

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征

杨胜香^{1,2}, 田启建¹, 梁士楚², 周耀渝¹, 邹慧成¹

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 吉首 416000; 2. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护省部共建教育部重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 矿区重金属污染严重, 寻找和发现适合当地气候与土壤条件的重金属耐性植物是矿区植被恢复和污染土壤修复的前提。通过对湘西花垣县锰矿、铅锌矿区植被调查, 共记录到高等植物 76 种, 隶属 69 属, 39 科。对两矿区的主要优势植物及其土壤重金属含量进行了测定、分析, 结果表明, 两矿区土壤 Pb、Zn、Cd 含量均超过国家土壤环境质量二级标准阈值, 对矿区土壤造成了污染。主要优势植物均能适应矿区土壤重金属元素较高的环境, 对重金属具有一定的耐性, 但不同植物对重金属的吸收和蓄积特征不同, 油茶、芒萁吸收的重金属主要分布在地上部分, 属于金属富集型植物, 适于修复湘西矿区重金属污染中等且使用价值较高的污染土壤; 灰白毛莓、山莓、毛萼莓、魁蒿、蕨吸收的重金属主要累积在根部, 属于根部囤积型植物; 芒草、白茅、箬竹、飞龙掌血根、茎、叶重金属含量均较低, 属于重金属规避型植物。这 2 种植物的植物适合种植在湘西矿区重金属污染严重、使用价值相对较低、面积较大的矿山废弃地。

关键词: 锰矿; 铅锌矿; 优势植物; 重金属; 湘西

中图分类号: X171; X820 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2038-08

Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi

YANG Sheng-xiang^{1,2}, TIAN Qi-jian¹, Liang Shi-chu², ZHOU Yao-yu¹, ZOU Hui-cheng¹

(1. College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Heavy metal pollution is a major environmental problem of mine wasteland. Finding out the tolerant plants, which can adapt to the local climate and the soil conditions, is the premise of vegetation restoration. An extensive vegetation survey and sampling were conducted in Huayuan Mn and Pb/Zn mineland, 76 species belonging to 69 genera and 39 families were recorded. The main dominant species and their associated soils were determined for heavy metal concentrations. The results showed that soil Pb, Zn and Cd levels exceeded the threshold levels of Class II of China Environmental Quality Standard for Soils, which suggested minesoils might be polluted by the three elements. The main dominant plants can adapt to the unfavorable edaphic conditions of mineland and were tolerant to heavy metals. There were great variations of metal uptake and accumulation among different plant species. They were classified into three types according to the metal concentrations in the plant shoots and roots: the accumulator, e. g. *Camellia oleifera* and *Dicranopteris dichotoma*, absorbed a large amount of heavy metals by the roots and transported to the shoots, which can be used to clean up the soils containing light to moderate toxic metal concentration and with high-value; the root compartment, e. g. *Rubus tephrodes*, *R. corchorifolius*, *R. chroosepalus*, *Artemisia princeps* and *Pteridium aquilinum* also absorbed a large amount of heavy metals but held in the roots; and the excluder, e. g. *Miscanthus sinensis*, *Imperata cylindrica*, *Indocalamus tessellatus* and *Toddalia asiatica*, absorbed less heavy metals than the accumulators. The root compartment and the excluder were more suitable for remediation of the mine wastelands with high heavy metal concentration, low-value and extensive area.

Key words: manganese mine; lead/zinc mine; dominant plant; heavy metal; Xiangxi

矿山开采不仅造成大规模的土地破坏, 而且带来严重的重金属污染问题^[1~3]。一般来说, 矿山废弃地土壤结构性差, 重金属含量较高, 有机质含量及植物必需的营养元素缺乏, 很不利于植物生长和其他生物活动, 生态环境恢复十分困难^[4~6]。但植物种类繁多, 各有不同的适应性, 总有一些能够适应这种特殊的环境条件, 在矿山废弃地上定居生长。王友保等^[7]在铜关山野外调查发现, 铜尾矿库自然

定居的 34 种高等植物对重金属有较强的忍耐能

收稿日期: 2011-08-28; 修订日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101532); 湖南省科技计划项目(2011SK3141); 湖南省教育厅科研项目(11C1041); 湘西自治州科技计划项目; 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护省部共建教育部重点实验室开放基金项目(桂科能 1002k003); 吉首大学引进人才科研启动基金项目; 湖南省重点学科建设项目; 喀斯特草地生态系统湖南省研究生培养创新基地项目(JD201101B)

作者简介: 杨胜香(1972~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为矿山污染治理及生态恢复, E-mail: yangsx1998@163.com

力、对环境适应性强,改善了矿区的自然景观. 杨世勇等^[8]和田胜尼等^[9]研究认为某些禾本科、豆科、菊科植物对重金属有完美的生态适应机制,是金属矿山废弃地植被恢复良好的先锋植物. 周兴等^[10]通过对刁江流域有色金属矿区自然生长的植物研究,认为在废弃尾砂库上自然定居的植物,能适应废弃地的极端条件,可作为有色金属矿区植被重建的优选物种. 因此,研究矿山废弃地上自然生长的植物是寻找适于废弃地生境特点的植物的重要途径之一.

