

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征

何东,邱波,彭尽晖*,彭亮,胡凌雪,胡瑶

(湖南农业大学园艺园林学院,长沙 410128)

摘要: 矿区废弃地优势植物调查与筛选是植物修复研究的重点。通过研究湖南下水湾铅锌尾矿库区土壤重金属含量,以及库区优势植物对 Pb、Zn、Cd、Mn、Cu 等重金属的富集能力与转移特征,筛选出适应该地区生态修复的先锋植物。结果表明,库区发现高等植物 40 种,40 属 22 科,并筛选出 15 种优势植物。其中地枇杷地上部分 Pb 含量为正常含量上限值的 4.01 倍,转运系数达到 3.91,富集系数达到 14.4,可见地枇杷对 Pb 具有很强的转运能力与富集能力,因此地枇杷对库区污染土壤修复具有巨大潜力,需对其 Pb 富集能力作进一步研究。除地枇杷外,其余 14 种优势植物对尾矿库区重金属污染有较好的耐性,可作为下水湾尾矿库区生态修复的先锋植物。

关键词: 铅锌尾矿库; 重金属; 植物修复; 优势植物; 富集

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3595-06

Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province

HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, PENG Liang, HU Ling-xue, HU Yao

(College of Horticulture and Landscape, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The key of phytoremediation was researches and selecting of dominant species in the lead-zinc tailings. This assay analyzed the amount of heavy metals, and the enrichment and transporting features of heavy metals, such as Pb, Zn, Cu, Cd and Mn, in the dominant species in the district, and then we can select the pioneer plants for ecosystem restoration of the area. Results showed that there were 40 species of higher plants, which belonged to 40 chasses and 22 families in the area. And we selected 15 dominant species by heavy metals. Among these dominant species, the content of Pb in *Ficus tikoua* was 4.01 times higher than that in other plants, the transfer factor(TF) was 3.91, and bioaccumulation factor(BCF) was 14.4. The capability of TF and BCF of *Ficus tikoua* was high, so *Ficus tikoua* had potentials in phytoremediation of heavy metals in polluted area and its enrichment capability of Pb was worth for the further research. Apart from *Ficus tikoua*, other 14 kinds of dominant plants had a better tolerance in metal pollution in tailings, and they can be used as pioneer plants of ecological rehabilitation in lead-zinc tailings in Xiashuiwan.

Key words: lead-zinc tailings; heavy metal; phytoremediation; dominant species; enrichment

尾砂库区是重金属污染十分严重的地区之一^[1],其重金属含量高,成分复杂,因此在尾矿库区寻找重金属富集和耐性的优势植物具有重要意义。目前,重金属污染土壤修复措施主要为物理方法和化学方法,如客土法、浸提法、改良法、淋滤法等^[2]。但这些方法成本高、处理过程复杂,对大面积的污染治理困难。植物修复方法是利用植物对某些重金属元素的吸收与富集能力,将土壤重金属转移到植物体内,以实现生态恢复与污染治理的目的^[3]。植物修复技术作为安全可靠、成本低、效果好的生态修复方法越来越受到重视。因此,筛选重金属富集与耐性植物具有重要意义。

生长在矿区、成矿作用带、重金属污染区域上的植物对重金属污染具有较强的耐性,因此对矿区废弃地上生长的植物进行调查是寻找重金属耐性植物的有效途径之一^[4]。近年来,对铅锌尾矿区耐性植物筛选取得了大量成果。刘成志等^[5]对柴河铅

锌尾矿区调查发现,刺玫蔷薇和小叶杨是 Zn 耐性植物。陈红琳等^[6]对汉源铅锌尾矿废弃地调查发现 8 种 Pb、Zn 耐性植物。刘月莉等^[7]对甘洛铅锌尾矿区调查,发现桔梗、狗尾草和千里光等对 Zn、Pb、Cd 具有最强耐性。本研究通过对湖南下水湾铅锌尾矿库区的植物与土壤进行测定与分析,初步筛选出湖南铅锌尾矿区耐性植物,以期对湖南铅锌尾矿的生态治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

下水湾尾矿库(东经 109°11' ~ 110°55', 北纬

收稿日期: 2012-08-28; 修订日期: 2012-12-28

基金项目: 湖南省科技厅项目(2011NK3055); 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B306)

作者简介: 何东(1987~),男,硕士,主要研究方向为植物修复, E-mail: hd4126@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pengjh2006@yahoo.com.cn

