



第三届全国土壤修复大会

The 3rd National Congress of Soil Remediation

摘要集

绿色低碳修复 净土洁食居安

Green and Low-Carbon Remediation for Clean Soil,
Safe Food and Secure Residence



编委会

骆永明	李广贺	涂勇	滕应	王玉军	吴龙华	王芳
刘五星	宋静	严卫东	涂晨	李秀华	胡鹏杰	李思敏
杜彦锴	石玲凤	刘么瑶	余贤安	李绍兵	李欣萌	

第三届全国土壤修复大会

摘要集

2023 年 11 月 5-8 日 南京

编委会：

骆永明，李广贺，涂 勇，滕 应，王玉军，吴龙华，
王 芳，刘五星，宋 静，严卫东，涂 晨，李秀华，胡
鹏杰，李思敏，杜彦锴，石玲凤，刘么瑶，余贤安，李
绍兵，李欣萌

前 言

土壤污染管控与修复已成为国家环境污染治理的重大需求。为打好我国土壤污染防治与净土攻坚战，加快提升国家土壤修复科技创新能力，促进土壤修复产业发展，服务乡村振兴、生态文明和美丽健康中国建设，中国科学院南京土壤研究所已分别于 2018 年和 2021 年在南京顺利主办了“第一、二届全国土壤修复大会”。大会期间，来自政、产、学、研、金的参会人员达千余人，进行了几十余场学术研讨及产品展览活动。会议的规模、水平、效果均创下了国内土壤环境科学与技术会议之最。

为了传承和发扬全国土壤修复大会的成果与精神，加强我国土壤环境与污染修复研究领域的新进展、新认识和新成果的系统交流，展示土壤修复行业的新材料、新技术、新仪器、新设备和新论著，促进我国土壤绿色低碳修复科技创新与产业化发展、科技成果转移转化和交流合作，将于 2023 年 11 月 5-8 日在江苏南京国际青年会议中心酒店召开第三届全国土壤修复大会。大会主题是“绿色低碳修复，净土洁食居安”。会议邀请国内科技界、企业界、管理部门的领导和知名专家学者出席会议并作报告。大会从基础研究、技术研发、材料开发、装备研造、工程应用、产业发展、政策管理等角度，设置了 23 个专题。本摘要集共收录摘要 225 篇，分专题和研究生论坛进行编排，基本涵盖了当前土壤环境与污染修复的各大研究方向。

非常感谢摘要的作者和所有参会人员的支持！因时间仓促，编写过程中难免遗漏或错误，敬请各位同仁批评指正。

骆永明

2023 年 11 月 4 日

会议组织机构

主办单位：中国科学院南京土壤研究所

中国土壤学会

江苏省环保集团有限公司

承办单位：

土壤与农业可持续发展国家重点实验室

土壤养分管理与污染修复国家工程研究中心

国民核生化灾害防护国家重点实验室

中国土壤学会土壤环境专业委员会

中国土壤学会土壤修复专业委员会

中国环境科学学会土壤与地下水环境专业委员会

中国物资再生协会土壤修复专业委员会

森特士兴环保科技有限公司

北京建工环境修复股份有限公司

中建八局环保科技有限公司

江苏省环境工程技术有限公司

中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心

中国土壤学会国际合作与交流工作委员会

中国土壤学会土壤工程专业委员会

中国土壤学会环境微塑料工作组

中国植物生理与植物分子生物学会植物修复生物学专业委员会

江苏省土壤学会

全球土壤修复网络-亚洲中心

协办单位：

江苏省生物技术协会

江苏省微生物学会

中关村众信土壤修复产业技术创新联盟

江苏大地益源环境修复有限公司

江苏盖亚环境科技股份有限公司

南京尚土生态环境有限公司

佛山市铁人环保科技有限公司

无锡西玖环保科技有限公司

北京高能时代环境技术股份有限公司

中科鼎实环境工程有限公司

《Eco-Environment & Health》期刊

《The Innovation》期刊

《The Innovation Geoscience》期刊

《Science of the Total Environment》期刊

《Environmental Technology & Innovation》期刊

《Soil & Environmental Health》期刊

中国科学院青年创新促进会南京土壤研究所小组

江苏满程千渠会展服务有限公司

赞助单位：

浙江卓锦环保科技股份有限公司

南京中荷寰宇环境科技有限公司

上海化工院环境工程有限公司

江苏隆昌化工有限公司

北京德严科技有限公司

上海胜丰环境能源科技有限公司

爱默里（河北）科技有限公司

南京水泽万物环保科技有限公司

郑州德森环境科技有限公司

南京卡文思检测技术有限公司

北京博诚立新环境科技股份有限公司

苏州佳谱科技有限公司

中船绿洲环保（南京）有限公司

江苏光质检测科技有限公司

永清环保股份有限公司

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司

北京金隅红树林环保技术有限责任公司

江苏国信协联生物科技（集团）有限公司

天津市之井科技有限公司

会议学术委员会

主任委员： 朱永官 院士

副主任委员：张佳宝 院士、朱利中 院士

委 员： 陶 澍 院士、邵明安 院士、吴丰昌 院士、张福锁 院士

沈其荣 院士、周 卫 院士、沈仁芳 研究员、方斌斌 教授级高工

颜晓元 研究员、李广贺 教授、骆永明 研究员

会议组织委员会

主任委员： 骆永明 研究员

副主任委员：

李广贺 教授、涂 勇 教授级高工、滕 应 研究员、王玉军 研究员

委 员：

吴龙华 研究员、王 芳 研究员、刘五星 研究员、宋 静 研究员

严卫东 副秘书长、刘 斌 高级会计师、涂 晨 副研究员

李秀华 六级职员、胡鹏杰 副研究员、赵克强 研究员

李书鹏 教授级高工、曲常胜 教授级高工、薛连友 高级工程师

叶 渊 高级工程师、黄相锋 高级工程师、朱勇兵 高级工程师

目 录

专题 1: 土壤与地下水中污染物分析新方法和新技术	
基于“生物传感-生物光谱”耦合的污染物风险预警与溯源技术.....	1
张大奕	1
The Effects of Copper and Salt-Induced Stress on the Rhizosphere of <i>Avicennia marina</i> and Rhizobacteria Community Structure: A gene high-throughput sequencing and metabolomics analysis	2
NkohJackson Nkoh, ShangChenjing	2
EDDS 对王草-印度梨形孢联合修复镉-铬污染土壤根际微生态及微生物调控的影响.....	4
张海洋, 张楷露、段亚丽, 孙晓燕, 林丽, 安千里, 朱治强, 李栋	4
遗留工业场地土壤汞污染的生态效应分析	5
曾玉萍, 张义, 郝芸芸, 刘玉荣	5
专题 2: 土壤复合污染过程与生态系统健康	
污水厂尾水灌溉稻田残留抗生素对稻米品质的影响及土壤中微生物污染特征 ...	6
徐圆, 郑小龙, 曹赵云, 林晓燕, 冯国忠, 严清	6
生物强化粪污堆肥中重金属-抗生素复合污染和抗性基因变化规律.....	7
王璨, 牛欢, 贾寅雪, 邱航, 李沛汉, 罗瑕, 江黎越, 邱忠平	7
专题 3: 土壤与地下水污染界面过程、暴露及生态健康效应	
氧四环素对稻田土壤铁砷形态转化的影响	8
全运平, 高娟	8
方解石与无机磷交互作用对铅镉化学活性的调控机制	9
肖琪, 杨世通	9
大气 CO₂ 浓度升高引起土壤铀的流失: 地带性差异及影响因素	10
王子艳, 汪彩琴, 张道勇, 潘响亮	10
同步辐射红外显微技术和 BL01B 线站在土壤环境领域的应用	12
周晓洁	12
冻融作用下团聚体周转对土壤中镉滞留和释放的影响机制	13
王全英	13
溶解有机物调控铬(氢)氧化物胶体团聚和沉积的分子尺度研究	14
金超, 朱世殊, 莫逸君, 罗雯丹, 肖子涵, 付毅, 仇荣亮	14
纳米矿物的形成和稳定性	16
胡焱弟	16
专题 4: 土壤与地下水污染时空演变、模拟模型与信息集成	
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	17

张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郜允兵	17
专题 5: 土壤污染物毒性毒理、风险评估与基准标准	
土壤污染生态风险评估方法及案例应用	18
赵丹, 吴畏达, 於方	18
纤毛虫的土壤污染修复潜力	20
陈瑛, 郑维彬, 侯森, 任南琪	20
我国场地土壤污染防治科技发展路线图及创新体系问卷调查	21
宋静, 黄贝童, 刘睿, 唐伟, 余海波, 晏井春	21
典型铈矿区表生环境中铈及伴生元素的地球化学研究	22
石陶然	22
草甘膦与敌草快对砖红壤土壤中微生物的复合毒性效应	23
谭华东, 何筱瑜, 梁悦夫, 武春媛	23
有机污染物在土壤中迁移转化的同位素示踪研究	24
李明, 钱毅光, 丁腾达, 李菊英	24
专题 6: 地质高背景区土壤污染成因与安全利用	
黑色岩系硒镉高背景区健康地质调查评价	26
汤奇峰, 刘久臣	26
地质高背景区土壤元素富集机理与生态风险识别	27
杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 夏学齐, 冯海艳	27
地质高背景稻田系统中砷镉的迁移转化规律及健康效应研究	28
孔淑琼, 易志豪, 魏夏国, 陈依依, 陈洁	28
广西岩溶地质高背景区土壤镉生态风险评价与防控	29
杨琼, 杨忠芳, 季峻峰, 张起钻, 余涛, 刘旭, 季文兵, 吴天生, 王磊 ..	29
砖红壤中铬的溶出和外源三价铬的氧化转化	30
施杨潇潇, 徐仁扣	30
基于地理探测器的土壤重金属空间分布及其影响因素与来源分析	31
孙思静, 董春雨, 张好, 杨海婵, 黄祖志, 韩宇, 张乃明, 包立	31
喀斯特地质高背景区土壤重金属富集特征与活化机制	32
刘意章, 王莹, 宁增平, 刘承帅	32
岩溶地质高背景值地区土壤中镉的生物有效性研究	33
文宇博, 李伟, 杨忠芳, 季峻峰	33
基于土壤标准适宜性评价与环境基准的黔西北 Cd 地质高背景区农用地精准管 理新思路	34
杨利玉, 吴攀, 杨文弢	34
专题 7: 土壤修复先进功能材料研发技术与应用	
基于环境风险和修复性能的生物炭生产工艺优化方法及其应用潜力	35
徐从斌, 孙天然	35

改性地质聚合物钝化修复重金属污染土壤性能与机理研究	37
贺攀阳, 辛楷能, 魏忠霖, 张晓民	37
自组装微生物-光催化耦联体系原位净化复合污染废水的过程和机制	39
王璨, 王宇, 马海涛, 邱航, 牛欢, 徐绯, 邱忠平	39
改性有机硅治理盐碱土壤的作用机理及应用	41
宋福如, 康莲薇, 曹子库	41
球磨改性零价铁生物炭复合材料修复受六价铬污染的土壤研究	42
郭鹏菲, 张金兰, 朱勇兵, 张婷婷	42
耕地保护与盐碱地改良创新思路和科学实践	43
雷晓东, 张剑宇	43
铁基纳米材料的定向调控及在水-土环境中的应用	45
曲建华	45
巯基单体插层层状双氢氧化物修复六价铬污染土壤研究	46
张立勋, 贺昉昕, 管运涛	46
新型煤基重金属钝化材料研发及其应用技术	49
黄占斌, 王颖南, 李春全, 马妍	49
铜同位素比值可以量化煤炭开采和燃烧对中国土壤中铜总浓度的贡献	50
任梦溪	50
专题 8: 土壤修复智能装备创制及应用	
利用合成生物技术以嗜盐菌为底盘建立耐盐生物修复平台	51
杨超	51
挥发性有机污染地块现场分析检测技术验证评价	52
尹惠林	52
双碳背景下热脱附技术装备的升级换代	53
肖超	53
基于新能源专用车辆的土壤与地下水污染全流程防控集成装备研发与应用	54
温玉霜	54
地下水污染 CT 扫描技术在地下水问题诊断上的应用	55
蔡易缙	55
专题 9: 农用地土壤污染管控与修复	
功能微生物驱动稻田土壤镉活化移除修复技术的研究	56
蒋慧丹, 邓燕, 陈希, 陈锦, 戴艳娇	56
HDXRF 法农田土壤镉砷测定结果准确度评价与精准校正模型构建	57
傅赵聪	57
微生物驱动稻田土壤镉活化移除及处理液净化回用技术研究	59
邓燕, 陈希, 刘宏伟, 刘学端, 蒋慧丹	59
近 20 年中国农田土壤重金属输入通量时空变化分析	60

马文玉, 潘瑜春, 孙在金, 刘昌华, 李晓岚, 徐笠, 郜允兵	60
微生物-腐殖酸-蛭石-海藻酸盐固定化生物复合材料强化 Cr(VI)污染土壤修复与 安全利用的策略研究	62
吴明慧, 王琪琪, 王璨, 曾奇璐, 李建鹏, 吴晗, 吴斌, 徐恒, 邱忠平 ..	62
基于质量平衡研究利用机器学习模型预测典型大气沉降区水稻籽粒镉含量	64
米雅竹; 周俊; 周静	64
盐碱农田土壤磷素有效性与面源污染的微生物调控	65
李哲	65
农田重金属污染修复的全生命周期评估: 方法构建与应用	66
金远亮, 刘承帅	66
土壤酸化作用下腐植酸-Fe(III)络合机制与氧化还原性能	67
唐舒婷, 汪彩琴, 潘响亮	67
基于低积累作物品种的污染耕地安全利用技术	69
廖晓勇, 王亮, 刘齐庆	69
两种景天镉积累特性差异对污染农田修复效率的影响	70
陈锦, 戴艳娇, 蒋慧丹, 邓燕, 聂阳阳	70
重金属污染土壤修复过程中铁锰氧化物作用与功能调控	71
卢涛, 王子威, 王宜, 段贤杰, 陈炜豪, 刘凡, 邱国红	71
水稻叶片和根系吸收大气沉降镉的同位素证据	72
周俊	72
镉污染农田小麦安全生产技术研究与难点解析	73
高岩	73
有机污染土壤绿色低碳热修复技术研究及应用	74
詹明秀, 张生东, 徐旭, 王进卿, 焦文涛	74
专题 10: 城市土壤-地下水污染管控与修复	
有机污染的定向环保生物修复技术	75
白鹤, 宋景鹏	75
高风险污染地块风险管控与协同修复关键技术研究与实践	76
沈婷婷	76
城市工业场地地下建筑结构对污染调查与修复管控的影响分析	77
潘澄, 张鸿嫔, 张宗文	77
热带沿河流域稻菜轮作系统中当前使用除草剂的多介质赋存	78
谭华东, 何筱瑜, 梁悦夫, 武春媛	78
专题 11: 矿区土壤-地下水污染管控与修复	
根际微生物-香根草在尾矿库生态治理中的互作机制	79
吴斌, 徐恒	79
FeOOH/ δ -MnO ₂ 介导下腐殖酸对贵州锑矿区黄壤中锑形态的影响	80

马雪, 朱霞萍	80
基于治理主体的中国煤炭资源型城市矿区环境治理模式研究——以平顶山市为例	81
李晓帆	81
专题 12: 油气田场地土壤-地下水污染管控与修复	
含油污泥生物预处理: 超声耦合生物表面活性剂的设备设计与试验研究	82
赵端, 李晨阳, 郭彩云, 于浩坤, 刘畅, 谭文捷, 桑义敏	82
专题 13: 军工特殊场地土壤-地下水污染管控与修复	
界面构造高效降解水中新型 PFAS 及机理研究	83
王宇辉, 赵文静, 张婷婷, 李尚焱	83
弹药销毁场地土壤重金属污染特征及影响因素	84
刘晓东, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 王诗雨, 计超, 张海阳	84
放射性核素污染土壤和地下水修复技术	85
朱勇兵, 赵三平, 郇正来, 聂果, 董彬	85
低温等离子体去除土壤及水中全氟化合物等卤代 POPs 研究	86
张晗, 朱大海, 高小婷, 战佳勋, 赵婧怡, 张茵茵, 刘亚男	86
放射性核素污染土壤和地下水修复技术	87
朱勇兵, 赵三平, 郇正来, 聂果, 董彬	87
军事场地蒸气入侵途径的风险评估研究	88
郭渊明	88
炸药污染土壤的生物修复	89
赵三平, 朱勇兵, 杨旭, 尹茂灵	89
专题 14: 堆填场和尾矿库土壤-地下水污染管控与修复	
三门峡市某铅厂遗留场地土壤重金属污染评价及来源解析研究	90
卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳, 张海涛	90
Investigation of waste alkali-activated cementing material using MSWI-fly ash and dravite as precursors	91
Ji-Rong Lana, Sun Yan, Ming-Feng Kai, Jian-Guo Dai, Hao-Bo Hou	91
专题 15: 电子垃圾拆解场地土壤-地下水污染管控与修复	
复苏促进因子强化多氯联苯厌氧脱氯降解	92
韩振, 谢梦琦, 苏晓梅	92
覆铜板分选残渣微生物提铜研究	93
周洪波	93
专题 16: 在产企业场地土壤-地下水污染管控与修复	
地下水循环井技术强化修复剂在低渗透含水层中的传输与累积	94
王 朋, 蒲生彦	94
生物反应墙技术原理和案例——一种绿色低碳修复和风险管控技术	95

庄健鸿, 陈波洋	95
农药化工类场地风险管控及修复案例分享	96
田平	96
国际污染土壤修复技术文献计量分析与未来发展趋势	97
李社锋	97
涉镉行业土壤污染数据挖掘方法初探	98
雷梅	98
专题 17: 工业聚集区场地土壤-地下水协同管控与修复	
利用合成生物学方法建立耐盐生物修复平台	99
赵婉婉, 熊威妮, 刘瑞华, 杨超	99
无锡某化工场地土壤和地下水污染风险管控工程案例	100
郜铭, 朱贤倩, 倪雨翔	100
场地地下水氯代烃微生物修复进展	101
曹利锋, 葛润蕾, 张芳	101
某冶炼厂旧址重金属污染土壤资源化技术研究及工程应用	102
苗进辉, 杨成锋, 万鑫斌	102
土壤洗脱减量技术的应用实践与若干思考	104
郭明达	104
污染土壤热脱附修复装备改进、性能提升及工程应用	105
周永贤	105
专题 18: 土壤与地下水中新污染物的污染特征、迁移转化与管控修复	
邻苯二甲酸二甲酯连续相演化对饱和多孔介质中共存全氟辛酸保留和传输的影响.....	106
王朋, 蒲生彦	106
多孔介质 PFAS 传输	107
吴睿	107
增塑剂对微生物燃料电池去除农业土壤抗生素和抗生素抗性基因的影响	108
汪慧香, 宋海亮	108
功能材料/微生物对 1,4-二噁烷协同降解机制	109
刘云	109
土壤中微塑料表面生态冠的形成机制及其环境效应	110
宋洋	110
白腐真菌对双酚 F 的降解研究	111
王剑桥, 肖唐付	111
腐植酸强化植物修复十溴联苯醚污染土壤效能研究	112
刘世宾, 唐建城, 蒲生彦	112
PFOS 浓度分析过程影响因素及优化	113

陈星,刘朝阳,宋昕,丁小燕,许昶,魏昌龙,唐志文	113
人工甜味剂对土壤典型无脊椎动物的毒性效应	114
林祥龙	114
微塑料介导下土壤-生物中阻燃剂累积特征与毒性机制	115
彭程,张卫,傅梦茹,韩艳娜	115
塑料际对病原微生物的载带效应及健康风险	116
彭楚,王姣,李梦曦,汪磊	116
不同农业活动下农田土壤微塑料赋存和积累特征研究	117
杨杰,涂晨,冯裕栋,李瑞杰,李连祯,向黎,骆永明	117
专题 19: 土壤污染源头防控与监督	
邯郸市工业区周边土壤重金属污染特征和来源解析	118
张海霞,蔡昂祖,赵泽霏	118
石化场地石油烃污染监测及分布研究	119
万伟,钱钦,马苏甜,韩旭,宋春侠,刘颖荣	119
土壤生态服务功能和价值评估	120
周颖	120
专题 20: 土壤生态环境损害鉴定评估技术方法、标准与实践	
某大型非法倾倒废液案件土壤环境损害鉴定评估技术方法实践研究	121
孙倩,赵丹,於方	121
土壤环境损害鉴定评估中工程修复目标的选取	122
王凯霖	122
基于 PMF 模型的重金属污染场地土壤损害基线确定方法研究	123
王宾	123
环境损害鉴定评估案例分析	124
段德超	124
专题 21: 工矿场地绿色低碳可持续修复与生态宜居景观再生	
污染场地可持续风险管控与再利用国际经验比较研究	125
郑晓笛,张琳琳,张心怡,叶晶,丁惠,江涛,王明睿	125
氰化物污染土壤修复工程环境足迹评估方法和案例研究	126
桑春晖,杨欣桐,张红振,肖萌,刘瑞平,孟藤藤,李香兰	126
专题 22: 土壤环境时空数据挖掘与智能管理	
基于多源公共大数据的区域企业用地污染识别与风险评估研究	127
江叶枫,史舟	127
我国在产企业土壤污染超标预测方法探索——以炼焦行业为例	128
雷梅	128
专题 23: 土壤绿色低碳修复政策法规、实践评估与产业发展	
厌氧脱卤菌剂 BS-1 与原位强化生物修复技术	129

陈波洋	129
研究生论坛	
历史碳质 Hg-Tl 采矿废石中铊的持久性富集及其高生态风险	130
赵凤其, 顾尚义, 李清光, 郭子栋, 张翔, 游桂连, 邓刚琴, 张天怡	130
微纳米塑料在陆地植物中粘附、吸收、易位和阻断的文献计量分析和系统综述	131
李洋, 赵林, 安毅, 秦莉, 乔治, 陈达颖, 李一晗, 耿宏志, 杨永奎	131
镉和铜复合污染对温室栽培胡萝卜的生理和遗传影响	132
安启睿, 郑娜, 候胜男, 孙思宇, 李肖乾, 王素静, 宋雪, 李鹏洋	132
石油烃降解基因的定量检测方法改进及其在陕北油田土壤污染研究中的应用	133
刘泽梁, 吴蔓莉	133
新型改性木耳菌棒生物炭凝胶球用于 Cd²⁺和 Pb²⁺复合污染修复	134
纪艺凝, 郑娜, 吴波, 安启睿, 李梓萌, 孙思宇, 张文慧, 李肖乾, 王素静	134
UV 老化微塑料与镉联合胁迫诱导蚯蚓的肠道毒性和代谢反应	135
陈昌成, 郑娜, 朱荟澄, 安启睿, 潘佳敏, 李肖乾, 纪艺凝, 李宁, 孙思宇	135
施硒能否控制作物中的汞含量? 汞固存机制的 Meta 分析与概述	136
陈洁菲, 郝尚妍, Gary Bañuelos, 周鑫斌	136
镉和铜混合物对根际土壤中抗生素抗性基因的影响	137
潘佳敏	137
伴矿景天重金属吸收与土壤中微量养分供应的关系: 基于全国大量土壤样本的盆栽试验	138
黄玉峰, 周嘉文, 黄永杰, 吴龙华	138
我国西南典型矿区污染土壤和沉积物中水分散性胶体态铊砷的潜在活化	139
杜彦铭, 胡鹏杰, 吴龙华	139
生菜对不同锌矿颗粒中细颗粒态镉锌的吸收性研究	140
曹心妍, 李欣阳, 吴龙华	140
土壤中分离的红球菌 NJF-7 降解低氟代烷烃的研究	141
晏蒙, 曾军	141
渤海焦油球的源识别及降解命运研究	142
张紫璇, 王传远	142
枯草芽孢杆菌 WX 对铅离子吸附机制的研究	143
王旭, 徐微, 李佳怡, 陆玉玲, 丁俊美	143
生物炭材料对土壤中炸药污染的修复机理研究	144
赖成旭, 郇正来, 董彬, 朱勇兵, 钟俊波	144

基于多目标决策方法改进 LCA 的污染场地修复技术比选研究.....	145
王顺扬	145
动态地球化学模型预测超积累植物伴矿景天对镉锌的富集	146
李思敏, 顾雪元, 周嘉文, 吴龙华, Peter Christie	146
氨基硅烷改性凹凸棒石的制备及其对 Cd^{2+} 的吸附性能研究	147
邱炜, 骆永明	147
碱性富硅复合改良剂在镉污染稻田安全利用中的作用效果与机理	148
王亮, 刘齐庆, 廖晓勇	148
铅污染农田修复后土壤环境容量时空演变及风险评价	149
周迪, 王梅, 高学振, 温嘉霖, 张情亚, 陆君, 周东美	149
不同水化学条件和多离子竞争竞争体系下重金属溶质运移的热力学-动力学耦合 模型研究	150
赵晓鹏, 顾雪元	150
固废协同作用在矿山采空区环境治理中的应用	151
李克新	151
灵泉闭坑露天煤矿土壤生态改良	152
刘予希, 朱雪强, 韩晓雨, 李昂	152
利用城市污泥改良退化红壤的效果研究	153
刘志宗, 张乃明	153
同位素示踪大气沉降镉的水稻富集过程	154
夏睿智, 周俊, 周静	154
含砷毒剂污染土壤中砷的环境行为研究	155
郇正来, 张言, 赵三平, 朱勇兵	155
云南某铅锌矿区耕地土壤重金属污染评价及来源解析	156
陈文, 张乃明	156
灭菌和未灭菌猪粪施用对水培生菜内生菌和抗生素抗性基因的影响	157
豆庆圆, 王芳	157
高温活化磷尾矿钝化矿区污染土壤中阳离子态重金属研究	158
周旺旺, 刘意章, 刘承帅	158
污染土壤不同深度下 PAHs 的迁移分布及微生物群落响应的研究	159
李尊, 王莹莹	159
冶金废渣基钝化剂对 Cd 在土壤中迁移的影响	160
宋思源, 王倩, 刘思琪, 黄珊, 孙晓彤, 崔雪莲, 朱熙	160
肥皂草促进土壤中苯并[a]芘降解: 肥皂草和功能微生物群落的作用	161
姚丹丹, 王宁, 代威, 刘洋, 田坤, 王辉, 刘云	161
草酸改性铁炭材料强化修复六价铬污染场地效果及机理研究	162
谢莉鸿, 李尚焱, 张婷婷	162

地下水生物修复智能控制系统研究与开发	164
孙同, 李晨阳, 何理	164
小分子有机酸对稻田土壤自由基过程的影响及机制探究	165
王艺轩, 陈宁, 周东美	165
复合环境材料对油泥渣土结构和性状改良及植物生长影响研究	166
冯俊义, 李红东, 邓博文, 汪的华, 黄占斌	166
化工园区土壤与地下水环境风险智慧管控应用研究	167
任富天, 梅丹兵, 黄蕾	167
一步水热合成新型芬顿催化剂促进碳铁之间电子转移	168
程六龙, 朱雁平, 仇荣亮	168
基于市政管网的蒸气入侵优先途径的场地调查和风险评估研究	169
许馨怡	169
巯基黏土矿物材料钝化修复镉污染土壤的持效性	170
钟晓琴, 刘京广, 朱霞萍	170
铁锰氧化物对土壤中锑形态的影响研究	171
刘玉蛟 崔婷 朱霞萍	171
弹药销毁场地土壤中铅的生物可利用性及相对生物有效性研究	172
张慧君, 王诗雨, 历红波, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 薛玉璐, 刘晓东	172
一种用于去除废水中 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的新型磷矿-磁性生物炭: 表征、性能和机制	173
陈勇林, 杨文弢, 吴攀	173
还原氧化石墨烯对水稻土中 BDE99 及 3,4-二氯苯胺同步消减的刺激效果及机制	174
孙毅, 滕应, 李然, 王霞, 赵玲	174
分子选择性在天然有机物与 Fe-Cr 共沉淀中作用的重要性	175
罗雯丹, 朱世殊, 金超, 仇荣亮	175
微生物诱导碳酸盐沉淀技术强化生物炭固定铅的效果及机理研究	177
胡慧聪, 唐朝生, 沈征涛, 泮晓华, 牟文, 吕超, 范晓亮	177
纳米铁的多重调控及对有机物的高效降解	179
曲建华, 李卓然, 张颖	179
$Fe_3O_4@MnO_2$ 活化过硫酸盐/亚硫酸盐降解地下水中二甲双胍的研究	180
江吟莹, 余江	180
探索人工湿地在有害水华干扰下的恢复能力: 微生物响应机制的研究	181
张拓实, 郭梦冉, 孟祥伟, 侯宁, 赵昕悦	181
大气湿沉降镉在上海青叶片上的积累及微界面迁移机制	182
杨佳, 程学宇, 曹雪莹, 谭长银	182
生物炭负载铁锰对污染土壤中砷修复及酶活性的协同作用	183

张理群	183
淮南矿业城市土壤微塑料污染特征：空间分布及影响因素	184
胡洁	184
有机氯农药污染土壤中病毒与细菌群落通过互补装配过程合作生存	185
苑书建，孙明明，郑晓璇，胡锋，叶茂	185
农药污染土壤病毒与宿主细菌相互作用	186
张文，郑晓璇，孙明明，叶茂	186
噬菌体协调土壤细菌群落提高有机氯农药污染土壤多功能性	187
赵铎凯，吴世茂，郑晓璇，孙明明，叶茂	187
基于淤背工程的土壤-黄河泥沙界面层成土机理	188
张子璇，胡振琪	188
铅锌冶炼场地土壤重金属污染特征及稳定化修复研究	189
李楚璇	189
生物炭与磷肥配施对镉污染土壤中小白菜生长的影响	190
彭欣蕾，胡红青	190
蚯蚓有机污染物敏感性与土壤污染物降解的定量关系	191
钱旻，晁会珍，孙明明，叶茂	191
中国军事污染土壤细菌群落特征及代谢潜能	192
姚柯渝，王风贺，叶茂	192
某废弃铅锌矿土壤和地下水中金属的来源识别及迁移规趋	193
黄驰岳，郭朝晖，李天爽，徐锐，彭驰	193
内生细菌对蓖麻生长及富集土壤铜镉的影响	194
李倩，胡红青	194
顾及样点微域空间变异性的多穴位黑土层厚度快速勘察与预测方法研究	195
高张，马利霞，于东升，胡文友，李德成，高磊，刘峰，张久明，姜军， 匡恩俊，王鑫，宋洁，王桐，王昌昆，迟凤琴，赵玉国	195
冶炼场地土壤-地下水重金属污染特征及可视化研究	196
唐璐	196
蚯蚓堆肥中噬菌体丰富功能基因含量并促进土壤中农药的降解	197
晁会珍，Jose Luis Balcazar，吴云玲，蔡安娟，叶茂，孙明明，胡锋	197
土壤中弱酸可溶态重金属溶出伏安快速检测关键技术与装备研究	198
叶文帅，刘宁，刘刚	198
不同南瓜品种对六氟环氧丙烷二聚体累积特性研究	199
徐凯然，林庆祺，仇荣亮	199
绿色可持续视角下大型复杂污染场地修复环境影响评估与方案决策	200
肖萌，李香兰	200
基于机器学习的地质高背景烟草 Cd 生物累积能力预测及驱动因素分析	201

荀子论, 齐猛, 赵文浩, 孙怡, 屈雅静, 马瑾, 刘承帅	201
以种子发芽指数为评价指标的畜禽粪便兼性堆肥植物毒性	203
孔艺霖, 王国英, 李国学, 袁京	203
兼性堆肥过程中腐殖化、病原菌和细菌群落的时间演替和空间异质性	205
杨燕, 孔艺霖, 李国学, 袁京	205
铬污染土壤中病毒功能装配随机性促进宿主功能冗余且走向确定性	206
刘舒月, 时玉, 孙明明, 黄丹, 叶茂	206
含能化合物污染土壤的植物-微生物修复技术研究	207
杨旭, 赵三平, 习海玲	207
微生物胶囊负载纳米羟基磷灰石强化去除 Cr(VI)的机制研究	208
单冰, 郝瑞霞	208
基于风险降低和生态系统服务的矿区环境治理中利益相关方的收益动态变化	209
杨军, 闫云仙, 杨俊兴, 王凌青, 万小铭, 雷梅, 郑华, 廖晓勇, 陈同斌	209
热传导加热耦合原位化学氧化修复有机污染场地的可持续定量评估	211
杨宗帅, 魏昌龙, 宋昕	211
磁性生物质对水土中镉的吸附去除机制及其应用研究	212
王衡, 易筱筠, 党志	212
碳酸盐岩地质背景土壤中铈的形态提取方法研究	213
李柏樟, 吴攀, 李玲	213
长期除草剂残留对土壤多功能性和土壤微生物群落的影响	214
王宏哲, 任文杰, 徐勇峰, 王霞, 孙毅, 胡文博, 马军, 陈森森, 戴士祥, 滕应	214
保水剂对重金属镉离子吸附特征及其互作效应研究	215
蔡子明, 吴美玲, 詹锋, 黄占斌	215
新型有机-无机调理剂对酸化土壤改良效果研究	216
吴美玲, 王安, 黄占斌, 李忠元, 黄相锋	216
地聚合物-纤维屏障的构建及铅镉污染土壤的修复	217
向愉唯, 蓝际荣, 董祎挈, 侯浩波	217
典型喀斯特地质高背景区土壤剖面镉的迁移富集机制与形态转化过程研究	218
罗超, 龙健, 刘承帅, 高庭, 宁增平, 宋长顺, 刘意章	218
网格尺度下典型岩溶峰丛洼地土壤肥力评价及权衡/协同关系	219
马国斌, 覃星铭	219
稻田上覆水的光化学表征:反应活性中间体的形成及对 As(III)的氧化	220
曾宇, 张明洋, 方国东	220
铜绿假单胞菌中 Lao 系统对长链醇的降解机制研究	221

苏小康, 马克·巴特兰姆	221
高效耐铬 <i>Bacillus mobilis</i> CR3 对 Cr(VI) 的去除机制	222
叶宇博, 郝瑞霞, 单冰, 张君曼, 鲁安怀	222
寒区重金属污染土壤修复稳定化材料优选及抗冻效能分析	223
王一鹏, 王琨, 赵庆良	223
模拟镉沉降对伴矿景天镉积累及生理活性的影响	224
黄硕霏, 谭长银, 曹雪莹, 杨佳, 邢倩文, 涂晨	224
场地有机氯化物对微生物群落结构的塑造作用	225
刘雨, 王芳, 蒋新	225
施用沼渣或沼渣生物炭对菜地土壤蔬菜产量及 N ₂ O 排放的影响研究	226
欧阳豪, 钟磊	226
中国南方农田土壤中重金属的空间模式、来源解析和以来源为导向的健康风险 量化: 综合使用 PMF 和统计模型	227
何翔宇, 胡碧峰, 张鹏博, 张杨珠	227
生物炭载纳米零价铁活化过硫酸盐降解土壤中萘实验研究	228
黄孔月, 张淇翔, 冯启言, 周来, 朱雪强	228
生物质诱导含铁矿物水热还原相变及其修复农田有机污染的机制	229
刘婧怡, 朱雁平, 仇荣亮	229
铁尾矿的 As 脱除处理及矿物质负载碳材料研制	230
卢卓烨, 朱雁平, 仇荣亮	230
摩西斗管囊霉对不同粒径土壤铅 (Pb) 累积和形态转化的影响	231
黄贝童, 杨玉荣, 李振新	231
机器学习模拟氨功能化磁性腐植酸纳米颗粒去除和回收铅离子	232
杨求文, 申保收	232
微生物絮体庇护噬菌体反哺宿主群落抵御水力胁迫的稳态机制	233
吴雅茹, 祁慧鹁, 吴云玲, 孙明明	233
BC-HA 复合修复碱镉污染农田及镉胁迫下小麦根系代谢物变化的田间试验	234
孙国怀, 郑旭, 岳皓钰, 张双婷, 李籽仪, 陈赓, Ram Proshad, 赵转军	234
碳球负载纳米零价铁活化过硫酸盐去除水中恩诺沙星的研究	235
赵乐依, 刘健, 路平, 朱雪强	235
地下水中纳米颗粒的原位形成及其环境效应	236
郭元杰, 王朋	236
多环芳烃与粘土矿物界面反应过程中持久性自由基的产生和稳定	237
张丽, 王朋	237
天然和人为源 DOM 对多孔介质中 NAPL 残余相迁移行为的影响研究	238
李尚燕, 王朋	238

不同聚集形式铁锰矿物颗粒对多孔介质中离子型污染物传输的影响	239
梅诗雨, 王朋	239
西南地质高背景区土壤—作物—农家肥系统镉循环	240
张晋龙, 雷梅	240
伴矿景天对重度镉污染农田土壤的吸取修复效果:八公顷的田间试验.....	241
王雨阳, 周通, 王文勇, 赵婕, 李柱, 葛延妍, 王朝阳, 吴龙华, Peter Christie	241
代谢组学分析揭示不同基因型水稻对氯代有机污染物的代谢调控机制	242
武桃旗, 徐艳	242
黔西北耕地重金属空间分布、健康风险及环境阈值	243
杨利玉, 吴攀, 杨文弢	243

基于“生物传感-生物光谱”耦合的污染物风险预警与溯源技术

张大奕*

吉林大学新能源与环境学院

摘要: 人类活动向环境排放了大量污染物,造成了显著的环境生态风险,精准刻画污染物毒性机理,准确识别污染物生态毒性水平,是系统和科学评估污染物生态毒性的重要内容。实际环境中污染物大多以复合形式存在,污染物类型和来源不同,污染物之间复杂的相互作用导致生态毒性具有协同或拮抗效应;传统污染物生态毒性评估技术受限于操作复杂性、检测成本、检测周期和应用局限性,难以满足生态风险评估过程对污染物生态毒性快速检测的技术需求,亟需开发新型生态毒性快速表征和解析方法。研究开发了“生物传感-生物光谱”耦合的复合污染物生态毒性表征方法,建立了多种典型污染物的生态毒性剂量-效应关系,构建了多种污染物毒性响应的生物光谱数据库,识别了不同暴露剂量条件下的生物光谱指纹特征和毒性机制,揭示了复合污染条件下生态毒性的协同或拮抗效应,探索了典型生物光谱特征峰与毒性机制之间的关系,研发了生态毒性定量评估和毒性机制反演算法,实现了复合污染毒性来源的高精度解析,准确率大于 88.5%。本研究开发的技术可以准确评估复合污染生态毒性水平、精准追溯毒性来源、有效识别污染物相互作用机制、深度解析复合污染毒性来源,是一种具有较大潜力的污染物风险预警与溯源分析技术手段。

关键字: 生物传感器; 风险评估; 生态毒性; 协同作用; 拮抗作用

作者简介: 张大奕,博士,教授,吉林大学新能源与环境学院。长期从事污染物检测技术开发、风险监控设备研制和环境风险形成机制探索等方面的研究工作,主持和参与国家千人计划青年项目、国家重点研发计划、国家自然科学基金重大项目等国家级项目 14 项,开发了“生物传感-生物光谱”耦合的污染物生态毒性快速检测方法,打破了污染物在线监测设备关键零部件的国际垄断,研制了智能一体化环境风险在线监控设备,揭示了典型复合污染物的多介质输移机制和生态风险形成原理,发表 SCI 收录论文 191 篇,授权国家发明专利 9 项,软件著作权 6 项。

E-mail: zhangdayi@tsinghua.org.cn

The Effects of Copper and Salt-Induced Stress on the Rhizosphere of *Avicenna marina* and Rhizobacteria Community Structure: A gene high-throughput sequencing and metabolomics analysis

NkohJackson Nkoh, ShangChenjing

Shenzhen University

Introduction: The presence of rhizobacteria in soils protects plants against pathogens, promotes growth, decreases pollutant uptake, and increases soil fertility. However, the role of rhizobacteria in the mitigation of stress in the mangrove ecosystem remains elusive. Thus, this study investigates the effects of salinity and copper-induced stress on rhizobacterial community structure and growth of *Avicennia marina* in a 4-year semi-natural experimental setup.

Method: Pot experiments were set up to investigate the growth of *A. marina* and changes in the rhizosphere bacterial community structure under salt and copper stress. The treatments included a salt stress group (S5Cu0, S15Cu0, and S25Cu0) and a copper stress group (S15Cu200, S15Cu400, and S25Cu400); where S5, S15, and S25 represent 5, 15, and 25‰ salt levels and Cu0, Cu200, and C400 represent 0, 200, and 400 mg L⁻¹ Cu, respectively.

Results and discussion: The results showed that dual stress in S25Cu400 significantly reduced the concentration of available Cu by 60.08% compared to S15Cu400, indicating that high salt concentration mitigated Cu bioavailability and possible toxicity to rhizobacteria and *A. marina*. It was observed that salt stress decreased the concentrations of L-glutamic acid and L-proline while copper stress decreased the concentrations of L-glutamate, L-proline, and p-coumaroylbutyramine. In S15Cu200 for example, the concentrations of L-glutamate, L-proline, and p-coumaroylbutyramine were significantly decreased to 72.19%, 90.44%, and 91.80%, respectively, while creatine was increased to 1.1005-fold of S15Cu0. This suggests that under salt and Cu stress, the rhizosphere microbial community maintained cellular integrity through osmoprotectants, intracellular homeostasis using metabolites such as proline, and improved intracellular utilization of organic N and energy through arginine biosynthesis with alanine, aspartate, and glutamate metabolism. The regulation of these metabolic pathways enhanced antioxidant defenses, nutrient recycling, accumulation of osmoprotectants, stability of plasma membrane, and chelation of Cu, thereby improving the stress tolerance of the microbial community and *A. marina*. Furthermore, the sequencing results revealed that the rhizobacterial community was changed significantly and dominated by Proteobacteria, Chloroflexi, Actinobacteriota, and Firmicutes, with the relative abundance varying between samples. Analyzing the rhizosphere soil in S25Cu400 revealed seven culturable novel bacteria strains identified as G21 (*Pontibacillus* sp.), G26 (*Sphingomicrobium* sp.), G29 (*Jiella* sp.), R5 (*Acuticoccus* sp.), R6 (*Fulvimarina* sp.), R9 (*Fulvimarina* sp.), and R10 (*Jiella* sp.), with 97.59%,

97.00%, 97.92%, 96.16%, 97.59%, and 98.25% similarity to the nearest related strains, respectively. These bacteria produced 14 secondary metabolites with the ability to inhibit the mobility of *Aeromonas hydrophila* and *Pst* pathogenic bacteria. Since the response mechanisms were unbalanced between treatments, it resulted in differential growth trends for *A. marina* in order of S15Cu200 > S15Cu0 > S25Cu0 > S5Cu0 > S25Cu400 > S15Cu400 after 4-y. Conclusion: Rhizobacteria in the rhizosphere of *A. marina* regulate soil processes to mitigate salt and heavy metal-induced stress and secrete secondary metabolites capable of inhibiting the activities of pathogenic microorganisms, thereby promoting the growth of *A. marina*.

关键词: Rhizobacteria; environmental pollution; Heavy metal pollution; soil degradation; food security; rhizosphere; nutrient availability; salinity; Salinity Tolerance; gene high-throughput sequencing; metabolome characterization; soil enzyme; Mangrov
E-mail: nkohjackson@szu.edu.cn

EDDS 对王草-印度梨形孢联合修复镉-铬污染土壤根际微生态及微生物调控的影响

张海祥¹, 张楷露¹、段亚丽¹, 孙晓燕¹, 林丽², 安千里³, 朱治强^{1*}, 李栋^{1,4,*}

1 海南大学热带农林学院, 海口 570228; 2 广西农业科学院甘蔗研究所, 南宁 53007; 3 农业部作物病原昆虫分子生物学重点开放实验室, 浙江大学农业与生物技术学院生物技术研究所, 杭州 310000; 4 海口市环境毒理学重点实验室/南海海洋资源利用生态环境修复中心实验室/海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海南大学, 海口 570228

摘要: 土壤重金属复合污染对农业生产和人类健康的负面影响日益严重。绿色螯合剂和微生物的应用已成为提高植物修复效率的强化措施。本研究采用高效液相色谱、Biolog 生态板、荧光定量 qPCR 和高通量测序等先进方法, 剖析了王草根系分泌物组成、土壤微生物碳源利用率、关键基因表达和微生物群落结构的变化。[S, S]-乙二胺二琥珀酸 (EDDS) 的添加可为王草-印度梨形孢体系维持良好的根际生态环境, 致使土壤 pH 值降低, 刺激琥珀酸和富马酸的分泌, 增强氨基酸和碳水化合物的碳源代谢活性, 提高王草生物量和 Cd/Cr 的生物有效性。此外, 土壤异化铁还原菌的表达显著上调, 根际真菌群落 (子囊菌门: 45.8%, 罗兹菌门: 16.7%) 的丰度显著增加, 以调控耐受微生物优势菌群的比例, 从而显著增加土壤 Cd/Cr 的去除率 (Cd: 23.4%, Cr: 18.7%)。本研究为螯合剂辅助植物-微生物联合修复重金属复合污染土壤提供了绿色可持续的技术方案。

关键词: 重金属; EDDS; 印度梨形孢菌; 王草; 有机酸

作者简介: 朱治强, 海南大学博士生导师。

E-mail: zhuzhiq8@163.com

遗留工业场地土壤汞污染的生态效应分析

曾玉萍, 张义, 郝芸芸, 刘玉荣*

华中农业大学资源与环境学院

摘要: 汞 (Hg) 作为催化剂应用于聚氯乙烯 (PVC) 生产, 导致其在工业场地周边土壤长期积累。土壤中积累的 Hg 会对微生物产生影响, 并且能在一定条件下被微生物转化为毒性更强的甲基汞 (MeHg)。然而, 场地周边土壤 Hg 污染对微生物的影响及其转化尚不清楚。基于此, 本研究以武汉市某遗留 PVC 厂周边土壤为研究对象, 分析了 Hg 污染状况及微生物对其响应特征, 并通过微宇宙培养探究环境条件变化对 Hg 甲基化的影响。结果发现, 该遗留 PVC 厂土壤 Hg 污染呈点源分布特征, 场地周边土壤中 96% 的位点 Hg 含量超标, 其含量范围为 0.05~262.54 mg kg⁻¹, 最大高出背景值 3000 余倍。土壤总汞 (THg) 含量与细菌丰富度呈负相关并显著影响了细菌群落结构。淹水和输入碳源后, 土壤汞甲基化微生物丰度显著增加, 使得土壤 MeHg 含量显著升高; 而仅淹水处理对土壤汞甲基化微生物丰度无影响, 且高 Hg 污染土壤中 MeHg 增加量更高, 但 MeHg 转化率相对较低; 而地杆菌科 Geobacteraceae 作为最主要 Hg 甲基化微生物, 其相对丰度与土壤 MeHg 呈显著正相关关系。此外, 某些非 Hg 甲基化微生物相对丰度与土壤 MeHg 也呈显著相关关系。本研究明确了 PVC 生产对场地周边土壤的 Hg 污染状况及 Hg 污染下的生态效应, 揭示了土壤环境变化条件下 Hg 转化为 MeHg 的微生物机制, 为全球变化背景下工业场地污染修复提供了可靠的理论基础。

关键词: 汞污染; 甲基汞; 微生物; 工业场地; 生态效应

作者简介: 刘玉荣, 华中农业大学资源与环境学院, 教授, 汞的微生物转化及生态效应。

E-mail: yupingzeng0422@163.com

污水厂尾水灌溉稻田残留抗生素对稻米品质的影响及土壤中微生物污染特征

徐圆, 郑小龙, 曹赵云, 林晓燕, 冯国忠, 严清

中国水稻研究所

摘要: 在现代工业化和城市化的背景下, 水资源的紧缺和污染问题已经成为一个全球性的问题。近年来我国的水资源量持续减少, 农业作为用水大户, 占总用水量的比例一直维持在60%以上, 现阶段对农业节水和高效用水的要求更加迫切, 再生水回用于农业灌溉是缓解水资源缺乏这一问题的有效途径, 然而, 再生水用于稻田灌溉时的微生物污染情况, 包括抗生素耐药基因(Antibiotic resistance genes, ARGs)、毒力因子(Virulence factors, VFs)和人类细菌病原体(Human bacterial pathogens, HBPs), 在灌溉的稻田土壤中尚不清楚。本研究基于宏基因组学分析对污水厂尾水长期灌溉稻田中稻田土的抗生素抗性基因组、VFs 和 HBPs 进行了系统的分析研究, 结果表明, 尾水中残留抗生素的存在通过增加 ARGs 的总量和丰度来影响抗生素抗性基因组; 此外, 实验分析结果发现 *sul1* 可以作为评估 ARG 污染的潜在风险指标。VFs、核心 HBP 丰度和危险 HBPs 不受污水厂尾水灌溉的影响。ARGs-HBPs 和 ARGs- VFs 的良好共存模式表明存在耐药 HBPs。网络分析结果显示, 携带 ARGs 的 *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium marinum*, *Bordetella pertussis*, *Staphylococcus aureus*, 与 *Pseudomonas aeruginosa* 可被列为高危 HBPs。此外, 分析了尾水灌溉对水稻生长及稻谷品质特征的相应变化, 结果表明残余抗生素在水稻根茎及水稻土壤中有积累, 在稻谷颗粒中无残留, 水稻植株能通过保持正常的光合作用和增加抗氧化防御能力抵御抗生素的胁迫。当尾水中抗生素浓度低于 100 $\mu\text{g/L}$ 时, 尾水灌溉水稻对水稻生长和稻谷品质没有不利影响, 而实际污水厂尾水中抗生素含量远低于 100 $\mu\text{g/L}$ 。本研究首次研究了长期污水厂尾水灌溉对水稻土 VFs 和 HBPs 的响应。该研究结果对于污水厂尾水回灌稻田的推广应用及相应的粮食安全生产具有重要的理论与实践指导意义, 也为城市污水厂尾水的安全利用提供了科学依据。

关键词: 尾水灌溉; 抗生素抗性基因 (ARGs); 毒力因子(VFs); 人类细菌性病原体 (HBPs); 稻谷品质响应

作者简介: 严清, 中国水稻研究所, 副研究员, 硕士研究生导师。主要从事痕量污染物在环境中的迁移转化及控制技术、水与土壤环境生态修复等方面的研究。先后主持完成国家自然科学基金、多项省自然科学基金、中央高校基本科研业务费等多项科研项目, 参与国家“十一五”和“十二五”科技支撑计划、国家水专项、国家重点研发计划等多项重大研究和示范项目, 合作完成了多项相关的科研与环境修复工程项目。近五年来, 以第一作者或通讯作者在 *Water Research*, *Journal of Hazardous Materials*, *Science of the Total Environment*, *Chemosphere* 等国内外期刊发表论文 20 余篇, 获权中国发明专利 3 项

E-mail: qyan2005@hotmail.com

生物强化粪污堆肥中重金属-抗生素复合污染和抗性基因变化规律

王璨，牛欢，贾寅雪，邱航，李沛汉，罗瑕，江黎越，邱忠平

西南交通大学生命科学与工程

摘要：养殖业生产中大量使用金属添加剂和抗生素以促进牲畜生长、防治感染疾病，绝大部分的重金属和抗生素难以经动物机体代谢而排除体外。受污染畜禽粪便在农业环境中作为有机肥大量施用，带来严峻的农田土壤复合污染挑战，引发的抗性基因富集更引起广泛关注。团队前期中研发了基于促腐、保氮功能菌的微生物复合菌剂，研究了其在鸡粪、猪粪堆肥中的最适条件，并验证了其对堆肥进程的促进和对堆肥质量的提升作用。本研究中以重金属和抗生素复合污染猪粪为堆肥物料，研究其在复合菌剂强化下的堆肥过程，分析其间重金属形态迁移转化过程和抗生素降解效率，剖析群落结构演替和抗性水平消长趋势，以探讨生物强化下复合污染物和抗性基因变化规律。复合菌剂强化下，堆肥高温期有效延长，物料中氮素含量和 C/N 显著下降。与此同时，Zn、Cu、Cd 等重金属有效态显著下降，四环素等抗生素残余量也较对照组显著降低。此外，生物强化下，物料群落结构较对照组发生显著变化，假单胞菌、芽胞杆菌、棒状杆菌等相对丰度较对照组显著提升，且 *copA*、*czcA* 等重金属抗性基因，*tetC*、*tetG* 等抗生素抗性基因和可移动基因元件 (*intl1*) 也有明显增长。结果表明，生物强化堆肥在降解转化污染物的同时可有效调节微生物代谢，然而污染物消减钝化过程中，抗性基因特别是多重耐药基因呈显著富集态势，需要在未来研究中开展针对性调控，以消减抗性基因扩散风险。本研究为污染养殖废物堆肥处理和抗性基因水平转移行为研究提供新的理论基础和技术支撑。

关键词： 重金属-抗生素复合污染；养殖粪污堆肥；生物强化；污染物降解转化；抗性基因

作者简介： 王璨，理学博士，西南交通大学生命科学与工程学院副教授，主要从事环境微生物学领域研究，基于微生物技术，多学科交叉进行污染治理与修复。主持四川省科技项目 2 项、中央高校科技项目 2 项、博士后基金和国重课题各 1 项，参与了团队的国家重点研发计划、国家 863、自然科学基金研究工作。先后发表 SCI 论文 30 余篇 (H 因子 17)，申请专利多项。

E-mail: wangcan@swjtu.edu.cn

氧四环素对稻田土壤铁砷形态转化的影响

Effects of oxytetracycline on the transformation of iron and arsenic in paddy soil

全运平^{1,2}, 高娟^{1,2}

1 中国科学院大学南京学院; 2 中国科学院南京土壤研究所

摘要: 稻田土壤中通常发现抗生素和砷污染同时存在, 为研究这类复合污染的相互作用, 选取湖南省湘潭市某稻田土壤进行微宇宙培养实验。通过模拟稻田淹水-排干过程, 探究氧四环素(OTC)在此过程中对铁砷氧化还原转化的影响。在淹水培养阶段, OTC 能够促进土壤铁矿物的还原, 使得溶解态、可交换态和吸附态/弱结晶型铁矿物态 Fe(II)含量显著增加, 因此在排干阶段能生成更多的 $\cdot\text{OH}$ 自由基, 促进溶解态 As(III)的氧化。OTC 对 Fe(III)具有络合和还原作用, 能够促进土壤含铁物质的还原; 同时, 作为一种广谱的抗菌剂, OTC 的选择作用提高了异化铁还原菌的相对丰度, 同样促进铁矿物的还原溶解。此外在淹水阶段, OTC 作用下硫酸盐还原菌相对丰度增加, 这使得硫化物结合态 As 的生成量增加, 因而溶解态 As 含量降低。总的来讲, OTC 在淹水阶段会促进土壤含铁物质的还原溶解, 但能够通过提高砷硫化物的生成量减少 As 的溶出; 在排干阶段则有利于生成更多的 $\cdot\text{OH}$, 将溶解态 As(III)快速氧化。这能够降低水稻吸收和转运 As 的风险。

关键词: 抗生素; 无机砷; 复合污染; 水稻土; 活性氧物种

作者简介: 高娟, 女, 博士, 江苏南通人, 研究员, 中科院研究员, 主要研究新型有机污染物在土壤中的迁移转化规律、开发高效的电化学氧化方法和技术去除土壤有机污染物; 原位解析土壤-地下水中有有机污染物分布及土壤矿物界面反应过程。研究成果为阻控和修复土壤-地下水中有有机污染提供了理论基础和技术支持。1997 年于南开大学环境科学系获学士学位; 2000 年于中科院昆明植物所植物化学专业获硕士学位; 2007 年于美国威斯康辛大学-麦迪逊校区土壤科学系获博士学位; 2007 年至 2012 年在美国密歇根州立大学土壤与作物系从事博士后工作, 2012 年后回中国科学院南京土壤研究所任研究员。目前已在 Environ. Sci. Technol. 和 Water Res. 等杂志发表相关论文 100 余篇, 授权发明专利 5 项, 主编专著 1 部, 荣获江苏省科学技术进步二等奖和中国土壤学会科学技术一等奖。

E-mail: juangao@issas.ac.cn

方解石与无机磷交互作用对铅镉化学活性的调控机制

Response mechanisms of lead and cadmium chemical activities to the interaction
between calcite and phosphate

肖琪, 杨世通*

西安交通大学 人居环境与建筑工程学院

摘要: 壤重金属污染生态风险决定于其毒性参数、污染程度和生物有效性等。潜在生态风险指数(PERI: potential ecological risk index)已广泛用于土壤重金属污染潜在生态风险评价。本研究基于上地壳、土壤、淡水、维管植物、人体中的元素丰度, 参照瑞典学者 Håkanson 的方法, 估算了针对土壤重金属污染生态风险评价的毒性效应因子。结果表明 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Sb、Zn 的毒性效应因子分别为 15、30、12、10、6、40、7、7、15、1。采用富集因子法评价土壤重金属污染程度, 并结合毒性效应因子和富集因子提出了上述 10 种重金属土壤污染潜在生态风险评价的分级体系: $PERI < 160$ 、 $160 < PERI < 320$ 、 $320 < PERI < 640$ 、 $640 < PERI$ 分别代表低、中、高、非常高的潜在生态风险。土壤重金属污染健康风险与土壤摄入率等暴露参数密切相关。研究采用元素示踪原理调查了我国典型地区儿童土壤摄入率, 表明儿童土壤摄入率存在地区和年龄段差异。以有色冶炼场地土壤重金属污染为案例, 调查了土壤重金属含量水平及形态, 采用改进的生态风险指数评级了土壤重金属污染的生态风险; 采用 Monte Carlo 概率方法, 计算了土壤重金属污染致癌风险和非致癌危害熵的概率分布, 进而评价了土壤重金属污染的健康风险。

关键词: 方解石; 无机磷; 铅; 镉; 化学活性

个人简介: 杨世通, 男, 西安交通大学人居环境与建筑工程学院副教授, 研究方向: 重金属环境污染化学。肖琪, 女, 西安交通大学人居环境与建筑工程学院硕士研究生, 研究方向: 典型重金属的土壤环境行为。

E-mail: xiaoqi6180@stu.xjtu.edu.cn

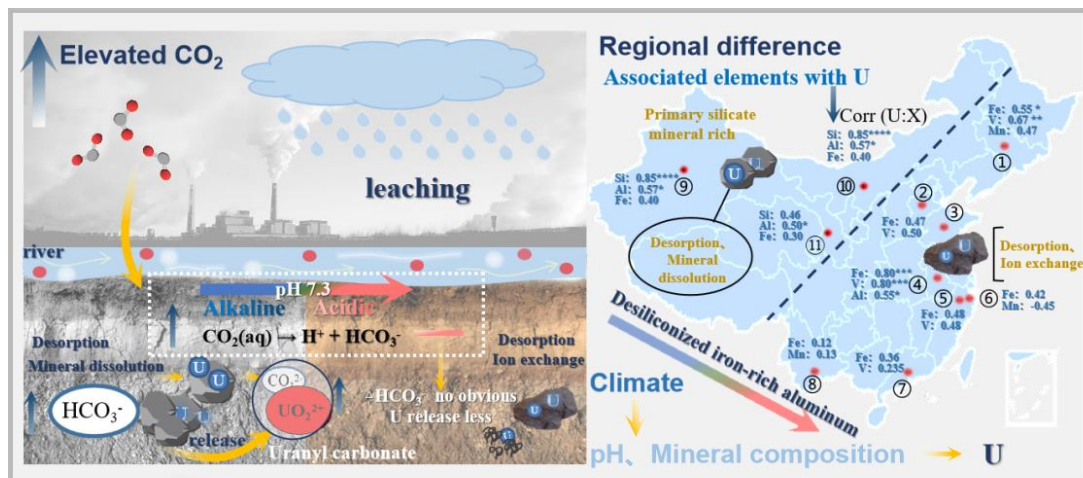
大气 CO₂ 浓度升高引起土壤铀的流失：地带性差异及影响因素

Uranium outflow from soils due to elevated atmospheric CO₂: zonal differences and influence factors

王子艳, 汪彩琴, 张道勇, 潘响亮

浙江工业大学环境学院, 浙江杭州, 310023

摘要: 随着人类社会的快速发展, 大气 CO₂ 浓度持续增加。放射性核素铀 (U) 对环境中 CO₂ 分压格外敏感, 升高 CO₂ (e CO₂) 下近地表中铀的迁移行为受到关注。本研究对全国典型的 11 种土壤在不同大气 CO₂ 浓度系统中进行模拟实验, 监测土壤溶液 pH、HCO₃⁻ 浓度的变化以及 U 的释放趋势, 以评估不同区域土壤中 U 对大气 CO₂ 的响应差异。结果显示, e CO₂ 会促进背景 U 水平含量土壤中 U 的释放, 且具有选择性。其中, 释放趋势基于土壤性质呈现显著差异, 碱性土壤 U 释放对 CO₂ 浓度响应敏感, U 释放量随 CO₂ 浓度增加而增加, 且均与 ΔHCO₃⁻ 浓度显著相关 (p<0.05)。此分析进一步说明了土壤 pH 值作为基础条件, 决定了土壤溶液中 CO₂ 解离形成 HCO₃⁻ 的程度, 从而共同成为控制土壤 U 溶出的主要因素。半动态淋滤周期中, eCO₂ 相对于环境 CO₂ (aCO₂) 系统下, 碱性土 U 溶出提高 8%-14% (700ppm CO₂) 以及 19%-30% (1000ppm CO₂)。其次, U 的溶出在干旱半干旱地区整体与溶液中的 Si、Al 含量相关, 而在湿润半湿润地区与 Fe 相关。这可能与土壤形成的长期气候条件的矿物组成密切相关。另外, 逆反应模型支持了反应过程中原生硅酸盐的溶解, 且趋势与 U 的释放较一致, 说明原生硅酸盐岩可能是地质环境中 U 赋存的重要物质, 也是 U 释放的来源之一。该实验表明了全球变暖影响下, 即使背景 U 含量的土壤在大尺度上会呈现 U 的大量从陆地向河流及海洋输送的潜力。



大气 CO₂ 浓度升高引起土壤铀的流失示意图

关键词：升高 CO₂；土壤；铀释放；pH；地带性差异

作者简介：王子艳，浙江工业大学，博士在读，主要研究方向为土壤中铀的地化行为；汪彩琴，浙江工业大学，讲师，主要研究方向为土壤污染修复；张道勇，浙江工业大学，教授，主要研究方向为土壤污染修复；潘响亮，浙江工业大学，教授，主要研究方向为环境修复技术等。

E-mail: wzy1489969024@163.com

同步辐射红外显微技术和 BL01B 线站在土壤环境领域的应用

周晓洁

中国科学院上海高等研究院

摘要：我同步辐射（Synchrotron Radiation, SR）红外光具有亮度高、光谱范围宽等优异的性质。基于上海同步辐射光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）建设的国家蛋白质科学研究（上海）设施（National Facility for Protein Science, NFPS）的同步辐射红外（SR-FTIR）显微光束线站 BL01B1 可进行高分辨的傅里叶变换红外显微研究。空间分辨率可达衍射极限。红外谱学显微线站集合高亮度的同步辐射（SR）红外光、Nicolet FTIR 红外光谱仪、Continu μm 红外显微镜、Bruker 70V 真空型光谱仪、Hyperion II 红外显微镜、高灵敏度 MCT 检测器，可进行高空间分辨的红外显微与 Mapping 成像研究。使用高亮度的同步辐射光进行红外显微与成像研究时，能够达到理论上衍射极限的高空间分辨率，在光阑孔径为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 时依然可以得到较高强度和信噪比的红外谱图，克服了传统 FTIR 谱仪内置光源在小光阑孔径下信号弱、信噪比差，空间分辨率低的缺点。近年来，BL01B1 线站支持土壤科学和环境科学领域的用户利用 SR-FTIR 技术产出了诸多应用成果。

关键词：同步辐射；红外显微；红外线站；BL01B；环境土壤学

作者简介：

E-mail: zhouxiaojie@sari.ac.cn

冻融作用下团聚体周转对土壤中镉滞留和释放的影响机制

Influence mechanism of aggregate turnover which was driven by freeze-thaw action
on the retention and release behaviors of cadmium in soil

王全英

中国科学院东北地理与农业生态研究所

摘要：冻融作用广泛发生在我国中高纬度及高海拔地区。土壤冻融过程中，土壤水分的相变及其伴生现象会引起土壤性质如土壤铁锰氧化物、溶解性有机质等分布和含量的变化，进而影响土壤中重金属的迁移转化行为。冻融作用主要通过影响土壤团聚体周转而影响土壤中污染物的迁移转化行为。本研究通过室内模拟冻融实验和田间冻融实验，结合稀土元素标记的方法对土壤团聚体周转路径进行示踪，以此揭示冻融作用下不同粒级土壤团聚体之间的崩碎和团聚机制，及其所引起的土壤性质变化与土壤重金属迁移转化之间的关系。研究发现冻融循环对土壤团聚体的周转方向受含水量影响显著。冻融作用改变了土壤团聚体的镉吸附能力，提高了粒径 106-500 μm 团聚体的镉负载量。田间冻融作用下，土壤胶体主要来自于小粒径团聚体，但冻融作用可以增大对大团聚体的破坏，使来自大团聚体的胶体增加。春季冻融后的土壤团聚体稳定性和周转时间高于秋季冻融后的土壤团聚体，秋季冻融过程增加了 $\geq 0.25\text{ mm}$ 团聚体的可交换态镉的含量，而春季冻融过程对土壤的镉交换量没有影响。与实验室条件相比，季节性冻融过程降低了全土和不同粒级特团聚体的镉释放量。本研究表明，季节性冻融作用可以通过直接或间接地改变土壤团聚体的周转行为而影响土壤中迁移转化行为。

关键词：冻融作用；团聚体周转；迁移转化；生物有效性

作者简介：王全英，中国科学院东北地理与农业生态研究所，研究员，主要从事季节性冻融作用下土壤-农作物系统中重金属的迁移转化过程研究。

E-mail: qywang@iga.ac.cn

溶解有机物调控铬（氢）氧化物胶体团聚和沉积的分子尺度研究

Dissolved organic matter regulates aggregation and deposition of chromium (hydr)oxide colloids: molecular-scale investigation using ESI-FT-ICR-MS

金超^{1*}, 朱世殊^{1,2}, 莫逸君¹, 罗雯丹¹, 肖子涵¹, 付毅¹, 仇荣亮^{1,3,4}

1 中山大学环境科学与工程学院, 广州, 510006; 2 华南理工大学环境与能源学院, 产业集群污染控制与生态系统恢复教育部重点实验室, 广州, 510006; 3 华南农业大学资源与环境学院广东省岭南现代农业重点实验室, 广州, 510642; 4 岭南现代农业广东省实验室, 广州, 510642

摘要: Cr（氢）氧化物胶体由于其高迁移能力而造成严重的环境风险, 溶解有机物（DOM）普遍存在于自然环境中, 与胶体颗粒显着相互作用并调节其环境影响, DOM 与 Cr（氢）氧化物之间的相互作用对于理解 Cr(III)的迁移率和环境风险具有重要意义。本文研究了 DOM 存在情况下有机质分子组成对 Cr（氢）氧化物胶体行为的影响, 采用傅里叶变换离子回旋共振质谱（FT-ICR-MS）和傅立叶变换红外光谱（FT-IR）研究了 DOM 在不同形式的 Cr（氢）氧化物上的吸附和分子分馏行为; 利用动态光散射技术（DLS）和石英晶体微天平（QCM-D）探测了与 Cr（氢）氧化物胶体外部“有机质冠”组成相关的团聚和沉积动力学, 以解析 Cr（III）在水生环境中的潜在迁移行为。确定了 DOM 与不同形式 Cr 纳米颗粒的结合方式, DOM 与氢氧化铬的结合依赖于配体交换作用, 具有更强的异质性; 而 DOM 在氧化铬上的吸附依赖于范德华作用力, 不具有选择性。同时, 氢氧化铬倾向于结合带有多个羧基并具有芳香结构或是高度不饱和的有机质, 而在氧化铬表面吸附的多为大分子量有机质的疏水段。DOM 吸附或结合在 Cr 纳米颗粒表面形成的“有机质冠”显著影响了 Cr 纳米颗粒的迁移行为和归趋。氢氧化铬表面结合的特定有机质组分在团聚和迁移的过程中促进共沉淀, 进而使得氢氧化铬更容易在介质表面被保留, 而氢氧化铬表面的有机质增强了空间位阻效应, 从而增加了氢氧化铬的稳定性和迁移能力。

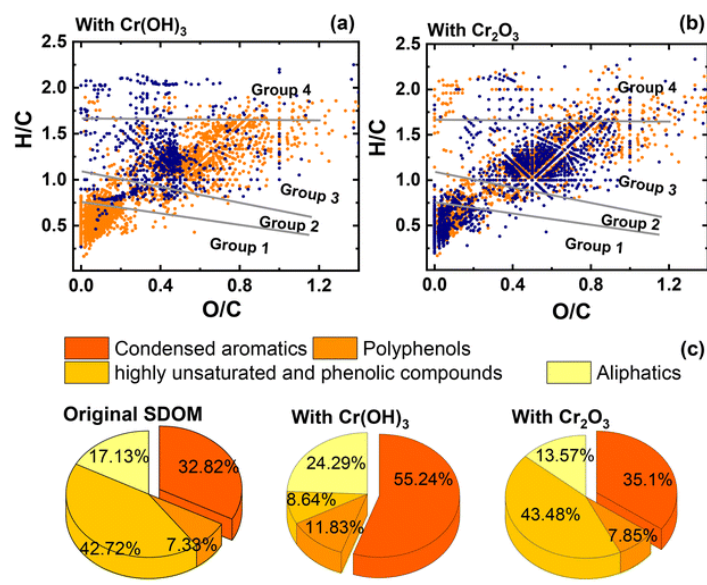


图. 1 不同形态铬颗粒吸附后 DOM 组成的 van Krevelen 图，橙色和蓝色点分别代表与 Cr 纳米颗粒间的高亲和力和低亲和力组分，以及吸附前后 DOM 中四种组分占比

关键词： 制傅里叶变换离子回旋共振质谱；铬纳米颗粒；迁移沉积；分子分馏

作者简介： 金超，中山大学环境科学与工程学院，副教授，胶体污染物迁移归趋。

E-mail: jinchao3@mail.sysu.edu.cn

纳米矿物的形成和稳定性

Formation and Stability of Natural Nanominerals

胡焱弟

北京大学

摘要：土壤-地下水体系中天然纳米矿物在水体和水土界面的形成和稳定性决定着重金属在水土介质的迁移传输，对土壤-地下水污染治理具有重要影响。定量观测纳米矿物在水体和水土界面的形成是地球化学领域的难点。通过设计对高能 X 射线高透射的反应槽，使实时原位观测纳米矿物的形成成为可能。通过集成多项材料化学领域新的纳米界面表征技术，结合经典结晶学和 DLVO 理论依据，并将此系统研究的技术手段应用于探究重金属/有机物和纳米矿物共沉淀，揭示了重金属离子-纳米矿物-土壤表面-有机物之间的相互作用机理，提出了土壤介电常数、亲水性和表面带电对纳米矿物在水土界面形成的控制机理，阐明了重金属水解和有机物官能团/分子量对纳米矿物形成和稳定性的控制机理。可用于指导土壤和地下水重金属污染修复。

关键词：纳米矿物；结晶生长；胶体稳定性；污染物和有机物的迁移和固定；水土界面过程

作者简介：胡焱弟，北京大学环境科学与工程学院新体制长聘副教授，研究员，博士生导师，入选国家青年千人（2020）和中国环境科学学会青年科学家奖（金奖，2021）。运用多种国际领先的实验手段，结合热力学理论，探索重金属在土壤和有机质表面的化学反应过程及其在环境中的迁移转化规律，用于指导土壤和地下水的修复。课题组在 PNAS、ES&T 等期刊发表大量文章。曾担任北美环境工程华人教授协会主席，现担任 Chemical Geology 和 Journal of Hazardous Material 杂志编委。

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法

Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites

张佳琦^{1,2,3}, 潘瑜春^{1,3}, 高世臣², 赵亚楠¹, 景胜强^{4,5}, 周艳兵^{1*}, 郇允兵^{1,3*}

1 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097; 2 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 3 北京农林科学院智能装备研究中心, 北京 100097; 4 廊坊市灾害遥感监测重点实验室, 三河 065201; 5 防灾科技学院生态环境学院, 三河 065201

摘要: 产地环境是农产品质量与安全的源头保障和重要基础。重金属污染物通过大气沉降、灌溉水、污泥农用等途径不断进入农田, 农产品产地环境遭受严重威胁, 引发一系列社会关注问题。开展区域土壤环境质量现状与变化趋势分析对于污染风险管控具有重要意义。然而土壤环境质量监测样点往往稀疏, 基于不同的统计方法(算数均值、面积加权均值、中位数众数、多水平模型等)其现状和变化估计往往结果不一致、甚至出现悖论。基于监测样点生成的真实模拟场上开展仿真抽样以探究统计方法对区域土壤环境质量现状及变化估计影响很有必要。本文重点探究稀疏样本下土壤重金属含量空间模拟场生成方法, 分析不同生成方法对环境质模拟结果的影响, 以期为区域土壤环境质量模拟选择提供参考依据。土壤重金属受人为和自然因素综合作用, 其空间异质性强, 存在区域均值和方差的非平稳性, 稀疏样本下未知点估计精确度低, 土壤环境质量现状精准估计和风险评估困难。基于此, 提出了随机森林-序贯高斯模拟混合模型(RF-SGS), 选取多种自然因素和人为因素作为辅助变量, 充分考虑土壤属性指标的空间自相关性以及环境变量属性相似性, 解决传统插值中极端值和空间连续性模式敏感存在的局限性, 为非平稳区域精准估计总体提出可行性方法。以北京市顺义区采样数据为例, 采用 MMSD 抽样方法对样点抽稀, 对原始采样数据进行不同采样密度的对比实验, 用随机森林-序贯高斯模拟混合模型(RF-SGS)、序贯高斯模拟模型(SGS)、趋势面-序贯高斯模拟混合模型(TR-SGS)和随机森林模型(RF)对土壤重金属 Cd 的空间分布进行模拟, 从统计特征和空间结构等方面比较模拟结果, 分析误差产生的原因, 进一步验证方法有效性。结果表明, 在 7 种采样密度下, 预测精度由低到高排序为: $SGS < TR-SGS < RF < RF-SGS$, RF-SGS 估算精度最高且 Cd 含量空间分布也最接近原始数据分布。RF-SGS 模型可以作为稀疏样点下土壤重金属空间模拟的一种有效方法。

关键词: 土壤插值; 条件模拟; 序贯高斯模拟; 随机森林; 随机过程

个人简介: 郇允兵, 博士, 北京市农林科学院信息技术研究中心副研究员, 主要从事耕地质量监测评价和时空大数据建模分析方面工作。北京土壤学会、北京土地学会理事。先后主持国家自然科学基金面上项目、重点研发计划课题 3 项, 参与重点研发、863 计划、科技支撑等国家及省部级课题 10 余项, 发表 SCI、EI 论文 20 篇, 中文核心 30 篇, 授权发明专利 10 项, 获得省部级科技进步二等奖 2 项, 参与国家、行业标准制定 3 项。

E-mail: gaoyb@nercita.org.cn

土壤污染生态风险评估方法及案例应用

Ecological Risk Assessment Method and Case Application of Soil Pollution

赵丹^{1,2}, 吴畏达^{1,2}, 於方^{1,2}

1 生态环境部环境规划院; 2 国家环境保护生态环境损害鉴定与恢复重点实验室

摘要: 本研究基于对国内外研究进展和实践的调研, 研究提出适合我国现阶段基本国情的土壤污染生态风险评估技术框架和方法体系, 并选择典型石油化工场地, 以受保护鸟类为敏感受体, 开展生态风险评估方法的案例应用, 为相关标准规范的制定奠定基础。

一是研究构建层次化的土壤污染生态风险评估技术框架。将土壤污染生态风险评估分为风险快速识别阶段、初步评估、详细评估和复合污染风险评估四个阶段。风险快速识别阶段基于对评估区和对照区土壤或生物体中污染物浓度及其它物理、化学、生物学指标的快速观察、测定、测试, 初步识别潜在风险。初步评估将调查获取的土壤污染物浓度与生态风险筛选值进行比对, 分析风险是否可接受。详细评估基于污染物浓度和形态调查、生物有效性测试、生物毒性测试、生态调查等, 采用商值法、指数法(证据权重法)、概率法等评估风险。复合污染风险评估主要通过开展复合污染毒性效应研究, 选择浓度加和或效应加和等方法对复合污染风险进行综合表征。

二是基于本土毒性数据推导典型污染物的生态风险阈值。通过调研本土毒性数据, 采用评估因子法和 SSD 方法推导了石油化工场地典型重金属砷和铅的生态风险阈值, 结果显示统计学方法的运用使得 SSD 法不局限于可用毒性数据中的最低浓度, 相比评估因子法可靠性更高。运用 SSD 推导砷的 HC5 为 5.74mg/kg, 铅的 HC5 为 142.53mg/kg, 与调研获取的发达国家生态风险筛选值存在较大差异, 其 As 的最低生态风险筛选值为 12mg/kg, Pb 的最低生态风险筛选值为 11mg/kg, 表明本土毒性数据的应用对于精准评估生态风险具有重要意义。

三是采用多种方法评估典型场地污染的生态风险。鸟类通过摄入食物、土壤和饮水等途径暴露于场地污染中。研究显示, 鸟类通过摄入某场地内废水的暴露量最大, 其次是土壤, 最后是地表水和植物, 这与鸟类摄入量(424-7479mL/d)以及废水中污染物浓度高有关。不同鸟类通过多种途径暴露于铅的总风险商在 7.58-32.07 之间, 砷为 5.77-23.82, 石油碳氢化合物为 0.51-2.21。不同鸟类的风险 *Phoenicurus alasemchanicalus* > *Coturnix japonica* > *Vanellus Vanellus* > *Turdus feae* > *Mareca falcate* > *Corvus spectabilis* > *Aythya nyroca* > *Aythya baeri* > *Symmaticus reevesii* > *Anser erytripus*, 主要影响因素是体重差异。表明场地污染对于受保护鸟类的风险处于较高水平, 需要对场地内的废水和土壤进行合理处置, 确保生态风险可控。

关键词： 土壤污染；生态风险评估；方法；案例

作者简介： 赵丹，生态环境部环境规划院，副研究员，主要从事土壤地下水环境风险、损害鉴定评估与修复研究。

E-mail: zhaodan@caep.org.cn

纤毛虫的土壤污染修复潜力

The Potential of Ciliates for Soil Pollution Remediation

陈瑛*, 郑维彬, 侯森, 任南琪

城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳, 518055

摘要: 原生动物是仅次于细菌和真菌的第三大土壤微生物类群。最近的研究表明纤毛虫是土壤原生动物中的优势种类。纤毛虫不但能够通过捕食行为驱动土壤细菌和真菌群落构建, 还会进一步影响其生态功能, 在土壤元素循环、植物病害防治和土壤污染监测和修复中发挥重要作用。我们最近的研究发现, 两种作物根际原生动物对微生物群落的重组具有驱动作用, 纤毛虫对作物生长所需的碳氮营养年平均贡献率分别超过 30%和 20%, 特定生长阶段最高贡献率达到 90%。细菌主导土壤养分代谢, 真菌则对作物健康影响更大, 原生动物对营养代谢具有正向作用, 对真菌性病害具有一定抑制效应。土壤含水量(SWC)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)对纤毛虫的丰度影响较大, 纤毛虫生态作用及机制为农田水氮科学管理提供新的依据。同时, 筛选到一株高耐镉纤毛虫, 揭示了其细胞积累镉的极限浓度和影响因素, 并对支持该纤毛虫高镉积累和耐受的生物学机制进行了深入研究, 建立了基于生物标志物和镉-金属硫蛋白剂量效应模型的土壤镉污染修复和生态风险评估体系。上述研究表明, 纤毛虫具有土壤污染防治和生态修复的巨大潜力, 是未来建立土壤污染低碳修复新理论和开发新技术不可忽视的生物类群。上述结果中一部分内容已发表在 *Plants* 和 *Bioengineered* 等期刊, 另一部分内容已投稿 *Nature Communications* 等期刊。

关键词: 土壤微生物; 纤毛虫; 碳氮营养; 水氮管理; 镉污染修复

作者简介:

E-mail: chenying@hit.edu.cn

我国场地土壤污染防治科技发展路线图及创新体系问卷调查

宋静^{1,2}, 黄贝童¹, 刘睿^{1,2}, 唐伟¹, 余海波¹, 晏井春^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京市北京东路 71 号, 210008; 2 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要: 2018 年, 科技部启动了“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项, 在土壤污染成因与源解析、监测监管技术体系、风险管控与治理修复技术装备及工程化应用等方面开展了系统研究与示范, 在理论、技术、材料、装备、工程、管理等方面取得了显著进展, 为我国场地土壤污染防治发挥了重要的科技支撑作用。面向 2030 和 2050, 有必要制定我国场地土壤污染防治科技中长期发展路线图和创新体系方案。所需开展的工作包括进一步厘清我国场地土壤污染防治技术研发、装备研制及工程化应用等关键科技瓶颈问题与发展趋势, 明确我国场地土壤污染防治的总体目标和发展方向, 设计发展路径, 制订分阶段目标和分步行动计划, 构建保障机制措施, 构建有利于发挥场地土壤污染防治各创新主体积极性, 目标明确、机制灵活, 分工协作, 可持续的科技创新模式。为了更好地了解我国场地土壤污染防治领域各创新主体对我国土壤污染防治存在的主要科技问题、创新方向以及创新模式等问题的意见和建议, 为提出适合我国国情的场地土壤污染防治科技发展路线图和创新方案建言献策, 2023 年 8 月中旬, 中国科学院南京土壤研究所项目组设计了“场地土壤污染防治科技发展路线图和创新方案”的问卷调查。本问卷调查的对象为政府主管部门、大学/研究所/新型研发机构的科研人员、科技中介、场地修复行业从业者、污染场地业主以及污染场地修复其他利益相关方等。截止 8 月底, 共收到有效答卷 503 份。在统计分析的基础上, 本报告总结了场地土壤污染防治科技发展路线图和创新方案问卷的主要结果。

关键词: 土壤污染防治; 科技创新体系; 场地; 发展路线图

作者简介: 宋静, 男, 1974 年 9 月生, 博士, 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室、土壤与环境生物修复研究中心研究员, 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室副主任, 中国土壤学会土壤环境专业委员会委员兼秘书, 国际微量元素生物地球化学学会 (ISTEB) 会员。