寻找和筛选适合当地气候条件与土壤条件的重金属耐性植物是矿区植被重建和植物修复的前提^[11]. 本研究调查了湘西花垣锰矿、铅锌矿区自然生长的主要植物,测试了主要优势植物体内重金属含量,分析它们对重金属的蓄积特征,初步筛选出适合湘西矿区废弃地植被恢复的重金属耐性植物,以期今后矿区污染治理及植物修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

花垣县(东经 109°11' ~ 110°55', 北纬 27°44' ~ 29°47')位于湖南省湘西自治州中部、西部和西北部分别与贵州省和重庆市接壤. 境内具有丰富的矿产资源和植物资源,已探明矿产 20 余种,其中锰矿、铅锌矿储量分别居全国第二位和第三位,有“东方锰都”、“有色金属之乡”的美称^[12]. 原始植被为亚热带典型山区植被,阔叶树、针叶树、灌木和草本植物丰富. 属中亚热带季风湿润气候,年均气温 16.7℃,年均降水量 1 421 mm,无霜期 270 d. 该区域光、热、水资源丰富,有利于植物生长,为废弃地的生态恢复提供了良好的气候条件.

1.2 样品采集

2011 年 5 月对花垣县 2 个典型矿区(民乐锰矿、龙潭铅锌矿)进行了植物调查和采样. 记录了矿区的所有高等植物种类,植物的丰富度按目测估计^[13],分为三级:优势种,常见种和偶见种. 采集优势植物及其所在区域的土壤,植物样采集 3~5 株相同植物混合成一个样品,同步采集 5 个平行样. 土样采集 0~30 cm 的表土,将 3~5 个点土样混为一个样,同步采集 5 个平行样. 分别采集锰矿、铅锌矿区优势植物各 7 种, 35 个样,土样各 35 份,所有样品用聚乙烯塑料袋封装后运回实验室.

1.3 样品处理及分析

植物样品按根、茎、叶分开,用自来水充分冲洗,

洗去附着在表面的灰尘和泥垢,然后用去离子水冲洗 3 次、晾干、于烘箱内 105℃ 杀青 30 min,之后在 70℃ 下烘至恒重,磨碎,过 100 目尼龙筛,于微波消解系统(WX-2100,上海,屹尧)浓 HNO₃ 加热消解.

土壤样品首先去除碎石和植物残体,风干,用木锤捣碎,四分法弃取,然后用研钵研磨成粉末,全部过 100 目的尼龙筛,于微波消解系统王水(HNO₃:HCl = 1:3, 体积比)加热消解.

消解后的植物、土壤样品采用 ICP-OES (iCAP6300 Radial, ThermoFisher Scientific, USA)测定 5 种重金属元素(Mn、Pb、Zn、Cu、Cd)的含量. 质量保证采用双平行样和加标回收法,各元素的加标回收率在 92.5% ~ 106.4%,符合元素分析质量控制标准. 数据处理采用 Excel 2003 和 SPSS 15.0 完成.

2 结果与分析

2.1 两矿区植被物种组成及特征

湘西矿区共记录高等植物 76 种,隶属 69 属, 39 科. 其中锰矿区 31 科, 45 属, 49 种; 铅锌矿区 32 科, 49 属, 53 种(表 1). 从矿区物种组成来看,以菊科、禾本科、蔷薇科的种数为多. 锰矿区菊科有 4 种,禾本科 4 种,蔷薇科 7 种,分别占总种数的 8.2%、8.2% 和 14.3%; 铅锌矿区菊科有 5 种,禾本科 4 种,蔷薇科 4 种,分别占总种数的 9.4%、7.5% 和 7.5%. 从植物生活型来看,以草本植物和灌木为主. 锰矿区记录的 49 种植物中,草本植物 20 种,占 40.8%,灌木 16 种,占 32.6%. 铅锌矿区记录的 53 种植物中,草本植物 23 种,占 43.4%,灌木 16 种,占 30.2%. 这反映出草本植物和灌木对恶劣环境的适应能力较强. 从植物的丰富度来看,锰矿区的优势种有油茶(*Camellia oleifera*)、灰白毛莓(*Rubus tephrodes*)、魁蒿(*Artemisia princeps*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)和芒草(*Miscanthus sinensis*); 铅锌矿区的优势种有油茶(*C. oleifera*)、灰白毛莓(*R. tephrodes*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、毛萼莓(*Rubus chroosepalus*)、飞龙掌血(*Toddalia asiatica*)和芒草(*M. sinensis*).

