

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)
五氯酚对稀有鮑鲫卵黄蛋白原及 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)	

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

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要: 在废弃的铅锌尾矿库进行人工植被恢复试验. 对 3 年生 15 种植物重金属积累和养分吸收特性的研究表明, 植物对土壤重金属和养分的吸收积累因植物种类、部位、金属种类和种植时间的不同而有显著差异. 树木不同器官 Pb 质量浓度高低的总趋势为根 > 叶 > 茎, 部分树种 Zn 质量浓度表现为叶 > 根和茎; 在 15 种参试植物中, 加拿大紫荆根系 Pb 和 Zn 质量浓度均处于最高水平(分别为 $1\ 803\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2\ 120\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 盐肤木具有最高的茎枝 Pb、叶片 Pb 和 Zn 质量浓度(分别为 280 、 546 和 $1\ 507\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 旱柳具有最高的茎枝 Zn 质量浓度($729\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和较高的叶片 Zn 质量浓度($1\ 153\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 枫香、紫花苜蓿对 Pb, 旱柳、盐肤木、紫花苜蓿对 Zn 的转移系数 TF 值均 > 1. 植物 Pb 的富集系数 BCF 值均小于 0.17, 旱柳、盐肤木、紫花苜蓿 Zn 的 BCF 值达 $0.37 \sim 0.43$. 固氮植物体内 N 含量显著高于其它植物, 火炬树、臭椿对 P 和夹竹桃对 K 的吸收积累能力强. 随着种植时间的增加, 植株体内有重金属质量浓度增加、营养元素含量下降的趋势. 盐肤木、旱柳等重金属积累树种及紫穗槐、紫花苜蓿、截叶胡枝子、桤木等固氮植物在铅锌尾矿治理中具有应用前景.

关键词: 重金属积累; 营养吸收; 植物固定; 尾矿库修复; 木本植物

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2021-07

Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings

SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, LI Jiang-chuan

(The Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China)

Abstract: Vegetation restoration field test was carried out in the abandoned lead-zinc tailings for 3 years. The study showed that accumulation of lead (Pb), zinc (Zn) and nutrient uptake differed with plant species and organs, heavy metals, and planting time. Pb was mainly accumulated in tree roots, and its content distribution in tree organs was generally in the order of roots > leaves > stems. But Zn concentrations in leaves of several tree species were higher than those in roots and stems. Within the tested 15 species, *Cercis Canadensis* had the highest concentrations of Pb and Zn in roots ($1\ 803$ and $2\ 120\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively). *Rhus chinensis* had the highest Pb concentration in stems and leaves (280 and $546\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively) and Zn concentration ($1\ 507\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in leaves. Zn concentration in stems and leaves of *Salix matsudana* (729 and $1\ 153\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively) were the highest. Among the tested 15 species, TF values for Pb of *Liquidambar formosana*, *Medicago sativa*, and for Zn of *Salix matsudana*, *Rhus chinensis*, *Medicago sativa* were higher than 1. BCF values for Pb were all lower than 0.17, while that for Zn were all lower than 0.44. The N contents in nitrogen-fixing plants, P contents in *Rhus typhina* and *Ailanthus altissima*, and K content in *Nerium indicum* were significantly higher than those in other plants. With the increase of planting time, concentrations of heavy metal in plant body increased significantly; however the inverse trend was observed in nutritional element content. The species have higher metal accumulation capacity, such as *Rhus chinensis*, *Salix matsudana* and those nitrogen-fixing plants have higher tolerance to metal contamination and nutrient deficiency, such as *Amorpha fruticosa*, *Medicago sativa*, *Lespedeza cuneata*, and *Alnus cremastogyne*, they were suitable as the phytostabilizers in abandoned mine tailings.

Key words: heavy metal accumulation; nutrient uptake; phytostabilisation; mine tailing restoration; woody species

废弃的金属尾矿因含较高的重金属而对环境造成危害, 大部分尾矿处置地区严重缺乏植被, 这些废弃物导致了严重的环境污染问题^[1~3]. 与传统的处理方法相比, 植物修复是重金属污染土壤治理的一个研究热点^[4,5]. 目前研究报道了数百种超累积植物^[6], 它们绝大多数属于草本植物, 根系较浅, 生物量小, 存在一定缺陷, 因此限制了植物修复效果. 相对于草本植物, 木本植物积累重金属的能力一般较

低, 多属于耐性植物, 具有生物量大、根深、寿命长, 一次栽种、多次收获并兼顾景观美化等优点, 因此树木修复的应用潜力巨大^[7,8]. 目前, 尾矿库植物修复

收稿日期: 2011-08-25; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家林业局 948 项目(2006-4-06); 浙江省科技厅重大项目(2006C12065); 浙江省科技厅社会公益项目(2011C23036)

作者简介: 施翔(1981~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为植物修复, E-mail: shixiang284@sina.com

