

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评估与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评估	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

污染场地修复技术筛选方法及应用

白利平¹, 罗云², 刘俐¹, 周友亚¹, 颜增光¹, 李发生¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234)

摘要: 污染场地修复技术的筛选是场地监管中的重要环节, 修复技术的适用性直接影响场地修复效果及费用。确定最适修复技术时需综合考虑污染物特征、场地条件、修复费用及时间等多种因素, 目前我国在污染场地修复技术筛选时多依赖专家赋值评分, 在决策方法的推广上受到限制。本文在国内外相关研究基础上, 考虑我国污染场地监管需求, 提出土壤修复技术初筛及详细评价方法, 并建立了修复技术筛选指标体系。为解决在各指标赋值及评价过程中存在的模糊性问题, 利用可拓理论进行修复技术等级划分。以我国某铬渣污染场地为例, 开展了土壤修复技术筛选研究, 提出了最适的修复技术, 研究成果可为我国污染场地监管工作提供科技支撑。

关键词: 污染场地; 修复技术筛选; 指标体系; 可拓理论; 铬渣

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4218-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.037

Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application

BAI Li-ping¹, LUO Yun², LIU Li¹, ZHOU You-ya¹, YAN Zeng-guang¹, LI Fa-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Life and Environmental Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Soil remediation technology screening is an important procedure in the supervision of contaminated sites. The efficiency and costs of contaminated site remediation will be directly affected by the applicability of soil remediation technology. The influencing factors include characteristics of contaminants, site conditions, remediation time and costs should be considered to determine the most applicable remediation technology. The remediation technology screening was commonly evaluated by the experienced expert in China, which limited the promotion and application of the decision making method. Based on the supervision requirements of contaminated sites and the research status at home and abroad, the screening method includes preliminary screening and explicit evaluation was suggested in this paper. The screening index system was constructed, and the extension theory was used to divide the technology grade. The extension theory could solve the problem of human interference in the evaluation process and index value assignment. A chromium residue contaminated site in China was selected as the study area, and the applicable remediation technologies were suggested by the screening method. The research results could provide a scientific and technological support for the supervision and management of contaminated sites in China.

Key words: contaminated site; screening of soil remediation technology; index system; extension theory; chromium residue

土壤是人类赖以生存的主要资源之一, 随着我国经济社会的快速发展和城镇化建设的不断推动, 土壤污染问题日益凸显并成为当前我国重要的环境问题之一。自 20 世纪 90 年代以来, 中国大中城市出现了大规模的工业企业搬迁情况, 这些企业遗留的场地大多位于城市中心, 场地可能存在土壤和地下水污染问题。根据我国 2005 年开展的首次全国土壤污染状况调查结果, 目前我国工矿废弃地土壤环境问题突出, 在调查的 690 家重污染企业用地及周边的 5 846 个土壤点位中, 超标点位占 36.3%, 主要涉及黑色金属、有色金属、皮革制品、造纸、石油煤炭、化工医药、化纤橡塑、矿物制品、金属制品、电力等行业^[1]。

污染场地修复的费用是阻碍场地修复的关键因

素, 因此, 在场地修复中采取的措施是将污染场地的风险降至合适水平而不是清除全部污染^[2]。土壤修复可采用的技术种类较多, 仅美国超级基金在 1 468 个污染场地修复中就应用了近 30 种修复技术^[3], 其中固化/稳定化技术和土壤气提技术在 30 年的场地修复中一直占有较高的应用比例(图 1)。美国超级基金在场地修复实践中, 重点考虑修复费用、效果和修复时间等多种因素, 在修复技术筛选过程中借助不同的决策方法。数值评分法是修复技术筛选中最常用的评分方法, 如 SAW(加权加和法)和 AHP

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471266)

作者简介: 白利平(1979~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤及地下水污染防治, E-mail: bclp@163.com