27°44'~29°47')位于湖南省湘西自治州西部,属中亚热带季风湿润气候,年均气温 16.7℃,年均降水量 1421 mm,无霜期 270 d^[8]. 该地区自然条件良好,有利于植物生长,为生态恢复提供了良好的气候条件. 下水湾地区铅锌矿产丰富,矿区铅锌资源潜力达 1 000 万 t,位居湖南省第一位^[9]. 大量的资源开发除带来经济利益,也带来了严重的环境污染,平均每天下水湾新增铅锌尾砂达 14 000 t,因此对于下水湾矿区的环境治理刻不容缓. 库内为尾矿粒度 200 目,占铅锌选矿后剩余物的 65% 左右,尾矿标高达到 373.0 m,尾矿堆积体最大高度在 38 m 左右,尾矿库总库容约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[10].

1.2 野外调查与采样

根据矿区废渣堆积点的分布情况,采用蛇行布点法由尾矿库中心区向外设置 12 个 10 m×10 m 的样方,采集植物样本与土壤样本,并记录样方内的优势植物^[11]. 草本植物与小灌木采集地上部分与地下部分,高大乔木则采集其叶片与枝条,每个样本采集 3 个重复. 土壤样品为附着在植物根系上的 0~20 cm 表层土壤,约 400 g 混合土壤为 1 个样品^[12].

1.3 样品测定与分析

植物样品用蒸馏水洗净,先在 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干,磨碎,备用. 土壤样先除杂,风干,捣碎,四分法弃取,然后用研钵研磨成粉末,全部过 100 目的尼龙筛. 植物样品与土壤样品均采用微波消解仪消解^[13].

消解后的植物、土壤样品采用 ICP-AES 法测定^[14] Mn、Pb、Zn、Cu、Cd 等重金属元素的含量. 质量保证采用双平行样和加标回收法,采用 Excel 2003 进行数据处理^[15].

2 结果与分析

2.1 植物科属组成

经调查在所设样地范围内共有植物 40 种,分属 40 属,22 科. 其中禾本科 7 种(占 17.5%);菊科 4 种(占 10.0%);豆科 4 种(占 10%);桑科 3 种(占 7.5%);蔷薇科 3 种(占 7.5%);漆树科 2 种(占 5%);楝科、荨麻科、肾蕨科、苋科、杉科、海金沙科、马鞭草科、茜草科、早熟禾科、里白科、忍冬科、鸭跖草科、马桑科、爵床科、败酱科、蕨科、棕榈科各 1 种,分别占 2.5%. 下水湾尾砂库区优势植物种类组成见(表 1).

由表 1 可知,出现频度较高与多度较大的优势植物有 15 种:小飞蓬(*Conyza canadensis*)、荻

(*Miscanthus sacchariflorus*)、狗尾巴草(*Setaria viridis*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、蕨(*Pteridium aquilinum* var. *Latiusculum*)、算盘子(*Glochidion puberum*)、地枇杷(*Ficus tikoua*)、艾草(*Artemisia argyi*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、云实(*Caesalpinia decapetala*)、蜈蚣草(*Nephrolepis cordifolia*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、金银花(*Lonicera japonica*)、牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)等. 其中草本植物有 11 种占 73%,说明草本植物对下水湾尾矿库恶劣环境有较强的适应能力,具有较强的抗逆性^[16]. 这些植物为乡土植物,适应本地的气候条件,即使是在尾砂库附近污染物较高的地方也能较好地生长,具有较强的重金属耐性.

2.2 矿区废弃地土壤重金属元素的污染状况

测定分析下水湾尾矿库土壤的重金属元素含量(表 2),结果表明,下水湾尾矿库土壤土壤的 Pb、Zn、Cu、Cd、Mn 的平均含量分别为:93.25、224.44、18.47、18.92、276.14 mg·kg⁻¹.

与湖南土壤重金属含量背景值比较,库区土壤中 Pb、Zn、Cd 的平均含量高出 3.1、2.3 和 146.5 倍;与全国平均值^[17]比较,库区土壤土壤 Pb、Zn、Cd 的平均含量高出 3.5、3.0 和 195.0 倍. 可见,该区土壤受到 Pb、Zn、Cd 等 3 种元素污染十分严重. 研究区土壤的 Pb、Zn、Cu、Cd、Mn 的含量普遍较高,而且变化范围较大,表 2 中得出,变异系数都在 40% 以上,这说明该尾矿库重金属污染存在较大空间变异性,下水湾铅锌尾矿库土壤是一类多种重金属复合污染的土壤.