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

研究已有不少报道^[9~12],大多局限于野外调查、盆栽试验等,且以草本植物为主,有关人工造林方面的研究报道很少.本研究利用废弃的铅锌尾矿库开展乔灌草相结合的人工植被恢复试验,分析不同树种在尾矿库条件下对 Pb 和 Zn 这 2 种重金属以及营养元素的吸收积累特性的差异以及在树木不同器官中的分布、转运特征,以期为尾矿库植被恢复技术提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验立地条件和栽培措施

尾矿库位于浙江省富阳市境内(30°126'N,

119°847'E),区域性土壤类型为红黄壤.该区域属于亚热带季风气候,年平均气温 16.2℃,年降水量 1 452 mm.尾矿库由尾砂及部分矿渣建筑垃圾堆积而成,寸草不生,水土流失严重.2007 年采集尾矿库 8~10 个土壤样品以及附近山地红黄壤样品(土层表层 0~30 cm)进行分析,其物理化学性质见表 1.根据国家标准 GB 15618-1995,尾矿库土壤中的重金属含量显著高于标准值.红黄壤中 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 含量显著低于尾矿区,分别为 176.4、383.3、184.7、9.00、6.70 mg·kg⁻¹,而 N、P 和 K 含量分别为 0.40、0.32 和 21.1 mg·g⁻¹,pH 值为 6.84.

表 1 铅锌尾矿库土壤物理化学性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of Pb/Zn mine tailings

项目	pH	全 N /mg·g ⁻¹	全 P /mg·g ⁻¹	全 K /mg·g ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Cr /mg·kg ⁻¹	Ni /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹
尾矿砂	7.84±0.12	0.05±0.04	0.378±0.031	5.10±1.98	2 054.8±922.0	1 739.5±924.4	217.3±101.2	27.85±4.81	12.55±1.20	30.5±38.5

主要栽培方法:沿等高线开挖宽 20 cm、深 15 cm 种植沟,间距 1 m,就近取红黄壤填入沟中.在沟内播种或栽苗,对于播种植物,加以覆土盖草以促进出苗.

1.2 参试植物材料和田间设计

参试乔灌草植物设计 20 种,造林第 3 年完好保存的有 15 种,其中 2007 年春季进行沟内播种植物 5 种:盐肤木 *Rhus chinensis* Mill、截叶胡枝子 *Lespedeza cuneata* (Dum. Cours.) G. Don、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.、紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.、田菁 *Sesbania cannabina* Pers.; 2008 年春栽种苗木 10 种,其中采用裸根苗沿土沟栽种的 7 种:麻栎 *Quercus acutissima* Carr.、臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle、桤木 *Alnus cremastogyne* Burk.、无患子 *Sapindus mukorossi* Gaertn.、夹竹桃 *Nerium indicum* Mill.、女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.、枫香 *Liquidambar formosana* Hance..同时用带土球(球径 15~20 cm)苗木在矿砂表面挖穴栽种的 3 种:旱柳 *Salix matsudana* Koidz、火炬树 *Rhus typhina* Nutt 和加拿大紫荆 *Cercis canadensis*,所用苗木除加拿大紫荆为 2 年生外,其余均为 1 年生,行距 1 m、株距 1 m.按照随机区组设计,每种植物 1~2 行,重复 4 次.于 2007 年 10 月对播种的 4 种植物盐肤木、截叶胡枝子、紫穗槐和田菁采样,分析根系中重金属含量;2008 年 10 月采集麻栎、旱柳、桤木、无患子、女贞、盐肤木、夹竹桃和紫穗槐 8 种植物的叶片进行重金属和营养元素分析.2009 年 10 月对所有参试植

物采样分析其植物组织中的重金属和营养元素含量.在 3 个重复内,每重复取播种植物中等苗 10 株,植苗树种取 3 株中等苗.

1.3 样品分析

样品收获后,根据实际情况将植株分为根系、茎枝和叶片 3 部分或根系、地上 2 部分.所有植物样品用去离子水洗净,先在 105℃下杀青 30 min,80℃烘干 3 d,植物样品烘干粉碎后,称取 0.2 g,用 4 mL HNO₃ 和 1 mL HClO₄ 混合液消解,Pb、Zn 和 K 含量用电感耦合等离子原子发射光谱 ICP-OES 测定(IRIS Intrepid II XSP, Thermo).植物组织中全 N 含量采用微量凯氏定氮法测定,全 P 含量采用钼锑抗比色法(钼蓝法)测定^[13].

土壤经风干过筛后经 5 mL 65% HNO₃ 和 70% HClO₄ 混合液(体积比 4:1)消解,ICP-OES 测定重金属含量^[14].采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,半微量凯氏定氮法测定土壤全氮;采用 NaOH 熔融-钼锑抗混合试剂比色法测定土壤全磷;采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定土壤全钾^[15].