(层次分析法)^[4]. SAW 与 AHP 方法通过主观赋值进行修复技术筛选,有时难以区分修复技术之间的细微差别^[5]. 成本效益分析法、问卷调查统计、生命周期法以及风险评估等定量赋值方法^[6~9]可用于替代数值赋值方法,使其客观反映各修复技术之间的差异. 也有研究者采用较为复杂的定量决策方法如 PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluation)、

ELECTRE(elimination and choice expressing reality) 和 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 方法筛选修复技术^[10,11]. 目前我国在污染场地修复技术筛选中多采用 SAW 和 AHP 方法^[12~14],也有研究中用到 Topsis 和 PROMETHEE 法^[15,16]. 在修复技术筛选过程中多依靠于专家赋值评分,据此得出的筛选结果具有一定的主观性.

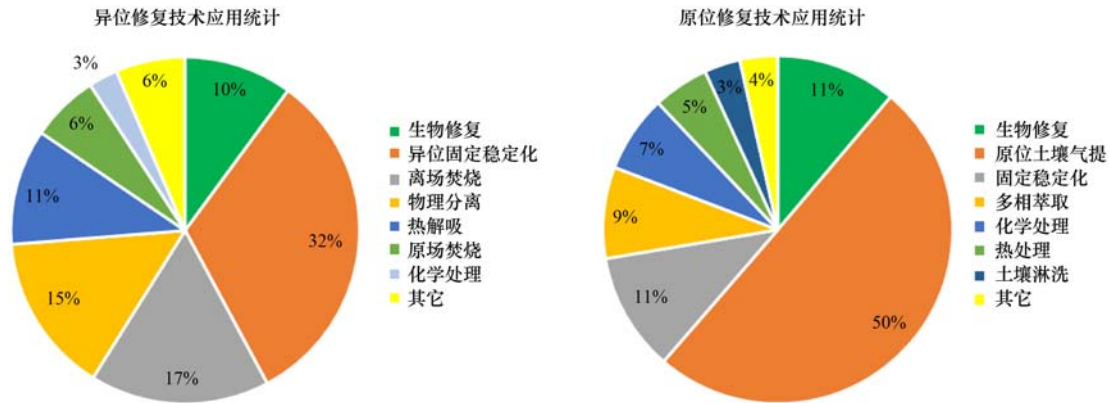


图1 美国超级基金场地修复技术应用情况

Fig. 1 Application status of remediation technologies in CERCLA

场地修复技术筛选是污染场地监管中的重要环节,修复技术的适用性也是影响场地修复效果的关键因素. 当前我国并未建立成熟完善的污染场地修复技术筛选方法与技术体系. 本研究考虑我国污染场地监管工作需求、修复技术现状及决策方法研究状况,提出包含修复技术初筛及详细评价的技术方法,构建了包含定量和定性指标的污染场地修复技术筛选指标体系,利用可拓理论进行修复技术详细评价;并将构建的修复技术筛选体系应用于我国某铬渣污染场地,提出适用于该场地的土壤修复技术,以期为我国污染场地监管提供参考.

1 修复技术筛选体系

修复技术筛选包括初筛和详细评价两个部分,初筛是指根据目标污染物确定潜在可用的修复技术,详细评价则是根据筛选指标体系进行评价,对待选修复技术进行排序,确定各种修复技术的适用性.

1.1 修复技术初筛

修复技术初筛是从大量的备选修复技术中选出潜在可用的修复技术,为修复技术详细评价提供比较对象. 修复技术初筛一般根据目标污染物适用性及修复介质来确定备选的修复技术,常见污染物适用的主要修复技术见表1^[17].