2.3 优势植物各部分重金属含量

对 15 种优势植物体内的 Zn、Pb、Cu、Cd、Mn 的含量进行测定(表 3),结果表明,植物体内重金属含量与土壤中的重金属含量特征基本一致,反应了植物重金属的富集特征与土壤重金属含量存在正相关性,植物体内积累的重金属含量随土壤中重金属含量的增加而增加,研究结果与文献[18~21]一致. 一般植物的正常重金属含量为: Pb 0.1~41.7 mg·kg⁻¹; Zn 1~160 mg·kg⁻¹; Cd 0.2~3 mg·kg⁻¹; Cu 0.4~45.8 mg·kg⁻¹; Mn 20~400 mg·kg⁻¹. 15 种优势植物中,地枇杷地上部分 Pb 含量超标 14.4 倍,说明地枇杷对 Pb 具有非常强的富集能力,而其他优势植物体内 Pb、Zn、Cu、Cd、Mn 的含量均在正常范围内,说明它们对该环境有较强的适应能

力,能在此重金属污染严重的环境中生长良好,具有一定的重金属耐性.

表 1 下水湾尾砂库区优势植物种类组成¹⁾

Table 1 Composition of main species in the mine tailings area of Xiashuiwan					
种名	拉丁名	科名	属名	生活型	多度
小飞蓬	<i>Conyza canadensis</i>	菊科	白酒草属	G	Soc
绊根草	<i>Cynodon dactylon</i>	早熟禾科	狗牙根属	H	Cop2
狼把草	<i>Bidens tripartita</i>	菊科	鬼针草属	G	Sp
荻	<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	禾本科	芒属	Th	Cop3
狗尾巴草	<i>Setaira viridis</i>	禾本科	狗尾草属	G	Sp
盐肤木	<i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属	Ph	Cop1
黄檀	<i>Dalbergia hupeana</i>	豆科	黄檀属	G	Sol
白茅	<i>Imperata cylindrica</i>	禾本科	白茅属	Th	Soc
算盘子	<i>Glochidion puberum</i>	大戟科	算盘子属	Ph	Cop1
芒萁	<i>Dicranopteris pedata</i>	里白科	芒萁属	H	Cop2
六月雪	<i>Serissa japonica</i>	茜草科	六月雪属	Ch	Sp
梅	<i>Prunus mume</i>	蔷薇科	李属	Ch	Sp
紫苑	<i>Aster tataricus</i> L	菊科	紫苑属	G	Sp
薜荔	<i>Ficus pumila</i>	桑科	榕属	Ch	Sol
金银花	<i>Lonicera japonica</i>	忍冬科	忍冬属	Ch	Cop2
蜈蚣草	<i>Nephrolepis cordifolia</i>	肾蕨科	蜈蚣草属	H	Cop2
悬钩子	<i>Rubus corchorifolius</i>	蔷薇科	悬钩子属	Ch	Sp
苎麻	<i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科	苎麻属	Th	Cop1
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i>	桑科	构树属	Ph	Cop1
地枇杷	<i>Ficus tikoua</i>	桑科	榕属	H	Cop2
硬杆子草	<i>Capillipedium assimile</i>	禾本科	细柄草属	H	Cop2
求米草	<i>Oplismenus undulatifolius</i>	禾本科	求米草属	G	Sp
杉树	<i>Eteleeria evelyniana</i>	松科	杉树属	Ph	Sp
铁扫把	<i>Lespedeza cuneata</i>	豆科	胡枝子属	H	Cop2
灰白毛莓	<i>Rubus tephrodes</i> Hance	蔷薇科	悬钩子属	Ch	Cop1
败酱	<i>Patrinia scabiosaeifolia</i>	败酱科	败酱属	G	Sp
艾草	<i>Artemisia argyi</i>	菊科	蒿属	G	Cop2
鸭跖草	<i>Commelina communis</i>	鸭跖草科	鸭跖草属	G	Cop1
云实	<i>Caesalpinia decapetala</i>	豆科	云实属	Ph	Sp
马桑	<i>Coriaria nepalensis</i>	马桑科	马桑属	Ph	Cop1
牡荆	<i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>	马鞭草科	牡荆属	Ph	Cop2
五节芒	<i>Miscanthus floridulus</i>	禾本科	芒属	Th	Cop2
蕨	<i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>Latiusculum</i>	蕨科	蕨属	H	Cop3
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	禾本科	芦苇属	Th	Cop1
漆树	<i>Toxicodendron delavayi</i>	漆树科	漆属	Ph	Sp
海金沙	<i>Lygodium japonicum</i>	海金沙科	海金沙属	G	Cop1
香椿	<i>Toona sinensis</i>	楝科	香椿属	Ph	Sol
爵床	<i>Justicia procumbens</i>	爵床科	爵床属	Ch	Sol
棕榈	<i>Trachycarpus fortunei</i>	棕榈科	棕榈属	Ph	Un
葛藤	<i>Pueraria lobata</i>	豆科	葛属		Cop1