2.2 两矿区土壤的重金属含量及 pH 值

锰矿、铅锌矿区土壤重金属含量及 pH 值见图 1. 两矿区土壤重金属含量趋势均为: Mn > Pb ≈ Zn > Cu > Cd. 由图 1 可知,锰矿区土壤 Mn 含量明显高

表 1 花垣锰矿、铅锌矿区主要植物种类

Table 1 Main plant species in Mn and Pb/Zn mineland, Huayuan

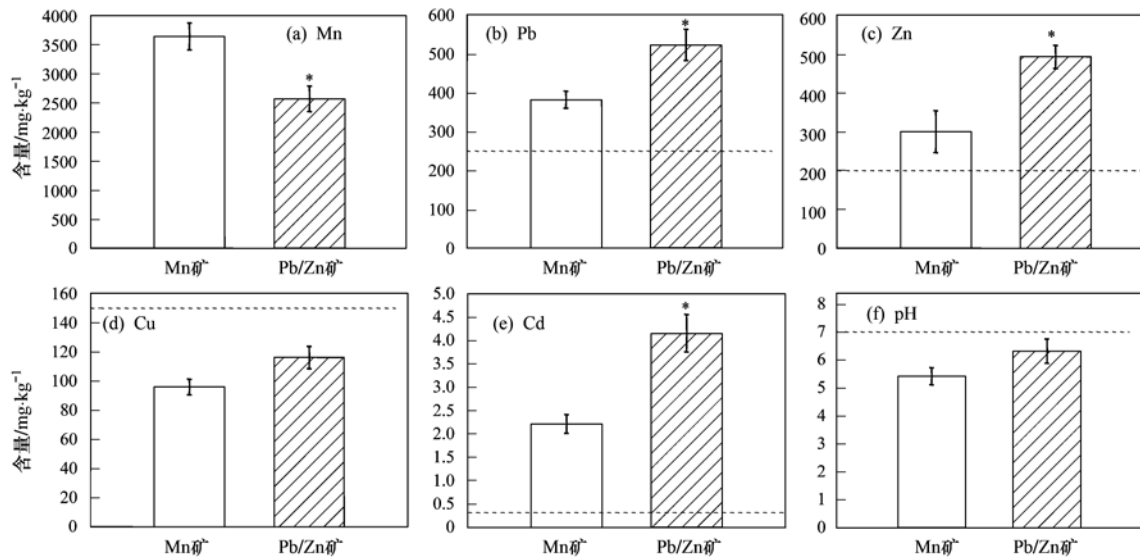
科(锰矿区)	种	丰富度 ¹⁾	生活型
漆树科 Anacardiaceae	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	F	灌木
五加科 Araliaceae	楤木 <i>Aralia elata</i>	F	灌木
菊科 Asteraceae	野茼蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	F	一年生草本
	加拿大飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	F	二年生草本
	魁蒿 <i>Artemisia princeps</i>	D	多年生草本
	白苞蒿 <i>Artemisia lactiflora</i>	F	多年生草本
大戟科 Euphorbiaceae	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>	F	灌木
	油桐 <i>Vernicia fordii</i>	F	乔木
木贼科 Equisetaceae	木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	O	多年生草本
豆科 Fabaceae	葛 <i>Pueraria lobata</i>	F	多年生草本
	云实 <i>Caesalpinia decapetala</i>	F	灌木
	羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i>	O	灌木
金缕梅科 Hamamelidaceae	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	F	乔木
里白科 Gleicheniaceae	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	F	多年生草本
鸢尾科 Iridaceae	蝴蝶花 <i>Iris japonica</i>	F	多年生草本
胡桃科 Juglandaceae	化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	F	小乔木
木通科 Lardizabalaceae	三叶木通 <i>Akebia trifoliata</i>	F	木质藤本
樟科 Lauraceae	山胡椒 <i>Litsea glauca</i>	F	灌木
	猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	F	乔木
	多花黄精 <i>Polygonatum cyrtoneura</i>	O	多年生草本
百合科 Liliaceae	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	F	多年生草本
楝科 Meliaceae	香椿 <i>Toona sinensis</i>	F	乔木
商陆科 Phytolaccaceae	商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>	F	多年生草本
松科 Pinaceae	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	F	乔木
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	F	多年生草本
	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	D	多年生草本
	荇草 <i>Arthraxon hispidus</i>	F	一年生草本
禾本科 Poaceae	淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	F	多年生草本
	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	D	多年生草本
	井栏边草 <i>Pteris multifida</i>	F	多年生草本
	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	F	多年生草本
蔷薇科 Rosaceae	灰白毛莓 <i>Rubus tephrodes</i>	D	灌木
	毛萼莓 <i>Rubus chroosepalus</i>	F	灌木
	湖北海棠 <i>Malus hupehensis</i>	O	小乔木
	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i>	O	灌木
	山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	D	灌木
	悬钩子 <i>Rubus ichangensis</i>	F	灌木
	大叶白纸扇 <i>Mussaenda esquirolii</i>	O	灌木
	鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>	F	多年生草本
	鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	F	多年生草本
	五味子 <i>Schisandra chinensis</i>	O	木质藤本
玄参科 Scrophulariaceae	台湾泡桐 <i>Paulownia kawakamii</i>	F	小乔木
茄科 Solanaceae	白英 <i>Solanum lyratum</i>	F	草质藤本
杉科 Taxodiaceae	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	F	乔木
山茶科 Theaceae	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	D	灌木
榆科 Ulmaceae	山油麻 <i>Trema cannabina</i>	O	灌木
荨麻科 Urticaceae	苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	F	半灌木
马鞭草科 Verbenaceae	紫珠 <i>Callicarpa bodinieri</i>	F	灌木
葡萄科 Vitaceae	异叶爬山虎 <i>Parthenocissus dalzielii</i>	F	草质藤本
漆树科 Anacardiaceae	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	F	灌木
五加科 Araliaceae	楤木 <i>Aralia elata</i>	F	灌木
菊科 Asteraceae	千里光 <i>Senecio scandens</i>	F	多年生草本
	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	F	多年生草本
	野菊 <i>Dendranthema indicum</i>	F	多年生草本