1.2 修复技术筛选指标

选取修复技术筛选指标时应尽量采用能反映修复技术应用状况、易于赋值的指标,以提高决策过程的客观性. 本研究选取技术、环境和经济这3类因素构建修复技术筛选指标体系(图2),根据相应信息对各项评价指标赋值(表2)^[18~20]. 各项评价指标中,修复时间和修复费用主要参考国内外已完成的修复案例. 利益方偏好主要考虑场地周边居民对修复过程产生干扰的可接受性、政府及业主对技术实施的态度,该指标的赋值通过问卷调查方式确定. 环境扰动考虑修复时对环境、大气、声环境和生态环境等方面产生的不利影响,通过理想最小扰动(待选修复技术各方面扰动最小情景)与待选

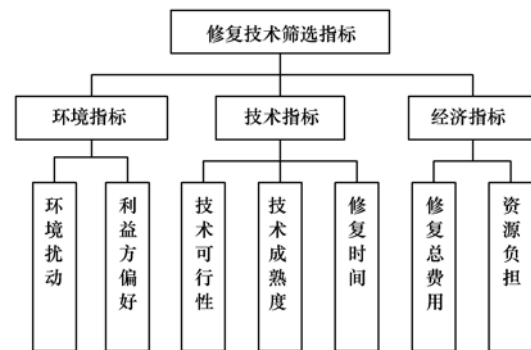


图2 修复技术筛选指标体系

Fig. 2 Screening index of remediation technologies

技术之间的对比确定;技术可行性主要考虑技术适用的场地特征,包括土壤理化特性、污染介质特征和地质条件因素及其他限制条件^[19];技术成熟度主要依据美国超级基金 1982 ~ 2011 年间完成修复的场地中各种技术的应用数量进行赋值^[3];资源负担主要考虑能耗和原材料价格^[8].

表 1 常见污染物适用的修复技术统计¹⁾

Table 1 Statistical table of the remediation technology for common pollutants													
修复技术	修复介质	有机物							无机物				
		挥发性有机物	卤代烃	非卤代烃	多环芳烃	多氯联苯	二噁英和呋喃	农药和除草剂	重金属	非金属	石棉	氧化物	爆炸物
挖掘处置	土壤	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
自然衰减	水	√	√	√	√	×	×	√	√	√	×	×	√
生物堆	土壤	√	×	√	√	×	×	√	×	×	×	×	√
生物通风	土壤	√	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	×
生物曝气	土壤/水	√	√	√	√	×	×	√	×	×	×	×	×
土耕法	土壤	√	×	√	√	×	×	√	×	×	×	×	√
泥浆相生物处理	土壤	√	√	√	√	×	?	√	×	×	×	√	√
化学氧化	土壤/水	√	√	√	√	×	×	√	×	√	×	×	×
土壤冲洗	土壤	√	√	√	√	×	×	×	√	×	×	×	×
溶剂萃取	土壤	√	√	√	√	√	√	√	×	×	×	×	√
空气注入	水	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
焚烧	土壤	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
热解吸	土壤	√	√	√	√	√	×	√	√	×	×	√	×
土壤气相抽提	土壤	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
可渗透反应墙	水	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√
土壤清洗	土壤	×	√	√	√	√	×	√	√	√	×	√	×
水力黏合(如水泥)	土壤	×	×	?	√	√	√	?	√	√	√	?	×
玻璃化	土壤	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

1) √表示该修复技术适用, ×表示不适用, ? 表示尚不确定

表 2 修复技术筛选指标评分表

Table 2 Scoring results of remediation technology screening index					
指标	5	4	3	2	1
技术成熟度(个数)	> 100	50 ~ 99	20 ~ 49	10 ~ 19	1 ~ 9
技术可行性	非常高	高	中等	低	非常低
修复时间	3 ~ 6 月	6 ~ 12 月	1 ~ 2 年	2 ~ 5 年	大于 5 年
总费用/ \$ · m ⁻³	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	> 300
资源负担	非常低	低	中等	高	非常高
环境扰动	非常小	小	中等	较大	非常大
利益方偏好	非常高	高	中等	低	非常低

采用层次分析法确定技术成熟度、技术可行性、修复时间、总费用、资源需求、环境扰动和利益方偏好指标的权重分别为 0. 08、0. 08、0. 24、0. 36、0. 04、0. 1、0. 1^[19],层次分析法计算结果见表 3.