1.4 数据分析

转移系数(translocation factor, TF)=地上部重金属质量浓度/根系重金属质量浓度

富集系数(bioconcentration factor, BCF)=地上部重金属质量浓度/土壤重金属平均质量浓度

所有试验数据采用 Excel 和 DPS 数据处理系统进行方差分析和邓肯氏法差异显著性检验

2 结果与分析

2.1 植物体不同部位铅、锌质量浓度

植物对重金属吸收积累能力的高低是尾矿库绿化植物选择的重要指标之一。表 2 可知,植物根系、茎枝和叶片 Pb 和 Zn 质量浓度存在显著的种间差异。15 种植物根系 Pb 质量浓度平均值为 503.1 mg·kg⁻¹,种间变幅 190.3 ~ 1 803.3 mg·kg⁻¹,加拿大紫荆最高,麻栎居次;茎枝 Pb 平均质量浓度 129 mg·kg⁻¹,种间变幅 42 ~ 280 mg·kg⁻¹,盐肤木最高,枫香居次;叶片 Pb 平均质量浓度 152 mg·kg⁻¹,种间变幅 62 ~ 546 mg·kg⁻¹,仍以盐肤木最高。紫花苜蓿地上部平均

Pb 质量浓度亦较高(278 mg·kg⁻¹)。Zn 质量浓度平均值及变幅分别为:根系 780.3 (360 ~ 2 120) mg·kg⁻¹,加拿大紫荆最高,麻栎居次;茎枝 350 (137 ~ 729) mg·kg⁻¹,旱柳最高,盐肤木次高;叶片 708 (376 ~ 1 507) mg·kg⁻¹,盐肤木最高,其次是旱柳。

多数树种的 Pb 质量浓度在不同部位的分布模式表现为根>叶≥茎,但盐肤木叶中 Pb 含量高于根和茎,枫香根、茎、叶 Pb 含量无显著差异。植物 Zn 质量浓度在不同部位的分布因树种而异,加拿大紫荆、麻栎、桤木、夹竹桃、女贞、无患子等表现为根>叶≥茎,盐肤木、旱柳、臭椿、紫穗槐、火炬树、枫香等表现为叶片>根和茎。

表 2 15 种植物组织中重金属的平均质量浓度(2009 年)¹⁾/mg·kg⁻¹

树种	根系		茎枝		叶	
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
麻栎	1 196.0 ± 565.0 b	1 843.3 ± 1 374.1 ab	97.0 ± 7.2 bc	207.0 ± 11.5 de	136.0 ± 7.0 bc	610.6 ± 45.1 cde
臭椿	245.3 ± 73.3 d	522.0 ± 345.3 c	50.3 ± 5.8 c	278.3 ± 66.4 cde	159.3 ± 28.6 bc	932.0 ± 164.3 bc
旱柳	221.0 ± 39.8 d	501.3 ± 55.8 c	66.6 ± 11.8 c	729.0 ± 99.8 a	62.0 ± 6.2 c	1 153.0 ± 208.6 ab
桤木	876.3 ± 197.0 bc	1 134.6 ± 409.8 bc	93.0 ± 19.8 bc	310.6 ± 49.3 cde	83.0 ± 8.0 c	530.3 ± 66.7 cde
无患子	326.6 ± 25.7 cd	627.6 ± 43.3 c	42.0 ± 9.5 c	137.0 ± 36.4 e	118.6 ± 9.8 bc	581.3 ± 59.4 cde
枫香	218.3 ± 8.0 d	399.0 ± 14.1 c	273.3 ± 95.7 a	428.3 ± 102.4 bcd	221.3 ± 10.9 b	477.3 ± 22.1 de
女贞	285.0 ± 150.8 cd	613.3 ± 394.7 c	220.3 ± 43.8 ab	306.3 ± 38.6 cde	65.6 ± 8.9 c	375.6 ± 41.5 e
火炬树	342.0 ± 12.2 cd	610.6 ± 31.7 c	78.0 ± 6.0 c	483.0 ± 35.0 bc	101.6 ± 14.6 bc	834.0 ± 253.0 bcd
加拿大紫荆	1 803.3 ± 985.9 a	2 120.0 ± 1 110.7 a	77.3 ± 19.7 c	158.6 ± 35.5 e	164.0 ± 83.7 bc	570.6 ± 135.1 cde
夹竹桃	500.3 ± 46.8 cd	695.3 ± 251.4 c	169.0 ± 71.4 abc	395.0 ± 107.6 bcd	103.6 ± 27.6 bc	397.3 ± 96.8 e
盐肤木	352.0 ± 132.6 cd	559.6 ± 330.5 c	280.0 ± 86.3 a	550.3 ± 187.1 ab	545.6 ± 99.6 a	1 506.6 ± 261.8 a
紫穗槐	190.3 ± 107.6 d	360.0 ± 168.3 c	97.0 ± 28.0 bc	222.0 ± 57.1 de	65.6 ± 14.7 c	531.6 ± 164.9 cde

	根系		地上部	
	Pb	Zn	Pb	Zn
截叶胡枝子	470.0 ± 263.4 cd	906.6 ± 621.0 c	169.3 ± 58.4 a	541.3 ± 317.8 a
紫花苜蓿	246.3 ± 99.8 d	443.6 ± 170.0 c	278.0 ± 116.1 b	654.6 ± 243.5 a
田菁	273.3 ± 38.5 cd	367.0 ± 54.0 c	26.3 ± 7.5 c	230.0 ± 11.5 b