续表 1

科(铅锌矿区)	种	丰富度 ¹⁾	生活型
卫矛科 Celastraceae	苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	F	一年生草本
	加拿大飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	F	二年生草本
	苦皮藤 <i>Celastrus angulatus</i>	F	木质藤本
	苦卖菜 <i>Ixeris polycephala</i>	F	一年生草本
	南蛇藤 <i>Celastrus orbiculatus</i>	F	木质藤本
藜科 Chenopodiaceae	土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	F	一年生草本
木贼科 Equisetaceae	木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	O	多年生草本
大戟科 Euphorbiaceae	杠香藤 <i>Mallotus repandus</i>	F	灌木
豆科 Fabaceae	云实 <i>Caesalpinia decapetala</i>	F	灌木
	马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	F	小灌木
	鸡眼草 <i>Kummerowia striata</i>	F	一年生草本
金缕梅科 Hamamelidaceae	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	O	乔木
唇形科 Lamiaceae	白苏 <i>Perilla frutescens</i>	F	一年生草本
	牛至 <i>Origanum vulgare</i>	O	多年生草本
	樟科 Lauraceae		
海金沙科 Lygodiaceae	山胡椒 <i>Litsea glauca</i>	F	灌木
	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	O	多年生草本
楝科 Meliaceae	香椿 <i>Toona sinensis</i>	F	乔木
罂粟科 Papaveraceae	博落回 <i>Macleaya cordata</i>	F	多年生草本
松科 Pinaceae	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	F	乔木
车前草科 Plantaginaceae	车前草 <i>Plantago asiatica</i>	F	多年生草本
禾本科 Poaceae	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	D	多年生草本
	箬竹 <i>Indocalamus tessellatus</i>	D	多年生草本
	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	D	多年生草本
	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	F	一年生草本
	蕨科 Pteridaceae		
毛茛科 Ranunculaceae	井栏边草 <i>Pteris multifida</i>	F	多年生草本
	打破碗花花 <i>Anemone hupehensis</i>	F	多年生草本
鼠李科 Rhamnaceae	枳椇 <i>Hovenia dulcis</i>	O	乔木
	光枝勾儿茶 <i>Berchemia polyphylla</i>	F	灌木
	蔷薇科 Rosaceae		
蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>		F	多年生草本
	灰白毛莓 <i>Rubus tephrodes</i>	D	灌木
	毛萼莓 <i>Rubus chroosepalus</i>	D	灌木
	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	F	灌木
	茜草科 Rubiaceae		
鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>		F	草质藤本
金剑草 <i>Rubia alata</i>		O	草质藤本
芸香科 Rutaceae	吴茱萸 <i>Evodia rutaecarpa</i>	F	灌木
	竹叶花椒 <i>Zanthoxylum armatum</i>	F	灌木
	飞龙掌血 <i>Toddalia asiatica</i>	D	木质藤本
三白草科 Saururaceae	鱼腥草 <i>Houttuynia cordata</i>	F	多年生草本
五味子科 Schisandraceae	五味子 <i>Kadsura longipedunculata</i>	O	木质藤本
玄参科 Scrophulariaceae	毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>	O	乔木
茄科 Solanaceae	少花龙葵 <i>Solanum photeinocarpum</i>	F	多年生草本
	白英 <i>Solanum lyratum</i>	O	草质藤本
	杉科 Taxodiaceae		
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>		F	乔木
山茶科 Theaceae	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	D	灌木
	荨麻科 Urticaceae		
苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>		F	半灌木
马鞭草科 Verbenaceae	臭牡丹 <i>Clerodendrum bungei</i>	F	小灌木
	狐臭柴 <i>Premna puberula</i>	O	灌木
	葡萄科 Vitaceae		
异叶爬山虎 <i>Parthenocissus dalzielii</i>		F	草质藤本