E-mail: jingsong@issas.ac.cn

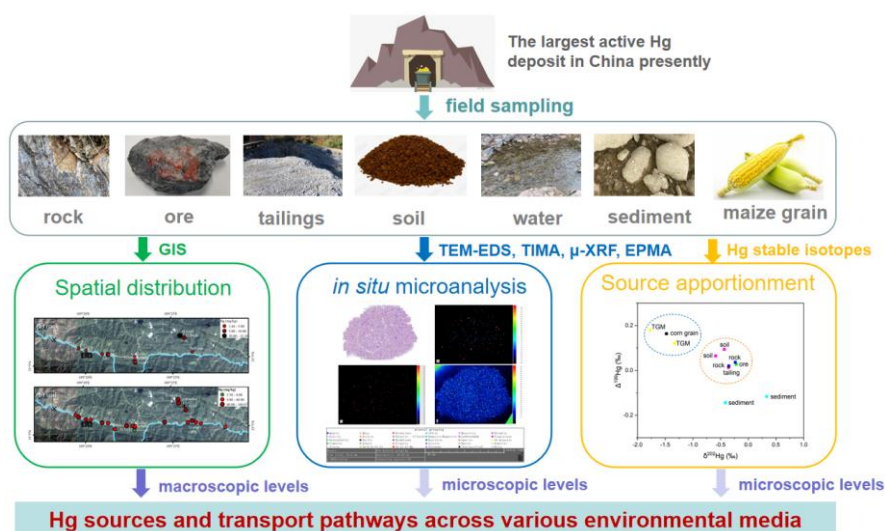
典型锑矿区表生环境中锑及伴生元素的地球化学研究

Geochemistry of antimony and associated elements in supergene environment of typical antimony mining area

石陶然

南京信息工程大学

摘要: 当锑 (antimony, Sb) 是一种类金属元素, 已被美国 EPA 和欧盟巴塞尔公约列入优先控制污染物和危险废物, 被我国列为《重金属污染综合防控“十二五”规划》主要控制污染物。我国是锑的主要供应国, 锑储量和产量均居世界首位, 在全球锑排放中扮演了最重要的角色。土壤锑污染阻控是我国锑污染区生态环境保护的重大科技需求。本研究以我国典型锑矿区——旬阳汞锑矿为研究对象, 采集了矿区土壤、岩石、矿石、尾矿、河水、沉积物和农作物样品, 利用同位素、高通量测序、XRD、TIMA、微区 X 射线荧光光谱等技术对环境介质中锑等元素污染水平、空间分布、矿物学定性定量、元素原位分布、源解析、微生物群落结构、健康风险等方面进行了研究。该研究可为锑矿区环境质量评价和制定适用指南提供科学依据。



关键词: 锑; 汞; 同位素; 矿物学; 地球化学

作者简介: 石陶然, 南京信息工程大学应用气象学院副教授/硕士生导师, 主要研究领域: 重金属环境地球化学。

E-mail: shitaoran@126.com

草甘膦与敌草快对砖红壤土壤中微生物的复合毒性效应

Combined toxicity of glyphosate and diquat on microbial diversity in lateritic soil

谭华东^{1,*}, 何筱瑜^{1,2}, 梁悦夫^{1,3}, 武春媛¹

1 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南省 海口 571101; 2 贵州大学, 贵州省 贵阳市 550025; 3 华中农业大学, 资源与环境学院, 湖北省 武汉 430070

摘要: 微生物群落在许多重要土壤元素的生物地球化学循环中发挥着至关重要的作用。草甘膦 (GP) 和百草枯 (DQ) 这两种常用的非选择性除草剂经常共存于富含铁/铝氧化物的红土型水稻土中, 然而关于它们对这类土壤中微生物群落结构和多样性的共同影响的信息有限。本文研究了 GP 和 DQ 联合暴露对热带农业区 (中国海南) 红土稻田土壤微生物多样性和群落结构变化的短期影响。两种除草剂的联合使用剂量设定为三个浓度: 低浓度 (推荐剂量的 1 倍)、中浓度 (推荐用量的 10 倍) 和高浓度 (推荐量的 100 倍)。通过 16S rRNA 和 ITS 基因高通量测序确定了微生物群落的结构和多样性。结果表明, 放线菌门和变形菌门是红土稻田土壤中对 GP 和 DQ 联合暴露最敏感的微生物门类。GP 和 DQ 的联合暴露增加了放线菌的丰度, 但显著抑制了变形杆菌的丰度, 尤其是在低浓度和中等浓度下。与对照相比, 混合除草剂 (GP+DQ) 对细菌和真菌群落的丰富度以及细菌群落的多样性没有不利影响, 但在高浓度下 28 天内显著降低了真菌群落的多样性。然而, GP 和 DQ 联合暴露对土壤微生物丰富度和多样性的影响与单独暴露两种除草剂的影响没有显著差异。总之, GP 和 DQ 联合应用对土壤微生物没有更多的不良影响。因此, 这两种除草剂可以在实际农业生产中合理使用。

关键词: 草甘膦; 敌草快; 微生物; 复合毒性效应

作者简介: 谭华东, 中国热带农业科学院环境与植物保护所, 助理研究员, 有机污染物的环境行为及效应研究。

E-mail: tanhuadong1991@163.com

有机污染物在土壤中迁移转化的同位素示踪研究

Study on transport and transformation of organic pollutants in soil by isotope tracer technique

李明，钱毅光，丁腾达，李菊英*

深圳大学化学与环境工程学院，中国深圳，518060

摘要：有机污染物在复杂环境介质中的赋存形态（尤其是矿化和结合残留）与转化归趋研究是其环境安全性评价的重要环节。本研究以典型 PPCP 和农药为代表，采用 C-14 放射性和 C-13 稳定性同位素示踪技术，研究有机污染物在土壤和土壤-植物体系中的分布、赋存形态、分子转化及其影响机制，为评价其环境行为和风险、开发污染土壤治理技术提供理论依据。研究发现，土壤和植物中 PPCPs 可以多种形态（自由态、结合残留态、降解产物和谷胱甘肽结合物等）存于土壤和植物中，典型 PPCPs 卡马西平和扑热息痛（俗称“泰诺”）在土壤中可降解为与母体相当甚至高于母体的生物活性产物；以我国具有自主知识产权的手性新药哌虫啉为对象，采用能反映哌虫啉不同对映体分子特征四个单一 ^{14}C 标记手性异构体为示踪剂，在对映体层面上着重研究了哌虫啉在厌氧淹水土壤中的吸收分配、代谢降解、迁移转归。研究发现，不论在彻底矿化、可提态残留动态变化与分布和结合残留动态变化中，还是各异构体母体消减动态、产物形成和产物动态等各方面手性农药都体现了显著的选择性差异，表现为对映异构体（5S, 7R）-IPP（IPP-SR）和（5R, 7S）-IPP（IPP-RS）相对于对映异构体（5R, 7R）-IPP（IPP-RR）和（5S, 7S）-IPP（IPP-SS）较易被矿化及与土壤形成结合残留。哌虫啉四个异构体的降解产物上述行为与规律不仅存在差向异构体选择性差异，也存在对映异构体之间的选择性差异。因此，在对含两个或两个以上手性中心的农药进行环境安全性评价时，不仅需考虑对映异构体选择性，还需考虑差向异构选择性。此外，利用单体稳定碳（碳-13）同位素分析技术，在对映体层面上研究了自然土壤中六氯环己烷（HCHs）的微生物降解，以及土壤中 HCHs 微生物降解的异构体特异性，明确了不同异构体在污染土壤中的浓度与碳同位素比值（ $\delta^{13}\text{C}$ ）之间的关系，以及 α -、 β -、 γ -和 δ -HCH 微生物降解的碳同位素富集系数 ϵ ，并将 ϵ 系数引入实际污染土壤场地修复，识别出 HCH 在复杂系统中的原位微生物降解。

关键词：有机污染物；土壤；迁移转化；同位素示踪

作者简介：李菊英，现任深圳大学化学与环境工程学院副教授/副院长，博士生导师，长期从事新污染物痕量分析、环境行为与效应、生态风险评价及修复等研究工作，先后主持国家自然科学基金项目 3 项、国家重点研发计划子课题 1 项、广东省自然科学基金项目 1 项和多市级科研项目。在 ES&T、Water Research

等国内外期刊上共发表论文 90 余篇，以第一或通讯作者发表论文 50 余篇，一篇入选 ESI 高被引论文，获得授权国家发明专利 4 项，Web of Science 总引用 2000 余次，h 因子 30 (Scopus)，担任中国原子能农学会常务理事，中国环境科学学会环境化学分会委员，环境领域 TOP 期刊《Science of The Total Environment》编委。

E-mail: jyli@szu.edu.cn

黑色岩系硒镉高背景区健康地质调查评价

汤奇峰，刘久臣

国家地质实验测试中心，自然资源部生态地球化学重点实验室

摘要：我国黑色岩系分布较为广泛，南方的黑色岩系从云南经贵州、湖南、江西一直延伸到浙江，全长约 1600km。该条黑色岩系带在浙江省主要以一套发育完整的寒武系地层为主，主要岩性为灰岩、硅质岩和碳酸盐岩，多富含 Cd、Pb、Zn、Cu 等多种重金属和 Se、S 等元素，上方发育土壤中多存在富硒高镉现象。通过在典型黑色岩系硒镉高背景区浙江省安吉县上墅乡开展健康地质调查，查明典型富硒高镉环境中硒、镉等元素的分布特征与控制因素以及人群暴露程度，建立健康地质调查评价指标体系，完成包含岩石、土壤、作物、大气、水等地表介质以及当地实际人群健康情况的健康地质适宜性评价。调查发现浙江安吉工区所有耕地都达到富硒土地标准，但同时镉元素含量超过农田土壤风险筛选值的占 30%以上。为进一步查明硒镉共生这个双刃剑的健康效应，从元素形态、控制因素、人群反应等方面加强了研究。一方面，形态分析表明土壤 Cd 的有效态占 22.5%，Se 的有效态占 15.8%，Cd、Se 在土壤中有较强的迁移转化能力。结合水稻、蔬菜等 Se、Cd 含量双高特征，判断两种元素均有较高暴露通量。另一方面，人群健康调查结果显示，安吉工区居民健康长寿，未出现“痛痛病”、肾功能衰竭、骨质疏松、高血压、生殖系统疾病以及致癌、致畸、致突变等问题。人群发硒、发锌含量高，而重金属 Cd、Ni 在人发中总体较低；人群尿液中 Cd 的平均值为 6.13ng/mL，远高于美、加、韩等国水平，但尿液 N-乙酰-β-D-氨基葡萄糖苷酶含量低于正常参考值。说明人群具有较高的 Cd 暴露和较快的 Cd 代谢，并且没有产生肾损伤，体现了明显的硒镉拮抗效应。研究为特色富硒产业发展和居民健康水平提高提供科学指导，并为我国黑色岩系区硒与重金属元素的生态评价提供参考依据，形成乡村健康地质调查评价技术方法，探索乡村优质健康地质资源经济转化的方法，服务乡村振兴，搭建绿水青山向金山银山转化的地质通道

关键词：黑色岩系、硒镉高背景、健康地质

作者简介：汤奇峰，国家地质实验测试中心，健康地质研究室副主任（主持工作）/高级工程师，主要从事环境地球化学、生态地球化学、健康地质等方面的调查研究工作。

E-mail: tangqifeng@mail.cgs.gov.cn。

地质高背景区土壤元素富集机理与生态风险识别

杨忠芳¹, 余涛², 侯青叶¹, 夏学齐¹, 冯海艳¹

1 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京市海淀区学院路 29 号，100083；2 中国地质大学（北京）数理学院，北京市海淀区学院路 29 号，100083

摘要：采地质高背景是指土壤中 Cd、As、Pb、Hg 等化学元素的富集与人为污染无关，而与成土母岩种类及其风化成土过程有关的现象。在空间分布上与特定地质体伴生，土壤中重金属含量显著高于区域土壤背景值（如岩溶区），或土壤中重金属的生物有效性显著高的地区（如黑色岩系分布区）。按照空间分布，地质高背景区可分为残破积型和冲洪积型，前者又分为继承型和次生型，后者主要指第四系分布区。继承型主要指基性、超基性岩、煤系地层、黑色岩系与硫化物、磷矿分布区；次生型主要指碳酸盐岩分布区。在岩溶区土壤微量元素富集与碳酸盐岩溶解-酸不溶物堆积阶段的初次富集、酸不溶物成土发育阶段的铁、锰、铝氧化物富集引起的二次富集，是导致岩溶区土壤微量元素富集的主要原因；而黑色岩系、金属硫化物矿、煤系地层分布区土壤重金属富集则是继承了原岩微量元素高含量，其生物活性增加则是硫化物氧化引起的土壤强烈酸化所致。采用热点分析和地理加权回归分析可以有效地识别土壤微量元素富集的宏观控制因素；采用机器学习，利用土壤大量元素、矿物组成与土壤理化性质等大数据，可以精准地建立起预测农作物籽实含量的数学模型，为利用面积性调查数据实现土地资源分类分级管理、农作物安全生产、特色农产品区划、人体健康水平提升等提供了理论基础与方法技术。

关键词：地质高背景；元素富集机理；大数据空间分析；健康风险识别

作者简介：杨忠芳，女，教授，从事生态地球化学研究。

E-mail: yangzf@cugb.edu.cn

地质高背景稻田系统中砷镉的迁移转化规律及健康效应研究

孔淑琼*, 易志豪, 魏夏国, 陈依依, 陈洁

中国地质大学（武汉）环境学院, 武汉, 430074

摘要：地质高背景土壤中通常有多种金属共存，砷与镉因赋存状态间的静电作用力，伴生于高地质背景土壤中。稻田系统中高砷高镉的环境地球化学行为及其引发的健康风险日益受到关注，是一个全球性的生态安全问题。砷镉具有较强的迁移能力和生物有效性，通过食物链传递到人体，损害人体健康。本研究结合野外实验和室内实验，探究地表水-地下水相互作用引起的砷镉形态和浓度分布动态变化过程；分析稻田水文地球化学环境的变化特征，研究砷镉迁移转化过程和生物有效性；揭示稻田系统中可溶性有机质和铁氧化物对砷镉迁移转化的影响机理；探究地表水-地下水相互作用下氧化还原条件变化对稻田砷镉的迁移转化的影响机制；揭示 DOM 和铁氧化物对砷镉释放过程和生物有效性的控制机理；探明地表水-地下水相互作用对稻田系统砷的环境地球化学行为的影响机制；阐释砷镉的生物有效性和健康风险效应。本项申请可为浅层地下水高砷高镉稻田系统中砷镉的迁移转化和农业健康风险预测提供科学依据，对降低农田土壤砷镉的生态健康风险有重要的指导意义，对粮食安全生产具有重要的理论支撑与实用价值。

关键词：砷；镉；稻田系统；生物有效性

作者简介：孔淑琼，中国地质大学（武汉）环境学院，副教授，研究领域：土壤地下水污染修复及环境健康效应。

E-mail: ksq@cug.edu.cn

广西岩溶地质高背景区土壤镉生态风险评价与防控

Ecological risk assessment, prevention and control of Cd in karstic soils with high geochemical background in Guangxi

杨琼¹, 杨忠芳², 季峻峰³, 张起钻⁴, 余涛⁵, 刘旭², 季文兵⁶, 吴天生⁷, 王磊⁷

1 郑州大学农学院, 郑州 450001; 2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 南京大学地球科学与工程学院表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023; 4 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 5 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 6 生态环境部南京环境科学研究所土壤污染防治重点实验室, 南京 210042; 7 广西壮族自治区地质调查院, 南宁 530023

摘要:喀斯特环境在全球具有重要意义, 岩溶区发育的土壤普遍富集重金属元素, 具有典型的地质高背景特征, 土壤生态风险也逐渐引起了广泛关注。其中, 镉(Cd)是影响我国农用地土壤环境质量的首要重金属污染物。然而, 岩溶区土壤中 Cd 元素的富集主要受成土母岩控制还是风化过程的次生富集控制, 尚未有定论。岩溶区水稻籽实 Cd 元素超标与土壤 Cd 高含量分布不一致, 若按照我国现行的农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)和《土壤污染防治行动计划》对岩溶区土壤进行分类分级管理, 势必会出现严格管控区水稻籽实 Cd 含量不超标的现象, 造成大面积土地资源浪费。本研究以广西贵港典型喀斯特和碎屑岩同时存在的地区为研究区, 通过系统分析表层土壤、深层土壤、岩石等各类样品的 Cd 分布及迁移规律, 研究成土母质和成土过程对土壤 Cd 元素富集的控制。同时, 结合广西岩溶地质高背景区 7.88 万 km² 的 1090 套水稻及配套根系土, 来研究岩溶区土壤中 Cd 的生态风险。结果表明, 研究区土壤 Cd 含量的空间分布主要受地质背景控制, Cd 元素在碳酸盐岩区表层土壤的富集是次生富集和母岩继承双重作用的结果。在碳酸盐岩的整个原地风化成土过程中, Cd 很大程度上被淋滤, 只原地残留了不到 2%。岩溶区土壤中普遍存在的铁锰结核对 Cd 的赋存状态和有效性有重要影响, 既促进了土壤 Cd 的富集, 又降低了 Cd 的生物有效性。岩溶区土壤 Cd 含量大于风险筛选值的比例较高(55.0%), 但水稻籽实 Cd 元素超标现象不明显, 超标率为 12.5%。随着土壤 pH 值的增加, 土壤 Cd 含量逐渐增大, 但水稻籽实 Cd 的含量和超标率均逐渐减小, 且当 pH>6.5 时, 水稻籽实 Cd 超标率仅有 4%。这些结果表明, 我国现行的农用地土壤污染风险管控标准中 Cd 元素筛选值并不适用于岩溶区土壤 Cd 的生态风险评价工作。因此, 本研究提出了针对岩溶区土壤 Cd 的安全利用和风险管控阈值建议值, 为我国岩溶区农用地土壤环境质量分级、污染风险管控和土地安全区划提供了依据。

关键词: 广西岩溶区; 地质高背景; 镉; 富集成因; 生态风险

作者简介: 杨琼, 郑州大学农学院, 讲师, 主要从事环境地球化学、农业资源与环境方面的工作,

研究兴趣: 1) 土壤重金属元素污染与防控; 2) 土壤质量变化与环境效应

E-mail: qyang@zzu.edu.cn

砖红壤中铬的溶出和外源三价铬的氧化转化

Dissolution of Chromium and Oxidation of Exogenous Trivalent Chromium in Latosol

施杨潇潇^{1,2}, 徐仁扣^{1,2}

1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 多砖红壤铬(Cr)的背景值和锰氧化物的含量均较高,当土壤中 Cr 溶出或者受到 Cr(III)污染,可能被氧化生成毒性较高的 Cr(VI),从而对周围环境造成威胁。为考察砖红壤中 Cr 的环境风险,以云南、海南和广东采集的部分砖红壤为对象,研究土壤中 Cr 的溶出和外源 Cr(III)的氧化。连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠法提取和电子探针扫描分析的结果表明,砖红壤中的 Cr 主要与铁氧化物和硅酸盐矿物结合,呈非活性状态。盐酸和柠檬酸的酸化和络合作用促进了 Cr 的溶出,但即使 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸也仅使海南 3 和广东 9 砖红壤中 3.68% 和 3.54% 的 Cr 溶出。向砖红壤中添加 Cr(III)并培养 42 d,发现少量添加的 Cr(III)氧化为 Cr(VI),但不同土壤中 Cr(VI)的生成量与亚锰的净产生量不一致,说明土壤中 Cr(III)氧化生成的 Cr(VI)可能会被土壤有机质重新还原为 Cr(III)。去除土壤有机质后,一次平衡实验中观察到外源添加的 Cr(III)氧化为 Cr(VI),氧化量与土壤易还原锰的含量一致。随着溶液 pH 的增加,Cr(III)的氧化量呈先上升后降低的趋势,在 pH 4.5 时 Cr(III)氧化量达最大值,但 Cr(III)的氧化转化量在 Cr(III)添加量中的占比很小,外源 Cr(III)在土壤中氧化转化的风险也很低。虽然砖红壤的背景 Cr 和易还原锰的含量较高,但自然条件下 Cr 的溶解和 Cr(III)的氧化反应很难发生,Cr(III)不易转化为 Cr(VI),因此无需过度担忧砖红壤中 Cr 的环境风险。

关键词: 砖红壤; 背景铬; 土壤铬溶解; Cr(III)氧化; 铁锰氧化物

作者简介: 施杨潇潇 (1999—),女,中国科学院南京土壤研究所,博士研究生,主要从事土壤重金属的生物有效性研究。

E-mail: shiyangxiaoxiao@issas.ac.cn

基于地理探测器的土壤重金属空间分布及其影响因素与来源分析

Source and Influence Factors Analysis of Soil Heavy Metals Based on PMF Model and GeoDetector

孙思静，董春雨，张好，杨海婵，黄祖志，韩宇，张乃明，包立

云南农业大学资源与环境学院，昆明 650000；云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心，昆明 650000

摘要：以丽江市为研究区，利用反距离权重法对研究区土壤 As、Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 进行插值分析，基于地理探测器，以土壤 pH、有机质、蒸发量、平均气温等 11 种影响因子为自变量，7 种重金属为因变量，探究土壤重金属含量的空间分异以及各因子对重金属的影响力与交互作用，通过 PMF 模型对 7 种重金属进行来源解析。结果表明：研究区内的土壤重金属 As、Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 的均值分别是云南省土壤背景值 0.95、3.17、1.87、1.84、0.71、1.78、2.57 倍；在空间分布上，Cu 和 Cr 的含量高值主要集中在玉龙纳西族自治县，As、Hg、Pb、Cd 的高值区主要在宁蒗彝族自治县，Zn 含量高值主要集中于华坪县；经过地理探测器的因子探测器发现土壤 pH、有机质（OC）、人口空间分布（POP）对 7 种重金属含量的具有较强的解释力，交互探测发现，不同影响因子交互后的结果为非线性增强或双因子增强，其中，OC 和 pH 交互作用是重金属空间分异的主导因素，对于 As、Hg、Cu、Pb、Cd、Cr 各影响因子交互后多为双因子增强，各影响因子对 Zn 的交互作用多为非线性增强；通过相关性分析和 PMF 模型发现研究区内重金属 As、Hg 的主要来源是工业源，Zn 的主要来源是交通污染源，Cr、Cu 的主要来源是自然源，Cd、Pb 的主要来源是农业源。研究为丽江市的土壤环境健康保护和可持续发展提供重要的科学依据。

关键词：重金属污染；PMF 模型；地理探测器；源解析

作者简介：孙思静（1999-），女，硕士研究生，主要研究方向为土壤污染修复。

E-mail: sunsijwxsa@163.com

喀斯特地质高背景区土壤重金属富集特征与活化机制

Geogenic enrichment and mobilization of heavy metals in the karst regions with high geochemical background

刘意章*, 王莹, 宁增平, 刘承帅

中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550081

摘要：碳酸盐岩占全球陆地面积的约 12%，在热带和亚热带等人口分布密集、工农业活动较强的区域广泛分布。其中，我国西南地区碳酸盐岩大面积成片分布，受母岩地球化学组成和特殊风化成土过程的影响，其风化形成的上覆土壤普遍富集镉等有害重金属，形成了我国最为典型的高镉地质背景区，土壤重金属的自然富集对区域生态环境、农产品质量和人体健康具有潜在威胁。因此，深入理解碳酸盐岩区土壤重金属的富集特征与活化机制，对揭示土壤污染成因和科学开展安全利用极为重要。针对上述问题，研究团队选择贵州南部典型的喀斯特地质高背景区为研究区，系统研究了岩石、表层土壤和土壤剖面中镉等重金属的分布特征和生物有效性变化规律，探讨了重金属的富集和活化机制。研究表明，石灰岩母岩中镉的平均含量高于碳酸盐岩平均值，其他重金属含量低于碳酸盐岩平均值，但酸不溶物中重金属含量极高，镉可高达 88 mg/kg。酸不溶物的残积风化造成上覆土壤中镉、铅、锌等重金属富集，且主要赋存于残渣态和铁锰氧化物结合态中，其中锰氧化物是镉的主要赋存载体，平均占比约 43%。DTPA 提取的生物有效态占比由高到低依次为镉、铅、铜，其他重金属生物有效性极低 (<1%)。值得注意的是，稻田土壤中镉、铅和铜的生物有效性显著高于旱地土壤，且重金属生物有效性和迁移活性随土壤深度降低而逐渐升高。土壤有机质络合、土壤酸化和锰氧化物还原溶解引起的再分配可能是表层土壤重金属活化的重要控制因素。研究结果可为喀斯特地质高背景区土壤重金属污染风险管控和安全利用提供科学依据。

关键词：地质高背景；碳酸盐岩；镉；污染；生物有效性

作者简介：刘意章（1986 年-），男，博士，副研究员，研究方向：土壤环境地球化学。

E-mail: liuyizhang@mail.gyig.ac.cn

岩溶地质高背景值地区土壤中镉的生物有效性研究

Bioavailability of Cd in soils in karst region with high geochemical background

文字博^{1,2*}, 李伟², 杨忠芳³, 季峻峰²

1 南通大学 地理科学学院, 南通 226019; 2 南京大学 地球科学与工程学院 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023; 3 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 当中国土壤污染状况调查公报表明, Cd 是耕地污染最严重的重金属元素。土壤中的 Cd 易被农作物吸收, 且通过食物链进入人体, 从而影响肝、肾等器官中酶系统的正常功能, 长期食用含镉超标的食物会诱发骨质疏松和肾结石等疾病。中国是世界上岩溶地貌分布最多的国家之一, 其中以西南岩溶区面积最大, 约为 78 万 km²。该地区的土壤普遍含有较高的 Cd 含量, 以广西为例, 土壤中 Cd 的背景值为 0.267mg/kg, 是全国背景值的 2.75 倍, 具有典型的地质高背景特征。农田土壤中高含量的 Cd 会对当地农产品安全和人体健康造成威胁, 然而目前对于地质高背景成因的 Cd 在土壤—农作物系统的地球化学过程和机制认识不足, 也给岩溶地区农田土壤质量评价标准的制定带来很大困难, 因此对该地区土壤 Cd 的生物有效性进行准确评估尤其紧迫。

我们采用化学提取、土壤溶液提取、梯度扩散薄膜技术(DGT)等方法, 结合土壤—植物迁移模型, 对西南岩溶地区土壤 Cd 的生物有效性进行了分析和评价, 结果表明:

(1) 土壤 pH 和 Ca 含量是影响土壤 Cd 生物有效性的主要因素。钙含量较高情况下, 土壤 pH 也相对较高, 尽管有些采样点 Cd 含量较高, 但水稻中 Cd 较低, 因此不会导致食品质量风险; 同时由于 Cd 与 Ca 离子半径相近, 在被植物根部吸收过程中 Ca 离子与 Cd 离子存在竞争效应, 使得 Cd 的生物富集系数降低。而在 pH 值较低的土壤中, 由于钙大量淋失, 使得其被植物吸收的竞争效应和缓冲效应降低甚至消失。

(2) CaCl₂ (0.01M) 提取实验为不同类型土壤的 Cd 在根系土壤—水稻籽实中富集关系的揭示提供了良好的研究方法。西南岩溶高背景地区土壤 Cd 的生物富集系数和 CaCl₂ 可提取率均远低于非地质高背景地区。岩溶地区始成土 Cd 的生物有效性和生态风险最低, 而人为土的生物有效性和生态风险最高。

(3) 基于土壤 pH、Ca 离子和 Cd 离子总量建立的扩展 Freundlich 型模型和多项式曲面模型, 可以确立可靠的土壤和水稻中 Cd 含量的相关关系, 本研究可为岩溶地质高背景地区的水稻安全生产提供参考指导, 对 Cd 超标的农田分类管理提供基础数据支撑

关键词: 岩溶; 地质高背景; 镉; 土壤; 生物有效性

作者简介: 文字博 (1987 年出生), 男, 博士, 研究方向: 重金属环境地球化学研究。

E-mail: wenyubo@ntu.edu.cn

基于土壤标准适宜性评价与环境基准的黔西北 Cd 地质高背景区农用地精准管理新思路

A new idea of precise management of agricultural land in the geological high background area of Cd in northwest Guizhou based on soil standard suitability evaluation and environmental benchmarks

杨利玉¹, 吴攀^{1,2,3,*}, 杨文弢^{1,2,3}

1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025

摘要: 我国现行土壤标准 (GB 15618-2018) 能较准确地对中国重金属污染土壤进行环境质量类别的分类, 但在重金属地质高背景区农用地土壤评价的准确性存在挑战, 难以满足地方政府对农用地的精准管理。以黔西北水城区高镉 (Cd) 农用地为例, 采集了 164 组土壤-农产品 (水稻 22 组、玉米 105 组、叶菜蔬菜 37 组) 协同监测样品, 系统地研究了该区域土壤和农作物可食部位 Cd 累积状况和分布特征, 探讨了现行标准对地质高背景区农用地评价的适应性, 并基于物种敏感分布模型 (SSD) 反推区域农用地环境风险基准值。结果表明: 1) 研究区土壤 pH 整体呈中性偏酸, 水稻、玉米和叶菜蔬菜土壤 pH 平均值分别为 6.03、6.35、6.12。土壤 Cd 含量总体呈高累积特征, Cd 含量的算数平均值为 $6.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 范围为 $0.258\sim 248 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 162 个土壤样品 Cd 含量高于现行标准值的筛选值 ($>\text{RSV}$)。2) 与土壤 Cd 高含量相反, 3 种农产品可食部位中 Cd 含量整体偏低, 仅有 8 个样品 Cd 含量超过相应限量标准 (水稻 2 个、玉米 4 个、叶菜蔬菜 2 个); 3) 适应性分析结果表明, 有 72 组样品分析结果为不适宜, 假阴性/阳性错误比率为 43.90%, 采用现行标准对于研究区农用地土壤的评价结果偏严格; 4) 利用物种敏感度分布曲线推导研究区作物健康风险基准值。推导基于保护 95% 和 5% 的农产品安全所得的土壤风险值临界值 (HC5) 和警戒值 (HC95) 分别为: 水稻: 0.7 和 $20.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、玉米: 2.4 和 $48.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、叶菜蔬菜: 2.5 和 $151.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基于上述阈值重新评价研究区农用地, 其适应性比率整体从 56.10% 提高至 97.60%。该结果将为黔西北 Cd 地质高背景区农用地的精准分类和管理提供新思路。

关键词: 重金属; 土壤标准; 农产品; 适应性评价; 分类管理

作者简介: 第一作者杨利玉, 女, 博士一年级学生, 现就读于贵州大学资源与环境工程学院。导师吴攀教授, 男, 博士, 教授, 贵州大学副校长, 主要从事岩溶地质环境演化、矿山环境污染过程与控制、水/土环境重金属污染与治理修复等研发工作。

E-mail: 1574312376@qq.com

基于环境风险和修复性能的生物炭生产工艺优化方法及其应用潜力

徐从斌，孙天然

中国科学院生态环境研究中心

摘要：近年来，生物炭作为一种高效污染土壤修复调理试剂，得到广泛研究与应用，但其复杂的原料来源亦可能导致生物炭成为有毒物质如重金属的载体，而热解属于固废减量化过程，有机组分损失可达 90%以上，并且大多重金属化合物沸点低于热解温度，从而导致重金属富集在生物炭中，致使其在实际土壤应用中存在巨大的环境风险。据此，本研究提出了基于环境风险与修复性能的生物炭生产工艺二元优化方法，并以典型固废为例，评估了其热解产物的重金属风险和 Cd 修复性能，以此优化热解条件。结果表明，随着热解温度的升高，热解生物炭的 pH 值和灰分含量均有所提高；然而产率、H/C 和 N/C 却呈现降低趋势。热解致使生物炭中重金属含量增加明显，与原材料相比，生物炭中 Cd、Ni、Cu、Cr、Pb 和 Zn 的含量经由 600℃热解后分别增加了 4.4、20.7、1.9、2.4、6.1 和 2.2 倍。但热解后生物炭的重金属赋存形态均得到稳定化，重金属风险从中等降至较低。生物炭对 Cd 的固定容量依次为：49.0 mg/g（600℃）、46.5 mg/g（500℃），23.6 mg/g（400℃）和 18.2 mg/g（300℃）。因此，500℃条件下热解制备的生物炭可实现 Cd 的绿色、高效、经济修复。SEM-EDS 和 XPS 表征结果表明，生物炭可通过沉淀、羧基/羟基络合、金属阳离子交换以及与 π -电子配位固定重金属 Cd。本研究从环境风险和修复性能两方面优化生物炭生产工艺参数，为生物炭在土壤中的绿色、高效、经济应用提供了新的视角。

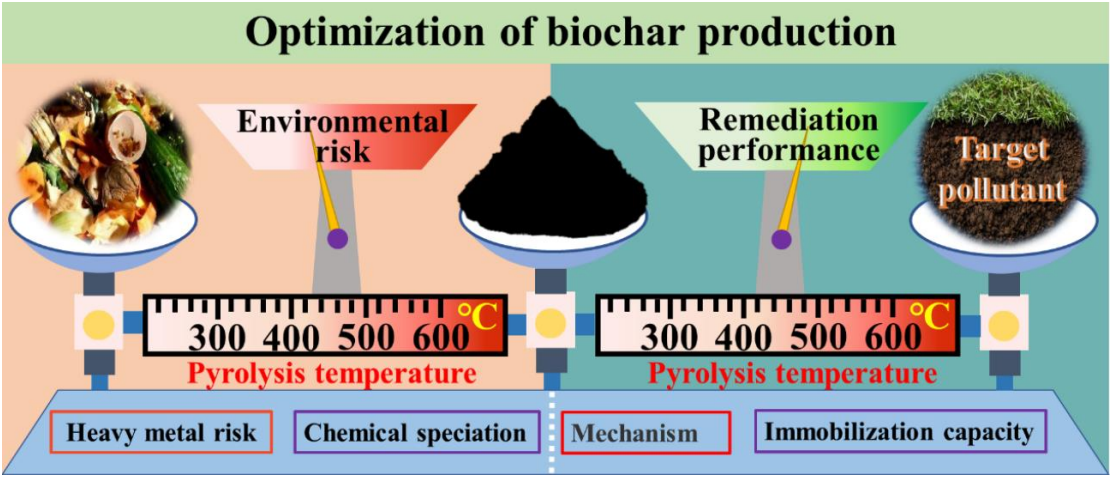


图 1 基于环境风险和修复性能的生物炭生产工艺优化方法摘要图

关键词：生物炭；环境风险；修复性能；重金属；生产工艺

作者简介：徐从斌，中国科学院生态环境研究中心特别研究助理，“双清计划”项目入选者，长期从事新

型环境功能材料的研发及其在土壤和地下水修复中的应用研究，重点就生物炭的环境风险评估及其在土壤重金属修复中的应用开展多项研究，研究成果先后发表于 Environmental Science & Technology、Journal of Hazardous Materials、Environmental Pollution 等国际知名期刊，共计 32 篇。文章他引 714 次，H-index 为 15（Scopus），并获得国内授权专利 2 项。

E-mail: cbxu@rcees.ac.cn

改性地质聚合物钝化修复重金属污染土壤性能与机理研究

Study on performance and mechanism of modified geopolymer for stabilization remediation of heavy metal contaminated soil

贺攀阳, 辛楷能, 虢忠霖, 张晓民

西安建筑科技大学 资源工程学院

摘要: 重金属污染土壤问题日益严峻, 严重危害环境和人的身体健康。高效、廉价的钝化材料在不改变土壤使用功能的前提下, 通过离子交换、吸附、沉淀、络合等途径原位钝化/稳定化土壤重金属, 在重金属污染土壤治理中发挥着不可替代的作用。高孔隙率、高比表面积和丰富的吸附位点是高性能钝化材料的重要前提。地质聚合物具有独特的类沸石三维网络骨架结构, 因而也有类似于沸石材料的离子交换、吸附性能, 故而成为重金属吸附领域的研究热点。而较低的比表面积和有限的吸附位点数量是限制地质聚合物吸附性能的主要原因。基于此, 本研究提出将地质聚合物用作土壤重金属钝化修复材料, 通过向地质聚合物中引入生物炭和酸处理脱铝等途径提高比表面积, 进一步以酸处理地质聚合物为基体通过氨基/巯基官能团接枝制备高性能的地质聚合物钝化材料。研究结果表明生物炭和地质聚合物之间存在协同效应, 即引入生物炭能提高地质聚合物的比表面积, 而地质聚合物的强碱性环境也能有效活化生物炭, 所得生物炭/地质聚合物复合材料的铅离子吸附性能高于单一地质聚合物和生物炭, 其中热解活性炭/地质聚合物复合材料 (300PBCGC-700) 在添加量为 9% 时对土壤铅的 7 d 钝化率为 76.3% (如图 1); 氨基/巯基改性的地质聚合物在施用量为 7% 时对土壤中铅的 60 d 钝化率分为 88.1% 和 91.5%。此外, 改性地质聚合物还能显著改善土壤 pH 值、电导率、阳离子交换容量以及有效钾含量等理化性质。

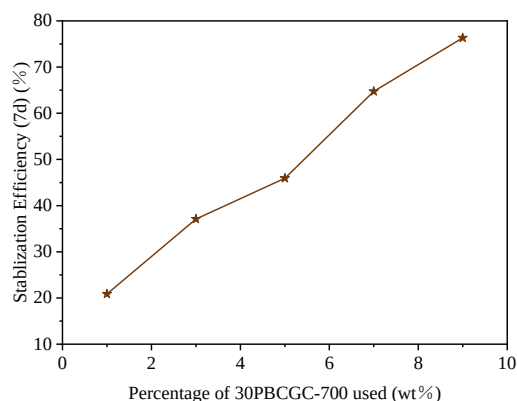


图 1 热解活性炭/地质聚合物复合材料用量对土壤铅钝化率的影响规律

关键词: 钝化; 地质聚合物; 吸附; 重金属

个人简介: 贺攀阳, 男, 博士/讲师, 西安建筑科技大学, 资源工程学院, 主要从事粉煤灰等固体废弃物

的资源化利用和地质聚合物环境功能材料的相关研究，系统研究了制备条件对地质聚合物材料结构与性能的影响，对地质聚合物材料的形成机理进行了探索性研究，通过掺杂、水热等方法对地质聚合物进行了改性，考察了改性地质聚合物在水中重金属离子吸附、渗透分离以及在土壤重金属钝化修复等领域的应用性能及其作用机理。近年来，获准中国博士后科学基金面上项目 1 项、陕西省高校科协学术交流项目 1 项、西安建筑科技大学前沿交叉领域培育专项项目 1 项，以第一作者发表 SCI 论文 10 篇，授权发明专利 10 项。

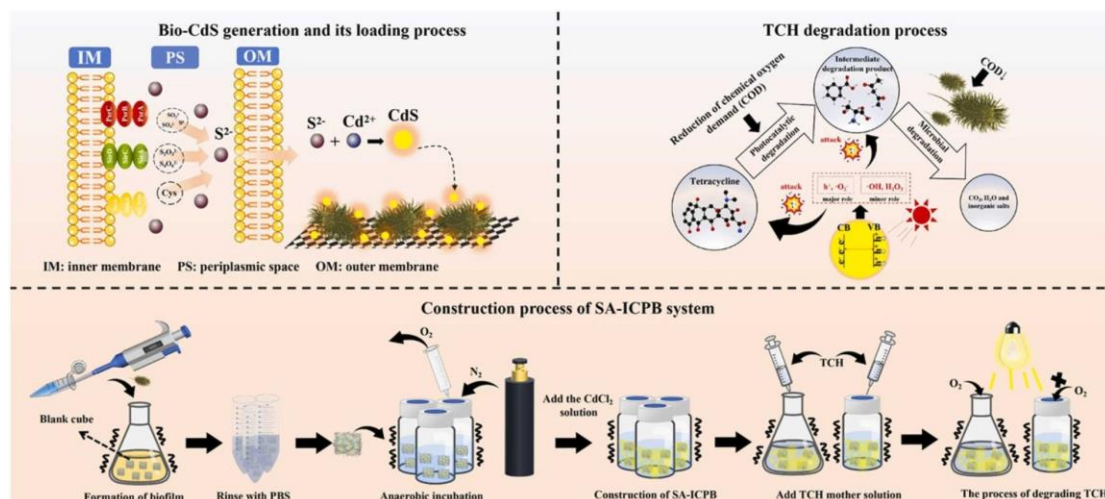
E-mail: hepangyang@xauat.edu.cn

自组装微生物-光催化耦联体系原位净化复合污染废水的过程和机制

王璨¹, 王宇¹, 马海涛¹, 邱航¹, 牛欢¹, 徐绯², 邱忠平¹

1 西南交通大学生命科学与工程, 611756; 2 四川大学生命科学学院, 610064

摘要: 矿山废水和许多农业废水中含有大量的重金属离子, 农业废水中往往还含有较多的抗生素等有机物。大量无机和有机污染物在土壤中累积, 严重影响土壤环境稳态, 其快速深度处理的是当前环境污染治理的重要挑战。常规好氧/厌氧生物废水净化技术净化周期长、净化深度不足, 而多段联用往往增加系统复杂性, 制约着复合污染废水的快速深度处理。为实现复合污染物在较短时间内的快速深度净化, 团队基于前期研究, 利用聚氨酯海绵、多孔陶瓷等多孔介质为载体, 利用希瓦氏菌等功能微生物的代谢活力, 利用废水中重金属离子将其回收为可见光光催化活性产物, 进而自组装构建为微生物-光催化耦联体系 (SMPCS), 实现有机污染物的深度净化。在可见光照射下, 光催化作用极大提高了废水的可生化性, 有利于后续微生物的深度降解。研究结果表明, 24 小时内可彻底去除模拟农业废水中的酚类物质和四环素等抗生素, 化学需氧量 (COD) 显著降低; 同时, 该耦联体系可循环使用, 在 5 个连续的处理循环后, SMPCS 对酚类和四环素类有机物的去除效率仍能达到 90% 以上。此外, 团队还通过人工智能算法开展多维数据融合分析, 提取关键数据特征, 定位影响 SMPCS 效能的主控因子, 构建预测模型, 以此实现 SMPCS 体系的进一步优化。以上论述初步验证了 SMPCS 用于同步净化重金属-有机复合废水的可行性, 其能耗低, 维护需求少, 净化深度和处理效率高, 为重金属-有机物复合污染废水处理提供了新的理论基础和技术路径。



关键词: 复合污染; 重金属; 废水; 原位净化; 自组装微生物光催化耦联

作者简介: 王璨, 理学博士, 西南交通大学生命科学与工程学院副教授, 主要从事环境微生物学领域研究, 基于微生物技术, 多学科交叉进行污染治理与修复。主持四川省科技项目 2 项、中央高校科技项目 2

项、博后基金和国重课题各 1 项，参与了团队的国家重点研发计划、国家 863、自然科学基金研究工作。先后发表 SCI 论文 30 余篇（H 因子 17），申请专利多项。徐绯，理学博士，四川大学生命科学学院助理研究员，主要从事重金属污染、有机污染的治理修复技术与产品研究。主持四川省科技项目 2 项、中央高校科技项目 2 项，作为主力参与了团队的国家重点研发计划、国家 863、自然科学基金等系列项目的研究工作，发表 SCI 论文 20 余篇。

E-mail: wangcan@swjtu.edu.cn

改性有机硅治理盐碱土壤的作用机理及应用

宋福如¹，康莲薇²，曹子库¹

1 河北硅谷农业科学院 河北硅谷肥业有限公司，河北 永年 057151；2 河北工程大学材料学院，河北邯郸，056002

摘要：聚硅氧烷碱解改性制备得到改性有机硅，通过核磁共振、差热分析和红外光谱扫描等手段表征其聚合度 38-80、含有多 Si-OH、Si-O-Si 和 Si-C。具有双亲性及强渗透、偶联、溶胀、缓冲酸碱性等优良性能。原位土柱和均质土柱实验显示有机硅可加速土壤的水分入渗、阻隔盐分离子的攀升。缓冲实验显示有机硅具有缓冲土壤 pH 的性能。电子能谱实验表明有机硅与土壤中的阳离子形成配位键和强吸附作用。小区实验和大田应用示范，盐碱土壤的土壤结构和理化性状有明显改善。

关键词：改性有机硅；盐碱土壤；应用示范

作者简介：康莲薇，河北工程大学材料学院 硕士研究生 教授 主要从事化学化工及环境的教学科研工作，研究领域水质、土壤等的分析检测。

E-mail: kanglianwei@126.com

球磨改性零价铁生物炭复合材料修复受六价铬污染的土壤研究

Remediation of hexavalent chromium-contaminated soil by ball-milled modified zero-valent iron biochar composites

郭鹏菲^{1,2}, 张金兰, 朱勇兵^{1*}, 张婷婷²

1 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102209; 2 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029

摘要: 六价铬 (Cr(VI)) 会污染土壤环境, 对人类健康造成危害。本研究制备了球磨零价铁生物炭复合材料 (BM-ZVI/BC), 并将其用于修复受六价铬人工污染的土壤。结果表明, BM-ZVI/BC 对土壤中的六价铬具有良好的还原和固定效果, 能在短时间内 (5 天) 将土壤中六价铬含量由 170.4 mg kg^{-1} 降至 3.0 mg kg^{-1} 以下, 并在后续的 105 天内保持稳定, 与没有经过球磨改性的材料相比, BM-ZVI/BC 对土壤中 Cr(VI) 的还原固定效果更加稳定。添加 BM-ZVI/BC 增加了土壤有机碳含量, 降低了土壤的氧化还原电位, 为细菌生长创造了有利环境, 细菌群落表现出更高的多样性和丰富度。添加 BM-ZVI/BC 后土壤中脱硫芽孢弯曲菌属 (*Desulfosporosinus*)、芽孢杆菌 (*Bacillus*) 和微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 等还原菌的相对丰度增大, 有助于更好地还原和固定土壤中的 Cr。BM-ZVI/BC 可以将土壤中不稳定的弱酸可提取态铬转化为更稳定的可氧化和残渣态铬。土壤中的 Cr 最终被固定转化为含铬矿物, 从而降低了 Cr 的流动性和生物可给性。使用 BM-ZVI/BC 进行修复的土壤, 在模拟酸雨浸出实验中, 浸出液中的铬浓度始终保持在 $50 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 以下。此外, 即使在干湿循环和冻融循环等极端环境条件下, 使用 BM-ZVI/BC 进行修复的土壤也表现出良好的稳定性。总的来说, 本研究制备的零价铁生物炭复合球磨改性材料对 Cr 的还原固定效果稳定且环境友好, 在重金属污染土壤的修复中具有实际应用价值。

关键词: 铬污染土壤; 球磨; 零价铁生物炭复合材料; 细菌群落; 抗环境干扰

作者简介: 郭鹏菲, 北京化工大学硕士研究生, 主要从事日遗化武污染土壤修复材料研究。

E-mail: guopf122@126.com

耕地保护与盐碱地改良创新思路和科学实践

雷晓东¹，张剑宇²

1 北京化工大学，化工资源有效利用国家重点实验室，北京，100029；2 江苏江苏隆昌化工有限公司，江苏 南通，226532

摘要：层状双金属复合氢氧化物（LDHs）是由主体层板金属氢氧化物及层间阴离子通过插层组装而形成的阴离子型层状材料。本团队经多年研究发现，LDHs 赋存形式对阴阳离子均具有超稳矿化作用。LDHs 结构中存在多种化学键合方式，使其溶度积常数（ K_{sp} ）较相应金属的碳酸盐或氢氧化物小数十个数量级。

基于对 LDHs 超稳矿化结构的认识，通过调变 LDHs 的结构和组成，将镉、镍、铜、砷、汞和铅等重金属离子锚定在主体结构晶格中，显著降低重金属离子在环境中的迁移性和生物有效性，阻断重金属离子进入生态循环。基于此，团队提出“超稳矿化结构”概念，并揭示了重金属离子经同晶取代形成超稳矿化结构的作用机制。研制的超稳矿化材料用于修复重金属污染土壤具有大容量、快速高效、长效性、抗酸性、低成本等优点。其中，不同种类的超稳矿化材料对镉、镍、铜、锌、铅、铬和砷等的选择性不同，可根据不同地区、不同类型土壤污染的具体情况，定制设计并提供针对性修复技术。该技术在江苏隆昌公司转化后，共同构建了新一代土壤修复技术体系，先后在湖南、江苏、甘肃、海南、山东和广西等省进行了 100,000 余亩重金属污染土壤修复示范，效果显著。

通过 LDHs 的超稳矿化结构进行盐碱地改良，主要是利用酸性金属盐矿化剂与盐碱地中的碱基（氢氧根）和盐基（碳酸根等）原位形成超稳矿化结构，再通过阳离子型黏土的离子交换作用固定盐碱地中的 Na^+ 。矿化后使得土壤中平衡碱基和盐基浓度极低，即具有极低的溶解度，从而大幅降低土壤中的碱度和盐含量。此外，由于原位形成的超稳矿化结构具有极低的 K_{sp} ，因此导致碱基和盐基的溶出非常困难，从而可以长期维持土壤的低盐碱状态，即具有长效性。团队通过实验研究证明，钙盐和铁盐矿化剂与盐碱地中的氢氧根和碳酸根在土壤中原位形成了超稳矿化结构，使得盐碱土壤理化性质得到了极大改善。改良后土壤 pH、电导率、碳酸根和可溶性钠离子含量、容重均大幅降低。采用该技术，已在甘肃、青海、内蒙古、宁夏和吉林等省进行了盐碱地改良示范，效果显著。

关键词：土壤修复；盐碱地改良；超稳矿化；插层结构

作者简介：雷晓东，北京化工大学化工资源有效利用国家重点实验室教授，博士生导师。主要研究方向：插层组装化学与产品工程、环境治理（水处理和土壤修复）工程科学与技术。现已在国内外学术刊物发表 SCI 论文 120 余篇，申报发明专利 60 余项，获授权 50 余项；参编国家行业标准 6 项，参与撰写专著 5 部。获北京市科学技术二等奖 1 项，获中国石油和化学联合会技术发明一等奖和技术进步一等奖各 1 项，江苏

省科学技术三等奖 1 项。主持和参与了 5 条层状功能材料中试和产业化生产线的研究和建设工作；利用研发成功的焦化脱硫废液资源化技术在国内唐山钢铁集团公司、黔桂天能股份有限公司、神华蒙西能源股份有限公司等知名大型企业建设了 8 条工业化生产线；基于超稳矿化结构研究，主持和参与了 150,000 余亩重金属污染土壤修复、盐碱地改良和青海木里矿渣山生态恢复工作，均取得了显著效果。现为江苏省科技咨询专家、北京粉体技术委员会委员，Energy Storage and Conversion、中国铝业和石油化工高等学校学报编委。

E-mail: leixd@mail.buct.edu.cn

铁基纳米材料的定向调控及在水-土环境中的应用

Directional regulation and application of iron-based nanomaterials in soil-water

曲建华

东北农业大学，黑龙江 150030

摘要：纳米零价铁（nZVI）是一种有前途的过硫酸盐（PS）活化剂，但其致密的氧化外壳严重抑制了向 PS 电子转移。因此，我们引入硫化和磷掺杂生物炭打破原始氧化物外壳，形成了含 FeS 和 FePO₄ 的混合外壳。我们发现 Fe 原子相对壳组分具有更快扩散速率，从而引发了多重柯肯达尔（kirkendall）效应，导致空位向内流动并合并成径向“柠檬片状”纳米裂纹。以三氯乙烯（TCE）去除为例，裂纹有利于电子和 Fe²⁺通过混合壳层快速向外转移活化 PS，使 TCE 有效脱氯（90.6%）和矿化（85.4%）。此外，SnZVI@PBC 逐渐缺电子，进而从 TCE 中提取电子，实现非自由基降解。此项研究为 nZVI 上多重 kirkendall 效应引发的纳米裂纹形成提供了机制上的理解，并相应地合理设计了用于有机物降解的类芬顿催化剂。基于以上工作，我们采用磷酸盐和掺磷生物炭制备了 PnZVI@PBC，以协同放大 Fe⁰ 和壳组分间的 kirkendall 效应，并通过形成的纳米裂纹进一步放大了 Fe⁰ 和重金属 Cr(VI)之间的 kirkendall 效应，进而改变了吸附构型，缩短了电子传递通道。基于此，nZVI 表面和内部电置换反应均被加速，实现了几乎完全的 Cr(VI)还原（97.0%）。令人惊讶地，我们观察到一个富集丰富 Cr(III)离子的明显空心核芯结构，表明 PnZVI@PBC 同步实现了 Cr(VI)的固定化、解毒和抗氧化，最终实现可持续修复。综上，基于非金属元素的 kirkendall 策略及在 nZVI 上增强电置换反应的先进机理为广泛的修复应用提供了可能性。

关键词：柯肯达尔效应；纳米裂纹；零价铁；电子转移

个人简介：曲建华，教授，博士生导师，研究方向为土水界面多过程调控与污染修复研究。

E-mail: jhqu@neau.edu.cn

巯基单体插层层状双氢氧化物修复六价铬污染土壤研究

张立勋，贺昉昕，管运涛

清华大学深圳国际研究生院，深圳 518055

摘要：铬渣堆存、含铬废水排放导致土壤 Cr(VI)污染问题日益严重，对人体健康、作物生长和经济发展造成巨大威胁。层状双氢氧化物材料(LDH)和巯基功能化材料在 Cr(VI)污染修复领域具有潜在优势，但尚缺少相关研究将两者组装联用。本研究制备巯基单体插层的 LDH 材料，利用吸附实验、材料表征和盆栽实验对材料进行性能评估、去除机制建立和土壤修复应用研究，为巯基单体插层 LDH 材料对 Cr(VI)污染土壤的修复提供理论支持和应用经验。通过共沉淀-焙烧法制备五种巯基单体插层 LDH 材料，利用序批式摇床实验进行吸附能力筛选，五类材料中二乙基二硫代氨基(DDTC)插层入 LDH 后形成的 DDTC-LDH 具有最佳吸附能力且能实现 Cr(VI)的快速高效去除。表征结果表明 DDTC-LDH 具备有序层状结晶结构且 DDTC 成功插层，化学式为 $\text{Mg}_{0.716}\text{Al}_{0.241}(\text{OH})_2(\text{C}_5\text{H}_{10}\text{NS}_2)_{0.108}(\text{CO}_3)_{0.024} \cdot 1.116\text{H}_2\text{O}$ ，材料具备的较高表面积 ($51.80 \text{ m}^2/\text{g}$) 与薄片状狭缝孔结构能保证其充分捕捉环境中 Cr(VI)。DDTC-LDH 的吸附性能评估表明，DDTC-LDH 的吸附容量为 47.69 mg/g ，并能够迅速将溶液中 $0.5\sim 10 \text{ mg/L}$ 的 Cr(VI)降至 ppb 级别，吸附过程符合伪二级反应动力学及 Redlich-Peterson 等温线模型，该反应是以化学吸附为主的物理-化学吸附过程且反应自发放热。DDTC-LDH 能够在较广的 pH ($3.17\sim 10.78$) 和较高浓度共存阴离子 (50 mg/L) 环境中维持其对 Cr(VI)高效吸附能力。DDTC-LDH 在对 Cr(VI)的去除过程中将 Cr(VI)还原为 Cr(III)，且产物 Cr(III)也能被同步高效去除。结合反应前后材料变化，可得 DDTC-LDH 去除 Cr(VI)+Cr(III)的机制主要分四阶段：①层板对 Cr(VI)的静电吸附捕捉；②层间 C-S/C=S 官能团对 Cr(VI)的络合固定；③层间 C-S/C=S 上的 S 将 Cr(VI)还原为 Cr(III)实现还原解毒；④层间 C-SO_x 对还原产物 Cr(III)的络合固定。DDTC-LDH 的 Cr(VI)污染土壤修复实验表明，0.50%投加量的处理组能够在 10 d 内将土壤中 Cr(VI)含量由 134.26 mg/kg 降至 1.39 mg/kg ，初期 Cr 有效态含量得到大幅快速削减 (10 h 削减 71.74%)，削减量与投加量成正比。DDTC-LDH 的投加能够提升空心菜存活率、改善根茎叶发育状况、提高叶绿素含量、有效降低 Cr 在植物体内的富集量。因此 DDTC-LDH 能实现 Cr(VI)严重污染土壤的应急解毒、固定和修复，具备独特的应用潜力与价值。

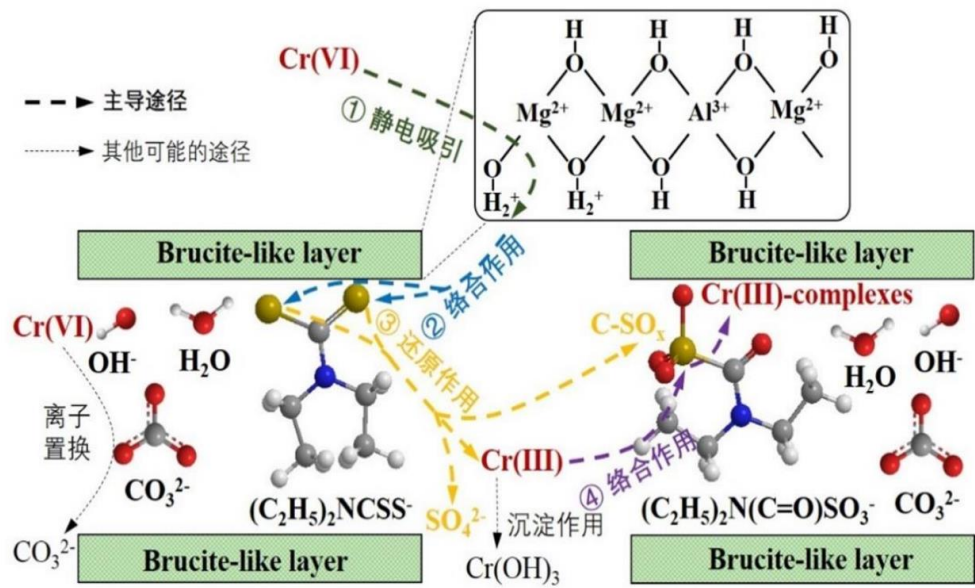


图 1 巯基单体插层层状双氢氧化物吸附六价铬机制示意图

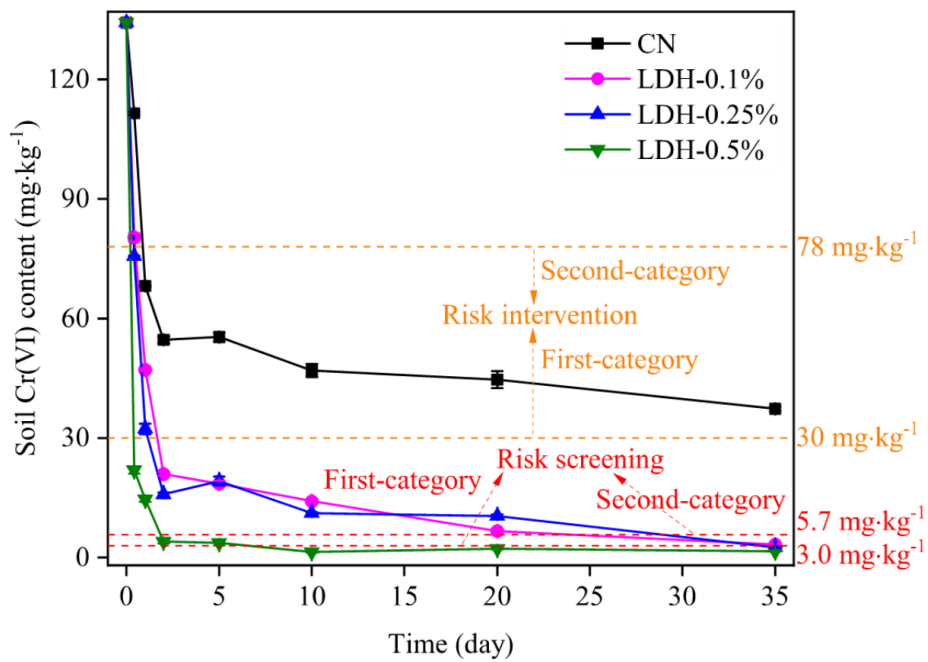
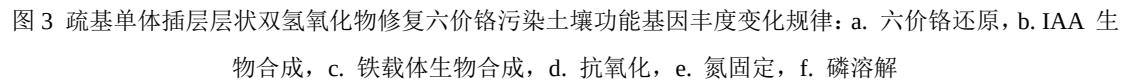


图 2 巯基单体插层层状双氢氧化物修复六价铬污染土壤的效果



个人简介:

新型煤基重金属钝化材料研发及其应用技术

Research and development of new coal-based heavy metal passivation materials and their application technology

黄占斌, 王颖南, 李春全, 马妍

中国矿业大学（北京）化学与环境学院

摘要：煤炭是占我国 60%以上的能源类型,以山西、陕西和内蒙等黄河中游地区煤炭聚集区是我国 9 大煤电基地核心。煤炭开采、加工和利用中产生大量的煤矸石、粉煤灰、脱硫石膏和褐煤制备腐殖酸产生的废渣,对煤矿区及其周边产生巨大的环境污染和土地植被破坏,国家重点研发计划课题“新型煤基吸附/固化材料及安全修复利用技术”开展以重金属钝化材料和有机污染物转化材料研发为核心,本着“以废治废”原则,开展腐植酸废渣制备重金属钝化煤基高分子材料、粉煤灰一步法制备分子筛材料、煤矸石基过硫酸盐催化材料、煤基负载微生物材料、多种煤基固废研发高强固化材料和煤基生物炭型有机-无机复合材料等材料研发,并制定相应的安全利用技术规程,开展野外应用试验示范,取得系列材料研发揭示机理和技术配套的成果。最后,提出煤基重金属钝化材料在土壤重金属污染修复三结合建议,即土壤重金属污染治理材料研发应与固废资源利用结合,土壤修复与土壤质量提升结合,土壤修复与碳库建设结合。这对我国固废资源化和土壤污染治理发展具有一定参考价值。

关键词：煤矿聚集区；固废资源化；重金属钝化；材料研发；应用技术规程

个人简介：黄占斌, 中国矿业大学（北京）教授, 博导, 土壤修复生态材料研究所所长。主要从事区域生态及矿区生态修复、土壤退化改良和污染治理技术研究和材料研发等。

E-mail: zbhuang2003@163.com

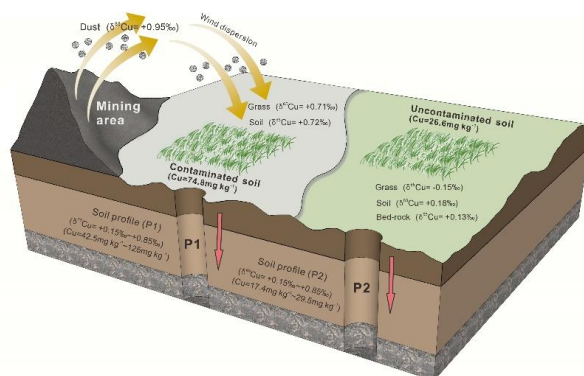
铜同位素比值可以量化煤炭开采和燃烧对中国土壤中铜总浓度的贡献

Copper isotope ratios allowed for quantifying the contribution of coal mining and combustion to total soil copper concentrations in China

任梦溪

巢湖学院

摘要：中世纪以来，全球范围内土壤中铜污染最突出的来源是金属开采和加工。然而，煤炭的开采和燃烧也会造成一些铜污染，但是关于矿区土壤中铜的来源和迁移控制因素的认识仍然是非常有限的。本研究调查了淮北矿区周边土壤铜的浓度分布变化及其同位素比值。基于煤炭开采和燃烧排放的铜与原生土壤中铜的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值不同，采用双端元混合模型确定了煤炭开采和燃烧对土壤中铜浓度的贡献。研究区土壤中铜的平均浓度为 75 mg kg^{-1} ，超过了当地土壤背景值(约为 22.13 mg kg^{-1})。靠近采煤和燃烧作业的草中 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值与研究区矸石和飞灰中的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值相近，表明地表存在重金属铜的污染。采矿投入是污染区土壤中铜的主要来源，占表层土壤中铜总量的 95%，平均占 72%。通过剖面研究显示，土壤剖面深度在 65cm 处铜的浸出中仍有 29% 的铜来源可归因于采矿排放。另外，未污染区剖面中腐殖质覆盖层低于表层土壤的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值，这是由于形成腐殖质的禾本科植物会优先吸收轻铜同位素的原因所致。污染区 $\Delta^{65}\text{Cu}_{\text{grass-soil}}$ 值低于未污染区域，主要是由于采矿排放导致污染区域植物表面吸附了重铜同位素。总体而言，在本研究中，采矿衍生物中的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 和原生土壤的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值明显不同，基于此可以量化采矿衍生物中铜的贡献，并且在研究区 60 余年的采矿作业中，铜的染污已经到达底土并通过表面吸附作用污染了研究区的草。



关键词：铜；煤矿区；土壤；同位素

个人简介：任梦溪，巢湖学院，讲师。主要研究方向为土壤重金属-有机物复合污染及生态毒理研究。

E-mail: mengxicc@126.com

利用合成生物技术以嗜盐菌为底盘建立耐盐生物修复平台

杨超

生态环境部环境规划院

摘要：渴望盐单胞菌 J9 (*Halomonas cupida*) 是中度嗜盐革兰氏阴性菌，积累相容性溶质四氢嘧啶作为主要的耐盐机制。目前，绝大多数有机污染物降解菌在高盐条件下无法生长并失去降解能力。为了克服这一瓶颈，本研究选择一种典型的环境污染物对硝基苯酚 (para-nitrophenol, PNP) 和 *H. cupida* J9 作为底盘细胞，首次证明了利用嗜盐菌构建有机污染物矿化菌株的可行性和有效性。首先，通过转录组分析和启动子强度表征，从 *H. cupida* J9 基因组中筛选出强启动子 P3、P15、P16 和 P22。当使用上述 4 个内源强启动子和异源强启动子 P8KT 时，在 J9 基因组中插入 P15-和 P8KT-pnpAB 表达盒的工程菌能够耐受并迅速降解 200 mg/L PNP。进一步，在 *H. cupida* J9 基因组中功能组装了 PNP 生物降解途径，通过 P15 和 P8KT 增强表达所有 PNP 降解基因，构建了两个稳定的基因工程菌 J9U-P15PNP 和 J9U-P8KTPNP。工程菌能够在高盐培养基中利用 PNP 作为唯一碳源进行细胞繁殖。稳定同位素分析表明，工程菌能够在高盐培养基中将 $^{13}\text{C}_6\text{-PNP}$ 转化为 $^{13}\text{CO}_2$ 。本研究表明，启动子工程是一种能显著提高有机污染物矿化效率的有效策略。本研究彰显了合成生物学从极端微生物创造新型降解菌的力量，突显了以 *H. cupida* J9 作为底盘细胞建立耐盐生物修复平台的潜能。

关键词：生物修复；对硝基苯酚；盐单胞菌；耐盐降解菌；合成生物学

作者简介：杨超，1979 年 12 月出生。2009 年 6 月在中科院动物研究所获得生物化学与分子生物学博士学位。入选 2014 年度“香江学者计划”。2015.2-2017.2 在香港大学开展博士后研究工作。目前为南开大学环境微生物与微生物催化课题组负责人，研究员，博士生导师。主要研究方向是利用合成生物技术构建基于人工微生物组的环境修复体系和高效合成生物基材料的微生物细胞工厂。迄今以第一作者或通讯作者共发表 SCI 收录论文 50 多篇，研究成果发表在 ACS Synth. Biol.、Microbiome、Appl. Environ. Microbiol.、Environ. Sci. Technol.、J. Hazard. Mater.、Sci. Total Environ. 等本领域知名期刊。作为项目负责人主持国家自然科学基金面上和青年项目、天津市自然科学基金项目。作为项目骨干承担国家重点研发计划合成生物学重点专项。E-mail: 2474254907@qq.com

挥发性有机污染地块现场分析检测技术验证评价

尹惠林

生态环境部环境规划院

摘要：依托“国家重点研发计划”场地土壤污染成因与治理技术研究项目《污染地块土层剖面钻进探测一体化技术与装备》，分析挥发性有机污染地块现场分析检测技术（MIP 为代表）特点和检测性能指标等，确定典型的评价技术设备类型，研究验证程序、指标体系、验证要求、评价方法等，开展国产挥发性有机污染地块现场分析检测技术环境技术的环境保护效果、环境影响以及从其他环境观点出发的重要性能进行科学、客观、公正的测试、分析与评价，建立装备技术验证评估方法体系，实现设备验证工作标准化和规范化国产现场检测技术装备标准化生产和市场准入要求，规范国产现场检测技术装备生产技术标准设计和运行性能验证，有效指导该设备未来在国内的推广和应用。

关键词：ETV 技术验证评价

作者简介：

E-mail: 2474254907@qq.com

双碳背景下热脱附技术装备的升级换代

肖超

杰瑞环保科技有限公司

摘要：绿色低碳已成为土壤修复发展的趋势，对土壤修复技术的研发和升级提出了新的挑战。在此背景下，热脱附技术如何进一步的节能减排，呼应“双碳”的要求是值得探讨的课题。杰瑞环保科技有限公司依托自身的系列化热脱附装备体系，不断进行热脱附技术和装备的升级优化，取得了一些阶段性的成果。截至目前，公司拥有 40 多台套的设备在全国各个现场进行作业，在这个过程中，依托大量的技术研发和工程实施经验，杰瑞在热脱附设备核心部件、设备的智能控制、热能回用等方面进行了探究，提出了热脱附技术进一步节能减排的一系列举措。依托大型有机污染工业场地 EPC 项目的技术实践，建立整个项目碳减排的全生命周期管理体系，针对工程实施的各个环节（入场前的准备、设备选择、现场实施过程、修复后验收等环节）进行节能减排的精细化控制，实现整个工程实施的低碳化和精细化。从双碳政策正式颁布后，杰瑞环保科技有限公司已在多个土壤项目现场进行了热脱附技术的应用，积累了更加丰富的经验，相信随着后续节能减排措施的不断完善和革新，热脱附技术会在未来的土壤修复项目中定位和适用场景更加的清晰，为我国土壤修复行业的发展贡献力量。

关键词：双碳；热脱附技术；工程实践

作者简介：肖超，杰瑞环保科技有限公司，工程技术研究院副院长，主要从事土壤修复工程设计、土壤修复装备开发等领域。

E-mail: chao.xiao@jereh.com

基于新能源专用车辆的土壤与地下水污染全流程防控集成装备研发与应用

Research and Application of Integrated Equipment Used Soil and Groundwater Pollution Whole Process Prevention and Control Based on New Energy Special Vehicle

温玉霜

徐州徐工环境技术有限公司

摘要：国家对土地污染整治十分重视，近几年全国有大量的重点行业企业需要进行土壤调查，土壤污染的应急检测与修复工程的需求也不断增加，我国土壤及地下水污染整治行业市场潜力巨大。而现阶段，国内用于土壤与地下水污染防治的集成式设备非常紧缺，无法满足市场需求，存在集成度低、功能类型单一、移动性差、作业效率低、工作过程存在二次污染等问题。同阶段，随着国家对新能源汽车的大力推广，技术不断迭代成熟，新能源专用汽车得以快速发展，新能源专用汽车在市政、环卫、公交等公共领域渗透率不断提高，与传统汽车相比，可以有效降低能源消耗，保护周围生态环境。结合本行业对装备的需求及新能源专用汽车的发展，开展采用电力为动力源的适用于土壤与地下水全流程防控的绿色化集成装备的研发，对其中纯电动匹配优化技术、机群动力协同分配技术、装备功能单元柔性化便捷式组合技术进行了介绍，明确了集成装备的结构及组成，对实现的功能进行了全面介绍，构建设计了场地污染情景类型，明确了集成装备适用于土壤和地下水污染采样、检测和应急处置工作，可实现有机物、重金属、生物毒性等场地污染物的实时检测、快速防控，为集成装备的协同作业提供了指导。通过集成装备的研发与应用，以期能为土壤与地下水污染防治工作提供设备的支撑和保障。

关键词：新能源；集成装备；纯电动；机群协同；场地污染

作者简介：温玉霜，徐州徐工环境技术有限公司，教授级高级工程师、产品研究所所长，主要从事环卫装备的研发工作。

E-mail: ys-wen@163.com

地下水污染 CT 扫描技术在地下水问题诊断上的应用

蔡易缙

以利沙科技有限公司

摘要：地下水的污染调查由于水文地质条件之复杂性，使得污染调查结果面临许多挑战，加上 LNAPL 及 DNAPL 的特殊性质以及污染物与土壤及地下水之交互作用关系，加上采样点数的限制，使得传统土壤及地下水污染调查结果的正确性面临挑战，如何快速且低成本地取得高密度的地下水污染信息是提升地下水问题诊断精确度的关键。地下水污染 CT 扫描技术是由国人自行研发的地下水污染快速调查技术，该技术透过实验室的砂箱实验及现地的模场试验逐步研究，发展出快速且高精确度的地下水问题扫描工具。扫描技术实施时不需要破坏地表、也不干扰工厂的正常生产或运作，即可快速获取地下水中的污染信息。该技术目前已经成功地应用在地下水污染扫描、修复药剂灌注追踪扫描、垃圾掩埋场破损渗漏点扫描等三个领域，本论文中针对这三个领域各介绍一个实际案例，地下水污染扫描以加油站污染为案例，在 14 个有效的 MIP 土壤调查结果中，相符的有 13 个土壤样点，正确率为 92.9%；修复药剂灌注追踪扫描以过硫酸盐灌注场址为案例，在 24 个地下水样品中，相符的有 23 个样品，正确率为 95.8%；而垃圾掩埋场破损渗漏点扫描的案例，经过地下水污染 CT 扫描而得到的破损点位置，经过双电极法(电气法)的进一步验证，确认破损点位置完全相同。

关键词：地下水污染；地下水污染诊断；修复药剂灌注追踪；垃圾掩埋场破损扫描

作者简介：蔡易缙，以利沙科技有限公司，研发主管。

E-mail: yjtsai28@qq.com

功能微生物驱动稻田土壤镉活化移除修复技术的研究

Study on remediation techniques for cadmium activation and removal in paddy soil driven by the functional microorganisms

蒋慧丹^{1*}, 邓燕¹, 陈希¹, 陈锦¹, 戴艳娇¹

¹ 湖南省农业科学院, 湖南省, 长沙, 410125

摘要: 微生物是驱动土壤元素循环的核心群体。镉污染稻田微生物在影响镉形态转化及迁移分布的地球化学行为过程中发挥着重要作用,并在适应镉胁迫的过程中逐渐演化形成特殊的调控机制。微生物修复技术以不改变土壤性质、不易二次污染和可原位实施等优点具有广阔的应用前景,然而稻田环境的复杂多变性和微生物受到环境制约的局限性影响了微生物修复技术的田间应用效果。课题组基于对湖南省多处典型性镉污染稻田土壤的取样调研,探究了稻田土壤微生物对镉胁迫的响应机理和水稻根际微环境中微生物对镉形态转化的驱动机制,开展了功能微生物驱动稻田土壤镉活化移除修复技术的应用研究:①利用环境基因组学分析方法从不同重金属污染环境中定向筛选针对不同形态镉转化为可溶态镉的功能菌株,进一步构建了多种功能微生物共培养体系,实现对土壤中不同形态镉的同步活化;②建立功能微生物“三段法”大规模快速培养技术和工业化菌剂发酵中试平台,以满足镉污染稻田大面积原位修复的需求;③耦合了功能微生物精准活化-纳米材料吸附净化的稻田土壤镉活化移除技术模式,完善了功能微生物原位修复后含镉处理液的净化回收,促进了田间水资源、营养元素及微生物资源的循环利用,降低了修复成本。自 2016 年在长株潭开展多点应用示范,最终研创并应用示范了首个基于功能微生物的稻田镉活化移除修复技术体系。该项技术于 2021 年 3 月参与了由湖南省农业农村厅组织的不同修复技术在镉污染稻田上的田间效果验证试验,经第三方取样检测结果显示:在土壤总镉 1.5~3.8 mg/kg 的稻田实施功能微生物活化移除修复技术,土壤总镉和有效镉的移除效率为 13.8~46.2%和 23.4~47.6%,稻米镉含量降低率为 30.9~70.3%。研究表明,通过功能微生物驱动不同镉形态转化以实现土壤镉的活化移除可望成为降低稻田镉污染的有效策略之一。

关键词: 稻田镉污染; 功能微生物; 镉活化移除; 重金属污染修复

作者简介: 蒋慧丹, 湖南省农业科学院副研究员, 湖南省农业生物技术研究微生物学研究室主任, 湖南大学研究生院隆平分院硕导, 主要从事农业生态环境微生物资源开发与应用、耕地重金属污染修复与地力提升技术的研究工作。近五年在 *Science of the Total Environment*、*Environmental Research*、*Ecotoxicology and Environmental Safety* 等期刊上发表 SCI 论文 10 余篇, 授权国家发明专利 16 项。

E-mail: jianghuidan@hunaas.cn

HDXRF 法农田土壤镉砷测定结果准确度评价与精准校正模型构建

Accuracy Evaluation and Precision Correction Model Construction of Cadmium and Arsenic Determination in Farmland Soil by HDXRF Methods

傅赵聪

中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室

摘要：传统土壤重金属检测方法具有检测精度高、检出限低、准确性强等优势，但检测复杂、时间经济成本高，难以满足大尺度空间快速检测需求。如何准确快速地获取土壤重金属含量及其分布状况是土壤污染调查和风险评估及污染修复急需解决的问题之一。X 射线荧光光谱技术是一种高效、无损、经济、绿色的土壤重金属快速检测技术，然而其测定结果的准确度易受土壤有机质、水分、矿物组分等因素的影响。本研究以西北某污灌区农田土壤为研究对象，通过对采用不同消解酸体系和前处理方法并对标准物质测定结果的准确度和精度进行评价，比选出适合西北污灌区土壤镉砷实验室分析方法；分析影响高精度便携式 X 荧光仪（HDXRF）土壤镉砷（Cd、As）测定准确度的主要因素及其定量关系，从而构建基于单因素的 HDXRF 土壤 Cd、As 定量校正模型，并采用相对误差（RE）、相对标准偏差（RSD）和决定系数（ R^2 ）对测定结果的准确度和精密度进行了评价。结果表明：（1）研究区农田土壤重金属 Cd、As 的最佳实验室分析方法为硝酸-盐酸-高氯酸-氢氟酸的石墨消解体系。（2）HDXRF 法适用于 Cd、As 快速测定，均具有较高的 R^2 ，检出限分别为 0.05 mg/kg 和 6.35 mg/kg，测定下限分别为 0.20 mg/kg 和 25.4 mg/kg，HDXRF 法 Cd 的测定下限满足 GB15618-2018 中的最低筛选值要求。（3）基于统计学校正模型的准确度无法满足农田土壤 Cd、As 污染精准调查的需求，尤其是低污染区域（ $R_{Cd}^2=0.810$ ， $R_{As}^2=0.692$ ），校正后数据具有较大检测误差；Cd、As 的水分定量校正模型分别为 $y=0.803e^{-1.3284x}$ 和 $y=8.908e^{-2.6805x}$ ， R^2 分别为 0.985 和 0.931，从 μ_w 和 R^2 数值大小来看，水分对 As 测定具有更大的影响，水分 >5% 时均会导致 HDXRF 法 Cd 和 As 测定值的显著性差异（ $p<0.05$ ）。（4）HDXRF 法 Cd、As 测定结果与有机质含量具有显著的负相关性，HA 比 Peat 对 HDXRF 测定结果的影响更大；HA 校正模型分别为 $y=-1.555x+0.780$ 和 $y=-19.45x+12.41$ ， R^2 分别为 0.934 和 0.925。HA 和 Peat 均在添加量为 2% 时出现显著差异。以 Cd 为例，HDXRF 法 Cd 测定结果与 F1（ $r=0.898^{**}$ ）、F2（ $r=-0.817^{**}$ ）、F3（ $r=-0.573^*$ ）具有较好的相关性，表明 Cd 的化学形态可能会在一定程度上影响 HDXRF 法 Cd 的测定结果。

关键词：X 射线荧光光谱法；重金属；快速检测；影响因素；校正方程

作者简介：傅赵聪，中国科学院南京土壤研究所，助理工程师，主要从事土壤重金属污染与修复研究。

E-mail: 17397959393@163.com

微生物驱动稻田土壤镉活化移除及处理液净化回用技术研究

邓燕¹, 陈希¹, 刘宏伟², 刘学端², 蒋慧丹^{1*}

1 湖南省农业科学院, 湖南省, 长沙, 410125; 2 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南省, 长沙, 410013

摘要: 微生物驱动土壤镉的活化移除是最具有前景的稻田镉污染修复技术之一, 而微生物处理后土壤含镉处理液的净化回收是实现微生物原位修复技术的关键环节。本研究将定向筛选的复配功能菌群运用于镉污染稻田原位修复试验, 结果表明: 功能菌群对土壤总镉和有效镉的活化移除效率可达到 13.8-48.3%; 微生物群落分析表明: 土壤中 *Metallibacterium*、*Acidithiobacillus* 和 *Alicyclobacillus* 的相对丰度在处理过程中逐渐升高, 土壤微生物群落结构显著改变, 其主要受到外源输入的营养元素以及微生物处理前后引起的土壤有效镉、总镉含量和 pH 值变化的影响; 进一步分析发现处理液中存在大量的 Cd、N、P 和 K 营养元素及微生物资源, 具有较高的回收利用价值; 利用活性炭 (C)、腐殖酸 (H) 和单分子纳米材料 (S) 净化含镉处理液, 发现处理液中共存阳离子及溶液 pH 对 Cd 的吸附效率有显著影响, 对 Cd 的吸附作用主要发生在 Fe 和 Al 之后; 最后将净化的处理液应用于微生物培养和土壤修复, 发现净化后的处理液可直接用于微生物培养而无需额外添加营养成分, 且对土壤修复效率比原始微生物菌剂更高。由此可见, 微生物活化移除修复技术可以有效降低土壤总镉和有效镉含量, 通过进一步探索微生物处理液的净化回用工艺, 促进了水资源、营养元素及微生物资源循环利用, 降低了修复成本, 推进了镉污染稻田绿色、高效、快速修复技术的实现。

