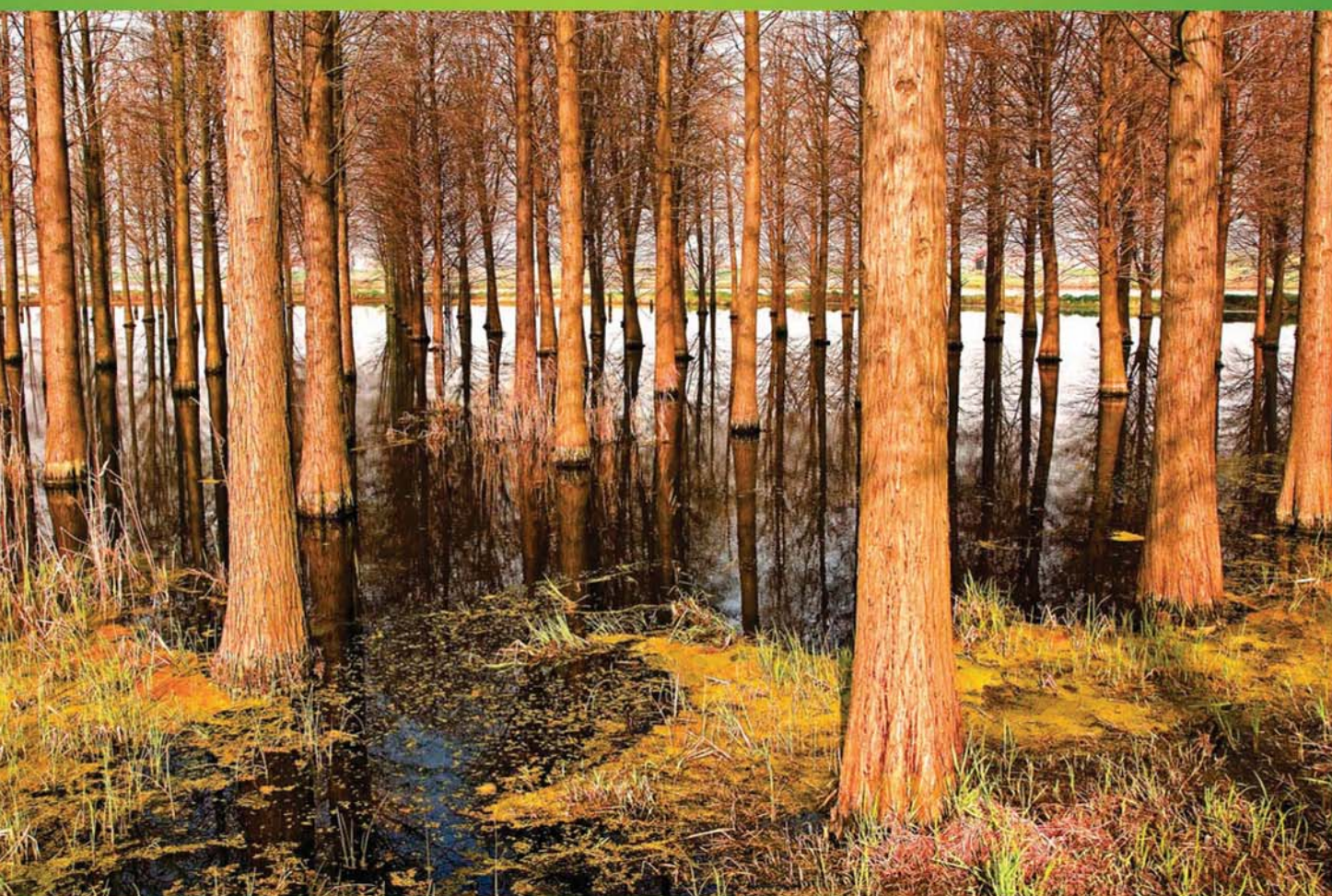


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

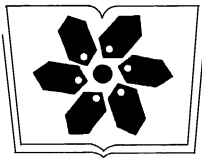
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第3期 Vol.32 No.3 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 3 期