1) 丰富度等级: D(dominant) 表示优势种, F(frequent) 表示常见种, O(occasional) 表示偶见种

于铅锌矿区, 铅锌矿区 Pb、Zn 和 Cd 含量明显高于锰矿区, 两矿区 Cu 元素含量基本持平。两矿区土壤均呈弱酸性, pH 值分别为 5.4 和 6.3。根据《土壤环境质量标准》二级标准 (GB 15618-1995, pH < 6.5), 两矿区土壤 Pb、Zn、Cd 含量均超过二级标准的阈值(图 1 中用虚线表示), 对矿区土壤造成污染; Cu 元素均在二级标准范围内, 说明 Cu 未对矿区土壤造成污染。目前土壤环境质量标准未对 Mn



星号表示两矿区间差异显著 $P < 0.05$, 虚线表示土壤环境质量二级标准值 (GB 15618-1995, $\text{pH} < 6.5$) 和 $\text{pH} = 7$

图1 花垣锰矿、铅锌矿区土壤重金属含量和 pH 值

Fig. 1 Heavy metal concentrations and pH values of Mn and Pb/Zn mineland, Huayuan

元素做出规定, 据报道^[14], 土壤中 Mn 元素的适中标准为 $170 \sim 1200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 锰矿、铅锌矿区土壤 Mn 平均含量分别为该上限值的 2.1 和 1.5 倍。

2.3 两矿区主要优势植物的重金属含量

锰矿、铅锌矿区主要优势植物体内的重金属含量见表 2。含量最高的是 Mn, 其次是 Zn、Pb、Cu, 最低的是 Cd。这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生物蓄积特征与土壤重金属的相关性。总体来看, 不同植物对重金属的吸收和蓄积特征表现出较大差异。与植物正常含量相比, 油茶和芒萁叶、茎中 Mn、Pb 和 Cd 含量较高, 5 种重金属元素基本表现为叶 > 茎 > 根。灰白毛莓、魁蒿、山莓、蕨和毛茛莓根中重金属含量较高, 且表现为根 > 地上部分。白茅、飞龙掌血、箬竹和芒草体内重金属含量相对较低, 在植物正常含量范围, 且根、茎、叶重金属含量差异不明显。

2.4 两矿区优势植物的重金属富集、转移特征

花垣锰矿、铅锌矿区主要优势植物生物富集系数与转移系数见表 3。生物富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 是指植物体内某种重金属元素含量与土壤中同种重金属含量的比值^[17], 它反映了植物对土壤重金属元素的富集能力。转移系数 (transfer factor, TF) 等于植物地上部分重金属的量除以植物根中该重金属的量, 它反映该植物吸收重金属后, 从根部向茎、叶的转移能力^[18]。从生物富集系数来看, 所有植物对重金属元素 Mn、Pb、Zn、Cu 的富集能力都较弱, $\text{BCF} < 1$, 说明两矿区的

主要优势植物均对重金属有一定的耐受能力。从转移系数看, 油茶和芒萁对 Mn、Pb、Zn、Cu 和 Cd 的转移系数较高, $\text{TF} > 1$, 表现出较强的向地上部分转移的能力。灰白毛莓、魁蒿、山莓、蕨、毛茛莓、白茅、飞龙掌血、箬竹和芒草对 5 种重金属的 TF 值较低, 一般小于 1, 吸收重金属后向上转移的能力较差。

3 讨论

植被恢复是矿业废弃地生态恢复的关键, 几乎所有的自然生态系统的恢复总是以植被的恢复为前提。重金属矿业废弃地土壤存在诸多影响植物定居、生长的限制因子, 如重金属含量高、极端 pH 值、营养元素缺乏、物理结构不良等^[19~21]。但某些特殊的金属型植物 (metallophytes) 由于长期进化和自然选择的作用, 能在重金属污染严重的土壤中正常生长、定居乃至繁殖后代^[22]。在矿区重金属污染土壤上生长的植物对重金属均具有一定的耐性, 不同的耐性机制使植物对重金属的吸收、转移和累积特征表现出较大的差异。目前公认的植物耐重金属机制主要有 3 种策略: 富集型 (accumulator)、根部囤积型 (compartment) 和规避型 (excluder)^[11]。