关键词: 功能微生物; 镉污染稻田; 活化移除; 净化回用工艺; 循环利用

作者简介: 邓燕, 2022 年 6 月博士毕业于中南大学生物工程专业, 湖南省农业科学院助理研究员。主要从事稻田镉污染微生物修复技术研究, 定向筛选和复配功能微生物并将其应用于稻田原位修复试验, 在多点位大田试验中验证了功能微生物对土壤镉的活化移除效率, 解析了修复过程中微生物群落结构和功能, 并完善了处理液净化回收与菌剂循环利用工艺流程。主持了湖南省农业科技创新基金项目 1 项, 参与了国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金及省市级项目 4 项。在 *Water Research*、*Science of the Total Environment*、*Environmental Research*、*Ecotoxicology and Environmental Safety* 等期刊上发表 SCI 论文 20 篇, 授权国家发明专利 4 项。

E-mail: dengyan202103@163.com

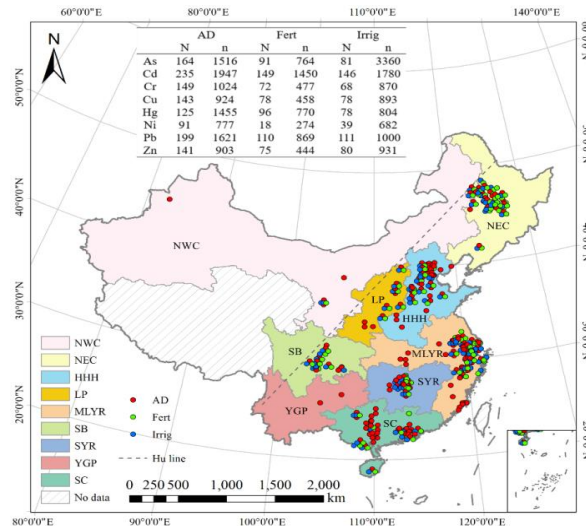
近 20 年中国农田土壤重金属输入通量时空变化分析

Input Flux and the Risk of Heavy Metal(Loid) of Agricultural Soil in China: Based on Spatiotemporal Heterogeneity from 2000 to 2021

马文玉^{1,2}, 潘瑜春², 孙在金^{3,*}, 刘昌华¹, 李晓岚², 徐笠⁴, 郇允兵^{2,*}

1 河南理工大学测绘与国土信息学院; 2 北京市农林科学院信息技术研究中心; 3 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心; 4 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所

摘要: 探明农田土壤重金属输入现状对农产品产地土壤生态环境质量管理具有重要意义。以往的研究大多是在中小尺度研究区域开展观测研究, 监测调查样点空间和时间覆盖度有限, 不足以反映中国环境质量的状况和变化趋势规律。本研究回顾了近 20 年来的相关文献, 基于时空异质性, 利用 meta 分析方法计算了中国不同地区大气沉降、肥料、粪肥和灌溉对农业土壤重金属的输入通量, 得出了较为准确可靠的结果。结果表明, 中国大气沉降重金属输入通量较大, 而肥料和粪肥输入通量相对较低。As、Cd、Cr、Ni、Pb 进入土壤的主要来源是大气沉降, 占总输入量的 12%~92%。粪肥占 Cu 和 Zn 输入量的 19%~75%。Cd 是当前中国农产品产地土壤重金属污染风险最大的元素, 大部分地区将在 100 年内达到安全限度。同时我们也需要重点关注的地区是黄淮海, 其综合污染风险较高。



土壤输入通量监测点分布

关键词: 土壤重金属污染风险; 时空异质性; 质量平衡法; meta 分析

作者简介: 郇允兵, 博士, 北京市农林科学院信息技术研究中心副研究员, 主要从事耕地质量监测评价

和时空大数据建模分析方面工作。北京土壤学会、北京土地学会理事。先后主持国家自然科学基金面上项目、重点研发计划课题 3 项，参与重点研发、863 计划、科技支撑等国家及省部级课题 10 余项，发表 SCI、EI 论文 20 篇，中文核心 30 篇，授权发明专利 10 项，获得省部级科技进步二等奖 2 项，参与国家、行业标准制定 3 项。

E-mail: gaoyb@nercita.org.cn

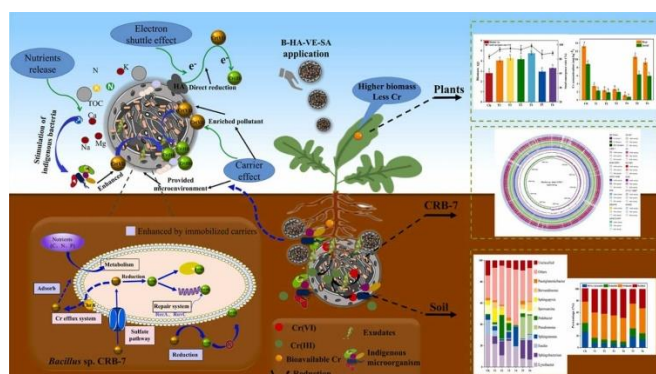
微生物-腐殖酸-蛭石-海藻酸盐固定化生物复合材料强化 Cr(VI)污染土壤修复与安全利用的策略研究

Strategy for enhancing Cr(VI)-contaminated soil remediation and safe utilization by microbial-humic acid-vermiculite-alginate immobilized biocomposite

吴明萋, 王琪琪, 王璨, 曾奇璐, 李建鹏, 吴晗, 吴斌, 徐恒*, 邱忠平

西南交通大学

摘要：生物还原是一种六价铬（Cr(VI)）污染土壤原位修复的有效方法，但进一步强化手段仍然是迫切需要的。本研究通过腐植酸（HA）、蛭石（VE）与海藻酸钠（SA）相结合包埋固定化一株高效铬还原菌芽孢杆菌 CRB-7（*Bacillus* sp. CRB-7）成功合成了一种新型固定化生物复合材料（B-HA-VE-SA）。开展了固定化菌株 CRB-7 修复 Cr(VI)污染土壤研究，从菌株 CRB-7 全基因组分析、土壤 Cr(VI)解毒效应、土壤微生态响应以及后续作物生长验证等角度综合解析固定化生物复合材料 B-HA-VE-SA 对 Cr(VI)污染土壤的修复效应和强化机制。基因组功能注释与分析发现菌株 CRB-7 基因组中存在多种有助于 Cr(VI)耐受性、Cr(VI)还原以及其他金属抗性方面的基因。结果表明，与对照和游离 CRB-7 处理相比，包埋固定化的 CRB-7 生物复合材料对土壤中 Cr(VI)的去除效果更佳。特别是 B-HA-VE-SA 主要以载体效应、养分持续释放以及电子穿梭效应等多种机制强化了生物修复过程，达到了最高的 Cr(VI)去除效率（96.18%）和残渣态铬占比（49.04%）。此外，CRB-7 和固定化剂（HA、VE 和 SA）的协同作用显著改善了土壤微生态（土壤酶活性、微生物数量和多样性），促进了微生物群落组成和功能途径的演化。最后，油菜盆栽实验验证了游离和固定化的 CRB-7 具有促进植物生长（出苗率和生物量分别提高 12.00-18.00%和 43.82-69.00%）以及减少铬累积的效果（根部和地上部位分别降低 19.47-91.09%和 29.11-89.80%）。综上所述，这些发现强调了 B-HA-VE-SA 在同时高效修复、改善微生态环境以及保障安全利用 Cr(VI)污染土壤方面的优越性。



关键词：Cr(VI)还原菌；固定化生物复合材料；全基因组；腐殖酸；蛭石；土壤微生态

作者简介：吴明慧，西南交通大学生命科学与工程学院讲师，长期从事资源与环境微生物技术领域研究，基于微生物技术，重点关注微生物强化农业废物资源化、环境污染物修复等技术开发、效应及机理研究等。目前主持国家青年自然科学基金项目 1 项，四川省自然科学基金项目 1 项，成都市技术创新研发项目 1 项，中央高校科技创新项目 1 项，并参研国家自然科学基金面上项目，科技部重大专项，四川省重点研发等国家级、省部级科研项目多项。先后在 Journal of Hazardous Material、Journal of Cleaner Production、Ecotoxicology and Environmental Safety 和 Applied Microbiology and Biotechnology 等学术刊物上发表论文 10 余篇，申请发明专利多项。

E-mail: wuminghui@swjtu.edu.cn

基于质量平衡研究利用机器学习模型预测典型大气沉降区水稻籽粒镉含量

Machine learning model for predicting cadmium concentrations in typical atmospheric subsidence area based on chemical mass balance

米雅竹^{1,2,3}; 周俊^{1,2,3}; 周静^{1,2,3}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 3 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211

摘要: 为量化分析土壤-水稻系统镉 (Cd) 质量平衡特征、有效评估 Cd 潜在污染源、选择可行的预测水稻籽粒 Cd 含量的方法, 本研究以贵溪冶炼厂周边典型大气沉降区 0~20 cm (背景区、中沉降区、高沉降区) 农田耕层土壤为研究对象, 通过化学质量平衡方法对土壤-水稻系统 Cd 的主要输入途径 (大气沉降、灌溉水、农药肥料) 和输出途径 (地表径流、土壤淋溶、籽粒带走) 开展为期三年的监测与定量分析, 并构建多元回归、反向传播 (BP) 神经网络多种模型, 开展区域预测水稻籽粒 Cd 含量的精准度研究。研究表明: 背景区、中沉降区土壤 Cd 输入主要来自灌溉水 (54.62~ 60.82%), 高沉降区土壤 (休耕地) Cd 输入主要来自大气沉降 (100%); 农药肥料带入的 Cd 年均输入量占比小于 5%, 可忽略不计。不同沉降区土壤中 Cd 的主要输出途径均为地表径流和土壤淋溶, 输出占比介于 86.66%~100%。选择土壤 Cd 含量、年大气沉降 Cd 输入通量、年农药肥料 Cd 输入通量、年灌溉水 Cd 输入通量、年地表径流 Cd 输出通量、年土壤淋溶 Cd 输出通量作为预测水稻籽粒 Cd 含量的试验参数, 分别建立多元线性回归、多元非线性回归、BP 神经网络模型、BP-GA (遗传算法) 神经网络模型。利用模型基础数据集的决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、回归值 (R) 分析得出, GA-BP 神经网络是预测水稻籽粒 Cd 含量的最佳模型 (MAE、RMSE 值最低, R^2 、R 值系数最高), 其 MAE 值、RMSE 值、 R^2 值、R 值分别为 0.0458、0.0706、0.7720、0.8786。综上, 建议对背景区和中沉降区的灌溉水质开展长期监测, 同时加强大气污染源的监测并采取一定的控制措施。GA-BP 神经网络预测模型为丰富现有预测水稻籽粒 Cd 含量的技术模型提供理论依据, 对区域水稻安全生产具有现实指导意义。

关键词: 镉; 大气沉降; 灌溉水; 水稻; 质量平衡; 机器学习

作者简介: 米雅竹, 中国科学院南京土壤研究所, 在站博士后, 主要从事土壤污染修复与治理研究。

E-mail: miyazhu@issas.ac.cn

盐碱农田土壤磷素有效性及面源污染的微生物调控

Microbial Mitigation of Soil Phosphorus Availability and Non-point Source Pollution in Saline-alkali farmland

李哲

山东大学

摘要：盐碱农田土壤的磷素调控面临着提高有效磷含量以保障作物吸收，和控制磷的淋溶流失以减少农田面源污染的双重挑战。微生物在全球磷素循环中起到重要作用，包括通过同化作用对环境中易流失磷的固定以及通过溶磷、矿化作用释放有效磷。本研究提出了以聚磷菌和解磷菌为媒介的综合生物调控手段，充分利用微生物有机磷库在土壤中作为潜在磷源的特征，提高外源磷的利用效率的同时降低磷素的流失风险。本研究通过土柱淋溶、土壤培养和盆栽相结合的微宇宙试验探究了土施聚磷菌对土壤磷素淋溶的调控效果，以及联合解磷菌剂对土壤磷素有效性的作用，并通过 NMR、三维荧光、微生物群落分析等手段研究了作用机理。结果表明施加聚磷菌能将外源无机磷转化为以磷酸单酯为主的有机磷暂时储存于胞外聚合物，从而显著降低土壤可溶态磷的淋溶。同时聚磷菌产生的胞外聚合物也有利于土壤团聚体的形成，减少颗粒态磷的流失。而耐盐碱解磷菌可以通过碱性磷酸酶等分泌物促进微生物有机磷的分解，与聚磷菌处理产生交互作用，最终综合处理提高了土壤有效磷水平，促进了盆栽小麦的生长和磷素积累。菌剂处理也对土壤微生物群落产生影响，*Lysobacter*、*Ramlibacter* 等一些本土种群丰度上涨且与土壤有效磷、碱性磷酸酶水平显著正相关。因此，以耐盐碱聚磷菌和解磷菌为基础的复合微生物调控手段可以充分利用微生物有机磷库在土壤中作为缓释磷源的特征，在磷肥增效减量的同时减少磷素流失，帮助实现盐碱农田改良过程中的面源污染防控。

关键词： 磷；盐碱地；微生物；面源污染；生物有效性；微生物群落

作者简介： 李哲，美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校自然资源与环境科学专业博士，现为山东大学博士后。主要研究领域为水土环境化学、面源污染防控。

E-mail: zhel2@sdu.edu.cn

农田重金属污染修复的全生命周期评估：方法构建与应用

Integrated life cycle assessment for heavy metal contaminated agricultural soil
remediation: method construction and application

金远亮，刘承帅

中国科学院地球化学研究所，贵州贵阳市观山湖区林城西路 99 号，5500812

摘要：针对农田重金属污染采取必要的修复或风险管控措施是保障食品安全的有效途径。然而，不合理修复治理活动产生的负面效应有时会超过修复本身，导致修复净效益为负值。科学评估所使用修复技术的环境可持续性，建立优化的污染农田管理策略显得尤为重要。目前，重金属污染农田修复相关研究主要关注治理技术研发，对技术使用过程的环境影响仅存在一些探索性研讨。针对修复技术的长期有效性、修复过程所带来的次生影响、以及固有系统边界之外的长期影响，仍然缺乏系统性的评价。因此，本研究基于扩展系统边界的生命周期方法（Consequential LCA）开展修复全生命周期建模。通过引入伤残折损年（DALY）量化与修复有关的污染物环境健康毒性，以及利用边际生产的市场均衡理论估算修复后土地使用改变的长期环境效应，实现了修复全过程一、二、三次环境影响的科学量化。

应用构建的全生命周期模型，系统评估了无干预、植物提取、化学稳定化和替代种植的总体环境影响。结果显示，污染农田若不采取干预将产生最大的环境影响，主要来源于饮食摄入产生的健康风险。实施植物提取和化学稳定化具有总体的环境正效益，使无干预情景的环境影响分别降低 67%和 69%。其中，化学稳定化方法具有最佳的环境可持续性。植物提取在生物富集系数和稳定化药剂的长效性是决定两者相对环境优势的决定因子。污染农田实施替代种植如果考虑修复后的种植改变，将产生 71%的额外影响，具有较大的不确定性。本研究构建的方法为农田修复技术选择提供一个更全面评估方法以支持更全面的政策制定，并对各种修复技术的未来发展提供了启示。

关键词：农田重金属；土壤修复；生命周期建模；环境影响；管理策略

作者简介：金远亮（1989- ），中国科学院地球化学研究所，博士后/助理研究员，合作导师：刘承帅 研究员。主要从事土壤重金属污染来源解析与修复全生命周期建模方面的研究。

E-mail: jinyuanliang@mail.gyig.ac.cn

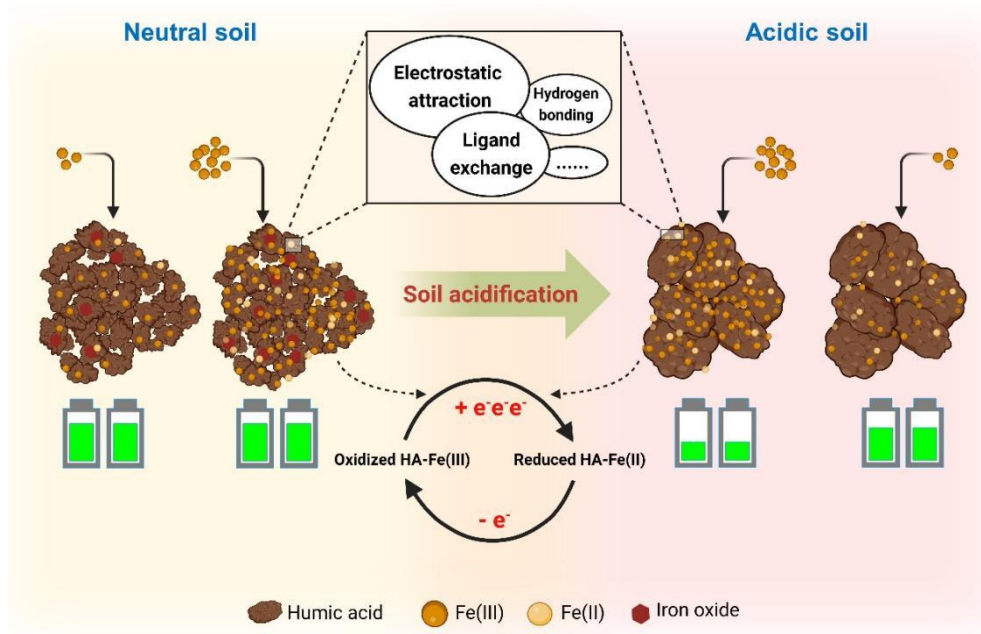
土壤酸化作用下腐植酸-Fe(III)络合机制与氧化还原性能

Complexation and REDOX properties of humic acid-Fe (III) under soil acidification

唐舒婷, 汪彩琴, 潘响亮

浙江工业大学环境学院, 杭州, 310014

摘要: 近几十年来, 由于人类活动影响, 土壤酸化过程持续加剧。HA 与 Fe(III)对土壤酸碱度极为敏感, 随着土壤 pH 降低, Fe(III)浓度会增加, 而 HA 不仅会发生自组装团聚, 还会改变与 Fe(III)之间的络合作用。正确认识土壤酸化对 HA 与 Fe(III)络合机制及其络合物氧化还原性能的影响对于揭示土壤酸化下的生物地球化学过程具有重要意义。本研究采用三维荧光光谱 (3D-EEM) 和傅里叶红外光谱 (FTIR) 研究了 pH 从 7.0 降低至 4.0 的土壤条件下, HA 与 Fe(III)之间的相互作用。同时, 运用先进的原子力显微红外光谱 (AFM-IR) 可视化分析技术和扫描电子显微镜 (SEM), 深入分析了 HA-Fe(III)络合物的纳米化学结构, 并揭示了 HA-Fe(III)络合物的结合机制。在此基础上, 通过电化学工作站评估了随着土壤 pH 的降低, HA-Fe(III)络合物的氧化还原性能变化。研究表明, 土壤 pH 降低使 HA-Fe(III)颗粒倾向于聚集成更紧密的结构。此外, 羧基和酚羟基是 HA 与 Fe(III)主要结合的位点, 同时 Fe(III)也与 HA 中的荧光活性基团结合, 导致 HA 发生荧光淬灭现象。HA-Fe(III)络合物的还原性较其氧化性更强, 在酸性条件下, HA-Fe(III)的电子交换容量随 Fe(III)浓度的增加变化显著, 当加入的 Fe(III)浓度升高至 10 μM 时, 较未加 Fe(III)的 HA 的电子交换容量 (EEC) 降低了 28.84%, 可能是由于低浓度 Fe(III)占据了 HA 的部分可传递电子的位点, 减弱了氧化还原能力, 导致电子交换容量降低。本研究为土壤酸化过程中 HA 与 Fe(III)离子相互作用的机制, 并对这种相互作用可引起的潜在的地球化学过程提供了新的见解, 可为评估和调控酸性土壤中 C、N、S 等元素循环及污染物迁移转化提供理论支撑。



土壤酸化作用下腐植酸-Fe(III)络合机制与氧化还原性能示意图

关键词：土壤酸化；腐植酸；Fe(III)；络合机制；氧化还原苯

作者简介：唐舒婷，浙江工业大学，博士在读，主要研究方向为土壤有机质的地化行为；汪彩琴，浙江工业大学，讲师，主要研究方向为土壤污染修复；潘响亮，浙江工业大学，教授，主要研究方向为环境修复技术等。

E-mail: tst0417@163.com

基于低积累作物品种的污染耕地安全利用技术

Safe utilization technology of polluted agricultural land based on low heavy metal accumulating cultivars

廖晓勇, 王亮, 刘齐庆

中国科学院地理科学与资源研究所

摘要: 农田土壤重金属污染已成为世界范围内严重的环境问题, 给粮食安全和公众健康带来巨大威胁。利用重金属低积累品种 (Low HM accumulating cultivars, LACs) 来降低农产品重金属风险是一项应用前景广阔、实用性强的污染耕地安全利用技术。然而, 目前对于 LACs 的概念、筛选鉴定标准、低积累的生物化学机制以及区域性的应用策略仍存在许多不确定性。本报告综述了多年来国内外在 LACs 领域取得的重要进展, 定义和完善了 LACs 概念和鉴定标准, 评估发现已鉴定的 LACs 平均降镉率为 58% 左右, 应用效果显著。总结提炼了 LACs 阻隔镉的生物化学机制: 一是通过分泌更少的低分子量有机酸和更弱的阳离子通道蛋白活性减少根部对镉的吸收; 二是通过更强的根部细胞液泡区隔化和细胞壁滞留作用减少镉经木质部由根向地上部转运; 三是通过更强的节点阻隔作用和对镉的再分配作用降低其由地上部向糙米的转运。介绍了国内外 LACs 的代表性工作以及 “Cd-LI” 模式、“LIHAP” 模式、“高低水稻混/间作” 模式等 LACs 应用的三大技术模式。最后提出了未来 LACs 研究需要重点解决的几个关键问题。



关键词: 农田; 重金属; 低积累品种; 低积累机制; 安全利用

作者简介: 廖晓勇, 中国科学院地理科学与资源研究所科研处处长, 所务委员, 二级研究员, 国家杰出青年基金获得者、国家万人计划科技创新领军人才、国家现代农业产业技术体系岗位科学家, 主要从事受污染耕地修复与安全利用机理和技术研究, 是我国较早从事污染土壤修复技术研究和工程示范的学者之一。在国内外环境领域重要学术刊物发表论文 160 余篇, 其中高质量论文 70 余篇, 授权国家发明专利 27 项。

E-mail: liaoxxy@igsnrr.ac.cn

两种景天镉积累特性差异对污染农田修复效率的影响

陈锦，戴艳娇，蒋慧丹，邓燕，聂阳阳

湖南省农业科学院，湖南省，长沙市，410125

摘要：为探讨 Cd 超富集植物东南景天和伴矿景天对污染农田的修复效率差异，本研究在湖南地区同时开展了两种景天田间栽培试验。结果表明，东南景天各生育期比伴矿景天提前 20 天左右；东南景天地上部 Cd 含量随种植时间呈快-慢-快趋势增长，旺长期增长缓慢，Cd 移除贡献率从大到小依次为茎>花>叶>根，伴矿景天 Cd 含量随种植时间逐渐增加，Cd 移除贡献率为叶>茎>花>根；同一田间栽培条件下，伴矿景天地上部单株生物量、Cd 含量、富集系数、Cd 移除量理论值均显著高于东南景天。但东南景天生根快、成活率高、不易染病，故其 Cd 移除量实测值为 173.58-174.00 g ha⁻¹ 且年际间差异较小，伴矿景天 Cd 移除量实测值为 137.71-199.91 g ha⁻¹ 且年际间差异大。东南景天和伴矿景天 Cd 移除效率最佳的收获时间分别为末花期初期（5 月上中旬）和整个末花期（6 月上旬）。综上，东南景天和伴矿景天对 Cd 污染土壤皆具有较好的提取修复效果，且伴矿景天修复潜力大于东南景天，适当采取栽培措施可促进修复效率的提高，本研究将为两种景天在我国南方地区的镉污染土壤修复工程实践提供理论和技术支撑。

关键词：重金属超富集植物；东南景天；伴矿景天；污染土壤修复

作者简介：陈锦，湖南省农业环境生态研究所，助理研究员，主要从事农田重金属超富集植物修复相关研究。

E-mail: 330792864@qq.com

重金属污染土壤修复过程中铁锰氧化物作用与功能调控

卢涛，王子威，王宜，段贤杰，陈炜豪，刘凡，邱国红

华中农业大学 资源与环境学院 430070

摘要：农田土壤重金属污染威胁粮食生产安全，而钝化修复降低重金属活性与生物有效性是实现粮食作物（如小麦）安全生产的有效途径，也是污染农田边生产边修复重要发展模式。铁锰氧化物是土壤中广泛存在的高吸附氧化活性矿物，然而其对弱碱性旱地土壤 Cd 的钝化性能及小麦 Cd 富集的影响尚不清楚。本工作采用腐殖酸、生物炭和沸石复合物钝化修复河南省新乡市境内弱碱性麦田土壤，实现了小麦安全生产与应用示范，主要作用还是调控土壤铁锰氧化物功能降低了 Cd 活性，并采用盆栽实验进一步验证了铁锰氧化物对弱碱性旱地土壤 Cd 的钝化效果和机理。结果表明腐殖酸钾、生物炭和沸石复合修复剂在钝化 Cd 同时，可调控土壤中铁锰氧化物吸附固定重金属作用，将土壤可交换态 Cd 转化为铁锰氧化物结合态 Cd，进而使高污染（Cd 含量 $4.26 \pm \text{mg kg}^{-1}$ ）土壤中有效 Cd 含量下降 76.5%–84.8%，实现了小麦的安全生产。单一组分对固定 Cd 的贡献顺序为腐殖酸钾 > 生物炭 > 沸石。而对重金属污染严重的场地土壤，可通过小分子有机酸还原土壤铁锰氧化物降低其结合重金属含量，淋洗辅助电化学吸附或光化学絮凝技术成功实现了重金属污染场地土壤的修复。柠檬酸能有效提取土壤重金属，降低重金属有效态和铁锰氧化物结合态，对场地土壤重金属污染有好的去除效果；电化学吸附与电化学絮凝是有效的技术去除水体及淋洗液中重金属；有机酸淋洗与直接太阳光照结合的方法可用于重金属污染土壤修复。上述方法具有低能耗和低成本优势。这些结果为重金属污染农田和场地土壤修复提供了新策略。

关键词：重金属污染；铁锰氧化物；钝化；淋洗；土壤修复

作者简介：邱国红，华中农业大学教授，环境科学与工程系主任，研究领域为重金属污染与土壤修复。

E-mail: qiugh@mail.hzau.edu.cn

水稻叶片和根系吸收大气沉降镉的同位素证据

周俊

中国科学院南京土壤研究所

摘要：大气沉降是地表重金属的重要来源，弄清这部分重金属在表生环境中的生物地球化学过程将有助于预测其环境归趋和风险。目前研究主要关注农田土壤“新”来源镉的输入通量，缺乏对其土壤环境行为和对作物富集贡献的研究，严重制约了对“新”来源镉的风险评估。不同于其它污染来源，大气沉降会对土壤和作物产生双重效应：大气沉降即可增加土壤总镉和有效态镉含量，促进作物根系吸收，也可沉降至作物叶面被叶片直接吸收，然而目前对叶片的吸收方式、过程、机制和生物效应缺少认识。本研究结合土壤置换、镉稳定同位素示踪、同步辐射等技术，弄清大气“新”沉降镉在土壤-水稻中的迁移、形态转化以及生物富集的制约因素。本研究量化了大气“新”沉降镉对水稻籽粒贡献高达 27%–45%，而这部分大气沉降只占土壤 Cd 库的 0.8-5.5%，说明大气镉严重制约粮食安全。通过同步显微镜 X 射线荧光(SR- μ XRF)观测和镉稳定同位素示踪发现水稻茎和籽粒中的镉主要来自根吸收的土壤原有镉和大气“新”沉降镉，因为水稻节点阻碍了叶片吸收的“新”沉降镉向籽粒转运。

关键词：镉同位素;大气沉降;水稻富集;叶面吸收

作者简介：周俊，1988 年 4 月出生于安徽合肥，博士，研究员。先后于 2010 年、2013 年和 2016 年在安庆师范学院、贵州大学和中科院生态环境研究中心获得学士、硕士和博士学位；2016 年 7 月-2019 年 10 月在中科院南京土壤研究所工作，2019 年 11 月-2023 年 1 月在麻省大学洛厄尔分校从事博士后研究，2023 年 3 月聘中国科学院南京土壤研究所研究员。主要从事大气-地表重金属交换通量、环境效应和土壤污染修复方面的研究，第一/通讯（共同）作者在 Nature Reviews Earth & Environment、Nature Communications、Environmental Science & Technology 等期刊发表 SCI 论文 50 余篇，作为第一申请人授权国家专利 2 项；主持国家自然科学基金项目 2 项，参与国家重点研发计划、江西省重点研发计划、美国国家自然科学基金等项目，任 Frontiers in Environmental Science 期刊副主编。

E-mail: zhoujun@issas.ac.cn

镉污染农田小麦安全生产技术与难点解析

高岩

江苏省农业科学院农业资源与环境研究所

摘要：小麦籽粒镉易超标问题严重影响了受污染耕地的安全利用，危害农产品质量安全。本研究基于苏南两个典型镉污染区 500 个监测点位分析结果，发现苏南稻麦轮作区小麦籽粒镉超标率远超水稻，且小麦对土壤镉的富集系数高于水稻。土壤镉浓度是影响小麦镉积累程度的主控因子，施用钝化剂材料或提高土壤 pH 降低小麦籽粒镉浓度的效果有限，土壤镉不超标的中性、弱碱性土壤中小麦镉超标率仍较高。在掌握小麦镉超标风险与累积特性的基础上，研发了基于功能微量元素调控的小麦镉吸收阻控技术：1、针对基施常规功能元素肥与小麦镉吸收敏感时期匹配度不足的问题，研制了不同缓释期的薄膜和颗粒缓控释锰肥、锌肥，发现包膜缓释锰、锌肥在小麦生长后期对土壤锰和锌的供给显著高于响应颗粒肥，弱碱性土壤中分别使小麦籽粒镉浓度降低 31%和 34%，可有效保障轻度镉污染农田小麦的安全生产。2、研发制备了纳米羟基磷灰石负载锌（nHAP@Zn）新型叶面阻控剂，nHAP 可通过增加锌溶液与小麦叶片的粘着力来提高 Zn 的利用效率，显著提高小麦体内 Zn 的浓度，降低小麦根系与节点中镉/锌转运蛋白基因（TaIRT1、TaNramp5、TaZIP5、TaZIP7、TaZIP3 等）的表达，显著抑制小麦对镉的吸收与转运，最高可使小麦籽粒镉浓度降低 31%。在轻度镉污染土壤中，合理利用功能元素肥结合低积累小麦品种应用技术，可以实现低成本的小麦安全生产与品质提升；但在镉污染浓度较高的土壤中，当前安全利用技术难以实现小麦的安全生产，采用替代种植进行边生产边移除可能是有效的解决途径之一。团队基于长江流域适宜的稻-油轮作模式，系统筛选出秸秆镉高累积、籽粒镉低累积的高生物量甘蓝型油菜品种，建立了黑曲霉发酵柠檬酸液体肥强化油菜提取土壤镉的绿色移除技术，在施用黑曲霉发酵液条件下油菜秸秆镉富集系数最高可达 3.55，按照线性关系计算种植 4 茬可使土壤 Cd 浓度降低 60%，并分析了镉污染麦田安全利用难点问题与一些思考。

关键词：镉；污染农田；安全利用；小麦；微量元素拮抗；植物移除

作者简介：高岩，研究员，土壤环境与污染修复研究室主任。南京农业大学、南京林业大学、江苏大学硕士生导师，南非夸祖鲁-纳塔尔大学（University of KwaZulu-Natal）博士生导师。江苏省“333 高层次人才培养工程”第三层次培养对象、江苏省“六大人才高峰”高层次人才培养对象、江苏省农业科学院中青年学术骨干。

E-mail: ygao@jaas.ac.cn

有机污染土壤绿色低碳热修复技术研究及应用

Research and Application of Green and Low Carbon Thermal Remediation Technology for Organic Polluted Soil

詹明秀^{1,2}, 张生东¹, 徐旭¹, 王进卿¹, 焦文涛²

1 中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

摘要:我国因城市产业结构调整,工业搬迁产生了大量遗留污染地块,引发了严重的环境安全和人体健康问题,其污染修复迫在眉睫。现有场地有机污染土壤热修复技术均面临能耗偏高问题,本报告针对水泥窑、陶粒窑协同处置等高温($\geq 800^{\circ}\text{C}$)热修复技术,阴燃中温($450^{\circ}\text{C}\leq T<800^{\circ}\text{C}$)热修复技术和原位热传导、电阻加热、蒸汽加热以及热耦合微生物、化学氧化等低温($<450^{\circ}\text{C}$)热修复技术,探究有机污染土壤热修复过程中多场耦合条件下污染物的迁移转化机制,建立精准刻画污染物宏观迁移与微观反应的数值模型,阐明实际修复场景多因素影响污染物迁移转化路径的机理,创建低碳热修复技术优化方法,为多技术联用突破单一热修复碳排放高的瓶颈提供科学依据。同时,构建“热-湿-电”多场耦合作用下污染物的迁移转化预测模型,为土壤有机污染修复过程的高精度预测提供数值模型支撑。基于上述研究,开发污染土壤原位热修复参数优化智慧平台软件,采用余热回用、技术耦合、能量梯级利用等方式,研发系列有机污染土壤绿色低碳热修复技术装备,实现综合节能 $>10\%$,并结合有机污染土壤热修复项目典型案例讲述减污降碳的技术堵点及可行的解决方案。本研究将为我国有机污染土壤低碳可持续修复提供重要科技支撑。

分类	温度范围	是否开挖	名称
低温热修复	$<450^{\circ}\text{C}$	异位	异位直接热脱附技术
			异位间接热脱附技术
			堆体热脱附技术
		原位	热传导技术
			电阻加热技术
			蒸汽加热技术
中温热修复	$450^{\circ}\text{C}\leq T<800^{\circ}\text{C}$	/	阴燃修复技术
高温热修复	$\geq 800^{\circ}\text{C}$	/	水泥窑、陶粒窑等协同处置技术

关键词: 有机污染土壤; 热修复; 余热回用; 数值模型

作者简介: 詹明秀, 中国计量大学, 副教授, 有机污染土壤修复。

E-mail: zhanmingxiu@cjlu.edu.cn

有机污染的定向环保生物修复技术

白鹤，宋景鹏

天津华勘环保科技有限公司

摘要：我国土壤环境风险得到基本管控，《国务院关于 2022 年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告》中明确指出，农用地土壤环境状况总体稳定，重点建设用地安全利用得到有效保障。针对“十四五”双碳背景下土壤修复的新要求，我司提出了定向环保生物修复技术，开发了系列 EPT 菌剂，开展了生物修复技术关键性新材料和新技术的科技攻关，加强土壤复合污染绿色低碳修复的系统布局，最终形成了一套适用于不同情景的绿色低碳技术体系，应用前景广阔。

关键词：有机污染物；定向生物修复；环保生物制剂

作者简介：白鹤，天津华勘环保科技有限公司副总，天津市生态环保局专家，土壤修复评审专家。

E-mail: baihejerry@126.com

高风险污染地块风险管控与协同修复关键技术研究与实践

Research and engineering practice on risk management and combined remediation technology in high-risk contaminated site

沈婷婷

上海勘察设计研究院（集团）股份有限公司，上海环境岩土工程技术研究中心

摘要：我国土壤和地下水污染形势严峻，采用阻隔技术管控高风险污染地块已成为重大需求，在后修复时代发展趋势显然，并在近年工程实践中得到了大量的应用。但受限于“风险源未消除或降低”，逐年增加的“僵尸”管控地块无法开发利用。同时，由于阻隔屏障设计依据不足，材料功能单一、施工质量难以有效控制，阻隔屏障的服役性能尚不能满足需求。因此针对风险管控地块，如何保障阻隔屏障的服役性能，并在服役期内结合需求提出合理有效的管理目标和治理模式，基于水土环境质量的长期监测和制度控制，协同原位绿色修复技术实现污染源消减降低风险的方法，尚缺乏研究与实践。本项目结合室内试验获取阻隔屏障功能材料性能参数，提出多场景阻隔屏障设计方法，借助大型模型试验评估阻隔屏障的长期服役性能。改良传统施工技术，研发多轴小直径搅拌桩和 HDPE 膜相结合的多种新型垂直隔污屏障技术与设备，提高屏障隔污性能和施工便利性。基于典型高风险污染地块关键风险问题和治理模式的筛选，提出分区分类“管控+修复”的治理模式。建立兼顾环境（水、土、气质量）与工程安全（阻隔屏障体变形）的多因素高风险污染场地长期监控体系；针对不同分区的特点，研发适用的原位绿色降解、精准多相抽提等与长期监控体系耦合的污染源削减系列技术，为高风险污染地块的管控和治理提供重要技术支撑。

关键词：风险管控；阻隔设计；服役性能；源消减；长期监控

作者简介：沈婷婷，华东理工大学环境工程专业，硕士，上海勘察设计研究院（集团）股份有限公司生态环境院副总工兼技术部经理、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会青委会通讯委员，长期从事环境岩土工程技术咨询与研发、工程实践、项目管理和科技创新管理工作。已累计主持、参与各类工程 100 余项，其中包括污染场地修复治理总承包项目 30 余项，获国家和上海市优秀工程一/二等奖 10 项。作为主要实施人、骨干研发人员先后参与科技部重点研发土壤专项子课题 1 项，上海发改委子课题 1 项，国家自然科学基金项目 1 项、上海市科委社发重点项目 10 余项。发表科技论文近 10 篇（SCI 1 篇），申报专利 68 件，获授权 40 余件，软件著作权登记 5 项。参编行业和地方标准规范 5 部。

E-mail: shentingting@sgidi.com

城市工业场地地下建筑结构对污染调查与修复管控的影响分析

潘澄，张鸿斌，张宗文

江苏禾荔环境修复有限公司

摘要：随着城市发展及“退二进三”政策的施行，产生了大量存在工业企业生产历史的城市场地，需开展相应污染调查及管控与修复工作。对于场地调查、修复或管控工作，现行的技术导则虽提出了各项要求，但而在实际工作中，关注重点大多集中于地块使用历史、工业厂房内生产布局、污染因子识别等；对于地块内地下结构，通常也仅为关注地下水池等构筑物结构及地下管线排布等，却忽视了建筑物自身结构对地块污染可能产生的影响。通过大量的实际工作发现，对于涉及历史上存在工业厂房的地块，其厂房整体建筑构造，特别是地下结构类型的不同，往往会对地块内水文地质、污染分布、迁移特征产生一定非规律性空间变异现象，进而影响到污染修复或管控方案的设计、实施效果，以及后续地块环境管理与安全利用等工作。结合长期以来的实际工作项目案例分析，城市工业场地的地下结构对地块污染特征的影响主要存在以下方式：①地块水文地质资料产生时空差异性；②污染源分布空间异常偏差；③污染迁移路径非规律性偏移；④修复及管控实施效果偏离预期。不同的地下结构对污染特征均存在相应的特异性影响，因此，在充分获取建筑物地下结构信息与实际情况综合分析的基础上，才可将由此产生的不利影响降至最低。此外，基于地块后续开发利用方式，相应的修复或管控工作也因充分考虑相应建设开发的地下结构影响，从而保障地块实现安全利用。

关键词：城市场地；地下结构；污染调查；修复管控

作者简介：潘澄，江苏禾荔环境修复有限公司 高级工程师，从事场地调查及污染地块修复治理工作。

E-mail: paazz10c@163.com

热带沿河流域稻菜轮作系统中当前使用除草剂的多介质赋存

Occurrence and distribution of current-use herbicides in a river basin dominated by tropical rice–vegetable rotations

谭华东^{1,*}, 何筱瑜^{1,2}, 梁悦夫^{1,3}, 武春媛¹

1 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南省 海口 571101; 2 贵州大学, 贵州省 贵阳市 550025; 3 华中农业大学, 资源与环境学院, 湖北省 武汉 430070

摘要: 草甘膦 (GLY) 和草铵膦 (GLU) 是中国农业市场上应用最频繁、最频繁有机磷除草剂 (OPHs) 种类之一; 苯氧基酸除草剂 (PAAAs) 2, 4-二氯苯氧基乙酸 (2, 4-D) 和 2 甲 4 氯 (MCPA), 酰胺类除草剂 (ANHs) 丁草胺 (BUT)、乙草胺 (ACE) 和丙草胺 (PRE) 通常用于热带农业中, 然而其在稻菜轮作系统多介质赋存特征研究不明。为此, 开展中国海南南渡江流域水稻-蔬菜轮作中土壤、水、水体悬浮颗粒物 (SPM) 及沉积物中赋存特征研究。结果显示, 2, 4-DP、2, 4, 5-T 和 2, 4, 5-TP 很少被检测到, 其他除目标除草剂的检出率在 6.2%~99.3%之间, 其中 GLY 及其主要代谢物氨甲基膦酸在土壤 (88.2%和 99.3%)、SPM (94.4%和 86.1%) 和沉积物 (92.4%和 86.11%) 检测频率较高。与 GLY 和 AMPA 相比, GLU 在水中的残留浓度和检出率最高。在 76.5%的环境样品中, 丁草胺在中等浓度下检测到, 范围从 0.1 ng g⁻¹ 到 1.0 ng g⁻¹。丁草胺在土壤、SPM 和沉积物中检测频率也相对较高 (87.9%至 89.3%), 并且高于在水中的检测频率。与丁草胺相比, 水中乙草胺的中位浓度 (0.21 µg L⁻¹) 和检出率 (86.1%) 较高。MCPA 和 2, 4-D 在含中等 DFs 的水中的发生率 (> 0.1 µg L⁻¹ 样品分别为 20.1%和 45.8%) 高于其他环境介质 (<11.1%环境样品>1.0 ng g⁻¹)。总体而言, 环境介质中的浓度和 DFs 通常按 OPHs > ANHs > PAAAs 或 OPHs > PAAAs > ANHs 的顺序排列。在四个环境区室中, OPHs 占总除草剂浓度 82.3%~99.0% (平均=97.2%), AMPA 和 GLY 是主要的 OPH 物种。

关键词: 除草剂; 环境介质; 赋存特征; 稻-菜轮作

个人简介: 谭华东, 中国热带农业科学院环境与植物保护所, 助理研究员, 有机污染物的环境行为及效应研究。

E-mail: tanhuadong1991@163.com

根际微生物-香根草在尾矿库生态治理中的互作机制

Interaction mechanism of rhizosphere microbial-vetiver in ecological management of tailings pond

吴斌^{1,*}, 徐恒²

1 成都理工大学生态环境学院, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室; 2 四川大学生命科学学院, 生物资源与生态环境教育部重点实验室

摘要: 香根草是一种常见的镉稳定化植物, 常用于尾矿库的生态治理, 而根际微生物在植物稳定化修复中具有重要调控作用。近年来, 课题组围绕香根草镉积累特征、根际微生物群落演替、微生物强化机制开展了系列工作。取得的主要研究成果如下: (1) 香根草具有突出的镉耐受性和超积累特征, 即使在 20 mg/kg 镉污染土壤中, 香根草也能正常生长, 根系的镉积累量达到 258 mg/kg; (2) 香根草根系和非根系土壤的微生物群落结构具有显著差异, 根际土壤细菌指数多样性高于非根际土壤, 同时根际土壤中的 *Sphingomonas*, *Lysobacter* 和 *Gemmatimonadetes* 等有益微生物丰度较高, 揭示了香根草积累镉过程的根际微生物群落演替规律; (3) 选择性分离出以解磷菌 SNB6 为代表的有益微生物, 构建了根际解磷菌的全基因组图谱, 揭示了根际微生物耐受镉、促植物生长的分子机制, 宏转录组揭示了解磷菌可以诱导香根草 *Nramp5* 基因过表达, 促进香根草根系积累镉; (4) 以生物碳-微生物-香根草构建联合修复体系, 揭示了有益微生物根际定殖与土著微生物的共线性关系, 从表型特征、生理生化、转录因子等多角度全面阐述了香根草积累镉的微生物调控机制; 上述研究有助于认识尾矿库生态治理中微生物-植物互作机制。

关键词: 复合污染; 重金属; 废水; 原位净化; 自组装微生物光催化耦联

作者简介: 吴斌, 成都理工大学生态环境学研究员, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室固定研究人员, 硕士生导师, 四川省农业农村厅耕地土壤重金属污染综合防治专家组成员, 四川省农业资源环境技术咨询专家工作组成员, 主要研究方向为土壤重金属生物地球化学行为与修复, 先后主持/主研国家重点研发项目课题、四川省重点研发、成都市科技局等项目 10 余项, 发表 SCI 论文 10 余篇, 授权国家发明专利多项, 团队所形成的土壤原位修复技术与产品转化在川推广上万亩, 基本实现酸性区中低重金属污染耕地安全利用与粮食安全生产, 长期担任 *J. hazard. Mater.*、*Chem. Eng. J.*、*Sci. Total Environ* 等期刊审稿人。

E-mail: wub@cdut.edu.cn

FeOOH/ δ -MnO₂ 介导下腐殖酸对贵州锑矿区黄壤中锑形态的影响

Passivation and remediation of heavy metals in landfill in purple soil area by combination of silicon fertilizer and phosphate rock powder

马雪, 朱霞萍

成都理工大学材料与化学化工学院, 四川 成都 610059

摘要: 铁锰氧化物是土壤粘土矿物中最活跃的成分, 影响着 Sb 在土壤中的滞留和形态转化。腐殖质是土壤有机质最主要的组分, 也是土壤重金属的重要络合剂和载体, 对 Sb 的形态转化、生态毒性等产生重要影响。现有研究多针对铁锰氧化物单矿物对 Sb 的吸附、氧化、沉淀过程, 忽视了自然界中铁锰氧化物是与典型土壤结合, 且与有机质交互作用影响 Sb 等重金属的滞留。为此, 本研究模拟自然环境, 以原位制备的方式在 Sb 含量为 16795 mg/kg 的锑矿区黄壤上负载 4% 针铁矿 (FeOOH) 和 0.1% 二氧化锰 (δ -MnO₂), 将土壤质量 1%、2%、3%、和 5% 的腐殖酸分别施加到黄壤原土 (S0), 负载 FeOOH 黄壤 (S1) 和负载 δ -MnO₂ 黄壤 (S2), 开展 40 天的淹水实验, 测定了土壤弱酸提取态 Sb、可还原态 Sb、可氧化态 Sb、残渣态 Sb 以及悬浮液中 Sb 含量, 探究了 FeOOH/ δ -MnO₂ 介导下, 腐殖酸对黄壤中 Sb 形态的影响。结果表明: 随着腐殖酸添加量增加, S0、S1 和 S2 系列土壤中弱酸提取态 Sb 含量均明显下降, 最大下降率分别为 76%、44% 和 85%; 可还原态 Sb 含量均明显增加, 最大增长率分别为 75%、135% 和 83%; 可氧化态 Sb 含量分别增加了 41%、12% 和 3%; 残渣态 Sb 含量均增加 10% 左右; 悬浮液中锑含量均呈上升趋势, 分别增加了 20、16 和 41 倍。与 S0 土壤相比, 添加针铁矿的 S1 土壤中弱酸提取态 Sb 含量下降 3%~46%, 可还原态 Sb、可氧化态 Sb 含量分别增加 1.0~1.8 倍、1.7~3.1 倍; 添加 δ -MnO₂ 的 S2 土壤中弱酸提取态 Sb、可还原态 Sb 含量分别增加 19%~37%、41%~78%, 可氧化态 Sb 含量下降 16%~50%。分析不同腐殖酸添加量后各形态锑的含量变化, 发现腐殖酸对土壤中 Sb 的迁移转化与铁锰氧化物密切相关, 腐殖酸和铁锰氧化物都能有效地降低土壤 Sb 的活性。研究结果为贵州典型锑矿区黄壤中锑污染风险评估、预警和治理提供理论基础。

关键词: 土壤; 腐殖酸; 针铁矿; δ -MnO₂; 锑; 形态分布

作者简介: 马雪, 女 (1998-), 在读硕士研究生, 从事土壤重金属的污染修复研究。通讯作者: 朱霞萍, 教授。

E-mail: 2590744335@qq.com

基于治理主体的中国煤炭资源型城市矿区环境治理模式研究——以平顶山市为例

Research On Environmental Governance Model Of Mining Area In China's Coal
Resource-based Cities Based On Governance Subject -- A Case Study Of
Pingdingshan City

李晓帆

清华大学建筑学院

摘要：铁在我国绿色发展转型和“双碳”目标的大背景下，中国煤炭资源型城市矿区环境治理作为城市治理的一个特殊类型，其治理过程由政府、企业、居民及各社会团体等行动方组成。这些行动方以协商合作的方式，最大限度地发挥资源型城市的治理效益。迄今，大致可将我国煤炭资源型城市生态环境治理类型划分为政府主导治理模式、政企合作治理模式、企业主导治理模式。本研究以河南省平顶山市为案例地，系统地分析了改革开放以来，中国煤炭资源型城市矿区环境三种治理模式的基本特征、综合效益和空间差异，尝试回答中国煤炭资源型城市矿区环境三种治理模式的比较优势这个科学问题。研究的主要结论如下：

（1）从治理主体的组织结构来看，具有不同利益取向的政府、企业等利益相关方，深度参与博弈和协调活动，并在治理导向、治理资金投入、治理效益和空间分布等方面存在差异。由于三种治理模式属性的不同，作为相关利益方第三方的居民，对政府主导治理模式治理效果的感知度最高，政企合作治理模式次之，最后是企业主导治理模式。

（2）政府主导治理模式基于自身属性，治理项目多数为历史遗留且影响深远的矿区环境难题和高质量发展问题，总体上向公益性，社会效益更突出。政企合作治理模式以涉及群众公共利益的危害较大的塌陷、城市公共设施建设和污染赔偿等问题为主，兼顾了社会效益、经济效益和环境效益。企业主导治理模式的利益导向很明确，经济效益是其主要导向。

（3）从三种治理模式治理区的空间分布及治理面积的差异来看，政府主导治理模式治理区的空间分布，呈现出不规律性，面积较大的治理区主要解决社会、生态环境等影响较大的问题。政企合作治理模式其空间分布大多位于城市公共区域或矿区交界处，空间区位具有靠近城市主干道和商业区的特征，呈块状分布。企业主导治理模式根据企业效益和治理资金投入量的不同，治理区大多分布在矿区内部，呈块状分布。

（4）三种治理模式治理后土地的用途上，对不同人群的有利性存在差异。

关键词：煤炭资源型城市；矿区环境治理；政府主导治理模式；政企合作治理模式；企业主导治理模式；平顶山市

作者简介：李晓帆，清华大学建筑学院主要研究方向：生态修复，棕地再生及修复。

E-mail: xfan_li@163.com

含油污泥生物预处理：超声耦合生物表面活性剂的设备设计与试验研究

赵端¹, 李晨阳¹, 郭彩云¹, 于浩坤¹, 刘畅¹, 谭文捷², 桑义敏^{1*}

1 北京石油化工学院; 2 中国石化石油勘探开发研究院

摘要: 石油石化行业上下游产生的含油污泥量大面广, 目前常用的热处理技术存在能耗高、尾气尾水需要净化等弱点, 热化学清洗技术产生大量清洗废水、消耗大量化学药剂、绿色低碳水平不足。生物治理技术绿色低碳, 其碳排放量甚至为负值。但是, 生物治理技术不适用于高浓度的油泥治理, 需要合适的预处理技术将油泥含油量降到 5% 以下。超声过程涉及解吸、吸附和部分化学反应, 可作为生物法的预处理手段, 以大幅降低含油量、提高油泥的可生化性。生物表面活性剂绿色低碳、生物友好, 利于后续生物处理。因此, 本文研究了超声耦合生物表面活性剂作为油泥生物预处理的可行性。首先, 确定了超声处理国内南方某油田油基钻屑的工艺参数: 超声频率 25 kHz、超声功率 200 W、超声温度 30 °C、超声时间 10 min、固液比 1:3、pH 值 8.5, 此时处理后油基钻屑的含油量降为 7.52%, 除油率大于 57%。然后, 获得了生物表活处理油泥工艺参数: 鼠李糖脂投加量 5%、反应温度 70°C、反应时间 45 min、搅拌速度为 100-1000 r/min、固液比为 1:4、pH 值 8.5, 除油率大于 57%。接着, 确定了超声与生物表活的联合处理方式, 通过单因素以及响应曲面法试验优化了超声-表活耦合工艺参数: SLM-鼠李糖脂投加量为 2.53%, 反应温度为 49.16 °C, 超声声强为 0.93 W/cm², 反应时间为 11.35 min。在这些条件下, 预测及实际除油率均超过 77%, 处理后油泥含油量降到 4% 以下, 满足生物预处理的目标要求。此外, 基于 Comsol 软件模拟了超声场强分布, 结合试验数据及规律研发了一套超声-生物表活油泥生物预处理室内实验装置, 并设计了超声-生物表活成套工艺中试设备方案。

关键字: 含油污泥; 超声波; 生物表面活性剂; 生物治理; 设备设计; 场强分布

作者简介: 桑义敏, 北京石油化工学院, 教授, 教授级高工, 工学博士, 主要从事污染场地调查评估与修复等方面的研究工作。

E-mail: sangyimin@bipt.edu.cn

界面构造高效降解水中新型 PFAS 及机理研究

王宇辉, 赵文静, 张婷婷, 李尚燚*

北京化工大学

摘要: 我国是含氟消防泡沫液的生产和使用大国, 年产量超 15000 吨, 涉及水成膜泡沫 (AFFF)、氟蛋白泡沫 (FP)、成膜氟蛋白泡沫 (FFFP) 等多种剂型。该类消防剂在军事训练演习等紧急情况下被广泛使用, 而在灭火过程中使用的消防泡沫灭火剂, 也会随着消防作业废水而排放到自然环境中。其中, 使高浓度的全氟及多氟化合物 (PFAS) 及其替代品如全氟壬烯氧基苯磺酸钠 (OBS) 等在国内外军事基地周围土壤和地下水环境中被频繁检出, 对人类健康和生态环境带来潜在的危害。而具有较高氧化还原电位的臭氧分子可以攻击 OBS 的双键、醚桥和苯基磺酸盐。为了进一步提高矿化效率, 可采用臭氧耦合过氧化物 (peroxone) 强化自由基的生成, 同时通过催化剂的引入构造有效的反应界面可进一步改进催化反应效率, 高效矿化军事场地残留和过期的泡沫废液。近年来, 具有优异的导电性的二维 MXene 材料可作为捕获金属原子的锚定位点。基于此, 本文将金属与 MXenes 材料复合作为非均相催化剂, 在 peroxone 工艺中拟大幅度加快 OBS 降解效率和泡沫废液的矿化效率。与此同时, 开展现代表征技术以及 Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP) 计算阐明催化剂界面电荷分布、多相电子转移机制以及界面能量理论变化过程。该研究成果深入探索非均相催化剂在高级氧化技术中的反应机理, 为未来新型高级氧化工艺在军事 PFAS 污染场地修复领域的应用与实施提供有利的理论基础和技术支撑。

关键词: 催化臭氧氧化; 界面; 全氟及多氟化合物; 过氧化物; 军事场地修复

作者简介: 李尚燚, 北京化工大学, 副教授, 高级氧化技术。

E-mail: lishangyi@mail.buct.edu.cn

弹药销毁场地土壤重金属污染特征及影响因素

刘晓东¹, 张慧君¹, 朱勇兵², 赵三平², 王诗雨¹, 计超¹, 张海阳¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205

摘要: 弹药销毁场地土壤中 Pb、Cu、Zn、Sr 的浓度很高, 尤其是 Pb, 最高浓度超过了 20%, Mn、Cd 和 Cr 的浓度相较于背景值也有所升高。高浓度的重金属主要存在于销毁平台焚烧笼附近区域和露天销毁区域, 弹药销毁平台土壤中金属污染程度出现差异, 主要与销毁的弹药类型不同有关, 销毁平台周边区域和附件农田土壤污染程度相对较轻。土壤中重金属浓度的空间分布特征显示出, 随着距离销毁点越远, 其浓度迅速降低; 在土壤剖面中, Pb、Cu、Zn 和 Sr 在 0~100 cm 土壤层中发生迁移, 迁移行为受重金属形态、土壤理化性质、销毁活动、地理位置、降水、径流、土壤侵蚀等多种因素的影响。PCA 和 PMF 结果显示工作平台土壤中重金属有 4 个潜在来源: 轻武器弹头、曳光弹、炸药等其他类型的弹药和自然源。轻武器弹头是导致土壤中 Pb、Cu 和 Zn 浓度极高的原因, 并且弹头销毁活动释放的 Pb 会导致土壤中碳酸盐结合态的 Pb 比例升高, 引起土壤中 Pb 的迁移能力增强, 最终导致 Pb 污染风险增大。此外, 弹药销毁场地土壤中高浓度的 Pb 很大可能是因为弹头中金属在高温下直接气化和熔融, 冷凝后以金属颗粒物的形式进入土壤中, 这与轻武器靶场 Pb 污染途径不一样。

关键词: 弹药销毁场; 土壤; 重金属; 污染特征; 来源解析; 影响因素

作者简介: 刘晓东, 男, 教授, 研究方向: 环境污染与全球变化.

E-mail: ycx@ustc.edu.cn

放射性核素污染土壤和地下水修复技术

朱勇兵, 赵三平, 郇正来, 聂果, 董彬

国民核生化灾害防护国家重点实验室

摘要:全氟烷基化物(PFAS)包括过氟及多氟烷基化合物已被广泛应用于许多工业以及家庭应用, 包括纺织品、食品包装、染色和耐油处理、工业生产和灭火泡沫。根据研究, 约有 3% 的氟化物是用于灭火泡沫, 而 75% 的灭火泡沫是用于在军方基地包括灭火消防员训练, 各种灭火系统测试及灭火。含氟消防泡沫在 60 年代即开始使用, 尤于其极佳的灭火效果, 美国国防部要求含氟消防泡沫必须被使用, 尤其在意外失火的紧急情况。自 50 年代氟化物的生产, 氟化物的组成多样, 至今有逾七千种, 而被用于消防泡沫的氟化物可随着制法、制造厂商也多有变化。长链的“过氟”化物属于最初期的消防泡沫, 它们的毒性已被确认。自 70 年起, 氟化物厂商已开始使用长链及短链的“多氟”化合物于消防泡沫的制造。这些多氟化合物大多缺乏标准样, 且在环境中可以转换成高毒性的过氟化物。根据目前美国空军的数据, 有 78% 的空军基地混合使用了过氟及多氟化物组成的消防泡沫。目前学界、业界及制造业对多氟化物在环境中的变化, 其扩散及转化成过氟化物的快慢均不清楚。基于含氟化物或多或少都造成污染, 无氟消防泡沫的研究兴起, 其研究包括了消防效果、毒性研究、及其与目前消防设备的兼容性、旧设备清洗及取代, 及其相关费用。除了含氟转换成无氟消防泡沫, PFAS 在多年来的使用及排放所造成的污染使社会付出了极大代价。本演讲将分享美国在近十来年所经历的 PFAS 风暴, 并客观的分析未来研发的方向。

关键词: 放射性核素; 核事故; 土壤污染; 地下水污染; 修复技术

作者简介: 朱勇兵, 军事科学院防化研究院高级工程师, 中国环境科学学会土壤与地下水专业委员会委员, 中国土壤学会土壤环境专委会、土壤修复专委会委员。主要研究方向: 军事特种污染监测与评价、军事污染场地调查与风险评估、军事场地污染控制与环境修复等领域研究。先后主持和参与国家重点研发计划、中科院重点部署项目、国家自然科学基金、军内科研项目等 20 余项科研课题研究, 获军队科技进步奖 6 项, 主持和参与出版学术著作 6 部, 在国内外学术期刊(会议)发表学术论文 60 余篇。

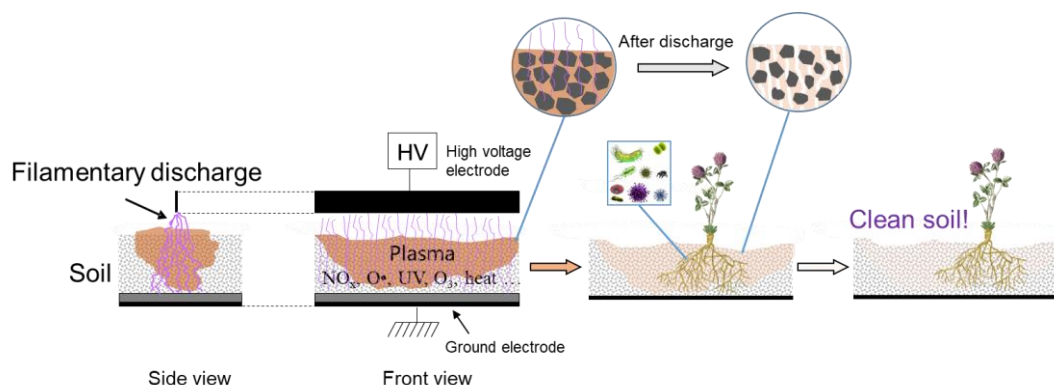
E-mail: zhuyb16@mail.ustc.edu.cn

低温等离子体去除土壤及水中全氟化合物等卤代 POPs 研究

张晗, 朱大海, 高小婷, 战佳勋, 赵婧怡, 张茵茵, 刘亚男

东华大学环境科学与工程学院

摘要: 低温等离子体由于不需要另外投加化学药剂即可产生各种活性粒子而被称为“绿色处理技术”, 并逐渐成为环境领域研究的热点。在等离子体土壤处理过程中, 该技术除了能够快速有效地降解全氟化合物等卤代 POPs 有机污染物之外, 还可以通过放电过程中产生的活性粒子和物理形式的能量实现污染土壤的快速脱毒和理化性质改良。在等离子体水处理领域, 为了充分利用其原位放电所产生的电子、带正电的重离子、UV、O₃、强电场、冲击波及各种自由基 (·O、·O₂、·OH 等), 可通过微纳米气泡强化气液传质、投加催化剂等实现其各种能量形式的充分利用, 实现全氟化合物等多种难降解有机污染物的有效去除。



关键词: 低温等离子体, 微纳米气泡, 全氟化合物, 土壤修复, 水处理

作者简介: 刘亚男, 博士, 东华大学教授, 博士生导师, 教育部新世纪优秀人才, 上海市浦江人才, 2005年在哈尔滨工业大学获得环境工程博士学位, 2009年至2011年受国家FFCSA项目资助赴法国巴黎第六大学LGPPTS实验室做博士后研究员。现任东华大学环境科学与工程学院副院长, 兼任全国循环经济工程实验室主任。主要从事基于低温等离子体、微纳米气泡及其相关技术在土壤修复及改良、水处理、生物安全防护、工业清洗、有机固废资源化及物理农业领域的研究与应用。对多介质污染物的物化协同修复技术具有深入的认识, 提出了基于原位低温等离子体氧化/还原修复及改良难降解有机污染土壤技术和原位气相放电耦合微纳米气泡处理多相污染物技术。主持国家自然科学基金、上海市科委基础研究重点项目等纵向科研项目20余项。发表学术论文100余篇, 出版专著2部, 授权发明专利23项, 获省部级科技奖励2项。

E-mail: liuyan@dhpu.edu.cn

放射性核素污染土壤和地下水修复技术

朱勇兵, 赵三平, 郇正来, 聂果, 董彬

国民核生化灾害防护国家重点实验室

摘要: 放射性污染是指由于人类活动造成物料、人体、场所、环境介质表面或者内部出现超过国家标准的放射性物质或者射线。核电生产和核燃料循环活动、医疗、科研或工业放射性物质的生产和使用、核武器的生产试验和使用、重大涉核事故, 造成的放射性物质的扩散, 并最终造成相关场地的土壤和地下水放射性污染。放射性污染以气态、液体和固态形式扩散到环境中, 通过扩散途径对场地的土壤、水体和动植物群落造成污染, 可能造成土壤和地下水污染的放射性核素有: ^3H 、 ^{14}C 、 ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 $^{134,137}\text{Cs}$ 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 $^{235,238}\text{U}$ 、 ^{241}Am 和 $^{238,239,240,241, 242}\text{Pu}$ 。在过去几十年里, 多个国家相继研究和开发了很多用于放射性核素污染土壤和地下水环境修复技术, 并开展了相关污染治理修复的工程应用。放射性污染场地修复技术可以按照技术原理、作用形式、处理位置等进行不同的分类, 放射性土壤修复技术一般包括固化法、密闭法、分离法、植物修复以及微生物修复等多种技术和方法。本文总结目前国内外放射性污染土壤和地下水修复技术, 介绍美国能源部放射性污染土壤修复技术的相关研究进展及相关修复工程案例。

关键词: 放射性核素,核事故,土壤污染,地下水污染,修复技术

作者简介: 朱勇兵, 军事科学院防化研究院高级工程师, 中国环境科学学会土壤与地下水专业委员会委员, 中国土壤学会土壤环境专委会、土壤修复专委会委员。主要研究方向: 军事特种污染监测与评价、军事污染场地调查与风险评估、军事场地污染控制与环境修复等领域研究。先后主持和参与国家重点研发计划、中科院重点部署项目、国家自然科学基金、军内科研项目等 20 余项科研课题研究, 获军队科技进步奖 6 项, 主持和参与出版学术著作 6 部, 在国内外学术期刊(会议)发表学术论文 60 余篇。

E-mail: zhuyb16@mail.ustc.edu.cn

军事场地蒸气入侵途径的风险评估研究

郭渊明

南京理工大学/北方工程设计研究院有限公司

摘要: 蒸气入侵 (Vapor Intrusion, VI) 是气态有害污染物从地下污染源向建筑物内迁移的过程。通过蒸气入侵, 气态有害污染物如挥发性有机物 (VOCs) 等可以在建筑中逐渐积累, 并对人体健康造成长期慢性或者短期急性的危害。军事污染场地的蒸气入侵风险最早在美国得到了广泛的关注, 造成了较为恶劣的社会影响, 大量的相关研究也由此而开展。本次报告将围绕于 2015-2020 年期间在美国 Hill 空军基地附近某含氯有机溶剂地下水污染场地开展的蒸气入侵途径的场地调查、风险评估以及风险控制技术的研究成果和示范展开, 系统的总结由美国 ESTCP&SERDP 项目支持的《综合评价含氯有机污染物蒸气入侵路径以及修复的方法研究》和《结合场地现场、实验室试验和模型研究改进地下水有机污染物蒸气入侵风险评价》项目的重要成果。报告主要包括: 阐述关于污染物波动性对蒸气入侵风险评准确性的影响以及相关的影响因素, 介绍“室内压力控制法”和“被动采样法”作为蒸气入侵风险评估技术的优缺点以及示范, 探讨市政排水管网作为蒸气入侵传播途径对蒸气入侵场地调查和风险评估所造成的影响, 并示范如何利用多种环境采样数据更精准的确定蒸气入侵影响范围。这些成果将对发展符合我国污染场地特征的风险评估体系有借鉴的意义。

关键词: 蒸气入侵, 风险评估, 挥发性有机物

作者简介: 郭渊明, 南京理工大学/北方工程设计研究院有限公司, 副教授, 主要研究方向为有机污染物在土壤和地下水中的迁移转化规律以及相关的修复技术、风险控制和评估技术。

E-mail: YUANMING.GUO@NJJUST.EDU.CN

炸药污染土壤的生物修复

赵三平, 朱勇兵, 杨旭, 尹茂灵

军事科学院防化研究院

摘要: 土壤炸药污染是普遍存在的环境污染问题。欧美发达国家在上世纪七八十年代以来就开始关注炸药污染问题,并利用在场地修复领域的技术优势发展了一系列的原位和异位炸药污染土壤修复方法并开展了修复工程实践,其中生物修复是最具有费效比的修复方法。作者在概述了国内外炸药污染土壤现状及修复技术进展的基础上,结合课题组近年来在炸药污染土壤修复领域的系统性工作,介绍了国内军事场地土壤炸药污染的风险识别与评价,以及土壤中炸药污染的生物有效性及其影响因素、显微漫反射方法在炸药-矿物相互作用研究中的应用;分别筛选了 TNT/RDX 和 HMX 的高效降解微生物,开展了微生物对炸药降解特性的研究,炸药暴露下微生物的生理响应,以及微生物对炸药的降解机制,利用筛选微生物开展了生物泥浆反应器修复高浓度 TNT 污染土壤的研究;从已报道的炸药降解植物中筛选 12 种植物,开展了植物对 TNT、RDX 和 HMX 的降解效果及降解机理研究,优化了栽培技术,选用典型的植物苜蓿,利用组学分析技术研究了炸药对苜蓿生长、光合特性、根系抗氧化酶系统和根系代谢的影响;利用优化筛选的植物和微生物,分别开展了低浓度、中高浓度炸药污染土壤的植物-微生物联合修复实验,在 60 天的栽培时间中转化率都超过了 80%;针对某弹药销毁场地的炸药污染,开展了生物堆修复中试研究,优化了生物堆运行条件,达到了预期的修复效果。未来世界火炸药的产量将持续增长,火炸药污染问题将长期存在。随着合成生物学时代的到来,国内外开展了炸药降解转基因植物、微生物的研究,美国 DARPA 提出的赛瑞斯计划,利用人工合成的生物菌群高效降解土壤炸药和航空燃料污染,合成生物学技术将为生物修复在炸药污染修复中的应用提供推动力。

关键词: 炸药, 生物修复, 生物有效性, 合成生物学, 微生物

作者简介: 赵三平, 军事科学院防化研究院副研究员, 环境工程博士。从事核化污染场地调查、污染处置以及污染场地的生物交叉、高级氧化修复技术研究。在国内外期刊发表论文 40 多篇,主持国家和军队科研项目 10 余项。

E-mail: spzhao@mail.ustc.edu.cn

三门峡市某铅厂遗留场地土壤重金属污染评价及来源解析研究

卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳, 张海涛

河海大学地球科学与工程学院

摘要: 随着我国城市化进程的加快和产业结构的调整, 部分企业被关停或搬迁, 遗留下大量被污染的场地。目前我国工矿企业用地土壤重金属超标率超过 30%。重金属能够对人体健康和生态环境产生巨大危害, 因此土壤重金属污染问题引起社会的广泛关注。本研究对三门峡市某铅厂遗留场地土壤重金属污染现状及生态风险进行评价, 分析其可能对人体产生的健康风险, 利用地统学研究场地土壤重金属的空间变异规律及其分布特征, 并对场地重金属的主要来源进行解析, 为后续的场地风险管控和土壤污染修复提供技术理论支撑。本研究主要结论如下: (1) 研究区内 Cr、Cu 和 Ni 未被污染, As、Cd、Pb 和 Hg 四种重金属存在不同程度的污染及生态风险。Pb、Hg 的生态风险极强, As、Cd 的生态风险中等, 研究区土壤重金属整体以低风险区为主, 部分区域处于中等风险。该场地土壤重金属总致癌风险较大。(2) 半方差函数模型拟合结果可知 Cr 的空间相关性较强, 主要受自然因素影响; Ni 的空间变异为中等相关性, 受到一定程度的人为因素影响; Cd 和 Hg 的空间相关性较弱, 受人为因素影响较大。Ni 和 Cd、Cu 和 Pb 具有相同的空间分布特征, Cr 的高值区位于废渣堆场北侧; Ni 和 Cd 高值区位于废渣堆场北侧和厂区南侧; As 的高值区位于废渣堆场南侧、炼炉区与生活区之间; Cu 和 Pb 高值区主要集中于南部的原料堆场和炼炉区。(3) 重金属污染主要集中于场地土壤中表层 (0~0.7m), 部分区域污染深度达到 2.2m。表层区域土壤类型为黄土状粉土, 其呈中密结构, 对重金属迁移具有较好阻隔作用。超标点位垂直方向的分布总体上表现为污染物浓度随深度增加而减小, 部分点位存在无规律的突然增高现象, 可能与部分区域表层存在人工回填的土壤有关。(4) 该场地土壤重金属的来源主要有土壤母质源、废渣堆积源和原料粉尘废气源 3 种。Cd 主要来自废渣堆积源, Cu、Pb 和 Hg 主要来自原料粉尘废气源, Cr、Ni 和 As 主要来自土壤母质源。PMF 模型模拟效果比 APCS-MLR 模型在区域土壤重金属污染源解析上解析效果更好。

关键词: 重金属, 地质统计学, 来源解析

作者简介: 卢小慧, 河海大学地球科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究领域为土壤-地下水渗流与污染迁移数值模拟、土壤-地下水污染源解析、土壤-地下水污染羽示踪与修复技术

E-mail: luxiaohui945@hhu.edu.cn

Investigation of waste alkali-activated cementing material using MSWI-fly ash and dravite as precursors

Ji-Rong Lana^{b*}, Sun Yan^a, Ming-Feng Kai^{a*}, Jian-Guo Dai^{a*}, Hao-Bo Hou^b

^a Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.

^b School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, China.

摘要: The proper treatment of municipal solid waste incineration fly ash (MSWIFA) is a crucial issue due to its hazardous nature and potential harm to the environment. To address this issue, this study utilized dravite and black liquor for the first time to solidify MSWIFA using the semi-dry pressing method, resulting in the production of MSWIFA-based cementing material. The compressive and flexural strength of this material reached 45.89 MPa and 15.58 MPa, respectively, and the heavy metal ions (Pb, Cr, Cu, Cd, and Zn) were effectively solidified in the MSWIFA-based cementing material. Furthermore, the MSWIFA-based cementing material exhibited excellent long-term performance with acceptable heavy metal leaching and minimal mechanical degradation. Through the experimental and theoretical analyses, the heavy metal solidification mechanism was also revealed, including chemical binding, ion substitution and physical encapsulation. Finally, the on-site application of MSWIFA-based cementing material was performed, proving the feasibility of the proposed material in meeting both environmental and strength requirements.