表 3 各指标权重计算结果

Table 3 Computation results of the screening index				
第一层		第二层		
指标	权重	指标	相对权重	总排序
技术指标	0. 4	技术成熟度	0. 2	0. 08
		技术可行性	0. 2	0. 08
		修复时间	0. 6	0. 24
经济指标	0. 4	总费用	0. 9	0. 36
		资源需求	0. 1	0. 04
环境指标	0. 2	环境扰动	0. 5	0. 1
		利益方偏好	0. 5	0. 1

1. 3 基于可拓理论的修复技术详细评价

1. 3. 1 可拓评价模型的构建

在污染场地土壤及地下水修复技术评价中考虑了 7 项因子,修复技术筛选指标中各指标的赋值分为五级. 在修复技术评价中一般依据评价值按等间距划分评价等级,在该过程中存在一定程度的人为因素干扰. 对于某一种特定的修复技术而言,需要判断 7 项因子与不同等级修复技术的相关性,修复技术筛选评价时需判断某个修复技术属于多个集合(五级)的程度,在该过程中存在一定的模糊性. 根据国内外文献调研,以物元理论、可拓集合、关联函数为基础的可拓理论是解决该问题的有效方法,在前期研究基础上,本研究利用可拓理论来进行修

复技术筛选评价。

与定量赋值方法(如加权加和法、层次分析法)相比,基于可拓理论的评价方法既得出待评价修复技术中各项因子与标准物元模型中各等级修复技术中相应因子的相关性,也可评价待评价修复技术与各等级修复技术的相关性。依据可拓学理论^[21,22],建立标准物元模型为:

$$R = \begin{pmatrix} H_j & X_1 & x_1 \\ & X_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & X_7 & x_7 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $X_1, X_2, \dots, X_7$ 分别表示修复技术筛选指标体系中的 7 项评价参数; $x_1, x_2, \dots, x_7$ 为参数 $X_1, X_2, \dots, X_7$ 的取值; $H_j(j=1, 2, \dots, n)$ 表示修复技术评价等级。

1.3.2 各因子关联度的计算

计算各参与评价的修复技术中 7 项评价因子与标准物元模型各等级中对应因子的关联度,即 $K_1 \sim K_7$, 关联度的计算公式为:

$$K(x) = \rho(x, X_0) / D(x, X_0, X) \quad (2)$$

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0) & x \notin X_0 \\ -1 & x \in X_0 \end{cases} \quad (3)$$

关联函数中把实变函数中距离的概念扩展为“距”,规定实轴上点 x 与区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 之距为:

$$\rho(x, X_0) = |x - (a + b)/2| - (b - a)/2$$

1.3.3 各事件关联度的计算

由式(2)、(3)可分别计算出任一待选的修复技术 R 中各评价因素与标准物元模型中任一等级中相应因素的关联度 K_j ,再根据各因素的关联度与权重来判定备选修复技术 R 所属的修复技术评价等级。 R 关于 H_j 的关联度为:

$$K_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(v_i) \quad (4)$$

$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$

式中, n 表示选取的参数个数, m 为修复技术等级数。修复技术筛选评价中,取 K_j 中的最大值相对应的 B_j 为修复技术评价等级。

2 案例研究

2.1 研究区概况

选择我国北方地区某铬渣填埋场作为研究对象,铬渣填埋场中铬渣堆存了数十年,因该渣场修建

时未能采取有效的污染防治措施,导致该区包气带土壤和地下水受到严重污染。目前研究区内填埋的铬渣已被清除,但对于受到污染的包气带土壤及含水层仍需采取有效的治理措施。该场地土壤以砂土为主,砂粒含量占 50% 左右;土壤天然密度为 $1.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,天然含水率为 13.2%,孔隙度 37.78%,渗透系数为 $0.18 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,pH 为 7~8。

2.2 修复技术初筛评价

目前修复土壤重金属污染主要有两种方法,一是从土壤中去重金属;二是改变重金属在土壤中的存在状态,降低其在环境中的迁移性和生物可利用性^[23,24]。根据修复技术初筛结果(表 1),针对铬污染土壤常用修复技术包括挖掘处置、土壤冲洗、土壤清洗、固化/稳定化技术(水力黏合、玻璃化),各修复技术的评分见表 4。