富集型植物能够从土壤中主动吸收并富集重金属元素, 同时将大量重金属转移到地上部分^[23]。研究表明, 油茶、芒萁体内重金属 Mn、Pb 和 Cd 含量相对较高, 对 5 种重金属元素的转移系数均大于 1, 吸收重金属后表现出较强的向地上部分转移的能力, 符合富集型植物特征。根部囤积型植物对土壤中

表 2 花垣锰矿、铅锌矿区主要优势植物重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Heavy metal concentrations of the main dominant plants in Mn and Pb/Zn mineland, Huayuan/mg·kg ⁻¹							
矿区	植物种类	部位	Mn	Pb	Zn	Cu	Cd
锰矿	油茶	叶	2 191.76 ±213.06	79.32 ±2.63	122.53 ±3.64	14.69 ±0.15	2.78 ±0.15
		茎	977.56 ±100.52	59.98 ±1.97	105.42 ±1.33	12.2 ±0.05	1.45 ±0.27
		根	492.35 ±98.23	50.63 ±2.12	89.78 ±3.19	7.05 ±0.67	0.67 ±0.51
	灰白毛莓	叶	569.47 ±79.03	30.06 ±4.24	94.76 ±2.4	21.48 ±0.32	1.17 ±0.08
		茎	408.73 ±71.51	20.80 ±6.83	73.29 ±8.62	11.24 ±0.51	1.32 ±0.18
		根	974.76 ±141.58	87.60 ±4.92	88.58 ±10.21	36.36 ±0.89	2.54 ±0.64
	魁蒿	叶	447.13 ±58.55	10.28 ±2.67	101.98 ±2.71	25.34 ±1.20	1.18 ±0.44
		茎	310.96 ±29.76	28.66 ±7.37	137.43 ±25.08	43.51 ±5.02	0.41 ±0.41
		根	1 276.61 ±299.51	150.17 ±8.19	158.38 ±14.86	44.04 ±3.68	2.47 ±0.76
	山莓	叶	304.23 ±60.02	47.30 ±1.44	87.37 ±16.76	28.48 ±0.70	2.32 ±0.26
		茎	242.57 ±98.97	25.34 ±1.55	38.65 ±8.48	14.65 ±2.63	2.06 ±0.24
		根	1 018.22 ±24.3	68.29 ±4.65	116.02 ±25.72	16.44 ±1.61	3.18 ±0.70
	芒萁	叶	2 110.27 ±207.74	107.02 ±25.20	85.65 ±8.18	42.45 ±5.66	4.59 ±0.85
		茎	1 553.47 ±124.06	80.06 ±4.24	37.45 ±2.12	34.81 ±7.28	1.39 ±0.38
		根	404.58 ±16.49	16.62 ±2.48	63.77 ±4.49	26.69 ±3.46	1.09 ±0.36
	蕨	叶	404.88 ±54.00	10.08 ±1.76	44.76 ±4.36	10.09 ±1.12	0.95 ±0.03
		茎	266.48 ±17.86	19.39 ±17.13	51.34 ±3.94	18.74 ±1.17	0.56 ±0.07
		根	1 336.19 ±245.44	47.06 ±8.08	59.9 ±12.41	32.89 ±1.91	1.32 ±0.14
	芒草	叶	440.12 ±70.84	7.67 ±1.31	24.28 ±3.5	14.18 ±2.13	1.05 ±0.22
		茎	310.11 ±42.08	5.84 ±2.04	34.8 ±8.38	11.01 ±2.07	0.85 ±0.16
		根	532.55 ±86.13	44.38 ±6.99	50.25 ±8.12	34.01 ±9.85	1.55 ±0.40
铅锌矿	油茶	叶	1 680.87 ±163.09	81.70 ±10.61	137.06 ±25.25	18.12 ±0.9	2.66 ±0.42
		茎	1 344.93 ±39.53	61.51 ±15.31	96.01 ±13.87	17.37 ±1.46	1.01 ±0.37
		根	672.27 ±30.97	65.46 ±16.19	126.17 ±1.91	12.95 ±2.1	1.19 ±0.41
	灰白毛莓	叶	403.72 ±48.17	51.94 ±4.93	91.65 ±9.29	20.69 ±3.77	1.48 ±0.19
		茎	258.47 ±36.25	45.06 ±3.70	113.87 ±10.12	27.79 ±1.65	1.57 ±0.17
		根	1 491.55 ±46.98	108.77 ±8.16	140.6 ±19.51	36.08 ±7.5	3.12 ±0.37
	白茅	叶	50.05 ±2.11	15.00 ±0.16	68.74 ±1.88	5.26 ±1.17	1.06 ±0.20
		茎	15.43 ±1.35	21.81 ±2.64	18.59 ±0.91	10.80 ±0.14	1.00 ±0.07
		根	230.01 ±39.63	83.21 ±11.75	81.21 ±10.51	19.67 ±6.67	1.51 ±0.27
	箬竹	叶	212.31 ±46.19	28.48 ±3.87	148.38 ±25.74	16.21 ±3.08	0.93 ±0.07
		茎	81.89 ±9.44	33.06 ±4.35	31.09 ±5.88	11.25 ±1.41	0.96 ±0.10
		根	96.17 ±4.12	11.19 ±1.33	121.73 ±8.39	11.11 ±0.76	0.79 ±0.08
	毛萼莓	叶	126.85 ±2.54	12.31 ±0.80	109.65 ±30.22	7.74 ±0.10	1.05 ±0.06
		茎	67.63 ±5.67	8.99 ±2.18	26.47 ±2.39	2.39 ±0.12	0.24 ±0.03
		根	1 056.60 ±15.91	46.99 ±4.02	199.31 ±6.23	20.74 ±4.07	2.30 ±0.08
	飞龙掌血	叶	60.04 ±12.19	8.12 ±0.34	63.01 ±1.95	13.08 ±0.48	1.05 ±0.02
		茎	33.02 ±0.97	6.10 ±2.25	11.08 ±3.02	10.56 ±0.26	0.41 ±0.12
		根	131.87 ±4.29	22.38 ±0.22	60.08 ±2.61	22.62 ±1.46	1.96 ±0.10
	芒草	叶	99.91 ±1.44	26.98 ±2.78	39.87 ±5.03	6.79 ±0.23	1.05 ±0.21
		茎	119.90 ±4.05	12.21 ±1.64	37.30 ±5.05	10.77 ±1.61	0.42 ±0.19
		根	146.29 ±28.17	42.51 ±10.84	61.34 ±9.22	22.83 ±2.24	1.16 ±0.14
植物正常含量 ^[15]			1 ~ 700 ^[16]	0.1 ~41.7	1 ~ 160	0.4 ~45.8	0.2 ~0.8