1) 表中同一列不同字母表示各树种体内重金属浓度差异显著(P<0.05);数据统计根系按 15 种植物进行,其余组织按 12 种植物和 3 种植物分别分析,下同

2.2 植物体的重金属转移系数、富集系数

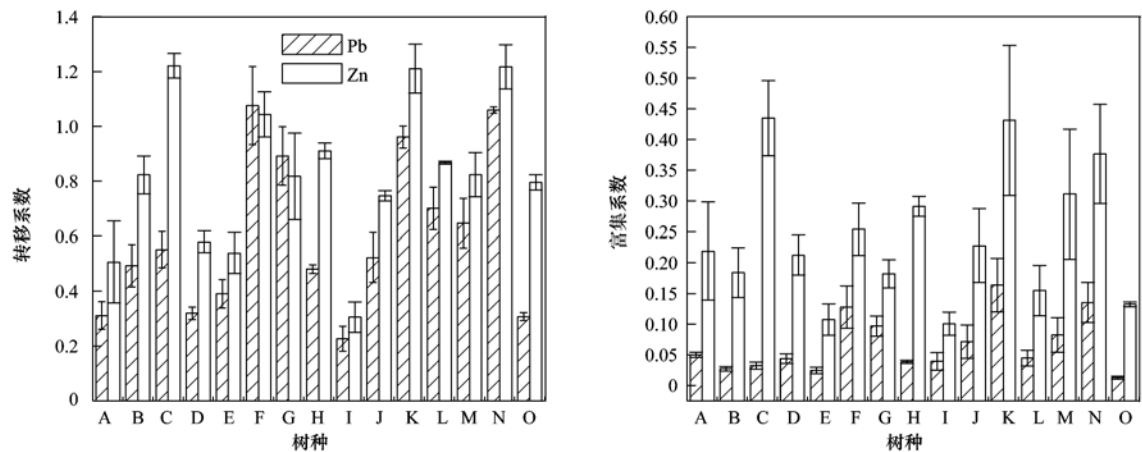
方差分析表明重金属铅、锌的转移系数(TF)存在着显著的种间差异(图 1)。15 种植物中,加拿大紫荆、麻栎、桤木、无患子 4 树种对铅、锌转移能力较低,铅 TF 值在 0.15 以下,锌 TF 值低于 0.34。枫香、紫花苜蓿铅 TF 值则大于 1.12,盐肤木为 0.92。锌 TF 值以旱柳、紫花苜蓿、盐肤木为最高,均达 1.2 以上。总体看来,植物对锌的转移能力高于铅。

富集系数(BCF)反映植物富集土壤重金属的能力。方差分析表明植物的 BCF 值存在显著的种间差异。图 1 表明参试植物对铅的富集能力较低,盐肤木、紫花苜蓿、枫香与其他植物相比对铅有一定的富

集能力,BCF 值为 0.128 ~ 0.164,臭椿、无患子、田菁铅 BCF 值低于 0.03;植物锌 BCF 值相对较高,变化范围 0.1 ~ 0.43,其中旱柳、盐肤木、紫花苜蓿的锌 BCF 值最高,为 0.37 ~ 0.43。旱柳对锌的富集能力超过铅的 12 倍以上。

2.3 植物体营养含量

尾矿砂养分贫瘠,特别 N 含量严重匮乏。植物体内养分含量的多少反映了该植物从贫瘠土壤环境中富集营养的能力。表 3 为 15 种植物体内养分含量。根、茎、叶养分含量的分布因树种、养分不同而有所不同。紫穗槐、截叶胡枝子、紫花苜蓿、田菁和桤木的 N 含量显著高于其它植物,但同样属于豆科植



A. 麻栎; B. 臭椿; C. 旱柳; D. 桤木; E. 无患子; F. 枫香; G. 女贞; H. 火炬树; I. 加拿大紫荆; J. 夹竹桃; K. 盐肤木; L. 紫穗槐; M. 截叶胡枝子; N. 紫花苜蓿; O. 田菁

图 1 15 种植物的重金属铅、锌转移系数和富集系数

Fig. 1 Translocation factor (TF) and bioconcentration factor (BCF) of Pb and Zn in 15 plant species

表 3 15 种植物组织中营养元素的平均浓度(2009 年)/mg·g⁻¹

Table 3 Average nutrient concentrations in shoot and root tissues of 15 plant species (2009)/mg·g⁻¹