关键词: MSWIFA; Semi-dry pressing; Mechanical properties; Heavy metal solidification; Long-term performance; On-site application

作者简介:

E-mail address: lanjirong3636@126.com (J. R. Lan)

复苏促进因子强化多氯联苯厌氧脱氯降解

韩振，谢梦琦，苏晓梅*

浙江师范大学地理与环境科学学院，金华 321004

摘要：多氯联苯（PCBs）组成复杂，性质稳定，是土壤中分布较广泛的持久性有机污染物，对人体健康及整个生态环境系统造成严重危害。微生物对 PCBs 的代谢降解是土壤 PCBs 最主要的削减方式，决定 PCBs 在土壤中的最终残留量。然而，绝大多数微生物均因处于活的非可培养（VBNC）状态，而限制其降解功能的发挥，成为微生物修复技术应用的瓶颈问题。课题组前期已证明藤黄球菌复苏促进因子（Rpf）对 PCBs 好氧降解微生物的复苏促进作用，但是有关 Rpf 对厌氧微生物功能菌群的研究尚未展开。因此，亟需开展 Rpf 对 PCBs 厌氧脱氯关联微生物的影响及作用机制研究。本研究以 PCBs 厌氧土壤为研究对象，分阶段富集厌氧脱氯菌群，分别采用四氯乙烯（PCE）和 Aroclor 1260 考察 Rpf 添加对富集 PCE/PCBs 脱氯功能菌群的影响。通过脱氯性能与脱氯途径的对比分析，探明 Rpf 加速厌氧脱氯的效率及其作用的主要脱氯途径；并借助高通量测序与 qPCR 考察 Rpf 加速厌氧脱氯的关联微生物功能群及功能基因，揭示 Rpf 加速厌氧脱氯的微生物机理，明晰响应 Rpf 的厌氧脱氯菌与协同菌的主要类群。研究结果表明，Rpf 可显著加速厌氧脱氯培养物的富集。添加 Rpf 的脱氯富集培养物其脱氯性能显著提高，PCE 脱氯性能提高 3.8-5.4 倍，Aroclor 1260 脱氯速度与深度均显著提升。Rpf 组富集培养物经 50 天培养后，高氯代 PCBs 在 TGs 和 CGs 中分别占 36.7% 和 59.8%。Rpf 提高 Aroclor 1260 脱氯性能主要归因于加速间位氯原子的去除（47.7 mol% vs. 14.7 mol%），而无明显改变脱氯途径。微生物菌群与功能基因解析表明 Rpf 添加可显著提高厌氧脱氯菌包括 Chloroflexi 中的 Dehalococcoides 和 Firmicutes 中的 Desulfotobacterium 的富集，也可显著增加协同脱氯菌 Methanosarcina、Desulfovibrio 和 Bacteroides 的丰富度。本研究为强化 PCBs 污染土壤厌氧微生物修复开辟一种新的方法与思路。

关键词：多氯联苯，复苏促进因子，快速富集，还原脱氯，功能菌群

作者简介：苏晓梅、浙江师范大学、教授、污染环境微生物修复。

E-mail: purple@zjnu.cn

覆铜板分选残渣微生物提铜研究

周洪波

中南大学资源加工与生物工程学院

摘要：在《国家危险废物名录（2016 年）》中，废覆铜板、印刷线路板、电路板破碎分选回收金属后产生的废树脂粉列为 HW13 类危险废物，危险特性为毒性。废线路板回收金属后的废覆铜板分选残渣（即废树脂粉）的处置和资源化利用依然是一个难题。本研究根据废覆铜板分选残渣的物料特性，研究了采用嗜酸微生物处理提取其中铜离子工艺技术，克服了菌种选育、微生物规模化培养和生物浸出等技术难点，形成了中试处理工艺。研究选育了适合废覆铜板分选残渣物料特性浸出的嗜酸微生物菌种及其微生物复合菌群，克服了规模培养微生物浸出液中的铁矾形成和堵塞问题。在 100L 搅拌浸出系统中，含固量 30%、浸出时间为 6 h，铜的浸出率为 95%。日处理 600kg 中试反应器浸出率可以保持在 80%以上，并建立了中试规模的固液分离、铜回收和废水处理及回用工艺。对浸出残渣进行了毒性浸出试验，符合垃圾填埋场入场要求。残渣浸出渣的主要危害物为无机元素及化合物，以重金属毒性浸出特性为依据进行危险废物鉴别，结果表明，浸出渣为无害化渣，可进一步资源化利用。研究成果为该类废物的无害化和资源化利用提供了新技术。

关键词：废覆铜板分选残渣，嗜酸微生物，浸出，无害化，资源化

作者简介：男，中南大学资源加工与生物工程学院教授、博士生导师。主要研究微生物资源开发及其在固废处理、土壤修复等领域的应用技术。

E-mail: zhoub@csu.edu.cn

地下水循环井技术强化修复剂在低渗透含水层中的传输与累积

王 朋^{1,2}, 蒲生彦^{1,2*}

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 成都理工大学生态环境学院, 成都, 610059

摘要: 本研究采用二维砂箱实验和数值模拟方法, 研究了地下水循环井 (Groundwater Circulation Well, GCW) 驱动下修复试剂 (过氧化氢和过硫酸盐) 在非均质饱和多孔介质中的迁移。利用 COMSOL 建立了在低渗透区域修复试剂反应性迁移数值模型, 阐明了受 GCW 影响下修复试剂在低渗透性区域的跨时间尺度迁移特征, 对 GCW 系统中的相关参数进行了敏感性分析, 解析了注射浓度、GCW 操作模式和运行技术参数对修复试剂传输的影响。本研究结果表明 GCW 水力激发下修复试剂的传输范围显著提高, 特别是试剂的纵向迁移最为明显。GCW 的驱动作用所产生的垂直水力作用可以显著改善修复剂的垂直迁移和污染物的反向扩散, 这一优势将有助于提高受污染含水层的修复效率。数值模拟结果表明, 从高渗透率到低渗透率区域的正向扩散效率明显高于 GCW 驱动的反向扩散效率, 区域累积浓度反映了由 GCW 驱动的水动力循环强化的过氧化氢迁移特征; 迁移模型加入反应项后可以更接近物理模拟结果。本研究可为 GCW 耦合原位注入技术修复受污染低渗透性含水层的工程实践提供理论指导。

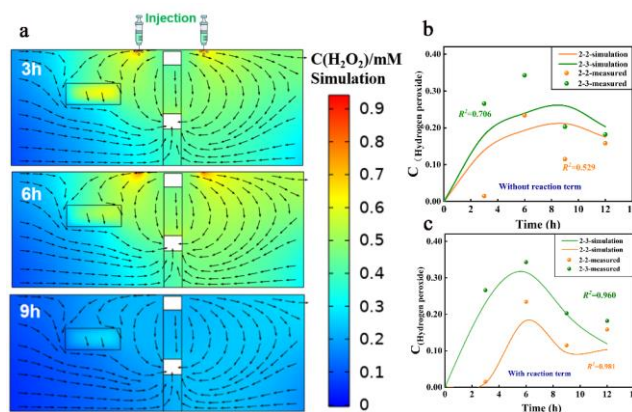


图 1. (a)模拟 GCW (10 mM 过氧化氢, $Q = 37.6 \text{ mL/min}$) 驱动的过氧化氢分布情况及流场线。在低渗透区域, 无反应项(b)和有反应项(c)迁移模型的模拟浓度与测量浓度的相关性分析 (R^2 是决定系数)。

关键词: 地下水, 原位修复, 在产企业, 低渗透含水层

作者简介: 蒲生彦 (1981—), 男, 教授, 研究方向: 土壤地下水污染协同防治研究。

E-mail: pushengyan13@cdut.edu.cn

生物反应墙技术原理和案例——一种绿色低碳修复和风险管控技术

庄健鸿，陈波洋

北京博诚立新环境科技股份有限公司

摘要：原位强化生物修复是一种绿色低碳的土壤和地下水修复技术。生物反应墙(bio-barrier)是具有前景的一种应用工艺形式，通过厌氧生物降解方式处理污染物，尤其适用于氯代烃(CAHs)、氯苯类、有机氯农药、高氯酸盐等污染物。类似于注入式可渗透反应墙，生物反应墙不需要像传统 PRB 开挖、对地下扰动少、不占用地面空间、运行期操作和维护要求低，具有修复材料和施工成本低的优势。利用地下水天然流场为驱动力，在污染羽区内部或边界建一排或多排注入井群，注射靶向厌氧菌剂和营养助剂，组成“无形”的渗透反应墙，可有效拦截和处理地下水污染羽，适合工业园区和在产企业对污染地块进行低成本分阶段分区域的风险管控和修复治理。本文在介绍生物反应墙的技术原理、可行性评估体系、设计方法、关键参数等基础上，介绍了采用厌氧生物反应墙控制地下水三氯乙烯污染扩散的工程案例。

关键词：强化生物修复；生物反应墙；厌氧脱卤菌；氧化还原电位；氯代烃；直推注射

作者简介：庄健鸿（1983-），男，北京博诚立新环境科技股份有限公司修复技术总监，主要从事污染场地修复与风险管控工作。

E-mail: zhuangjh@bosentech.com

农药化工类场地风险管控及修复案例分享

田平

浙江卓锦环保科技股份有限公司

摘要：中国是农药化工产品生产及使用大国，其中 2018 年的农药产量已突破二百万吨，占世界总产量的 33%以上，涉及的种类涵盖有机氯类、有机磷类和拟除虫菊酯类等多种及多代产品。近十几年来，随着国内城市发展理念及方式的不断更新，大量农药化工生产及使用企业被迫停产或搬迁，遗留下了大量被污染的场地，该类场地具有多种、多代农药混合以及有机溶剂复合污染等特征，同时相应污染物也呈现毒性高、难降解的特点，修复治理难度较大。农药化工类退役场地，多处于城市中心区域，且距周边居民或水源地等环境敏感区域较近，如不能及时开展科学合理的修复治理，不仅是风险极大的污染源，且影响地块的二次商业开发和城市品质的提升。因而，农药化工类污染地块的修复治理与安全利用，已成为诸多城市亟需解决且颇具挑战的环境问题，也日益受到行业内专家、学者及从业单位的关注。本文首先概括性介绍了我国农药产业的发展演变史和历代农药产品，归纳并分析了退役农药化工类场地特征污染物种类、理化性质、迁移转化特性、毒性危害及相关修复治理的重难点等，进而梳理并介绍当前国内外针对农药化工类污染场地的主要管控及修复技术和相应管理策略，最后结合卓锦股份近 5 年相关工程案例分享，进一步分析和探讨适用于我国国情的农药化工类场地修复治理及管理模式，以期该类场地修复治理提供借鉴及决策依据。

关键词：农药化工、场地、风险管控、修复

作者简介：田平，浙江卓锦环保科技股份有限公司董事，高级经济师/高级工程师，主要从事工业场地污染土壤及地下水管控和修复技术研究。

E-mail: 18222643@qq.com

国际污染土壤修复技术文献计量分析与未来发展趋势

李社锋

武汉轻工大学化学与环境工程学院

摘要: 污染土壤修复是提高生态环境质量的重要途径,受到了越来越多研究者的关注。本文以 Web of Science 数据库的文献资料为数据源,利用 CiteSpace、VOSviewer 等文献计量软件,针对近 10 (2011-2020) 年全球土壤重修复领域的相关文献,从发文量、发文国家、机构、关键词、作者、期刊及被引频次等方面进行分析,探讨了国内外研究现状及未来发展趋势。结果表明,污染土壤修复研究文献数量呈快速增长态势,中国、美国、澳大利亚、德国、法国等是外文文献发文量较多的国家;外文文献主要载文期刊有 Environmental Science and Pollution Research、Chemosphere、Science of the Total Environment 等;在外文文献发文数量和被引频次方面,中国科研机构均占有重要地位,这表明我国在污染土壤修复领域有着较强的国际学术影响力;通过关键词“共现”分析,发现“重金属”、“生物有效性”、“Pb”、“植物修复”、“生物修复”、“固定化”、“风险评估”、“多环芳烃”等主题是近 10 年的研究热点;利用关键词突现功能,发现风险评估、污染因子空间分布、土壤微生物群落、生物炭正逐渐成为全球研究的新热点。最后,结合作者十余年的土壤修复一线从业经验,提出了未来重点研究方向的建议。

关键词: 污染土壤; 土壤修复; 重金属; 生物修复; 植物修复

作者简介: 李社锋, 博士毕业于浙江大学, 现任武汉轻工大学化学与环境工程学院教授、土壤与地下水污染防治湖北省工程研究中心主任、武汉市生态环境化工与低碳技术转化中试基地主任、武汉轻工大学生态环境与低碳研究实验室主任, 湖北浙江大学校友会秘书长。国家注册环保工程师、注册咨询工程师。湖北省科技创新战略团队 A 类负责人, 武汉市“黄鹤英才”(3551), 武汉市创新人才开发资金资助项目“创新团队”领军人才等。担任国家科技奖励评审专家库专家, 国家科技部资源环境领域专家, 国家教育部学科评估专家, 中国有色金属学会环保学术委员会副秘书长, 中国环境科学学会环境与热能利用专业委员, 中国有色金属学会钒资源清洁利用专业委员会委员等。从事环境修复、固废资源化利用及污染控制等的研究及应用推广工作十余年。主持或参与国家、省市科技项目 30 余项。发表论文 48 篇 (SCI、EI 收录 15 篇)。申请 PCT 国际专利 2 项, 中国专利 200 余项 (发明专利 80 余项), 已授权 140 余项。获得省部级及以上科技奖励 13 项。科技成果鉴定 8 项。编写国家环保部《污染场地修复技术目录》1 项, 主编《武汉市“十三五”节能环保领域科技发展规划》。主编教材 2 部, 主编行业标准 1 项, 参编标准 4 项。

E-mail: lishefeng@163.com

涉镉行业土壤污染数据挖掘方法初探

Preliminary study on data mining method of soil pollution in cadmium industry

雷梅

中国科学院地理科学与资源研究所

摘要：近年来，随着我国工业化和城市化进程的不断推进以及国家产业结构升级、城市布局调整如“退城进园”、“退二进三”等政策的加速实施，污染场地是我国当前备受关注的最严峻的土壤污染问题之一。尽管近年来我国在污染场地信息管理、调查评估和管控修复等方面取得了显著进步，但由于污染场地基数大、管理起步较晚，我国仍面临着基础数据不足、企业用地全国分布格局不清的局面，同时基于宏观尺度的污染场地形成机制研究也较为滞后，给我国企业用地风险筛查及防控带来了不确定性。随着科技的进步和经济的发展，大数据已经成为了现代社会中不可或缺的一部分。有色金属作为我国重要的战略资源，其大数据的应用和发展更是备受关注。本报告以重金属污染最为严重的有色金属工业为例，利用多源网络地理大数据，研发了完整的数据挖掘技术体系，并设计了严格、可编程的数据质量控制流程。从构建企业用地及其污染场地空间数据集出发，明确了有色金属企业用地时空格局演化特征，揭示了有色金属场地不同污染物类型、不同功能区的污染特征，并识别了场地污染的主控因子和形成机制。

关键词：有色金属；数据挖掘方法；时空格局；主控因子

作者简介：雷梅，中国科学院地理科学与资源研究所，研究员。主要研究方向为：土壤污染大数据挖掘、土壤重金属修复、土壤重金属污染现场快速监测技术与设备。

E-mail: leim@igsnrr.ac.cn

利用合成生物学方法建立耐盐生物修复平台

赵婉婉, 熊威妮, 刘瑞华, 杨超*

南开大学生命科学学院, 天津 300071

摘要: 化工废水大多情况下都是高盐的, 高盐废水的含盐量在 3.5%以上。这些废水中盐分高, 又含有高浓度有机污染物, 双重高负荷使高盐有机废水成为废水处理领域中的技术难题。生物强化 (Bioaugmentation) 具有经济、高效、无害的特点, 从自然环境中筛选得到的或经过基因改造的降解菌投加到自然生态系统或人工系统中, 以达到增强其处理效果的目的。然而, 在高盐废水的生化处理中, 过高的盐度会对微生物的生长产生抑制作用, 同时也会严重影响胞内降解酶的活力。渴望盐单胞菌 J9 (*Halomonas cupida*) 是中度嗜盐革兰氏阴性菌, 积累相容性溶质四氢嘧啶作为主要的耐盐机制。目前, 绝大多数有机污染物降解菌在高盐条件下无法生长并失去降解能力。为了克服这一瓶颈, 本研究选择一种典型的环境污染物对硝基苯酚 (para-nitrophenol, PNP) 和 *H. cupida* J9 作为底盘细胞, 首次证明了利用嗜盐菌构建有机污染物矿化菌株的可行性和有效性。首先, 通过转录组分析和启动子强度表征, 从 *H. cupida* J9 基因组中筛选出强启动子 P3、P15、P16 和 P22。当使用上述 4 个内源强启动子和异源强启动子 P8KT 时, 在 J9 基因组中插入 P15-和 P8KT-pnpAB 表达盒的工程菌能够耐受并迅速降解 200 mg/l PNP。进一步, 在 *H. cupida* J9 基因组中功能组装了 PNP 生物降解途径, 通过 P15 和 P8KT 增强表达所有 PNP 降解基因, 构建了两个稳定的基因工程菌 J9U-P15PNP 和 J9U-P8KTPNP。工程菌能够在高盐培养基中利用 PNP 作为唯一碳源进行细胞繁殖。稳定同位素分析表明, 工程菌能够在高盐培养基中将 $^{13}\text{C}_6\text{-PNP}$ 转化为 $^{13}\text{CO}_2$ 。本研究表明, 启动子工程是一种能显著提高有机污染物矿化效率的有效策略。本研究彰显了合成生物学从极端微生物创造新型降解菌的力量, 突显了以 *H. cupida* J9 作为底盘细胞建立耐盐生物修复平台的潜能。

关键词: 生物修复, 对硝基苯酚, 盐单胞菌, 耐盐降解菌, 合成生物学

作者简介: 杨超, 南开大学生命科学学院, 教授, 博士生导师, 主要从事合成生物技术在环境修复中的应用研究。

E-mail: yangc20119@nankai.edu.cn

无锡某化工场地土壤和地下水污染风险管控工程案例

郜铭，朱贤倩，倪雨翔

无锡生量环境工程有限公司

摘要：改革开放以来，无锡地区大力发展乡镇企业经济，催生了一大批化工企业，形成了本地区化工企业大中小规模并举、高中低技术并存的模式。近年来，由于工业转型和太湖地区的环保要求的提高，大量的化工企业迁出或者关停，遗留下大量的化工退役场地，这些场地环境问题亟待解决。无锡某化工场地，历史上曾进行过近 40 年的化工生产，关停后计划作为一类用地使用，经环境调查和风险评估，地块内土壤和地下水存在严重的有机污染。该场地呈现污染程度严重、污染深度较深、污染物扩散性强、周边环境敏感点距离较近的特征。长久以来，地块对周边居民生产生活造成严重不良影响。由于彻底修复难度巨大、成本高昂，为解决地块环境问题，确定了“总体风险管控、重污染区源消减”的治理思路。对整个土壤和地下水污染区域进行垂直阻隔和水平阻隔，以阻断污染物随地下水迁移和自然挥发。水平阻隔采用高密度聚乙烯土工膜作为主要防渗材料，垂直阻隔采用双排三轴搅拌桩作为主要防渗层，水平阻隔与垂直阻隔进行搭接，保证阻隔效果的整体性。污染源消减采用原位热脱附的方式，以达到消减污染、减少环境风险的目的。

关键词：化工污染，场地原位热脱附，风险管控，工程案例

作者简介：郜铭，高级工程师。无锡生量环境工程有限公司 土壤部总工程师。

E-mail: 13921166688@139.com

场地地下水氯代烃微生物修复进展

曹利锋¹, 葛润蕾², 张芳²

1 浙江大学杭州国际科创中心, 杭州 311200; 2 清华大学环境学院, 北京 100084

摘要: 氯代烃是场地地下水中检出频率最高的污染物, 它们大多数都具有“三致”效应, 场地地下水氯代烃污染严重威胁人体健康与人居环境安全。在我国“双碳”目标的背景下, 微生物还原脱氯被认为是一种绿色低碳的原位地下水污染修复技术, 而菌剂性能是影响修复效果的最关键因素之一。现有菌剂存在耐受污染物浓度范围低、脱氯不完全等缺点, 在场地应用中存在一定劣势。通过富集与驯化实验, 获得一种能够还原脱氯近饱和浓度 TCE 菌剂, 确定 *Desulfitobacterium* 是可耐受近饱和浓度 TCE 菌剂中功能菌。通过优化实验, 得出 *Desulfitobacterium* 菌剂最佳脱氯温度范围是 25~35℃, 乳酸盐是最佳电子供体, 最高可脱氯 8.0 mM 的近饱和浓度 TCE, 产物为顺-1,2-二氯乙烯 (cis-DCE), 是已报道脱氯菌耐受极限浓度的 2 倍。通过功能菌 *Desulfitobacterium*、*Dehalogenimonas*、*Dehalococcoides* 组合, 得到了一种可实现高浓度 TCE 完全脱氯的复合菌剂。该复合菌剂最佳脱氯温度为 30℃, 以甲酸盐作为电子供体脱氯效果最佳, 可完全脱氯高达近饱和浓度 TCE 至乙烯, 是目前报道的 TCE 完全脱氯最高浓度。此外, 该复合菌剂能够完全脱氯四氯乙烯 (PCE)、二氯乙烯 (1,1-DCE、顺/反式 DCE)、氯乙烯 (VC)、1,1,2-三氯乙烷 (1,1,2-TCA) 和 1,2-二氯乙烷 (1,2-DCA)。借助高通量测序, 阐明菌剂中不同菌株能够实现优势互补的机制, *Desulfitobacterium* 主导高浓度 TCE 至 cis-DCE 脱氯过程, *Dehalogenimonas* 主导 cis-DCE 至 VC 过程, *Dehalococcoides* 主导 VC 至乙烯过程, 而 1,1,2-TCA 完全脱氯依赖 *Dehalogenimonas* 与 *Dehalococcoides* 协作。本研究结果为场地地下水氯代烃微生物修复提供技术支撑与理论指导。

关键词: 地下水修复、氯代烃、脱氯群落、高浓度、完全脱氯

作者简介: 曹利锋, 浙江大学杭州国际科创中心 研究员, 主要研究方向为土壤与地下水有机污染修复。

E-mail: lifengcao@zju.edu.cn

某冶炼厂旧址重金属污染土壤资源化技术研究及工程应用

苗进辉，杨成锋，万鑫斌

中交第三航务工程局有限公司

摘要：随着工业的高速发展，我国老工业场地土壤重金属污染严重，其土壤重金属污染具有污染因子复杂、污染面积广、修复难度大等特点。本研究结合株洲清水塘老工业区某冶炼厂场地修复工程案例，采用固化/稳定化技术开展了重金属污染土壤资源化技术研究。通过对该冶炼厂的调查，该场地为铅、镉、汞、砷四种重金属复合污染，污染深度达 16 m。采用毒性淋溶连续提取法提取了场地污染土壤中的可交换态、碳酸盐结合态、有机结合态、铁锰氧化态和残渣态五种重金属形态，其中铅、镉、汞、砷的可交换态和碳酸盐结合态之和分别是 26.29、19.97、31.91 和 15.35%。表明四种重金属均具有较强的迁移能力，迁移风险比较大，危害周边生态健康。采用不同碱性固化/稳定化药剂投加量 P （2~15 wt.%）进行污染土壤固化/稳定化，结果表明：当药剂投加量 $P \geq 10$ wt.% 时，固化/稳定化修复后的土壤重金属浸出浓度低于污水综合排放标准值；将修复前（后）土壤、页岩和煤矸石按照不同比例混合开展烧结砖制备实验，并优化了烧结温度，实验结果表明：将三种原材料按照 7: 2: 1 的比例混合后，修复后的土壤为原料制备的烧结砖强度达 MU10 级以上，碱性固化/稳定化药剂有利于提升烧结强度；当烧结温度 $T \geq 800^\circ\text{C}$ 时，重金属在烧结砖中以长石结构形态存在，其浸出浓度低于地表水 IV 级标准值，满足无害化要求。基于固化/稳定化和烧结砖制备实验结果，采用碱性固化/稳定化药剂投加量 $P=10$ wt.%，对株洲清水塘老工业某冶炼厂 45902 m^3 重金属污染土壤进行了修复；并以修复后的土壤原料，于 800°C 条件下进行烧结砖准备，成功实现了场地重金属污染土壤的资源化利用。通过对冶炼厂旧址重金属污染土壤开展资源化技术研究及工程应用，成功实现了重金属污染土壤的无害化修复与资源化利用，为后续老工业区场地修复工程提供参考。



图 1 株洲某冶炼厂区重金属污染土壤资源化技术工程应用

关键词：重金属污染，土壤修复，固化/稳定化，资源化，工程应用

作者简介：杨成锋，女，1993 年 4 月生，博士，现工作单位为中交第三航务工程局有限公司。

E-mail: 15601875566@ccccltd.cn

土壤洗脱减量技术的应用实践与若干思考

郭明达

南京尚土生态环境有限公司

摘要：土壤洗脱技术作为一种有效去除土壤中污染物的治理方法，最早于上世纪八九十年代在欧美地区开始使用，具有适用范围广、操作过程简单和对土壤功能破坏性小等特点。随着我国环境修复领域的飞速发展，该技术也渐渐显露头角，作为国内土壤修复的主流技术之一，在建设美丽中国这一历程中，发挥着举足轻重的作用。国内在该技术机理探究与应用实践等方面已逐渐积累了越来越多的经验，国家和地方也发布了相关技术导则、规范和指南等文件。虽然我们已经对土壤洗脱技术有了较为全面的认知，并已有较多实地应用，但与欧美国家相比，在技术应用过程中仍然存在着诸多困难与问题，需要逐步解决与优化。例如，土壤洗脱技术在实际应用过程中，需根据项目具体情况对技术指标与关键参数等进行科学选择和应用，如：土壤洗脱工艺与方法、洗脱设备的选型与运维、洗脱药剂的选取、洗脱后废水与高污染的筛下小颗粒物的最终处置等，这些对土壤洗脱技术能否在项目上成功实施均有关键作用。

本报告将基于国内外土壤洗脱技术的发展背景，并结合我司曾参与的广东某地块污染土壤洗脱治理实施情况，重点就该技术工艺选用过程中关键影响因子、技术应用过程中的核心关键点与未来发展趋势等内容进行汇报。旨在将项目实施所积累的经验与大家共同分享的同时，还希望与大家进行探讨、学习与交流，一同为建设美丽中国而不懈奋斗。

关键词：环境修复 土壤洗脱技术 影响因子 减量化

作者简介：郭明达，毕业于英国纽卡斯尔大学农业与环境科学专业，硕士学历，现就职于南京尚土生态环境有限公司。毕业回国后一直从事土壤与地下水修复修复相关工作，主要聚焦于场地调查、修复工程和效果评估等相关的技术研究与工程管理工作。曾在国内顶尖上市环保历任技术工程师和部门经理等职务。至今，曾参与国内外各类环境修复项目 60 多个，授权相关发明专利/实用新型 30 多项，参与行业技术规范/导则/标准编制数项，在污染土壤和地下水修复领域具有丰富实战经验。同时，在市场营销、战略管理和销售管理方面有丰富的理论和实践经验，现就职于尚土环境，负责技术指导与工程管理、市场营销和品牌建设等相关工作。

E-mail: guomd_njsoil@163.com

污染土壤热脱附修复装备改进、性能提升及工程应用

周永贤

东南大学土木工程学院；中船绿洲环保（南京）有限公司

摘要：热脱附是通过加热的方式使污染物成为气态与固态土壤分离的一种修复技术，具有处理彻底、适用范围广等优点，是国内外土壤修复常用技术之一。其中异位间接热脱附技术具有污染物去除率高、修复效果好、修复周期短、装备可反复使用、场地适应性强等优点，广泛应用于挥发/半挥发性有机物、多环芳烃、石油烃等污染场地土壤修复。本报告介绍了污染土壤热脱附修复装备的基本形式分类和适用场景，以及相关的标准和技术规范。阐述异位间接热脱附修复装备基本工作过程，针对该装备在实际工程应用中反映的故障率高、处理能力弱等共性问题，列举了土壤粘附、局部磨损、管道堵塞等典型故障现象，从土壤特性、工艺过程等角度，分析了故障原因，提出了优化输送装置结构、调整反应器形式、增加脱附气除尘措施等方案；同时分析了异位间接热脱附反应器基本传热原理和传质过程，提出了扩展传热面、增强搅拌等强化传热传质措施。介绍了外热回转热脱附修复装备的结构和特点，阐述了已经采取的复合曲面非规则转筒强化传热技术和高温除尘间壁冷凝脱附气净化技术两项改进措施，结合该装备在实际工程中的应用，参经常规修复装备分析对比了改进后性能参数的提升效果。此外，从工艺优化的角度，提出了直接和间接传热技术相互耦合，进一步提高处理效率、降低能耗的改进思路。

关键词：热脱附装备；强化传热；尾气净化

作者简介：周永贤，东南大学在职研究生，中船绿洲环保（南京）有限公司节能环保专业总师，高级工程师，主要从事土壤修复和固废处置领域技术装备研发。联系电话：18252032332。

E-mail: 220231601@seu.edu.cn

邻苯二甲酸二甲酯连续相演化对饱和多孔介质中共存全氟辛酸保留和传输的影响

王朋，蒲生彦

成都理工大学

摘要：地下水中非水相液体（NAPL）经历着持续演化过程形成自由相、残余相和溶解相共存的动态复杂体系。使得对与其共存的有机污染物在地下环境的迁移过程的预测变得复杂。通过砂柱实验模拟饱和条件下 NAPL 的演化过程，并探究了不同相态 NAPL 与 PFOA 的共存迁移行为。PFOA 能通过降低界面张力和 NAPL 在多孔介质上接触角形成更多的自由相流出。自由相在多孔介质中的迁移会携带 PFOA 形成污染源，并演化出更多的 NAPL-水界面面积能够阻碍 PFOA 的迁移。疏油性的 PFOA 并不能促进残余相的迁移。使用溶质迁移模型对 PFOA 穿透曲线模拟并计算获得延迟因子 R 。结果表明 PFOA 在 DMP 由自由相向残余相和溶解相演化过程中迁移的延迟因子 R 值表现出先增加后减小的变化趋势。PFOA 迁移的迟滞性与残余相饱和度呈正相关关系（ $r=0.948, p<0.05$ ），主要归因于 NAPL-水界面面积随 NAPL 饱和度减小而减少。PFOA 与 NAPL 共存下迁移中主要受到 NAPL-水的界面吸附作用（ $fK_i=0\sim 58.51\%$ ）和多孔介质吸附作用（ $fK_d=41.18\%\sim 100\%$ ）的联合控制。相分配作用对 PFOA 在共存体系中迁移的影响始终有限（ $fK_n<2\%$ ）。溶解相 DMP 对 PFOA 迁移不存在竞争吸附和阻滞作用。本研究首次阐明了 PFOA 在 NAPL 整个演化过程中的迁移特征，这对制定复合污染管控策略提供了理论依据。

关键词：非水相液体；演化；自由相；残余相；全氟辛酸；共迁移

作者简介：王朋，成都理工大学。

E-mail:wpeng0815@163.com

多孔介质 PFAS 传输

吴睿

上海交通大学

摘要: PFAS (Per- and polyfluoroalkyl substances) 在全世界分布范围广, 是难以降解的有毒污染物, 在自然环境中浓度超过一定范围时会影响人类或其它生物的健康安全, 因此受到了广泛的关注。掌握 PFAS 在土壤渗流带(非饱和和多孔介质)中的传输过程, 是评估地下 PFAS 污染风险, 制定有效修复策略的关键。在非饱和多孔介质中, PFAS 传输与水流动过程相互耦合, 因为 PFAS 可吸附在空气-水界面上, 引起表面张力变化, 影响水流动进而影响 PFAS 传输。正是由于此耦合特性, 准确模拟非饱和多孔介质中 PFAS 传输是一难题。为解决此问题, 本文利用二阶精度的有限体积方法对非饱和多孔介质中 PFAS 传输多维模型进行求解。在模型中, 采用两区域吸附模型描述固体表面和空气-水界面对 PFAS 的吸附。在数值计算中, PFAS 传输和水流方程中扩散项和对流项分别采用中心差分 and QUICK 方法离散。研究了两中国 PFAS 传输和水流动耦合迭代方法: 当前时刻 PFAS 浓度场求解水流方程, 和上一时刻 PFAS 浓度场求解水流方程, 发现在边界条件变化的情况下, 这两种耦合迭代方法结果有较大差异。基于建立的数值计算方法, 揭示了表面张力变化的影响规律, 明晰了影响非饱和和多孔介质中 PFAS 传输的关键无量纲参数及其影响, 发现描述土壤性质的无量纲数对 PFAS 传输过程影响较大。

关键词: PFAS, 多孔介质, 表面张力

作者简介: 吴睿, 上海交通大学副教授, 一直从事多孔介质两相传输方向研究, 在国家自然科学基金、国家重点研发计划、上海市自然基金、上海市浦江人才计划、德国洪堡基金、以及慕尼黑工业大学访问教授基金等项目资助下, 对多孔介质两相传输过程孔隙尺度可视化实验以及孔隙网络模型构建方面开展了深入细致的研究, 发现了多孔介质两相传输过程影响相界面移动的毛细阀、毛细剪以及毛细失稳等毛细效应, 建立了多孔介质多相热质传输的微流控可视化实验平台, 建立了多孔介质多相传输反应的孔隙网络和宏观连续介质尺度模型, 并发展了高效求解算法。申请人以第一/通讯作者在 *Physical Review Fluids*, *Physical Review E*, *Advanced Energy Materials*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 等国际权威期刊发表研究论文 21 篇, 以第一作者完成 CRC 专著《Mass transfer driven evaporation from capillary porous media》及软件著作权 3 项。申请人先后获德国洪堡学者(2013)、上海市浦江人才计划(2017)、慕尼黑工业大学 August-Wilhelm Scheer Visiting Professorship (2019)、华为火花奖(2023)等奖项。担任国际 SCI 期刊《International Journal of Chemical Engineering》编委(2020-今), *International Heat Transfer Conference* 副编辑(2018), *InterPore Conference* 分会场主席(2018, 2020), 以及 *International Conference on Applied Energy* 分会场主席(2020)。

E-mail: ruiwu@sjtu.edu.cn

增塑剂对微生物燃料电池去除农业土壤抗生素和抗生素抗性基因的影响

汪慧香, 宋海亮

南京师范大学

摘要: 土壤微生物燃料电池 (MFCs) 是一种新兴的生物修复技术, 已有研究用于单一抗生素污染土壤的原位修复。然而, 实际的农业土壤总是受到混合污染物的污染, 尤其是广泛使用的农业塑料薄膜的增塑剂。本研究旨在研究邻苯二甲酸二辛酯 (DEHP, 土壤中的代表性增塑剂) 对去除磺胺嘧啶 (SDZ, 一种在自然环境中经常检测到的抗生素)、抗生素抗性基因 (ARGs) 和土壤 MFCs 微生物群落的影响。结果表明, 即使在残留 DEHP 的影响下, 土壤 MFCs 仍保持了良好的去除抗生素的能力, 并且在较高的 DEHP 浓度下由于产电性能的增强, 具有更高的去除效果。具体而言, 较高的 DEHP 浓度对土壤 MFC 中的抗生素去除有利影响, 因为污染土壤上层 (即从 $4.867 \pm 0.221 \text{ mg kg}^{-1}$ 降低到 $0.268 \pm 0.021 \text{ mg kg}^{-1}$) 和下层 (即从 $4.867 \pm 0.221 \text{ mg kg}^{-1}$ 降低到 $0.293 \pm 0.047 \text{ mg kg}^{-1}$) 的生物降解效率都有所提高。此外, 与较低的 DEHP 浓度相比, 高 DEHP 浓度显着促进了与产电相关的细菌的丰度, 从而促进了细胞外电子转移, 并增强了 SDZ 降解。ARG 丰度的增加可能是由于高 DEHP 浓度带来的 ARG 潜在宿主富集引起的, 可能是由于细胞膜通透性降低和活性氧含量增加导致 RP4 质粒的接合转移频率增加。结果表明, 土壤中残留的 DEHP 具有促进 ARG 在土壤 MFCs 中传播的生态风险, 尽管它有可能通过水平基因转移降低 SDZ 的毒性。此外, 我们还强调了对土壤中抗生素和增塑剂管理的担忧; 在使用土壤 MFC 对抗生素污染的土壤进行原位修复时, 应系统评估增塑剂对抗生素去除的负面影响。

关键词: 农业土壤; 增塑剂; 抗生素去除; 混合污染; 土壤 MFC

作者简介: 汪慧香 (1997-), 女, 博士研究生, 研究方向为微生物燃料电池处理土壤新兴污染物。

E-mail: 222501004@njnu.edu.cn

通讯作者: 宋海亮 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为微生物电化学水土污染控制耦合技术。

E-mail: hlsong@njnu.edu.cn

功能材料/微生物对 1,4-二噁烷协同降解机制

刘云

中国科学院南京土壤研究所

摘要: 挥发性氯代烃溶剂是全球场地检出率较高的一类污染物,已被列为优先控制污染物之一。1, 4-二噁烷(DX)常用作氯代烃溶剂的稳定剂,因此存在氯代烃污染通常亦伴有 DX 污染。因此,污染场地氯代烃与 DX 复合污染不容忽视。生物修复是目前国内外公认的污染物降解最为经济的方法之一。我们从自然环境中分离出降解 DX 的混合菌群,采用宏基因组和代谢组学技术联合分析降解 DX 的潜在降解途径和功能基因,并采用逐级稀释法分离降解菌株。虽然微生物能够有效降解 DX,氯代烃对 DX 降解微生物具有抑制作用。我们采用沸石分子筛强化微生物降解氯代烃/DX 复合污染,沸石分子筛能够有效消除三氯乙烯(TCE)、三氯乙烷(TCA)、顺-1, 2-二氯乙烯(cDCE)对 DX 降解菌的抑制作用,但是不能完全消除 1, 1-二氯乙烯(1,1-DCE)对降解菌的抑制作用。为了揭示这一现象背后的机理,我们采用改进的 Dubinin-Ashtakhov (DA)模型拟合沸石分子筛对 DX 与氯代烃复合污染的吸附模型,建立吸附势能与污染物的物理化学参数的线性模型,阐明污染物的氢键作用力、偶极性/极化率、分子尺寸对吸附势能的贡献率,进而揭示沸石分子筛不能消除 1, 1-DCE 对 DX 降解菌抑制作用的机理,并通过计算机分子模拟验证氯代烃/DX 复合污染在沸石分子筛上的吸附过程。

关键词: 吸附机制,1,4-二噁烷,微生物降解,沸石分子筛

作者简介: 刘云,中国科学院南京土壤研究所,研究员,主要从事环境功能材料与土壤修复研究。

E-mail: yliu@issas.ac.cn

土壤中微塑料表面生态冠的形成机制及其环境效应

宋洋

中国科学院南京土壤研究所

摘要: 生态冠是颗粒物（微/纳塑料等）表面被环境介质中的可溶性有机质（DOM）、蛋白质、代谢物和胞外聚合物等生物活性分子包裹形成的一层特殊分子层。微塑料可通过生态冠与土壤生物与其他污染物相互作用，影响其在土壤中的环境行为。土壤代谢物（WESMs）是土壤 DOM 中最活跃的生物分子，在介导土壤生物地球化学循环中发挥重要作用。然而，微塑料生态冠能否由土壤代谢物形成以及是否在不同土壤类型中存在差异仍不清楚。本研究以不同来源的聚乙烯（PE）地膜源微塑料为研究对象，探究了 PE 与黑土、潮土、红壤三种典型土壤中代谢物组的相互作用。研究表明，暴露于 WESMs 的 PE 微塑料表面能够快速形成生物分子层生态冠。生态冠的形成可通过代谢物在 PE 微塑料上的直接吸附和由大分子介导的间接吸附作用完成，其主要成分在不同类型土壤中相似，为脂类和类脂分子、苯丙类和多酮类、核苷、核苷酸及其类似物。同时 WESMs 通过两种途径减少 PE 微塑料对共存的有机污染物的吸附，即生态冠的屏障作用和 WESMs 的增溶作用。研究结果对微塑料和有机质之间的相互作用有了新的认识，并强调有必要将它们的相互作用纳入未来对环境中微塑料的环境风险评估。

关键词: 土壤,微塑料

作者简介: 宋洋，副研究员，硕士生导师。一直从事土壤环境化学与污染控制研究，重点关注新污染物/生物的多界面过程与环境效应、土壤污染修复原理与技术研究。

E-mail: ysong@issas.ac.cn

白腐真菌对双酚 F 的降解研究

王剑桥, 肖唐付

广州大学环境科学与工程学院

摘要: 双酚 A (BPA) 是世界上工业使用量最大的化合物之一, 因其对生物体具有内分泌干扰作用, 许多国家和国际组织已对 BPA 的生产和使用进行监管和限制。双酚 F (BPF) 作为最常用的“BPA 替代品”, 被广泛应用于工业生产。但是近年来, BPF 也被证明具有和 BPA 相似的内分泌干扰活性, 经工业活动释放到环境介质中造成 BPF 污染。微生物修复是去除环境中持久性有机污染物的一种重要手段, 其中, 白腐真菌因其对有机物的降解广谱性和高效性受到广泛关注。目前白腐真菌降解 BPF 的研究主要集中在白腐真菌发酵以及分泌的漆酶对 BPF 的降解, 而对白腐真菌直接生物降解 BPF 及其降解功能基因的研究甚少。本实验选取具备高木质素降解性能的白腐真菌 *Phanerochaete sordida* YK-624 作为降解菌株, 研究在不同降解条件下, BPF 的降解能力, 并通过对降解产物的鉴定及利用转录组数据进一步揭示 *P. sordida* YK-624 对 BPF 的降解机制。木质素降解条件下 (pH=4.5、培养温度 30 °C、初始浓度 0.1 mM), 降解培养 4 天后, BPF 降解率为 99.24%; 非木质素降解条件下 (自然 pH=5、培养温度 30 °C、初始浓度 0.1 mM), 7 天后降解率达 100%。通过细胞色素 P450 影响实验和比较转录组学的分析发现, 在木质素降解条件下, 木质素降解酶木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和细胞色素 P450 参与了 BPF 的降解过程; 在非木质素降解过程中, 细胞色素 P450 在 BPF 降解过程中发挥了重要作用。在非木质素降解条件下, 鉴定了 *P. sordida* YK-624 对 BPF 的两种降解产物 4,4'-二羟基二苯甲酮 (DHBP) 和 4-羟基苯基-4-羟基苯甲酸酯 (HPHB)。进一步对 BPF 进行的生物转化定量实验及代谢产物的降解研究发现, BPF 首先转化成 DHBP, 随后转化成 HPHB, 并且 *P. sordida* YK-624 对 HPHB 也有很强的降解能力。这一降解过程依赖于细胞色素 P450 的氧化作用。毒理实验显示, BPF 及其代谢物的内分泌干扰活性顺序为 HPHB>BPF>DHBP。这一研究为双酚类化合物的生物修复提供了理论基础, 具有实际应用价值。

关键词: 白腐真菌; 双酚 F; 木质素降解酶; 细胞色素 P450; 转录组

作者简介: 王剑桥、广州大学环境科学与工程学院、副教授、环境修复。

E-mail: wangjq@gzhu.edu.cn

腐植酸强化植物修复十溴联苯醚污染土壤效能研究

刘世宾^{1,2,3*}, 唐建城¹, 蒲生彦^{1,2}

1 成都理工大学生态环境学院, 成都, 610059; 2 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都, 610059; 3 青藏高原生物多样性形成机制与综合利用重点实验室, 西宁, 810008

摘要: 天然腐植酸和生物表面活性剂可以改善土壤质量并增加多溴联苯醚(PBDEs)的溶解度。但两类物质对 PBDEs 污染土壤的修复效果的优劣尚不清楚, 对其强化植物修复 PBDEs 污染土壤的机理也缺乏足够认识。本研究以 PBDEs 中分布最广泛的十溴二苯醚(BDE-209)为目标污染物, 以两种典型的生物表面活性剂皂素和鼠李糖脂为对照, 首先开展了 BDE-209 的增溶和洗脱实验, 比较了天然腐植酸和两种生物表面活性剂对 BDE-209 在土壤中溶解和流动性的影响。其次开展了土壤培养实验, 探讨腐植酸和两种生物表面活性剂对 BDE-209 降解和土壤微生物环境的影响; 最后通过植物盆栽实验, 结合 BDE-209 消散率和植物生理生化指标, 比较了腐植酸和生物表面活性剂对 BDE-209 污染土壤的植物修复效果。结果说明相比生物表面活性剂皂素和鼠李糖脂, 腐植酸能通过提高 BDE-209 在土壤中的溶解流动度来增加其生物可利用性。其次, 通过提高土壤微生物多样性和微生物活性, 提高了土壤中 BDE-209 的降解效率。最后, 通过改善根际环境和植物生理生化指标, 提高了植物根际消散及吸收 BDE-209 的能力。本研究厘清了腐植酸强化植物修复 BDE-209 污染土壤的机理, 为污染土壤修复和土壤质量提升提供了理论基础和技术支撑。

关键词: 腐植酸, 生物表面活性剂, 十溴联苯醚, 微生物群落, 植物修复

作者简介: 刘世宾, 成都理工大学生态环境学院, 副教授, 污染土壤生物地球化学过程与调控。

E-mail: liushibin17@cdut.edu.cn。

PFOS 浓度分析过程影响因素及优化

陈星¹, 刘朝阳¹, 宋昕^{1*}, 丁小燕^{1,2}, 许昶^{1,2}, 魏昌龙¹, 唐志文^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京, 210008; 2 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要: 本研究解决 PFOS 浓度分析出现显著误差问题为目的, 开展了痕量级 PFOS 浓度分析影响因素研究。仪器分析表明, PFOS 溶液标准曲线 $r = 0.9988$, $R^2 = 0.9977$, 线性关系好, 拟合度高; $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PFOS 浓度测定允许误差约 $\pm 6\%$, 平均值置信区间为 $93.83\sim 105.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验表明, PP 材质移液枪枪头和玻璃材质的注射器均未产生明显系统误差和操作误差。在水与甲醇体积比为 1:9 混合液体系中, PP 注射器、PTFE 和 Nylon 滤膜的过滤器均使 PFOS 测定浓度增大, 且并非材料中含有 PFOS 残留造成; 甲醇为溶剂时, PFOS 待测液润洗后的 PP 材质的注射器与针式过滤器对 PFOS 浓度测定无显著影响。水为溶剂时, PP 离心管、PP 注射器和针式过滤器对 PFOS 的浓度有显著影响, 移液枪枪头和玻璃注射器未产生显著影响, 与美国 USEPA 与 ISO 标准中的建议相反, 存放含有 PFOS 水样品建议不使用 PP 材质的容器, 使用玻璃容器。液液萃取将水溶液替换甲醇为溶剂, 液液萃取操作步骤增多, 虽然累积误差增大约 1%, 但 RSD 为 $0.33\% \sim 2.29\%$, 测定精确度高, 液液萃取具有很好的可行性。

关键词: 全氟化合物; PFOS 测定; 前处理; 吸附损失;

作者简介: 陈星, 中建八局环保科技有限公司, 高级工程师, 土壤地下水修复。

E-mail: 51377974@qq.com.

人工甜味剂对土壤典型无脊椎动物的毒性效应

林祥龙

中国环境科学研究院

摘要：人工甜味剂是人工合成或半合成的蔗糖替代品，已被视为环境中的新兴污染物。当前，人工甜味剂对土壤典型无脊椎动物的毒性影响尚不明确。本研究初步揭示土壤常见人工甜味剂三氯蔗糖（SUC）、糖精（SAC）、甜蜜素（CYC）和安赛蜜（ACE）对模式生物赤子爱胜蚓（*Eisenia fetida*）和白符跳虫（*Folsomia candida*）不同水平（个体、分子和肠道微生物）终点的毒性效应，在一定程度上填补研究空白和为实际土壤中人工甜味剂生态风险的评估管控提供依据。主要研究结论/结果如下：

（1）土壤中环境相关浓度的常见人工甜味剂导致典型无脊椎动物（赤子爱胜蚓和白符跳虫）生长和繁殖等生命周期参数出现异常（增加或抑制），表明了这一新兴污染物的潜在生态风险。

（2）土壤人工甜味剂胁迫下，赤子爱胜蚓和白符跳虫体内 ECM-受体相互作用和溶酶体等 KEGG 通路的显著改变均是重要致毒机理。不同人工甜味剂胁迫下白符跳虫体内共有的 KEGG 通路（糖酵解/糖异生、戊糖和葡萄糖醛酸互转、氨基糖和核苷酸糖的代谢、核糖体和溶酶体等）表明该类污染物分子水平致毒机理具有相似性。

（3）无脊椎动物肠道微生物对人工甜味剂胁迫有着较高的敏感性，赤子爱胜蚓肠道中肾管共生体 *Verminephrobacter*、白符跳虫肠道中无色杆菌属（*Achromobacter*）是人工甜味剂毒性的指示性指标，其相对丰度变化也能在一定程度上解释无脊椎动物个体水平终点响应。

关键词：土壤新污染物,毒性效应,无脊椎动物

E-mail: 15110038821@163.com

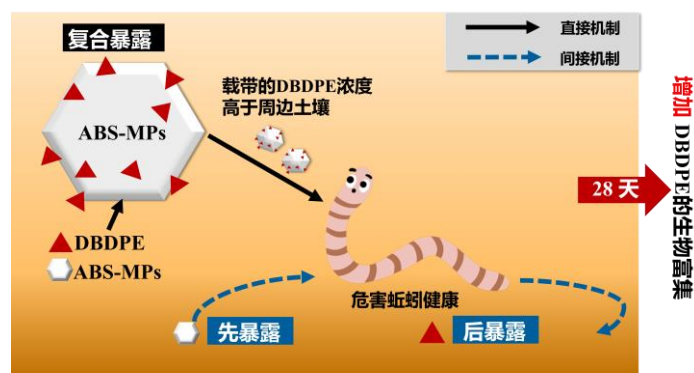
微塑料介导下土壤-生物中阻燃剂累积特征与毒性机制

彭程*, 张卫*, 傅梦茹, 韩艳娜

华东理工大学资源与环境工程学院; 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室

摘要: 微塑料 (MPs) 和阻燃剂等新污染物复合污染的环境风险已成为近期研究前沿和热点问题。本研究利用 LDA-BERT 主题建模揭示了 MPs 对全球生态系统影响的研究时空规律, 发现研究热点从水生生态系统转向陆地生态系统, 从环境分布转向环境命运, 从生物摄入转向毒性效应, 从生理毒性转向细胞和遗传毒性; 此外, 微塑料环境问题迫切需要更多发展中国家的关注。探究了丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS)-MPs 对蚯蚓中十溴二苯乙烷 (DBDPE) 吸收累积的影响机制, 发现 MPs 共存显著促进蚯蚓组织与表皮富集 DBDPE; MPs 对 DBDPE 的载体效应直接增强其在土壤-蚯蚓系统中的生物利用率, 同时 MPs 通过影响蚯蚓的组织形貌、生理活动、基因表达间接促进蚯蚓对 DBDPE 的累积。此外, 比较了不同种类 MPs 介导下蚯蚓体内 DBDPE 的累积特征与毒性效应, 发现三种 MPs 对蚯蚓累积 DBDPE 的促进效果为: 聚乳酸 (PLA)-MPs > PE-MPs > 聚丙烯 (PP)-MPs; MPs 介导 (尤其是 PLA-MPs) 显著加剧 DBDPE 对蚯蚓的神经毒性, 乙酰胆碱酯酶与钙离子为敏感生物标志物; 基于转录组学发现可生物降解 MPs 对蚯蚓的毒性高于传统石油基 MPs。该研究为科学评估微塑料及其复合污染的生态环境风险提供理论依据。

关键词: 微塑料, 阻燃剂, 蚯蚓, 生物累积, 转录组学



作者简介: 彭程, 华东理工大学, 副教授/博士生导师, 博士 (浙江大学与美国佐治亚理工学院联合培养)。

研究方向: 土壤污染修复、新污染物生态风险评估。

E-mail: cpeng@ecust.edu.cn。

塑料际对病原微生物的载带效应及健康风险

彭楚，王姣，李梦曦，汪磊*

南开大学环境科学与工程学院

摘要：作为重要的新污染物，塑料及微塑料在环境中的广泛分布被充分证实，其生态风险和健康危害也被不断研究和报道。其中，微塑料及其表面塑料际中特异性群落及对环境其他污染物的载带就是其生态风险和健康危害的重要体现。研究发现 PET 及 PLA 两种微塑料结合表面塑料际均能显著抑制土壤中四环素的降解，对土壤中的各级团聚体的测定发现，微塑料增加土壤中小团聚体的含量，降低土壤呼吸效率，并对好氧微生物群落产生抑制效应，这可能是微塑料抑制四环素降解的原因。宏基因组的物种注释表明，变形菌门等为土壤中四环素降解的核心菌群。基因注释结果发现，相关基因对外排泵的表达是土壤中最重要四环素降解机制。在水环境也进行了相关实验，针对鱼类误食误吸微塑料过程中是否会增大病原菌对鱼类的暴露风险及健康威胁这一猜测，进行了模拟暴露实验。以鲤鱼为实验对象，结果显示：1. 环境中的微塑料会快速进入鱼鳃，且由于纤维态微塑料的缠绕效应，锦鲤会更难排出纤维态微塑料；2. 微塑料的载带效应导致微塑料暴露组中锦鲤鳃中黄杆菌比例及绝对丰度显著增高；3. 相比空白组，实验组中烂鳃病的比例显著增高，且通过宏基因组技术及 RT-PCR 技术证明了这一过程是由于高丰度的黄杆菌及其分泌的软骨素 AC 裂解酶导致的，且微塑料特别是塑料纤维给鱼鳃带来的物理损伤会显著加重锦鲤的烂鳃病病情。考虑到塑料纤维（例如尼龙绳）在水产养殖业的大量使用，其可能带来健康风险的需要引起重视。

关键词：微塑料，土壤，细菌群落，抗生素降解，病原微生物

不同农业活动下农田土壤微塑料赋存和积累特征研究

杨杰¹, 涂晨¹, 冯裕栋¹, 李瑞杰², 李连祯³, 向黎^{1,4}, 骆永明¹

1 中国科学院土南京土壤研究所; 2 中国科学院西北生态环境资源研究院; 3 青岛大学环境科学与工程学院; 4 浙江工业大学环境学院环境生态与工程研究所

摘要: 微塑料污染已成为全球关注的环境问题。由于土壤等复杂介质中微塑料较难提取, 因此相对于水体环境, 微塑料在土壤环境中的研究相对滞后与缺乏。农田土壤是环境中微塑料的重要汇集地, 其污染程度与微塑料的来源有关。长期的农业活动被认为是农田土壤中微塑料的重要来源, 如: 有机肥的施用、污泥农用及使用农用薄膜等。然而, 目前缺乏对长期农业活动下农田土壤中微塑料的赋存和积累规律的研究。本研究通过连续流动浮选分离方法, 综合分析长期施用猪粪的红壤旱地农田、长期施用污泥的稻麦轮作农田和长期覆膜的川中丘陵稻田中微塑料赋存特征发现, 不同农业活动土壤中微塑料赋存特征具有相似性和差异性。纤维和碎片是非覆膜土壤中微塑料的主要类型微塑料, 覆膜造成了土壤中薄膜类微塑料的增多; 土壤中微塑料的颜色以透明、黑色、红色和蓝色为主, 粒径<1 mm 的微塑料在大部分土壤中占比较高。聚合物类型上, 以聚酯、聚丙烯和聚乙烯为主。长期施用猪粪、污泥和长期覆膜造成了土壤中微塑料积累。根据当地的土壤容重估算, 长期猪粪和污泥的施用造成土壤中微塑料积累量分别为 350 万个 ha⁻¹ 和 768 万 ~ 2904 万个 ha⁻¹; 长期覆膜造成了土壤中薄膜类微塑料的年积累量为 1404 万 ~ 1809 万个 ha⁻¹。受长期风化的微塑料表面出现了微米级裂纹和微孔, 羰基等含氧官能团增加和黏土矿物附着等风化特征。研究结果为农田环境中微塑料积累规律的认识提供基础数据和理论指导。

关键词: 微塑料; 农田土壤; 赋存特征, 积累规律, 长期风化

作者简介: 杨杰, 男, 中国科学院南京土壤研究所, 特别研究助理, 主要从事微塑料的土壤-植物系统过程与风险研究。

E-mail: jyang@issas.ac.cn

邯郸市工业区周边土壤重金属污染特征和来源解析

张海霞, 蔡昂祖, 赵泽霏

河北工程大学

摘要: 邯郸市是位于河北省南部的典型重工业城市, 长期的工业活动导致周边的环境存在潜在的污染风险, 尤其是重金属。因此针对邯郸市工业区进行土壤重金属污染来源解析和评估, 对有效控制重金属排放和保护区域环境具有重要意义。本研究在邯郸市工业区周边开展, 对污染状况进行评估, 并采用受体模型解析了土壤重金属污染来源。

本研究以邯郸市工业区的冶炼厂为中心, 采用放射状布点法布设了 56 个采样点, 并测定了 Fe、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As 等 9 种重金属元素含量。结果显示表层土中这 9 种重金属平均含量分别为土壤背景值的 1.32、17.62、1.92、1.30、1.15、1.26、1.40、4.79 和 2.36 倍, 底层土中 9 种重金属分别为背景值的 1.32、15.13、1.78、0.95、1.13、1.24、1.45、4.15 和 2.39 倍。表层土和底层土中均为 Cd 超标倍数最大, 其次是 Zn。不同重金属空间分布存在差异, 主城区和冶炼厂周边重金属含量较高。富集因子分析结果表明 Cr、Pb、Ni、Cu 和 Mn 属于轻度富集; Zn 和 As 属于中度富集; Cd 属于高度富集, 土壤中的 Cd 受人为污染源影响严重。单因子污染指数评价结果显示研究区域 Cd 属于重度污染等级, Zn 属于中度污染等级, As 属于轻度污染等级, 其他重金属元素属于轻微污染等级。地累积指数评价结果表明 Cd 处于重度污染状态, Cr、Zn 和 As 处于轻度污染状态, 其余元素处于无污染状态。潜在生态风险评价结果显示, 按重金属元素来说, 研究区域 Cd 的生态风险最高; 生态风险空间分布显示, 钢铁冶炼厂东南部生态风险最高; 研究区域 RI 平均值为 620.61, 说明地区存在很强的潜在生态风险。根据富集因子、单因子污染指数、地累积指数和潜在生态风险指数计算的综合污染指数结果表明 Cd、Zn 和 As 的 IPI 值均大于 0.5, 处于重污染水平。本研究利用 Unmix、正定矩阵因子分析法 (PMF) 和绝对因子-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 受体模型进行源解析, 并对比分析这三种受体模型获得的来源种类、源贡献及适用性。解析结果表明, 三种模型互相印证和补充, 能够较为准确地解释重金属污染来源。但从源解析结果和模型适用性角度来看, PMF 模型运行结果最优。总的来说, 工业排放源 (48.33%-58.04%) 为该研究区域土壤重金属最主要的污染源, 其次是交通源和自然源。

关键词: 重金属; 空间分布; 源解析; 污染评估; 受体模型

作者简介: 张海霞、河北工程大学、教授, 主要研究环境中重金属的迁移转化和来源解析。

E-mail: zhanghaixia@hebeu.edu.cn

石化场地石油烃污染监测及分布研究

万伟, 钱钦, 马苏甜, 韩旭, 宋春侠, 刘颖荣

中石化石油化工科学研究院有限公司

摘要: 石油是烷烃、环烷烃、芳烃、烯烃及少量其他有机物的复杂混合物。石油中碳、氢含量占绝对优势, 总量达到 95-99%。石油烃具有“三致”特性, 即致癌、致畸、致突变, 引起国内外的广泛关注。国内按照碳数将石油烃分为挥发性石油烃(C6-C9)和可萃取石油烃(C10-C40)。石化行业是石油烃排放的重点行业, 炼化企业场地中的石油烃来自于生产工艺产生的废水排放, 油类产品的储存、运输和装卸过程中存在的泄漏, 主要污染物为汽油和柴油。催化剂是石油化工工业中最重要的组成部分, 催化剂经过多次运转后, 其表面负载的石油烃、重金属等污染物会引起催化剂中毒而失去活性, 因此回收催化剂需要除去这些污染物。废催化剂已被列入《国家危险废物名录(2021 版)》, 危险废物的储存和处理非常严格, 处理费用成倍增加, 成为石化行业环保成本之一。《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)设立了土壤中石油烃(C10-C40)的筛选值和管制值, 其中第一类用地的筛选值和管制值为 826 mg/kg 和 5000 mg/kg, 第二类用地的筛选值和管制值为 4500 mg/kg 和 9000 mg/kg。《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB 5085.6—2007)将可回收石油烃总量 $\geq 3\%$ 列为危险废物。目前分析标准中 C6-C9 和 C10-C40 的测定以总量计, 土壤已有标准方法, 固体废物还没有标准方法, 且均不涉及碳数分布的计算。本文建立了适合石化场地土壤和废催化剂中石油烃污染物的前处理和分析方法, 并采集典型石化装置的土壤和废催化剂样品, 考察石油烃等污染物的分布。

关键词: 石油烃, 石化场地, 分析方法

作者简介: 万伟(1991~), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为石化分析和土壤分析。

E-mail: wanwei.ripp@sinopec.com。

土壤生态服务功能和价值评估

周颖

生态环境部环境规划院

摘要：土壤是生态系统的重要组成部分，为生态系统服务功能提供支持服务，是森林、草地等生态系统生存的必需条件，直接影响着陆地生态系统的健康。本文从分别设置土壤生态系统存量（生态资源资产）核算指标体系、土壤生态系统流量（生态产品价值）核算指标体系以及环境损害价值核算方法，其中存量账户设定 6 个指标描述土壤生态系统生态资产质、量及其动态变化；流量账户按“物质供给、调节服务、文化服务”3 个一级指标和 7 个二级指标，并利用市场价值法、旅行成本法、支付意愿法等方法进行价值量化，核算土壤生态系统功能实物量和价值量，为土壤生态系统生态产品价值核算和损害价值核算提供参考。

关键词：土壤, 生态, 价值, 评估

E-mail: zhouying@caep.org.cn

某大型非法倾倒废液案件土壤环境损害鉴定评估技术方法实践研究

孙倩^{1,2}, 赵丹^{1,2}, 於方^{1,2}

1 生态环境部环境规划院; 2 国家环境保护生态环境损害鉴定与恢复重点实验室

摘要:近年来,非法倾倒污染环境事件频发,生态环境部、公安部、最高检等部门联合行动,推进落实生态环境损害赔偿制度改革和环境民事公益诉讼制度,严厉打击环境污染犯罪行为。2022年,内蒙古自治区公安部门查处1起跨省大型非法倾倒废液污染环境案,该案件涉及倾倒点110多处,倾倒方式有直接排放、渗坑注入、喷洒路面等,倾倒废液量超过30万m³。如何科学运用现有生态环境损害鉴定评估技术方法开展鉴定评估,同时要兼顾调查时效要求和调查成本,是本案鉴定评估工作的重点和难点。

一是按照调查评估对象进行分类,选择代表性区域开展现场土壤环境损害调查。按照倾倒位置不同,分为野外沙地、垃圾堆场等16种类型。按照调查对象和调查条件不同,分为4大类,第1类为野外沙地,第2类为垃圾堆场,第3类为公路地面、渣场等;第4类为砖厂、化工厂等。对于第1类和第2类,选择倾倒量大、倾倒范围较大、污染情况复杂,且具备调查条件的倾倒点为代表,开展现场采样调查;第3类倾倒点,不具备现场调查条件;第4类倾倒点,经调研确定废液没有进入外环境,没有造成损害。二是根据损害价值量化方法的适用性,分类型开展土壤环境损害价值评估。对于第1类和第2类倾倒点,如调查确定了受损土壤范围和程度,且需要实施修复措施,则制定土壤恢复方案和补偿性恢复方案,基于恢复费用量化环境损害价值;大多野外沙地倾倒点,废液倾倒量小、倾倒范围较小,且沙地的渗透性较强,部分区域植被已逐渐恢复生机,不需要采取修复措施,则利用基于废液排放量的虚拟治理成本评估环境损害价值。对于第3类倾倒点,无法确定损害程度和范围,同样采用虚拟治理成本法进行环境损害价值量化。三是通过不同倾倒点受损情况对比,探索土壤环境损害责任划分方法。在修理厂倾倒点,倾倒人将部分废液直接倾倒,部分废液用于清洗含油储罐后排放,两者共同造成了土壤环境损害。对比2处倾倒点的环境损害调查情况发现,废液倾倒量相差1.6倍,但修理厂倾倒点地下水中苯系物浓度远高于另一倾倒点,其中乙苯浓度高80多倍,由此认为修理厂洗罐主要对有机物类指标产生影响,倾倒废液主要对无机盐类和重金属类指标产生影响。因此,按照受损土壤中不同类型指标所占的区域体积的相对比例,进行土壤环境损害责任划分。

关键词: 非法倾倒、土壤损害、鉴定评估

作者简介: 孙倩,生态环境部环境规划院,工程师,主要从事土壤地下水环境损害鉴定评估研究。

E-mail: sunqian@caep.org.cn。

土壤环境损害鉴定评估中工程修复目标的选取

王凯霖

生态环境部环境规划院

摘要：在已开展的废液倾倒和危险废物填埋类环境损害案件中，多数案件直接采用土壤环境标准或基于人体健康风险评估方法推导的风险控制值来作为土壤清挖目标。土壤和地下水之间存在天然的水力联系，如选择不合适的清挖修复标准，土壤中残留的污染物虽然不会引起人体健康风险，但在淋溶作用下会迁移至地下水中导致二次污染，不仅影响前期地下水环境损害鉴定评估的准确性，也给地下水环境带来较大的环境和健康风险。

以西北某场地为案例，探讨工程修复目标值的选取对地下水环境损害鉴定评估研究的影响。某废液倾倒场地土壤中特征污染物为苯酚和 4-甲基苯酚，应急处置单位参考北京地标《场地土壤环境风险评价筛选值》（DB11/T 811-2011），清挖阶段将土壤中苯酚和 4-甲基苯酚的清挖目标值分别定为 200 mg/kg 和 80 mg/kg，清挖后效果评估表明侧壁和坑底土壤中残留苯酚和 4-甲基苯酚的最高浓度分别为 96.1 mg/kg 和 14.2 mg/kg，达到清挖目标。地块清挖后栽种了树木，在一次大水漫灌后地下水中挥发性酚类浓度出现急剧上升的情况，地下水中挥发性酚类最大浓度由漫灌前的 0.0615 mg/L 升高到 9.23 mg/L，超过 GB 14848 的Ⅳ类地下水限值（0.01 mg/L）922 倍。

清挖后土壤中残留污染物进入地下水通常经历 4 个过程：（1）污染物释放后在土壤固、液、气三相中的分配；（2）污染物随水分穿越非饱和带到达潜水面；（3）污染物进入地下水中发生混合稀释；（4）污染物在含水层中的迁移衰减。只考虑土壤中污染物的淋溶和地下水的稀释作用，计算的清挖目标值为 0.25 mg/kg，基于保护地下水的土壤风险控制值远小于最初依据人体健康风险标准确定的苯酚和 4-甲基苯酚清挖目标值，未清挖污染土壤给地下水环境带来较大风险。因此，在制定土壤修复目标时应充分考虑土壤中污染物对地下水环境的风险，尤其对于土壤有机碳-水分配系数较小的污染物，其不易被土壤吸附而易随淋溶液迁移，对地下水环境风险较大。

关键词：土壤；地下水；修复目标；挥发性酚类；风险控制值

作者简介：王凯霖，生态环境部环境规划院生态环境风险损害鉴定评估研究中心，博士，助理研究员，主要研究方向为土壤、地下水环境损害鉴定评估和风险管控。

E-mail: wangkl@caep.org.cn

基于 PMF 模型的重金属污染场地土壤损害基线确定方法研究

王 宾

生态环境部环境规划院

摘要：重金属污染造成的环境损害事件呈逐年增加态势，严重威胁生态环境与人类健康。环境损害评估技术是场地污染责任鉴定、修复、损害赔偿的有效手段，在环境司法、环境管理中具有不可或缺的作用。受干扰来源多、土壤变异性强、重金属迁移转化复杂等因素影响，现有重金属污染场地土壤环境损害评估过程中存在基线识别不准确的问题，难以满足场地基线原位识别要求。本文提出了基于正定矩阵因子分解法(PMF)的污染场地土壤重金属环境基线水平确定方法。利用 PMF 模型在识别和量化土壤重金属来源方面的优势，解析场地不同点位自然源重金属贡献情况，进而反演出整个场地的重金属基线值，并利用相关系数法、不确定性分析法和对照区调查法综合评估模型计算结果的准确性。案例应用结果显示，识别出研究区土壤重金属的三个来源分别为工业源(PMF-F1)、历史源(PMF-F2)和自然源(PMF-F3)，三项源对整个研究区土壤重金属的相对贡献率平均值分别为 5.79%、17.82%、76.39%。利用相关系数法计算出模型预测值与实测值的相关系数基本达 0.9 以上；利用三种不确定性分析方法确定自然源的标识元素区间比值低于 0.3，模型模拟效果良好；与对照区调查法获取的结果对比显示，基于 PMF 模型获得的污染场地标识元素环境基线值更接近区域背景值。本方法有效解决了场地土壤重金属原位基线确定方法缺失的问题，同时也丰富了我国现行土壤损害鉴定评估技术指南中基线识别的研究手段。

关键词：土壤损害；基线；重金属；PMF

作者简介：王宾，生态环境部环境规划院，博士/助理研究员，地下水科学与工程专业，主要从事土壤与地下水环境损害鉴定评估相关研究与实践工作。

E-mail: wangbin@caep.org.cn

环境损害鉴定评估案例分析

段德超

浙江佳和生态环境科技有限公司

摘要：针对河道重金属污染案例的环境调查、损害分析、危废鉴定等一系列环境损害评估技术手段介绍。

关键字：河道、重金属污染、环境损害评估

E-mail: 408016878@qq.com

污染场地可持续风险管控与再利用国际经验比较研究

郑晓笛，张琳琳，张心怡，叶晶，丁惠，江涛，王明睿

清华大学建筑学院

摘要：在新时代生态文明与美丽中国建设大背景下，土壤污染风险管控与生态修复已经成为我国重大战略需求。2022 年 10 月，党的二十大报告指出，加强土壤污染源头防控，开展新污染物治理。一方面，需要持续深入推进农用地土壤污染防治和安全利用，强化土壤污染源头管控及受污染耕地安全利用和风险管控；另一方面，要严格建设用地土壤污染风险管控和修复名录内地块的准入管理，推进受污染耕地和建设用地管控修复。

本研究归纳总结西方发达国家在土壤污染防治领域几十年积累的成功经验，选择英国、美国、欧盟（包括德国、荷兰、比利时等）、日本作为典型国家代表，通过研究国外污染场地风险管控与再利用相关的基本概念、法律法规、管理模式、实践路线、典型案例等内容，系统梳理国外发达国家在污染场地可持续风险管控与再利用领域积累的理论基础和实践经验。基于对于国际前沿经验的总结，本研究提出三大核心策略：（1）建立分级分层风险管控与再开发的总体路径；（2）有效联结“污染治理”和“再生利用”两大阶段；（3）建立全生命周期可持续实践与评估流程。本研究通过将“可持续”理念融入污染场地风险管控的各个环节，探索中国污染场地可持续修复与规划利用相结合的新模式，构建基于中国国情的可持续风险管控与再利用实践路径。

关键词：污染场地，风险管控，国际经验

作者简介：郑晓笛，清华大学建筑学院特聘副教授、院长助理、景观学系副主任，清华大学建筑学院棕地研究中心创始人及联合主任，担任中国风景园林学会副秘书长、教育部高等学校风景园林专业教学指导分委员会秘书长、国际风景园林师联合会亚太区（IFLA APR）中国官方代表等兼职。主要研究方向：城市棕地与废弃地改造再生、校园景观设计研究、风景园林规划设计。

E-mail: xiaodister@qq.com

氰化物污染土壤修复工程环境足迹评估方法和案例研究

桑春晖^{1*}, 杨欣桐^{2*}, 张红振², 肖萌¹, 刘瑞平², 孟藤藤³, 李香兰^{1*}

1 北京师范大学地理科学学部全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 2 生态环境部环境规划院土壤保护与景观设计中心, 北京 100012; 3 山东大成环境修复有限公司, 山东淄博 255099

摘要:“双碳”背景下,我国污染土壤修复不断向低碳、低能耗、绿色可持续方向发展,修复活动本身的环境足迹逐渐融入污染场地修复的管理决策过程。氰化物作为重要的工业原料,由其剧毒且引发土壤污染问题长期存在而愈发受到广泛关注。本文在界定评估边界、细化数据清单和系统构建评估流程方法的基础上,采用国际上广泛应用的环境足迹分析计算工具 Spreadsheets for Environmental Footprint Analysis (SEFA),以山东某氰化物污染地块为例,基于实际获取数据,进行环境足迹的定量评价。结果表明,修复工程污染土方量 74948 m³,材料消耗量 2249 t,固废产生量 4.19 t,水资源消耗量 2714 m³,废水产生量 2481 m³,能源消耗量 4274 万 MJ,温室气体 (GHG) 排放量为 2463 t CO₂e。原位化学氧化相对原地异位化学氧化的环境影响更小,去除每千克氰化物的能源效率和 GHG 排放强度分别为 6415 MJ/kg 和 339.11 kg CO₂e/kg,约占异位化学氧化的 25%。案例结果表明,SEFA 能够快速、高效地定量评估氰化物污染修复工程的环境影响,上游原材料的使用导致的间接排放是环境足迹的主要来源,设备使用时长和材料用量是影响评估结果的关键参数。不确定性分析结果表明案例场地能源消耗、温室气体排放、NO_x, SO_x 和颗粒物 3 种大气污染物排放、HAP 排放的变异系数分别为 5.09%、4.68%、3.7%、6.8%,均小于 10%,本案例核算结果的不确定性较低。

关键词: 原位化学氧化; 异位化学氧化; 过硫酸钠; 绿色可持续修复; 碳排放

作者简介: 桑春晖, 北京师范大学地理科学学部全球变化与地球系统科学研究院, 硕士研究生, 主要气候变化与污染场地绿色可持续修复研究。

E-mail: 202331490012@mail.bnu.edu.cn.

基于多源公共大数据的区域企业用地污染识别与风险评估研究

江叶枫¹, 史舟²

1 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2 浙江大学环境与资源学院, 杭州
310058

摘要: 改革开放以来, 我国工业化和城市化快速发展导致工矿企业数量、企业污染事件和程度显著增加, 企业用地污染与风险问题受到社会各界广泛关注。虽然我国在企业用地污染调查和风险评估方面取得了长足进步, 但由于污染基数大、管理起步晚导致区域层面上仍面临污染识别效率低与风险评估成本高等问题, 同时区域层面上事件驱动型环境风险管理模式的弊端逐渐显现, 给企业用地风险管理带来了极大挑战。然而, 以传统场地调查为手段的污染识别和风险评估方法费时费力, 且难以快速明确重点区域、重点行业 and 重点企业。近年来, 随着物联网、机器学习、关联分析、自然语言处理和网络爬虫等技术的飞速发展, 企业用地的数据获取方式和体量都得到了大幅扩展, 企业用地污染识别与风险评估研究已开始向大数据方向和区域尺度进行转变。然而, 如何结合大数据相关技术科学有效地开展区域企业用地污染识别与风险评估研究是当前污染防治亟需解决的基础问题。为此, 本文以我国企业用地污染重点区域长三角为主要研究区, 采集场地调查、社交媒体、工业企业等多源异构数据, 运用网络爬虫、时空多属性信息融合、机器学习、主题分析、情感分析和情景假设等大数据技术, 开展区域企业用地污染识别与风险评估研究, 以期为实现企业用地的分类管理和风险管控提供科学依据。

关键词: 企业用地; 污染识别; 风险评估; 机器学习

作者简介: 江叶枫, 男, 江西农业大学国土资源与环境学院讲师, 主要研究领域为资源环境遥感与信息技术; 史舟, 男, 浙江大学环境与资源学院教授, 主要研究领域为资源环境遥感与信息技术。

E-mail: jiangyefeng@zju.edu.cn

我国在产企业土壤污染超标预测方法探索——以炼焦行业为例

雷梅

中国科学院地理科学与资源研究所

摘要：近年来，我国建设用地土壤污染问题日益受到关注。污染后的建设用地治理难度大，成本高，传统的“末端治理”方式已无法应对我国上百万个建设用地的污染问题。因此，国家现在将管理重点转向源头预防，以切断污染途径的方式来保护土壤环境。然而，由于采样调查数据有限，对在产企业的土壤污染管理仍难有针对性。如果能提前预测出在产企业当前及未来的土壤污染状况和趋势，从而采取措施预防或减轻场地污染的影响，这对土壤环境质量预警和区域建设用地管理政策的实施至关重要。因此，急需一套行之有效的建设用地土壤污染物含量预测方法。然而，环境领域在聚焦到某一行业时数据量小、更新速度慢，如何利用为数不多的数据类型达到较为准确的污染物含量预测，是环境领域需要突破的关键节点之一。本报告以我国在产炼焦企业土壤苯并[a]芘为研究对象，利用多源环境大数据技术，通过深入研究污染物排放标准并创建量化方法，结合企业自身信息和自然环境信息，构建了一套建设用地土壤污染物含量预测方法。进而利用该方法预测了我国在产炼焦企业土壤苯并[a]芘的含量及超标情况。这样的方法在一定程度上突破了传统方法对数据的依赖，不再局限于单一的数据源或数据类型，而是通过多源环境大数据的综合分析，提高了预测的准确性和可靠性。这种方法不仅有助于我们了解我国在产炼焦企业土壤污染物的含量情况，还能为政策制定者提供决策依据，以更好地保护土壤环境质量。

关键词：炼焦行业；苯并[a]芘；标准量化；污染预测。

作者简介：雷梅，中国科学院地理科学与资源研究所，研究员。主要研究方向为：土壤污染大数据挖掘、土壤重金属修复、土壤重金属污染现场快速监测技术与设备。

E-mail: leim@igsnrr.ac.cn。

厌氧脱卤菌剂 BS-1 与原位强化生物修复技术

陈波洋

北京博诚立新环境科技股份有限公司

摘要：在国家重点研发计划“场地地下水卤代烃污染修复材料和技术”项目支持下，我司成功研发了具有完全独立知识产权的厌氧脱卤生物修复菌剂 BS-1。此菌剂的多种型号可将各种氯代甲烷、氯代乙烷和氯代丙烷等氯代烷烃厌氧脱卤降解无害化，性能媲美国际知名的 KB-1 菌剂，填补了国内空白。氯代烷烃和氯代烯烃是国内污染场地中常见的挥发性有机污染物，严重威胁人体健康和生态环境安全。国际知名的 KB-1 菌剂自 2002 年首次批量生产以来，已广泛应用于欧美发达国家氯代烃污染场地。长期以来，我国因缺乏厌氧脱卤生物修复菌剂制约了厌氧生物修复技术的应用。厌氧脱卤生物修复菌剂难以规模培养，我司研发了碳源、电子供体、电子受体和生物刺激因子等发酵材料配方和发酵工艺参数，实现国内首次 5000L 厌氧脱卤菌剂规模化生产。我司研发的厌氧脱卤生物修复菌剂 BS-1 结合已授权发明专利技术可实现经济高效、绿色低碳治理修复污染场地。在开展的地下水原位强化厌氧脱卤微生物修复中试中，高浓度氯代烃可在四个月内经厌氧脱卤降解达到地下水 IV 类标准，去除率高达 99%以上。

关键词：原位强化生物修复 基岩裂隙水 生物菌剂 修复井设计 运行调控

作者简介：陈波洋，北京博诚立新环境科技股份有限公司，董事长兼总经理，正高级工程师，入选国家科技专家库和生态环境部环境工程评估中心专家库，2003 年度中国环境科学学会青年科技奖获得者，多次获得北京市科技进步奖，作为牵头人荣获生态环境部 2021 年度环境保护科学技术奖二等奖。获得多项原位强化生物修复发明专利授权，作为技术发明人，在腾格里沙漠污染事件污染场地成功实施了国内首例大规模地下水原位强化生物修复工程。

E-mail: bychen@bosentech.com

历史碳质 Hg-Tl 采矿废石中铊的持久性富集及其高生态风险

Persistent thallium enrichment and its high ecological risks developed from historical carbonaceous Hg-Tl mining waste

赵凤其¹, 顾尚义^{1,2*}, 李清光^{1,2}, 郭子栋¹, 张翔¹, 游桂连¹, 邓刚琴¹, 张天怡¹

1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2 贵州大学地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025

摘要: 铊 (Tl) 是一种具有高生物毒性的优先污染物, 近年来受到全世界的高度关注。中国西南地区滥木厂 Hg-Tl 矿区是多(类)金属污染的热点地区, 以前曾造成大规模的慢性 Tl 中毒, 主要由含 Tl 的碳质采矿废石引起。然而, 在复垦几十年后, 被历史采矿废石破坏的耕地仍然面临着高生态风险, 但人们对作为潜在 Tl 来源的下伏采矿废石在土壤形成过程中 Tl 的固相分配和形态知之甚少。在本研究中, 从低地选择了一个具有代表性的复垦土壤剖面 (100 cm 深), 以探索采矿废石衍生底土中 Tl 的地球化学循环和环境命运。通过电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 分析显示, 采矿废石衍生底土中 Mn (2920-7250 mg/kg) 和 Tl (205-769 mg/kg) 意外富集。BCR 连续提取、X 射线光电子能谱 (XPS) 和电子探针 (EPMA) 的结果表明, 高 Tl 负载的 Mn 氧化物微粒 (高达 15712 ppm Tl) 通过氧化-络合作用主导了 Tl 在底土中的固存, 并具有很高的向表土和地下水迁移的潜力。此外, 来自微生物化石和与 Tl 密切相关的 Fe 代谢细菌的认识表明, 显示出高 Tl 水平 (高达 3865 ppm) 的 Fe(氢)氧化物颗粒指向生物矿化。详细的矿物学调查表明, 赤铁矿-菱铁矿共生颗粒可以作为周期性淹水条件下氧化还原波动的一种很有前景的矿物学指标, 并记录了研究剖面中频繁的地下水位波动。尽管在岩溶地区富含 HCO₃ 的地下水条件下, 高 Tl 含量的 Fe/Mn(氢)氧化物有可能长期保存, 但在淹水期间, Tl 的还原释放将是不可避免的, 这意味着下伏碳质采矿废石将对生态系统构成持久和严重的危害。

关键词: 碳质采矿废弃物; 显微矿物学; 铊污染; 锰氧化物; 铊生物矿化

作者简介: 赵凤其, 男, 工程师, 博士研究生, 目前主要研究铊的富集成矿以及铊在表生条件下的迁移转化。

E-mail: zhao_fengqi103@163.com

微纳米塑料在陆地植物中粘附、吸收、易位和阻断的文献计量分析和系统综述

Bibliometric analysis and systematic review of the adherence, uptake, translocation, and reduction of micro/nanoplastics in terrestrial plants

李洋, 赵林, 安毅, 秦莉, 乔治, 陈达颖, 李一晗, 耿宏志, 杨永奎

天津大学, 天津 30072

摘要: 微/纳米塑料是全球新兴的农业污染物。微/纳米塑料可以附着在陆地植物表面, 被植物吸收和运输, 并积累在植物的可食用部分, 导致通过食物链富集和传播的可能性, 威胁人类健康。然而, 其根本机制仍不清楚。随着对陆地植物中微/纳米塑料内化的研究越来越多, 有必要对当前的研究趋势和进展进行全面、系统的综述, 为进一步的相关研究提供参考。基于文献计量学分析, 本研究梳理了该研究领域的重要期刊和研究机构, 并重点探讨了陆地植物对微/纳米塑料粘附、吸收和迁移的机制、研究方法和阻断技术。结果表明, 微/纳米塑料可以粘附在植物组织的表面, 如种子、根和叶子。根吸收(根-叶易位)和叶吸收(叶-根易位)是植物中 MNPs 的两种同时内化途径。观察方法包括扫描电子显微镜(SEM)、共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)、热解气相色谱-质谱法(Py-GC/MS)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)。我们强调了减少植物对 MNPs 的吸收和转运的必要性和紧迫性, 并发现硅的应用可能是减少内化的一种很有前途的方法。这项研究确定了当前的知识差距, 并提出了未来可能的研究需求, 如(1)关于 MNPs 如何从木质部或韧皮部卸载, 然后重新分配到可食用部分的机制, 研究尚缺乏,(2)建议在根和叶的联合吸收下研究 MNPs 在作物可食用部分的最终积累,(3)迫切需要寻找有效的方法来减少陆地植物对 MNPs 的吸收、迁移和积累, 硅的应用可能是有前景的方法之一, 需要深入探索, 等。

关键词: 微纳米塑料; 陆生植物; 内化机制; 阻断

作者简介: 李洋, 天津大学, 博士研究生, 土壤及地下水新污染物研究。

E-mail: LiY0128@163.com

镉和铜复合污染对温室栽培胡萝卜的生理和遗传影响

Physiological and genetic effects of cadmium and copper mixtures on carrot under greenhouse cultivation

安启睿¹, 郑娜^{1*}, 候胜男², 孙思宇¹, 李肖乾¹, 王素静¹, 宋雪¹, 李鹏洋¹

1 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 2 四川省农业科学院, 成都 610066

摘要: 暴露于重金属的复合污染会影响蔬菜的基因, 重金属会在蔬菜中积累, 从而间接影响人体健康。探讨镉 (Cd) 和铜 (Cu) 复合污染下胡萝卜基因变化与表型变化之间的联系, 对研究重金属污染机理具有重要意义。因此, 本研究考察了 Cd 和 Cu 复合污染对温室栽培胡萝卜生理指标 (丙二醛 (MDA)、脯氨酸和抗氧化酶) 和生长相关基因 (赤霉素基因、胡萝卜素基因和糖基因) 表达的影响。结果表明, 在添加高浓度 Cd 和 Cu 复合污染的处理中, MDA 含量显著增加 ($p < 0.05$), 而脯氨酸含量与对照没有显著差异。在高浓度 Cd 的复合处理中, 超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性明显低于对照组 ($p < 0.05$); 而过氧化物酶 (POD) 的活性与对照组相比有不同程度的增加。在添加 Cd 和 Cu 复合污染时, 与对照相比, 赤霉素基因的表达下调了 1.97 至 20.35 倍 (不包括 0.2 mg kg^{-1} Cd 和 20 mg kg^{-1} Cu 的复合污染, 该处理中赤霉素基因的表达上调了 1.29 倍), 导致胡萝卜的长度和干重下降。复合污染中胡萝卜素基因的表达下调幅度比单一处理大, 这可能会降低胡萝卜抵抗氧化损伤的能力, MDA 含量的显著增加就说明了这一点。在添加 Cd 和 Cu 复合污染时, 与对照相比, 糖基因的表达下调了 1.42-59.40 倍, 这会导致胡萝卜的糖含量显著降低, 并可能进一步降低其抵抗重金属损伤的能力。聚类分析显示, 在添加 Cd 和 Cu 复合污染时, 植物表型首先受到影响, 然后随着添加浓度的增加, 基因的表达也受到影响。总之, 在添加 Cd 和 Cu 复合污染时, 随着 Cd 和 Cu 浓度的增加, 植物会受到损害。

关键词: 镉; 铜; 胡萝卜; 生理效应; 基因表达; 重金属复合

作者简介: 安启睿, 吉林大学新能源与环境学院博士生, 主要研究领域为土壤环境重金属复合污染。

E-mail: 1923664959@qq.com

石油烃降解基因的定量检测方法改进及其在陕北油田土壤污染研究中的应用

Improvements in quantitative detection methods for petroleum hydrocarbon degradation genes and their application in studying soil contamination in the Shaanbei oil field

刘泽梁, 吴蔓莉*

西安建筑科技大学, 西安 710055

摘要: 陕北油田的开采活动引发了严重的土壤石油污染问题。石油烃降解关键基因(包括脂肪烃和芳香烃降解基因)的定量分析为研究石油污染物的降解潜力提供了重要依据。然而, 现有的研究中, 部分降解基因的定量检测方法只有定性而无定量分析, 或者存在扩增效率低且方法灵敏度较差的问题。本研究根据文献报道的 27 种石油烃降解基因, 通过 Allele ID6 软件, 按照引物设计原则对其中的 19 种基因进行了重新设计和优化。将质粒 DNA 进行 8 次 10 倍梯度稀释后构建实时荧光定量 PCR 标准曲线, 检测体系 (20 μ L) 为: FastStart Essential DNA Green Master 10.0 μ L, 上下游引物各 0.4 μ L, RNase-Free Water 4.2 μ L, 5.0 μ L DNA 模板。对于 17 种在文献中没有定量检测方法的石油烃降解功能基因, 成功构建了新的定量检测方法, 这些基因的扩增效率均在 73%-118%之间。另外, 优化了 masD 和 bamA 基因的定量检测方法, 优化后的方法扩增效率分别提高至 97.5%和 71.2%, 相比文献报道的方法提高了 7.6%-44.5%, 具有更高的重复性和灵敏度。通过这些引物, 对陕北 10 个地区不同污染程度的石油污染土壤进行了定量检测。结果显示, 当土壤含油量低于 10,000 mg/kg 时, 脂肪烃和芳烃降解基因的表达上调; 然而, 当含油量超过 10,000 mg/kg 时, 这两类基因的表达下调。这表明, 当土壤石油含量低于 10,000 mg/kg 的中等污染水平时, 其生物修复潜力较高。

关键词: 石油烃降解关键基因; 荧光定量 PCR; 引物设计; 检测方法; 石油污染土壤

作者简介: 刘泽梁, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 博士研究生, 石油污染土壤的生物修复理论与技术。

吴蔓莉, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 教授/博士生导师, 石油污染土壤的生物修复理论与技术。

E-mail: zeliang_liu@126.com

E-mail: 447005853@qq.com

新型改性木耳菌棒生物炭凝胶球用于 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 复合污染修复

Novel modified wood ear mushroom sticks biochar aerogel spheres for the remediation of Cd^{2+} and Pb^{2+} composite pollution