(1) 挖掘处理

用机械挖掘的方式将污染土壤挖出并转移至其他场所进行处理,处理达标后进行安全填埋。该方法简单易行,所需的工期较短,在早期的污染场地修复中应用广泛。在场地修复过程中,污染介质的埋藏深度及地上构筑物的建设将影响处理费用。

(2) 土壤冲洗

通过表面喷洒或注射井注射等方式,将水或冲洗液注入到地下,冲洗液流经污染介质后通过抽提井进行收集。该技术不需挖出土壤,对砂质土壤处理效果较显著,但在处理过程中易造成污染物的迁移。土壤冲洗的费用估计为 $60 \sim 170 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$,处理时间一般在 2 年以上^[25]。土壤冲洗技术的适用性主要受场地特征参数(如渗透系数、阳离子交换量、黏土及有机质含量等)的影响^[25~27]。

(3) 土壤清洗

将污染土壤挖出,经过破碎、筛分后将其放入处理容器中,用水或溶液对土壤进行洗涤,使土壤中的污染物进入液相中,从而去除土壤中的污染物,处理后的溶液可回收利用。经过 30 余年的发展,土壤清洗技术已较为成熟,对砂质土壤的处理效果显著,该方法的处理费用估计为 $130 \sim 220 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[25]。

(4) 固化/稳定化技术

水力黏合技术是在污染介质中加入固化剂,土壤中的污染物与固化剂发生反应后,其迁移性或毒性可被大大减弱,从而降低污染风险^[28]。该技术适用于含水量低于 20%、黏性低于 10% 的污染土壤处理,处理费用估计为 $30 \sim 250 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[29]。

玻璃化技术是通过高温($1600 \sim 2000^\circ\text{C}$)将污

染土壤转变为稳定的玻璃态,使重金属固定于其中. 该技术较为复杂,耗费较高,多用于复合污染严重且其它方法无法有效处理的场地^[29]. 因此,本场地土壤修复不推荐采用玻璃化技术. 固化/稳定化技术尤其适用于金属与有机物复合污染场地^[26],相对于原位玻璃化技术,水力黏合技术更为适用.

表 4 土壤修复技术评分结果

Table 4 Scoring results of soil remediation technologies							
技术名称	技术成熟度	技术可行性	修复时间	总费用	资源负担	环境扰动	利益方偏好
挖掘处理	5	5	5	5	3	2	5
土壤冲洗	3	4	3	4	4	3	4
土壤清洗	1	4	4	3	2	2	4
固化/稳定化	4	3	3	4	4	3	3

2.3 修复技术详细筛选评价

2.3.1 标准物元模型的构建

本研究中初筛得出的可用于该铬渣场地土壤修复的技术为挖掘处置、土壤冲洗、土壤清洗、固化/

稳定化,因此,修复技术评价中可划分为 4 个等级,按等级由低到高分别用 1、2、3、4 来表示. 根据各参数的评分范围(表 4),按不同修复技术等级构建标准物元模型为:

$$SI_4 = \begin{pmatrix} 4 & X_1\langle 5 \rangle \\ & X_2\langle 5 \rangle \\ & X_3\langle 5 \rangle \\ & X_4\langle 5 \rangle \\ & X_5\langle 4 \rangle \\ & X_6\langle 3 \rangle \\ & X_7\langle 5 \rangle \end{pmatrix} \quad SI_3 = \begin{pmatrix} 3 & X_1\langle 4 \rangle \\ & X_2\langle 4 \rangle \\ & X_3\langle 4 \rangle \\ & X_4\langle 4 \rangle \\ & X_5\langle 4 \rangle \\ & X_6\langle 3 \rangle \\ & X_7\langle 4 \rangle \end{pmatrix} \quad SI_2 = \begin{pmatrix} 2 & X_1\langle 3 \rangle \\ & X_2\langle 3 \rangle \\ & X_3\langle 3 \rangle \\ & X_4\langle 3 \rangle \\ & X_5\langle 3 \rangle \\ & X_6\langle 3 \rangle \\ & X_7\langle 3 \rangle \end{pmatrix} \quad SI_1 = \begin{pmatrix} 1 & X_1\langle 1 \rangle \\ & X_2\langle 3 \rangle \\ & X_3\langle 3 \rangle \\ & X_4\langle 3 \rangle \\ & X_5\langle 2 \rangle \\ & X_6\langle 2 \rangle \\ & X_7\langle 3 \rangle \end{pmatrix} \quad (5)$$