树种	N			P			K		
	根	茎枝	叶片	根	茎枝	叶片	根	茎枝	叶片
麻栎	3.83±0.75 fgh	4.63±0.96 cd	12.30±1.60 cde	0.24±0.03 e	0.35±0.03 f	0.61±0.04 e	2.04±0.84 i	1.54±0.20 f	3.73±0.64 ef
臭椿	6.10±1.00 ef	7.06±0.38 bcd	16.26±2.85 abc	1.43±0.19 a	0.95±0.07 b	1.92±0.11 a	11.50±1.77 b	6.56±0.18 b	2.09±0.14 f
旱柳	3.56±1.64 gh	6.50±0.80 bcd	9.43±2.88 def	0.51±0.08 cd	0.66±0.08 cd	0.76±0.03 de	4.00±1.53 gh	5.23±0.35 c	9.18±1.52 ab
桤木	6.83±1.26 de	6.20±0.98 bcd	21.00±2.93 a	0.37±0.01 de	0.32±0.02 f	0.77±0.08 de	3.29±0.56 hi	2.08±0.03 ef	5.61±0.68 de
无患子	4.30±0.75 fgh	4.43±0.06 d	10.93±0.67 cdef	0.68±0.02 c	0.50±0.03 def	0.87±0.05 d	5.13±0.45 efg	3.49±0.21 d	11.06±1.22 a
枫香	2.30±0.10 h	4.23±0.60 d	9.23±0.40 def	0.27±0.01 e	0.44±0.07 ef	0.73±0.02 de	4.07±0.61 gh	2.63±0.06 e	6.47±0.23 cd
女贞	4.23±0.92 fgh	5.00±0.36 cd	5.23±0.67 f	0.41±0.09 de	0.36±0.01 f	0.67±0.04 de	8.60±0.56 c	4.79±0.28 c	7.86±0.56 bcd
火炬树	8.56±0.20 d	8.23±0.37 ab	14.10±2.28 bcd	1.52±0.10 a	1.22±0.02 a	0.82±0.10 de	6.80±0.41 de	3.79±0.18 d	5.91±0.84 de
加拿大紫荆	7.30±0.88 de	4.70±0.32 cd	7.06±0.26 ef	0.58±0.09 cd	0.31±0.01 f	0.71±0.07 de	4.71±1.10 fgh	1.69±0.12 f	1.63±0.39 f
夹竹桃	4.26±1.15 fgh	3.93±0.52 d	5.96±1.49 ef	0.45±0.13 cde	0.79±0.11 bc	1.50±0.01 b	13.90±2.25 a	12.23±0.37 a	10.98±0.82 a
盐肤木	5.13±1.24 efg	7.66±1.81 abc	10.26±1.07 cdef	0.52±0.12cd	0.57±0.02 de	0.70±0.04 de	6.35±0.38 def	4.50±0.10 c	8.73±0.46 abc
紫穗槐	19.50±2.42 a	10.13±2.52 a	19.73±3.51 ab	0.99±0.33 b	0.65±0.04 cd	1.18±0.09 c	6.14±0.19 def	4.87±0.35 c	7.92±0.85 bcd

	N			P			K	
	根	地上		根	地上		根	地上
截叶胡枝子	16.26±0.64 b	18.56±0.86 b	0.52±0.05 cd	1.03±0.15 c	6.36±0.53 def	7.94±0.67 c		
紫花苜蓿	11.83±1.42 c	11.23±5.59 c	0.61±0.11 cd	1.22±0.04 b	6.65±0.20 de	14.40±1.41 a		
田菁	7.00±1.92 de	23.70±0.10 a	0.41±0.02 de	1.42±0.02 a	7.37±0.28 cd	11.36±0.51 b		

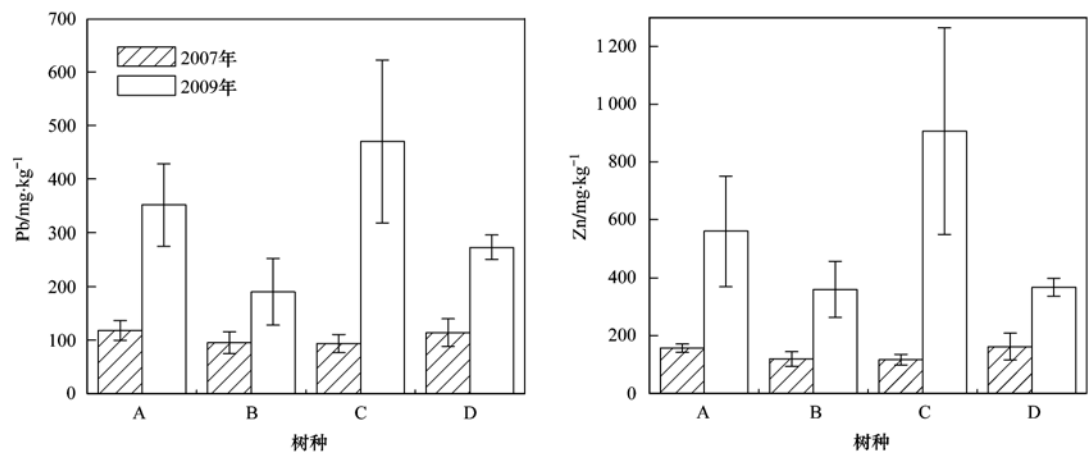
物的加拿大紫荆的 N 含量较低. 根系 P 含量最高的是火炬树、臭椿,其次是紫穗槐. 地上 P 含量田菁最高,其次是火炬树、紫花苜蓿、截叶胡枝子、臭椿; 根系 K 含量夹竹桃、臭椿显著高于其它植物,地上 K 含量以紫花苜蓿、夹竹桃、田菁最高. 多数树种叶片养分含量高于根系和茎枝,尤其是 N 和 K. 但火炬树茎枝的 P 和 N 含量高于叶片和根系.