1) Ph:高位芽植物(phanerophyte); Ch:地上芽植物(chamaephyte); H:地面芽植物(hemicryptophyte); G:地下芽植物(geophyte); T:一年生植物(therophyte); Soc:甚多; Cop3:很多; Cop2:多; Cop1:尚多; Sp:中等; Sol:少而个别; Un:单株

表 2 下水湾尾矿库土壤重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Heavy mental contents in the mine tailings area of Xiashuiwan/mg·kg ⁻¹					
统计值	Pb	Zn	Cu	Cd	Mn
最大值	479.66	355.02	31.13	42.78	479.34
最小值	39.6	73.79	7.34	3.53	98.46
平均值	93.25	224.44	18.47	18.92	276.14
变异系数/%	131.17	44.09	41.95	77.94	59.90
样本数/个	12	12	12	12	12
湖南省平均值	29.7	94.9	27.3	0.126	459
全国平均值	26.0	74.2	27.3	0.097	538

表 3 植物体内重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 3 Concentration distribution of heavy metals in plants/mg·kg⁻¹

植物种类	部位	Pb	Zn	Cu	Cd	Mn
小飞蓬	地上部	7.55	82.70	6.61	2.38	107.79
	地下部	4.20	49.29	10.23	1.34	61.91
荻	地上部	3.26	53.00	6.64	0.28	100.88
	地下部	3.31	56.58	15.42	0.05	26.81
狗尾巴草	地上部	7.47	52.46	10.80	0.37	157.61
	地下部	5.00	69.52	18.06	0.45	138.32
芒萁	地上部	4.22	48.59	4.85	0.06	225.61
	地下部	6.31	15.24	4.14	0.04	60.15
盐肤木	地上部	15.35	84.35	5.83	1.75	40.20
	地下部	7.75	4.24	2.73	0.28	36.58
蕨	地上部	4.83	32.64	6.90	0.02	127.94
	地下部	6.91	14.31	4.48	0.23	43.00
算盘子	地上部	10.25	48.18	5.21	1.57	228.23
	地下部	35.53	47.32	5.45	2.46	229.01
地枇杷	地上部	169.23	46.32	6.78	2.41	65.39
	地下部	11.74	30.26	5.98	2.95	20.89
艾草	地上部	6.80	72.98	13.20	2.29	11.05
	地下部	4.10	47.99	5.26	2.87	76.38
白茅	地上部	4.14	20.35	5.23	0.51	64.77
	地下部	1.26	40.65	5.74	1.59	23.93
云实	地上部	2.40	78.15	4.87	2.05	44.77
	地下部	15.92	20.54	5.19	0.15	5.44
蜈蚣草	地上部	6.55	46.46	6.07	0.88	24.86
	地下部	30.35	73.93	9.38	1.54	36.35
五节芒	地上部	3.77	43.08	4.48	0.72	27.11
	地下部	0.75	54.33	3.21	0.20	116.82
金银花	地上部	3.81	45.41	7.72	1.20	52.10
	地下部	2.29	34.58	6.75	3.59	26.52
牡荆	地上部	8.56	88.20	3.73	1.04	10.98
	地下部	3.59	29.82	3.31	1.42	11.44

2.4 优势植物重金属元素的转运与富集特征

转移系数(transfer factor,TF),即植物地上部与地下部重金属含量的比值,用来衡量植物对重金属的转运能力^[22].

当TF大于1时,说明植物能够将地下部分吸收的元素转运到地上部分,从而达到地下部对某种重金属的大量吸收,此时植物就表现耐性生长.在一定意义上可用植物萃取的方式来治理受污染土壤;当TF小于1时,植物通过自身的排斥机制,减少毒害,阻止地下部分吸收的重金属元素向上部运输.