各因素的节域为:

$$SI_p = \begin{pmatrix} X_1\langle 1,5 \rangle \\ X_2\langle 3,5 \rangle \\ X_3\langle 3,5 \rangle \\ X_4\langle 3,5 \rangle \\ X_5\langle 2,4 \rangle \\ X_6\langle 2,3 \rangle \\ X_7\langle 3,5 \rangle \end{pmatrix}$$

2.3.2 修复技术筛选结果

由式(2)、(3)可计算得出各修复技术中评价因子与标准物元模型中各因子的关联度,根据各因子的关联度计算结果,由式(4)可计算得出各修复技术与标准物元模型的关联度,据此进行修复技术等级划分(表 5).

依据可拓理论得出的修复技术筛选结果,修复技术优先排序为:挖掘处理、土壤冲洗、固化/稳定化、土壤清洗. 推荐挖掘处理和土壤冲洗技术作为

表 5 土壤修复技术筛选结果

项目	关联度				修复技术等级
	SI ₄	SI ₃	SI ₂	SI ₁	
挖掘处理	-0.12	-0.98	-0.96	-0.88	4
土壤冲洗	-0.55	-0.2664	-0.31	-0.45	3
土壤清洗	-0.79	-0.58	-0.43	-0.21	1
固化/稳定化	-0.64	-0.42	-0.26	-0.38	2

该铬渣污染场地备选土壤修复技术,在场地修复工程设计中可结合场地规划用途、修复工期及经费等因素选取最佳的修复技术. 该场地规划作为住宅类敏感用地,当地政府及居民均倾向于采用修复时间最短、总费用最低、环境扰动最小、资源需求最低的修复技术. 本场地土壤修复备选的挖掘处理及土

壤冲洗技术中,挖掘异位处理技术较为成熟,所需时间相对较短,总费用相对较低,但环境扰动大;土壤冲洗技术成熟度相对较低,修复工期较长,总费用相对较高,环境扰动较小. 因此,若本场地急于开发,可采用挖掘异位处理方式;若不急于开发,则可采用原位土壤冲洗处理方式.

3 结论

(1) 建立了土壤修复技术筛选方法及指标体系, 包括修复技术初筛和详细评价两个部分, 筛选指标包括技术成熟度、技术可行性、修复时间、总费用、资源需求、环境扰动和利益方偏好 7 项因素。