纪艺凝¹, 郑娜^{1,*}, 吴波², 安启睿¹, 李梓萌¹, 孙思宇¹, 张文慧¹, 李肖乾¹, 王素静¹

1 吉林大学, 新能源与环境学院地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130012

2 农业农村部沼气科学研究所, 成都 610041

摘要: 镉(Cd)对人体具有剧毒, 其主要影响的是骨骼和肾脏。铅(Pb)含量超标会危害人体神经系统、消化系统和心血管系统, 影响儿童智力等造成不可逆转的严重后果。 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 离子共存于采矿、冶炼、电子垃圾回收、油漆、汽油和其它工业生产过程中, 广泛存在于地表水、地下水、土壤和沉积物中。当 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 一起释放到环境中时, 它们会比单独释放造成更大的破坏。因此, 迫切需要找到同时将它们去除的方法。羟基磷灰石改性木耳菌棒生物炭包埋在海藻酸钙中(CA-HAPMB), 合成了一种吸附水中重金属的新型吸附剂。将羟基磷灰石作为底物负载在生物炭上, 通过增加生物炭上官能团的含量来提高其吸附能力。吸附剂中加入海藻酸盐, 海藻酸盐具有丰富的羧基(-COOH)和羟基(-OH)官能团, 与多价金属离子反应形成三维网状结构, 使吸附剂形成球体(平均直径 2.5 毫米), 正好弥补了吸附剂分离和再生的局限性。采用扫描电镜、X 射线能谱(SEM-EDS)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、X 射线衍射图(XRD)和 X 射线光电子能谱(XPS)表征了 CA-HAPMB 的表面结构和吸附机理。通过批量实验评价了 CA-HAPMB 对重金属的吸附能力。在不同条件下, 研究了 CA-HAPMB 对水中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附性能及其竞争关系。凝胶球对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附量最大分别达到 $302.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $564.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (基于 Langmuir)。结果表明, CA-HAPMB 复合凝胶球具有去除水中重金属离子良好前景。土壤培养实验发现, CA-HAPMB 的施加可以使土壤中重金属有效态含量下降, 进一步评估材料用于土壤中重金属修复的应用前景。

关键词: 重金属; 吸附; 机制; 混合物; CA-HAPMB

作者简介: 纪艺凝, 吉林大学新能源与环境学院博士生, 主要研究领域土壤及水体污染修复。

E-mail: jiyining95@163.com

UV 老化微塑料与镉联合胁迫诱导蚯蚓的肠道毒性和代谢反应

Co-exposure to UV-aged microplastics and cadmium induces intestinal toxicity and metabolic responses in earthworms

陈昌成¹, 郑娜^{1*}, 朱荟澄¹, 安启睿¹, 潘佳敏², 李肖乾¹, 纪艺凝¹, 李宁¹, 孙思宇¹

1 武汉大学, 武汉 430072; 2 香港理工大学, 香港 100872

摘要: 微塑料(MPs, 粒径小于 5mm 的塑料碎片)污染被认为是陆地生态系统的新兴威胁。重金属污染问题广泛存在于土壤环境中。镉(Cd)是中国农田土壤中最常见的重金属污染物。进入环境后, 由于 MPs 的孔隙结构以及静电相互作用, MPs 能够吸附土壤中的 Cd。MPs 和 Cd 之间的相互作用进一步可能会影响土壤生态系统中的重金属生物利用度。然而, 实际环境中的 MPs 不可避免地会老化, 从而影响到颗粒的吸收性能、胶体稳定性和流动性。在评估不同类型的 MPs 与 Cd 的复合生态毒理学效应时, 有必要探究塑料的老化过程对 MPs 与 Cd 的复合毒性影响。在本研究中, 基于氧化应激水平、组织病理学和综合多组学探讨了环境相关浓度的老化 MPs(PLA and PE)对土壤中 Cd 的生物毒性的影响。结果表明, UV 老化降低了 MPs 表面的 zeta 电位并增大了比表面积, 从而提高了 Cd 的生物累积并对蚯蚓造成了更严重的氧化应激。同时, 在蚯蚓肠道观察到更明显的组织损伤, 例如氯原组织充血病变和盲肠损伤。此外, UV 老化 MPs 和 Cd 的复合暴露增强了蚯蚓肠道微生物网络的复杂度并干扰了蚯蚓的内分泌紊乱、膜结构以及能量代谢途径。UV 老化 MPs 显然引起了 Cd 更复杂的生物毒性。多层次的分析评估了不同种类的老化 MPs 对土壤中 Cd 诱导蚯蚓的毒性效应, 为陆地生态系统的风险评估提供了数据。同时, 我们也应该对可生物降解塑料给予更多的关注。农业土壤中存在不同种类以及不同老化程度的 MPs, 进一步的研究应该考虑不同种类以及不同老化程度的 MPs 对环境共存污染物在土壤生物毒性影响。我们呼吁未来的研究中应采用与环境条件更为相关的老化 MPs, 这对 MPs 的风险评估和管理极为重要。

关键词: 微塑料; 镉; 氧化应激; 肠道毒性; 代谢组学

作者简介: 陈昌成, 吉林大学新能源与环境学院, 在读博士研究生, 研究方向: 环境化学。

E-mail: 964840712@qq.com

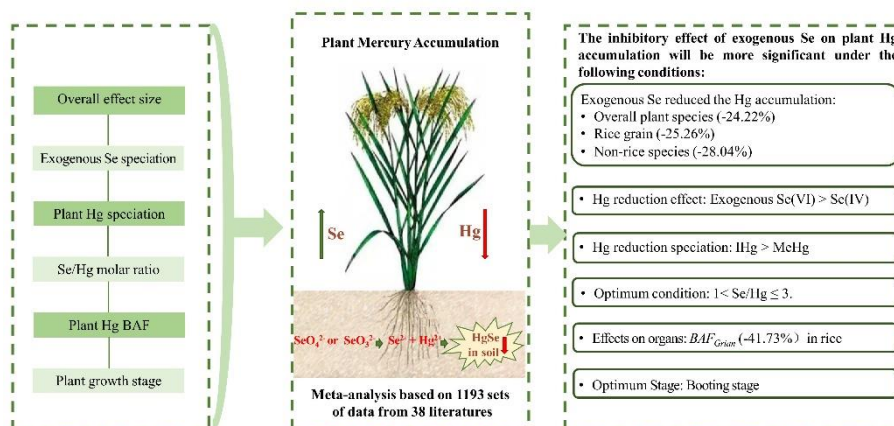
施硒能否控制作物中的汞含量？汞固存机制的 Meta 分析与概述

A quantitative review of the effects of Se application on the reduction of Hg concentration in plant: a meta-analysis

陈洁菲^{1,2,3}, 郝尚妍¹, Gary Bañuelos⁴, 周鑫斌¹

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 汞 (Hg) 是一种剧毒重金属, 经植物吸收后通过食物链进入人体。外源硒 (Se) 已被认为是降低植物 Hg 浓度的潜在解决方案。然而, 目前的文献在 Se 对植物 Hg 积累方面的影响还未有一致定论。为了获得有关 Se-Hg 拮抗作用更科学准确的结论, 我们从 38 份文献中收集了 1193 份数据进行 meta 分析, 并通过亚组分析和元回归模型模拟了不同因素对 Hg 积累的影响。结果表明, Se/Hg 摩尔比对降低植物 Hg 浓度具有显著的剂量依赖性作用, 抑制植物 Hg 积累的最佳条件是 Se/Hg 比为 1: 3。外源 Se 显著降低了整体植物、水稻和非水稻植物中的 Hg 浓度, 分别降低了 24.22%、25.26% 和 28.04%。Se (IV) 和 Se (VI) 均能显著降低 Hg 在植物中的积累, 但 Se (VI) 的抑制作用强于 Se (IV)。Se 显著降低了水稻的生物积累系数 (BAF_{Grain}), 这表明水稻的其他生理过程可能与限制土壤对水稻籽粒的吸收有关。因此, Se 可以有效减少水稻中 Hg 的积累, 为有效缓解 Hg 通过食物链向人体转移提供了新策略。



关键词: 籽粒; Se-Hg 拮抗作用; meta 分析; 植物; 水稻

作者简介: 陈洁菲, 硕士研究生在读, 中国科学院大学南京土壤研究所学生, 主要从事植物养分吸收研究。周鑫斌, 农学博士, 西南大学资源环境学院副教授, 主要从事养分资源管理与环境健康领域研究。

E-mail: 1114909352@qq.com

E-mail: zxbissas@swu.edu.cn

镉和铜混合物对根际土壤中抗生素抗性基因的影响

Effects of cadmium and copper mixtures on antibiotic resistance genes in rhizosphere soil

潘佳敏

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

摘要: 微生物中的抗生素抗性是当今公共卫生和环境科学研究的热点, 其进化和发展可能受多种环境因素的影响, 包括金属污染。然而, 重金属镉(Cd)和铜(Cu)的组合对根际土壤微生物群落结构及抗生素抗性基因(Antibiotic resistance genes, 简称ARGs)的影响机制尚不明确。为明确不同重金属单独及联合污染对微生物抗性机制的影响, 本研究以模拟混合重金属污染的根际土壤为对象, 利用高通量测序技术研究不同处理下土壤微生物群落结构及ARGs的变化规律及其相互作用。研究目的有: (1) 比较Cd和Cu单独及组合处理对根际土壤微生物群落结构和ARGs丰度分布模式的影响; (2) 探讨Cd、Cu混合污染及诸如营养物质、pH等环境因子对土壤微生物群落结构和ARGs变化的作用机制; (3) 评估混合重金属污染对土壤微生物抗性风险, 为科学评估重金属污染危害及土壤抗性风险提供理论参考。结果表明: 多重耐药基因acrA、acrB和转座子基因int11在微生物群落中的相对丰度较高; Cd和Cu对acrA丰度有显著交互作用, Cu对int11丰度有显著的主效应作用; 相关性网络表明大多数ARGs主要存在于变形菌门、放线菌门和拟杆菌门。结构方程模型结果显示, Cd污染对ARGs的影响大于Cu; 与之前对ARGs的分析相比, 本研究中细菌群落多样性对ARGs的影响很小。研究为评估混合重金属污染对土壤抗性风险提供理论参考, 并可拓展Cd、Cu共同选择土壤微生物抗性的认识。

关键词: 重金属; 混合物; 抗生素; 抗性基因; 重金属抗性基因; 微生物群落

作者简介: 作者简介: 潘佳敏, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 在读博士研究生, 研究方向: 环境生态与生物地球化学。

E-mail: panjiamin18@mails.ucas.ac.cn

伴矿景天重金属吸收与土壤中微量养分供应的关系：基于全国大量土壤样本的盆栽试验

The relationship between heavy metal uptake and trace nutrient supply in soil of *Sedum plumbizincicola*: a pot experiment based on a large number of soil samples in China

黄玉峰^{1,2}, 周嘉文², 黄永杰¹, 吴龙华²

1 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 2410001; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要:【目的】为探究伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 镉 (Cd、Zn) 吸收与土壤中微量养分元素供应的关系, 从养分调控角度指导提高超积累植物的修复效率。【方法】基于全国 49 个不同类型土壤的盆栽实验, 分析伴矿景天生长及重金属吸收情况, 并利用相关分析、广义梯度增强模型等手段挖掘限制植物重金属吸收的主控养分因子。【结果】(1) 土壤全量 Fe 和 Mn 在影响伴矿景天生长的中微量养分元素中占主导地位, 贡献率分别为 34.6% 和 16.3%。(2) Ca、Fe 和 Mn 是影响伴矿景天 Cd 和 Zn 吸收的主要中微量养分因子, 在回归方程中均具有较高的系数; 其中有效 Ca 含量是地上部 Cd 浓度影响最大的养分因子, 贡献率为 16.9%, 且与地上部 Cd 浓度及吸收量显著正相关; 全量 Fe 和 Mn 对地上部 Cd 浓度的贡献率分别为 9.12% 和 8.33%; 有效 Mn 含量对地上部 Zn 浓度的影响最大, 贡献率为 17.7%。【结论】土壤中微量养分元素的供应程度对伴矿景天生长和重金属吸收能力有一定的影响, 可调控其供应促进伴矿景天对 Cd 和 Zn 的获取和吸收, 从而达到提高污染土壤修复效率的效果。

关键词: 中微量元素; 伴矿景天; 土壤污染; 吸取修复

作者简介: 黄玉峰, 安徽师范大学硕士研究生, 主要研究方向为修复生态学。

E-mail: hyufeng1998@163.com

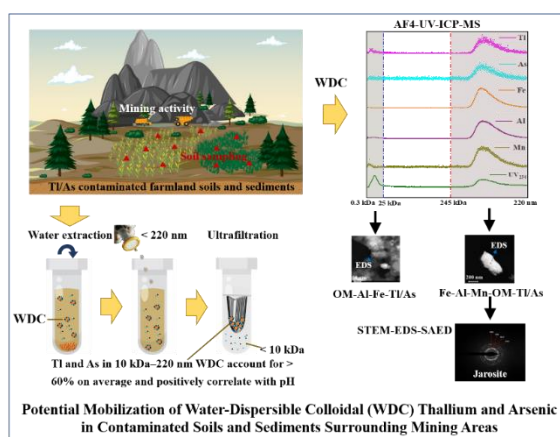
我国西南典型矿区污染土壤和沉积物中水分散性胶体态铊砷的潜在活化

Potential mobilization of water-dispersible colloidal thallium and arsenic in contaminated soils and sediments in mining areas of southwest China

杜彦镭, 胡鹏杰*, 吴龙华

中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 水分散胶体对微量元素迁移至关重要, 但关于水分散性胶体结合的铊(Tl)和砷(As)在采矿污染土壤和沉积物溶液中的丰度、粒径分布和元素组成的信息有限。在此, 我们研究了典型的 Tl/As 污染地区土壤和沉积物中水分散性胶体结合的 Tl 和 As 的潜在活化。超滤结果显示土壤溶液中平均超过 60%的 Tl 和 As (< 220 nm)以水分散性胶体形式共存(10 kDa-220 nm); 由于沉积物溶液酸性较强, 其中的 Tl 和 As 主要以真溶解态的形式存在(< 10 kDa)。非对称流场流分离技术和透射电子显微镜分析表明, 与铝硅酸盐矿物和有机质相关的含铁水分散性胶体是 Tl 和 As 的主要载体。选区电子衍射进一步验证了黄钾铁矾纳米颗粒是土壤水分散性胶体的重要组成部分, 直接参与了 Tl 和 As 的迁移。值得一提的是, 高污染水平和高溶液 pH 促进了含 Tl/As 的水分散性胶体的释放。本研究为土壤中 Tl 和 As 在水分散性胶体上的分布提供了定量和直观的认识, 强调了含铁水分散性胶体、土壤溶液 pH 和污染水平在污染土壤和沉积物中 Tl 和 As 的潜在活化中的重要作用。



关键词: 铊 (Tl); 砷 (As); 水分散性胶体; 纳米颗粒; 场流分离

作者简介: 杜彦镭, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染界面过程研究。

E-mail: duyanpei20@mails.ucas.ac.cn

生菜对不同锌矿颗粒中细颗粒态镉锌的吸收性研究

Uptake of Cd and Zn in Different Zn ore-derived fine particles by lettuce (*Lactuca sativa* L.)

曹心妍^{1,2}, 李欣阳¹, 吴龙华¹

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190

摘要: 采矿过程释放的矿石粉尘是矿区周边土壤金属污染的重要源之一, 但其植物吸收性尚未十分明确。本文通过生菜盆栽试验, 选取天然锌矿颗粒(原生锌矿闪锌矿与次生锌矿菱锌矿)为重金属污染源, 研究生菜对土壤中矿物源镉(Cd)和锌(Zn)的活化作用和吸收性。结果表明, 生菜种植促进了闪锌矿添加处理土壤中Cd由可氧化态向其它形态转化, 菱锌矿处理组Cd由可氧化态和残渣态向弱酸提取态和可还原态转化。当矿粉添加量为土壤干重的1%时, 闪锌矿处理组生菜地上部Cd和Zn的浓度分别为 3.07 ± 0.22 和 $125 \pm 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 而菱锌矿处理组对应浓度为 27.7 ± 0.8 和 $1226 \pm 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (均为干重), 显著高于相同量闪锌矿处理, 该组生菜出现明显镉中毒症状。透射电镜加能谱(TEM-EDS)表征结果显示, 生菜体内存在含镉锌纳米颗粒。因此, 种植生菜对两种锌矿来源的Cd具有活化作用, 但生菜体内含镉纳米颗粒是否直接来自矿物细颗粒或由植物合成有待深入研究。

关键词: 生菜; 闪锌矿; 菱锌矿; 重金属; 吸收性

作者简介: 曹心妍, 中国科学院大学中丹学院及中国科学院南京土壤研究所硕士生, 研究方向为锌矿源金属细颗粒的生物有效性。

E-mail: caoxinyan@issas.ac.cn

土壤中分离的红球菌 NJF-7 降解低氟代烷烃的研究

晏蒙^{1,2}, 曾军^{1,*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008

2 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601

摘要: 由于含氟化合物的广泛应用及其对环境的潜在影响, 含氟化合物的微生物降解已引起人们的极大关注。在本研究中, 我们新发现了一株微生物菌株 NJF-7, 它能够降解单氟长链烷烃。研究表明, NJF-7 具有显著的脱氟活性, 在 52h 内可以消耗 $59.9 \pm 3.4\%$ 的 FD, 伴随释放出 $43.2 \pm 0.6\%$ 的 F⁻。NJF-7 对 FD 的降解效率受到底物浓度和 pH 值的影响, 其中 pH 值是一个极为重要的环境因子, 不仅直接影响细菌细胞的生长速率, 还影响 F⁻ 的细胞毒性。此外, 静息细胞实验结果显示, 酸性条件下, 培养物消耗了 1.47 ± 0.03 mM 的底物, 但仅释放出 0.8 ± 0.05 mM F⁻, 约有 43% 的底物发生了生物转化而不是脱氟; 而在中性条件下, 底物消耗量与氟离子释放量相当, 这表明脱氟酶活性受酸性条件的影响。无细胞提取物实验则表明, 在两种 pH 值下分别消耗了 1.04 ± 0.50 mM 和 0.68 ± 0.23 mM 底物, 但未检测到明显的 F⁻ 释放, 说明 FD 的生物脱氟可能是一系列酶促反应结合的过程, 而不是某一脱氟酶的作用。这些发现拓展了我们对生物脱氟的认识, 有助于深入了解氟烷基化合物降解过程中的脱氟机制。

关键词: 氟烷烃; 生物脱氟; 氟离子毒性

作者简介: 晏蒙, 安徽大学与中国科学院南京土壤研究所联培生, 主要研究方向为含氟化合物微生物脱氟。曾军, 中国科学院南京土壤研究所副研究员, 主要研究方向为有机污染物微生物降解与污染土壤修复。

E-mail: myan20_19@163.com

E-mail: jzeng@issas.ac.cn

渤海焦油球的源识别及降解命运研究

Study on source identification and degradation fate of tar balls in the Bohai Sea

张紫璇¹, 王传远²

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

摘要: 渤海油气资源丰富, 是我国最主要的海上石油开采区和航运密集区。随着人类对石油的需求量不断增加, 促使其开采面积不断扩大, 海洋石油运输量和运输频率逐年增大, 导致渤海海上溢油事故风险增大。大多数溢油响应的战略、决策以及设备都是基于“油是漂浮在海面上的”这一常识。然而, 从溢油事故中溢出的油并不总是漂浮的, 由于其自身性质和水环境条件会发生半潜或下沉。半潜或下沉的石油与沉积物、沙子或其他材料接触, 可能会粘附在一起形成团块或焦油球。焦油球是石油泄漏的残留物, 通常被认为是石油泄漏事件影响的指标。确定泄漏石油的特征并将其与已知来源联系起来, 对于环境损害评估、了解其命运和行为以及预测石油泄漏对环境的潜在长期影响至关重要。本研究对渤海湾沿岸上岸的焦油球进行实地采样, 通过对焦油球进行稳定碳同位素分析以及焦油球中生物标志化合物的指纹图谱, 开展渤海岸滩焦油球的特征指纹谱图构建与来源识别。同时对焦油球进行切割, 研究焦油球不同层中多环芳烃的降解命运。研究表明: (1) 2020 年从仙螺岛海滩收集的焦油球样品与蓬莱 19-3 原油相似。进一步使用双比图 ($C_{29}H/C_{30}H$ vs $\Sigma C_{31}-C_{35}H/C_{30}H$) 和生物标志物诊断比值主成分分析进行的源识别确认了仙螺岛焦油球可能来自蓬莱 19-3 原油。同样对月坨岛焦油球样品的指纹特征以及双比图的分析, 表明 2020 年沉积在月坨岛的焦油球部分可能来自蓬莱 19-3 原油, 部分可能来自冀东原油。(2) 焦油球不同层中多环芳烃的降解命运, 母体和烷基化多环芳烃值从焦油球的表层到中心层逐渐增加, 表明焦油球表层中多环芳烃降解更严重。此外, 以焦油球的中心层为标准, 计算了表层多环芳烃的损失率。表明, 4 环和 5 环母体多环芳烃的损失率高于 3 环母体多环芳烃。同一焦油球中相同烷基化多环芳烃异构体的损失率几乎相同, 这表明相同烷基化多环芳烃中不同异构体的降解速率相似。母体多环芳烃和烷基化多环芳烃损失率的比较表明, 降解程度随着烷基数量的增加而增加。此外, 还计算了焦油球的不同层中相同烷基多环芳烃不同对异构体化合物的诊断比值, 包括甲基菲、二甲基菲、三甲基菲、甲基茈、甲基二苯并噻吩、二甲基二苯并噻吩和三甲基二苯并噻吩。数据表明, 尽管与中心层相比焦油球表层风化得更严重, 但焦油球不同层的诊断比值几乎相同。

关键词: 渤海; 焦油球; 源识别; 降解; 生物标志物

作者简介: 张紫璇, 中国科学院南京土壤研究所科研助理, 主要研究石油类污染物的源解析及环境命运。

E-mail: zxzhang@issas.ac.cn

枯草芽孢杆菌 WX 对铅离子吸附机制的研究

王旭，徐微，李佳怡，陆玉玲，丁俊美*

云南师范大学生命科学学院，昆明 650000

摘要：铅（Pb）是毒性最强的重金属之一，对生物体构成直接威胁，其不能通过微生物活动或化学反应进行降解，而是通过吸附等反应而保留在土壤中，形成各种铅化合物。微生物修复具有环境友好并可持续的特性，是最有前景的解决方案之一，筛选和鉴定耐重金属微生物，研究铅固定化的可能机制，对于控制铅在污染土壤中的生物利用度和流动性，避免铅超标具有重要意义。在此，我们从云南保山铅污染土壤中筛选出一株耐铅细菌 *Bacillus subtilis* WX，研究了该菌株在不同温度，pH 下的生长情况以及对多种重金属的耐受性，并对其铅吸附机制进行了初步的探讨，结果显示菌株 WX 具有较高的铅离子耐受性，即使在铅浓度 2200 mg/L 的环境下该细菌仍表现出显著的生存能力，另外随着铅离子浓度从 50 mg/L 增加到 350 mg/L，其超氧化物歧化酶与脱氢酶活性也随之提高，暗示菌株 WX 可能是通过激活抗氧化防御机制来抵御铅离子的毒性，且扫描电镜结果发现菌株 WX 细胞外分泌了大量胞外聚合物（EPS）来吸附铅离子，以阻止铅离子进入细胞和回归到环境中，另外，脲酶实验检测发现，菌株 WX 可产生脲酶，当在含有尿素的环境下诱导其水解并与铅离子形成碳酸盐沉淀，从而达到解毒的效果。最后，我们将菌株 WX 与植物在含铅环境中进行共培养，发现该菌可吸附大量铅离子，进而减小其给植物带来的伤害，具有潜在的实际应用价值。

关键词：重金属；铅离子；微生物修复；吸附特性；应用潜力

作者简介：王旭，云南师范大学 2021 级硕士研究生，主要研究方向：重金属污染的微生物修复。

丁俊美，教授/博导，2012 年 7 月毕业于云南大学（导师：张克勤院士），2015 年-2016 年，美国麻省理工学院（Koch Institute）访问学者，2012 年至今任教于云南师范大学，近年来主要从事环境污染生物降解、极端生境微生物资源及酶的挖掘、新型 CRISPR/Cas 系统研究。

E-mail: xu_w6059@163.com

E-mail: djm@ynnu.edu.cn

生物炭材料对土壤中炸药污染的修复机理研究

赖成旭^{1,2}, 郇正来¹, 董彬¹, 朱勇兵¹, 钟俊波²

1 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205; 2 四川轻化工大学化学与环境工程学院, 自贡 643000

摘要: 军事训练场、弹药销毁场等场地会受到 2,4,6-三硝基甲苯 (TNT) 等炸药化合物的污染, 这些炸药具有较强毒性, 进入环境后会在土壤和水中发生迁移转化, 长期污染环境, 威胁人体健康。生物炭是生物质在限氧条件下热解制备的碳质材料, 具有大的比表面积和丰富的官能团等特点, 能够吸附或促进污染物降解。本研究利用不同来源生物炭去除 TNT 污染物。吸附实验表明, 植物基生物炭对炸药化合物吸附有更优异的吸附性能, 在 100 mg/L TNT 浓度时, 200mg/L 生物炭浓度下, 饱和吸附时间下植物基生物炭的吸附容量为 27.1 mg/g, 吸附去除率可达 51.3%, 而相同条件下动物基生物炭和污泥基生物炭的去除率仅有 3.8%, 吸附动力学研究表明, 植物基生物炭对 TNT 的吸附过程符合伪二级动力学过程。通过对不同生物炭理化性质进行分析表征, 植物基生物炭具有更高的比表面积(621 m²/g)、更高的碳含量(87%)和更丰富的表面官能团, 这些性质有利于生物炭通过弱静电作用和 π - π 相互作用吸附 TNT 等污染物。进一步研究生物炭对微生物降解 TNT 的促进效果, 添加 200 mg/L 植物基生物炭后, 5 h 内 *Shewanella oneidensis* MR-1 对 100 mg/L TNT 的去除率即可达到 70%, 远高于微生物单独降解 TNT (去除率约 10%), 表明生物炭能促进微生物降解 TNT 污染物。本研究可为 TNT 等含炸药污染场地修复提供一种绿色可持续的修复技术。

关键词: 炸药; 生物炭; 吸附; 降解

作者简介: 赖成旭, 为 2022 级四川轻化工大学和国民核生化灾害防护国家重点实验室联合培养研究生, 研究方向为环境污染修复。

E-mail: 2639301986@qq.com

基于多目标决策方法改进 LCA 的污染场地修复技术比选研究

Research on the Comparison and Selection of Contaminated Site Remediation Technology Based on the Multi-objective Decision-making Method to Improve LCA

王顺扬

山西大学，太原 030006

摘要：在注重修复效果的同时，修复实施过程也必然会产生不同程度的环境影响，而这个过程所产生的环境影响容易被忽略，因此选择一种既能取得最佳效果又能最大限度减少环境影响的适当技术至关重要。基于此，本研究选择了生命周期评价理论（LCA），以焦化场地典型修复案例为基础，计算了修复技术实施过程在酸化、富营养化、全球变暖、光化学烟雾、人体毒性潜值、资源消耗、陆地生态毒性潜值七项环境影响指标下的环境影响值。并将多目标决策方法（MCDA）与生命周期评价理论相结合，采用层次分析法（AHP）对七项指标的权重进行计算，利用理想点法（TOPSIS）对各指标环境影响值进行归一化，同时利用支付意愿法（WTP）对修复过程所产生的环境成本进行计算比较，最终确定修复技术的环境影响排序。本论文将 AHP-TOPSIS 结合生命周期评价理论应用于焦化场地污染修复技术比选中，对水泥窑协同处置技术与原位化学氧化技术修复 1 t 污染土壤过程各指标的下环境影响大小进行综合计算比较。结果可得水泥窑协同处置技术在酸化、富营养化、全球变暖、光化学烟雾、人体毒性潜值、资源消耗、陆地生态毒性潜值下的环境影响值分别为 9130、15.8、21.2、0.079、911、1.25、63.2；原位化学氧化技术为 3450、11.6、4.7、0.0133、4910、0.94、7.7，利用 AHP-TOPSIS 模型综合环境影响值和环境成本，计算可得水泥窑协同处置技术的综合指数为 0.545，原位化学氧化技术的综合指数为 0.456，由此可得原位化学氧化技术的环境压力更小，有更强的环境友好性。

关键词：生命周期评价；多目标决策；修复技术比选；污染土壤

作者简介：王顺扬，成都理工大学，2020 级研究生，主要研究多环芳烃的分布特征及物源分析。

E-mail: 841522695@qq.com

动态地球化学模型预测超积累植物伴矿景天对镉锌的富集

李思敏¹, 顾雪元², 周嘉文¹, 吴龙华¹, Peter Christie¹

1 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 210008; 2 南京大学环境学院, 南京 210093

摘要: 利用超积累植物进行植物修复是一种环境友好、经济有效的土壤重金属净化技术。但由于土壤性质差异较大, 修复效率及年限很大程度上取决于经验, 这限制了该技术的应用。本文提出了一种新的动态多面模型(MSM)框架, 用于预测超积累植物伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 提取镉(Cd)和锌(Zn)的效率和时间。首先, 研究了 MSMs 在 95 个自然污染土壤中的应用。采用“通用”模型参数, 并考虑根际 pH 和 DOC 含量, MSMs 预测的溶解态 Cd/Zn 与地上部重金属吸收量有很强的相关性(Cd/Zn $R^2 = 0.825/0.802$, $n = 95$), 模型预测效果优于化学提取方法。在连续 6 季盆栽试验的基础上, 进一步将 MSMs 与时间、Cd 和 Zn 相互作用相结合, 形成动态 MSMs 组合(D-MSM-C)模型, 用于评价和预测植物修复效率和年限。D-MSM-C 模型能较好地预测每季修复后土壤中金属残留量, 平均绝对百分比误差(MAPE)为 20.4% (Cd)和 2.46% (Zn) ($n = 66$)。因此, 该模型可用于评估和预测植物修复效率和年限且适用于不同土壤性质和多种金属污染。

关键词: hyperaccumulator; 修复预测; 地球化学模型; 金属植物修复效率

作者简介: 李思敏, 中国科学院南京土壤研究所博士生在读。主要研究领域为土壤重金属生态评估及模型预测, 地球化学模型, 土壤动物生态毒理学研究, 土壤动物多样性研究。

E-mail: smli@issas.ac.cn.

氨基硅烷改性凹凸棒石的制备及其对 Cd^{2+} 的吸附性能研究

Preparation of aminosilane modified attapulgite and adsorption property to Cd^{2+}

邱炜^{1,2}, 骆永明^{1,2*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 镉 (Cd) 是水和土壤环境中最为典型的无机污染物之一, 通过制备新型高吸附容量材料去除 Cd 是长期以来的研究热点, 但对材料成本控制和制备方法简化的研究相对较少。本研究选用常见的粘土矿物凹凸棒石为原材料, 设计一种制备过程简单、吸附容量高的 3-氨丙基三乙氧基硅烷 (APTS)/凹凸棒石复合材料。通过红外光谱、热重和 X 射线光电子能谱表征得出, APTS 改性后凹凸棒石表面新增了 C-H 键和含氮基团, 表面 N 含量由 2.28% 增加至 8.19%。批试验结果表明, 在 pH 为 6.0、 Cd^{2+} 初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, APTS 改性的凹凸棒石较未改性凹凸棒石对 Cd^{2+} 的吸附量提高了 33.4%, 吸附过程符合准二级吸附动力学, 以化学吸附为主。APTS 改性后凹凸棒石对 Cd^{2+} 的最大吸附容量由 $58.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 提高至 $88.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。APTS 改性后的凹凸棒石对 Cd^{2+} 的吸附主要发生在材料表面或孔隙, 是均匀的单分子层吸附。与其他改性粘土矿物材料相比, 本研究制备的 APTS 改性凹凸棒石对 Cd^{2+} 的吸附容量高, 制备流程较为简单, 并且所用溶剂可回收利用, 具有较好的应用前景。

关键词: 粘土矿物; 凹凸棒石; 氨基改性; 镉; 吸附

作者简介: 邱炜, 博士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复原理与技术。

E-mail: qiuwei@issas.ac.cn

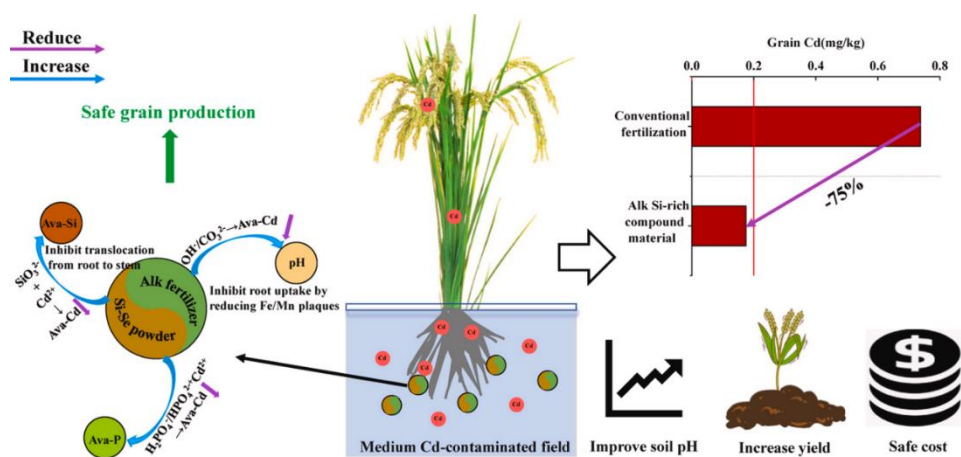
碱性富硅复合改良剂在镉污染稻田安全利用中的作用效果与机理

Safe usage of Cd-polluted paddy fields using alkaline Si-rich compound
amendment: Effect and mechanism

王亮, 刘齐庆, 廖晓勇*

中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 世界上许多地区都亟需一种低成本的实用性技术来降低水稻中的镉污染。本研究通过田间试验, 阐明了四种碱性复合材料在华南地区镉污染稻田安全利用中的作用及其机理。其中, 两种碱性富硅复合材料: AF-SC (碱肥底肥配硅钙矿粉); AF-SS (碱性底肥配硅硒矿粉); 试验结果表明这两种复合材料能够以较低的成本同时实现稻米降 Cd、增产和土壤质量改善的多重目标收益。两个试验点的稻米 Cd 含量平均降低了 75%, 保证了中度镉污染地区的水稻安全生产。不同实试验点的不同品种水稻增产幅度为 6.7%~21.0%, 土壤 pH 增加了 0.36~0.62 个单位, 土壤有效磷和有效硅含量升高, 土壤有效镉含量降低。结构方程模型 (SEM) 和回归分析表明, 复合材料中碱性组分提供的碱性环境有效抑制了根表 Fe/Mn 膜的形成, 减少了对环境中 Cd 的吸收。此外, 水稻籽粒中 Cd 的降低还与 Cd 从根到茎的转运被抑制有关, 这主要是由于有效态 Si 的增加。研究结果表明, 碱性富硅复合材料的应用对于中国南方镉污染稻田的修复是可行的。



关键词: 镉污染农田; 水稻; 安全生产; 碱性肥料; 硅

作者简介: 王亮, 中国科学院地理科学与资源研究所助理研究员。主要研究领域为受污染耕地安全利用技术与机理。承担国家自然科学基金青年基金、国家重点研发计划项目专题各 1 项, 参与国家自然科学基金重点基金项目。

E-mail: wangliang@igsnr.ac.cn

铅污染农田修复后土壤环境容量时空演变及风险评价

Spatial and temporal evolution of soil environmental capacity and risk evaluation of a typical Pb-contaminated farmland soils after remediation

周迪¹, 王梅^{1*}, 高学振³, 温嘉霖², 张情亚³, 陆君¹, 周东美²

1 江苏科技大学环境与化学工程学院, 镇江 212100; 2 南京大学环境学院, 南京 210046; 3 江苏大地益源环境修复有限公司, 南京 210012

摘要: 土壤重金属环境容量的确定对于相关环境管理和政策制定尤为重要。为探究我国碱性土壤高风险重金属铅的环境容量动态变化特征, 以某典型碱性铅污染农田为研究对象, 首先通过统计学方法计算研究区铅的土壤地球化学基线值, 并据此分析该农田土壤为期三年修复过程中的环境容量时空演变特征, 同时进行铅污染的生态风险与健康风险评估, 为最终修复效果进行综合评价。结果表明, 研究区域内土壤铅环境容量的关键影响因素为土壤 pH 值, 土壤地球化学基线经三种统计学方法的协同计算确定为 $217.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。经三年修复后, 该农田以 $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为限值的铅点位超标率已清零, 农田现存环境容量得到显著增量, 同时分区修复环境现存容量变化表明使用原位钝化技术进行修复的区域效果最为显著。风险评价结果显示, 该农田铅污染生态风险与健康风险经三年修复后得到显著改善, 土壤铅单因子污染指数、内梅罗污染指数以及潜在生态危险指数皆明显下降, 表明该农田土壤重金属铅污染已由重污染降为轻微污染, 潜在生态风险等级由强等级转化为中等等级; 且非致癌污染指数和单因子致癌污染指数经过三年修复得到显著降低, 非致癌风险与致癌风险皆处于安全范围内。本研究结果可为同样受铅污染的同类农田土壤的安全利用与风险评价提供一定参考。

关键词: 土壤; 环境容量; 地球化学基线; 风险评价

作者简介: 周迪, 女, 江苏宿迁人, 江苏科技大学硕士研究生, 从事土壤环境容量研究。

E-mail: zhoudijkd@163.com

不同水化学条件和多离子竞争体系下重金属溶质运移的热力学-动力学耦合模型研究

Prediction competitive multi-ions leaching under various flow chemistry conditions: Column studies and unified thermodynamic-kinetic modeling

赵晓鹏, 顾雪元*

南京大学环境学院, 南京 210046

摘要: 土壤-地下水系统是一个复杂的多相多介质体系, 重金属的迁移转化由于会受生物物理化学等多过程的共同作用而难以预测。传统溶质运移模型中对重金属在土壤界面的吸附只是基于经验式吸附等温线或简化的热力学机制反应进行描述, 往往忽略了吸附反应的动力学过程。本研究创新性地将表面配合模型与经典一维对流-弥散方程进行耦合, 建立了基于热力学-动力学耦合的反应性溶质运移模型, 该模型通过实时调用表面配合模型来估算不同时刻和空间位置下平衡浓度, 充分发挥了表面配合模型在不同水化学条件下适用性强的优势, 并引入了多速率方程, 充分考虑吸附表面不同点位空间异质性导致动力学行为差异的可能, 并开发配套计算软件 (REKIT)。模型所获微面方程的动力学参数适用于不同水化学条件, 首次实现 Cr(VI)/P(V)/As(V)多离子在针铁矿-石英砂柱中的竞争性共运移行为的精准预测, 填补传统溶质运移模型无法预测竞争性离子共运移曲线的空白。将溶质运移模型的吸附项从“经验式”推进到“机理式”, 突破了传统溶质运移模型中反应项参数适用范围窄、机制不清、无法测竞争性离子共运移的技术瓶颈, 为构建更大尺度及复杂野外场地条件下的重金属溶质运移模型, 实现重金属迁移扩散科学准确预测提供了基础理论和模型方法。

关键词: 多表面形态模型; 多速率方程; 溶质运移; 机理模型

作者简介: 赵晓鹏, 南京大学环境学院博士研究生。研究领域为无机痕量污染物在天然土壤固相表面的表面络合模型构建, 和土壤-地下水系统中重金属溶质运移的热力学-动力学耦合模型研究。

E-mail: zhaoxp_nju@163.com

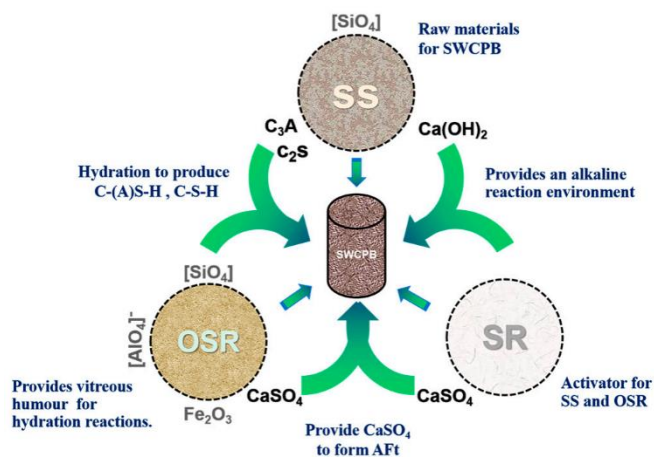
固废协同作用在矿山采空区环境治理中的应用

Application of solid-waste synergism in the environmental management of mining airspace areas

李克新

中国地质大学（北京），北京 100083

摘要：矿产资源的大力开发促进了经济增长，同时也出现了大量的地下采空区，进而导致了地表塌陷以及房建受损。开采冶炼过程伴生的固体废物占用大量土地，在雨水淋溶和风力的作用下，会引发水-土-大气的污染问题。所以，矿区的土壤地表的固废堆积污染以及地下的采空区地质环境结构问题亟待解决。随着充填法采矿和绿色无废开采的推行，水泥成为矿山充填料中最常用的胶凝材料，但其生产过程耗能碳排放较高。随“双碳”目标的推行，高能耗、高排放、高污染材料的替代品成为新的热点。因此，利用固体废弃物开发无水泥无添加剂的绿色充填材料，能够在大量消纳固废，减缓堆存污染的基础上解决地下采空区稳定问题，还可有效减小水泥使用所带来的碳排放问题，进而降低充填采矿成本，这是遵循绿色、可持续修复的理念的可行之路。本报告将讨论固废协同作用在矿山采空区环境治理中的应用的相关研究。



关键词：固废资源化利用；矿山采空区治理；全固废胶结充填材料

作者简介：李克新，中国地质大学（北京），水资源与环境学院，博士研究生，研究领域为固废资源化利用及矿山环境修复治理。

E-mail: likexin202104@163.com

灵泉闭坑露天煤矿土壤生态改良

Ecological improvement of soil in Lingquan closed pit openpit coal mine

刘予希, 朱雪强, 韩晓雨, 李昂

中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 露天开采的过程中的“剥—采—运—排—复”流程, 导致了大量的土地占用及植被损毁等问题, 开采过程中废弃物不断的搬运和堆积形成的排土场, 岩石碎片比例高、堆积密度高、对侵蚀敏感、碱性强和养分缺乏导致风蚀沙化, 水土流失严重, 加速导致土壤侵蚀、植被丧失、荒漠化以及对地质的不利影响。本报告通过展示了一种适宜于内蒙古满洲里市扎赉诺尔区灵泉露天闭坑煤矿的土壤治理方向, 通过向供试土中同时添加当地易得的培肥材料牛羊粪、秸秆、硅藻土、粘结剂、粉煤灰, 进行单因素实验和响应面实验进行配方优选, 模拟人工降雨测试改良土壤水土保持性能。近年来, 也有研究尝试采用接种生物结皮的方式来减缓水土流失, 生物结皮是由地衣、藻类、苔藓等孢子植物类和细菌、真菌等微生物群落通过菌丝、假根及分泌物等与土壤表层胶结形成的复合有机体, 其存在会改变土壤表层水文循环和土壤侵蚀过程。通常, 生物结皮覆盖于地表会形成不透水层, 可以增加坡面径流, 从而改变坡面侵蚀动态演变过程及坡面水动力学参数。此外, 生物结皮会显著影响地表粗糙度、土壤质地、土壤容重及土壤粘结力等土壤性状。本报告展示了生物结皮的分布特征及其与环境因子的相关关系, 根据生物结皮的生长特性, 确定适宜的扩繁模式; 通过斜坡实验研究生物结皮对水土流失的控制效果。研究成果可以指导露天矿区岩质边坡水土流失控制工作。

关键词: 水土保持; 矿区治理; 露天煤矿; 土壤改良

作者简介: 刘予希, 中国矿业大学环境与测绘学院 2021 级环境工程专硕研究生, 主要研究领域为矿区土壤修复。

E-mail: 2993999385@qq.com

利用城市污泥改良退化红壤的效果研究

Study on the effect of municipal sludge on the improvement of degraded red soil

刘志宗^{1,2}, 张乃明^{1,2*}

1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室,
昆明 6502011

摘要: 随着城市化进程不断加快, 作为污水处理产物的城市污泥产量日益增加, 很多地区都出现了污泥产量与处理容量不均衡的情况, 造成了污泥中可利用的资源被完全浪费。污泥的资源化利用不仅可以解决污泥处理处置面临的难题, 还可以提高土壤的肥力, 促进植物的生长, 对可持续发展有积极的影响。红壤是云南地区最为常见的土壤类型之一, 分布广泛, 但是由于长期不合理的人为耕种、施肥, 红壤耕地质量提升的科技支撑不足等因素, 导致高原红壤酸化、黏重、贫瘠且板结。为探究城市污泥资源化利用在生态领域修复的效果, 提高红壤区低产田的肥力。选取云南省低产田土壤为试验材料, 在分析低产田土壤、底泥和磷石膏等的养分特征的基础上, 以处理的城市污泥为主要材料, 水洗磷石膏、鸡粪、废渣为辅料, 选择黑麦草为供试植物, 进行土壤培肥的盆栽试验。试验设置四因素三水平正交试验, 共计9个处理, 从牧草的发芽率、成活率、株高、根长等生物性状探究不同原料单施和配合施用下低产田土壤对牧草的生长发育的影响。试验结果表明, ZJ5 (底泥: 鸡粪: 废渣: 磷石膏质量比为 1.4: 0.3: 0.16: 0.14) 处理黑麦草生长情况最好, 发芽率为 93.33%, 存活率为 56.66%, 收获时株高为 35.25cm, 茎粗为 4.28cm, 根长为 24.25cm, 生物量为 19.16g。对正交试验进行极差分析, 影响黑麦草生物性状各因素的主次排序为磷石膏>鸡粪>废渣>污泥, 鸡粪、废渣、污泥磷石膏的质量比为 0.2: 0.3: 0.16: 1.4 时, 黑麦草的生物量最高, 为最优水平含量组合。本研究结果可为城市污泥资源化利用以及红壤区低产田改良提供参考。

关键词: 城市污泥; 红壤; 资源化; 土壤改良; 黑麦草

作者简介: 刘志宗, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤培肥与改良。

E-mail: lzzynau@163.com

同位素示踪大气沉降镉的水稻富集过程

夏睿智^{1,2}, 周俊^{1,2}, 周静^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 准确识别并量化农田土壤和农作物镉的污染来源以及贡献份额是开展镉污染防治的前提, 对减少区域环境风险至关重要。镉 (Cd) 稳定同位素为追踪环境中镉的生物地球化学循环提供了新的技术手段, 但由于镉同位素在生物过程中发生明显的质量分馏, 使其在追踪植物体内镉的来源方面存在挑战。本研究使用定制的开顶式气室 (OTC) 对水稻的叶面和根部分别进行大气干沉降和湿沉降的暴露, 以区分不同暴露途径和不同沉降类型对水稻富集镉的影响。另外, 通过温室试验, 研究了两种暴露途径在不同暴露剂量下水稻植株中的镉同位素分馏过程, 计算出了大气沉降被水稻吸收并在体内转运所发生的镉同位素分馏值, 其结果可用于优化镉同位素混合模型中的参数, 并用于田间水稻组织中镉的来源追踪。OTC 试验和温室试验的同位素比值分析结果显示, 水稻叶片可以直接吸收大气沉降中的镉, 并在水稻植株中向其他组织转运, 其对籽粒中镉的贡献高达 52-70%, 超过了根部暴露对镉的贡献 (30-48%)。水稻根部优先吸收湿沉降中的镉, 而叶片更倾向于吸收干沉降中的镉。叶片对镉的吸收可以通过水稻的节点进行重新分配, 并向上转运至籽粒, 但无法向下转运至根。水稻的叶片和根部优先吸收大气沉降中的重同位素 ($\Delta \text{Cd}^{114/110}$ 叶-颗粒: $0.10 \pm 0.02\%$, $\Delta \text{Cd}^{114/110}$ 根-颗粒: $0.20 \pm 0.02\%$), 但是保留轻同位素, 并进一步向籽粒转运重同位素。这些发现强调了大气沉降对水稻的贡献以及镉同位素可以作为定量植物污染来源的示踪剂, 为使用镉同位素在环境中的示踪提供了重要信息。

关键词: 大气沉降; 镉同位素比值; 叶面暴露; 根部暴露; 同位素混合模型

作者简介: 夏睿智, 中国科学院南京土壤研究所在读博士生, 主要从事环境地球化学和土壤污染修复方面的研究。

E-mail: xiaruizhi@issas.ac.cn

含砷毒剂污染土壤中砷的环境行为研究

郇正来, 张言, 赵三平, 朱勇兵*

国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京, 102205, 中国

摘要: 第二次世界大战期间, 日军在我国境内遗弃了大量化学武器(简称日遗化武), 其中大部分填充的为含砷化学毒剂。在填埋及粗放式销毁过程中, 其中充填的含砷毒剂被泄漏到环境中, 造成环境砷污染。本文研究了我国东北某地区含砷毒剂污染土壤中砷的赋存、形态及组成, 并对污染水平与潜在风险进行评估。表层土壤污染研究表明, 砷主要分布在研究区的林地土壤中, 最高浓度为 110 mg/kg, 并有向下坡农田土壤迁移的趋势。砷主要积累在非晶态 Fe/Al 氧化物结合态和残余态中, 且下坡农田土壤中具有潜在风险的形态占比高于上坡农田。研究区土壤中砷以五价(As(V))为主, 平均含量为 25.02 mg/kg。砷在表层土壤水平迁移过程中存在转化行为, 主要为三价砷的氧化过程。土壤中有机砷主要包括 2-氯乙烯砷酸(CVAOA)、苯氧砷(PAO)、二苯砷酸(DPAA)和三苯砷(TPA)。同砷的影响因子类似, 砷的价态与有机砷均显著受到 Fe/Al/Mn 等氧化物的影响, 迁移转化过程中发生氧化还原反应。研究区土壤样品中主要的微生物群落包括 Proteobacteria、Actinobacteria 以及 Acidobacteria 等, 并在土壤中发现了具有砷抗性的微生物群落。利用体外模拟试验对研究区土壤中砷的生物可给性进行分析, 结果表明砷的平均生物可给性相对较低, 且与 Fe/Al 氧化物结合态密切相关。利用指数模型对研究区的环境生态风险评估的结果表明, 日遗化武主销毁区表层土壤砷污染存在潜在生态风险很强的点位, 地积累指数 I_{geo} 达到偏重度污染水平, 而两侧农田土壤生态风险相对较弱。主销毁区 0-50 cm 土壤污染较重, 潜在生态风险很强; 砷向深层土壤迁移水平低, 100 cm 以下土壤为清洁土壤, 无潜在危害。本文研究为日遗化武污染场地调查与修复提供了数据基础。

关键词: 日遗化武; 砷形态; 有机砷; 土壤; 潜在风险

作者简介: 郇正来, 国民核生化灾害防护国家重点实验室硕士研究生, 主要从事日遗化武场地调查、含砷毒剂降解产物高级氧化与稳定化材料研发。

E-mail: 18811414859@163.com

云南某铅锌矿区耕地土壤重金属污染评价及来源解析

Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in cultivated soil of a lead-zinc mine in Yunnan Province

陈文^{1,2}, 张乃明^{1,2*}

1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201

摘要: 为探究矿区耕地土壤重金属污染特征, 全面了解其生态风险和重金属污染来源, 在某铅锌矿区均匀布设 221 个采样点, 测定土壤中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 的含量。运用地累积指数(Igeo)和潜在生态风险指数(RI)探讨重金属污染程度, 使用绝对主成分-多元线性回归模型(APCS-MLR)和正定矩阵因子分解受体模型(PMF)识别污染源并计算污染贡献率。结果表明: Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的含量平均值分别是云南省土壤背景值的 39.23、10.64、2.07、4.81 和 9.73 倍; 地累积指数递减趋势为 Cd>Zn>Pb>Cu>Cr, 元素 Cd 属于重度污染, 在土壤中积累明显。重金属综合潜在生态风险指数为 1268.2, 处于极高风险水平, 其中 Cd 的贡献率达到 92.81%。源解析结果显示, 研究区土壤重金属来源较为复杂, APCS-MLR 模型识别出四个污染源, 工业和交通源贡献率为 30%、农业源贡献率为 31%、母质源贡献率为 24%和未知源贡献率为 15%; PMF 模型识别出四个污染源, 工业源贡献为 30%, 母质源为 29%, 交通源为 12%, 农业源为 29%。研究表明, 研究区 Cd 污染较为严重, 存在极高的生态风险, 对重金属污染的治理和修复已刻不容缓。对比 2 种分析结果发现 APCS-MLR 和 PMF 模型在来源解析上具有较高的相似性。

关键词: 矿区; 耕地土壤; 重金属; 风险评价; 源解析

作者简介: 陈文, 云南农业大学资源与环境学院, 硕士研究生, 主要研究领域为农业环境保护。

E-mail: 16687097726@163.com

灭菌和未灭菌猪粪施用对水培生菜内生菌和抗生素抗性基因的影响

Effects of sterilized and unsterilized pig manure application on bacterial and antibiotic resistance genes in hydroponic lettuce endophyte

豆庆圆, 王芳*

中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 牲畜粪便通常作为农业肥料使用, 导致抗生素抗性基因 (antibiotic resistance genes, ARGs) 在土壤和作物微生物中增殖与迁移。食用受 ARGs 感染的作物可导致 ARGs 和抗生素耐药细菌进入人体, 这对人体的抗生素耐药性产生重大风险。尽管灭菌处理经常用于杀灭环境微生物, 但其在阻控 ARGs 方面的功效尚不清楚。在本研究中, 我们建立了水培生菜系统, 收集培养 20 天的生菜叶片、根及相应水培溶液样品, 采用高通量 qPCR 和 16S rRNA 基因测序技术, 研究灭菌与未灭菌猪粪对水培溶液和生菜内生中细菌群落和 ARGs 组成的影响。在所有样品中共检测出 68 个 ARGs 和 18 个可移动遗传元件 (mobile genetic elements, MGEs), 灭菌和未灭菌猪粪处理均显著增加了溶液和根内生中 ARGs 和 MGEs 的检出数 ($P < 0.05$)。除此之外, 相比未施肥的对照处理, 灭菌和未灭菌猪粪施用均导致了水培溶液和生菜根内生中 ARGs 和 MGEs 的富集, 最高富集倍数分别为 2507 (灭菌猪粪) 和 827458 (未灭菌猪粪)。样品的优势菌门为变形杆菌 (19.08% - 97.64%)、拟杆菌门 (0.20% - 63.78%) 和厚壁菌门 (0.00% - 13.60%)。厚壁菌门是未灭菌猪粪中 ARGs 的关键宿主细菌, 能够转移并定殖到生菜组织中, 灭菌粪便中缺乏能够转移和定殖于生菜组织的外源细菌, 其对生菜内生细菌的多样性和组成影响不大。值得注意的是, 共享 ARGs 的分布和富集表明, 灭菌和未灭菌猪粪处理中, 外源 ARGs 均能够从水培溶液迁移到生菜根内生。水培溶液和生菜内生样品中的共享细菌能够作为 ARGs 的宿主菌, 促进 ARGs 的传播。方差分解分析表明, 细菌群落、MGEs 以及其之间的相互作用驱动了样品中 ARGs 的变化, 其中细菌群落与 MGEs 的相互作用是主要因素, 解释比例为 81.87%。

关键词: 抗生素抗性基因; 猪粪; 灭菌猪粪; 生菜内生菌

作者简介: 豆庆圆, 博士研究生, 就读于中国科学院南京土壤研究所, 研究方向为农田系统中抗生素和抗生素抗性基因的迁移转化行为。

E-mail: douqingyuan@issas.ac.cn

高温活化磷尾矿钝化矿区污染土壤中阳离子态重金属研究

Immobilization of Heavy Metal Cations in Contaminated Mining Soils by High-Temperature Activated Phosphate Tailings

周旺旺^{1,2}, 刘意章^{1*}, 刘承帅¹

1 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 土壤重金属污染是重要的环境问题, 矿产资源开发及加工产生的废渣、废水和烟尘等进入环境, 可造成厂矿周边及下游土壤重金属污染, 并对生态环境和人体健康产生危害, 采取可行的修复措施极为必要。化学钝化具有操作相对简单、无需大面积对土壤开挖转运以及修复速度快等优点, 被广泛应用于矿区场地土壤重金属污染修复。在实际应用中, 选择高效、低成本的修复材料尤为关键, 而现有钝化材料仍存在效率较低、成本较高等缺点。近年来, 为降低修复成本, 推动化学钝化技术大面积应用, 利用废弃物研制重金属钝化材料的研究受到关注。磷尾矿是磷化工过程产生的固体废弃物, 其含有的碳酸盐和磷酸盐矿物可与重金属离子生成难溶物, 有望成为适于大面积应用的重金属钝化材料, 但其对重金属的钝化效率有待提高。本研究采用 900 °C 高温处理制备活化磷尾矿材料 (CPT), 研究不同处理下 CPT 对土壤重金属的钝化效果。结果表明: 高温处理将磷尾矿中的白云石分解为方解石、MgO 和 CaO, 活化材料可显著提升土壤 pH, 降低土壤可交换态重金属含量; 添加 0.8% 的 CPT 钝化 30 天后, 土壤可交换态 Zn、Cd 和 Pb 含量分别降低 97%、46% 和 95%。在污染场地土壤重金属修复应用中, 按照 1.32% 的投加量与土壤混合, 15 天后土壤 Zn、Cd 和 Pb 的钝化率分别达到 87.4%、76.4% 和 78.6%。重金属由可交换态向碳酸盐结合态转化, 部分 Cd 转化为铁锰氧化物结合态。主要钝化机理为 MgO 与水反应生成氢氧化物提升土壤 pH, 促使重金属形成氧化物、氢氧化物沉淀, 同时增加铁锰氧化物对 Cd 的吸附固定。研究结果可为矿区土壤原位钝化和磷尾矿资源化利用提供参考。

关键词: 土壤污染; 化学钝化; 重金属; 磷尾矿; 矿山修复

作者简介: 周旺旺, 博士研究生, 研究方向: 地表过程与生态环境效应。

刘意章, 博士, 副研究员, 研究方向: 土壤环境地球化学。

E-mail: zhouwangwang@mail.gyig.ac.cn

E-mail: liuyizhang@mail.gyig.ac.cn

E-mail: dzhang@cqu.edu.cn

污染土壤不同深度下 PAHs 的迁移分布及微生物群落响应的研究

Research on the migration and distribution of PAHs and the response of microbial community at different depths of contaminated soil

李尊, 王莹莹

南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350

摘要: 重污染企业用地及其周边环境因为受到严重污染而需要进行修复处理, 其中主要的有机污染物为农药、多环芳烃和石油烃。物理化学修复技术发展成熟且应用广泛, 但成本高昂且具环境风险高; 生物修复技术具有修复效果好且对环境影响小的优点, 但耗时较长。近年来引入国内的监测自然衰减及其强化技术具有成本低、环境风险小的特点, 其原理是利用场地自然环境中自然生物降解作用、物理和化学作用实现污染物的消除, 其中本土微生物的降解作用被认为是主要的污染物消除途径。本研究首先通过对多环芳烃污染场地不同深度土壤和浅层地下水的污染情况和微生物群落结构的迁移变化规律进行探究, 解析多环芳烃的分布规律和降解功能微生物群落的分布变化及代谢潜力; 其次是采集污染场地周边原位土壤, 并进行实验室内的短期的多环芳烃污染原状土柱模拟实验, 探究短期土壤输水对污染物迁移的影响和原位微生物群落的急性响应, 并探究土壤理化性质和微生物量的变化; 最后是结合三代全长 16S rRNA 测序技术和 Spike-in 微生物绝对定量技术对微生物群落结构和代谢功能进行进一步分析, 综合考察输水总量、土壤深度和理化性质、污染物分布等多重因素对原位土壤微生物群落的影响。结果表明, 场地土壤中多环芳烃污染主要集中在 (0-20cm) 表层土壤。表层土壤微生物群落丰富度和均匀度较高, 物种组成以变形菌门和厚壁菌门为主; 地下水中多环芳烃浓度较低, 但物种丰富度和均匀度高于土壤, 以变形菌门和 Patescibacteria 为主, 随着深度增加古菌所占比例逐渐升高。本研究的意义在于关注污染场地整个地表和浅层地下水的多环芳烃污染, 捕捉多环芳烃从地表到下层土壤和浅层地下水的迁移分布规律, 特别是该过程对土壤基本理化性质以及当地微生物群落造成的多重影响, 并考虑主要影响该过程的环境因素, 例如降水情况导致的土壤含水率突变, 从而初步探索多环芳烃污染对典型场地土壤不同深度下的微生物生态造成的影响, 并评估了原始微生物群对污染物的降解能力。

关键词: 土壤污染; 多环芳烃; 微生物多样性; 16S rRNA

作者简介: 李尊, 南开大学环境科学与工程学院, 硕士研究生, 主要研究领域为污染土壤微生物生态学。

E-mail: lizun@mail.nankai.edu.cn

冶金废渣基钝化剂对 Cd 在土壤中迁移的影响

Effect of metallurgical slag-based passivators on the transport of Cd in soil

宋思源, 王倩, 刘思琪, 黄珊, 孙晓彤, 崔雪莲, 朱熙

中南财经政法大学, 武汉 430073

摘要: 矿产资源整合、资源枯竭(闭坑)和历史遗留等产生的大量废弃矿山工业场地已成为我国土地复垦最重要的对象之一, 矿产开采过程中容易造成土壤重金属污染, 治理土壤重金属对矿山土壤的修复和二次利用至关重要。为探究冶金废渣基钝化材料对 Cd 在土壤-钝化剂中的转化规律, 本研究开展以改性水泥基钝化剂作为对比的球状冶金废渣基钝化剂修复 Cd 污染土壤的室外盆栽实验, 分析了不同实验参数下对有效态 Cd 的钝化效率。实验结果表明, 当冶金废渣基钝化剂掺量为 15%, 钝化时间在 14 d 时, 钝化效率最高(90.08%), 其他条件下对 Cd 钝化效率良好(40~80%), 且在钝化效率最佳参数下冶金废渣基材料钝化效果普遍优于水泥基材料。其次, 总结冶金废渣基钝化剂施加量对小白菜生长情况的影响, 在 5~20% 施加量范围内, 小白菜株长与钝化剂浓度呈正相关。最后通过分析 Cd 在土壤-钝化剂中的再分配关系发现冶金废渣基钝化剂处理的确能促进土壤中的 Cd 向钝化剂迁移并累积, 并在钝化中后期(7~60 d)钝化效果明显优于水泥基钝化剂; 通过 XRD 分析, 冶金废渣基钝化剂含硅酸三钙(C3S)和 SiO_2 , 水化产物通过离子交换、静电吸附和物理封闭实现对 Cd^{2+} 的固结, 达到土壤中部分有效态 Cd 向钝化剂中迁移的目的。本研究结果为 Cd 在土壤与冶金废渣基钝化剂中的迁移转化规律提供了理论依据, 为冶金废渣基钝化剂应用于金属矿山复垦提供现实思路。

关键词: 矿山; 镉; 冶金废渣; 钝化; 土壤修复

作者简介: 宋思源, 中南财经政法大学, 硕士研究生, 研究领域: 土壤重金属修复。

E-mail: 201921130216@stu.zuel.edu.cn

肥皂草促进土壤中苯并[a]芘降解：肥皂草和功能微生物群落的作用

Degradation of benzo [a] pyrene in the soil enhanced by soapwort: The role of soapwort and functional microbial community

姚丹丹, 王宁, 代威, 刘洋, 田坤, 王辉*, 刘云

1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院大学南京学院, 南京 211135

摘要: 多环芳烃 (PAHs) 在土壤中的生物利用率有限, 这给其生物降解带来了挑战。我们假设肥皂草 (*Saponaria officinalis* L.) 可作为一种原位提供生物表面活性剂的工厂, 它能有效促进外源或本地功能微生物对苯并[a]芘的去除。肥皂草是一种能排出生物表面活性剂 (被称为皂苷) 的植物, 本研究通过根箱实验和微宇宙实验分析了肥皂草与两种外源菌株 (黄孢原毛平革菌/枯草芽孢杆菌) 对苯并[a]芘 (BaP) 污染土壤的植物微生物修复机制。结果显示, 自然衰减处理 (CK) 100 天后对 BaP 的去除率仅为 15.90%。相比之下, 肥皂草 (SP)、肥皂草-细菌 (SPB)、肥皂草-真菌 (SPF)、肥皂草-细菌-真菌 (SPM) 介导的根际土壤处理的去除率分别为 40.48%、42.42%、52.37% 和 62.57%。对微生物群落结构的分析表明, 肥皂草刺激了根瘤菌、微球菌和梭状芽孢杆菌等引入和本地功能微生物, 这些微生物通过代谢途径促进了对 BaP 的去除。此外, 皂苷、氨基酸和碳水化合物也是高效去除 BaP 的原因, 它们促进了 BaP 的移动、溶解和微生物活性。总之, 我们的研究强调了肥皂草和特定微生物菌株在有效去除 BaP 方面的潜力。

关键词: 肥皂草; 皂苷提取物; 功能微生物; 共现性网络; 生物强化

作者简介: 姚丹丹, 中国科学院南京土壤研究所博士生,, 研究领域: 微生物固碳。

E-mail: yaodandan@issas.ac.cn

草酸改性铁炭材料强化修复六价铬污染场地效果及机理研究

Enhanced remediation of Cr(VI)-contaminated soil by modified zero-valent iron with oxalic acid on biochar

谢莉鸿, 李尚焱*, 张婷婷*

北京化工大学, 资源与环境研究中心, 环境科学与工程系, 北京 100029

摘要: 六价铬 (Cr(VI)) 具有“三致”毒性, Cr(VI)污染土壤的修复迫在眉睫。本研究采用湿式球磨法制备生物炭上草酸修饰零价铁 (OA-ZVI/BC), 用于修复 Cr(VI)污染土壤。微观表征表明 ZVI 在生物炭上分布均匀, 湿法球磨也增强了生物炭与 ZVI 界面相互作用。电化学分析表明, OA-ZVI/BC 具有较强的电子传递能力和较强的腐蚀性能。此外, 添加 1,10-菲罗啉对 Cr(VI)去除的抑制效率表明, OA-ZVI/BC 中有丰富的 Fe^{2+} 生成, 这有助于 Cr(VI)还原为 Cr(III)。通过理论计算进一步表明, 草酸修饰后的 ZVI 更容易与 Cr(VI)发生固-固界面反应, 并且有更多的电子转移到 Cr(VI)上。当其用于修复 Cr(VI)污染土壤时, OA-ZVI/BC 能钝化 96.7%的总 Cr(VI), 并维持 90 天稳定。采用毒性特征浸出法 (TCLP) 和简单提取法 (SBET) 分别评价了 Cr(VI)的浸出毒性和生物可及性。经 OA-ZVI/BC 修复后, 土壤中 TCLP-Cr(VI)由 $10.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远低于 ZVI/BC 和 OA-ZVI 修复土壤的 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经过 3 个月的修复, Cr(VI)的生物可及性降低了 93.5%。形态提取实验结果表明, 经过 OA-ZVI/BC 修复后, 土壤中的 Cr 组分由弱酸可提取转化为更稳定的形式 (残渣态和可氧化态)。在草酸、生物炭和湿球磨的协同作用下, OA-ZVI/BC 对 Cr(VI)污染土壤表现出优异的修复效果, 其修复机制包括吸附、还原 ($\text{Fe}^0/\text{Fe}^{2+}$, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) 和共沉淀。总之, 本研究制备的铁基钝化材料效果稳定且环境友好, 在重金属污染土壤的修复中具有实际应用价值。

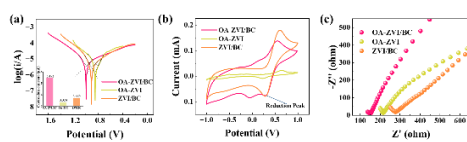


图 1. 电化学表征

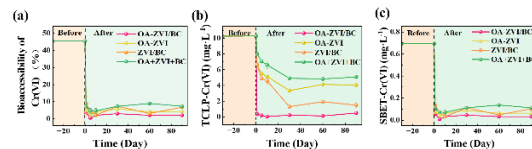


图 2. 土壤修复效果长期评估

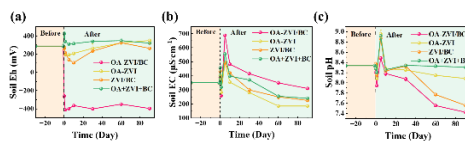


图 3. 土壤理化性质变化

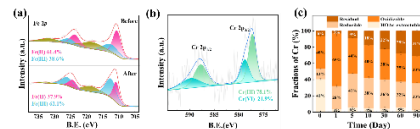


图 4. 修复后材料表征及 Cr 形态变化

关键词：六价铬污染场地；生物炭；零价铁；草酸；电子转移

作者简介：谢莉鸿，北京化工大学环境科学与工程专业 2021 级硕士研究生，研究方向为 Cr(VI)污染土壤钝化材料的开发。

E-mail: 2432398676@qq.com

地下水生物修复智能控制系统研究与开发

孙同^{1,2}, 李晨阳^{1,2}, 何理^{1,2*}

1 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2 天津大学建筑工程学院, 天津 300072

摘要: 为顺应国家“加快产业转型升级, 推进绿色低碳发展”时代要求, 针对传统土壤与地下水修复存在的智能化水平不高、工作效率低等问题, 通过物理模型构建-代理模型拟合-智能控制搭建, 并进一步基于智能优化算法和 C#开发平台, 开发了地下水生物修复智能控制系统, 该系统克服了传统动态控制在处理复杂的污染物降解情况时容易做出无法满足预期的预测不确定弊端, 极大的提高了污染场地修复的精度和修复效率。

关键词: 物理模拟; 代理方程; 智能控制

作者简介: 孙同, 博士研究生, 主要从事水土环境修复研究。

何理教授, 博士, 主要从事水土环境修复与生态水环境研究。

E-mail: 2269406606@qq.com

E-mail: helix111@tju.edu.cn

小分子有机酸对稻田土壤自由基过程的影响及机制探究

Amendment of organic acids significantly enhanced hydroxyl radical production during oxygenation of paddy soils

王艺轩, 陈宁*, 周东美*

南京大学, 南京 210023

摘要: 近年来, 土壤氧化还原波动过程中 Fe(II)氧化诱导产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的研究被广泛报道。土壤中广泛存在的小分子量有机酸(low-molecular-weight organic acids, LMWOAs)由于与 Fe(II)的强相互作用可能也会影响 $\cdot\text{OH}$ 形成的相关过程。我们通过摇瓶实验添加三种小分子酸(草酸(OA), 柠檬酸(CA)和乙酸(AA)), 利用高效液相色谱测定羟基累积量。对反应前后固体进行 XPS、穆斯堡尔谱 Mössbauer 表征, 得到小分子酸介导下二价铁的氧化和铁形态转变。通过探究 pH 和酸根离子相对贡献、固液相羟基产生能力、电子传递途径等探究了小分子酸影响羟基产生的内在机制。结果表明: 添加 LMWOAs (OA 和 CA) 显著提高了厌氧水稻土氧化过程中 $\cdot\text{OH}$ 产量(1.2 ~ 19.5 倍)。与 OA 和 AA (78.4 ~ 110.3 μM)相比, 添加 0.5 mM CA 处理 $\cdot\text{OH}$ 累积量(140.2 $\text{m}\mu\text{M}$)最高, 这是由于其较强络合能力提高了电子利用效率。此外, 随着 CA 浓度增加(< 6.25 mM)显著促进了 $\cdot\text{OH}$ 生成和吡虫啉(IMI)的降解(48.6%), 但过量 CA 会由于竞争作用而进一步降低 $\cdot\text{OH}$ 产量和 IMI 降解。与 0.5 mM CA 相比, 6.25 mM CA 引起的酸化与络合的协同作用会促使更多易与 CA 络合的可交换态 Fe(II)生成, 从而显著增强其氧化。Mössbauer 数据表明, 添加 LMWOAs 有利于活性 Fe(II)氧化, 进而诱导高晶铁相(如针铁矿)的累积。该研究提出了利用 LMWOAs 减少农田土壤有机污染物的绿色途径, 为氧化还原波动频繁的稻田土壤污染物转化提供了理论基础。

关键词: 氧化还原波动; 小分子有机酸; 羟基自由基; 铁形态; 稻田土壤

作者简介: 王艺轩, 现为南京大学环境学院三年级硕士研究生。研究方向: 主要从事稻田土壤中自由基产生以及基于氧化还原耦合修复污染土壤等方面的研究。

E-mail: 18909121620@163.com

复合环境材料对油泥渣土结构和性状改良及植物生长影响研究

Study on soil structure & fertilizer improving and the plant growth response to composite environmental materials in oil sludge residue

冯俊义^{1,3}, 李红东², 邓博文³, 汪的华³, 黄占斌^{1*}

1 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2 甘肃蓝洁环保科技有限公司, 庆阳 745400; 3 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

摘要:为解决油泥渣土资源化利用做绿化基质用土时所面临的土壤结构差、持水能力低、养分贫瘠、生物活性低等问题,本文开展了油泥渣土改良的环境材料研制。在油泥渣土氧化预处理基础上,向油泥渣土中掺混 10%、20%、30%、40%和 50%等不同比例黄土,通过矿物油削减效果和水培实验中种子发芽率,确定黄土掺混比例;并选用煤基腐植酸(A)、生化腐植酸(B)和保水剂(C)三种环境材料,设计三因素三水平的正交土壤培养试验和植物种植试验,对研究中的环境材料进行表征分析以揭示其作用机理,并分析试验结果以确定复配基质改良的环境材料优化配比和应用植物种植的材料适宜用量。结果表明,油泥渣土中添加 40%黄土形成复配基质,其矿物油含量削减至 500 mg/kg 左右,绿豆根长和发芽率相比对照增高了 77.50%、125.00%;复配基质改良的环境材料的优化组合为 A:B:C=4:6:0.05(质量比)时,土壤容重和 pH 分别低至 1.27 g/cm³、7.07,孔隙度、田间持水量提高至 47.50%、37.82%,团聚体、平均重量直径和阳离子交换量相比对照分别提高了 25.80%、64.62%、23.90%,有效磷、水解性氮气、速效钾、有机质分别为 9.50 mg/kg、74.00 mg/kg、642 mg/kg、31.90 g/kg;复合材料的添加量为 20.10 g/kg 种植绿豆时,能明显改善土壤性质和提高绿豆的生长状况,与空白对照相比,绿豆的株高、根长分别增长了 39.33%、23.91%,地上鲜重和干重提高了 75.57%、61.84%,地下鲜重和干重提高了 27.45%、103.88%,FDA 酶活性、叶绿素、类胡萝卜素分别提高了 63.07%、48.99%、52.80%,且土壤养分维持良好、矿物油削减至 391 mg/kg。研究结果为油泥渣土资源化利用做绿化基质用土提供了重要参考。

关键词: 油泥渣土; 资源化; 土壤改良; 环境材料; 腐植酸

作者简介: 冯俊义,中国矿业大学(北京)/武汉大学博士研究生,主要从事土壤改良环境材料研究。

黄占斌,中国矿业大学(北京)教授、博士生导师,主要从事旱区农业生态及植物生理生态、土壤保水剂和土壤污染治理研究。

E-mail: fjy3937@163.com

E-mail: zbhuang2003@163.com

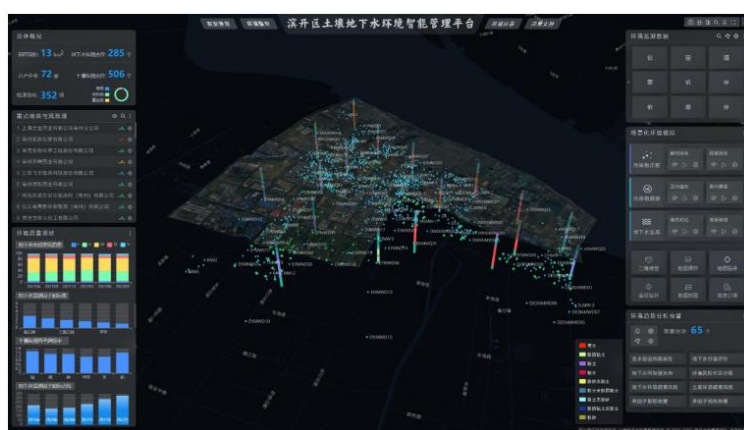
化工园区土壤与地下水环境风险智慧管控应用研究

Application Research on Intelligent Management and Control of Soil and Groundwater Environmental Risks in Chemical Parks

任富天, 梅丹兵, 黄蕾

南京大学环境学院, 南京 210093

摘要: 随着工业化和城市化快速推进, 工业场地造成的土壤与地下水污染问题日益凸显, 严重威胁粮食安全、饮水安全和人居安全。“十三五”期间开展了上万家风险企业、上万个污染土壤地块的调查工作, 呈现出多污染源叠加、多代污染累积、连片污染突出和土-水-气交互的污染特征, 风险监控预警需求强烈。化工污染场地成为“十四五”时期污染防治的重点污染源。针对化工园区土壤与地下水污染防治及环境风险防控的迫切需求, 本研究构建了集“数据管理”、“地表-地下三维场景渲染”、“土壤与地下水污染可视化”、“土壤与地下水污染、溯源模拟可视化”、“地下水在线风险评估与预警”于一体的智慧化监管平台, 实现了地表三维建模可视化、地下三维建模可视化、土壤与地下水水流和溶质运移模型在线模拟预测、地下水污染风险预警与污染溯源等功能, 形成了污染物筛查-大数据风险分析-模型模拟预警溯源-立体全方位监管等为一体的土壤与地下水智能监控预警技术体系, 为化工园区土壤与地下水环境综合整治提供智慧化管理服务, 全面提升了园区土壤与地下水环境治理、管控效果、监管能力与综合水平, 对实现污染地块安全利用、园区环境持续性改善、环境数据信息化管理以及园区土壤与地下水环境的长效监管具有重要示范意义。



关键词: 化工园区; 土壤与地下水; 在线风险评估; 污染过程模拟; 污染预警与溯源; 智慧监管

作者简介: 任富天, 南京大学环境学院, 在读博士研究生, 研究方向为化工园区土壤与地下水环境风险智慧化监管与管控。

E-mail: renfutiann@163.com

一步水热合成新型芬顿催化剂促进碳铁之间电子转移

程六龙¹, 朱雁平¹, 仇荣亮^{1,2*}

1 华南农业大学, 资环学院, 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642; 2 中山大学, 环境科学与工程学院, 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510006

摘要: 在异相相芬顿反应中, 碳材料在促进 Fe(III)/Fe(II) 循环中起着至关重要的作用, 但铁与碳之间的电子传递效率通常较低。在本研究中, 我们通过一步水热法制备了一种新型的异相芬顿催化剂-草酸铁矿/水热碳(Hum/HTC), 并在合成过程中就通过铁碳之间的电子转移实现了 Fe(III) 的 100% 还原。此外, HTC 可以持续提供电子, 促进芬顿反应中 Fe(II) 的再生。电子顺磁共振(EPR)和淬灭实验表明, Hum/HTC 可以通过自由基和非自由基途径将 As(III) 完全氧化为 As(V)。原位红外光谱(ATR-FTIR)和 2D-COS 结果表明, 单齿单核(MM)和双齿双核(BB)是 As(V) 固定的主要键合方式。40%Hum/HTC 对 As(III) 的最大吸附量为 167 mg/g, 高于大多数已报道的铁碳材料。本研究为催化剂合成过程中 Fe(III) 的高效还原提供了一种新的策略, 同时 HTC 可以在异相芬顿反应中持续提供电子加速 Fe(II) 的再生。

关键词: 水热碳; 草酸铁矿; 电子转移; Fe(III)/Fe(II) 循环; As(III) 去除

作者简介: 程六龙 (在读博士), 研究领域: 芬顿催化, 重金属吸附, 铁碳材料。

E-mail: chengl13@126.com

基于市政管网的蒸气入侵优先途径的场地调查和风险评估研究

Site investigation and risk assessment of preferential pathways of vapor intrusion
based on municipal drainage system

许馨怡

南京理工大学, 南京 210094

摘要: 蒸气入侵 (VI) 是指存在于地下环境中的挥发性有机污染物 (VOCs) 通过对流和扩散等一系列的传质作用进入室内并造成室内空气污染的过程。然而, 近年来市政管网作为蒸气入侵的优先通路的案例不断被报道, 其危害愈发引人关注, 对这种蒸气入侵途径的场地调查和风险评估也成为了该领域的研究难点。目前, 仅有少数学者开展了对于 VOCs 污染物在地下管网分布特性和其向邻近建筑内部迁移规律的探讨, 但并未形成被广泛认可和适用的结论, 规范化的调查和风险评价方法也尚未形成。在我国, 对于市政管网作为 VI 优先通路的调查和研究几乎为零, 亟需开展相关的场地调查和研究, 填补该领域的研究空白。本研究以我国管网内 VOCs 的赋存现状和蒸气入侵风险作为研究对象, 选取位于河北和江苏的两段典型排水管网, 对污染物在管网中的组成, 分布以及污染物由管网进入室内的衰减情况进行了场地调查, 调查结果表明: 1. 场地管网中测得的 VOCs 污染物主要为苯系物和氯代类有机污染物, 其浓度都表现出明显的时空波动性; 2. VOCs 经由管网向室内传播的衰减系数差异较大, 其范围为 0.06~0.25; 3. 结合场地调查数据, 采用衰减系数法预测了不同管网污染物可能造成的 VI 健康风险, 发现被调查场地中有超过 30% 的采样点表现出三氯甲烷、四氯化碳和 1, 2-二氯丙烷至少一种污染物的超标, 其中三氯甲烷的风险最大, 有超过 70% 的采样点都表现出高风险。研究结果为我国蒸气入侵风险评价体系的建立提供了数据依据。

关键词: 蒸气入侵优先通路; 污染场地风险评估; 衰减系数; 室内空气污染

作者简介: 许馨怡, 南京理工大学, 硕士研究生。主要研究方向为地下污染物的迁移和转化面的研究。

E-mail: mistyxu98926@126.com

巯基黏土矿物材料钝化修复镉污染土壤的持效性

Persistence of mercapto clay mineral material for passivation remediation of cadmium contaminated soil