表 3 花垣锰矿、铅锌矿主要优势植物的富集系数和转运系数

Table 3 Bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) of the dominant plants in Mn and Pb/Zn mineland, Huayuan											
矿区	植物	Mn		Pb		Zn		Cu		Cd	
		BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
锰矿	油茶	0.57	4.45	0.22	1.57	0.43	1.36	0.13	2.08	1.53	4.14
	灰白毛莓	0.42	0.58	0.17	0.34	0.31	1.07	0.33	0.59	1.08	0.52
	魁蒿	0.28	0.35	0.14	0.57	0.46	0.87	0.44	0.99	1.03	0.48
	山莓	0.48	0.30	0.18	0.69	0.43	0.75	0.32	1.73	1.06	0.73
	芒萁	0.53	5.22	0.28	6.44	0.30	1.34	0.47	1.58	1.46	2.38
	蕨	0.24	0.30	0.14	0.41	0.18	0.86	0.41	0.57	0.60	0.72
	芒草	0.17	0.83	0.13	0.17	0.17	0.69	0.37	0.42	0.80	0.67
铅锌矿	油茶	0.75	2.50	0.15	1.25	0.26	1.09	0.15	1.40	0.82	2.24
	灰白毛莓	0.74	0.27	0.14	0.48	0.31	0.81	0.28	0.77	0.53	0.50
	白茅	0.11	0.07	0.18	0.26	0.13	0.46	0.18	0.55	0.28	0.70
	箬竹	0.07	2.21	0.07	2.95	0.31	1.22	0.15	1.46	0.29	1.22
	毛萼莓	0.42	0.12	0.13	0.26	0.28	0.91	0.17	0.37	0.49	0.46
	飞龙掌血	0.04	0.46	0.03	0.36	0.12	1.05	0.04	0.58	0.64	0.54
	芒草	0.05	0.82	0.12	0.37	0.13	0.65	0.05	0.47	0.34	0.90

的重金属具有被动吸收的特征,能将重金属吸收至体内,但金属元素大量囤积于根部,只有少量向地上部运移,减少对光合、呼吸、生殖系统的伤害^[24].灰白毛莓、山莓、毛萼莓、魁蒿、蕨吸收的重金属主要累积在根部,向地上转移的能力较弱,属于根部囤积型植物.规避型植物则能抵制植物根系对重金属的吸收,并常常将土壤重金属沉淀在根系表面,而植物体内只吸收少量的重金属^[23].芒草、白茅、箬竹、飞龙掌血尽管生长在重金属元素含量较高的环境中,体内重金属含量均在植物正常含量范围内,且重金属富集系数和转运系数均小于1,可见属于重金属规避型植物.