(2) 利用可拓理论进行修复技术详细筛选评价, 通过建立标准物元模型, 根据任一待选修复技术与标准物元模型中各因素的关联度与权重来确定修复技术评价等级。

(3) 将构建的修复技术筛选方法应用于我国北方某铬渣污染场地, 初筛得出可用的土壤修复技术为挖掘处置、土壤清洗、土壤清洗、固化/稳定化, 利用可拓理论计算得出修复技术优先排序为挖掘处理、土壤冲洗、固化/稳定化、土壤清洗, 推荐挖掘处理和土壤冲洗技术作为该场地备选土壤修复技术。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>, 2014-4-17.
- [2] Sorvari J, Antikainen R, Kosola M L, *et al.* Eco-efficiency in contaminated land management in Finland-Barriers and development needs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(5): 1715-1727.
- [3] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Superfund Remedy Report (Fourteenth edition) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/superfund/remedytech/srr/>, 2013-11-30.
- [4] Grell B J, Kloeber J M, Jackson J A, *et al.* Making the CERCLA criteria analysis of remedial alternatives more objective [J]. *Remediation Journal*, 1998, **8**(2): 87-105.
- [5] Linkov I, Varghese A, Jamil S, *et al.* Multi-criteria decision analysis: A framework for structuring remedial at contaminated sites [A]. In: Linkov I, Ramadan A, (eds.). *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making* [M]. Netherlands: Springer, 2004. 15-54.
- [6] Postle M, Fenn T, Grosso A, *et al.* Cost-benefit analysis for remediation of land contamination [R]. Risk & Policy Analysts Ltd, 1999.
- [7] Inoue Y, Katayama A. Two-scale evaluation of remediation technologies for a contaminated site by applying economic input-output life cycle assessment: Risk-cost, risk-energy consumption and risk-CO₂ emission [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(3): 1234-1242.
- [8] Hu X T, Zhu J X, Ding Q. Environmental life-cycle comparisons of two polychlorinated biphenyl remediation technologies: Incineration and base catalyzed decomposition [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 258-268.
- [9] 胡新涛, 朱建新, 丁琼. 基于生命周期评价的多氯联苯污染场地修复技术的筛选 [J]. *科学通报*, 2012, **57**(2-3): 129-137.
- [10] Yang A L, Huang G H, Qin X S, *et al.* Evaluation of remedial options for a benzene-contaminated site through a simulation-based fuzzy-MCDA approach [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **213-214**: 421-433.
- [11] Carlon C, Pizzol L, Critto A, *et al.* A spatial risk assessment methodology to support the remediation of contaminated land [J]. *Environment International*, 2008, **34**(3): 397-411.
- [12] Giove S, Brancia A, Satterstrom F K, *et al.* Decision support systems and environment: Role of MCDA [A]. In: Marcomini A, Suter II G W, Critto A (eds.). *Decision Support Systems for Risk-Based Management of Contaminated Sites* [M]. US: Springer, 2009. 1-21.
- [13] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(2): 197-202.
- [14] 罗程钟, 易爱华, 张增强, 等. POPs 污染场地修复技术筛选研究 [J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(4): 569-573.
- [15] 唐小亮. 挥发性氯代烃类化合物污染场地健康风险评价与修复技术筛选研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [16] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究 [J]. *土壤学报*, 2012, **49**(6): 1088-1094.
- [17] 李安婕, 全向春, 王龔, 等. 基于 PROMETHEE II 法的污染场地土壤修复技术筛选及应用 [J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(10): 3767-3773.
- [18] Environmental Agency. Model procedures for the management of land contamination Contaminated Land Report 11 [R]. 2004.
- [19] Bai L P, Luo Y, Shi D R, *et al.* TOPSIS-based screening method of soil remediation technology for contaminated sites and its application [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2015, **24**(4): 386-397.
- [20] Marks P J, Wujcik W J, Loncar A F. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (Second Edition) [R]. Washington: United States Department of Defense (USDOD), 1994. 1-43.
- [21] Cai W. Extension theory and its application [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(17): 1538-1548.
- [22] 蔡文. 可拓论及其应用 [J]. *科学通报*, 1999, **44**(7): 673-682.
- [23] 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 等. 淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3690-3696.
- [24] 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 等. 无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3722-3726.
- [25] United States Environmental Protection Agency (USEPA). In-situ treatment of soil and groundwater contaminated with chromium [EB/OL]. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/30004GUQ.pdf>, 2014-3-30.

- [26] Evanko C R, Dzombak D A. Remediation of metals-contaminated soils and groundwater [R]. 1997.
- [27] Khan F I, Husain T, Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 71(2): 95-122.
- [28] Martin T A, Ruby M V. Review of *in situ* remediation technologies for lead, zinc, and cadmium in soil [J]. Remediation Journal, 2004, 14(3): 35-53.
- [29] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 85(1-2): 145-163.

欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2016 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行