钟晓琴, 刘京广, 朱霞萍

成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059

摘要: 农田土壤的修复技术具有特殊性, 在不影响耕作的情况下进行可最大限度保证农户的利益, 钝化修复技术是首选。现阶段钝化技术关键核心是材料, 除了材料在应用过程中的成本、效率外, 持效性更是实际田间钝化修复中的难点。发掘膨润土、凹凸棒石天然黏土矿物的环境属性, 基于有机巯基定向配位作用, 通过硅烷偶联化创新性地研发了对重金属吸附率高、吸附作用力强的复合黏土矿物土壤修复材料 (ATP-SH 和 Bent-SH)。将材料分别施加到 Cd 污染农田土壤中, 施加量为土壤质量的 0.25%、0.5%、1% 和 1.5%, 连续开展了多季水稻和多季油菜的盆栽, 测定了每季作物成熟后土壤有效态 Cd、籽实中 Cd 含量, 秸秆中 Cd 含量, 探究了材料应用于不同 Cd 污染程度土壤的钝化有效性和持效性, 以推动材料在钝化修复重金属污染土壤中的实际应用。结果表明: 将 ATP-SH 施加到 Cd 含量为 1.32 mg/kg (S0)、3.72 mg/kg (S1)、5.47 mg/kg (S2) 的盆栽土壤中, 经过两年四季的作物生长, 随着 ATP-SH 添加量增加, 不同镉污染系列土壤有效态 Cd、籽实 Cd 含量均明显下降, 最大下降率分别为: 第一季: 74.27%、95.81%; 第二季: 84.41%、93.06%; 第三季: 62.15%、62.15%; 第四季: 63.75%、84.30%; 将 Bent-SH 施加到 Cd 含量为 6.0 mg/kg 的盆栽土壤中, 经过三年三季的作物生长, 随着 Bent-SH 添加量的增加, 土壤中有有效态 Cd、大米及秸秆中的 Cd 含量均而呈下降趋势, 最大下降率分别为: 第一季: 58.10%、42.22% 和 55.17%; 第二季: 57.35%、73.10% 和 84.50%; 第三季: 34.25% 和 96.58% (未测秸秆)。分析不同材料添加量后有效态 Cd 含量、籽实中 Cd 含量变化与作物种类、品种、淹水或是旱作环境的关系, 表明复合材料对土壤中重金属的钝化效果与材料添加量、土壤重金属有效态含量、作物种类、作物品种和淹水环境密切相关。ATP-SH 和 Bent-SH 都能持续地降低土壤 Cd 的活性, 阻隔 Cd 从土壤向作物籽实迁移, 对于 Cd 污染土壤具有较好的应用持效性。

关键词: 巯基凹凸棒石; 巯基膨润土; 钝化修复; Cd; 土壤; 持效性

作者简介: 钟晓琴, 在读硕士研究生, 从事土壤重金属的污染修复研究。

通讯作者: 朱霞萍, 教授。

E-mail: 2240352522@qq.com, zhuxiaping@cdut.edu.cn

铁锰氧化物对土壤中锑形态的影响研究

Effects of iron oxides and manganese oxides on the speciation of antimony in soil

刘玉蛟 崔婷 朱霞萍

成都理工大学材料与化学化工学院，成都 610059

摘要：土壤锑污染严重程度不仅与其总量有关，更与其存在形态有关。自然状态下土壤中不同形态锑处于一种动态平衡，活性较大的铁锰氧化物及其形态分布是影响土壤锑形态分布和转化的主要因素。本研究选取贵州晴隆地区土壤，模拟自然环境，以原位制备的方式在土壤中分别负载 0.015%、0.025%、0.05%和 0.1%的 $\delta\text{-MnO}_2$ （以锰计）和 1%、2%、4%、6%的水铁矿（以铁计），开展淹水实验，分析不同载锰量、不同载铁量和不同淹水时间对于悬浮液和土壤中各形态铁、各形态锰与各形态锑含量的变化，并进行相关性分析，揭示铁锰氧化物形态对土壤中锑形态的影响机制，为土壤锑污染预警和治理提供理论和技术支撑。结果表明：20 天淹水条件下，随着水铁矿负载量增加，土壤中活性较大的非专性吸附态锑和专性吸附态锑含量降低，且二者与水铁矿负载量呈显著负相关。 $\delta\text{-MnO}_2$ 负载量与土壤中铁锰铝氧化物结合态锑和残渣态锑含量具有显著的相关性，但对各形态锑含量的影响较小。60 天淹水条件下，负载不同量水铁矿或 $\delta\text{-MnO}_2$ 会导致土壤中各形态铁锰氧化物发生不同程度转化，进而与锑发生离子交换反应，氧化反应、配位反应，促进活性较强的非专性吸附态锑和专性吸附态锑向更稳定的铁锰氧化物结合态锑和残渣态锑转化，水铁矿效果更明显。

关键词：Sb 形态； $\delta\text{-MnO}_2$ ；水铁矿；土壤

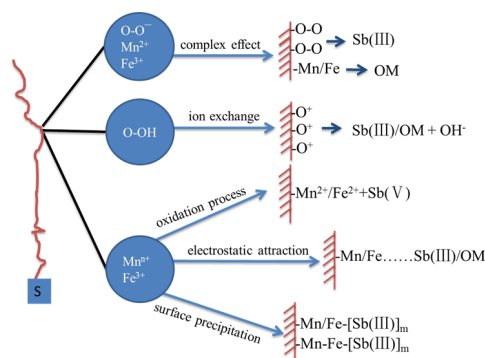


图1 土壤中铁锰氧化物对锑的作用力

作者简介：刘玉蛟，硕士研究生，从事土壤重金属污染修复研究。

E-mail: 2022020561stu.cdut.edu.cn

弹药销毁场地土壤中铅的生物可利用性及相对生物有效性研究

Bioaccessibility and relative bioavailability of lead in soils of ammunition demolition sites

张慧君¹, 王诗雨¹, 历红波², 朱勇兵^{3*}, 赵三平³, 计超¹, 薛玉璐¹, 刘晓东^{1*}

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 2 南京大学环境学院, 南京 210023;
3 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205

摘要: 在战争结束后或者是军事科技进步的过程中, 都会产生很多过时的废弃弹药。露天引爆/露天燃烧是一种常见的销毁废弃弹药的方式, 由于其具有经济、高效、安全等特点而被广泛使用, 但这种粗暴的销毁方式往往会向环境中释放大量重金属, 导致土壤严重污染, 并可能对销毁场地周围的生态和人体健康带来造成潜在风险。目前关于弹药销毁场地重金属污染特征和风险评估的研究较少, 且基于总量的污染物风险评估可能会高估其风险水平, 故有必要开展弹药销毁场地重金属生物有效性研究。本研究调查了中国三个不同类型的弹药销毁场地土壤重金属污染情况, 结果表明, 土壤主要受铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)和铬(Cr)污染, 其中Pb污染最为严重。在此基础上, 采用体外胃肠模拟提取方法(UBM和SBRC)和体内小鼠动物模型分别测定了Pb的生物可利用性和相对生物有效性。结果表明, 两种体外实验方法测定的Pb的胃相生物可给性均显著高于肠相生物可给性。由于实验参数不同, SBRC测定的生物可及性高于UBM测定的生物可给性。小鼠体内分析方法得到Pb的相对生物有效性为30.21%~80.77%, 显著低于轻武器靶场土壤中Pb的相对生物有效性。对体内体外试验得到的结果开展相关性分析, 发现SBRC胃相Pb的生物可给性与小鼠体内方法测得的相对生物有效性具有较好的相关性, 线性回归方程为 $RBA(\%) = 0.987 \times BAc(SBRC-GP) + 2.47$ 。此外, 土壤中Pb的生物有效性随pH的降低和TOC的减少而提高, Pb的化学形态如水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态也对生物有效性具有一定贡献。

关键词: 弹药销毁场地; 铅污染; 生物可利用性; 相对生物有效性

作者简介: 张慧君, 博士研究生, 研究方向: 军事场地污染研究;

朱勇兵, 高级工程师, 研究方向: 军事环境科学。

刘晓东, 教授, 研究方向: 污染环境与全球变化。

E-mail: zhang96@mail.ustc.edu.cn

E-mail: zhuyb16@mail.ustc.edu.cn

E-mail: ycx@ustc.edu.cn

一种用于去除废水中 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的新型磷矿-磁性生物炭：表征、性能和机制

A novel phosphate rock-magnetic biochar for Pb^{2+} and Cd^{2+} removal in wastewater: Characterization, performance and mechanisms

陈勇林¹, 杨文弢^{1*}, 吴攀^{1,2}

1 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州大学资源与环境工程学院; 2 贵州喀斯特环境生态系统观测研究站

摘要: 治理受铅 (Pb) 和镉 (Cd) 污染的工业废水已成为当前全球的研究热点。本研究选用牛粪固体废弃物作为原料并通过磁化和与磷矿石煅烧的改性方法制备了一种新型磷矿-磁性生物炭 (PR-MCLB), 同时探讨其对模拟废水中 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除效率和吸附机理。结果表明, 伪二级动力学模型和 Langmuir 模型能更好的拟合 PR-MCLB 对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附过程, 这表明吸附过程是一个单层的均相化学吸附。在 25° C 条件下, PR-MCLB 对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的最大理论吸附容量 ($Q_{e,cal}$) 分别为 451.24 和 120.87 mg g^{-1} , 比之前研究中提到的磷改性生物炭或牛粪衍生生物炭的 $Q_{e,cal}$ 分别高出约 1.5-42.4 倍和 1.1-21.0 倍。酸性条件 (pH 值 3.5-5.5) 和共存阳离子 (Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} (10-200 mg/L)) 对 PR-MCLB 的吸附性能几乎没有不利影响。机理分析表明, PR-MCLB 表面的磷酸盐和碳酸盐在 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的固定过程中扮演关键作用, 有 54.03% 的 Pb^{2+} 和 39.12% 的 Cd^{2+} 主要是通过矿物沉淀的形式被固定。其次, 有 21.24% 的 Pb^{2+} 和 32.22% 的 Cd^{2+} 是通过离子交换被固定在 PR-MCLB 表面。阳离子- π 相互作用和表面络合作用对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 固定的贡献率相对有限, 对 Pb^{2+} 的贡献率分别占 9.11% 和 11.10%, 而对 Cd^{2+} 的贡献率分别占 7.36% 和 18.71%。而静电吸引和物理吸附作用对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 固定的贡献率较低, 可以忽略不计。最重要的是, 潜在生态风险测试的结果证实了 PR-MCLB 实际应用的安全性。基于以上结果表明, PR-MCLB 作为一种高效、环保的材料, 在治理受 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 污染废水方面展现出巨大的实际应用潜力。

关键词: 废物利用; 重金属; 吸附; 牛粪生物炭; 磷矿

作者简介: 陈勇林, 现为贵州大学在读硕士研究生, 主要研究领域与方向为固体废弃物资源化利用、废水重金属治理和土壤重金属污染与修复技术。

E-mail: ylchen189904@163.com

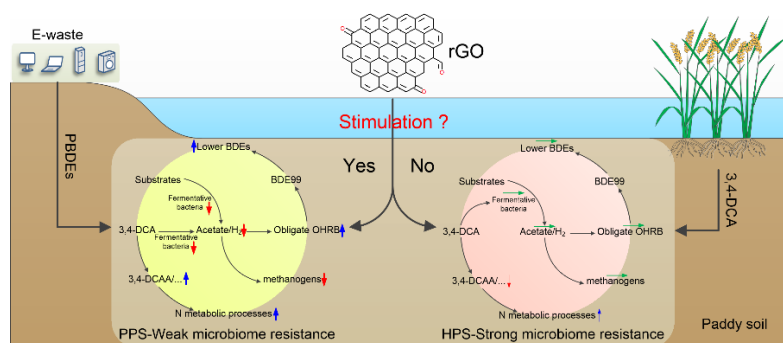
还原氧化石墨烯对水稻土中 BDE99 及 3,4-二氯苯胺同步消减的刺激效果及机制

Insights into the stimulation of reduced graphene oxide to simultaneous abatement of 2,2',4,4',5-pentabromodiphenyl ether and 3,4-dichloroaniline in paddy soils

孙毅^{1,2}, 滕应^{1,2*}, 李然³, 王霞^{1,2}, 赵玲^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 养分资源高效利用全国重点实验室, 农业农村部废弃物基质化利用重点实验室, 济南 250100

摘要: 电子垃圾拆解区周边的水稻土, 可能受到多溴联苯醚及 3,4-二氯苯胺 (3,4-DCA) 的复合污染。本研究探究了还原氧化石墨烯 (rGO) 对两种水稻土中 2,2',4,4',5-五溴联苯醚 (BDE99) 及 3,4-DCA 同步消减的刺激效果及内在机制。18 周的微宇宙培养实验结果表明, rGO 提高渗育型水稻土中 BDE99 的脱溴程度及 3,4-DCA 的转化速率, 对潜育型水稻土中两者的消减无影响。在渗育型水稻土中, rGO 抑制发酵菌、产酸菌及产甲烷菌的活性, 利于专性脱卤菌对 BDE99 的脱溴; 而在潜育型水稻土中, 发酵菌、产酸菌、产甲烷菌及专性脱卤菌对 rGO 无明显响应。对于 3,4-DCA, rGO 将渗育型水稻土中其消减途径由乙酸途径变为氮代谢途径, 且提高氮代谢相关的氯代苯胺降解菌活性, 从而提高 3,4-DCA 的转化速率。在潜育型水稻土中, rGO 提高氮代谢相关氯代苯胺降解菌的活性, 但抑制 3,4-DCA 向 3,4-二氯乙酰苯胺的转化, 两者相互抵消使 rGO 对 3,4-DCA 转化无影响。两种水稻土中 rGO 的不同刺激效果, 受水稻土中微生物组抵抗力的调控。在微生物组抵抗力弱的水稻土中, rGO 具有刺激多溴联苯醚及氯代苯胺同步消减的应用潜力。



关键词: 微生物组抵抗力; 还原氧化石墨烯; 多溴联苯醚; 氯代苯胺; 水稻土

作者简介: 孙毅, 中国科学院南京土壤研究所, 在读博士生。主要研究领域卤代有机污染物的厌氧脱卤。

E-mail: sunyi@issas.ac.cn

分子选择性在天然有机物与 Fe-Cr 共沉淀中作用的重要性

The Importance of Molecular Selectivity of Natural Organic Matter in Fe-Cr Coprecipitation

罗雯丹¹, 朱世殊¹, 金超^{1,*}, 仇荣亮^{1,2,*}

1 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2 华南农业大学资源与环境学院广东省岭南现代农业重点实验室, 广州 510642

摘要: 铁/铬 (Fe/Cr) 氢氧化物与天然有机质 (NOM) 共沉淀是 Cr 固化的重要途径。因 NOM 其具有丰富的氧化还原结构和多重的有机分子共同体特征, 会显著改变重金属 Cr 的赋存形态。目前, NOM 在共沉淀中的作用由于其分子异质性和多样性而存在争议, 难以从分子层面解析, 阻碍了人们对 Cr 在 NOM 存在时的地球化学过程机制的理解。本团队侧重关注于 NOM 参与 Fe/Cr 共沉淀过程中的分子选择性, 通过傅里叶变换离子回旋共振质谱 (FT-ICR-MS) 揭示 Cr 的环境归趋。结果表明, Suwannee River NOM (SRNOM) 对 Fe/Cr 共沉淀物中 Cr 固定化和稳定性的显著影响不仅仅取决于 SRNOM 在 Fe/Cr 氢氧化物上的吸附。其中, SRNOM 中的多环芳烃和多酚类化合物有限吸附在 Fe/Cr 氢氧化物纳米颗粒表面, 提供了额外的结合位点并促进了其团聚。而一些特定化合物 (如多酚类化合物以及高不饱和酚类化合物) 相较于吸附在 Fe/Cr 氢氧化物纳米颗粒上具有更低的不饱和度和更高的含氧量, 在共沉淀过程中会优先掺杂进入共沉淀物形成不溶性 Cr-有机配合物。Kendrick 质量表明, 不溶性 Cr-有机配合物含有更少的羧基化有机物。同时发现, 不溶性 Cr-有机配合物的空间分布与 Cr 固定化和 Fe/Cr-NOM 共沉淀物的稳定性密切相关。以上成果证明了不溶性 Cr-有机配合物在 Cr 固定化和沉淀物稳定性中的重要性; 本研究内容也强调了有机质分子层面的结构解析对于预测重金属归趋的重要性。

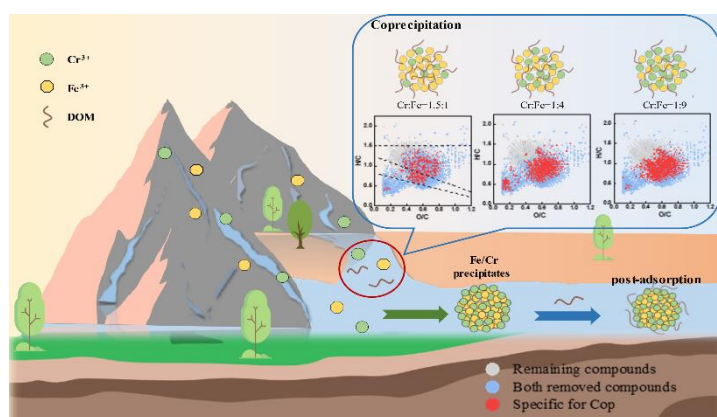


Fig. Coprecipitation behavior and mechanism of Fe-Cr under the influence of NOM

关键词： 铬固定；共沉淀；天然有机质；分子分馏；Cr-有机配合物

作者简介： 金超，中山大学环境科学与工程学院，副教授；研究领域：土壤-水环境中胶体态污染物迁移行为及机理。

E-mail: 2289634707@qq.com

E-mail: jinchao3@mail.sysu.edu.cn

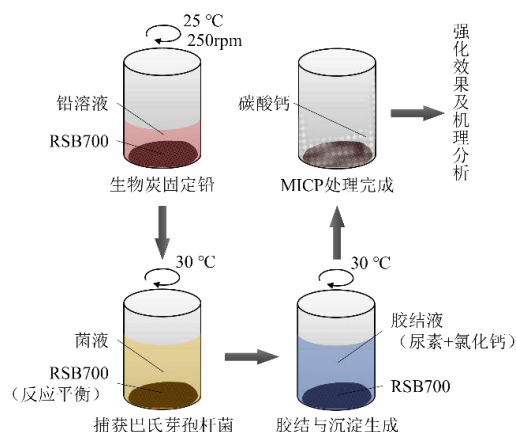
微生物诱导碳酸盐沉淀技术强化生物炭固定铅的效果及机理研究

The effect and mechanism of microbial induced carbonate precipitation to enhance lead immobilization by biochar

胡慧聪, 唐朝生*, 沈征涛, 泮晓华, 牟文, 吕超, 范晓亮

南京大学, 地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 生物炭是一种极具潜力的低碳重金属固定材料。但受固定机理的制约, 其长效稳定性往往不能满足实际工程需求。而微生物诱导碳酸盐沉淀 (MICP) 技术在岩土、环境、地质工程等领域得到了广泛研究和应用。本次研究提出通过 MICP 技术来强化生物炭对铅的固定, 以期实现长效稳定。首先, 从不同原材料、不同生产温度制备得到的 5 种农业废弃生物炭中筛选出铅固定总量较大、但稳定性较差的水稻秸秆生物炭 (700 度制备) (RSB700), 其固定的铅成分中酸可溶态占比高达 94.0%, 具有潜在的环境风险。对固定了铅的 RSB700 进行 MICP 处理, 试验以巴氏芽孢杆菌为试验菌株, 控制尿素浓度为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 氯化钙设 4 个浓度梯度, 分别为 0.05、0.1、0.3 和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微观测试试验和化学分析结果显示, MICP 处理后, 生物炭表面出现不规则的团簇型碳酸钙晶体 (多为方解石、部分为球霏石), 铅的稳定性也得到显著提升。氯化钙浓度对强化效果有一定的影响, 当其浓度为 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可交换态铅和酸可溶态铅占比分别降低约 90.0% 和 92.7%, 稳定态铅占比提升约 19.6 倍。MICP 技术的强化机理主要是在生物炭表面形成一层由碳酸钙组成的表面保护“屏障”, 从而抵抗来自环境的酸性侵蚀。本次研究表明, MICP 技术强化生物炭固定重金属污染具有实际的应用潜力, 未来可以在重金属污染土壤治理中进行进一步的研究。



关键词：微生物矿化；重金属；炭基材料；农业废弃物；土壤修复

作者简介：唐朝生，南京大学地球科学与工程学院，教授，主要从事极端气候工程地质与城市环境岩土工程的研究；

胡慧聪，南京大学地球科学与工程学院，博士研究生，主要研究方向为重金属污染土壤治理。

E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

E-mail: mg21290062@smail.nju.edu.cn

纳米铁的多重调控及对有机物的高效降解

Multiple regulation of nanosized zero-valent iron to degrade organic matter efficiently

曲建华, 李卓然, 张颖*

东北农业大学, 黑龙江 150030

摘要: 纳米零价铁 (nZVI) 是一种很有前途的过硫酸盐 (PS) 活化剂, 然而其致密的氧化壳结构严重限制了 nZVI 向 PS 的电子转移。我们引入硫化和磷掺杂生物炭来打破 nZVI 原始的氧化壳, 形成了含有 FeS 和 FePO₄ 的混合外壳。与壳层组分相比, 内部铁核原子的扩散速度更快, 引发了多重柯肯达尔效应, 导致空位向内流动, 形成径向纳米裂纹。以去除三氯乙烯 (TCE) 为例, 这种具有独特“柠檬片状”的纳米裂纹结构有利于电子和 Fe²⁺ 通过混合壳向外快速转移活化 PS, 从而高效生成并利用活性物种, 其中, O₂^{•-} 对 TCE 的去除贡献最大; 并且 SnZVI@PBC 逐渐变得缺电子, 进而从 TCE 中提取电子, 实现非自由基途径降解。实验结果表明, TCE 的脱氯率可达 90.6%, 矿化率可达 85.4%。与 nZVI/PS 工艺相比, SnZVI@PBC/PS 体系可以显著减少催化剂用量 (87.5%) 和 PS 用量 (68.8%), 几乎实现 TCE 的完全降解, 且该体系具有抗干扰、稳定性好、pH 适用范围广等特点。我们的工作推进了对 nZVI 上多重柯肯达尔效应引发纳米裂纹形成机理的理解, 并相应合理地设计了用于降解有机物的类芬顿催化剂。

关键词: 柯肯达尔效应; 纳米裂纹; 过硫酸盐活化; 零价铁; 电子转移

作者简介: 曲建华, 教授, 博士生导师, 研究方向为土水界面多过程调控与污染修复研究。

李卓然, 硕士研究生, 研究方向为环境保护与修复。

E-mail: jhqu@neau.edu.cn

E-mail: lzt001117@163.com

Fe₃O₄@MnO₂ 活化过硫酸盐/亚硫酸盐降解地下水中二甲双胍的研究

江吟莹，余江

四川大学建筑与环境学院，成都 610041

摘要：近年来，水污染日趋严峻。二甲双胍是世界上消费量最高的药物，几乎完全不被人体代谢，可全部排出体外，传统的污水处理方式对废水中的二甲双胍去除效率不高，导致各类水体中二甲双胍常被检出。二甲双胍对水生动物存在生态毒性，已被认为是一种新兴污染物。继传统的高级氧化技术之后，基于硫酸根自由基（ $\cdot\text{SO}_4^-$ ）的高级氧化技术开始被科研工作者关注。本研究选取亚硫酸钠、过二硫酸盐和过一硫酸盐三种可以产生硫酸根自由基的氧化剂，以地下水中二甲双胍作为目标污染物，采用磁性 Fe₃O₄@MnO₂ 催化剂分别活化亚硫酸盐、过二硫酸盐和过一硫酸盐，研究 Fe₃O₄@MnO₂ 活化过硫酸盐/亚硫酸盐体系去除地下水中二甲双胍的效果及机理。主要结果如下：

（1）通过两步水热法，先后合成了具有磁性、便于回收的纳米 Fe₃O₄ 颗粒和呈花状结构的核-壳催化剂 Fe₃O₄@MnO₂。经 SEM、TEM、XRD、XPS 和 VSM 手段表征，催化剂拥有良好的结晶度，外形规整，能够被磁铁吸引以达到回收目的。Fe₃O₄ 和 MnO₂ 的复合具有互相促进活化 Na₂SO₃、PDS 和 PMS 的能力，当 n(Fe₃O₄:MnO₂)=1:2.5 时，催化效果最佳。

（2）分别选取 Na₂SO₃、PDS 和 PMS 作为氧化剂，在超声波辅助下，对地下水中新兴污染物二甲双胍进行降解。其中 PMS 体系降解性能最优，80 min 内降解率最高为 98.89%；PDS 体系次之，最大降解率 97.79%；Na₂SO₃ 可能受限于投加浓度，该体系最大降解率也可达 92.38%。整体上，三种氧化体系对难降解 PPCPs 二甲双胍均表现出较好的氧化能力。

（3）三种氧化体系对于弱酸性至碱性环境均具有较宽泛的良好适应性，且在碱性 pH 下降解能力提升；较低的地下水硬度对氧化二甲双胍有促进作用，当地下水硬度太高后会有少许抑制，但抑制作用不强烈；对地下水中的阴离子和腐殖酸，三种氧化体系也都有不错的适应能力，尤其是 PDS 和 PMS 体系，在添加了阴离子和腐殖酸的环境中几乎不受抑制，这可能与不同氧化体系中占主导的活性氧化物质不同有关：Na₂SO₃ 体系主要依靠自由基途径生成的 $\cdot\text{SO}_4^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 进行氧化；PDS 体系中是非自由基路径的 $^1\text{O}_2$ 占据主导地位，其次是 $\cdot\text{SO}_4^-$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ ；PMS 体系 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $^1\text{O}_2$ 起关键作用。因此，PMS 和 PDS 有较好的氧化性能和环境适应性，更利于工程实际应用。

关键词：PMS；PDS；亚硫酸钠；二甲双胍；高级氧化技术；地下水移

作者简介：江吟莹，四川大学博士研究生。

余江，四川大学教授，博士生导师。

E-mail: yuj@scu.edu.cn

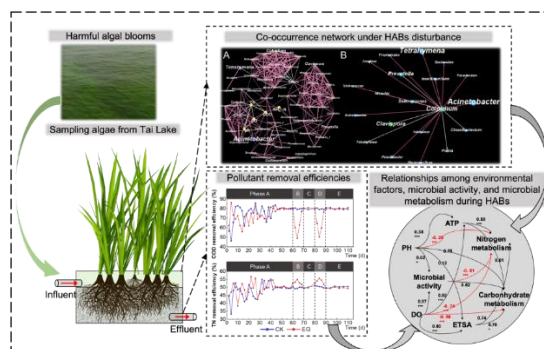
E-mail: 3369675077@qq.com

探索人工湿地在有害水华干扰下的恢复能力：微生物响应机制的研究

Exploring the resilience of constructed wetlands to harmful algal blooms disturbances: A study on microbial response mechanisms

张拓实¹, 郭梦冉¹, 孟祥伟¹, 侯宁¹, 赵昕悦^{1*}¹ 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030

摘要: 人工湿地作为一种基于自然的污水处理系统, 与自然环境持续保持着物质和能量的交换。由于湿地系统具有高处理效率、成本效益和多功能性的特点。因此, 其非常适合处理各种废水, 包括畜牧业废水、农田退水等。然而, 作为开放的生态系统, 人工湿地系统在废水处理过程中容易受到水力强度、温度、进水负荷和水华等因素的扰动, 这可能会破坏生物和非生物因素之间复杂的相互作用, 导致其污染物去除能力降低。其中, 人工湿地由于有害水华 (Harmful algal blooms, HABs) 造成的扰动引发了人们广泛的关注。HABs 是一种高度危险且普遍存在的环境威胁, 具有其独特的生物学特性。在进入湿地系统后会破坏系统内物理、化学和生物过程的微妙平衡, 进而影响湿地的污染物处理性能。为此, 本研究旨在探索 HABs 对人工湿地的污染物去除性能和根际微生物群落响应的影响。结果显示, 人工湿地具有自适应能力, 使其能够从 HABs 干扰中恢复。在根际微生物环境中, 水华的加入促进了 *Acinetobacter* 丰度的增加, 并且表明了 *Acinetobacter* 在抵抗 HABs 干扰中起到了关键作用。与此同时, 功能预测结果进一步证实, 水华的扰动增强了湿地根际微生物的反硝化代谢途径。并进一步促进了反硝化过程, 进而提高了人工湿地的氮去除效率。此外, 我们构建了结构方程模型进一步表明, 环境因素如溶解氧、pH 等也对微生物活性产生了显著影响, 从而影响了污染物去除性能。总体而言, 我们的研究结果揭示了人工湿地在 HABs 干扰期间维持稳定性的机制。

**关键词:** 人工湿地; 有害水华; 污水处理; 根际微生物; 微生物群落

作者简介: 张拓实, 东北农业大学资源与环境学院研二在读研究生, 科研方向主要围绕环境生物修复、人工湿地修复水体污染、环境可持续性分析等方面开展研究工作。

E-mail: zhangtuoshi2000@163.com

大气湿沉降镉在上海青叶片上的积累及微界面迁移机制

杨佳^{1,2}, 程学宇^{1,2}, 曹雪莹², 谭长银

1 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2 长沙学院乡村振兴研究院, 长沙 410022

摘要: 上海青作为常见叶菜, 易吸收积累土壤 Cd 及大气沉降态 Cd。为探索上海青叶片对于大气湿沉降态 Cd 的吸收机制, 进行大气湿沉降模拟试验, 研究了土培和基质培两种方式下, 不同年沉降通量(30、60、90、120 g/ha)大气湿沉降 Cd 对上海青生长情况、抗逆反应和体内 Cd 积累、叶片 Cd 不同形态分布与亚细胞分布特征的影响, 并通过 TEM 观察上海青叶片亚细胞的损伤情况。试验结果显示, 随着沉降通量的增加, 两种培养条件下, 均发现上海青株高、鲜重及叶片含水率降低, 叶绿素含量和可溶性蛋白含量先升后降, 丙二醛含量增加, 土培上海青过氧化氢酶活性和基质培上海青超氧化物歧化酶活性显著提升, 通过进一步 TEM 观察发现, 沉降处理下细胞中叶绿体的类囊体膜和线粒体外膜等膜结构被严重破坏。可见低浓度 Cd 促进植物生长, 但随着沉降通量增加, 细胞逐渐受到 Cd 沉降的破坏, 影响植物生长, 上海青则是利用抗氧化酶系统清除过量活性氧缓解大气沉降 Cd 胁迫。与对照相比, 根部 Cd 含量均无明显差异, 但低沉降通量即可显著增加基质培上海青地上部 Cd 含量, 高沉降通量显著增加土培上海青地上部 Cd 含量, 大气沉降 Cd 对上海青叶片 Cd 积累的贡献率随沉降通量的增大而显著增加, 两种栽培方式贡献率差异明显, 可见叶片直接吸收了大气沉降中的 Cd, 在几乎完全排除根系 Cd 吸收时上海青叶片的 Cd 积累完全来源于叶面。Cd 在上海青叶片中以氯化钠提取态为主要存在形态, 随模拟沉降通量的增大, 上海青叶片内的 Cd 出现向高迁移活性形态转化的趋势, 表明 Cd 更多在细胞壁中与果胶和蛋白质结合, 迁移能力与生物毒性更强, 同时, 研究发现 Cd 在叶片亚细胞组分中主要分布在细胞壁和可溶性组分, 随模拟沉降通量上升, Cd 在细胞壁中的比例增加, 在可溶性组分中的比例降低, 可见上海青对 Cd 固持主要依靠细胞壁加强。本研究比较了作物叶片亚细胞 Cd 分配与 Cd 在作物体内迁移能力的关系, 从微观层次上探明了大气沉降 Cd 在植物体内迁移机制。

关键词: 大气沉降; 镉; 亚细胞组分; 形态分布

作者简介: 杨佳, 湖南师范大学地理科学学院, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属污染修复与农产品安全生产。

E-mail: 1830263168@qq.com

生物炭负载铁锰对污染土壤中砷修复及酶活性的协同作用

Synergistic mechanism of iron manganese supported biochar for arsenic remediation
and enzyme activity in contaminated soil

张理群

安徽大学, 合肥 230601

摘要: 本研究制备并表征了毛竹衍生生物炭负载不同比例的铁基与锰基, 通过研究不同材料添加后土壤中各项环境因子、砷形态及浸出量的变化评价了其在 As 污染土壤中的修复性能, 提出了 Fe-Mn 去除砷的优质比例及机理, 并结合生物学知识解释了酶活性与土壤环境因子的多变量关系。Fe-Mn 改性生物炭的处理提高了有机质、阳离子交换量、N、P、K 等养分含量, 在修复过程中于生物炭表面形成 Mn-O/As、Fe-O/As 等含氧官能团, 促进了 As 由可移动态向残渣态的转化, 减轻了 As 的植物毒性, 对 As 的修复能力优于 Fe 单一改性生物炭。Mn 的贡献在 FeMn-BC 协同修复砷的过程中是不可缺少的, 它能增加生物炭表面重金属的吸附位点和官能团数量。铁锰改性生物炭对 As 的协同机制除静电吸引外, 主要为氧化还原和络合作用, Mn 将 As(III)氧化为更具有惰性的 As(V), 在这个反应过程中, Mn(IV)还原为 Mn(III)和 Mn(II), 促进 Fe(III)与 As 形成 Fe-As 络合物, 同时 As 由于三元表面配合物的形成而被固定。此外, 添加 Fe-Mn 改性生物炭对土壤酶活性的影响与土壤环境因子的变化相关, 过氧化氢酶与土壤 pH 相关, 中性磷酸酶与土壤有机质相关, 脲酶与氨态氮相关, 而蔗糖酶的活性影响不显著。本次研究突出了 FM1:3-BC 可作为 As 污染中性土壤中具有潜在价值的修复剂。

关键词: 生物炭; 土壤修复; 酶活性

作者简介: 张理群, 安徽大学博士研究生, 主要研究方向为土壤砷修复。

E-mail: zlq1339566@163.com

淮南矿业城市土壤微塑料污染特征：空间分布及影响因素

Characteristics of microplastic pollution in mining soil in Huainan: spatial distribution, influencing factors

胡洁

安徽大学，合肥 230601

摘要：农田土壤已经成为微塑料（MPs）的主要汇集地，而城市活动也会向环境中释放微塑料。本研究考虑到人类活动干扰和土壤性质条件，调查了淮南典型矿业城市中不同样地类型土壤中微塑料的污染情况，通过分析微塑料的形态特征（丰度、形状、颜色、尺寸）与土壤基本性质、重金属、及地理特征之间的关系，阐述土壤中微塑料污染的主要驱动因素。本研究提供了城市-农田生态系统中 MP 污染等多方面环境信息，对于 MP 污染控制和修复的后续研究具有重要意义。

关键词：微塑料；农田；分布特征；环境因素

作者简介：胡洁，安徽大学博士生研究生，主要研究方向为环境微塑料污染特征及生态效应研究。

E-mail: hj1057353315@163.com

有机氯农药污染土壤中病毒与细菌群落通过互补装配过程合作生存

Viral and bacterial communities collaborate through complementary assembly processes in soil to survive organochlorine contamination

苑书建¹, 孙明明², 郑晓璇^{2,3}, 胡锋², 叶茂^{1*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京, 210008; 2 南京农业大学, 资源与环境科学学院, 土壤生态实验室, 南京 210095; 3 浙江大学, 环境与资源学院, 杭州 310085

摘要: 指导病毒和宿主细菌群落组装的生态驱动因素在很大程度上是未知的, 尽管病毒编码的辅助基因帮助宿主细菌在污染的环境中生存。为了解病毒和宿主在有机氯农药胁迫下协同存活的生态机制, 采用宏基因组学/病毒组学和生物信息学相结合的方法, 研究了中国江苏省江阴市一家关闭的农药工厂周边清洁和有机氯农药污染土壤中病毒和细菌在分类单元和功能基因水平上的群落组装过程。我们观察到有机氯农药污染土壤(农药浓度从 0 提高到 2,617.6 mg/kg)中细菌分类群和功能基因的丰富度降低, 但病毒分类群和辅助代谢基因(AMGs)的丰富度增加。在有机氯农药污染土壤中, 细菌类群和基因的组装均以确定性过程为主, 相对显著性分别为 93.0%和 88.7%。相比之下, 病毒类群和辅助代谢基因的组装是由随机性过程驱动的, 随机过程分别贡献了 83.1%和 69.2%。病毒宿主预测分析表明, Siphoviridae 与 75.0%的细菌门有关。病毒类群和辅助代谢基因在有机氯农药污染土壤中的迁移率较高, 表明病毒具有在细菌群落中传播功能基因的潜力。综上所述, 本研究结果表明, 病毒类群和 AMGs 的随机组装过程促进了土壤中细菌对有机氯农药胁迫的抵抗力。此外, 本研究结果为从微生物生态学角度理解病毒与细菌之间的协同相互作用提供了新的途径, 突出了病毒在污染土壤生物修复中的重要性。

关键词: 有机氯农药; 微生物群落组装; 病毒; 土壤

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

农药污染土壤病毒与宿主细菌相互作用

Interaction of virus and host bacteria in pesticide contaminated soils

张文¹, 郑晓璇², 孙明明³, 叶茂^{1*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京, 210008; 2 浙江大学, 环境与资源学院, 杭州 310085;
3 南京农业大学, 资源与环境科学学院, 土壤生态实验室, 南京 210095

摘要: 农药过量使用是土壤环境污染的主要原因之一, 且对微生物的影响不容忽视。近年来, 土壤环境中的噬菌体群落越发受到人们关注。噬菌体对宿主细菌的作用, 尤其是编码的辅助代谢基因 (auxiliary metabolic genes) 会对细菌代谢如能量摄取、胁迫耐受、污染物转化等产生干扰, 从而影响区域甚至生物地球化学循环。然而, 针对污染土壤中微生物群落变化相关研究甚少, 噬菌体与细菌相互作用的相关研究近乎空白。因此, 本研究针对长三角地区某典型有机氯农药污染场地, 采用宏基因组及宏病毒组测序技术分析清洁土壤及不同污染程度 (轻污染、重污染) 土壤中细菌群落多样性、噬菌体群落多样性及宿主预测、细菌和噬菌体群落基因功能比较与关联、噬菌体辅助代谢基因功能验证等方面对有机氯农药污染下细菌-噬菌体相互作用进行阐释。研究发现有机氯农药污染的土壤显示了较低的细菌多样性和较高的病毒多样性, 其中包含相对丰富的与农药降解和代谢相关的辅助代谢基因。此外, 辅助代谢基因的多样性和相对丰度随着农药污染的严重程度而显著增加。本研究结果揭示了噬菌体辅助代谢基因类群具有协助细菌抵御胁迫环境的重要作用, 为进一步了解土壤病毒群落生态以及与微生物之间的相互作用机制提供数据支撑和理论依据, 并为利用噬菌体疗法修复土壤中的有机氯农药污染提供新策略。

关键词: 有机氯农药污染土壤; 宏病毒组; 噬菌体; 辅助代谢基因; 细菌-噬菌体相互作用

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

噬菌体协调土壤细菌群落提高有机氯农药污染土壤多功能性

Viruses assisted bacteria to facilitate soil multifunctionality under organochlorine pesticide contamination

赵铎凯¹, 吴世茂¹, 郑晓璇², 孙明明³, 叶茂^{1*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京, 210008; 2 浙江大学, 环境与资源学院, 杭州 310085;
3 南京农业大学, 资源与环境科学学院, 土壤生态实验室, 南京 210095

摘要: 土壤生态系统多功能与生物多样性是生态系统功能研究的热点之一, 噬菌体作为生态系统中重要的微生物之一, 尚未有研究阐释噬菌体的多样性与活动对土壤多功能性的影响。有机氯农药污染是常见的土壤污染问题, 微生物在用于土壤污染的生物修复价值已经被普遍研究, 但噬菌体与细菌在污染土壤中的相互作用以及对土壤污染与功能服务的意义也缺乏讨论。因此, 本研究收集了受有机氯农药 (OCPs) 污染的土壤和清洁土壤进行宏基因组与宏病毒组测序和分析, 旨在探索病毒在污染条件下调节土壤生态系统功能特征的价值。首先, 我们发现 OCPs 污染的土壤相比清洁土壤具有更高的多功能性指数, 并且 CEC, TN, TP 等功能指数在污染土壤中更高。通过分析土壤中的微生物基因组我们发现, 污染土壤中病毒群落的多样性显著增加, 病毒编码的辅助代谢基因 (AMGs) 的多样性也显著增加, 污染土壤中富含更多与碳、氮、磷、硫循环和污染物代谢相关的 AMGs。这些病毒和病毒介导的变化与污染土壤中土壤多功能性的增加有关。此外, 污染土壤中的病毒-寄主关系更加多样化, 导致更多的水平基因转移, 进而影响土壤生态系统的功能特征。这些结果表明, 病毒群落对 OCP 污染的适应性调节了主要由细菌主导的土壤功能的转变, 促进了污染土壤多功能性的提高, 确保了土壤生态系统的健康和功能价值。此外, 我们的研究结果还强调了病毒种群和病毒编码的 AMGs 对有机氯农药污染土壤中生态系统多功能性的重要性。

关键词: 土壤生物多样性; 生态系统多功能性; 病毒; 辅助代谢基因; 有机氯农药污染

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

基于淤背工程的土壤-黄河泥沙界面层成土机理

张子璇¹, 胡振琪^{1,2}

1 中国矿业大学（北京）地球科学与测绘工程学院，北京 10083；2 中国矿业大学环境与测绘学院，徐州 221116

摘要：煤矿区生态修复与黄河泥沙淤积协同治理的提出，为黄河泥沙应用于矿区土地复垦与生态修复提供了新的科学理论思路，黄河泥沙充填复垦技术已成为耕地恢复的关键技术，因此探究黄河泥沙是否具备成土可行性及其成土特征、过程与影响因素等可为其应用于缺乏植被生长介质土壤的矿区提供科学支撑。本文选取黄河下游地区一处黄河泥沙淤背工程区作为研究区，以黄河泥沙淤背工程区的上覆土与黄河泥沙界面层为研究对象，界面层采样厚度为10-20cm，分别取自淤背年限分别为0-20年的“上土下沙”剖面构型，通过野外实地调查和室内试验与分析，选取含水率、pH、电导率、有机质、速效养分和全量养分等共11个理化指标；总磷、总氮、重金属等全分析水质检查指标；细菌、真菌群落多样性等微生物指标，综合测定分析不同淤背时期下土壤-黄河泥沙界面层的理化生特征及变化过程，结合PCA、RDA、相互关系等分析方法，以及数值模拟和功能预测计算方法，进一步明确人工修复与自然修复相结合措施下黄河泥沙的成土特征、年际变化规律及影响因子，深入揭示不同淤背时期影响下土壤-黄河泥沙界面层的成土作用机理，同时构建淤背区土壤-黄河泥沙界面层成土的时间预测数学模型。本研究重点从理念上认识黄河泥沙成土和剖面重构（土层功能与层次）的重要性，为黄河泥沙作为植物生长介质应用于矿区土壤重构提供科学的理论依据。

关键词：土壤重构；黄河泥沙；成土；作用机理；界面

作者简介：张子璇，中国矿业大学（北京）博士在读，师从胡振琪教授，主要研究领域为土地复垦与生态修复，主要科研方向为土壤重构。

E-mail: zxzhang0719@163.com

铅锌冶炼场地土壤重金属污染特征及稳定化修复研究

Pollution characteristics and stabilization remediation of heavy metal in lead-zinc smelting sites

李楚璇

中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083

摘要: 冶炼活动是土壤重金属污染的主要来源之一, 随着经济快速发展和产业结构调整, 遗留场地的重金属污染问题限制了土地资源的再开发利用。以华南地区典型铅锌冶炼场地为研究对象, 结合重金属总量和赋存形态分析, 阐明土壤重金属污染特征。研究结果表明, 土壤主要污染物为 Pb、Zn、Cd 和 As, 重金属的空间分布表现出较强的空间异质性。Pb、Cd、As 对土壤的污染达到 5 m 深度, 并由表层向深层迁移。在 3-4 m 土层中, Zn、Pb、As 的浸出含量显著降低, Cd 的浸出含量仍然较高, 表明 Cd 具有较强的迁移性。随着深度的增加, 重金属的弱酸提取态占比降低, 可还原态增加。土壤中 Cd 的弱酸提取态占比较高, As 主要以可还原态和残渣态形式存在。MLA 矿物定量分析结果显示, 62.2%铅主要赋存于硫酸铅矿物中, 89.5%锌赋存在纤维锌矿、闪锌矿、磁铁铅矿物中, 98.9%镉赋存于硅钙铅锌矿、硫铁镉铅矿中, 93.5%的砷赋存于磁铁铅矿、勃砷铅石中。针对铅锌冶炼场地土壤高浓度 Cd 和 Zn, 制备缓释磷酸盐修复材料。其中 TO-0.1 对 Cd 和 Zn 的稳定化效果最佳, 其浸出含量在 30 天后分别下降 96.4%和 93.9%, 弱酸提取态的 Cd 和 Zn 转化为更稳定的赋存形态。同时, 浸出含量和形态结果表明缓释磷酸盐材料的添加几乎没有活化土壤中 As。酸雨淋溶和自然老化的结果表明, 缓释磷酸盐材料对土壤中 Cd 和 Zn 的稳定具有长效性。

关键词: 冶炼场地; 重金属; 空间分布; 缓释磷酸盐; 稳定化

作者简介: 李楚璇, 中南大学冶金与环境学院博士生, 研究方向为有色金属冶炼场地修复。

E-mail: chuxuan@csu.edu.cn

生物炭与磷肥配施对镉污染土壤中小白菜生长的影响

Effect of biochar combined with phosphorus fertilizer on the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil

彭欣蕾, 胡红青*

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要: 根据《全国土壤污染状况调查公报》显示, Cd 是我国耕地的主要污染物之一, 对生态环境的影响最为严重。生物炭与磷肥被广泛应用于土壤 Cd 污染的修复过程中, 但土壤中化学成分复杂, 单一钝化材料在实际运用中存在局限性, 农田重金属修复需要综合考虑经济效益与修复效率。本研究选取两种钝化剂(玉米秸秆生物炭与过磷酸钙)施入 Cd 污染土壤中, 其中生物炭施用量为 0、5、10 mg/kg, 磷肥施用量为 0、0.1、0.2、0.5、1.0 mg/kg。通过盆栽试验, 在玉米秸秆生物炭与过磷酸钙钝化后的 Cd 污染土壤上种植小白菜, 测定小白菜中 Cd 含量、生物量和种植后土壤中 Cd 形态等, 探究钝化剂对于小白菜生长和吸收 Cd 能力的影响, 为农田 Cd 污染土壤修复提供理论依据。结果表明, 生物炭促进土壤中可交换态 Cd 转化为残渣态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态, 磷肥促进土壤中可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态 Cd 转化为残渣态。添加生物炭和磷肥可显著降低植物中镉的含量, 并抑制镉从小白菜地下部向地上部的转运。与单独施用磷肥和生物炭的处理相比, 配施处理显著降低小白菜对镉的吸收。在施用 5mg/kg 生物炭与 1.0mg/kg 磷肥的情况下, 小白菜地上部 Cd 含量下降 40.48%, 生物量也显著增加。因此, 考虑到重金属修复的效果与经济效益, 在供试 Cd 含量为 3.61mg/kg 的污染土壤中, 建议采用生物炭和高磷肥配施的方法对镉污染土壤进行修复。

关键词: 镉; 生物炭; 磷肥; 小白菜

作者简介: 彭欣蕾, 博士研究生。*胡红青, 教授。

E-mail: pxl@webmail.hzau.edu.cn

E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn。

蚯蚓有机污染物敏感性与土壤污染物降解的定量关系

Quantitative relationship between earthworms' sensitivity to organic pollutants and the contaminants' degradation in soil

钱旻, 晁会珍, 孙明明, 叶茂*

中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 利用蚯蚓去除土壤有机污染物是一种常见的生物修复方法。蚯蚓以其特殊的食性和生理特征成为了土壤生态系统中的重要角色, 能够通过摄食和消化有机污染物, 促进其降解和转化为无害物质。然而, 基于蚯蚓毒理学和污染物降解速率评估和预测其对去除土壤有机污染物的影响仍然具有挑战性。本研究选择了 1974-2020 年期间关于生态毒理学和生物修复的同行评审期刊文章进行 meta 分析, 以量化蚯蚓对有机污染物降解的影响大小。meta 分析表明, 蚯蚓对有机污染物降解的平均影响量为 128.5% ($p < 0.05$)。进一步的分析表明, 土壤有机质或粘土含量较高的土壤更有利于蚯蚓介导的有机污染物去除。此外, 结构方程模型的结果显示, 与环境因素相比, 蚯蚓对污染物暴露的敏感性可能是污染物降解的更大限制因素。这意味着, 在蚯蚓存在的情况下, 污染物的生物降解能力可能受到蚯蚓的响应和适应能力的限制。另外, 研究还发现蚯蚓的 LC50 (半数致死浓度) 与有机污染物的降解存在定量关系。LC50 阈值的升高会导致有机污染物降解量至少增加 1.5 倍。这种相关性通过 meta 分析的结果和验证试验得到了双重证实。这意味着蚯蚓的毒理学状况对其对污染物降解的能力有着重要的影响。这项研究的结果为更深入地了解利用蚯蚓减轻土壤有机污染的潜力提供重要参考, 为蚯蚓在生物修复中的应用提供了科学依据, 为全球范围内开发基于蚯蚓的土壤修复技术提供了支撑。

关键词: meta 分析; 蚯蚓; 有机污染物; 毒理学; 生物修复剂

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

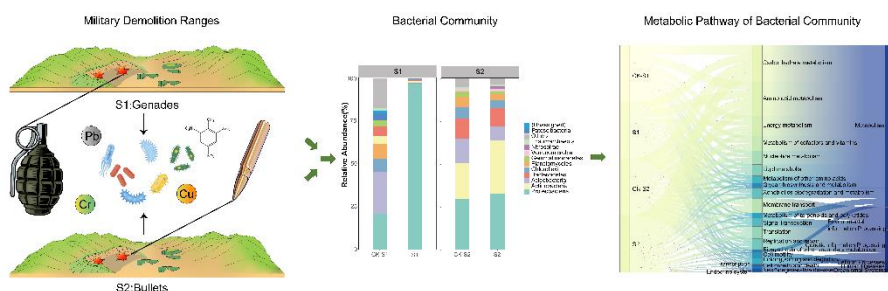
中国军事污染土壤细菌群落特征及代谢潜能

The Characteristics and Metabolic Potentials of the Soil Bacterial Community in a Typical Military Demolition Range

姚柯渝¹, 王风贺², 叶茂^{1,*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 南京师范大学, 南京 210023

摘要: 研究军事污染场地土壤微生物群落响应机制对于表征弹药的生物毒性具有指示作用。本研究采集了中国 2 处典型靶场榴弹炮 (DH 场地) 和冲锋枪弹药(HM 场地)污染土壤, 采用了高通量测序技术揭示了: 受榴弹炮弹药袭击后, DH 中优势菌门为 Proteobacteria (97.29%)、Actinobacteria (1.05%), HM 中优势菌门为 Proteobacteria (32.95%), 其次为 Actinobacteria (31.17%)。受污染后土壤菌群多样性指数显著下降, 菌群互作更加紧密, 榴弹炮场地比冲锋枪场地土著菌受到的影响更大。环境因子分析表明, 细菌组成受重金属和有机物影响, 主要包括 Cu、Pb、Cr、TNT。在细菌群落中检测到约 269 条在 Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes(KEGG)数据库中注释的代谢途径, 包括营养代谢(C, 4.09%; N, 1.14%; S, 0.82%)、外源污染物代谢(2.52%)和重金属解毒 (2.12%)。弹药投放改变了土著菌群的基础代谢; 重金属胁迫抑制了群落对 TNT 的降解能力; 污染程度与群落结构共同影响了受污染场地的重金属解毒策略, 在 DH 场地中主要通过膜转运蛋白将重金属离子外排, 而 HM 场地则通过脂类代谢、次生代谢物生物合成。本研究结果可以为受重金属和有机物复合污染的军事场地细菌群落的响应机制提供了新的认知, 并为土著菌群消纳降解土壤中军事弹药化学药剂污染物提供了科学参考。



关键词: 军事场地; 细菌; 互作; 代谢; 重金属抗性基因

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

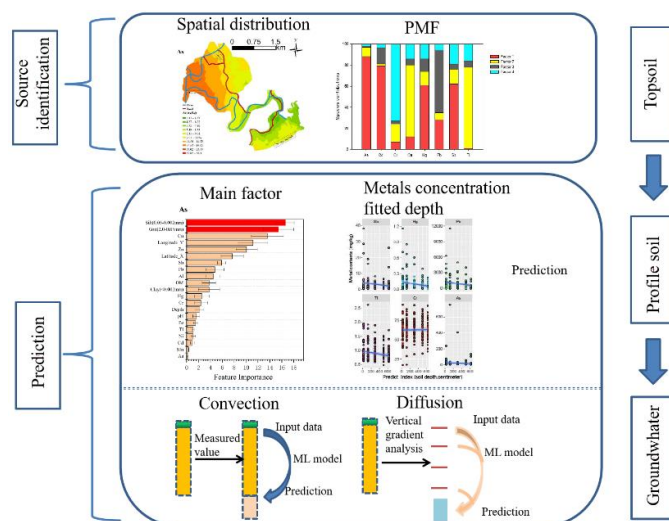
某废弃铅锌矿土壤和地下水中金属的来源识别及迁移规趋

Source identification and migration fate of metal(loid)s in soil and groundwater from an abandoned Pb/Zn mine

黄驰岳, 郭朝晖*, 李天爽, 徐锐, 彭驰

中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083

摘要: 了解有毒金属的空间分布、来源识别和迁移规趋对于管理废弃铅锌矿土壤中金属的潜在风险至关重要。本研究全面分析了矿山土壤和地下水中金属的异质性特征、污染源和迁移规趋。结果表明:废弃矿区土壤污染以 As 和 Pb 为主, 采冶区地下水污染以 Pb 为主;土壤中 As 和 Pb 的浓度最高分别达到 37.5 mg/kg 和 289 mg/kg, 显著超过当地 As 和 Pb 的背景值 13.6 mg/kg 和 29 mg/kg。As、Cd、Hg 和 Sb 的土壤污染主要来源于历史冶炼活动(31.4%), Pb 和 Mn 主要来源于成矿带(21.5%)。机器学习预测表明, As 在土壤中的迁移可以延伸到 6 米或更多, 主要受沙砾和淤泥存在的影响。土壤 As 和 Cd 作为地下水污染的重要来源, 均可通过对流或扩散过程渗入地下水。综上所述, 必须解决异质性金属矿石在废弃矿区土壤中的长期释放问题, 因为这会严重恶化土壤和地下水的品质。



关键词: 废弃铅锌矿; 重金属; 源识别; 土壤-地下水系统; 迁移规趋

作者简介: 黄驰岳, 中南大学冶金与环境学院在读博士, 主要研究方向为土壤重金属。

郭朝晖, 中南大学冶金与环境学院教授, 主要领域为土壤学、矿山固废等。

E-mail: zhguo@csu.edu.cn

内生细菌对蓖麻生长及富集土壤铜镉的影响

李倩, 胡红青*

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要: 蓖麻 (*Ricinus communis* L.) 是一种重要的油料作物, 对多种重金属均表现出一定的耐性及良好的富集能力。利用蓖麻对土壤肥力要求较低、生物量大、根系发达且经济价值高等优点, 将其应用于重金属污染农田土壤的修复具有很好的应用前景, 但蓖麻对土壤重金属提取效率及向地上部转运重金属能力仍有限。内生细菌强化植物修复是提高植物修复效率的一种有效手段, 因此本研究拟通过内生细菌来强化蓖麻修复重金属污染土壤。本研究选取了 8 株自蓖麻体内分离得到的具有不同促生特性且对重金属铜镉具有一定耐受性的内生细菌, 探究了其对于碱式碳酸铜 ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) 的活化能力, 结果表明菌株 TR8、TR18、TR21、YL1、YS3 和 YS5 均可很好的活化溶液中的 $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$, 其中 TR8、TR21、YL1、YS3 和 YS5 可使上清液中 Cu^{2+} 浓度分别达 84.3 mg/L、84.1 mg/L、100.4 mg/L、108.2 mg/L 和 98.9 mg/L。然后通过土壤培养实验及盆栽试验探究了其对于土壤重金属活性及蓖麻生长和富集土壤重金属铜镉的影响。土壤培养实验表明各内生细菌的接种有利于难溶态重金属向相对不稳定的重金属形态转换, 而且可增加土壤中有效磷的含量(10.8%-29.2%)。盆栽试验结果表明, TR16、TR18、TR21、YS3 和 YS5 处理显著提高了蓖麻的生物量 (20.0%-39.9%)。除 YL1 与 TR4 处理外, 其他接菌处理均可不同程度地提高蓖麻不同组织中 Cu、Cd 的含量及总 Cu、Cd 累积量, 总累积量分别提高了 15.8%-71.8%和 20.8%-85.4%, 其中 TR16、TR18 和 TR21 处理提升效果最好。内生细菌的接种促进了植株对 P、Fe 和 Mg 的吸收。因此, 菌株 TR16、TR18、TR21、YS3 和 YS5 通过提高蓖麻生物量和各组织中重金属含量进而有效提高植物重金属修复效率, 可用于强化蓖麻修复重金属污染土壤。

关键词: 蓖麻; 重金属污染土壤; 铜和镉; 植物修复; 内生细菌强化

作者简介: 李倩, 博士研究生。

胡红青, 博士, 教授。

E-mail: liqian0601@mail.hzau.edu.cn

E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

顾及样点微域空间变异性的多穴位黑土层厚度快速勘察与预测方法研究

Rapid Survey and Prediction Method for Thickness of Black Soil Layer through Multiple Cavities Considering Microdomain Spatial Variability of Sample Sites

高张^{1,2}, 马利霞¹, 于东升^{1,2}, 胡文友^{1,2}, 李德成^{1,2}, 高磊^{1,2}, 刘峰^{1,2}, 张久明³, 姜军^{1,2}, 匡恩俊³, 王鑫^{1,2}, 宋洁^{1,2}, 王桐^{1,2}, 王昌昆^{1,2}, 迟凤琴³, 赵玉国^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 黑龙江省黑土保护利用研究院, 哈尔滨 150086

摘要:【目的】黑土层厚度作为土壤质量的重要标志, 在土壤可持续发展、粮食安全和生态功能中发挥着不可替代作用。然而, 基于土壤剖面调查数据分析, 往往样本数量少、区域范围小, 多数仅依据点位数据统计, 缺乏空间变异预测分析, 迫切需要黑土层厚度快速调查与高性能空间预测方法。【方法】本文通过新建调查样点黑土层厚度多穴位“浅层挖掘+深层土钻”快速获取方法, 在黑龙江省获取 326 个样点的黑土层厚度系列样本数据; 通过对随机森林预测模型参数优化, 预测黑土层厚度空间变异及其不确定性; 分析不同穴位观测值及其均值样本对优化模型预测精度及稳定性影响, 评价模型空间预测潜能。【结果】研究区耕地预测平均黑土层厚度为 54.42 cm, 新建黑土层厚度快速获取与预测方法行之有效。优化随机森林模型预测黑土层厚度的空间变化解释力 R^2 达到 62%, 可精细刻画黑土层厚度空间分异; 样点单个观测穴位的随机性可改变模型预测协变量重要性数值, 甚至影响黑土层厚度空间预测分布格局; 相较于样点多穴位观测均值的空间预测, 单穴位观测值预测的空间分布不确定性评估准确性较低, 预测精度显著下降; 交叉验证指标和散点图分析表明, 优化随机森林模型对黑土层厚度具有稳定的空间预测潜能。【结论】本研究为黑土层厚度高精度快速调查与预测提供了新经验、新途径。

关键词: 黑土层厚度; 多穴位勘察; 随机森林模型; 不确定性

作者简介: 高张, 中国科学院南京土壤研究所, 博士研究生, 主要从事资源环境与遥感研究。

E-mail: gaozhang@issas.ac.cn

冶炼场地土壤-地下水重金属污染特征及可视化研究

Multi-technological integration in a smelting site: Visualizing pollution characteristics and migration pattern

唐璐

中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083

摘要:随着城市化进程加快和产业结构调整政策的实施,城市及周边地区遗留大量冶炼场地,土壤与地下水重金属污染严重。土壤-地下水系统作为复杂的“黑箱”体系,具有多相、多介质和多过程等特征,极大地增加了污染物质分布及迁移的研究难度。明确污染场地土壤-地下水系统中的关键污染物及其污染特征对后续修复工作的开展至关重要。研究以某铅锌冶炼场地为调查对象,结合统计方法、GIS插值和地质模型等手段,分析地下水水化学特征与重金属的空间分布。通过土壤质地及地层岩性分析,将研究区划分为杂填土层、素填土层、粉质粘土层、砾石层4类土壤层次。含水层位于粉质粘土和砾石层中,主要接受侧向径流补给,流向为东北向西南。地下水水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$,且样品中Cd、Zn、Pb、As、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 超标率(地下水V类水标准GB/T 14848-2017)达到79%、71%、57%、89%、100%、78.6%。在长期降雨淋溶过程中,地下水Cd、Zn、Pb、As浓度均较高,废渣堆存区的地下水污染风险随降雨增强而升高。通过钻孔技术与高密度电阻率成像技术联用,模拟关键污染物在土壤-地下水系统中的空间分布,整合水文地质结果和污染数据,将地下看不见的污染特征可视化。土壤中Pb、Zn、As、Cd污染较为分散,且集中于主要生产区域,其中Zn、As污染比较严重,污染深度超过了7.0 m。地下水污染分布与土壤污染、地下水流向具有一致性。这项研究建立了土壤污染和地下水污染羽之间的联系,强调了三维可视化技术在污染场地的实际应用,有助于揭示有色冶炼场地的水文地质特征和污染物运移的阻控机制,为开展污染场地土壤-地下水协同修复提供科学依据。

关键词: 污染场地; 重金属; 土壤-地下水

作者简介: 唐璐,中南大学冶金与环境学院2021级博士生,研究方向为有色冶炼场地土壤-地下水重金属污染阻控。

E-mail: tangluu@csu.edu.cn

蚯蚓堆肥中噬菌体丰富功能基因含量并促进土壤中农药的降解

Phages in vermicomposts enrich functional gene content and facilitate
pesticide degradation in soil

晁会珍¹, Jose Luis Balcazar^{2,3}, 吴云玲¹, 蔡安娟⁴, 叶茂⁵, 孙明明^{1*}, 胡锋¹

1 南京农业大学, 资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095; 2 西班牙, 加泰罗尼亚水研究所; 3 西班牙, 赫罗纳大学; 4 江苏省环境工程技术有限公司; 5 中国科学院南京土壤研究所, 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008

摘要: 有机肥微生物群在改善土壤结构、作物产量和污染物耗散等方面发挥着重要的生态功能。然而, 关于噬菌体和噬菌体编码的辅助代谢基因(AMGs)在有机肥中的生态功能的信息有限。本文采用宏基因组学和噬菌体移植试验相结合的方法, 研究了不同来源有机肥中噬菌体的特征及其在农药降解中的潜在作用。噬菌体注释结果表明, 由猪(PV)和牛(CV)粪制成的两种蚯蚓堆肥的噬菌体群落结构比猪粪(P)和牛粪(C)更相似。蚯蚓堆肥后, 相对于不堆肥的两种有机肥(P 和 C), PV 和 CV 表现出丰富的噬菌体-宿主配对和噬菌体 AMG 多样性。此外, 蚯蚓堆肥中的宽宿主噬菌体数量(182)高于猪粪(153)和牛粪(103)。值得注意的是, 在四种有机肥中均检测到与代谢和农药生物降解相关的噬菌体 AMGs。噬菌体移植试验表明, 与猪粪和牛粪相比, 蚯蚓堆肥噬菌体对土壤中农药前体对硝基苯(P - ncb)的降解效果最好($p < 0.05$)。综上所述, 我们的研究结果强调了蚯蚓堆肥中噬菌体对污染土壤中农药相关化学物质的生物地球化学循环和生物降解的重要性。

关键词: 噬菌体、蚯蚓堆肥、辅助代谢基因、农药降解、噬菌体群落移植

作者简介: 吴云玲, 南京农业大学资源与环境科学学院生态学专业硕士生, 主要从事土壤生态学研究。

E-mail: 2021103016@stu.njau.edu.cn

土壤中弱酸可溶态重金属溶出伏安快速检测关键技术与装备研究

Rapid detection technology and equipment of weak acid soluble heavy metals in soils
based on stripping voltammetry

叶文帅, 刘宁, 刘刚

中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083

摘要: 土壤中重金属存在多种形态, 其中弱酸可溶态重金属具有较高的生物可获取性, 容易被农作物吸收, 降低粮食产量和品质, 危害国家粮食安全, 还会通过食物链进入人体, 危害人类健康。溶出伏安法检测具有检测速度快, 灵敏度高, 重复性好, 可以用于土壤中弱酸可溶态重金属含量的快速检测。但溶出伏安检测土壤重金属时仍存在问题, 土壤中重金属为痕量, 可溶性有机物(腐殖质)和非目标重金属离子会干扰目标离子的溶出信号, 而且目前的土壤样本前处理步骤复杂耗时等。针对上述问题, 本研究以铅和镉为研究目标离子, 分别展开了传感器制备研究、腐殖质干扰机理分析及其抑制方法研究、重金属离子交互干扰机理及其抑制方法研究和土壤重金属一体式自动化检测装备研发。制备了铋纳米粒子/Nafion修饰的激光诱导石墨烯(BiNP@LIG-Nafion)电极, 实现土壤弱酸浸提液中重金属铅(检测限 0.8 $\mu\text{g/L}$, 线性范围: 1~60 $\mu\text{g/L}$)和镉(检测限 0.5 $\mu\text{g/L}$, 线性范围: 1~60 $\mu\text{g/L}$)的高灵敏检测; 提出了基于紫外光解打破腐殖质-重金属络合作用释放重金属离子的干扰抑制方法, 恢复铅和镉的溶出伏安信号; 搭建基于机器学习技术的重金属离子间交互干扰高效抑制模型, 改善了溶出伏安法电化学检测的抗干扰性能; 开发出一套智能手机控制的集样本前处理与溶出伏安分析于一体的土壤弱酸可溶态铅和镉自动化检测装备, 实现了土壤重金属现场精确快速检测。研究成果可为农业生产管理者快速、准确地评估土壤重金属污染程度提供强有力的技术支撑。

关键词: 土壤重金属; 腐殖质干扰; 光催化; 交互干扰; 机器学习; 检测装备

作者简介: 叶文帅, 中国农业大学信息与电气工程学院, 博士研究生, 研究方向为农业关键信息技术。

刘宁, 中国农业大学信息与电气工程学院, 博士研究生, 研究方向为电化学分析与光谱分析。

刘刚, 中国农业大学信息与电气工程学院, 教授, 研究方向为电子信息技术农业应用。

E-mail: yewenshuai@cau.edu.cn。

E-mail: ningliu@cau.edu.cn。

E-mail: pac@cau.edu.cn。。

不同南瓜品种对六氟环氧丙烷二聚体累积特性研究

Accumulation characteristics of hexafluoropropylene oxide dimer in different pumpkin varieties (*Cucurbita moschata*, Duch.)

徐凯然, 林庆祺*, 仇荣亮

华南农业大学, 广州 510641

摘要: 六氟环氧丙烷二聚体(Hexafluoropropylene oxide dimer acid, HFPO-DA)作为全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid, PFOA)的替代物, 在传统全氟及多氟化合物(Per- and polyfluoroalkyl substances, PFASs)被逐渐限制使用的背景下, 其使用量逐渐上升, 并不可避免的释放到环境中, 已在包括农田-作物系统的多种环境介质中普遍检出。课题组此前的研究显示, 作物可从土壤中吸收 HFPO-DA 并将其转移到地上部及可食用部分。而且由于 HFPO-DA 在土壤中难以被微生物自然降解, 导致其在农田作物系统中的污染较难修复, 从而增加了人们通过摄食农产品所造成的暴露风险。葫芦科作物南瓜对多种有机污染物具有较高的累积能力, 考虑到 HFPO-DA 分子量和疏水性较小, 有利于植物向地上部转运。因此本研究通过对不同的南瓜品种的筛选实验, 揭示 HFPO-DA 在不同品种南瓜中的分布累积特征, 并获得 HFPO-DA 的高、低累积型南瓜品种; 在此基础上围绕转运关键过程及调控因素阐明高、低累积型品种的差异形成机制, 为农业生产安全提供科学依据。

关键词: 六氟环氧丙烷二聚体; 南瓜; 累积分布

作者简介: 徐凯然, 华南农业大学硕士研究生, 研究方向为植物对有机污染物的吸收累积机制。

林庆祺, 华南农业大学资源环境学院副教授, 硕士生导师, 近年来主要从事新型有机污染物的环境行为与转化机制、污染土壤的植物修复机理等研究及应用。

E-mail: xukairan020@qq.com

E-mail: linqingqi@scau.edu.cn

绿色可持续视角下大型复杂污染场地修复环境影响评估与方案决策

Environmental impact assessment and remediation alternative decision-making for large-scale complex contaminated sites from a green and sustainable perspective

肖萌, 李香兰

北京师范大学地理科学学部全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

摘要: 环境影响评估可以实现修复方案对比、决策和优化, 从而推动污染场地绿色可持续发展。当前, LCA 作为普遍的环境影响定量评估方法之一应用广泛, 但其只能对单个产品或过程进行评估, 而无法考虑整个经济系统的影响。因此, 本研究以中国某大型复杂污染场地为例, 利用场地实测数据, 首先采用 LCA 方法对两个修复方案进行精细的环境影响评估和不确定性分析, 并选择更具有环境效益的方案。之后, 基于 IO-LCA 方法, 使用中国本土数据对所选择的方案进行更加广泛的环境影响评估。最终, 基于环境影响评估结果, 从绿色可持续发展的视角下实现大型复杂污染场地的修复方案选择和优化。结果表明, 多种传统修复技术组合而成的方案 1 综合环境影响评分为 6.94 MPt, 优于以填埋为主的方案 2 (7.89 MPt)。尽管 LCA 结果具有较大的不确定性, 方案 1 优于方案 2 的概率达到了 98.1%。对于所选择的方案 1, 从整个经济产业链角度进行核算, 方案 1 将排放温室气体 1.06×10^{10} kg CO₂-eq, 颗粒物 6.06×10^6 kg, 氮氧化物 4.88×10^6 kg, 硫氧化物 3.49×10^6 kg, 化学需氧量 5.06×10^5 kg, 以及氨氮 3.29×10^4 kg, 并主要带动了“电力和热力生产和供应”部门进行污染物排放和能源消耗。方案 1 的进一步优化应关注环境热点环节和类别, 如中、重度污染土壤的修复以及药剂用量和运输距离。整个修复行业的绿色可持续发展则需要关注清洁能源、可再生能源的使用。本研究为大型复杂污染场地修复的精细评估与绿色可持续视角下方案选择和优化提供参考。

关键词: 碳排放; 定量精细评估; 全生命周期; 投入产出; 修复决策

作者简介: 肖萌, 北京师范大学地理科学学部全球变化与地球系统科学研究院, 硕士研究生, 主要从事气候变化与污染场地绿色可持续修复研究。

E-mail: xiaomeng@mail.bnu.edu.cn

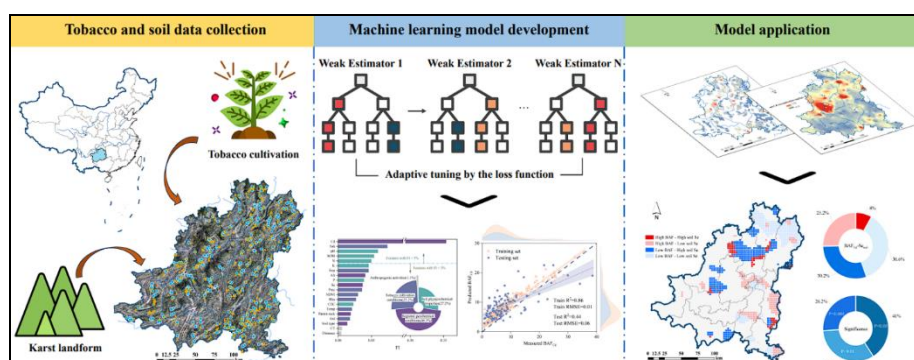
基于机器学习的地质高背景烟草 Cd 生物累积能力预测及驱动因素分析

Machine Learning-based prediction of Cd bioaccumulation capacity and associated analysis of driving factors in tobacco with high geochemical background

苟子论^{1,3}, 齐猛^{1,3}, 赵文浩², 孙怡², 屈雅静², 马瑾^{2,*}, 刘承帅^{1,3*}

1 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081; 2 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 区域差异和环境条件的变化是种植在地球化学高背景区烟草生物积累 Cd 能力存在较大差异的主要原因。然而, 在富 Se 的高背景地区, 影响烟草中 Cd 生物积累能力的因素尚不清楚。本研究基于西南典型喀斯特地区采集的 365 份根际土壤-烟草样品和 321 份表层土壤样品, 使用了目标编码 (Target encoding) 的极致梯度提升树模型 (XGBoost) 对烟草 Cd 的生物积累能力进行精细化预测及关键驱动因素相对贡献量化的同时, 结合基于莫兰指数的局部双变量空间自相关分析 (LISA) 对风险管控区和烟草生态种植区进行识别。结果表明, 土壤 Cd 含量、土壤类型和岩性等区域地球化学特征, 对烟草 Cd 生物积累能力的影响最大, 解释了总变化的 46.5%。其次是土壤理化性质 (如土壤 pH 值, 有机质含量等) 和烟草种植条件 (如日照时间, 年降水量等), 分别解释了总变化的 27.2%和 25.2%。相比之下, 人为活动的影响相对不显著, 仅解释了总变化的 1.1%。此外, 土壤 Se 含量对烟草中 Cd 的生物累积能力积有着不可否认的影响, 本研究基于偏依赖分析, 从数据驱动角度确定了当土壤硒含量为 0.8 mg/kg 时, Cd 和 Se 的相互抑制作用达到阈值。最终, LISA 分析结果表明遵义市中部、东北部和东南部土壤中 Se 含量较高且 Cd 污染风险较低, 适合用作研究区烟草的生态种植。本研究将机器学习与空间分析技术相结合, 为高背景区烟草种植土壤的管理及风险区域的识别提供了科学依据。



关键词：地质高背景；烟草种植土壤；XGBoost；LISA；Cd；Se

作者简介：苟子论，中国科学院地球化学研究所，硕士研究生，主要研究方向为重金属的环境地球化学行为及大数据机器学习在环境领域的应用。

E-mail: gouzilun@126.com

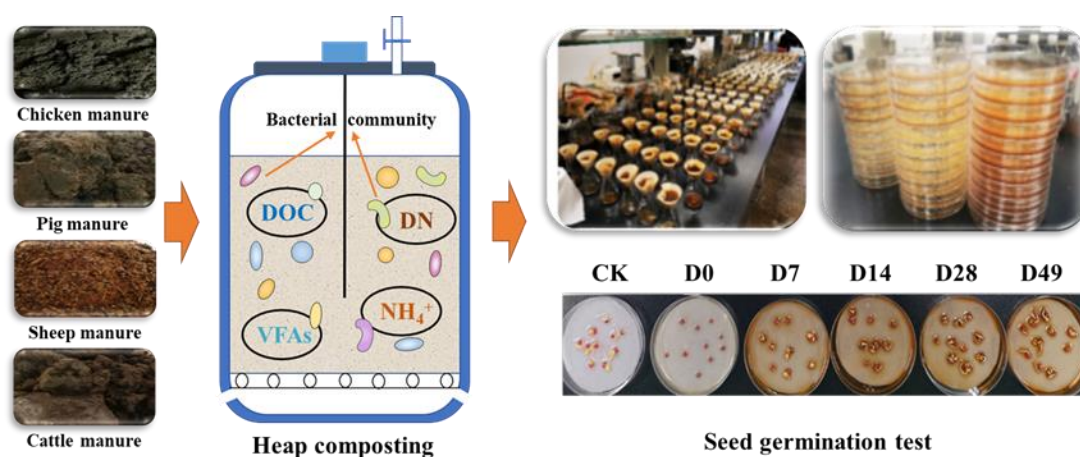
以种子发芽指数为评价指标的畜禽粪便兼性堆肥植物毒性

Phytotoxicity of farm livestock manures in facultative heap composting using the seed germination index as indicator

孔艺霖, 王国英, 李国学, 袁京*

中国农业大学, 北京 100091

摘要: 畜禽粪便兼性堆肥因其成本低、操作简单而在中国得到广泛应用, 即在没有进一步控制和通风的情况下, 将粪便简单堆置, 其中超过 70%的粪便在兼性堆肥后直接返回农田土壤。因此, 分析和评价兼性堆肥的腐熟度和植物毒性至关重要。自 1982 年 Zucconi 首次提出发芽指数 (GI) 以来, 发芽指数已被广泛应用于评估堆肥的腐熟度和植物毒性。许多研究表明, 堆肥中的盐含量、有机酸、金属等都是影响 GI 的植物毒性物质。有机物质在兼性堆肥的生物分解过程伴随着各种微生物种群的动态变化, 其对堆肥过程中水溶性物质的转化至关重要。传统上, 畜禽粪便中植物毒性物质的组成和浓度因动物种类、生活方式和饮食而显著不同, 不同的粪便特性决定了堆肥中的微生物群落和有机物降解率。然而, 目前很少有关于在畜禽粪便兼性堆肥过程中影响 GI 的关键因素的研究, 特别是关于直接影响 GI 的水溶性物质的变化。本研究利用不同植物种子 (黄瓜、萝卜、白菜和油菜) 对四种动物粪便 (鸡粪、猪粪、羊粪和牛粪) 兼性堆肥产生的植物毒性变化进行了评估, 以确定影响种子发芽指数 (GI) 的关键因素。研究结果表明不同畜禽粪便的植物毒性存在显著差异, 不同粪便类型按照植物毒性排序为: 鸡粪 (CM) > 猪粪 (PM) > 羊粪 (SM) > 牛粪 (CaM)。其中, 小分子有机酸 (VFA) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响 GI 的关键因素。在 CM 和 CaM 堆肥中, VFA 对 GI 的影响最大, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则是影响 PM 和 SM 堆肥 GI 的主要因素。网络分析表明, VFA 与厚壁菌门丰度呈负相关, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要与放线菌门、变形菌门和拟杆菌门相关。可溶性有机碳 (DOC) 和可溶性氮 (DN) 的含量和组成, 以及核心和专有微生物群落是影响畜禽粪便兼性堆肥中植物毒性物质演替的主要因素。本研究发现并评估了畜禽粪便兼性堆肥过程影响 GI 和植物毒性的关键途径, 为堆肥腐熟度的精确调控和农田安全利用提供新的视角。



关键词： 畜禽粪便；兼性堆肥；植物毒性；种子发芽指数；水溶性碳氮物质；微生物群落

作者简介： 孔艺霖，中国农业大学，博士生，主要从事堆肥腐熟度评价与还田过程植物毒性效应研究。

E-mail: kongyilin@cau.edu.cn

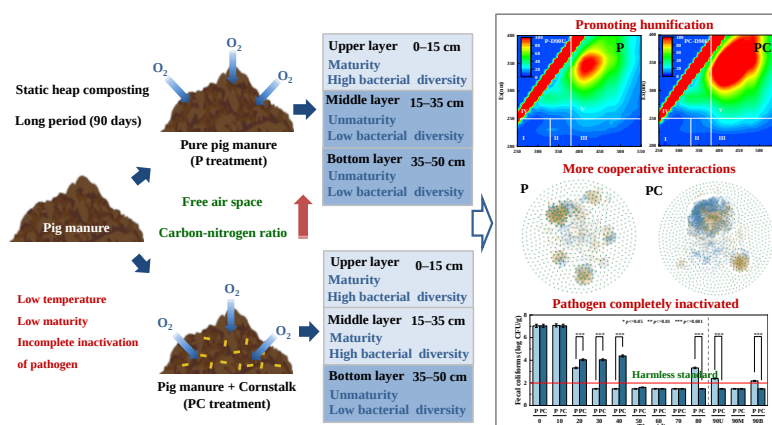
兼性堆肥过程中腐殖化、病原菌和细菌群落的时间演替和空间异质性

Temporal succession and spatial heterogeneity of humification, pathogens and bacterial community in facultative heap composting

杨燕, 孔艺霖, 李国学, 袁京*

中国农业大学, 北京 100091

摘要: 我国 70%以上的畜禽粪便（典型为猪粪和羊粪）因其易操作、投资要求低而采用兼性堆肥进行资源化利用，特别是在土地面积充足、经济相对落后的地区。由于空气扩散限制，静态兼性堆肥堆体氧气含量随深度逐渐降低。由于氧气分布不均，堆肥上层为好氧层，中层为兼性厌氧层，底层为厌氧层。目前没有关于兼性堆肥的系统研究，很少有研究关注兼性堆肥中涉及的无害化、腐殖化和细菌动态。因此，本研究对兼性堆肥过程中腐殖化、病原菌和细菌群落的时间演替和空间异质性进行了研究。本研究在不通风、不翻堆的条件下，将猪粪单独或与玉米秸秆混合堆肥 90 天。由于兼性堆肥过程中空气扩散的差异，不同堆肥层表现出腐熟度和细菌群落的差异。从堆体的上层到下层，两个处理的腐熟度从 80.60%下降到 0%，Shannon 指数从 4.09 下降到 2.08。秸秆调控显著提高了堆肥腐熟度和腐殖化程度，显著改善了细菌多样性和协同作用，并通过增强孔隙度和氧气扩散加速了厌氧菌向好氧菌的转化。添加玉米秸秆会减缓病原菌灭活速度，但灭活效果更彻底。结构方程模型揭示了氧气含量、温度和细菌群落主要影响病原菌灭活，而影响腐殖化的关键影响因素是溶解性有机碳和细菌群落。本研究结果对静态兼性堆肥有机肥的农田安全利用具有重要意义。



关键词: 兼性堆肥; 细菌演替; 空间异质性; 病原菌; 腐殖化

作者简介: 杨燕, 中国农业大学, 博士生, 固体废弃物资源化利用。

E-mail: yy@cau.edu.cn

铬污染土壤中病毒功能装配随机性促进宿主功能冗余且走向确定性

刘舒月¹, 时玉², 孙明明³, 黄丹¹, 叶茂^{1*}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 河南大学生命科学学院, 开封 475004; 3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210008