2.4 植物体重金属和营养元素含量的年度变化

随着植物的生长,植株吸收、积累重金属的能力增强,体内重金属浓度有显著增加(图 2). 2009 年,盐肤木、紫穗槐、截叶胡枝子这 3 种灌木根系中的

Pb、Zn 质量浓度比 2007 年播种当年提高 1~2 倍,其中截叶胡枝子的 Pb 质量浓度提高 4 倍,Zn 质量浓度增加 8 倍. 田菁是 1 年生植物,当年枯死前散种更新,第 3 a 只有零星分布,体内铅锌含量也有增加. 2008 年春定植的 8 个树种,2009 年秋叶片 Pb、Zn 质量浓度比 2008 年秋叶片质量浓度同样增加了 2~3 倍(图 3).

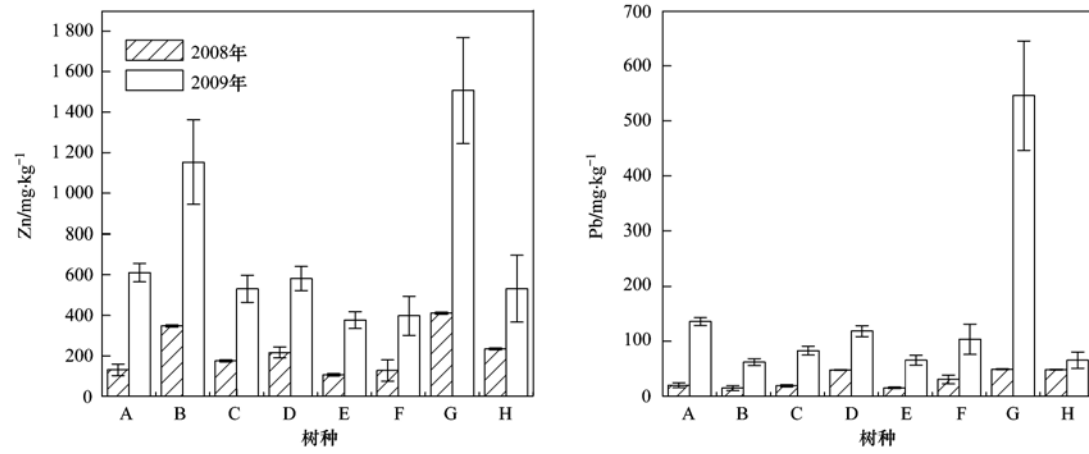
对 8 个树种叶片养分含量连续两年的分析表明(图 4),2009 年叶片中 N、P、K 含量较 2008 年呈下降趋势,反映出尾矿库土壤养分贫瘠对植物生长有不良影响.



A. 盐肤木; B. 紫穗槐; C. 截叶胡枝子; D. 田菁

图 2 4 种植物根系铅、锌浓度的年度差异

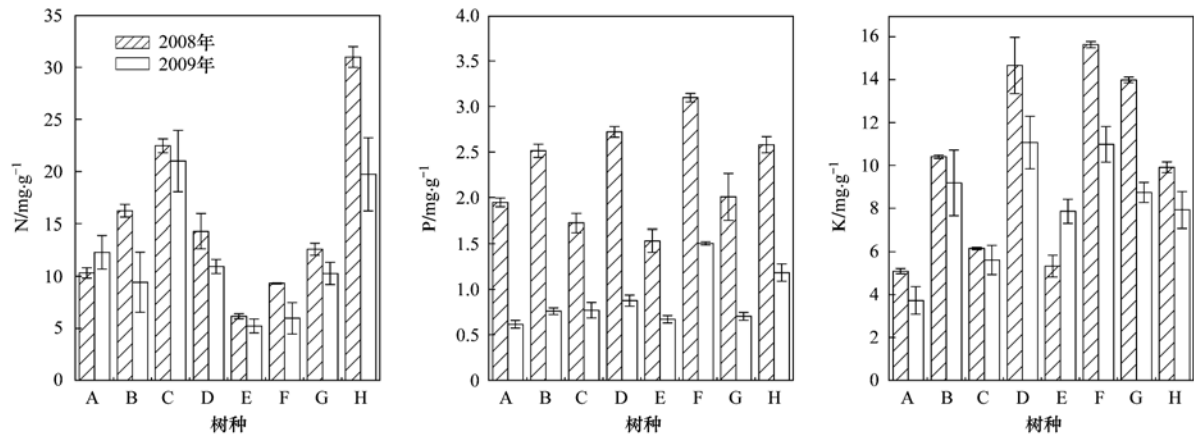
Fig. 2 Diversity of concentrations of Pb and Zn in roots of 4 plant species in different years



A. 麻栎; B. 旱柳; C. 桤木; D. 无患子; E. 女贞; F. 夹竹桃; G. 盐肤木; H. 紫穗槐

图 3 8 种木本植物叶片铅、锌浓度的年度差异

Fig. 3 Diversity of concentrations of Pb and Zn in leaves of 8 woody plants in different years



A. 麻栎; B. 旱柳; C. 桤木; D. 无患子; E. 女贞; F. 夹竹桃; G. 盐肤木; H. 紫穗槐

图 4 8 种木本植物叶片营养元素含量的年度差异

Fig. 4 Diversity of concentrations of nutrient in leaves of 8 woody plants in different years