矿区植被恢复过程中,要根据植物对重金属的不同耐性和蓄积特征采取相应的植被恢复措施.富集型植物由于其对重金属耐性高且能将吸收的重金属转移到地上部位,适用于重金属污染中等且使用价值较高的污染土壤,如矿区周边的农用地、生活区等,种植几茬土壤中的重金属含量减少到允许范围内后再移作农田使用^[25].但在种植过程中要采取一定的防护措施,防止重金属通过食物链对人畜产生毒害.另外,收割后也要做妥善处理,避免重金属带来二次污染.根部囤积型和规避型植物具重金属耐性高且吸收、富集量少的特点,适合种植在重金属污染严重、使用价值相对较低、面积较大的各种类型的矿山废弃地,如尾矿库、排土场、冶炼渣堆放场地等^[26].在矿区种植这类植物可以起到稳定土壤、控制污染、改善景观、减轻重金属通过风蚀、水蚀对周边地区带来的污染.

4 结论

(1)通过对湘西花垣县锰矿、铅锌矿区植被调查,共记录到高等植物76种,隶属69属,39科.其中锰矿区31科,45属,49种;铅锌矿区32科,49属,53种.

(2)湘西花垣县矿区的不同植物对重金属的吸收和蓄积特征不同.油茶和芒萁叶、茎重金属含量较高,且表现为叶>茎>根,属于金属富集型植物,适于修复湘西矿区重金属污染中等且使用价值较高的污染土壤.灰白毛莓、魁蒿、山莓、蕨和毛萼莓根中重金属含量较高,表现为根>地上部分,属于根部囤积型植物;白茅、飞龙掌血、箬竹和芒草根、茎、叶重金属含量均较低,在植物正常含量范围内,属于重金属规避型植物.这两种类型的植物适合种植在湘西矿

区重金属污染严重、使用价值相对较低、面积较大的矿山废弃地.

参考文献:

- [1] Memon, A R, Schröder P. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, **16**(2): 162-175.
- [2] Suresh B, Ravishankar G A. Phytoremediation-a novel and promising approach for environmental clean-up [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2004, **24**(2-3): 97-124.
- [3] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 775-780.
- [4] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, *et al.* Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques [J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(10): 1103-1111.
- [5] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **357**(1-3): 38-53.
- [6] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al.* Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in Southern China [J]. *Restoration Ecology*, 2005, **13**(1): 49-60.
- [7] 王友保,刘登义,张莉,等.铜官山铜尾矿库植被及土壤酶活性研究[J].*应用生态学报*, 2003, **14**(5): 757-760.
- [8] 杨世勇,谢建春,刘登义.铜陵铜尾矿复垦现状及植物在铜尾矿上的定居[J].*长江流域资源与环境*, 2004, **13**(5): 488-493.
- [9] 田胜尼,孙庆业,王铮峰,等.铜陵铜尾矿废弃地定居植物及基质理化性质的变化[J].*长江流域资源与环境*, 2005, **14**(1): 88-93.
- [10] 周兴,宋书巧,吴欢.广西刁江流域有色金属矿区尾砂库植物研究[J].*热带地理*, 2003, **23**(3): 226-230.
- [11] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等.湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J].*生态学报*, 2005, **25**(5): 1146-1151.
- [12] 陈明辉,孙际茂,付益平,等.湘西州矿产资源现状及找矿方向[J].*矿产与地质*, 2008, **22**(2): 93-96.
- [13] Brooks R R. *Plants that hyperaccumulate heavy metals* [M]. Wallingford: CAB International, 1998.
- [14] 王敬国. *植物营养元素的土壤化学* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1995.
- [15] 曹鉴燎,池柏良. *都市生态走廊* [M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [16] Gerber G B, Léonard A, Hantson P. Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds [J]. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 2002, **42**(1): 25-34.
- [17] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, *et al.* Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. *Nature Biotechnology*, 1995, **13**(5): 468-474.

- [18] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants [A]. In: Raskin I, Ensley B D, eds. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000. 193-229.
- [19] Adriano D C, Wenzel W W, Vangronsveld J, *et al.* Role of assisted natural remediation in environmental cleanup [J]. *Geoderma*, 2004, **122**(2-4): 121-142.
- [20] Bolan N S, Duraisamy V P. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: a review involving specific case studies [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, **41**(3): 533-555.
- [21] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(1): 168-175.
- [22] Baker A J M. Metal tolerance [J]. *New Phytologist*, 1987, **106**(1): 93-111.
- [23] Baker A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, **3**(1-4): 643-654.
- [24] Mendez M O, Maier R M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments-An emerging remediation technology [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, **116**(3): 278-283.
- [25] Marchiol L, Sacco P, Assolari S, *et al.* Reclamation of polluted soil: phytoremediation potential of crop-related Brassica species [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, **158**(1): 345-356.
- [26] Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Identification of weed plants excluding the uptake of heavy metals [J]. *Environment International*, 2005, **31**(6): 829-834.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行