摘要: 污染土壤中, 微生物群落装配以确定性过程筛选并富集降解菌, 随机性过程促进群落功能冗余两种手段克服群落扰动, 进而协助生态系统恢复与重建。然而, 在土壤污染条件下, 病毒与宿主细菌群落的装配机制尚未见报道。本研究在中国西北部以及中国西南部两个典型铬渣污染场地采集铬污染土壤(有效铬浓度为0.11-465.4 mg/kg)。使用宏基因组及宏病毒组测序技术探究铬污染土壤中土著细菌及噬菌体群落装配特征。发现: 1) 随土壤铬浓度增加, 土著细菌分类水平alpha多样性下降 ($p < 0.05$), 但细菌基因alpha多样性变化则相对稳定 ($p > 0.05$), 且土著细菌物种与功能的丰度组成变化出现解耦现象, 以上发现意味着细菌存在功能冗余; 2) 土著细菌及病毒类群装配均由确定性过程主导。随铬污染浓度升高, 土著细菌功能装配由随机性过程转为确定性过程(NST值由0.52下降至0.19), 但病毒功能装配则呈现相反趋势(NST值由0.34上升至0.83), 由此暗示细菌与病毒不同的抗逆策略; 3) 噬菌体-宿主相互关系结果显示, 细菌与病毒生态位宽度联系紧密且均呈下降趋势。基于CRISPR间隔序列以及tRNA匹配方法进行宿主预测, 发现变形菌门及放线菌门为噬菌体主要宿主, 且多价噬菌体比例随铬浓度升高而增加。迁移率结果表明, 噬菌体较细菌而言较少受到扩散限制的影响, 且噬菌体功能装配NST值与宿主Simpson指数呈显著正相关 ($p < 0.05$)。说明在逆境条件下病毒功能装配的随机性有助于宿主实现功能冗余并向确定性方向演化, 进而协助宿主抵御土壤中铬的逆境毒害。本研究从病毒与宿主细菌群落交互作用的角度, 阐释了铬污染土壤中病毒与宿主细菌的装配机制, 可以为深入理解和调控铬污染土壤中病毒与宿主细菌群落之间的相互关系, 制定病毒-宿主偶联的微生物修复策略提供科学依据。

关键词: 群落装配; 功能装配; 病毒与宿主细菌交互作用; 铬污染土壤

作者简介: 叶茂, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会成员/南京土壤所小组组长。研究方向: 污染场地土壤智慧生物修复理论、技术与工程装备。

E-mail: yemao@issas.ac.cn

含能化合物污染土壤的植物-微生物修复技术研究

杨旭, 赵三平, 习海玲

国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 1022052

摘要: 本研究针对含能化合物污染土壤修复的需求, 利用微生物原位修复快速和耐受浓度较高、植物修复成本低、二次污染少、美化环境等优势, 紧紧围绕炸药 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)、环三亚甲基三硝胺(RDX)和环四亚甲基四硝胺(HMX)等含能化合物污染土壤生物修复的关键技术问题, 开展了微生物和植物筛选、菌种复配、植物-微生物联合修复体系构建及调控关键技术研发, 探索了土壤含能化合物污染微生物、植物及植物-微生物联合修复机理。研究结果如下: 炸药污染降低了土壤微生物群落结构的多样性和丰富性。其中, Sphingomonadaceae、Actinobacteria 和 Gammaproteobacteria 微生物类群相对丰度显著增加, 具有降解炸药的微生物种群开始占据土壤生态位。土壤差异代谢物主要为 Lipids and lipid-like molecules 和 Organic acids and derivatives。筛选出炸药高效降解菌株 *Klebsiella variicola*、*Klebsiella sp.*以及 *Bacillus aryabhatta*。筛选出适合 TNT、RDX 以及 HMX 污染土壤修复的候选植物, 包括: 香根草 (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash)、紫羊茅 (*Festuca rubra* L.)、红三叶 (*Trifolium pratense* L.)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、紫花苜蓿 (*Medicago*)。毒理机制显示 TNT、RDX 以及 HMX 暴露导致植物光合特性和抗氧化酶系统失衡, 同时改变了植物基础代谢水平。香根草、紫羊茅、红三叶、黑麦草以及紫花苜蓿辅以微生物菌剂对土壤中初始浓度为 100 mg·kg⁻¹ 的炸药 60 天降解率超过 80%。上述结果表明, 炸药污染土壤植物-微生物共生修复效果显示出具有较高的技术应用潜力和前景。

关键词: TNT; RDX; HMX; 含能化合物污染; 生物修复

作者简介: 杨旭, 2022 级博士研究生, 研究方向为污染场地表征、风险评估与治理修复。

E-mail: 1367133755@qq.com

微生物胶囊负载纳米羟基磷灰石强化去除 Cr(VI)的机制研究

Exploring the Mechanism of Enhanced Cr(VI) Removal by *Lysinibacillus cavernae* Microcapsules Loaded with Synthetic Nano-Hydroxyapatite

单冰, 郝瑞霞*

北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

摘要: 铬(Cr)是一种天然存在于地壳中的元素, 其中 Cr(VI)和 Cr(III)是环境中最常见和最稳定的价态。自工业革命以来, 铬化合物被广泛用于电镀、有色金属采选和冶炼等多个工业领域。Cr(VI)具有溶解度大、毒性强等特点, 很容易被生物吸收并累积, 具有致癌、致畸和致突变作用, 对生态系统和人类健康造成严重威胁。因此, 开发一种高效环保的 Cr(VI)去除技术迫在眉睫。生物固定化方法相较于传统的修复方法而言具有稳定性好、处理效率高、二次污染低等诸多优点, 具有更为广阔的发展前景。本研究以废弃蛋壳为原料, 成功合成了纳米级羟基磷灰石粉末, 并与溶穴赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus cavernae* CR-2)复合制备成矿物-微生物胶囊, 促进了 Cr(VI)的还原和 Cr(III) 的吸附, 最大程度地固定环境中的铬离子。当羟基磷灰石添加量为 10 g/L、胶囊投加量为 2 bead/mL 时, 矿物-微生物胶囊对六价铬的去除率最高, Cr(VI)去除率高达 90%以上, 总铬去除率达 70%以上。此外, 矿物-微生物胶囊在与铬离子反应后仍保持了较高的生物活性。利用 SEM、TEM、XPS 和 XRD 进行表征, 发现矿物-微生物胶囊去除 Cr(VI)的机制主要涉及生物还原和羟基磷灰石的吸附作用。其中羟基磷灰石对铬离子的吸附主要是通过静电作用和表面络合作用实现的, 同时还伴随着 Cr(III)和 Ca(II)之间的离子交换过程。基于实验结果, 提出了矿物-微生物胶囊去除 Cr(VI)的机制: (1) 矿物-微生物胶囊表面的大量官能团(如-COOH、-OH、-P=O 等)可以充当吸附位点, 直接吸附 Cr(VI); (2) *Lysinibacillus cavernae* CR-2 会分泌大量还原性有机酸和还原酶, 将高毒性的 Cr(VI)转化为低毒性的 Cr(III); (3) 矿物-微生物胶囊对还原的 Cr(III)进行吸附和固定。综上所述, 本研究所制备的新型矿物-微生物胶囊成本低廉、制作工艺简单, 能高效去除水相中的铬离子, 在铬污染废水的处理方面具有巨大的应用潜力。

关键词: 矿物-微生物胶囊; 羟基磷灰石; 铬去除; 生物还原

作者简介: 单冰, 博士研究生, 研究方向: 微生物地球化学。

郝瑞霞, 副教授, 研究方向: 微生物地球化学。

E-mail: shanbing@stu.pku.edu.cn

E-mail: rxhao@pku.edu.cn

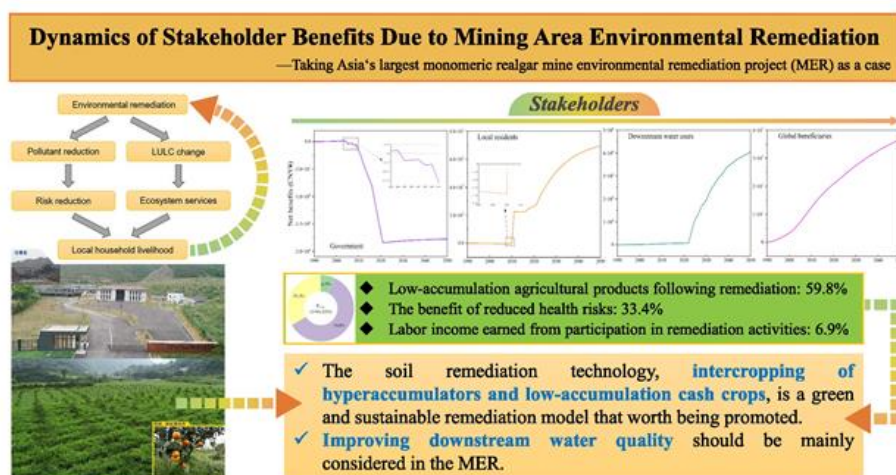
基于风险降低和生态系统服务的矿区环境治理中利益相关方的收益动态变化

Dynamics of multiple stakeholders' benefits due to mining area environmental remediation based on risk reduction and ecosystem services

杨军^{1,2}, 闫云仙^{1,2}, 杨俊兴^{1,2}, 王凌青^{1,2}, 万小铭^{1,2}, 雷梅^{1,2}, 郑华^{2,3}, 廖晓勇^{1,2*}, 陈同斌^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 环境修复中心, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049; 3 中国科学院生态环境研究中心, 城市 and 区域生态学国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 涉重金属矿区环境治理可以通过污染风险控制和改善生态系统服务来改善人类福祉。然而, 对于项目涉及的多个利益相关方的成本和收益很少被分析。以亚洲最大的单体雄黄矿环境修复项目为例, 我们首次就环境风险、健康风险和生态系统服务为多个利益相关方进行了为期 60 年的动态成本效益分析。结果显示, 通过改善环境和生态系统, 预计在项目结束后 5 年开始回收, 到 2050 年效益成本比为 2.71。当地居民作为直接受益者, 获得了 13.2% 的收益, 这些收益来自于参与农业土壤修复项目 (66.6%) 和减少健康风险 (33.4%)。政府作为投资者, 获得了 3.3% 的收益, 到 2050 年仍有 91% 的修复投资未收回。下游水用户是主要受益者, 获得了总收益的 76.5%, 主要来自于受砷污染的水净化的收益 (97.9%)。下游受益人对改善用水的补偿也许可用于分担矿区环境治理的执行负担。需要指出的是, 在 MER 的农业土壤中, 超积累体和低积累体作物的间作修复, 在修复期间和修复后分别提供了就业和可持续农业收入。这种绿色和可持续的修复模式既改善了环境, 也改善了居民的生活, 值得向全球近百万个矿区推荐。



关键词：矿区治理；环境修复；可持续性；利益相关方；生态系统服务

作者简介：杨军，中国科学院地理科学与资源研究所，副研究员，从事土壤修复规划、土壤环境质量评估及修复。

闫云仙，中国科学院地理科学与资源研究所，在读博士生，研究领域：土壤修复。

E-mail: yangj@igsnrr.ac.cn

E-mail: yanyx.18s@igsnrr.ac.cn

热传导加热耦合原位化学氧化修复有机污染场地的可持续定量评估

Thermal conductive heating coupled with in situ chemical oxidation for soil and groundwater remediation: A quantitative assessment for sustainability

杨宗帅, 魏昌龙, 宋昕

中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 热传导加热 (Thermal conductive heating, TCH) 广泛应用于修复挥发或半挥发性有机污染场地, 然而由于其高能耗、高花费和高碳排而被认为是不可持续的修复方式。近些年来, 热传导加热耦合原位化学氧化 (TCH coupled with in situ chemical oxidation, TCH-ISCO) 修复技术因其能在短时间内达到修复有机污染土壤和地下水的目的, 并且与单一 TCH 相比需要加热的目标温度大幅降低而受到广泛关注。然而, 目前针对 TCH-ISCO 的研究多基于实验室尺度, 缺少实际场地尺度的应用及基于场地尺度的绿色可持续性定量评估。因此, 本研究首先建立了生命周期评价耦合最佳管理措施 (Life cycle assessment coupled with best management practices, LCA-BMPs) 可持续定量评估模型, 然后基于实际 TCH-ISCO 修复某氯代烃污染场地全过程能耗物耗数据, 采用 LCA-BMPs 模型首次定量评估了 TCH-ISCO 的环境、经济和社会可持续性。结果表明: 在相同的修复情景下, TCH-ISCO 和 TCH 修复过程中加热电耗对环境影响的占比分别为 68%和 93%, 是环境影响的主要来源; TCH-ISCO 的碳排放比 TCH 的碳排放降低约 80%, 具有较好的碳减排效益; 同时, 相较于 TCH, TCH-ISCO 的直接经济投入降低约 70%, 具有更好的经济可持续性; 但 TCH 的社会可持续性略高于 TCH-ISCO。将环境、经济和社会可持续性结果归一化处理后得到综合可持续得分, TCH-ISCO 和 TCH 的综合可持续得分分别为 89.6 分和 61.9 分, 证明 TCH-ISCO 较 TCH 更可持续, 拥有更好的发展前景。鉴于目前对低碳高效土壤修复技术需求逐步提高的形势, 本研究不仅为 TCH-ISCO 的可持续性定量化评估及其低碳发展提供了可靠依据, 还为相关有机污染场地修复技术的定量化评估提供了可行方法。

关键词: TCH-ISCO; 碳排放; 可持续定量评估; 生命周期评价; 最佳管理措施

作者简介: 杨宗帅, 中国科学院南京土壤研究所, 博士研究生, 主要从事污染场地可持续修复研究。

E-mail: zsyang@issas.ac.cn

磁性生物质对水土中镉的吸附去除机制及其应用研究

Mechanism and application of magnetic biomass for removing cadmium from water and soil

王衡, 易筱筠, 党志

华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006

摘要: 水体和土壤重金属污染已经成为我国严重的环境问题, 在对污染水土进行的修复过程中, 修复材料的选择非常重要, 磁性吸附剂因价格低廉、便于分离受到广泛的关注。但现有磁性吸附材料存在吸附量低或磁性弱的问题, 导致重金属的去除效率不高, 因此需要开发兼具高吸附量和强磁性的吸附剂。本研究以牡蛎壳和花蛤壳为原材料, 使用乙二胺四乙酸铁钠和硫化亚铁作为铁源制备磁性材料, 通过高温煅烧制得改性牡蛎壳(CMOS)和花蛤壳(CMCS)磁性吸附剂, 考察了两种磁性材料对水体中 Cd^{2+} 的吸附动力学、等温线和热力学等特性, 利用 SEM、XRD 和 XPS 等技术方法探究了其吸附机理, 并应用于实际镉污染土壤中探究对重金属的去除效果。结果表明, CMOS 和 CMCS 饱和磁化强度分别为 14.3 和 8.0 emu/g, 在水体中的回收率均为 100%, 对 Cd^{2+} 的吸附容量最大可达到 168.4 和 115.7 mg/g, 这远高于此前报道的许多磁性材料的吸附效果, 两种吸附剂均可在 120 min 内达到吸附平衡, 具有较快的吸附速率。机制研究发现, 材料表面的 -OH 和 -COOH 官能团参与了与 Cd^{2+} 的螯合反应, 吸附过程中生成了 $\text{Cd}(\text{OH})_3$ 、 CdCO_3 、 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 CdFe_2O_4 等沉淀, 在对 Cd^{2+} 的吸附中静电吸附和离子交换作用也发挥了作用。将两种磁性材料应用于实际镉污染 (2.3 mg/kg) 的土壤中, CMOS 和 CMCS 对土壤总镉的去除率为 41.5 和 34.2%, 有效态镉的去除率为 52.4 和 42.5%。分析发现, 被去除的镉主要为酸提取态和可还原态, 可氧化态和残渣态无显著变化。CMOS 和 CMCS 在土壤中具有较高的回收效率, 分别为 98.3 和 95.8%。本研究中的两种磁性材料能够快速、高效去除水体和土壤中的重金属镉, 且回收效率高, 具有较为广阔的应用前景。

关键词: 镉; 磁性材料; 吸附机制; 重金属去除; 回收

作者简介: 王衡, 华南理工大学环境与能源学院, 博士研究生, 研究领域为土壤重金属污染修复。

易筱筠, 华南理工大学环境与能源学院, 教授, 研究领域为重金属污染水土环境的生态修复技术。

党志, 华南理工大学环境与能源学院, 研究员, 研究领域为重金属和有害元素在生态系统中的环境地球化学与生物地球化学过程。

E-mail: 616544902@qq.com

E-mail: xyyi@scut.edu.cn

E-mail: chzdang@scut.edu.cn

碳酸盐岩地质背景土壤中锑的形态提取方法研究

Study on the Extraction Method of Antimony Forms in Carbonate Geological Background Soil

李柏樟¹, 吴攀¹, 李玲^{2*}

1 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

摘要: 锑 (Sb) 污染已经成为我国的典型环境污染问题, Sb 也是我国“十四五”期间重金属污染防控工作的重点污染物之一。我国作为世界产锑大国, 锑矿资源分布相对集中, 其中西南喀斯特地区的超大型、大中型 Sb 矿床占全国 Sb 矿床的 60% 以上。喀斯特地区以碳酸盐岩地质背景土壤为主要特征, 碳酸盐岩风化发育的土壤普遍存在重金属地球化学高背景现象。一般来说, Sb 的生物有效态往往比其总量更能反映其危害性。因此, 合理评价碳酸盐岩地质背景土壤中 Sb 的生态风险, 应该充分结合其地质背景类型与 Sb 的地球化学性质以提取不同形态 Sb 的占比, 准确辨识生物有效态 Sb 的含量。基于上述考虑, 本研究选用 Shiowatana、改进 BCR、Wenzel 等三种形态提取方法分别对贵州某 Sb 矿场地四种不同 Sb 浓度的土壤 (S1=29.01 mg/kg、S7=62.47 mg/kg、S16=125.62 mg/kg, S17=435.21 mg/kg) 进行锑形态分析, 同时采用土壤-苋菜盆栽试验以验证 Sb 的生物可利用性。结果表明: Shiowatana 方法对四件供试土壤所提取的有效态组分分别为 14.64%、19.04%、15.71% 和 18.46%, 显著高于 Wenzel 方法 (1.65%、1.32%、1.35%、2.64%) 和 BCR 方法 (1.03%、1.21%、1.26%、1.14%)。土壤-苋菜盆栽试验和相关/偏相关分析结果表明, Shiowatana 方法的可利用组分与苋菜中 Sb 含量的相关性最高, Wenzel 方法次之, BCR 最差。因此, 本研究认为 Shiowatana 方法最适合用于碳酸盐岩地质背景土壤中锑的形态提取。

关键词: 锑污染; 形态提取; 锑生物可利用性

作者简介: 李柏樟, 现为贵州大学在读硕士研究生, 主要研究领域与方向为土壤重金属污染与修复技术。

E-mail: lbz1287073602@163.com

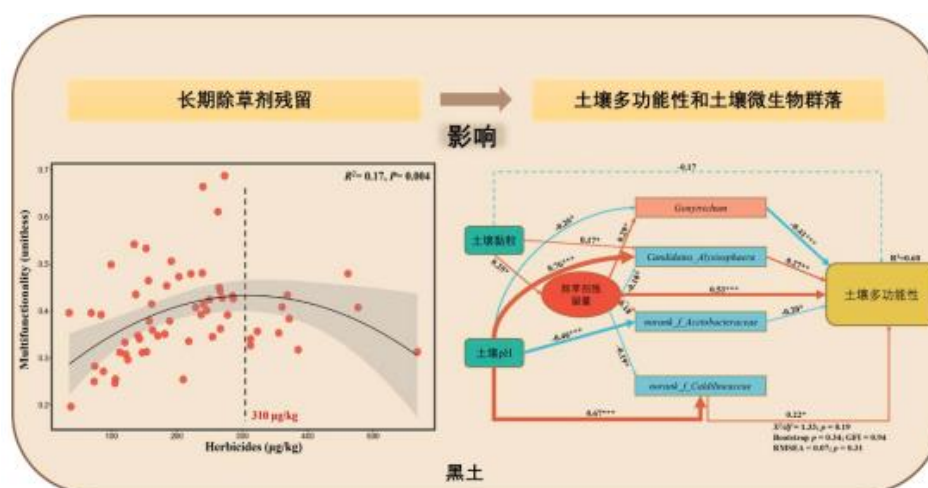
长期除草剂残留对土壤多功能性和土壤微生物群落的影响

Effects of long-term herbicide residues on soil multifunctionality and soil microbial community

王宏哲^{1,2}, 任文杰^{1,2}, 徐勇峰¹, 王霞^{1,2}, 孙毅^{1,2}, 胡文博^{1,2}, 马军¹, 陈森森^{1,2}, 戴士祥¹, 滕应^{1,2*}

1 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 农业生产中除草剂的高频高强度使用, 导致其长期残留于土壤中, 并且可能会影响农业生态系统功能甚至威胁农业生产。目前, 除草剂长期残留量对土壤多功能性和土壤微生物群落的影响尚不清楚。因此本研究选取东北黑土种植区土壤样品, 评价了除草剂残留量对土壤多功能性和微生物群落的影响。结果表明除草剂残留量与土壤多功能性呈现 U 型非线性关系。土壤多功能性随着除草剂残留量的增加先升高, 当除草剂残留浓度达到约为 310 $\mu\text{g/kg}$ 后, 土壤多功能性随着除草剂残留量的增加而下降。此外, 研究发现微生物群落丰富度在低残留组 (LG, 小于 310 $\mu\text{g/kg}$) 和高残留组 (HG, 大于 310 $\mu\text{g/kg}$) 中具有显著差异。其中, 特定关键微生物属 *norank_f_Acetobacteraceae*、*norank_f_Caldilineaceae*、*Candidatus_Alysiosphaera* 和 *Gonytrichum* 的相对丰度在 LG 和 HG 之间存在显著差异并且与土壤多功能性显著相关。结构方程模型进一步表明除草剂残留也可以通过影响这些特定的关键物种间接影响土壤多功能性。本研究结果强调了长期除草剂残留会显著影响农业土壤多功能性, 因此需要合理施用除草剂以维持土壤生态系统的健康。



关键词: 黑土; 除草剂; 土壤多功能性; 土壤微生物群落

作者简介: 王宏哲, 中国科学院南京土壤研究所, 在读博士生。主要研究领域为环境生物修复。

E-mail: wanghongzhe@issas.ac.cn

保水剂对重金属镉离子吸附特征及其互作效应研究

Study on adsorption characteristics and interaction effect of water retaining agent on heavy metal cadmium ion

蔡子明^{1,2}, 吴美玲², 詹锋^{1*}, 黄占斌^{2*}

1 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004; 2 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

摘要: 为分析评价凹凸棒聚丙烯酸钠(OSAP)与聚丙烯酰胺(JSAP)两种保水剂对重金属离子镉的吸附特征及镉离子对保水剂吸水特性影响。采用室内模拟试验和批处理实验方法, 分析两种保水剂镉离子的吸附表征、对镉离子吸附的动力学和热力学、对镉离子吸附影响因素及其对保水剂吸水特性影响。结果表明, 保水剂用量、镉离子浓度、pH 值、吸附时间、温度等因素都影响保水剂对镉离子吸附量, 其中 pH 是影响主要因素, 随 pH 浓度增加, 两种保水剂对镉离子吸附量成增加趋势。25 °C条件下在 Cd²⁺浓度为 250 mg/L 和 pH=6 时, OSAP 和 JSAP 用量 0.6-0.8 %用量下吸附镉离子达 207.13 mg/L 和 241.23 mg/L; 吸附时间 10 min 基本达最大吸附量; 镉离子浓度增加和温度提升, 都增加两种保水剂对镉离子的吸附量。保水剂对溶液镉离子吸附过程符合 Langmuir 模型、准二级动力学模型, 即保水剂对溶液 Cd²⁺ 的吸附以物理吸附和化学为主。热力学分析表明, 两种复合环境材料对溶液镉离子吸附是自发($\Delta G_0 < 0$)且吸热($\Delta H_0 > 0$)过程。此外, OSAP 与 JSAP 在去离子水中吸水倍数分别为 474.8 和 152.6; 随溶液 Cd²⁺浓度的增加, 两种保水剂吸水倍率呈下降趋势; 当 Cd²⁺溶液浓度 100 mg/L 时, OSAP 和 JSAP 保水剂吸水倍率分别为 165.7 和 68.1; 镉离子浓度明显影响保水剂的吸水性。5 次反复吸水后, 纯水中 OSAP 和 JSAP 能分别保持去离子水中 87%和 61.5%吸水量。总体而言, OSAP 较 JSAP 具有更高镉离子吸附量, 更高吸水性和反复吸水性, 更适宜干旱半干旱地区农业和环境的土壤保水和吸附镉离子性能。

关键词: 凹凸棒聚丙烯酸钠保水剂(OSAP); 聚丙烯酰胺保水剂(JSAP); 镉离子; 吸附动力学

作者简介: 蔡子明, 广西大学, 硕士研究生, 研究方向为环境材料处理重金属污染。

E-mail: 2015391002@st.gxu.edu.cn

新型有机-无机调理剂对酸化土壤改良效果研究

Study on the effect of new organic-inorganic conditioners on the improvement of acidified soil

吴美玲¹, 王安¹, 黄占斌¹, 李忠元², 黄相锋²

1 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2 中建八局环保科技有限公司, 上海 200444

摘要: 酸化土壤作为我国重要的退化土壤类型之一, 其土壤结构差、透气性差、易造成土壤中营养元素流失, 土壤肥力下降, 严重制约我国粮食安全和农业可持续发展。本研究以钢渣(S)、生化腐植酸(B)、煤基腐植酸(M)为原材料, 通过单因素土壤培养试验和三因素三水平正交土壤培养试验设计, 利用土壤相关指标测定和主成分分析, 研制出一种新型的有机-无机调理剂。单因素试验表明三种材料对酸化土壤均有改善作用, 但表现出不同的效果, 其中钢渣(S)对酸化土壤 pH 和土壤交换性铝改善比较明显, 生化腐植酸(B)对酸化土壤的容重及土壤孔隙度表现出较优的处理效果, 煤基腐植酸(M)对酸化土壤的有机质有明显提升作用。正交试验结果表明三种材料优化组合的 S2B2M2 对酸化土壤改良效果最佳, 最佳施用量为钢渣 6 g/kg, 生化腐植酸 3 g/kg, 煤基腐植酸 5 g/kg, 改良后的土壤铝毒得到明显缓解, 土壤交换性铝较原土壤下降了 $0.52 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}(1/3\text{Al}^{3+})$, pH 值较原土提升了 1.72。土壤肥力有所上升, 相较于原土, 处理后土壤速效钾、有效磷、水解性氮和有机质含量分别提升了约 2.1%、4.8%、59.9%、16.7%。研究结果对加速我国酸化土壤改良与利用、缓解土壤退化以及减少二次污染具有重要的研究价值和现实意义。

关键词: 钢渣; 生化腐植酸; 煤基腐植酸; 酸化土壤改良; 调理剂

作者简介: 吴美玲, 中国矿业大学(北京), 硕士研究生, 研究方向为土壤改良与修复。

E-mail: 2317939073@qq.com

地聚合物-纤维屏障的构建及铅镉污染土壤的修复

Construction of coal bottom ash based geopolymer-fiber barrier and remediation of Pb-Cd contaminated soil: Soil Remodeling and Mechanism

向愉唯, 蓝际荣, 董祎挈, 侯浩波

武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072

摘要: 固体废物基环境功能材料稳定重金属污染土壤是一种可持续的方法。本研究合成了一种用于治理镉、铅污染土壤的燃煤底灰基地聚合物-纤维屏障。结果表明, 添加 10% 的地聚合物可稳定污染土壤中 95% 以上的 Cd 和 Pb, 固化后土壤的最大抗压强度可达 634 kPa。地球化学模型模拟表明, 当系统 pH 值超过 5 时, Pb 和 Cd 主要转化为沉淀矿物($\text{Cd}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$ 、 $\text{Pb}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$ 、Litharge 和 larnakite)。从力学角度看, 纤维与地聚合物的结合有效地固定了重金属, 同时提高了土壤的抗冻性、抗压性和抗剪性, 成功实现了燃煤底灰的矿物复合, 制备了无定形胶凝材料。本研究揭示了地聚合物-纤维屏障固定重金属及其结构强化的机理, 为解决土地资源污染和实现工业固体废物的绿色、可持续、清洁再利用提供了新技术。

关键词: 地聚合物-纤维屏障; 铅镉污染土壤; 机械性能; 固化/稳定化

作者简介: 向愉唯, 武汉大学资源与环境科学学院博士生, 主要从事固体废物资源化与土壤修复领域的研究。

E-mail: xyw_whu@163.com

典型喀斯特地质高背景区土壤剖面镉的迁移富集机制与形态转化过程研究

罗超, 龙健, 刘承帅, 高庭, 宁增平, 宋长顺, 刘意章

贵州师范大学地理与环境科学学院(喀斯特研究院), 贵阳 550001

摘要: 镉(Cd)是典型的有毒有害元素, 土壤中 Cd 的富集会威胁农产品质量安全与人体健康。

《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤 Cd 的点位超标率达 7.0%, 高于其他重金属元素。土壤中 Cd 的富集不仅受工矿业等人类活动的影响, 也与区域地质背景和风化成土过程密切相关。碳酸盐岩具有较高的重金属元素释放潜能, 其发育的土壤普遍呈现高 Cd 异常。我国西南地区是全球碳酸盐岩集中连片分布面积最广的区域, 土壤 Cd 超标率高, 此区域土壤 Cd 的迁移富集机制与环境效应受到广泛关注。近年来, 已有学者对广西、贵州等喀斯特地质高背景区土壤 Cd 的来源与富集过程机制、赋存形态与生物有效性、迁移转化过程与生态环境风险等进行了较系统的研究并取得了丰硕的研究成果, 但目前对喀斯特地质高背景区土壤发育过程中 Cd 的形态转化过程及其主要影响因素的系统研究仍较为缺乏, 对土壤发育过程中地质源 Cd 的活性变化机制的认识有待深入。 本研究以贵州西北部典型喀斯特地质高背景区土壤剖面为对象, 探讨了土壤 Cd 含量与形态的纵向分布特征、Cd 迁移转化过程及关键影响因素。结果表明: 下伏高 Cd 碳酸盐岩风化成土作用是剖面土壤 Cd 富集的重要原因, 在土壤形成初期, 土壤 pH 较高, 地质源 Cd 淋失较少, 土壤 Cd 含量高; 随着土壤发育程度加深, 地质源 Cd 逐渐淋失, Cd 含量降低。此外, 区域人为源输入可能影响表层土壤 Cd 的富集。土壤地质源 Cd 主要以残余态存在, 其次为铁锰氧化物结合态, 可交换态的占比较低, Cd 活性较低。剖面中下层(> 60 cm)土壤 Cd 赋存形态的变化较小, 剖面上层(< 60 cm)土壤可交换态 Cd 的占比随土壤深度降低逐渐增加, 地质源 Cd 被活化。本研究的结果为理解喀斯特地质高背景区土壤 Cd 的地球化学行为提供科学参考。

关键词: 地质高背景; 土壤; 镉; 迁移富集; 赋存形态

作者简介: 罗超, 博士研究生, 讲师, 研究方向:喀斯特环境保护与污染控制。

刘意章, 博士, 副研究员, 研究方向: 土壤环境地球化学。

E-mail: 361615009@qq.com

E-mail: liuyizhang@ mail.gyig.ac.cn

网格尺度下典型岩溶峰丛洼地土壤肥力评价及权衡/协同关系

马国斌, 覃星铭

南宁师范大学, 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001

摘要: 土壤肥力直接决定着土地资源承载能力和植物生长发育潜力的高低。而峰丛洼地山区土壤提质改造作为我国西南地区石漠化综合治理的主战场, 科学评价网格尺度下岩溶峰丛洼地土壤肥力水平, 探究各肥力指标间的权衡/协同强弱关系, 对推进区域土壤精细化施肥保肥及发展衍生生态农业具有重要的现实意义。鉴于此, 本文基于“实测采样+网格预测”的 160 个土壤有效样点数据, 通过半方差函数模型探析各项养分指标的空间分布特征, 采用综合评价模型测定典型岩溶区的土壤肥力综合水平, 依据斯皮尔曼相关系数以及空间集聚模进而剖析各肥力指标间的权衡/协同作用强度。结果表明: (1) 土壤 pH、全钾 (TK) 的空间分布格局与全氮 (TN)、全磷 (TP)、有机质的空间分布大体相反, TN、TP、有机质三项养分指标的空间分布总体呈由东北向西南降低的变化特点, TK 为东高西低, pH 则为南高北低; (2) 土壤各项养分指标高值含量分布范围较小, 低值区所占面积超 50%。土壤综合肥力总体处于较缺乏水平, 肥力等别东北高—西南低的地域异质性较为显著, 肥力缺乏区主要位于耕地、住宅用地与林地。(3) TN、TP、有机质、pH 与土地利用对土壤综合肥力的协同贡献大小为 $TP > TN > \text{有机质} > pH > \text{土地利用}$, TK 对于采样区其余五项指标均具有权衡损益效应, 有机质、TN、TP 两两间的协同互促效应较为显著, 其中高—高协同增强区、低—低协同减弱区分别主要分布于耕地与林地区。研究表明, 岩溶峰丛洼地山区土壤肥力状况总体较缺乏, 各肥力元素间存在较为显著的权衡/协同效应, 应注重 TP、TN、有机质的增施以及土壤 pH、土地利用行为的调节管控, 同时对肥力缺乏区提出科学合理的保肥增肥措施, 保障峰丛洼地山区居民的农业种植活动, 促进岩溶区生态保护与农业经济的可持续发展。

关键词: 土壤肥力; 岩溶峰丛洼地; 权衡/协同关系; 网格尺度

作者简介: 马国斌, 南宁师范大学自然资源与测绘学院土地资源管理专业硕士研究生, 主要从事于岩溶土壤调查与生态评价研究。

E-mail: 2265888612@qq.com。

稻田上覆水的光化学表征:反应活性中间体的形成及对As(III)的氧化

Photochemical Characterization of Paddy Water during Rice Cultivation Formation of Reactive Intermediates for As(III) Oxidation

曾宇, 张明洋, 方国东

中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要: 水体光化学过程对环境污染物的迁移转化具有重要的意义。近年来, 虽然人们对地表水的光化学行为进行了广泛的研究, 但对水稻上覆水的光化学仍然知之甚少。在本研究中, 我们研究了水稻四个不同生长期上覆水的光化学过程。发现三重激发态有机质(3DOM*)、单线态氧($^1\text{O}_2$)和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)是主要的活性物质(RIs), 并定量了它们的表观量子产率和稳态浓度。与典型地表水相比, $^1\text{O}_2$ 的量子产率约为地表水的 2.4-6.7 倍。三维荧光光谱、傅里叶变换离子回旋共振质谱和统计分析表明, DOM 的性质和亚硝酸盐浓度是影响 RIs 生成的主要因素。亚硝酸盐对 $\cdot\text{OH}$ 产生的贡献为 23.9% ~ 100%。EEM 和 FT-ICR-MS 数据表明, 在光照条件下, 相对分子量小、饱和度高、芳香度低的 DOM 可产生更多的 3DOM*, 而 DOM 的多酚部分抑制了 RIs 的形成。RIs 显著促进了亚砷酸盐(As(III))的氧化, 其中 $\cdot\text{OH}$ 和 3DOM* 起主要作用。本研究为探讨亚砷酸盐在稻田中的非生物转化途径提供了新的思路。

关键词: 稻田上覆水; 有机质; 自由基

作者简介: 曾宇, 南京土壤研究所博士研究生, 研究方向为环境自由基过程与土壤污染修复。

E-mail: zengyu18@mailsucas.ac.cn。

铜绿假单胞菌中Lao系统对长链醇的降解机制研究

The Degradation Mechanism of Long-Chain Alcohols by the Lao System of
Pseudomonas aeruginosa

苏小康, 马克·巴特兰姆

南开大学生命科学学院, 天津 300071

摘要: 铜绿假单胞菌可以利用多种碳源, 对石油有着良好的生物降解性能。关于铜绿假单胞菌对石油中长链烷烃的降解过程中的起始酶促步骤已有较详细的表征, 但是对降解中生成的长链醇的氧化过程尚不清晰。近年, 有研究发现铜绿假单胞菌 Lao 系统的基因参与烷烃降解的长链醇的氧化。在 Lao 系统中, LaoA 被预测为携带黄素 (FAD) 的醇脱氢酶, 并且, 研究发现, 长链醇氧化过程还需要 Tat 依赖性蛋白 LaoB, LaoA 与 LaoB 以复合物的形式才能发挥醇氧化的活性。本研究利用结构生物学技术探究 LaoAB 降解长链脂肪醇的过程。首先将 *laoA* 和 *laoB* 用大肠杆菌表达系统进行异源表达, 发现单独表达的 LaoA 虽结合 FAD 但并不具有活性, LaoB 则不能单独进行表达, LaoA 和 LaoB 只有在共表达的情况下才具有生物活性。共纯化的 LaoAB 携带 FAD 辅因子, 并在 C2-C12 的长链醇氧化实验中表明 LaoAB 对无分支的长链伯醇的活性明显更强。对 LaoA 和 LaoAB 进行蛋白质结晶实验, 用 X 射线衍射和 AlphaFold 对其结构进行解析, 预测可能的活性中心、辅因子结合位点和底物结合位点, 构建对应的突变体并对其活性进行测定, 证明 His295, Val297 和 Leu372 为辅因子 FAD 的结合位点, His465 和 Asn508 是 LaoAB 的底物结合位点, 这些位点的突变将极大的影响酶活力。意义: 铜绿假单胞菌能够代谢多种污染物, 它在临床环境、配水系统甚至喷气燃料箱中茁壮成长的能力与通过醇类中间体代谢的各种疏水底物有关。我们的研究表征了一种新型黄素蛋白长链醇脱氢酶, 该酶由双亚基复合物组成, 在相关酶中是独一无二的, 而相应基因的同系物存在于许多细菌基因组中。对其催化机制的解析有助于我们对生物降解污染物过程的深入理解。

关键词: 生物降解; 铜绿假单胞菌; 长链醇氧化; 蛋白质结构。

作者简介: 苏小康, 南开大学硕士研究生, 研究领域为结构生物学。

高效耐铬 *Bacillus mobilis* CR3 对 Cr(VI) 的去除机制

叶宇博, 郝瑞霞, 单冰, 张君曼, 鲁安怀

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: Cr(VI) 是环境中重要的有害污染物具有致癌性与毒性。Cr(VI) 的微生物修复技术是一种经济高效且环保的方法, 具有更为广阔的发展前景。我们从 Cr(VI) 污染土壤中成功地分离出一株新型的 *Bacillus mobilis* CR3 菌株。菌株 CR3 可以在 200 mg/L Cr(VI) 条件下表现出 86.70% 的去除能力, 不同浓度的 Cr(VI) 影响 CR3 细胞的活性与对 Cr(VI) 的去除速率, 反应结束后约有 3.46% 的总 Cr 被固定。SEM-EDS 与 TEM-EDS 分析表明, 通过 Cr(VI) 处理后在细胞表面与细胞内均有 Cr 的累积。XPS 分析表明在细胞表面同时存在 Cr(III) 和 Cr(VI), FTIR 结果表明细胞表面 Cr 的存在主要与 O-H、磷酸基团和 -COOH 等官能团有关。代谢组学揭示了 Phenol 和 L-Carnosine 等 5 种代谢产物上调明显, 这些代谢物与 Cr(VI) 的还原、重金属的螯合以及解毒机制密切相关, 此外还涉及多种与细胞稳态密切相关的代谢物差异表达。Cr(VI) 的存在抑制了菌株 CR3 的分裂速度并影响能量代谢通路、核苷酸代谢通路和氨基酸的合成与分解过程。我们提出了菌株 CR3 在 Cr(VI) 胁迫下的自我保护及对 Cr(VI) 的还原机制。菌株 CR3 对 Cr(VI) 的去除主要为生物还原, 并且可以分为胞内与胞外两种途径。Cr(VI) 在胞内被还原为 Cr(III), 一部分 Cr(III) 通过相应的通路流出细胞; 另一部分与胞内的蛋白质或核酸结合。Cr(VI) 的胞外还原与胞外还原酶和还原物质有关, 还原产物为有机态的 Cr(III)。Cr(VI) 的去除也存在生物吸附, 在细胞表面 Cr(VI) 与 Cr(III) 同时存在, Cr 的吸附与多种官能团有关。菌株 CR3 通过调节自身的代谢过程来响应 Cr(VI) 的胁迫, 具体表现为 (1) 核苷酸的合成受到抑制, 阻碍细胞分裂; (2) 能量代谢虽受抑制但 PEP 生成 Pyruvate 的过程具有很强的放能性, 可以为生化反应提供足够多的能量; (3) 多种氨基酸和有机酸产物表达上调, 可以促进电子传递、维持细胞稳态、与 Cr 螯合并降低其毒性。因此, 通过对菌株 CR3 分子机制的研究可以为 Cr(VI) 污染场地的修复提供理论指导。

关键词: Cr(VI); *Bacillus mobilis* CR3; 微生物修复; 非靶向代谢组学

作者简介: 叶宇博, 北京大学博士研究生, 研究方向为微生物地球化学。

E-mail: 2101110637@stu.pku.edu.cn

寒区重金属污染土壤修复稳定化材料优选及抗冻效能分析

Optimization of stabilization materials for remediation of heavy metal contaminated soils in cold regions and analysis of anti-freezing efficacy

王一鹏, 王琨, 赵庆良

哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150001

摘要: 随着我国产业布局调整乃至全球产业结构调整, 城市及周边地区开始出现大量重金属污染场地, 它们具有复合污染、浓度高和污染深度大等特点, 已对区域生态环境、居住环境和人体安全构成了严重威胁与挑战。其中, 铜、铬和铅单一污染土壤在我国分布非常普遍。对铜、铬和铅污染土壤进行了稳定化材料优选、复配及稳定化效果研究。筛选了绿色稳定化材料为钢渣、骨粉和磷矿粉, 并通过响应面得到了三者之间的最优配比为 3:1:5 时可以同步稳定三种重金属, 按此比例球磨得到钢渣-骨粉-磷矿粉复配材料 (S-B-P)。在最不利条件下, 材料在 20% 添加量下能将土壤中的 Cu、Cr 和 Pb 的 3 种毒性浸出浓度分别降低 85%, 82% 和 99% 以上, 证明材料的稳定性可以满足所有场地需求。材料也降低了 Cu 和 Pb 的生物毒性。形态提取实验证明, Cu、Cr 和 Pb 的可交换态在土壤中的含量在稳定后已不足 1%。材料的添加也影响了土壤的基本理化性质, 包括提升土壤肥力, 提高了土壤的 pH, 降低土壤氧化还原电位值等。研究东北地区气候条件对土壤重金属活性和材料稳定化效果的影响, 及材料稳定化和抗冻融机理。冻融循环显著提高了重金属的活性和迁移性, 在 60 次冻融循环后 Cu、Cr(VI) 和 Pb 的 TCLP 浸出浓度分别上升了 18.9%、38.7% 和 7.2%。同时冻融循环提高了有机质含量, 并使得土壤平均粒径降低。土壤颗粒的相对运动导致的土壤团聚体破坏是造成上述现象主要原因。而 S-B-P 表现出良好的抗冻融能力, 即使在 3 倍污染土壤中, 20% 添加量下重金属的浸出浓度几乎不随冻融次数的延长而变化, 材料水解生成的水化硅酸钙 (C-S-H) 类物质可以在土壤中形成致密的凝胶状网络, 连结周围土壤颗粒, 阻止冻融循环带来的团聚体破坏。以上结果可为绿色复配材料修复东北地区复合重金属污染土壤提供实验支撑和理论依据, 在东北地区场地修复、复杂污染场地治理、工业副产物的再利用等方面具有重要的工程实践意义。

关键词: 土壤; 重金属复合污染; 固化/稳定化; 冻融循环; 绿色材料

作者简介: 王一鹏, 哈尔滨工业大学博士生, 研究领域为水中重金属的去除、土壤环境探究及土壤中重金属的稳定。

E-mail: 18846093228@163.com

模拟镉沉降对伴矿景天镉积累及生理活性的影响

Impacts of simulated atmospheric cadmium deposition on the physiological response
and cadmium accumulation of *Sedum plumbizincicola*

黄硕霈, 谭长银, 曹雪莹, 杨佳, 邢倩文, 涂晨

湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081

摘要: 大气沉降是土壤-植物系统中重金属的重要来源之一, 但这一重要途径却没有得到重视。伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 是一种镉的超富集植物, 常用于修复镉污染土壤。本研究以伴矿景天作为供试作物, 通过模拟大气镉沉降盆栽试验, 旨在探明大气镉沉降下伴矿景天的生理效应以及吸收大气镉的效率。结果表明, 与对照组相比, 高浓度大气镉沉降 (12 mg/L) 下伴矿景天的生物量增加了 11.35%, 这说明伴矿景天对大气沉降镉胁迫具有良好的耐受性。随着沉降浓度的提高, 伴矿景天的丙二醛 (MDA) 含量增加, 同时抗氧化酶的活性也增强。这表明伴矿景天通过提高抗氧化酶活性有效应对大气镉胁迫对其的影响, 缓解体内的氧化胁迫。大气镉沉降都能有效增加伴矿景天中镉含量, 且伴矿景天体内镉含量随大气沉降浓度增加而提高, 但伴矿景天地下部分镉含量变化较小, 地上部分镉含量变化较大。在高镉沉降条件下, 伴矿景天体内的镉主要来自大气, 并储存主要在茎叶中 (39.7-58.5%)。因此, 大气镉胁迫下伴矿景天对镉的积累与生理响应与镉浓度有密切关系。同时这也表明伴矿景天可直接吸收大气中的镉, 具有直接修复土壤中来自大气镉的潜力。

关键词: 镉; 伴矿景天; 大气沉降; 生理效应

作者简介: 黄硕霈, 湖南师范大学硕士研究生, 研究方向为土壤健康与农产品安全、微塑料与重金属复合污染。

E-mail: 976332908@qq.com

场地有机氯化合物对微生物群落结构的塑造作用

Soil properties and organochlorine compounds co-shape the microbial community structure: A case study of an obsolete site

刘雨^{1,2}, 王芳^{1,2*}, 蒋新^{1,2}

1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 氯苯等有机氯化合物是一种持久性有机污染物, 普遍存在于有机氯农药生产厂的土壤中。长期污染可能会改变土壤微生物结构, 进而影响土壤功能。然而, 仍然不清楚有机氯污染物对土壤微生物群落结构的影响, 特别是在污染物高度隐蔽的垂直土壤剖面中。为此, 本文探讨了某废弃场地中有机污染物(氯苯、六氯环己烷、滴滴涕)的污染现状和原因, 以及其与土壤性质(pH、速效磷、溶解有机碳等)对微生物群落结构的影响。底层土壤中有机氯化物的平均总浓度是表层土壤的 996 倍, 其中氯苯占底层土壤有机碳的 90%以上。历史原因、人为影响、土壤质地和污染物性质是造成有机氯空间分布差异的主要原因。冗余分析表明, 土壤性质和有机氯化合物都是影响微生物组成和多样性的重要因素。变异分配分析进一步表明, 土壤性质对微生物群落结构的影响强于有机氯化合物。通过线性判别分析效应大小(LEfSe)分析, 发现表层土壤和底土微生物组成存在显著差异, 主要受不同污染条件的驱动。此外, 共现网络分析表明, 与轻度污染的表土相比, 重度污染的底土表现出更密切、更复杂的细菌群落相互作用。这项工作揭示了环境因素对共同塑造土壤微生物群落结构的影响。这些发现促进了我们对有机氯污染物、土壤特性和微生物群落之间错综复杂的相互作用的理解, 并为设计有效的有机氯污染土壤管理策略提供了有价值的见解。

关键词: 有机氯污染场地; 土壤性质; 微生物群落; 垂直分布; 物种共生

作者简介: 刘雨, 中国科学院南京土壤研究所, 博士在读, 研究领域为场地有机氯污染物修复。

E-mail: liuyu@issas.ac.cn

施用沼渣或沼渣生物炭对菜地土壤蔬菜产量及 N_2O 排放的影响研究

欧阳豪, 钟磊

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

摘要: 人口的增长和健康指南建议的每日蔬菜摄入量的增加推动了对蔬菜的更高需求, 这促使化肥的应用成为提高蔬菜产量的重要农业实践。一氧化二氮(N_2O)由于其辐射效应和高全球变暖潜力, 是过度施肥产生的主要温室气体(IPCC, 2014)。因此, 在不影响蔬菜产量的情况下减少化肥的施用, 从而减少温室气体排放, 是一项关键挑战。

有机肥作为一种高肥力的缓释肥料, 与无机化肥相结合, 可以有效提高土壤肥力, 降低化肥的施用率, 对管理土壤物理条件和微生物也有重要作用。通常, 有机肥料主要包括秸秆、牲畜粪便和工业中营养含量高的副产品)。其中, 沼渣(BR)是厌氧发酵技术的副产品, 由于产量高、营养成分高, 被广泛用作有机肥料; 并已被证明能促进作物生长, 部分甚至接近氮肥施用水平。另一方面, 沼渣型生物炭(BRC)可以改变土壤的物理化学性质, 释放固有的营养物质, 改变土壤中营养物质和微生物群落的种类, 从而改善营养循环和作物产量。此外, 施用 BR 和 BRC 会将大量的代谢碳、矿质氮和水带入土壤, 通常有利于硝化和反硝化作用。然而, BR 和 BRC 的输入也会影响土壤 pH, 它们之间的差异——携带的营养物质和有毒物质的可用性也可能影响与氮循环相关的微生物的活性和相关基因的表达。BR 和 BRC 的投入可能直接或间接影响 N_2O 生产的微生物过程, 但目前还没有系统研究比较 BR 和 BRC 对 N_2O 和作物产量的微生物机制和差异效应。

基于此, 本研究开展了沼渣和沼渣型生物炭的盆栽实验, 运用分子生物学技术和氮循环功能及其相关功能微生物菌群动态变化的耦合机制, 并探讨了沼渣和沼渣型生物炭对于菜地土壤的蔬菜产量和 N_2O 排放的影响机制。研究结果发现, 加上施用 BRC 增加了土壤 C 含量和土壤 N 含量, 表明用 BR 和 BRC 都能够有效替代化肥可以维持作物产量, 同时降低细菌和真菌硝化反硝化产生的 N_2O 潜力, 但是两者的影响途径和程度存在明显差异。这项工作为 BR 和 BRC 作为高效氮肥的应用提供了理论依据, 并提出需要更多地关注蔬菜土壤中真菌相关的反硝化 N_2O 产生潜力。

关键词: 沼渣; 沼渣生物炭; 蔬菜产量; N_2O

作者简介: 钟磊, 副教授, 研究领域为农业与草地氮循环过程研究。

E-mail: Lei.zhong@tju.edu.cn

中国南方农田土壤中重金属的空间模式、来源解析和以来源为导向的健康风险量化：综合使用 PMF 和统计模型

Spatial pattern, source apportionment, and source-oriented health risk quantifying of heavy metals in farmland soils of southern China: Integrated using of PMF and statistical models

何翔宇, 胡碧峰, 张鹏博, 张杨珠

江西财经大学财税与公共管理学院, 南昌 330013

摘要：现如今土壤重金属的污染问题已经遍布中国各地，特别是在人口稠密、经济较发达、工业化程度较高的中国南方地区。本文重点研究了中国南方地区的土壤重金属污染水平和生态风险评估，并进行对研究区内的重金属空间分布特征和重金属污染源解析进行统计分析。我们同时也对有关土壤重金属的健康风险进行了详细评估，并分析了影响土壤污染水平的影响因素。研究结果发现大部分重金属主要分布在研究区的中东部和南部，其中镉和汞的污染程度较高，具有一定程度的潜在生态风险。利用正交矩阵因子分解法（PMF）分析了五种土壤重金属的污染来源。PMF 结果表明不同的污染源的贡献率依次为：自然源（42.42%）、农业活动源（29.93%）、工业污染源（20.49%）和大气沉降污染源（7.16%）。结果发现相比成人，儿童和老年人更容易受到铬和砷元素的致癌因素影响。通过结构方程模型，我们探讨了社会经济因素，自然气候因素，地形地貌因素和土壤性质因素对土壤污染水平的影响，结果发现土壤性质是影响土壤污染的主要因素之一，其中土壤有机质（SOM）和阳离子交换容量（CEC）对重金属污染水平的影响因素相对较大。本文的研究对中国南方地区的土壤重金属污染进行了多方位的综合评价，为制定中国南方地区土壤生态保护与土壤修复政策提供了一定的科学依据。

关键字：土壤重金属污染；来源解析；正交矩阵因子分解法；健康风险评估；结构方程模型

作者简介：何翔宇，江西财经大学硕士研究生，研究方向为土壤重金属污染与土地生态。

E-mail: h871376134@163.com

生物炭载纳米零价铁活化过硫酸盐降解土壤中萘实验研究

Experimental study on degradation of naphthalene in soil by MBC@nZVI-PS system

黄孔月, 张淇翔, 冯启言, 周 来, 朱雪强

中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 在我国快速城市化发展过程中遗留下大量的工业污染场地, 其焦化场地污染较为严重且处置困难。多环芳烃(PAHs)作为焦化场地最典型的有机污染物之一, 所造成的污染越来越受到人们的重视。本研究以生物炭载纳米零价铁 (MBC@nZVI) 活化过硫酸盐(PS)氧化体系为研究对象, 研究了 PAHs 污染土壤中典型的半挥发性污染物萘(NAP)的降解性能。采用批实验研究了 MBC@nZVI 活化 PS 降解土壤中的 NAP, 考察了 MBC@nZVI+PS 浓度、土水比、土壤有机质含量及复合污染对 NAP 降解的影响; 采用砂箱实验研究了 MBC@nZVI、PS 在土壤中的扩散迁移及 NAP 的降解。结果表明, MBC@nZVI+ PS 浓度从 1.2%开始, 每提高 0.4%, 降解效率约可增加 7%; 2%时降解率最高, 达到了 87.7%, 浓度在 1.2~2%区间内, 增加 MBC@nZVI+ PS 浓度可有效提升 NAP 的降解效率; 较高的土水比能够加速 NAP 的降解; 土壤有机质含量在 2%以内对 NAP 的降解效率影响不显著; 苯作为复合污染组分进入反应体系后可以抑制 NAP 的降解, 竞争作用明显。在注射压力 0.65 Mpa 下, 分别注射 500 mL 45 mg/mL PS 和 500mL 35 mg/mL MBC@nZVI, 注射 24 h 后, 注射影响半径 10 cm 内, 孔隙率 55%的土壤中 NAP 的降解率可达 75.3%; 其中, 土壤中 NAP 的残留量与 PS 的残留量呈正相关、与总 Fe 含量呈负相关; MBC@nZVI 颗粒在土壤中的扩散是 NAP 降解的主要限制因素。本研究结果可为 MBC@nZVI 活化 PS 技术在 PAHs 污染土壤修复中的应用提供参考。

关键词: 土壤; 萘; 生物炭载纳米零价铁; 过硫酸钠

作者简介: 黄孔月, 中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向为土壤与地下水修复。

E-mail: huangky1012@163.com

生物质诱导含铁矿物水热还原相变及其修复农田有机污染的机制

Mechanism of biomass-induced hydrothermal reduction phase transformation of iron-containing minerals and its remediation of organic pollution in farmland

刘婧怡, 朱雁平, 仇荣亮

华南农业大学资环学院, 广州 510642

摘要: 广东省耕地具有复种指数高, 保育增产压力大、农药施用频繁等特点。特别地, 在轮作体系下, 由于上茬作物存在大量有机污染物残留, 在下茬作物耕作前需要进行快速、高效的有机污染物去除。异相芬顿是经济有效的方法之一, 但反应中 Fe(III) 的还原速率很低, 如何将含铁矿物中的 Fe(III) 还原是异相芬顿催化技术的关键问题。另外, 不同结晶度含铁矿物的理化性质, 如抗酸性、表面活性位点和催化反应活性等也存在明显差异。本研究通过低温水热法活化不同结晶度的原生铁矿物和农林废弃物, 原位诱导三价含铁矿物还原相变得到活性更强的二价含铁矿物和水热碳复合催化材料。通过 X 射线衍射 (XRD) 及 X 射线光电子能谱 (XPS) 对材料进行表征, 结果表明, 含铁矿物中的 Fe(III) 还原为 Fe(II) , 与强结晶相比, 弱结晶铁矿物中 Fe(III) 更容易被还原, 同时发生了相变, 转化为草酸铁矿。在水相体系中, 弱结晶施氏矿物与秸秆复合的水热碳在 10min 左右即可对双酚 A 实现 100%降解, 其催化芬顿反应速率是其他几种材料的 10 倍。在土壤体系中, 其在 24h 内即可对异丙甲草胺实现 84% 的去除。本研究为解决“农田土壤有机物污染严重、农林废弃物大量堆积, 和原生铁矿物储备量大但可利用性低”三大问题提供了有效策略, 能够实现农林废弃物的资源化利用和农田土壤有机污染物的快速高效去除。

关键词: 水热碳; 异相芬顿; 农田土壤有机污染; Fe(III) 还原相变; 不同结晶度含铁矿物

作者简介: 刘婧怡, 华南农业大学在读硕士, 研究领域为异相芬顿催化, 农田土壤有机污染去除, 铁碳材料。

E-mail: 974465070@qq.com

铁尾矿的 As 脱除处理及矿物质负载碳材料研制

Harmless treatment of iron tailings and precise development of new mineral soil conditioners

卢卓烨, 朱雁平, 仇荣亮

华南农业大学资环学院, 广州 510642

摘要: 铁尾矿的资源化利用存在砷(As)等有害元素脱除困难和铁(Fe)等有益元素结晶度高、利用率低的问题。在现有技术中,部分化学淋洗方法虽然能有效脱除铁尾矿中的As,但也会将铁尾矿中大部分有益矿物质元素溶出,大大降低了铁尾矿的资源化利用价值。针对现有技术的缺陷,本研究通过酸环境水热法将茶叶渣、巨菌草渣等生物质废弃物与天然含As铁尾矿在特定酸环境下进行水热碳化反应,在反应过程中,通过酸热浸提及水热碳化过程产生的还原性环境,使铁尾矿中的矿物态As迁移至液相并还原为迁移性较强的As(III),从固相中脱除;同时将铁尾矿晶格中的低活性Fe(III)还原为高活性、高生物可利用性Fe(II)负载于固相中,得到的活性高、应用性能优异的矿物质负载碳材料,进一步作为催化剂、吸附剂利用于废水处理及土壤修复。通过液相色谱-原子荧光光谱法(LC-AFS)进行As含量测定,结果表明,酸环境水热法的铁尾矿As脱除率最高能达到85%,效果远高于淋洗法与酸直接浸提;通过盐酸浸提-邻菲罗啉分光光度法进行Fe含量测定及X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)表征,结果表明,Fe以可利用性更高的Fe(II)形式负载于固相材料。本研究可实现高效去除铁尾矿中As,同时提高铁尾矿晶格中低活性Fe及其它有益元素的利用率,资源化利用铁尾矿和生物质废弃物。

关键词: 酸环境水热法; 铁尾矿As脱除; Fe还原负载; 矿物质负载碳材料

作者简介: 卢卓烨, 华南农业大学硕士研究生, 研究领域为酸环境水热法, 铁尾矿无害化, 铁碳材料。

E-mail: 1441368627@qq.com

摩西斗管囊霉对不同粒径土壤铅（Pb）累积和形态转化的影响

Effect of *Funneliformis mosseae* on the accumulation and transformation behaviors of lead (Pb) in different soil

黄贝童, 杨玉荣, 李振新

东北师范大学环境学院, 长春 130024

摘要: 重金属铅（Pb）污染是世界范围内最严重的环境问题之一，Pb 具有环境毒性高、迁移能力强、能在土壤和食物链中累积等特点，从而导致土壤稳定性降低，并危害地球上的各种生命的正常生活。重金属（Heavy metals, HMs）的生态环境风险取决于其赋存形态，土壤粒径、土壤微生物对重金属的累积和形态转化具有重要影响。摩西斗管囊霉（*Funneliformis mosseae*）是典型的丛枝菌根真菌（Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF）类型，作为与植物进行有效互惠共生的真菌，AMF 与土壤、植物的相互作用可以增强宿主植物对 HMs 胁迫的抗性，并提高 AMF 对 HMs 的植物修复效率。但在 Pb 胁迫下 AMF 接种对不同粒径土壤中 Pb 形态转化的影响及其机制尚缺乏认识。本研究利用自制根箱装置对 *F.mosseae* 接种的小花鬼针草（*Bidens parviflora*）根际不同粒径土壤中 Pb 含量累积和形态转化过程进行研究。研究表明：*F.mosseae* 在土壤重金属植物修复中发挥着重要作用，能使土壤 Pb 含量明显下降。中高浓度的 Pb 胁迫均会抑制 *F.mosseae* 的定殖和生长，进而抑制 *F.mosseae* 分泌的球囊霉素含量，从而影响重金属污染物的形态转化过程。结构方程模型揭示了 *F.mosseae* 主要通过调节土壤球囊霉素和球囊霉素结合态铅的含量间接影响土壤 Pb 含量的累积；并且 *F.mosseae* 分泌的球囊霉素能改变残渣态 Pb 和铁锰氧化态 Pb 在土壤中 Pb 组分的占比影响土壤中 Pb 的形态转化过程。上述结果对于开展 AMF 在废弃矿区污染土壤的生态修复具有理论指导意义，同时为丰富退化生态系统恢复相关理论，具有极其重要的研究价值。

关键词: 丛枝菌根真菌；铅；重金属形态转化；球囊霉素；土壤粒径

作者简介: 黄贝童，东北师范大学环境学院硕士毕业，现于中国科学院南京土壤研究所担任项目聘用，主要研究领域为土壤微生物修复。

E-mail: betterhuang182@163.com

机器学习模拟氨功能化磁性腐植酸纳米颗粒去除和回收铅离子

杨求文, 申保收

西北大学城市与环境工程学院, 西安 710127

摘要: 使用共沉淀法合成了由腐植酸和氨基修饰的纳米磁铁颗粒 (AFMHS), 借助机器学习优化从水溶液中去除和回收铅离子。考察了 pH 竞争、吸附机理、等温线、动力学、热力学、再生和稳定性的影响。在中性 pH 条件下 AFMHS 表现出优异的 Pb²⁺ 去除能力。AFMHS 对重金属离子的吸附在 15 分钟内就可以达到平衡, 且最大吸附容量为 110mg/g。通过分析 FTIR, XPS 提出了 AFMHS 对 Pb (II) 的吸附可归因于 Pb (II) 与材料基质中的羧基、酚羟基、亚胺/胺官能团的络合。此外, 吸附剂被回收了 3 次后吸附容量没有显著降低 (吸附剂损失的 10%)。采用人工神经网络 (ANN)、随机森林 (RF)、支持向量回归 (SVR) 和 CatBoost 来预测纳米材料对 Pb 在水溶液中的吸附能力。对 ML 模型性能的评估和比较表明, CatBoost 模型具有最高的相关系数 $R^2=0.95$, 所开发模型的准确预测能力可以显著减少实验工作量。输入特征的相对重要性可以为更好地处理真实废水中的重金属提供正确的方向。这有望使这种低成本吸附剂具有长期处理污染水中重金属离子的巨大潜力。

关键词: CatBoost; 机器学习; 特征分析; Pb(II); 磁性; 腐植酸; 吸附

作者简介: 杨求文, 西北大学硕士, 主要研究机器学习在重金属污染土壤中的应用。

E-mail: bsshenn@nwnu.edu.cn

微生物絮体庇护噬菌体反哺宿主群落抵御水力胁迫的稳态机制

Microbial Aggregates Sheltered Bacteriophages Enhance Microbial Stability under Hydraulic Stress

吴雅茹¹, 祁慧鹂², 吴云玲¹, 孙明明^{1*}

1 南京农业大学资源与环境科学学院, 土壤生态实验室, 南京 210095

2 中国科学院南京土壤研究所, 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008

摘要: 微生物聚集体包含丰富多样的微生物以及其分泌的多聚物。由于聚集体相对优势的代谢效率与环境耐受力, 它们在自然生境分布普遍同时在微生物技术领域广泛应用。活性污泥蕴藏的大量的细菌的和病毒, 这里的病毒指的是噬菌体, 噬菌体本身虽没有代谢功能, 但噬菌体-宿主相互作用却可以引起活性污泥性能的变化。因而活性污泥中细菌和病毒互作值得深入研究。噬菌体是感染细菌的病毒, 噬菌体可以编码辅助代谢基因, 也就是 AMG, 在感染宿主期间可以增强或重定向宿主代谢过程。我们从南京和杭州的四个污水处理厂进行活性污泥样本采集, 四个污水厂均具有推流式运动, 我们采集了每个污水厂三个工作单元的活性污泥, 进行了宏基因组和宏病毒组测序。发现活性污泥中的噬菌体携带与脂多糖以及胞外多糖形成相关的 AMG, 脂多糖是有利于维持宿主菌细胞膜结构的完整性, 而胞外多糖是胞外聚合物 EPS 的重要组成, EPS 不仅有利于微生物团聚体的形成, 还可作为物理屏障保护原核生物免受抗菌剂、消毒剂的侵害。进一步的, 我们分析了活性污泥的物种组成, 发现, 同一污水厂不同工作单元的活性污泥具有相似菌群组成, 不同污水处理厂菌群组成具有显著差异。但总体而言, 活性污泥中的优势菌属多为硝化螺旋菌属, 脱氯单胞菌属等代谢污染物的功能细菌。我们对游离的病毒群落进行了溶原噬菌体识别, 发现活性污泥溶原性噬菌体丰度为 48%-66%, 与此同时, 我们发现活性污泥中温和噬菌体比例明显高于湖泊沉积物以及淡水、海水, 这一结果表明活性污泥中噬菌体具有和人体肠道相似的特征, 这也侧面揭示了活性污泥生境中溶原性噬菌体的优势地位。

关键词: 噬菌体; 活性污泥; 辅助代谢基因; 物种多样性; 微生物团聚体

作者简介: 吴雅茹, 南京农业大学资源与环境科学学院生态学专业硕士生, 主要从事土壤生态学研究。

E-mail: 2023103005@stu.njau.edu.cn

BC-HA 复合修复碱镉污染农田及镉胁迫下小麦根系代谢物变化的田间试验

孙国怀^{1,3,4}, 郑旭^{1,3,4}, 岳皓钰^{1,3,4}, 张双婷^{1,3,4}, 李籽仪^{1,3,4}, 陈赓^{1,3,4}, Ram Proshad^{2,3}, 赵转军^{2*}

1 兰州大学, 资源环境学院, 甘肃兰州 730000; 2 中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地环境演变与调控重点实验室, 成都 610041; 3 西部环境重点实验室, 甘肃兰州 730000; 4 甘肃省环境污染预测与控制重点实验室

摘要: 农田土壤镉污染及其对农产品的影响已引起人们的广泛关注。为了解决这一问题, 各种材料的土壤调理剂被广泛应用于土壤中镉的固定化。然而, 复合调理剂对碱性土壤中镉含量的调节及小麦成熟过程中根系代谢物的变化尚不清楚。采用生物炭(BC)、腐植酸(HA)和生物炭与腐植酸的组合修复弱碱性镉污染土壤。BC 与 HA 配比为 0.5:0.5 的土壤调整剂显著降低了土壤中 DTPA-Cd 含量至 $0.183 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这种减少可能是由于复合土壤调理剂在土壤中形成镉金属配合物, 导致土壤环境中有效镉含量降低。每个处理组都有效降低了小麦植株在土壤中积累 Cd 的能力, 如图 8 所示。小麦植株对土壤 Cd 的吸收效率由 BCF (bioconcentration factor) 值决定, BCF 值代表重金属从土壤到植株的运输能力。与对照相比, 各处理均降低了小麦植株对 Cd 的吸收, 减少幅度在 15.7%-26.9%之间。BC 和 BH2 处理在减少 Cd 从土壤到植物的转移方面特别有效, 导致小麦植株各部位 Cd 含量下降。复合调理剂提高了土壤整体质量。本研究还观察到小麦根系代谢产物在成熟期的显著变化, 其中脂质代谢显著上调。这些发现为弱碱性农田土壤 Cd 污染的修复提供了有价值的见解。

关键词: 土壤; BC; HA; Cd

作者简介: 孙国怀, 兰州大学, 2021 级环境科学与工程专业, 硕士研究生。

E-mail: zhaozj@imde.ac.cn

碳球负载纳米零价铁活化过硫酸盐去除水中恩诺沙星的研究

Study of Carbon-Spheroid-Loaded Nano-Zero-Valent Iron-Activated Persulfate Removal of Enrofloxacin from Water

赵乐依, 刘健, 路平, 朱雪强*

中国矿业大学环境与测绘学院

摘要: 恩诺沙星(ENR)具有稳定性强、难分解、易富集等特性,虽然在环境中总体浓度较低,但长期低剂量暴露可能对人体健康和生态环境带来极大风险。因此采用碳球负载纳米零价铁(Fe@C)活化过硫酸盐(PS)去除水体中的 ENR。采用两步碳热还原法制备了碳球负载纳米零价铁(Fe@C)并进行了表征;采用单因素实验分析法研究了不同条件对 Fe@C 活化 PS 降解 ENR 的影响及降解动力学;通过自由基及降解产物分析推测出 Fe@C 活化 PS 降解 ENR 的反应机制与降解路径。探讨了温度、Fe@C 投加量、PS 浓度、ENR 初始浓度和 pH 对 ENR 降解的影响。结果表明,ENR 的降解符合准二级动力学,在温度为 25℃、Fe@C 投加量为 0.3g/L、PS 浓度为 1mM、ENR 初始浓度为 10mg/L、pH 值为 3 的条件下,去除率最高达 98.6%。腐殖酸(HA)、氨氮(NH₃-N)、碳酸氢根离子(HCO₃⁻)对 ENR 的降解率有抑制作用,ENR 降解率随着 HA、NH₃-N、HCO₃⁻浓度的升高而降低。氯离子(Cl⁻)在低浓度时有微弱的促进作用,高浓度时对 ENR 的降解有抑制作用。自由基淬灭实验证实了参与反应的主要自由基为 SO₄^{·-}和·OH,其中 SO₄^{·-}占主导地位。根据溶液中 Fe²⁺、Fe³⁺浓度变化,提出了 Fe@C-PS 降解 ENR 的反应机制。通过 HPLC-MS 分析了 ENR 的中间产物和降解途径,推测出哌嗪环的裂解、喹诺酮环的分解及脱氟为 ENR 主要降解途径。碳球负载纳米零价铁活化 PS 高级氧化工艺可作为一种高效去除有机污染物的工艺。

关键词: 碳球负载纳米零价铁; 过硫酸盐; 恩诺沙星; 降解途径

作者简介: 赵乐依, 2021 年获得华北水利水电大学学士学位,现为中国矿业大学研究生,主要研究领域为土壤与地下水修复。

E-mail: zhaoleyi1999@163.com

地下水中纳米颗粒的原位形成及其环境效应

郭元杰¹, 王朋^{1,2*}

1 成都理工大学生态环境学院, 四川成都, 610059; 2 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都理工大学, 四川成都, 610059

摘要: 处于低渗透区的环境修复一直是挑战重重的问题, 近年来, 原位生成纳米颗粒技术已经崭露头角, 为解决这些问题提供了一种创新的方法。深入探讨了在低渗透区原位生成纳米颗粒的原理和应用, 强调了这一技术的巨大潜力。深入研究了通过在地下注入适当的前体物质, 结合先进的纳米技术, 纳米颗粒可以在原位生成, 使用正硅酸四乙酯 (TEOS) 通过水解缩合过程产生 SiO_2 纳米颗粒, 产生的 SiO_2 纳米颗粒能够增大有机污染物的流动性; 通过调控水化学条件原位形成具有高反应活性的纳米颗粒, 溶解态的铁和锰可以通过水解反应自发地转化为纳米颗粒状金属氧化物, 能够影响还原活性有机物在环境中的命运; 矿物表面形成金属纳米颗粒, 如纳米零价铁能够快速而有效地去除多氯联苯(PCBs)、重金属、卤代烃等多种污染物。这一方法解决了预制的纳米颗粒的稳定性问题以及在地下长距离难输送问题, 并实现了地下水污染的有效修复, 减轻了环境负担, 对于环境保护和可持续发展具有重要意义。

关键词: 暴露参数纳米颗粒; 原位生成; 低渗透区; 地下水污染

作者简介: 郭元杰, 成都理工大学生态环境学院硕士研究生, 研究方向: 低渗透区原位生成纳米颗粒。

E-mail: 1453536760@qq.com

多环芳烃与粘土矿物界面反应过程中持久性自由基的产生和稳定

Generation and stabilization of persistent free radicals during interfacial reaction
between polycyclic aromatic hydrocarbons and clay minerals

张丽¹, 王朋^{1,2*}

1 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059; 2 成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

摘要: 环境持久性自由基 (environmental persistent free radicals, EPFRs) 是一种新型环境污染物, 具有高反应活性和长效性, 能对人体和生物造成损伤。多环芳烃 (PAHs) 是由两个及以上的苯环簇状排列键合形成的有害的有机化合物, 含有不饱和的苯环结构分子, 其结构含有较多的离域电子, 在与氧化性高的物质接触时可充当电子供体。粘土矿物通常被认为是土壤中化学活性最强的一类成分, 其独特的层状结构和带负电荷使得层间存在大量阳离子, 因此粘土矿物可作为电子受体接收电子。目前已有多种粘土矿物显示出明显的吸附多环芳烃的能力, 多环芳烃首先通过物理吸附直接与粘土矿物络合, 然后将一个电子转移给粘土矿物层间的阳离子, 形成的有机阳离子自由基在粘土矿物层间得以稳定, 生成的种类、数量以及形成机制均会随着粘土矿物的结构和污染物特性的不同而改变, EPFRs 的生成位点也存在争议。本研究选取粘土矿物中的 2:1 型的硅酸盐矿物-蒙脱土作为实验载体, 蒽作为多环芳烃的代表污染物, 研究了蒙脱土界面上作用位点和蒽转化生成持久性自由基的机制, 通过电子顺磁共振光谱 (EPR) 对自由基信号进行检测, 发现了蒙脱土上长达 50 天的自由基的存在, 其 g 值在 2.0024-2.0036 之间, 属于碳中心自由基和氧中心自由基的混合自由基, 自由基的强度随着时间变化总体呈现先增后减的趋势。

关键词: 粘土矿物; 多环芳烃; 环境持久性自由基; 界面反应

作者简介: 张丽, 成都理工大学生态环境学院 2022 级硕士研究生, 研究方向为地下水位波动对包气带持久性自由基形成和稳定性的影响机制。

E-mail: 1105313008@qq.com

天然和人为源 DOM 对多孔介质中 NAPL 残余相迁移行为的影响研究

Study of the effect of natural and anthropogenic sources of DOM on the migration behavior of NAPL residual phases in porous media

李尚燕¹, 王朋^{1,2*}

1 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059; 2 成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

摘要: 非水相有机污染物(NAPL)下渗至土壤地下水后, 可吸附截留在固体介质表面形成 NAPL 残余相。天然和人为源溶解性有机质(DOM)作为土壤地下水生态系统中普遍存在的组成部分, 是一类结构复杂、来源广泛的非均质溶解性有机化合物, 因其含有疏水性的芳香族、脂肪族基团和亲水性的含硫、含氧/氮等官能团, 能与有机污染物产生吸附、结合、氧化还原等相互作用。不同来源 DOM 在 NAPL 残余相多孔介质中迁移行为存在显著差异。目前基于 NAPL 残余相对 DOM 在多孔介质中的迁移机制影响研究仍然缺乏。因此考虑 DOM 在 NAPL 残余相中的迁移行为对土壤固碳和有机污染物控制的协同具有重要意义。本研究以不同源释放的 DOM(生物炭溶解性有机质 BCDOM、腐殖酸溶解性有机质 HADOM)为研究对象, 探究不同来源 DOM 在多孔介质中的迁移规律, 采用 Hydrus-1D 软件对实验结果进行模拟, 利用紫外-可见吸收光谱(UV-Vis)和三维荧光光谱法(3D-EEM)分析不同来源 DOM 在迁移过程中结构组成和性质变化。一维柱实验结果表明 BCDOM(10mg/L)流出液平台期 C/C_0 在纯砂柱中均大于 99%, 在正十六烷残余相砂柱中平台期 C/C_0 均值为 92.90%, 穿出时间提前 0.25PV; EEMs 图谱显示 BCDOM 流入液的荧光峰主要分布在区域 II、IV 和 V, 分别代表芳香蛋白类物质, 溶解性微生物代谢产物以及腐殖酸类物质, 纯砂柱中的 2、3、4 和 5PV 流出液的荧光峰主要在区域 V, 在正十六烷残余相砂柱中 2、3PV 流出液的荧光峰主要在区域 V, 4、5PV 流出液荧光峰出现在区域 IV。HADOM(8.189mg/L)在纯砂柱中平台期 C/C_0 均值为 91.60%, 在正十六烷残余相砂柱中穿出时间提前 0.25PV, 平台期 C/C_0 均值为 91.38%, 由于占据了一定的孔隙体积, 正十六烷残余相砂柱主要影响 DOM 的穿出时间, 同时对 BCDOM 的迁移阻碍作用更明显。

关键词: 溶解性有机质; NAPL 残余相; 多孔介质迁移

作者简介: 李尚燕, 成都理工大学生态环境学院 2022 级硕士研究生, 主要研究领域地下水固碳与污染控制协同。

E-mail: 1538921788@qq.com

不同聚集形式铁锰矿物颗粒对多孔介质中离子型污染物传输的影响

Effect of different aggregated forms of ferromanganese mineral particles on the transport of ionic pollutants in porous media

梅诗雨¹, 王朋^{1,2*}

1 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059; 2 成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

摘要: 铁、锰氧化物的单相反应性已被广泛研究, 但对于实际体系中的二元混合物颗粒聚集形态如何控制环境污染物的迁移和运输仍知甚少。为了弥补简单模型系统和复杂环境系统之间的差距, 有必要增加模型系统的复杂性, 并研究所涉及的相互作用机制及相互作用如何影响污染物的迁移转化。研究了离子型化合物 BPA 与活性矿物相关的化合物的氧化还原转化。模拟地下环境中铁锰氧化物的沉积形式, 模拟制备了针铁矿-二氧化锰(MnO_2)混合的涂层砂(MGCS1)与模拟针铁矿- MnO_2 在土壤表面生长的涂层砂(MGCS2)。通过使用填充有 MGCS1 和 MGCS2 的石英砂柱, 研究 BPA 在铁锰二元氧化物上的迁移及环境因素(如 pH 值、共存离子等)对迁移的影响。利用迁移模型预测 BPA 在针铁矿和 MnO_2 上的吸附和转化动力学, 揭示 Fe 和 Mn 氧化物混合物在流过条件下的反应性迁移, 研究结果将对预测氧化还原活性有机化合物的命运和运输以及开发用于环境修复具有重要意义。

关键词: 铁锰氧化物; 针铁矿; 二氧化锰; 双酚 A 迁移

作者简介: 梅诗雨, 成都理工大学生态环境学院硕士研究生, 研究方向: 多过程耦合迁移模型的非均质性贡献。

E-mail: 1023808355@qq.com

西南地质高背景区土壤—作物—农家肥系统镉循环

张晋龙, 雷梅

中国科学院地理科学与资源研究所, 资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100048

摘要: 我国西南岩溶地区叠加历史频繁的铅锌冶炼活动, 造成大面积耕地土壤镉超标, 继而将镉带入到农业活动循环中。但当地大量施含镉的农家肥(作物秸秆及畜禽粪污堆沤肥)在土壤-作物-农家肥系统的循环中被忽视。研究发现, 以研究区主要作物玉米和水稻为例, 仅有 11.11%-11.81%的镉随籽粒移除, 88.19%-88.89%镉又重新进入循环系统中。地质高背景和土法炼锌活动所形成的高镉土壤是造成农家肥镉含量高的主要原因, 土壤镉含量与农家肥镉含量成极显著正相关, r^2 为 0.713。在峨眉山玄武岩区、碎屑岩(主要为紫砂岩)区、碳酸盐岩区农家肥镉浓度较高, 分别为 1.78~4.56 mg/kg、1.89-6.15 mg/kg、1.24-4.87 mg/kg, 历史土法炼锌活动会加剧农家肥中镉的富集。当地每年每亩施用量为 1-3 吨, 使人们长期处于高镉农业循环中, 因此高镉污染地区农家肥镉污染问题不容忽视。

关键词: 地质高背景; 农家肥; 镉; 碳酸盐岩

作者简介: 张晋龙, 中国科学院地理科学与资源研究所博士生。

E-mail: zhangjinlong1019@igsrr.ac.cn

伴矿景天对重度镉污染农田土壤的吸取修复效果:八公顷的田间试验

Phytoextraction of highly cadmium-polluted agricultural soil by *Sedum plumbizincicola*: An eight-hectare field study

王雨阳^{1,2}, 周通^{1*}, 王文勇¹, 赵婕¹, 李柱¹, 葛延妍¹, 王朝阳¹, 吴龙华^{1*}, Peter Christie¹

1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 伴矿景天吸取修复是一项原位、环保、高效、适用于轻度镉污染土壤的修复技术, 但是其在重度镉污染土壤上的田间应用效果仍未可知。本研究选取位于云南省怒江州兰坪县的 8 公顷重度镉污染农田土壤 ($\text{pH } 5.61$, $\text{Cd } 2.58 \text{ mg kg}^{-1}$), 进行为期两年的田间试验, 评价伴矿景天在重度镉污染农田土壤上的吸取修复效果。第一季, 伴矿景天地上部的平均生物量干重、镉浓度及镉吸取量分别为 1.95 t ha^{-1} 、 170 mg kg^{-1} 和 339 g ha^{-1} 。第二季, 伴矿景天地上部的平均生物量干重、镉浓度及镉吸取量分别为 0.91 t ha^{-1} 、 172 mg kg^{-1} 和 142 g ha^{-1} 。经过两季的植物吸取修复后, 土壤的总镉和 CaCl_2 可提取态镉的含量分别从 $2.58 \pm 0.69 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $0.22 \pm 0.12 \text{ mg kg}^{-1}$ 下降到 $1.53 \pm 0.43 \text{ mg kg}^{-1}$ 和 $0.14 \pm 0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ 。逐步多元线性回归分析表明, 伴矿景天地上部 Cd 浓度和吸取量与土壤 CaCl_2 可提取态 Cd 浓度呈正相关, 而与土壤有机质含量呈负相关, 尤其是第一季。此外, 第一季根际土壤的 CaCl_2 可提取态 Cd 浓度含量与土壤 pH 呈负相关。伴矿景天镉的吸取量与土壤镉浓度的降低量之间存在差异, 因此当计算土壤 Cd 的植物吸取效率时, 应综合考虑植物地上部 Cd 的吸取量、种植模式、标准化的采样点以及 Cd 的淋滤和地表径流的损失量等多种因素的影响。综上, 伴矿景天吸取修复是一种能够有效修复重度镉污染农田土壤的技术, 其在大田尺度上的吸取修复效率受到土壤性质广泛变化的影响。

关键词: 超积累作物; 土壤镉污染; 原位生物修复; 土壤性质; 大田试验; 云南省

作者简介: 王雨阳, 中国科学院南京土壤研究所, 博士研究生, 主要从事农田土壤重金属污染植物修复的研究。

E-mail: wangyuyang@issas.ac.cn

代谢组学分析揭示不同基因型水稻对氯代有机污染物的代谢调控机制

Metabolomic analysis reveals metabolic regulation mechanism of chlorinated organic pollutants in rice (*Oryza sativa* L.) of different genotypes

武桃旗, 徐艳*

青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071

摘要: 氯代有机污染物 (COPs) 给农田生态系统带来了巨大的挑战, 而植物作为其主体备受关注。目前缺少植物对其体内 COPs 代谢降解能力的研究, 并且对降解过程中植物代谢水平上小分子的动态表达变化也知之甚少。本研究首先选取杂交稻、籼稻, 粳稻幼苗各两种, 在典型疏水性 COPs 林丹溶液中胁迫 48 小时后移入无林丹培养液中培养 9 天, 以研究不同基因型水稻对林丹累积及代谢能力的差异, 并对其进行了代谢组学研究。结果表明, 杂交稻对林丹吸收累积及代谢降解能力最高, 粳稻最低。代谢组学分析表明, 林丹胁迫会通过影响籼稻的脂质代谢, 杂交稻的氨基酸代谢和核苷酸代谢来抑制水稻的正常生理活动, 而粳稻会调节氨基酸代谢来抵御林丹胁迫。而随着林丹在水稻体内的降解, 第 9 天林丹降解效率高的籼稻和杂交稻的氨基酸代谢途径被激活以修复机体损伤, 而低降解效率的粳稻细胞由于长期处于一定林丹浓度胁迫下导致下调的差异代谢物增多, 氨基酸代谢、碳水化合物代谢及能量代谢被损伤抑制。本研究进一步选取亲水性 COPs 五氯酚钠 (PCP-Na) 进行了上述试验, 与响应林丹胁迫不同的是, 杂交稻相比其他水稻对 PCP-Na 具有低累积性和高代谢能力。不同基因型水稻对 PCP-Na 的胁迫响应存在很大差异以及解除胁迫后水稻本体在恢复过程中影响的代谢物也是随时间不断变化的。植物激素信号传导过程、苯丙酮生物合成、精氨酸和脯氨酸代谢及脂质代谢是水稻响应并抵御 PCP-Na 胁迫的关键代谢途径。本研究评估了不同基因型水稻对 COPs 的累积和代谢能力, 提供了其在 COPs 胁迫后的自我修复过程中的代谢分子层面的变化。在评估植物氯代有机污染风险效应, 保障作物安全等方面提供了新的视角。

关键词: 氯代有机污染物; 水稻品种; 植物代谢; 代谢组学; 林丹; 五氯酚钠

作者简介: 武桃旗, 青岛大学环境科学与工程学院, 硕士研究生, 主要从事有机污染物在植物体内的迁移转化、植物逆境分子生物学以及土壤微生物方面的研究。

徐艳, 青岛大学环境科学与工程学院, 副教授, 主要从事持久性有机污染物在土壤环境中迁移转化及环境归趋、氯代有机污染物的根-土界面行为过程及微生物学机制方面的研究。

E-mail: wu_guangqi7@163.com

E-mail: yanxu@qdu.edu.cn

黔西北耕地重金属空间分布、健康风险及环境阈值

杨利玉, 吴攀, 杨文弢

贵州大学, 贵阳 550025

摘要: 重金属通过农作物吸收、转运, 影响食品安全和人体健康。贵州省地处中国西南喀斯特中心, 生态环境脆弱。普遍认为, 贵州省土壤重金属来源主要有 2 个方面: 一是矿山、冶炼及农药等的人为来源; 二是含矿岩系风化成土过程等的自然来源。研究区六盘水市矿冶等人类活动叠加 Cd 高背景的影响, 加剧了区域农用地土壤中重金属累积。我国现行土壤质量标准《土壤环境质量农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)规定了农用地土壤重金属 Cd 的风险筛选值(RSV)和风险管制值(RIV)。该标准在湖南、福建、江苏等地区均能较准确地对重金属污染土壤进行分类。但由于中国地缘辽阔, 不同地区农田土壤环境质量差异较大, 同时不同区域土壤重金属污染来源复杂, 采用现行标准对 Cd 高质量分数土壤评价可能并不完全适用, 这或将制约地方政府对农用地的精确分类和管理, 限制当地的经济发展。本研究以黔西北六盘水市水城区水稻、玉米和蔬菜种植农用地为研究对象, 系统采集土壤-农产品协同监测样品, 在厘清该区域农田土壤和农作物可食部位中重金属的累积状况及分布特征的基础上, 讨论现行标准对该区域土壤评价的适宜性, 并基于物种敏感度分布曲线, 提出黔西北农田土壤 Cd 的健康风险基准值建议, 以期为黔西北高重金属质量分数农用地的精准分类和管理提供新思路。

关键词: 土壤重金属; 健康风险; 阈值; 空间分布

作者简介: 杨利玉, 博士二年级学生, 现就读于贵州大学资源与环境工程学院, 导师为吴攀教授。研究方向为土壤重金属污染与治理修复。

E-mail: 1574312376@qq.com

▶ 江苏省环保集团有限公司

江苏省环保集团有限公司是经省委省政府批准，于2019年成立的省属大型战略性环保产业集团，注册资本人民币50.94亿元。集团着力在大气和水环境治理、土壤污染治理与修复、固废安全处置、生态保护修复、农村环境综合整治、工业园区环境整治、生态环境监测监控建设运维等方面发挥作用。集团以打造国内领先国际一流高科技环保领军企业为目标，牵头推进全省重大环境基础设施建设，积极构建省市国有资本协同联动、各类资本积极参与的投融资体系，实现社会效益、环境效益和经济效益协同发展。

● 发展目标

国内领先、国际一流
高科技环保领军企业

● 主业板块

围绕“构建现代环境治理体系”总体要求，加快推动各项业务分步分项实施，重点打造“五大板块”，加强“双碳”核心技术研发，开展能源清洁低碳安全高效利用，推进低碳技术研发推广应用。



● 建设“三院两中心”



● 四大职能

- 01 全省重点环境基础设施建设工程的省级投资主体
- 02 统筹全省环境治理工作的重要抓手
- 03 引导省市国有资本联动发展环保产业的主要力量
- 04 全省环境治理技术研发和数据集成的重要平台

● 业务主体



-联系我们-

电话: 025-52372000 (总机)
传真: 025-52372888
邮件: jsep@jsep.com

地址: 中国南京市江东北路176号
邮编: 210036
网站: www.jsep.com

▶ 江苏省环境工程技术有限公司

江苏省环境工程技术有限公司（原江苏省环科院环境科技有限责任公司）是成立于1985年的江苏省环境科学研究院的事企分离改制单位，现隶属于江苏省环保集团，是专业从事环境科技研发、环保技术咨询、环境管理支撑、环境工程总承包的综合性高科技环保服务企业。公司拥有一支高水平人才队伍，现有员工超400人，其中硕博比例超75%，高级职称比例超30%。公司具备环境工程设计甲级、环保工程专业承包壹级、工程咨询等资质，是国家“科技示范企业”。

国家级课题 23 项	省部级课题 35 项	厅局级以上课题 100 余项	省部级平台 4 个
SCI、EI等论文 70 余篇	授权、申请专利 300 余项	制定标准 30 余项	出版专著 20 余部

江苏省环境工程技术有限公司土壤团队以服务为牵引、以工程为核心、以平台为支撑、以投资为杠杆，涵盖上游“土壤状况调查与风险评估”、中游“修复方案设计与工程实施”和下游“土地资源盘活与安全利用”的全链条产业布局；以“政府放心、业主满意、社会赞誉、伙伴共赢、全民共享”为宗旨，以市场为导向，以价值创造为目的，以科技创新和资本运营为手段，提供土壤环境整体解决方案和系统专业服务。在土壤领域，承担“十四五”国家重点研发计划项目、国家及省自然科学基金以及江苏省“333高层次人才培养工程”等各类高水平科研项目40余项，荣获省部级科学技术一等奖1项、二等奖1项。

● 定位

关键技术研发
“先锋队”

环境管理支撑
“顶梁柱”

污染修复工程
“主力军”

产业健康发展
“领头羊”

● 土壤板块重点方向



● 示范工程



土壤地下水污染修复
(南京)



土壤地下水污染风险管控
(泰州)



污染地块综合环境整治
(南通)



农用地土壤安全利用
(南京)

-联系我们-

电话: 025-52372182 (总机)
邮件: jsep@jsep.com

地址: 中国南京市建邺区嘉陵江东街8号
邮编: 210036



森特士兴环保科技有限公司
Center Environmental Protection Technology Co., Ltd.