2.5 植物生长表现

1 年生草本植物田菁 2007 年播种当年出苗密集,生长旺盛,高达 80 ~ 100 cm,开花结实,冬季死亡,散下的种子于次年部分成苗,第 3 a 仅零星保存;其余 14 种植物,2009 年底保存率均在 90% ~ 100%。在尾矿库恶劣条件下,不同植物的形态和生长表现有所不同。紫穗槐、截叶胡枝子、紫花苜蓿、火炬树、桤木、夹竹桃等 6 种植物叶色基本正常、长势较好,其中前 4 种植物均已开花结实,固氮植物有根瘤出现;加拿大紫荆、麻栎 2 树种叶缘焦枯严重,其余植物均出现不同程度的叶色黄化现象。不同植物的生长存在显著差异(数据未给出)。10 个植苗树种中,桤木、夹竹桃、火炬树、旱柳的苗高和基径增长率显著高于其它树种。加拿大紫荆、枫香、无患子、臭椿有一定高增长,基径生长处于停滞状态。麻栎、女贞的苗高和基径没有增长。4 种播种植物中,高生长量的大小次序:截叶胡枝子 > 紫穗槐 > 紫花苜蓿 > 盐肤木,高增长率:盐肤木、紫穗槐 > 紫花苜蓿 > 截叶胡枝子;径生长量的大小次序:紫穗槐 > 盐肤木 > 截叶胡枝子 > 紫花苜蓿,径增长率:紫穗槐 > 盐肤木 > 紫花苜蓿 > 截叶胡枝子。截叶胡枝子和紫花苜蓿在播种当年和次年,生长相当旺盛,第 3 a 粗增长停滞,这与密度大导致竞争有关。

3 讨论

目前,利用树木修复土壤重金属污染的已有大量报道^[5,7,8,16,17],而对生长于矿区的树木的研究较少,且缺少野外试验数据的支持,因此利用废弃的铅锌尾矿库开展人工植被恢复试验,对矿区植物修复可能有重要意义。

本研究发现 15 种植物种植 2 ~ 3 a 后,都能吸收积累一定量的重金属,不同植物体内的重金属含量和重金属在体内不同器官中的分布存在显著差异,其植物组织中的重金属浓度要高于其他已报道树木^[8]。正常植物地上部铅的含量范围一般在 0.1 ~ 10 mg·kg⁻¹ 之间,且只能积累少量的铅于地上部^[18],植物吸收的大部分铅都限制在根部^[19]。本研究中盐肤木和紫花苜蓿的地上部对 Pb 的积累能力较强,Pb 浓度分别为 336 mg·kg⁻¹ 和 278 mg·kg⁻¹,特别是盐肤木叶片 Pb 浓度超过 500 mg·kg⁻¹。普通植物中锌的含量一般为 20 ~ 150 mg·kg⁻¹^[18]。本研究中地上 Zn 浓度最高的是旱柳 756 mg·kg⁻¹ 和盐肤木 750 mg·kg⁻¹,特别是他们叶片浓度都超过了 1 000 mg·kg⁻¹。15 种植物中枫香、紫花苜蓿和盐肤

木对 Pb 以及旱柳、紫花苜蓿、盐肤木对 Zn 的转移能力较强,与以往的研究结果相似^[20,21]。其他植物一般对 Pb 和 Zn 的富集转移能力较低,与国内外学者的研究表明树木不同器官 Pb 和 Zn 含量总的趋势为根系 > 叶片 > 茎枝的结果相似^[17,22~25],这可能与植物生物量与重金属富集量之间的平衡有关^[22,26],也可能是目前没有发现超积累重金属的木本植物的原因。同时由于大部分重金属积累在植物根部,从而减轻了地上部分各器官的毒害作用,一定程度上提高了树种对重金属的耐性。尽管这些植物不能定义为超富集植物,但其地上部积累重金属能力较强,容易通过多次采割实现降低土壤污染的目的,因而它们在尾矿库治理中更有应用潜力。

植物体内的重金属含量大小与诸多因素有关,植物特性、土壤理化性质(pH 值、有机质含量、氧化还原电位等)、土壤中重金属的浓度、形态和毒性大小等都会影响植物对重金属的吸收和富集^[22],导致了不同研究成果可比性差。如本研究中,紫花苜蓿对铅的 TF 值 > 1,而叶春和的研究表明紫花苜蓿根系是铅积累的主要部分^[27]。

矿区尾矿库土壤中营养元素一般含量较低,因此参试的 15 个树种组织中营养元素含量较低。表 3 表明,紫穗槐、截叶胡枝子、紫花苜蓿、田菁和桤木的氮含量显著高于其它植物,这与它们都属于结瘤固氮植物,能和根瘤菌或放线菌发生共生固氮的结果。相比第 2 a,第 3 a 参试植物组织中的营养元素有下降的趋势,这可能是由于植物体内较高的重金属浓度影响了植物的生长,从而导致植物体营养元素吸收量的下降。图 2 和图 3 显示植物种植第 3 a 其组织中重金属含量较前 2 a 有显著的增加,说明对于多年生木本植物而言,根据 1 a 盆栽试验结果判断其对重金属积累特性需慎重。