由表4可知:小飞蓬、狗尾巴草、盐肤木、地枇杷、五节芒、金银花、牡荆等7种植物Pb转移系数大于1;小飞蓬、芒萁、盐肤木、地枇杷、艾草、白茅、云实、金银花、牡荆等9种植物Zn转移系数大

于1;小飞蓬、荻、芒萁、盐肤木、艾草、白茅、云实等7种植物Cd的转移系数大于1;芒萁、盐肤木、地枇杷、白茅、五节芒、金银花、牡荆等7种植物Cu的转移系数大于1;小飞蓬、荻、狗尾巴草、芒萁、盐肤木、地枇杷、白茅、云实、金银花等9种植物Mn的转移系数大于1.在Pb、Zn含量比较高的铅锌尾砂矿区,可选用Pb、Zn转移系数都大于1的小飞蓬、盐肤木、地枇杷、金银花、牡荆等5种乡土植物作为耐性植物.

富集系数(bioaccumulation factor,BCF),即植物地上部与土壤中相应重金属含量的比值,用来衡量植物对土壤中重金属元素的吸收累积能力,是评价植物富集重金属能力的指标之一^[23].BCF大于1时,说明植物地上部分的重金属含量大于其所生长

的土壤环境中的重金属元素含量,因此这些植物可以用于土壤重金属污染修复治理. 从表 4 可以看出地枇杷对 Pb 的 BCF 值达到 3.91,牡荊对 Zn 的 BCF 值达到 1.19,白茅对 Mn 的 BCF 值达到 1.54,地枇杷、牡荊和白茅分别对 Pb、Zn、Mn 的 BCF 值与 TF

值均大于 1,说明地枇杷、牡荊、白茅分别对 Pb、Zn 和 Mn 有较强的迁移能力和富集能力. 可用于 Pb、Zn、Mn 污染严重地区的生态修复. 15 种优势植物对 Cd、Cu 的 BCF 值均小于 1,表明这些植物对 Cd、Cu 的富集能力较弱.

表 4 植物重金属元素的转移系数和富集系数

Tabel 4 Transportation factors(TF) and bioaccumulation factors(BCF) of plants for heavy metals

植物	Cd		Pb		Zn		Cu		Mn	
	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
小飞蓬	0.67	1.77	0.15	1.80	0.68	1.67	0.28	0.64	0.22	1.74
荻	0.05	5.21	0.04	0.98	0.34	0.93	0.25	0.43	0.26	3.76
狗尾巴草	0.06	0.83	0.09	1.49	0.33	0.75	0.41	0.59	0.41	1.13
芒萁	0.01	1.37	0.06	0.66	0.32	3.18	0.15	1.17	0.51	3.75
盐肤木	0.30	6.31	0.34	1.98	0.56	2.09	0.18	2.08	0.09	1.09
蕨	0.01	0.07	0.07	0.69	0.21	2.28	0.22	1.53	0.29	2.97
算盘子	0.27	0.63	0.15	0.28	0.32	1.01	0.16	0.95	0.52	0.99
地枇杷	0.57	0.81	3.91	14.4	0.62	1.53	0.34	1.13	0.13	3.13
艾草	0.44	1.54	0.17	0.48	0.64	1.11	0.79	0.71	0.02	2.23
白茅	0.02	9.19	0.02	0.93	0.15	1.49	0.43	1.49	1.54	4.29
云实	0.06	14.13	0.04	0.15	0.25	3.80	0.66	0.93	0.42	8.22
蜈蚣草	0.03	0.57	0.13	0.21	0.16	0.62	0.69	0.64	0.23	0.68
五节芒	0.02	3.66	0.07	5.05	0.14	0.79	0.51	1.39	0.25	0.23
金银花	0.28	0.33	0.08	1.66	0.61	1.31	0.39	1.14	0.11	1.96
牡荊	0.24	0.73	0.19	2.38	1.19	2.95	0.18	1.12	0.02	0.95

3 讨论

对受重金属污染严重的尾矿库区而言,能存活下来的植物种已在长期的自然选择过程中产生了对重金属毒害的防卫机制,具有较强的抗污染能力^[24]. 因此,下水湾尾矿库区的 15 种优势植物均可作为该地区的植物修复的资源. 在优势植物中草本植物有 11 种占 73%,说明草本植物对下水湾尾矿库恶劣环境有较强的适应能力.