一方净土·一处安心

森特环科简介 COMPANY PROFILE

森特士兴环保科技有限公司是森特士兴集团股份有限公司(股票代码:603098)全资子公司,始终秉持“一方净土、一处安心”的初心,致力于为客户提供生态环境治理领域全流程综合解决方案。

资质荣誉 QUALITY AND HONOR



- 公司拥有土壤和地下水修复治理领域有效专利共计53项
- 中华人民共和国软件著作权证书31项
- 2019年度环境保护科学技术奖二等奖
- 2021年度环境技术进步奖二等奖
- 2022年度生态环境保护实用技术名录
- 2023年度中国仪器仪表学会科技进步二等奖
- 2022年浙江省污染地块调查评估和修复治理从业优秀单位
- 北京市专精特新小巨人企业
- 北京市设计创新中心
- 博士后科研工作站
- 新技术新产品证书10项
- 参编标准8项

业绩概况 PERFORMANCE OVERVIEW

- 土壤与地下水治理服务足迹遍布**13**个省、直辖市和自治区

- 业绩涉及**9**种行业:

(钢铁行业、化工行业、农药行业、石油炼化行业、有色冶金行业、机械制造业、稀土金属加工行业、电镀行业、重型装备制造业、在产企业)



首都某钢厂地块污染治理项目



合肥某钢厂地块污染治理项目



天津某农药公司地块污染治理项目



浙江某旧址公园地块污染治理项目



甘肃某石油炼化地块污染治理项目



山东某造纸厂地块土壤处置及阶段性地下水监测项目



贵州某铝厂地块污染治理项目



安徽某化工地块污染治理项目



重庆某钢厂地块污染治理项目



森特土壤修复研究院(深圳)有限公司
Center Soil Remediation Research Institute (Shenzhen) Co., Ltd

森特研究院简介 COMPANY PROFILE

森特土壤修复研究院(深圳)有限公司致力于将森特研究院打造成为国际领先的土壤与地下水污染科学识别与综合服务专业平台,构建美丽中国数字化治理体系,建设绿色智慧的数字生态文明,加快推进人与自然和谐共生的现代化。

研发成果 RESEARCH ACHIEVEMENT



业绩概况 PERFORMANCE OVERVIEW

承担70+ 推动20万+ 加速25+ 释放40万+ 总计300万+
地块调查工作 平方米可利用土地 地块土地流转进程 平方米可利用 平方米土壤环境
进入招拍挂流程 土地空间 质量调查

■ 地下水及土壤气数字感知系统
■ 水井(INTAI-PRO)



广州工控环保科技有限公司
Guangzhou Industrial Holding Environmental Protection Technology Co., Ltd

工控环科简介 COMPANY PROFILE

广州工控环保科技有限公司致力于土壤与地下水治理,聚焦先进装备生产制造、数字化感知终端应用、工程化服务三大方向,业务涵盖相关咨询、设计、运营、管理等全产业链条,为客户提供土壤与地下水治理、绿色园区智能污染识别与源头防控系统解决方案。



森特士兴集团股份有限公司
Center International Group Company Limited



广州工业投资控股集团有限公司
GUANGZHOU INDUSTRIAL INVESTMENT HOLDINGS GROUP

土壤与地下水治理行业
领军企业

2022 中国企业500强第147位
2023《财富》世界500强第414位

业绩概况 PERFORMANCE OVERVIEW



广州某农药厂地块污染治理项目



广州某溶剂厂地块污染治理项目



广州某旧城旧厂地块场地调查项目

森特环科 ☎ 010-67856668 📍 北京市经济技术开发区永昌东四路10号院1号楼
森特研究院 ☎ 18010463052 📍 深圳市宝安区沙井街道沙头社区金沙一途25号金沙名都A301
工控环科 ☎ 020-81338103 📍 广东省广州市荔湾区花地大道南657号岭南V谷园区C1栋1502



中建八局环保科技有限公司

CSCEC 8TH DIVISION ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CO., LTD.

企业简介

中建八局环保科技有限公司（简称环科公司）是中国建筑第八工程局有限公司（简称中建八局）为响应国家生态文明建设号召，贯彻落实中建集团创新发展战略而成立的生态环保专业化公司。环科公司以“**中建领先的生态环境综合治理服务商**”为发展定位，坚持“科技引领、创新驱动”，联合高校及科研院所，设立院士工作站，建设生态环境工程研究中心，构建产学研用融合发展体系，在生态环境治理领域形成“**技术成果转化、咨询设计服务、投资建设运营**”三大核心竞争能力，致力于为客户提供一站式服务和全方位解决方案，助力中建八局打造“**修复+建设**”、“**治理+运营**”的综合服务能力。



企业资质

中建八局资质 —— 全国首批“三特三甲”资质企业

施工总承包资质

《 建筑工程
施工总承包特级 》

《 公路工程
施工总承包特级 》

《 市政公用工程
施工总承包特级 》

设计资质

《 市政行业甲级 》

《 建筑行业甲级
(建筑工程专业) 》

《 公路行业甲级 》

环科公司资质 —— “6+1”资质结构

施工资质

《 环保工程
专业承包一级 》

《 市政公用工程
施工总承包三级 》

《 河湖整治工程
专业承包三级 》

《 水利水电工程
施工总承包二级 》

《 地基基础工程
专业承包三级 》

《 防水防腐保温工程
专业承包二级 》

设计资质

《 环境工程设计专项
(污染修复工程) 乙级 》

业务体系

提供全方位的生态环境综合治理服务

聚焦“土壤修复、水务水环境、固废处置与资源化及综合类”等业务产品体系

以“建设美丽中国，拓展幸福空间”为企业愿景，贡献八局模式、八局科技





中建八局环保科技有限公司

CSCEC 8TH DIVISION ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CO., LTD.

研发平台

中国建筑生态环境工程研究中心

- 组织单位：中国建筑股份有限公司
- 承担单位：中国建筑第八工程局有限公司
- 依托单位：中建八局环保科技有限公司
- 建设期限：2021年7月-2024年6月

中国建筑生态环境工程研究中心 (土壤修复技术与装备)

CSCEC Eco-Environmental Engineering Research Center
(Soil Remediation Technology and Equipment)

中国建筑第八工程局有限公司
China 8th Division Environmental Technology Co., Ltd.

研发机构

1个国家级研发平台

与中科院南京土壤研究所共建土壤养分管理与污染修复
国家工程研究中心

1个院士工作站

围绕土壤、固废、新能源等领域，
引领生态修复的新兴产业发展

1个院士工作室

围绕水环境治理、膜技术、智慧管
网等，开展技术研发与工程应用

国家工程研究中心 土壤养分管理与污染修复 承建单位

住房和城乡建设部
2022年12月

中国工程院 吴明红院士工作站

中国建筑第八工程局有限公司

中国工程院 马军队院士工作室

中国建筑第八工程局有限公司

项目业绩

宝钢湛江钢铁基地土壤污染修复项目

- 围绕典型钢铁行业污染场地治理示范项目
- 重庆市“两江四岸”治理提升工程修复项目
- 国内单体最大污染土壤与废钢渣综合处置项目



徐州铜山区块状道路及相关公共区域修复项目

- 助力徐州市在“十四五”时期打造“无废城市”
- 治理-风险管控组合修复项目



广西大平山石南村土壤污染修复项目

- 采用“原址风险管控”方案
- 建设垂直防渗帷幕系统



古蜀蜀地遗址保护与土地综合整治项目

- 四川省场地再利用示范项目
- 交地为先，打造城市生态绿洲
- 泸州市镇发展规划示范项目



石家庄焦化厂厂区块状土壤污染修复工程

- 助力建设石家庄市老工业区搬迁改造示范区
- 原址原位、原址和异位处置技术组合修复项目



吴江区水系治理及农村水系综合整治项目

- 长三角生态绿色一体化发展示范项目
- 吴江区水城治理示范样板



广西防城港市海洋生态保护修复项目

- 海洋生态文明建设新突破
- 基于自然的海洋生态修复
- 全域生态与减灾协同增效



佛山市南海区水环境综合整治工程

- 长三角生态绿色一体化发展示范区的重大生态环保项目
- 致力打造“会呼吸的智慧生态河道”



电话：(021) 66156667

传真：(021) 66156067

中国·上海·宝山区·园泰路300号

No.300 Yuantai Rd., Baoshan Dist., Shanghai, China



佛山市铁人环保科技有限公司



(备注:地图中标绿部分为公司业务涉及区域)

佛山市铁人环保科技有限公司(以下简称“公司”)由广东省科学院生态环境与土壤研究所(以下简称“广东省土壤所”)和佛山市人民政府于2012年共同孵化成立,目前由佛山市水业集团有限公司旗下全资国企佛山市环境保护投资有限公司控股,是一家专注系统性土壤治理的综合服务商。公司致力于土壤健康事业,业务领域涵盖**农田治理、土壤修复、农业面源污染治理、全域土地综合整治与乡村振兴及技术服务、农产品提质增效防污染、产品销售、场地及地下水调查与修复、矿山修复**等,拥有环保工程专业承包、环保工程修复二级、土壤修复甲级等资质。

公司专利“降低农作物吸收重金属的纳米硅肥技术”先后参与6项国家级课题研究,“稻田镉砷污染阻控关键技术与应用”荣获(2019年)国家科学技术进步二等奖。公司核心产品“降镉灵”“喷喷富”叶面阻控剂可有效减少农作物吸收积累重金属,同时可大幅增加农作物产量,应用范围已覆盖广东、广西、湖南、湖北、贵州、四川、浙江、重庆、黑龙江、安徽、云南和江西等22个省(市),应用面积近600万亩。



联系我们

地址:广东省佛山市禅城区佛山国家火炬创新创业园E座3楼
全国服务热线:400-800-1025 网站:www.fstrhb.com



官方微博号



官方微信号



官方抖音号

佛山市铁人环保科技有限公司

专注于土壤治理

土壤医生

专注于农作物提质增产

作物营养师



核心技术产品



喷喷富 (中量元素肥料)

该产品是叶面硅肥,能有效阻遏重金属在植株体内的转运,还可促进作物生长、富硒,从而生产出安全优质的农产品。该产品已获有机生产投入品及绿色生产资料认定。



“丛枝菌根真菌”菌剂

该产品可提高作物对于干旱胁迫和重金属的耐受性,在抗盐抗碱、壮根壮苗、提质增产等方面作用显著。



降镉灵 (中量元素肥料)

该产品是叶面硅肥,可提高作物对重金属、农药的抗性,减少乃至阻断重金属、农药向食物链转移,成本低于其他重金属污染治理技术产品。



土壤改良剂

该产品是一种多元素协同作用的重金属土壤改良剂,对土壤中多种重金属如砷、镉、铅等具有钝化功能,可改善土壤结构、提升土壤肥力。

叶面硅肥产品的三大主要功效

提质

富硒:提高有机质含量,解钾硅肥后可提高农产品的含硒量,且有机硒可达各类作物富硒标准,从而大大提高农产品价格与价值;

截果:能有效促进植物的快速生长发育,如提高种子萌发和根根系活力,促进营养的吸收和植物新陈代谢,提高光合作用3-5倍和叶绿素含量等,达到提高品质的效果;

提高抗性:增强植物生物抗氧化作用及对环境胁迫的抗性,提高农作物的抗病抗逆能力,而且对部分种植土壤重金属含量超标具有很大的缓冲作用。

增产

可大幅增加农作物产量,增产率为**5-20%**

其中:

粮食作物增产**8%-12%**

瓜果蔬菜增产**6%-13%**

经济作物增产**9%-14%**

茶叶增产**10%-30%**

防污染

多年田间试验表明,在轻度、中度污染的农田施用后,可防止土壤中的镉污染,重金属传递到农作物可食用部位,有效减少农作物吸收积累重金属,可平均

降低农产品镉吸收

30%-70%

降低农产品砷吸收

20%-30%

联系我们

地址:广东省佛山市禅城区佛山国家火炬创新创业园E座3楼
全国服务热线:400-800-1025 网站:www.fstrhb.com



官方微信



官方微博



官方抖音号



盖亚科技

公司简介

COMPANY PROFILE

留给子孙一片净土

江苏盖亚环境科技股份有限公司成立于2012年8月,是国内首批从事土壤修复技术及专业设备自主研发并成功实现批量化生产和规模应用的国家高新技术企业,是国内首批担任科技部千万级国家重点研发计划项目的修复牵头单位公司。目前,公司累计自主申报254项专利,其中发明188项、实用新型65项、软著12项、国际PCT1项;公司已经联合多家高校和科研院所牵头2项、参与1项国家千万级重点研发项目。公司现有员工150人,其中研发人员占比30%,全国设立子分公司12家,累计完成土壤修复、土壤调查、生态修复等项目2100例,覆盖全国20多个省级地区。

发展策略

- 核心: 自主科技创新
- 目标: 土壤修复行业领跑者
- 策略: 通过全国网络布局为客户提供从前端场调到后端修复的一站式解决方案
- 优势: 全面性、全国性、定制性、首创性

资质

- 环保工程专业承包壹级
- 建筑装饰装修工程专业承包贰级
- 环境工程专项设计乙级
- 市政施工总承包叁级



电话: 13236566596
网址: www.jsgaiya.cn
邮箱: info@jsgaiya.cn



江苏省苏州市工业园区唯正路8号唯亭科技创业大厦7楼



江苏盖亚环境科技股份有限公司

核心装备

- 1 盖亚环保机器人 GY-ROBOT
- 2 盖亚环保智能盒 GY-BOX
- 3 盖亚热脱附设备 GY-HOT
- 4 盖亚淋洗设备 GY-SW

技术实力



场地土壤污染成因与治理
技术——“污染场地土壤及地下
水原位采样新技术与新设备”项目
——3958 万元



场地土壤污染成因与治理
技术——“污染场地土层剖面钻
进探测一体化技术与装备”项目
——5803 万元



苏州市工业园区唯正路8号

唯亭科技创业大厦7楼



13236566596

15995777488





提供环境污染体一体化解决方案

1

COMPANY PROFILE

公司简介

无锡西玖环保科技有限公司成立于2010年,是一家专业从事污染治理与环境保护的高科技公司,为客户提供专业的环境保护以及全生命周期的清洁生产解决方案。公司作为无锡市太湖人才A类企业,是无锡市政府重点支持的高新技术企业,是“江苏省专精特新中小企业”。我们相信技术创新是企业可持续发展的推动力,公司坚持走科技兴企之路,长期与污染场地安全修复国家重点实验室、中科院、清华大学、南京大学和同济大学等科研院所保持合作关系。目前公司主要经营场地污染及地下水修复装备,根据功能侧重点不同,可细分为土壤淋洗装备、注入系统、气相/多相(SVE/MPE)抽提设备、尾气处理设备。

2

BUSINESS AREA

业务领域



以服务感动客户

用技术回馈自然



中科鼎实环境工程有限公司
CHINA STATE SCIENCE DINGSHI ENVIRONMENTAL ENGINEERING CO.,LTD



聚心聚力 创造绿色家园
Agglomerate Mental Efforts to Build A Green Home

中科鼎实环境工程有限公司成立于2002年，是致力于环境综合治理的国家级高新技术企业，凭借核心技术和人才优势、管理和运营经验，成为集环境修复技术研发、设计咨询、项目投资、工程建设、运营管理为一体的环境修复综合服务商。

研发优势

研发中心具有：申请和承担国家或地方重大科研项目能力；自主研发大型专业设备、药剂能力；技术引进与再开发能力；快速有效解决工程现场技术问题能力



拥有发明专利百余项

项目类别	项目名称
国家重点研发计划项目	农药行业场地异味清除材料与控制技术
	京津冀及周边焦化场地污染治理与开发利用技术研究集成示范
	长江经济带石化类场地污染治理技术研究集成示范
	粤港澳大湾区污染场地安全利用保障技术与集成工程示范
	复合有机污染场地原位热修复耦合修复技术与装备
国家863项目	中国城镇污染农田综合防治与修复技术示范
	西北煤化工场地污染综合防治集成技术与工程示范
生态环境部标准	含氯代有机物工业废物处理技术与示范工程
	污染土壤及场地修复评估及综合集成与管理体系
	污染土壤修复工程技术规范 异位热脱附

将研发创新作为核心竞争力和市场驱动力，致力于建设行业领先的技术体系

企业资质

中科鼎实具有环保工程专业承包和地基基础工程专业承包一级、市政公用工程总承包二级、环境工程专项设计乙级、工业清洗、知识产权管理体系、质量环境职业健康安全管理体系及重点省市环境污染治理、施工、设计等专业资质。



企业业绩

近年来，中科鼎实工程项目遍布全国，实施了包括北京焦化厂保障性住房地块及政府储备土地污染土壤和地下水综合治理修复项目、首钢园区焦化厂原料地块/精苯地块土壤修复项目、江苏农药集团2号地块污染土壤和地下水

治理项目、原长沙铬盐厂国际治理深度最深的垂直柔性阻隔修复工程等在内的多项具有影响力的重大环境修复项目，不断打造行业名片。

Http://www.cssds.net 地址：北京市朝阳区望京北路51号院4号楼





浙江卓锦环保科技有限公司

浙江卓锦环保科技有限公司成立于 2003 年，2021 年 9 月 16 日成功登陆科创板，股票简称卓锦股份，股票代码 688701。

目前公司主营环保综合治理服务和环保产品销售与服务两大板块。作为优秀创新型企业，卓锦股份已成为一家面向全国，综合实力位居前列的环保公司，至今已累计承接市政工程、工业废水废气治理、土壤修复治理、河道生态治理等项目数百个，为改善城乡环境、建设生态文明作出了贡献。

资质管理作为公司承接业务和开展项目的基础，目前公司已具有住建部门颁发的环保工程专业承包壹级资质证书、电子与智能化工程专业承包贰级资质证书，环境工程（水污染防治工程）专项设计甲级、环境工程（污染修复工程、大气污染防治工程）专项设计乙级资质证书；机电工程施工总承包叁级资质、市政公用工程施工总承包叁级资质；环境污染治理设施运营服务能力评价证书、环保管理服务能力评价证书等。

公司作为国家级高新技术企业，始终以高新技术的研发和研发成果的转化为动力，建立浙江省级博士后科研工作站，获批浙江省省级企业研究院，获批省级企业技术中心，与浙江大学联合成功申报“水污染控制浙江省工程实验室”，在土壤及地下水修复领域形成了高浓度六价铬等重金属长效稳定化技术、土壤地下水原位注入和循环抽提联合修复技术、有机污染土壤高效化学氧化及异味控制技术等多项核心技术。

卓锦股份将继续坚持“诚信、责任、专业、团队”的经营理念，采用现代化的企业管理模式，培养一批学习型、知识型的管理人员，打造一支高素质专业化的员工队伍，来更好的满足市场的需求，为广大客户服务，为美丽中国建设作出贡献。





中国船舶集团

中国船舶集团有限公司是按照党中央决策、经国务院批准，于2019年10月14日由原中国船舶工业集团有限公司与原中国船舶重工集团有限公司联合重组成立的特大型国有重要骨干企业，是全球最大的造船集团。

CSSC 中船绿洲环保(南京)有限公司 CSSC LUZHOU ENVIRONMENT PROTECTION (NANJING) CO., LTD.

中船绿洲环保(南京)有限公司,成立于1958年,隶属中国船舶集团,是国家环保产业协会常务理事单位,国家水污染治理委员会常务委员单位,江苏省、南京市环保产业协会副会长单位。公司属于国家高新技术企业、“专精特新”中小企业、南京市环保专业龙头企业,拥有江苏省技术中心、南京市级工程中心。

公司构建土壤修复、固(危)医废处置资源化、船舶防污染、多元化产业(垃圾处置、废水处置、餐厨垃圾处理等)的“3+X”产业布局,建设“资本引导、科研支撑、制造实施、运维服务”全产业链体系。

公司肩负军工央企使命担当,坚持以客户为中心,以“改善人居环境、服务美好生活”为使命,秉承“深耕市场、科技引领、客户至上、不懈奋斗”理念,致力发展为国内一流环保产业引领者、环境治理综合解决服务商。



地址:南京江宁滨江开发区宝象路68号

电话:025-84769620

网址:WWW.NJ-LZEP.COM

传真:025-86723747



MCC 中冶南方都市环保

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司（简称“中冶南方都市环保”、英文缩写“CCEPC”），是中国五矿旗下，由中冶南方工程技术有限公司控股的国家级环保高新技术企业，于2000年在国家自主创新示范区——武汉东湖新技术开发区注册成立。

在能源清洁高效利用，固废处理，污水污泥处理，废气治理，环境修复，五大主营业务领域，为海内外众多客户提供了环境保护，资源综合利用工程的投融资、技术开发、设计咨询、设备成套、总承包建设、运营管理等服务。

坚持以设计和研发为基础，
以自主知识产权和高新技术为核心，
以优秀的管理能力为依托，

成为能源环保领域系统
解决方案的
提供商和实施商。

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司

- 地址：武汉市东湖新技术开发区流芳路59号
- 网址：www.ccepc.com
- 邮编：430205
- 电话：027-81302951





MCC 中冶南方都市环保

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司（简称“中冶南方都市环保”、英文缩写“CCEPC”），是中国五矿旗下，由中冶南方工程技术有限公司控股的国家级环保高新技术企业，于2000年在国家自主创新示范区——武汉东湖新技术开发区注册成立。

在能源清洁高效利用，固废处理，污水污泥处理，废气治理，环境修复，五大主营业务领域，为海内外众多客户提供了环境保护，资源综合利用工程的投融资、技术开发、设计咨询、设备成套、总承包建设、运营管理等服务。

坚持以设计和研发为基础，
以自主知识产权和高新技术为核心，
以优秀的管理能力为依托，

成为能源环保领域系统
解决方案的
提供商和实施商。

中冶南方都市环保工程技术股份有限公司

- 地址：武汉市东湖新技术开发区流芳路59号
- 网址：www.ccepc.com
- 邮编：430205
- 电话：027-81302951





江苏大地益源环境修复有限公司

Jiangsu DBBS Environmental Remediation CO.,LTD.

注册于2020年9月

DBBS 大地益源环境修复有限公司

完成威立雅环境集团的战略并购，正式成为中国土壤修复领域最具品牌、专业优势和综合实力的中外合资企业。其目标是打造全球土壤及地下水修复工程技术中心和国际一流的环境修复企业。

注册于2009年9月

DBBS 江苏大地益源环境修复有限公司

中国土壤修复领域创新技术的先行者。凭借技术能力、工程经验和专业团队优势，多次获得“土壤修复领先企业”称号，是国内该领域最有影响力的修复企业之一。

创立于1853年

VEOLIA 法国威立雅环境集团

世界500强企业和全球环境服务领域的领头羊，具有环境治理综合实力、全球化市场布局和企业长期发展经验等方面的领先优势。

公司概况 >>>

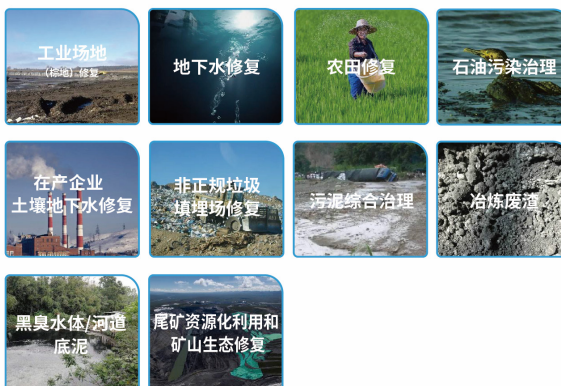
COMPANY PROFILE

大地益源环境修复有限公司，将依托威立雅集团的品牌、资本、技术等综合优势，充分发挥合资企业国际合作的能动作用，积极拓展与国内外企业、科研、高校及地方政府的战略合作，广泛吸收海内外的专家、技术骨干和优秀后备人才，坚持规范、技术和环境友好的可持续方向，加快实现公司的愿景目标，助推中国土壤及地下水污染治理与国际接轨，为中国环境服务事业的发展做出贡献。



业务领域 >>>

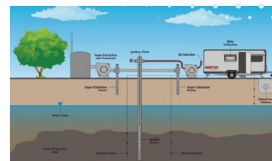
BUSINESS AREA





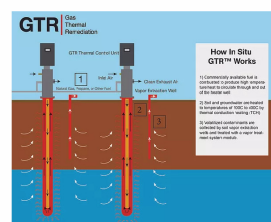
阴燃技术——STAR

阴燃技术-STAR 基于阴燃机理的创新原位热技术,用以治理石油烃、煤焦油、矿物油、新兴污染物等多种有机物或非水相液体污染的介质,包括但不限于土壤及各类油泥。低能耗、可处理高含水率物料等优势使此技术在油气、固废/危废处置、化工、市政等领域环境管理上极具潜力。



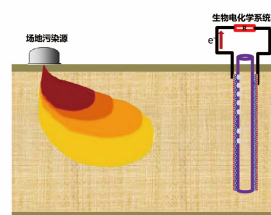
燃气热脱附技术——GTR

燃气热脱附技术-GTR 以天然气或液化石油气为燃料提供热源,通过热传导加热目标修复区域,同时通过动力控制,用抽提并抽取地下土壤气、蒸汽等。适用于所有不同性质土壤,及各类挥发性、半挥发性有机污染物,深度不限,系统可扩展,原位、异位均可,治理时间短,易于落实,对场地基础条件要求较低



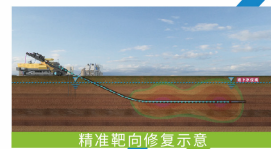
微生物电化学氧化技术——E-Redox (O)

应用于在企业污染地下水修复,主要是石油污染场地好氧强化生物修复;基于微生物燃料电池机理,在已有地下水观测井或注射井,安装电极来提供不枯竭的电子受体,强化苯系物、石油烃等地下水污染物的好氧生物降解。



国家重点研发计划课题项目

大地益源牵头承担了国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”专项项目“地下水原位修复功能材料精准注入与强化传输技术及装备研究 (2018YFC1802400)”,依托此项目研制了导向钻进-喷注一体化的技术与装备系列,实现了地下水原位修复药剂的分层、定向精准注入;完成了在地表(地下)构筑物下面的污染地下水修复;突破了传统修复药剂注入技术的影响半径限制;创新地利用水平多分支井技术实现了单井长距离、大范围的污染地下水修复,建立了原位立体地下水修复体系。



精准靶向修复示意



实物钻机



北京金隅红树林环保技术有限责任公司成立于1999年，隶属于北京金隅集团股份有限公司，是专业从事危固废处置、资源综合利用、污染场地修复的环保企业，是危固废领域提供一揽子解决方案的综合服务商，为政府部门、产废单位、危废运营单位提供多元化的环保服务。



公司2005年成功处置北京地铁五号线含六六六、DDT污染土壤3.5万吨，成为国内首家开展污染土壤处置的专业化企业。近二十余年来，公司承担了北京市大部分污染场所产生的污染土壤的终端处理工作。成功完成北京市某化工厂、化工二厂、有机化工厂、涂料厂、农药厂、煤焦油站、焦化厂、油毡厂等，河北省某焦化厂、制药厂、冶金矿山机械厂、雄安新区铝灰钢渣项目，安徽合肥叉车厂等30多项污染场地修复项目，累计修复污染土壤300多万方，处理污染物包括镍、汞、砷、铜、镉等多种重金属和二氯乙烷、氯乙烷、氯仿、苯胺、六六六、DDT、多环芳烃等多种有机污染物。



公司通过技术引进、自主研发、合作研究等多种方式，成功掌握了多项污染土壤修复技术，包括水泥窑协同处置技术、基于水泥窑的热脱附技术、常温解析修复技术、微生物修复技术、化学氧化/还原修复技术、多相抽提技术、气相抽提（SVE）修复技术、污染土壤阻隔填埋技术、植物修复技术等。公司正与国内诸多专业科研机构开展技术合作，积极探索有机污染土壤微波热修复、生物化学修复及高温热解析等土壤修复技术，致力于成为中国最专业的污染土壤修复服务商。



水泥窑协同处置技术

高温热解析修复技术

节温解析修复技术



植物修复技术

污染土壤阻裂填埋技术

植物修复技术



公众号：环境智汇

地址：上海市光复西路2666号

电话：021-31015230

邮箱：sicie_shhj@126.com



上海化工院环境工程有限公司

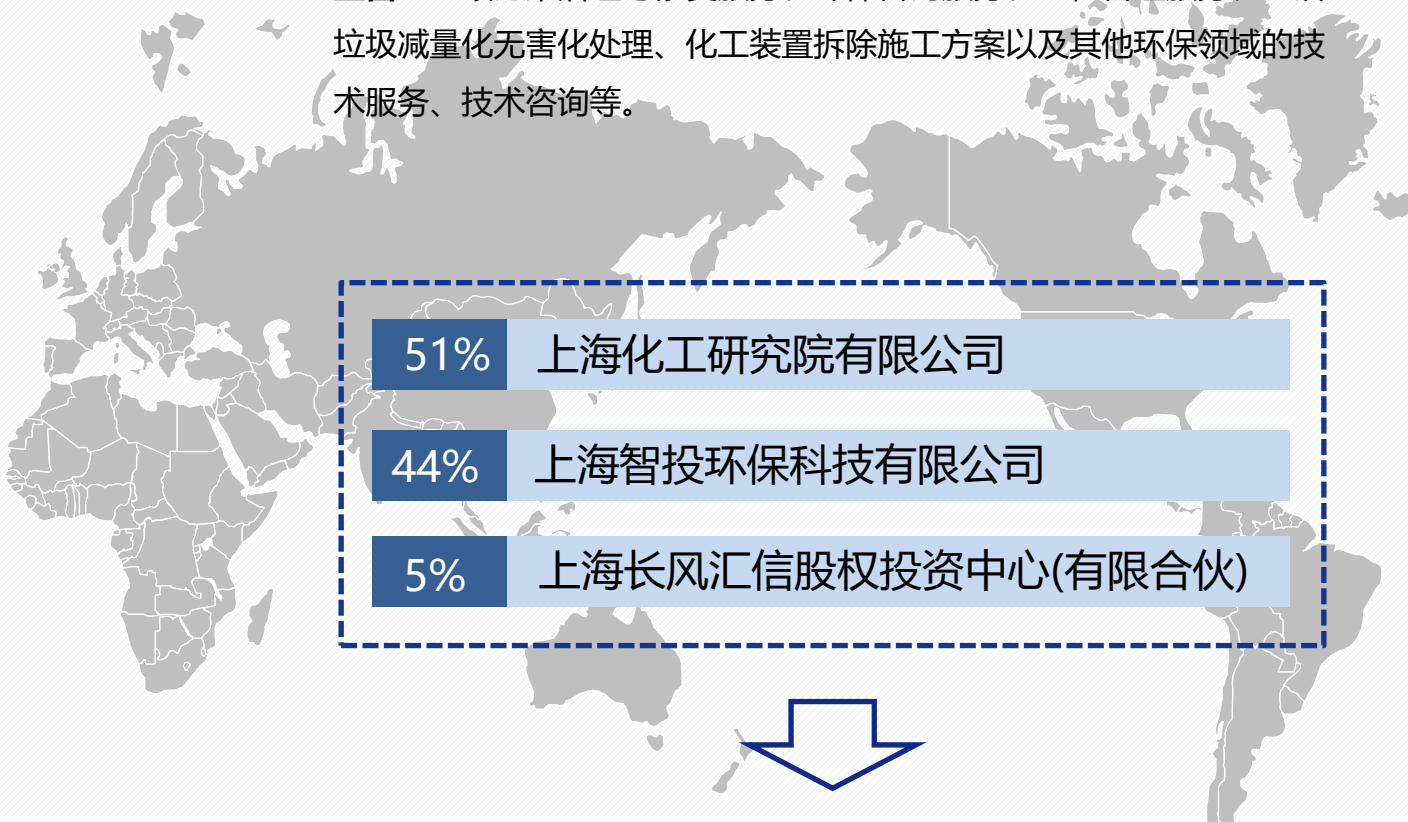
SHANGHAI INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY ENVIRONMENTAL ENGINEERING CO.,LTD





上化环境（SICIE）是一家依托上海化工研究院有限公司成立的专业从事环境保护的技术公司。

主营：土壤污染治理与修复服务、环保咨询服务、工程管理服务、生活垃圾减量化无害化处理、化工装置拆除施工方案以及其他环保领域的技术服务、技术咨询等。



51%	上海化工研究院有限公司
44%	上海智投环保科技有限公司
5%	上海长风汇信股权投资中心(有限合伙)



上海化工院环境工程有限公司

SHANGHAI INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY ENVIRONMENTAL ENGINEERING CO.,LTD

Lead Ecology and Environment to a Healthy Future



Eco-Environment & Health

Eco-Environment & Health (EEH) focuses on the concept of "One Health" to promote green and sustainable development, dealing with the interactions among ecology, environment and health, and the underlying mechanisms and interventions. EEH covers a variety of research areas, including but not limited to Ecological Safety, Environmental Health Risks, Ecological Restoration, and Environmental Remediation. The main topics of EEH include ecology and biodiversity conservation, environmental behaviors and bioprocesses of emerging contaminants, human exposure and health effects, and evaluation, management and regulation of environmental risks.

Editors-in-Chief



Guibin Jiang



Hongqiang Ren

Scopes

Ecology and Biodiversity Conservation

- Biodiversity
- Ecological restoration
- Ecological safety
- Protected area

Environmental and Biological Fate of Emerging Contaminants

- Environmental behaviour of emerging contaminants
- Environmental processes
- Environmental microbiology

Human Exposure and Health Effects

- Environmental health risk
- Environmental toxicology
- Food safety
- Environmental epidemiology

Environmental Risk Assessment, Management and Regulation

- Chemical safety
- Environmental policy
- Health policy
- Health economics
- Environmental remediation

Features

Fast peer review and publication

Fast peer-review processes (<3 weeks)

Accepted papers online within 1-3 weeks

Figure and language polishing

Dedicated figure design & language editing teams

Free professional figure & language polishing

One-on-one service

An exclusive assistant assigned to each manuscript

A dedicated track-tracing system

Enhanced submission & revision experience

Access anywhere, anytime

Gold Open Access for all articles

Free download anytime, anywhere

Free publishing for the first three years

Global promotion platforms

Five regional centers around the globe

Over 10 content promotion platforms

Highly professional promotion strategies



Follow us on Wechat



Follow us on Instagram



Follow us on Twitter @Eco-Environment & Health

E-mail eeh@nies.org
Website www.journal-eeh.com

Follow us on Facebook
<https://www.facebook.com/eehjournal>



Nanjing Institute of
Environmental Sciences, NIES



Nanjing University



ELSEVIER

Soil & Environmental Health

(英文简称SEH, 中文《土壤与环境健康》)

全英文开放获取国际学术期刊



SEH主题领域:

土壤与环境健康概念的科学基础
探索实施土壤健康概念的严谨案例研究
促进土壤、人类和星球综合健康的同一健康概念
不同土壤威胁和相关阈值的土壤健康指标
土壤与环境健康监测和制图
评估和模拟土壤与环境健康的方法
环境健康、土壤功能和生态系统服务之间的联系
可持续土壤与环境管理、修复及工程
土壤与环境健康政策及立法
土壤与环境健康经济学



SEH公众号

主办单位:
浙江大学

承办单位:
浙江大学环境与资源学院

出版商:
Elsevier

Soil & Environmental Health

(SEH—《土壤与环境健康》)

主编 Editors-in-Chief



朱利中

中国工程院院士

浙江大学求是特聘教授，博士生导师，国家杰出青年基金获得者，973项目首席科学家，英国皇家化学会会士，浙江省特级专家。兼任教育部环境科学与工程类专业教学指导委员会副主任、国家生态环境保护专家委员会委员、生态环境部土壤保护专家咨询委副主任、“十三五”国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项总体专家组组长、“十四五”国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项实施方案与指南编写专家组副组长、长三角区域生态环境协作专家委员会成员。担任《环境科学》副主编、《ACS ES&T Engineering》、《Front Environ Sci Eng》、《J Environ Sci》编委等职，曾任亚洲废弃物管理协会副理事长。2014年当选浙江省劳动模范，2017年获全国创新争先奖状。



朱永官

中国科学院院士、
发展中国家科学院院士

中国科学院城市环境研究所和中国科学院生态环境研究中心研究员、博士生导师，浙江大学求是讲座教授。2001年入选中科院“百人计划”，2002年获国家自然科学基金委杰出青年基金，2006年获中国青年科技奖、入选新世纪百千万人才工程国家级人才。曾经担任联合国国际原子能机构(IAEA)科学顾问、中国土壤学会土壤环境专业委员会副主任、中国原子能农学会副理事长、中国科学院城市环境研究所所长。长期从事环境土壤学和环境生物学研究，在典型区域土壤污染特征、元素生物地球化学过程与机制、土壤修复等方面取得了系统性的创新成果，先后主持国家自然科学基金委重大项目和中国科学院先导专项等。主要研究成果获得国家自然科学二等奖、发展中国家科学院(TWAS)农业科学奖和国际土壤科学联合会李比希奖。

执行主编 Executive Editors



马奇英 (Lena Q. Ma)

浙江大学求是讲座教授

浙江大学求是讲座教授、博士生导师，美国科学促进会会士，美国土壤学会会士，美国农学会会士。长期从事土壤重金属特别是砷的生物地球化学与环境修复技术方面的研究，是国际著名土壤化学家，也是环境生态领域最具影响力的华人科学家之一。入选科睿唯安2019年“全球高被引科学家”、斯坦福大学2020和2021年“全球前2%顶尖科学家”和全球学者库2022年“全球顶尖前10万科学家”榜单。2001年在Nature报道了世界上第一个砷超积累植物蜈蚣草，极大地推动了国际土壤砷污染植物修复的研究与应用。现任Crit Rev Environ Sci Technol主编，Chemosphere副主编。相关研究成果在Nature、Environ Sci Technol等发表SCI收录论文420余篇；据Web of Science，总引次数2.9万余次，H指数为81。



Randy A. Dahlgren

美国加州大学戴维斯分校杰出教授

美国加州大学戴维斯分校(UC-Davis)杰出教授(加州大学系统内最高教授荣誉称号)。主要从事土壤-水文-生物地球化学过程方面的教学和科研工作，兼任土壤科学Kearney基金负责人、牧场流域科学Russell L. Rustici首席教授、中央谷TMDL计划研究和技术支持负责人以及土壤和生物地球化学研究生项目副组长等。2006年当选美国土壤学会会士，2008年和2012年分别获得UC Davis杰出教学奖和本科学术成就奖。曾担任Ecological Monographs、Soil Science and Plant Nutrition和Journal of Integrated Field Sciences等期刊编委。至今已在Nature(4篇)、Science(1篇)、Glob Chang Biol、Water Res and Environ Sci Technol等SCI期刊上发表论文200多篇，据Web of Science，论文他引6200余次，H指数为45。

北京博诚立新环境科技股份有限公司成立于2007年，是一家提供污染场地评估、方案设计和修复工程完整解决方案的国家高新技术企业，2017年成功挂牌新三板，具有中关村瞪羚企业、北京市“专精特新”中小企业、科技型中小企业和中国环保优秀品牌企业等称号。

公司“地下水原位强化生物修复集成技术与应用”项目荣获国家环境保护科学技术奖二等奖、入选绿色化工园区适用技术。

污染场地 生物修复领跑者

诚实守信 尽责合作
卓越创新 客户至上



中国石油和化学工业联合会

关于公布“2021年绿色化工园区适用技术”名单的决定

各有关单位：
为贯彻落实国家产业政策，推动绿色化工园区建设的技术支撑，中国石油和化学工业联合会组织专家工作组，组织开展了“2021年绿色化工园区适用技术”征集工作，经专家评审，现将入选“2021年绿色化工园区适用技术”名单予以公布。

附件：“2021年绿色化工园区适用技术”名单



典型客户



腾格里沙漠污染事件蒸发池场地地下水原位强化生物修复工程



核心技术

原位强化生物修复技术

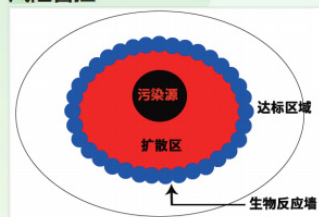
原理

特种功能生物菌剂原位注入
工程集成技术调控生境条件
微生物大量繁殖将有机污染物矿化降解

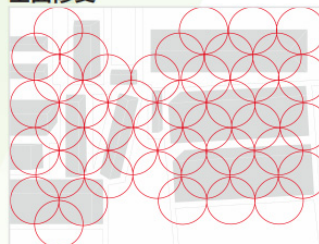
技术特点

施工简单, 扰动小
满足严格的地下水标准
低碳绿色, 保持土壤地下水生态环境功能
显著降低修复费用

风险管控



全面修复



异位强化生物修复技术



辽河油田井场生物堆修复工程

同步硝化/反硝化 高效脱氮技术

原理

反应链条短, 前期投入少
耗氧量低, 反应时间短
经济高效
污泥产生少, 运行成本低

应用场景

污水处理厂节能降耗改造
地表水体氨氮/总氮达标治理

厌氧脱卤 生物修复菌剂BS-1



菌剂特点

厌氧脱卤呼吸完全脱氯降解氯代烃
性能媲美国际知名KB-1菌剂, 填补国内空白

北京德严勘查技术有限公司

农业 / 牧业 / 林业土壤调查 Wintex 全自动取土钻机 ▶

Wintex土壤采样器旨在更大幅度地减少物理应变，使土壤采样快速、准确且具有成本效益。可以安装在很多种车辆之上其所有功能都可以遥控执行。结合GPS 系统让您准确记录采样地点并建立特定地点的肥料管理。Wintex 土壤采样器只需要很少的维护并且坚固耐用不易损坏这意味着您将拥有运行维护成本更低的设备来为您的工作保驾护航。



30米液压直推钻机 可建井 ◀ TEC 履带式取土钻机

AMK TEC系列履带式取土钻机是一款三位一体的多功能型环保采样钻机，本身兼具了出色的性能和很高的性价比，可以快速切换机身上的液压直推、双速回转和重力落锤功能，可以伸缩和摆头的钻架能够让您更方便调整角度常被应用于原状土壤采样、地下水监测并建设SPT标准贯入试验、DPSH高动态探针实验、多口径螺旋钻孔等，它是一款高集成性专业级土壤采样设备。



18匹马力 15米原状土取样 HPD60 液压取土钻机 ▶

犀牛HPD60钻机。拥有一台18匹马力的液压泵站从而实现柱状原状土取样工作。在过去通过客户数千个各种项目的不断反馈，证实了该钻机完全具备15米土壤取样的能力，它不但支持51mm钻杆，更是支持71mm钻杆进行土壤取样工作。



10米原状土取样 超轻手持式 ◀ Muilt-PRO 取土钻机

犀牛Muilt-PRO取土钻机（犀牛S1），是一台小型手持式的原状土采样设备，它可以完成0-10米之间的土壤采样工作，设备体积小，搭配上独特的运输拉车，使得该钻机非常便于运输。



400-668-9937

www.deyankeji.com

ZHONG 之井科技



天津市之井科技有限公司

天津市之井科技有限公司成立于2016年6月，位于天津市北辰区。是国家级高新技术企业，天津市“专精特新”企业。公司拥有各类知识产权40余项。公司主要研发生产成套气动降水设备、气驱排渗设备，主要应用在土壤修复、尾矿排渗、房建及市政工程降水等领域。

公司研发生产的气动降水设备具有开创性，解决了行业多年来的用电安全问题以及操作复杂、劳心劳力等顽固性问题，并结合物联网、云计算等技术助力降水及排渗行业达到新高度。

项目案例

土壤修复项目中渗滤液提升设备

天津某农药厂土壤修复项目
天津某造纸厂土壤修复项目
甘肃某能化土壤修复项目
江苏某垃圾填埋场项目
江西某土壤修复项目
.....



尾矿库气驱排渗成套设备

中国黄金西藏某铜矿尾矿库气驱排渗项目
中国黄金内蒙某铜矿尾矿库气驱排渗项目
国金矿业内蒙某尾矿库气驱排渗项目
湖北某铜矿尾矿库气驱排渗项目
.....



市政、房建气动降水成套设备

内蒙新机场基坑降水项目
上海浦东机场基坑降水项目
哈利逊国际医院降水项目
北京亚运村降水项目
上海地铁降水项目
.....



节能环保
Energy Saving



使用耐久
Durable Use



工业设计
Industrial Design



制造研发
Innovative Research



网址: <http://www.tjzhijingkeji.com>

地址: 天津市北辰区刘安庄工业园发安路66号

电话: 022-59908895/17702245992 (同微信)





江苏光质检测科技有限公司

JIANGSU GUANGZHI TESTING TECHNOLOGY Co., Ltd

地址：江苏省苏州市工业园区
东长路88号M11幢2/3/4楼
电话：0512-62768072
网址：www.envgz.com

客观严谨 精益求精

专注土壤、地下水及固体废物检测



土壤及地下水检测
■ 场地调查、修复自检验收及
■ 环评中涉及的土壤及地下水
采样检测

未知污染物成分分析
■ 场地或修复过程中的未知污
染物进行成分分析

固体废物检测
■ 检测固体废物的腐蚀性、浸
■ 出毒性、毒性含量、易燃性、
反应性

实验室外包服务
■ 帮助客户设计建立土壤检测
■ 实验室外派团队帮助客户运
营实验室

江苏光质检测科技有限公司位于苏州工业园区自贸区，是一家以检测土壤、地下水和固体废物为特色的第三方服务机构(检验检测机构资质认定证书(CMA)编号：201012340155)。

公司拥有数名毕业于新加坡国立大学的分析化学博士及训练有素的专业人员，现有员工200余名，其中实验室及研发人员100多名，本科学历占95%以上。

公司实验室面积近5000平方米，拥有包括40台安捷伦8890-5977B型气相色谱-质谱联用仪(GCMS)在内的先进检测仪器两百余台，固定资产原值超6000万元。

公司以第三方模式，检测土壤及地下水，固体废物中的理化性质、有机物、重金属、挥发性有机物(VOCs)及半挥发性有机物(SVOCs)、有机农药(有机氯/磷农药/三嗪类农药)、指纹图谱检测、溶剂残留等特色项目。

公司积极与各高校、科研院所合作，包括新加坡国立大学苏研院、苏州大学、浙江大学、南京大学、浙江工业大学、华北电力大学等机构，打造一个由行业内资深的专家学者组成的，面向大众市场以切实解决企事业单位现实中遇到的分析技术难题的开放平台。

行业标准及检测项目：

一、建设用地和农用地土壤检测

GB36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》中表1基本45项，表2其他40项
GB15618-2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中表1、表2、表3所有涉及项目；

三、固废检测

GB5085.1-2007《危险废物鉴别标准腐蚀性鉴别》；
GB5085.3-2007《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》；
GB5085.4-2007《危险废物鉴别标准易燃性鉴别》；
GB5085.5-2007《危险废物鉴别标准反应性鉴别》；
GB5085.6-2007《危险废物鉴别标准毒性物质含量鉴别》；

二、水质检测

GB3838-2002《地表水环境质量标准》中表1基本24项，表2补充项5项，表3特定项61项
GB/T14848-2017《地下水质量标准》中表1常规35项，表2特征项49项
GB8978-1996《污水综合排放标准》中表2常规23项
GB5084-2021《农田灌溉水质标准》中表1基本控制项目16项，表2选择控制20项

现场采样

样品库

实验室分析

样品保存、
运输、交接

SPEC & MASS

超稳矿化土壤修复材料（土壤调理剂LC-S01）



产品介绍

利用天然矿物合成的超稳矿化土壤修复材料，通过层板元素调控，根据不同金属离子作为层板元素和层间阴离子导致的溶解度差异，借助同晶取代和阴离子交换而将重金属离子原位矿化，实现镉砷等多种重金属离子的同步高效超稳矿化。同时，利用层板晶格限域作用，实现功能分子的有序排列，借助吸附增容、配位和静电作用等方式，实现抗生素、微塑料等新污染物的选择性固定。



产品特性

1、一次使用，高效稳定矿化。通过离子键、化学键等多重作用力，将土壤中重金属离子牢牢固定并形成极低溶度积常数的超稳矿化结构，显著降低重金属离子的迁移性和生物有效性。一次使用，至少保持 5 年以上的效果，因而大大降低使用成本。

2、同步矿化，富硒降镉减砷。通过阳离子同晶置换、阴离子交换吸附和结构重组，实现镉砷等多种重金属离子的同步矿化。由于选择性吸附，对硒、锌、氮、磷、钾等营养元素基本无影响，具有很强的保水保肥功能。

3、吸附增容，协同处理新污染物。通过层板晶格限域作用，实现功能分子的有序排列，借助吸附增容、配位和静电作用等方式，实现抗生素、微塑料、有机污染物、内分泌干扰物等新污染物的高效处理。

4、减排固碳，改善土壤环境。使用该材料后，能够固定秸秆碳元素，吸收空气中的二氧化碳，改善土壤质量，提高农业生产效益，促进农业可持续发展，有助于保护生态环境和生物多样性。

适用范围

适用于酸性、弱酸性及弱碱性土壤，适宜各种农作物，不影响农业生产。



耕地生产障碍（重金属污染）修复



酸化耕地治理(耕地质量提升)



盐碱地改良

江苏隆昌化工有限公司

JIANGSU LONGCHANG CHEMICAL CO.,LTD

地址：江苏省如皋市如皋港绿色新材料产业园 邮编：226532

电话：0513-68976271，15851297968 邮箱：lczy968@126.com



资质荣誉



科技部农村司组织专家调研后认为，超稳矿化土壤修复材料是目前土壤修复材料的最佳选择和替代品，并建议加快该产品产业化、规模化、国际化进程，参与一带一路战略。超稳矿化土壤修复材料及其应用技术通过科技成果鉴定，与会专家一致认为项目技术处于国际领先水平。我司牵头完成的重金属污染耕地高效稳定修复与安全利用关键技术及应用项目获得江苏省科学技术三等奖，超稳矿化土壤修复材料绿色制造关键技术及农用地减污固碳应用获得中国循环经济协会科技进步三等奖。

使用方法

机械或人工撒施均可，机械撒施尤佳。撒施后翻耕混匀，即可栽种农作物。一般用量为 200Kg/ 亩，根据实际情况适当增减。



应用推广

在江苏、湖北、江西、贵州等 10 多个省推广应用，土壤中重金属有效态明显降低，农产品籽粒中镉、砷等重金属含量降低 70% 以上，且符合食品安全卫生标准，得到业主和专家高度评价。



华中地区耕地生产障碍修复



西南地区酸化耕地治理



西北地区盐碱地改良



华东地区复合污染耕地安全利用





南京卡文思检测技术有限公司

植物、土壤、水质等多领域研究型检测机构

公司简介

卡文思致力于为客户提供多元化的检验检测的综合服务。紧跟市场研究热点，长期以来注重和国内外高校、大型研究所、先进企业研发团队紧密的学习、交流、合作。满足用户基础检测需求的同时，针对研究热点的待测因子，复杂基质背景样本，进行检测方法的开发，验证，长期积极探索具有个性化及领先性的检验检测技术解决方案。

企业实力

以服务大农业为主，业务涉及植物、土壤、水质、食品安全、动物等多个领域。办公和实验场地2200平米，拥有CMA资质，仪器设备涵盖UHPLC、LC-MS、GC、GC-MS、ICP-MS、ICP-AES等大型精密设备，对来样进行前处理和制备、生化分离分析。可为科研工作者提供优质的理化分析、靶向代谢产物检测等服务。也可为农食企业在社会责任、环境友好、产品质量、生产规范质量体系等方面提供专业服务。



中国计量认证 (CMA)



环境保护标准样品研究所 (IERM)



赛默飞RQ icp-ms电感耦合
等离子体质谱仪



赛默飞世尔Thermo Vaquish
高效液相色谱仪



Waters 2695-2487液相色谱仪



Thermo trace 1600 ISQ 7610
气相色谱质谱联用仪

主营业务

植物土壤理化、酶活、
常量元素、微量元素、
有机等检测服务。



卡文思官网



卡文思客服

南京卡文思检测技术有限公司

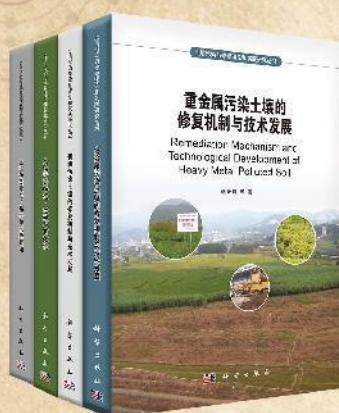
植物、土壤、水质等多领域研究型检测机构

Tel: 400-066-8286

E-mail: order@convinced-test.com



土壤污染与修复技术原理和实践丛书 (共4册)



- 重金属污染土壤的修复机制与技术发展
- 有机污染土壤的修复机制与技术发展
- 土壤污染特征、过程与有效性
- 土壤污染毒性、基准与风险管理

骆永明 等著

了解土壤污染与修复研究理论、方法、技术、工程及管理等方面的**权威读本**。该丛书发展了我国土壤污染与修复理论及方法学体系，为认识我国乃至世界土壤污染规律和实现绿色可持续修复提供了基础理论和方法原理。

“土壤环境与污染修复”丛书 “十四五”国家重点出版物出版规划项目



- 《伴矿景天的栽培和修复原理与应用》
- 《图说土壤污染与治理》
- 《污染场地蒸汽入侵的风险评估（英文版）》
- 《土壤矿物界面有机化学》
- 《土壤有机污染与修复原理》
- 《重金属污染耕地安全利用与修复理论及江苏实践》
- 《环境微塑料赋存特征、表面变化和生物积累》
- 《土壤环境自由基化学》
- 《土壤化学氧化修复技术原理与应用》
- 《土壤修复学》
- 《修复土壤学》
- 《土壤环境化学》
- 《重金属土壤地球化学》
- 《土壤环境功能材料开发与应用》
- 《生物质炭阻控土壤-植物系统中有机污染物迁移转化的原理》
- 《土壤污染修复理论与实践》
- 《农田土壤污染危害与防治》
- 《土壤环境学》

●●●●● 未完待续

传承科学优秀品质 立足苏皖专业出版

科学出版社南京分社2010年在南京成立，是科学出版社的重要分支。成立以来，科学出版社南京分社迅速发展壮大，具有一批精业务，懂专业，敢创新的图书编辑。

南京分社在秉承科学出版社“三高、三严”工作作风的同时，充分利用地方化特色，以真诚职业细致的工作为苏皖专家学者提供更为满意的专业出版服务。

提供服务内容：

协助申报学术出版基金
重要学术典籍的整理与出版
科研院所学术成果系统整合出版
重要活动成果出版支持
期刊的创办与出版
个人学术成果出版
版权引进与输出
出版方面业务咨询

高水平 高层次 高质量
严肃 严密 严格

出版事宜可联系



地学编辑部主任：周丹
电话：13611578807
E-mail: zhoudan@mail.sciencep.com



地学编辑部编辑：黄梅
电话：15205158318
E-mail: huangmei@mail.sciencep.com



地学编辑部编辑：王腾飞
电话：13913901737
E-mail: wangtengfei@mail.sciencep.com



中国科技出版传媒股份有限公司
China Science Publishing & Media Ltd. (CSPM)
科学出版社

南京尚土生态环境有限公司

公司介绍 Company introduction

南京尚土生态环境有限公司成立于 2019 年，核心团队由国内一线环境修复专业人士组成，致力于为客户提供调查评估、修复治理和风险管控技术的研发与应用等土壤和地下水修复全产业链综合服务，为环境问题提供高效、专业、经济的解决方案。

尚土环境秉承“科技立企”的发展思路，严守“知行合一、止于至善”的价值理念，以科技创新驱动技术咨询和工程项目并重发展，专注专行，开拓进取，为建设美丽中国而不懈奋斗。

企业资质 Enterprise qualification

公司拥有环保工程专业承包资质、质量管理体系认证、环境管理体系认证、职业健康安全管理体系认证、企业信用评价 AAA 等级证书，被评为国家高新技术企业，荣获环境保护科学技术二等奖、中国循环经济协会科技进步三等奖、广东省环境技术进步一等奖等奖项。

产品与服务 Products and services

技术咨询与服务：公司核心人员均从国内外知名院校毕业，有环境修复领域多年从业经验，具备运用广阔的国际视野解决国内与环境污染相关的实际问题，可提供场地环境调查与评估、修复方案设计、施工顾问等站式技术咨询与服务，协助客户科学、经济、绿色的完成项目。

环境工程设计与施工：公司核心人员有多年环境工程设计与施工经验，可承担建设用地、在产企业、农田、矿山等各类修复工程的设计与施工。主要修复技术包括：微生物修复技术、垂直防渗技术、氧化还原技术、固化/稳定化技术、热脱附技术等。

技术与装备 Technology and equipment

原位热脱附技术体系：原位热脱附技术是指向地下输入热能，加热土壤及地下水，提高目标污染物的蒸气压及溶解度，并通过土壤气相抽提或多相抽提实现对目标污染物去除的技术。我公司研制成功新一代堆体热脱附装备系统并在东北某项目成功运用。



强化生物修复技术体系：以生物表面活性剂和高效工程菌为核心的强化生物降解技术，对石油污染的治理具有绿色高效、实施工艺简捷、应用范围广、可资源化回收、成本低廉等优势，通过微生物代谢，将石油烃类污染物完全降解。我公司研发并具有自主知识产权的高效生物破乳剂和强化生物菌剂，产品产能效率已达国际先进，最新开发的第三代产品与化学表面活性剂相比，在价格上同样具备竞争力。



智能模块化淋洗技术：公司集成研制的智能化淋洗装备为国内淋洗装备中最为先进的产品之一。整个装备不仅功能达到高度集成化，还大大地提高了设备处理能力达到 80t/h，在全国同类型投产的设备中居首，同时兼具物理和化学清洗等多效功能。可大幅缩减现场安装调试时间，并快速安全地应用于现场工程实施。通过 PLC 全自动智能化控制系统，实现整个清洗流程的自动化操作，以保证清洗生产线的顺畅运营。



AIMOLI 爱默里

www.dixiashui.net

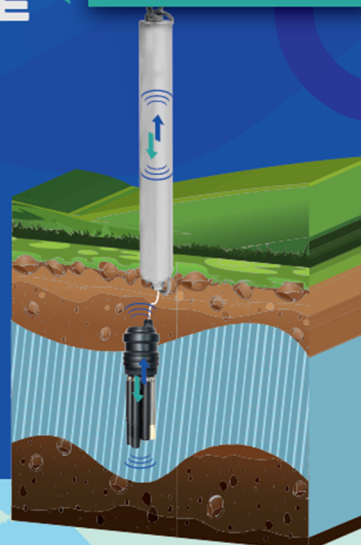
地下水 在线监测系统

——爱默里中国模式

实时可见全国所有地下水监测井的数据，
各地环保局可实时监测
全国任何一口井都可随时遥控操作，
并观测其水位和水质的变化



抽水监测仪，
不用爱默里采样器不行



原位监测仪，
老外做不过爱默里

AML919 地下水采样器

(洗井/采样/分析/观测)

扬程300米，进口做不到



扫描二维码
查看更多信息



AIMOLI 爱默里
爱默里(河北)科技有限公司

TEL
电话

158-3019-0109



南京中荷寰宇环境科技有限公司 Nanjing Sino-Dutch Universal EST Co., Ltd

公司简介 Company Profile

“南京领军型科技创业人才引进计划”入选企业
“江苏省高层次创新创业人才引进计划”入选企业

“南京中荷寰宇环境科技有限公司”由五位海归博士联合创立。公司目前主要经营污染场地调查与人体健康风险评估、环境修复技术研发与商业化应用、智能环境监测管理系统推广与商业化应用以及环保和实验仪器与设备。

“Nanjing Sino-Dutch Universal Environment and Technology Co., Ltd” was jointly established by five overseas Ph.D. The scope of the main business of our company includes Contaminated Site Investigation and Human Health Risk Assessment, Remediation Technology Development, Promotion and Application, Smart-sensing System Promotion and Application, and Environmental and Laboratory Analyzer and Equipment.

快速检测 Quick-Analysis



GPS



PID



XRF

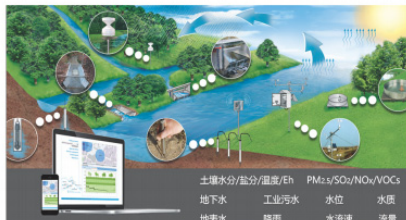


GPR



GW-PUMP

智能监测 Smart-Sensing



南京市建邺区创智路188号
追光公社203室
Postcode: 210013
Room 203, Zhuiguang Commune,
No. 188 Chuangzhi Road,
Jianye District, Nanjing
T +86 25 85300017
E info@u-est.com
I www.u-est.com

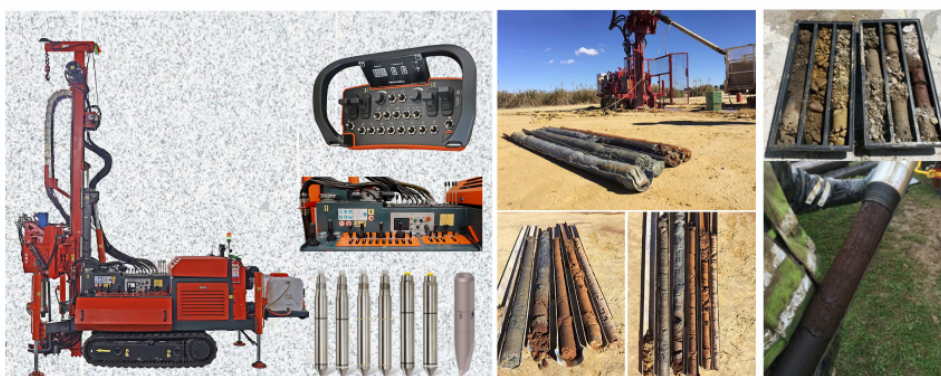




南京中荷寰宇环境科技有限公司

“一站式产品和技术供应商与服务商”

声波勘探 SonicSampDrill



配套钻具 Drilling Rigs



合作伙伴 Partnership



南京市建邺区创智路188号
 追光公社203室
 Postcode: 210013
 Room 203, Zhuiguang Commune,
 No. 188 Chuangzhi Road,
 Jianye District, Nanjing
 T +86 25 85300017
 E info@u-est.com
 I www.u-est.com



上海胜丰环境能源科技有限公司

SHANGHAI SF ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CO., LTD

上海胜丰环境能源科技有限公司是一家集研发、设计、工程施工与设备运营于一体的高科技环保企业。公司由各型高端人才组成了涵盖技术、管理、市场的专业团队，在污染土壤修复、尾矿修复、河道底泥修复、地下管网底泥修复、钻井泥浆修复、非正规填埋场综合整治等领域开展相关业务。公司自成立以来，与大型企业战略合作伙伴先后实施完成了30多个土壤修复项目。自行研发、制造的淋洗设备已在多个大型项目中成功应用，与市场上同类设备比较，胜丰土壤异位淋洗智能撬装装备的工程效益和经济效益十分显著。

一、土壤修复项目专业承包商



- 上海市普陀区11个污染地块修复
- 上海市嘉定区某污染地块修复
- 上海市普陀区某黑臭水体整治项目
- 上海市杨浦区2个污染地块修复
- 上海市青浦区某污染地块修复
- 上海市金山区某垃圾填埋场项目
- 南通市某污染地块修复
- 泉州市某污染地块修复
- 淄博市某污染地块修复
- 东莞市某污染地块修复
- 杭州市某污染地块修复
- 多次土壤淋洗设备、垃圾筛分设备租赁及运营

二、土壤修复重金属淋洗设备的销售、租赁、运营及相关技术支持



泥水分离造浆系统



粒径分级+化学增效淋洗



泥水分离系统



水处理系统

三、非正规垃圾填埋场整治专业承包商

四、垃圾筛分设备的销售、租赁、营运及相关技术支持



联系电话：刘先生13381666876；雷先生18516621112

上海公司地址：上海市闵行区申虹路1088弄12号楼1003室

公司邮箱：773828139@qq.com

生产基地地址：河南省焦作市温县产业集聚区鑫源路东段

公司网站：www.sf-environment.com

南京水泽万物环保科技有限公司

Nanjing Water-nourishing Environmental Technology Co., Ltd

南京水泽万物环保科技有限公司成立于2023年，致力于研发、生产和销售地下水采样与监测设备，为客户提供全方位的地下水采样与监测解决方案。

我们拥有一支专业的团队，由水文地质、环境科学和工程技术等领域的人才组成，具备丰富的实践经验和专业知识。我们将以技术实力、品质保证和客户服务为基础，共同推动地下水环境保护工作的发展。

水泽万物

水泽万物专注于地下水采样与监测领域，主营产品有地下水智能采样系统、地下水监测井（高清成像）检测仪、地下水流速流向仪、多参数水质监测仪、水位水温仪等。水泽万物采用先进的技术和高质量的材料，以创新的思维研发产品，率先在地下水采样与监测领域取得突破性进展。

地下水采样系列产品



SZ-109智能采样与监测系统



SZ-301地下水洗井采样系统



SZ-306地下水智能采样系统

地下水监测系列产品



SZ-201地下水监测井（高清成像）检测仪



SZ-203多参数水质监测仪



SZ-204水位水温仪

公司名称：南京水泽万物环保科技有限公司
地址：南京市江宁区秣陵街道苏源大道117号
电话：18795988593



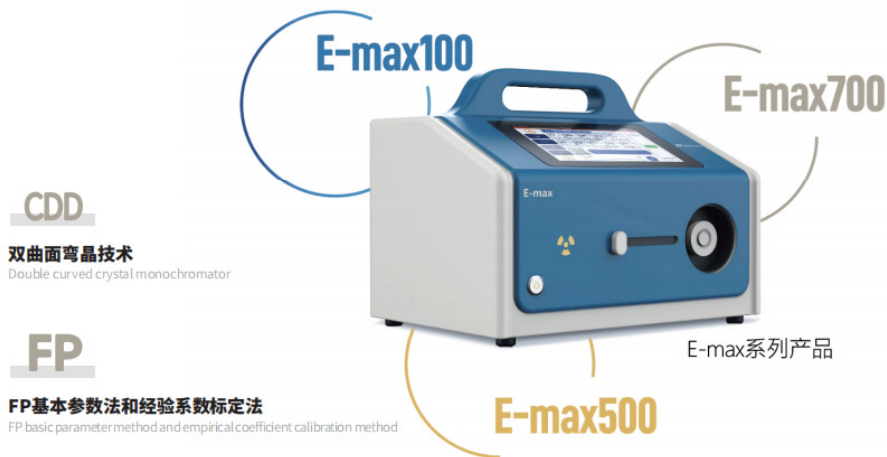
E-max系列

HPXRF 高精度X射线荧光元素分析仪

High Performance X-ray Fluorescence spectrometry

苏州佳谱科技有限公司位于中国（江苏）自由贸易试验区苏州工业园区汀兰巷192号B1幢，从事单色聚焦X射线荧光光谱仪的研发、生产、销售与服务，致力于为各行业客户提供先进的高精度、高灵敏和高可靠性元素分析解决方案。公司有手持式、便携式、实验室和在线式四种产品技术平台，可广泛应用于土壤调查、水质监测、农产品加工筛查、食品安全监测、地质矿冶和工业在线监测等应用领域。

苏州佳谱科技有限公司创始人陈泽武博士自 1998 年发明高效双曲面弯晶以来，分别在中国、美国、日本和欧盟等国家获得发明专利。陈泽武博士带领其团队首创和引领了双曲面弯晶在 X 射线荧光光谱仪的广泛应用，发明了 MWDXRF 和 HPXRF 的两种 XRF 技术路线及其系列产品；佳谱科技高精度 X 射线荧光元素检测仪采用了双曲面弯晶单色光聚焦技术即 HPXRF，实现了 X 射线荧光光谱仪在元素检测中的精准分析。



E-max系列高精度X射线荧光元素检测仪应用领域和应用行业

E-max series high precision X-ray fluorescence element detector application field and application industry

设备型号	E-max100	E-max500	E-max700
检出限值 标准适用性	ASTM D8064; GB15618-2018 GB36600-2018	ASTM D8064; GB15618-2018; GB36600-2018; GB3838-2002等	ASTM D8064; GB15618-2018; GB36600-2018
应用领域	土壤调查和 现场固废中重金属快速检测	土壤调查、固废重金属快筛、水质环境、 农产品重金属快筛和植物组织元素快速准确检测	土壤调查、固废重金属快筛、 污水重金属快筛、农产品和植物组织中 元素快速检测以及农田肥料快检
应行业	生态环境监测中心 固废监测执法机构	环境执法机构 农业调研部门和高校科研单位	环境执法机构、农业调研部门、 高校科研单位、海关进出口和工业化生产



永清环保股份有限公司（股票代码：300187.SZ）于2011年上市，是湖南省首家A股上市环保企业。公司建立了覆盖环境修复规划咨询、场地调查、环境监测、风险评估、工程设计与施工以及药剂生产等全过程的完整产业链，并先后承担了近百项各种类型的土壤修复工程。

永清环保是全国第一批土壤重金属修复技术重点推广示范单位，同时永清也是国内首家可为耕地重金属污染修复提供全产业链服务的提供商，全国首批自发推行、打造耕地修复第三方治理新模式的领军企业。

永清环保建成了湖南省最大的环保研发中心，并先后创建了“国家企业技术中心”、“国家工程研究中心”、“国家级博士后科研工作站”3个国家级创新研发平台以及“湖南省生活垃圾资源化处理工程研究中心”、“湖南省工业锅炉烟气脱硫脱硝工程技术中心”等7个省级研发平台，其创新研发平台数量位居国内环保企业之首。

近年来，公司先后承担国家级、省部级科研攻关项目20余项，获国家级科技进步奖2项，45项省级、市级以上行业奖，拥有各类专利164余项，其中发明专利42项。公司已在耕地污染治理、土壤修复、超低排放、清洁能源、垃圾发电等领域掌握了一批具有国内领先水平的核心技术。

在土壤修复领域，环保企业仍然将面临很多难题，未来，永清环保将继续着力环保技术创新和服务模式开拓，发挥公司在环境治理技术、工程管理、项目运作上的专业经验，尽快地解决目前行业内面临的遗留污染处理等核心问题，提高项目推进效率，助力行业将环境治理带入新的合作领域。

同时积极响应碳中和战略，打造新能源项目专业服务供应商。公司已与新能源产业链上下游的上市公司、民营头部企业等优质客户和科研院所展开深度合作，深化用户侧能源解决方案，取得了良好的成效，可以为地方政府、工业园区和企业提供双碳咨询、投资、建设、运营、碳资产管理的一站式综合服务。





全心全意 · 至臻至美

德森淋洗装备

DESEN WASHING PLANT



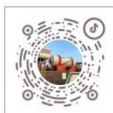
■ 德森淋洗车

■ 应用领域

广泛应用于重金属污染土壤、通沟余泥、河道淤泥、盾构泥浆、钻井岩屑、含油污泥、矿山修复等多种类物理淋洗分级需求的项目场地。



■ 模块集成式土壤淋洗装备



郑州德森环境科技有限公司

销售热线: 0371-61937711

手机: 18625555035

邮箱: densenhuanjing@163.com

网址: www.zzdshj.com

联系地址: 郑州市长椿路11号国家大学科技园孵化1号楼5层

江苏国信协联能源有限公司创建于 1986 年，注册资本 5.84 亿，位于美丽的中国陶都宜兴，是以能源、生物科技、现代农业三大产业为主的混合所有制企业，总资产规模超 40 亿，年营业收入突破 60 亿。

能源板块以高效能发电机组为核心，构建集供电、供热、供气、污泥处置为一体的综合能源服务体系，多次荣获江苏省“标杆机组”和“标杆电厂”称号；生物科技板块主要生产柠檬酸及其盐类产品，产品远销欧盟、日本等 100 多个国家和地区，是可口可乐、百事可乐、红牛、宝洁、娃哈哈等大型终端客户的长期供应商。

现代农业板块专门成立了江苏国信协联生物科技(集团)有限公司,以合成生物技术为基础，以推动农业绿色、生态发展为目标，依托江南大学陈坚院士团队和南京农业大学沈其荣院士团队，高效配置、集聚各类创新资源及要素，不断优化产品、完善服务、拓展供应平台，积极为种、养殖者提供全程改土及作物营养解决方案，打造一二三产融合、绿色发展的协联创新模式，全力以赴助力乡村振兴，引领现代农业向“减肥增效，绿色发展”的道路迈进。

公司创新研发有机水溶肥、土壤改良剂、发酵碳源、微生物制剂等“沃方”系列产品，在经济作物种植、土壤修复改良、动保和水产方面广泛应用，已取得优良的效果反馈并得到了客户的一致好评，产品和技术荣获“全国农牧渔业丰收奖”称号，获得授权专利近 50 项、发明专利 30 多项、国际专利 10 多项。新型生物肥料系列产品应用面积超 1000 万亩；盐碱地生物改良剂应用面积约 10 万亩，发酵碳源应用面积超 45 万亩。