从矿山废弃地植被恢复的实际应用角度出发,植物选择不仅要考虑它们对重金属的富集和转移能力,更要考虑植物对尾矿库土壤重金属含量较高、营养贫瘠、夏季地表高温干旱等恶劣环境的耐受性,主要体现在植物的存活率、生长势、生物量、受害症状等方面。在 15 种参试植物中,生长良好、叶色基本正常、没有明显受害症状的是固氮植物紫穗槐、桤木、截叶胡枝子、紫花苜蓿和非固氮树种火炬树、夹竹桃。它们虽然对重金属的积累能力不高,但其耐受性很强或具有较高景观价值,适宜在废弃尾矿库植物治理工程加以应用。

4 结论

(1) 15 种植物体内重金属 Pb 和 Zn 含量的总变化趋势为根 > 叶 > 茎, 部分树种 Zn 含量表现为叶 > 根和茎。加拿大紫荆和麻栎的根系具有较强的 Pb、Zn 积累能力, 盐肤木的茎叶对 Pb、Zn 有较强的积累能力, 旱柳和紫花苜蓿分别对 Zn 和 Pb 也有较高的地上积累。15 种植物对重金属 Pb 的富集能力较低, 对 Zn 的富集能力相对较高。

(2) 固氮植物体内 N 含量一般高于其它植物, 火炬树、臭椿对 P 和夹竹桃对 K 的积累能力显著高于其它植物。

(3) 随着种植时间的增加, 植株体内重金属浓度有显著增加, 营养元素含量有下降的趋势。紫穗槐、截叶胡枝子、紫花苜蓿和桤木等固氮植物在尾矿库生长良好, 以及盐肤木、旱柳等对重金属铅、锌积累能力较强的树种在废弃铅锌尾矿库的植被治理中具有应用前景。

参考文献:

- [1] Conesa H M, Faz Á, Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain) [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(1): 38-44.
- [2] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, **7**(1): 47-59.
- [3] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(1): 29-40.
- [4] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(6): 757-762.
- [5] Shi X, Zhang X L, Chen G C, *et al.* Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(2): 266-274.
- [6] Pilon-Smits E. Phytoremediation [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2005, **56**(1): 15-39.
- [7] Brunner I, Luster J, Güenthardt-Goerg M S, *et al.* Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(3): 559-568.
- [8] Domínguez M T, Marañón T, Murillo J M, *et al.* Trace element accumulation in woody plants of the Guadamar Valley, SW Spain: a large-scale phytomanagement case study [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(1): 50-59.
- [9] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H, *et al.* Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China [J]. *Restoration Ecology*, 2000, **8**(1): 87-92.
- [10] Jiménez M N, Bacchetta G, Casti M, *et al.* Potential use in phytoremediation of three plant species growing on contaminated mine-tailing soils in Sardinia [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(2): 392-398.
- [11] 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): 512-517.
- [12] Conesa H M, Schulin R, Nowack B. A laboratory study on revegetation and metal uptake in native plant species from neutral mine tailings [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, **183**(1-4): 201-212.
- [13] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 232-242.
- [14] Shu W S, Ye Z H, Lan C Y, *et al.* Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility [J]. *Environment International*, 2001, **26**(5-6): 389-394.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 46-109.
- [16] Rosseli W, Keller C, Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil [J]. *Plant and Soil*, 2003, **256**(2): 265-272.
- [17] Seo K W, Son Y, Rhoades C C, *et al.* Seedling growth and heavy metal accumulation of candidate woody species for revegetating Korean mine spoils [J]. *Restoration Ecology*, 2008, **16**(4): 702-712.
- [18] 刘益贵, 彭克俭, 沈振国. 湖南湘西铅锌矿区植物对重金属的积累 [J]. *生态环境*, 2008, **17**(3): 1042-1048.
- [19] Shen Z G, Li X D, Wang C C, *et al.* Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(6): 1893-1900.
- [20] 李庆亨, 杨锋杰, 张兵, 等. 重金属污染胁迫下盐肤木的生化效应及波谱特征 [J]. *遥感学报*, 2008, **12**(2): 284-289.
- [21] 施翔, 陈益泰, 吴天林, 等. 7 个柳树无性系在 Cu/Zn 污染土壤中的生长及对 Cu/Zn 的吸收 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1683-1689.
- [22] 刘维涛, 张银龙, 陈喆敏, 等. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(4): 752-756.
- [23] Zhuang P, Yang Q W, Wang H B, *et al.* Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2007, **184**(1-4): 235-242.
- [24] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 3 种木本植物在铅锌和铜矿砂中的生长及对重金属的吸收 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(7): 1818-1826.
- [25] 李永华, 杨林生, 姬艳芳, 等. 铅锌矿区土壤-植物系统中植物吸收铅的研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 196-261.
- [26] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 529-540.
- [27] 叶春和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究 [J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(4): 331-334.

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-cai, 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

国内外公开发行人