综合分析优势植物体内的重金属含量,从植物体内重金属含量、转运系数和富集系数 3 个指标可见:地枇杷的 Pb 的地上部分含量为正常含量上限值的 4.01 倍,达到 169.23 mg·kg⁻¹,转运系数为 3.91,富集系数达到 14.4,可见地枇杷对 Pb 具有很强的转运能力与富集能力,其作用原理有待进一步研究.

按照植物对重金属的吸收的特点,可以将其分为 3 类:第一类为富集型植物,这些植物是将重金属累积于体内;第二类为根部囤积型植物,它们吸收了大量重金属但地上部重金属含量较少;第三类为规避型植物,这些植物少量吸收重金属^[25]. 而在调查中发现,小飞蓬、荻、狗尾巴草、芒萁、盐肤木、蕨、算盘子、地枇杷、艾草、白茅、云实、蜈蚣草、五节芒、金银花、牡荊等优势植物的地上部分与地

下部分的重金属的含量均在正常范围内. 可见下水湾铅锌尾矿库除地枇杷外,其他 14 种优势植物为规避型的植物,对尾矿库区重金属污染有较好的耐性,可作为修复矿区污染环境的先锋植物,提高植被覆盖率,起到治理污染与保持水土的作用,用于铅锌尾矿库生态恢复.

4 结论

(1)通过对下水湾尾矿库区的调查,共采集植物 40 种,分属 40 属,22 科. 其中优势植物 15 种,在优势植物中以草本植物为主,草本植物有 11 种占 73%.

(2)在 15 种优势植物中,地枇杷地上部分 Pb 含量为正常含量上限值的 4.01 倍,转运系数达到 3.91,富集系数达到 14.4,可见地枇杷对 Pb 具有很强的转运能力与富集能力,因此地枇杷对 Pb 污染土壤修复具有巨大潜力.

(3)下水湾铅锌尾矿库除地枇杷外,其他 14 种优势植物为规避型的植物,对尾矿库区重金属污染有较好的耐性,可作为治理该地区污染环境的先锋植物.

参考文献:

[1] 张慧智,刘云国,黄宝荣,等. 锰矿尾渣污染土壤上植物受重金属污染状况调查[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 111-

- 113.
- [2] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 等. 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(1): 108-112.
- [3] 高岚, 李泽琴, 李国臣. 土壤重金属污染植物修复研究动态[J]. 作物杂志, 2011, (5): 12-15.
- [4] 翁高艺. 香薷属植物对污染重金属耐性和吸取修复作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [5] 刘成志, 尚鹤, 姚斌, 等. 柴河铅锌尾矿耐性植物与优势植物的重金属含量研究[J]. 林业科学研究, 2007, **18**(3): 246-249.
- [6] 陈红琳, 张世熔, 李婷, 等. 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **26**(2): 505-509.
- [7] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 2020-2026.
- [8] 周毅, 黄衡宇, 李菁. 湘西地区蛇足石杉资源调查研究[J]. 中药材, 2010, **33**(2): 186-188.
- [9] 李伟锋. 湖南花垣-凤凰铅锌矿或成全国最大铅锌矿基地[N]. 湖南日报, 2012-03-01.
- [10] 袁湘民. 下水湾尾矿库安全评价及溃坝模拟分析[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [11] 邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 796-804.
- [12] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤, 2006, **38**(5): 591-597.
- [13] 李春鸣. 土壤样品的采集和处理[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2003, **24**(3): 74-75.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 278-281.
- [15] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2038-2045.
- [16] 魏树和, 周启星, 王新. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, **11**(2): 152-160.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 25-40.
- [18] 贾锐鱼, 赵晓光, 祖彪. 叶类蔬菜对重金属的敏感性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(11): 6495-6497.
- [19] 王显炜. 金矿区农田土壤重金属污染与农作物关系探讨[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [20] 王代飞. 基于多种重金属污染评价方法的铜陵矿区土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 复合污染研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [21] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征[J]. 农业环境科学, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- [22] 杨成, 岳娟, 陈金凤, 等. 汾河太原段沉积物和植物中重金属分布特征的研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, **33**(S1): 63-65.
- [23] 崔爽, 周启星, 晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(3): 512-515.
- [24] 张军英, 席荣. 金川镍尾矿库复垦的限制因子及植物适应性[J]. 甘肃冶金, 2007, **29**(4): 92-95.
- [25] 刘茜, 闰文德, 项文化. 湘潭锰矿业废弃地土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, **29**(2): 25-29.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人