2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

夏季可可西里雌性藏原羚行为时间分配及活动节律	连新明, 李晓晓, 颜培实, 等 (663)
热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 张禹, 张衡, 等 (671)
洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应	卢碧林, 严平川, 田小海, 等 (680)
广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程	刘亮, 范航清, 李春千 (690)
高浓度 CO ₂ 引起的海水酸化对小珊瑚藻光合作用和钙化作用的影响	徐智广, 李美真, 霍传林, 等 (699)
盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响	邹维娜, 袁琳, 张利权, 等 (706)
基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例	栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 等 (715)
城市化对本土植物多样性的影响——以廊坊市为例	彭羽, 刘雪华, 薛达元, 等 (723)
利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种	刘芳, 李迪强, 吴记贵 (730)
基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型	李海奎, 宁金魁 (740)
千岛湖社鼠种群遗传现状及与生境面积的关系	刘军, 鲍毅新, 张旭, 等 (758)
气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响	顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等 (767)
中国西北典型冰川区大气氮素沉降量的估算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等 (777)
植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响	童春富 (786)
黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征	邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等 (796)
云南中南部季风常绿阔叶林恢复生态系统萌生特征	苏建荣, 刘万德, 张志钧, 等 (805)
筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化	肖德荣, 袁华, 田昆, 等 (815)
三峡库区马尾松根系生物量的空间分布	程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等 (823)
兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异	王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等 (833)
内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力	何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞 (844)
不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系	葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等 (852)
不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响	彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等 (863)
不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程	刘目兴, 聂艳, 于婧 (871)
不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间	田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等 (879)
外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响	肖志华, 张义贤, 张喜文, 等 (889)
温度和盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼鳃 Na ⁺ -K ⁺ -ATPase 活力的联合效应	王海贞, 王辉, 强俊, 等 (898)
基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究	王晓学, 李叙勇, 吴秀芹 (907)
边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响	蔡妙珍, 王宁, 王志颖, 等 (915)
川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应	龚固堂, 黎燕琼, 朱志芳, 等 (923)
基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价	翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等 (931)
基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析	王翠平, 王豪伟, 李春明, 等 (942)
生态旅游资源非使用价值评估——以达赉湖自然保护区为例	王朋薇, 贾竞波 (955)
专论与综述	
基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建	袁菲, 张星耀, 梁军 (964)
硅对植物抗虫性的影响及其机制	韩永强, 魏春光, 侯茂林 (974)

研究简报

光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例	占峰, 杨冬梅 (984)
Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响	陈小文, 祁鑫, 王海永, 等 (993)
汶川大地震灾后不同滑坡体上柏木体内非结构性碳水化合物特性	陈博, 李志华, 何茜, 等 (999)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-02



封面图说: 难得的湿地乔木——池杉池杉为落叶乔木, 高达 25 米, 主干挺直, 树冠尖塔。树干基部膨大, 常有屈膝状吐吸根, 池杉为速生树, 强阳性, 耐寒性较强, 耐干旱, 更极耐水淹, 多植于湖泊周围及河流两岸, 是能在在水里生长的极少数的大乔木之一, 故有湿地乔木之称。池杉原产美国弗吉尼亚沼泽地, 中国于本世纪初引种到江苏等地, 之后大量引种南方各省, 尤其是长江南北水网地区作为重要造树和园林树种而大量栽种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106220925

邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 吴龙华. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征. 生态学报, 2012, 32(3): 796-804.

Xing D, Liu H Y, Yu P P, Wu L H. The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 796-804.

黔西北铅锌矿区植物群落分布及其 对重金属的迁移特征

邢 丹¹, 刘鸿雁^{2,3,*}, 于萍萍², 吴龙华³

(1. 贵州省农业科学院辣椒研究所, 遵义 563006; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003;

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

摘要: 重金属耐性植物和超富集植物的筛选、鉴定和驯化是植物修复技术研究发展的关键。以黔西北 4 个不同恢复年限的铅锌矿为研究对象, 通过群落生态调查利用聚类分析方法筛选出研究区域中重金属耐性植物优势种, 并分析其对重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 的迁移富集能力。结果表明: 4 个矿区共发现高等植物 22 种, 分属 13 科 21 属, 筛选出 9 种重金属耐性植物优势种, 其中转运系数大于 1 的植物有: 黄花蒿 (Cu)、珠光香青 (Zn)、大叶醉鱼草 (Zn/Pb/Cd)、野艾蒿 (Cu/Zn/Pb/Cd); 没有富集系数大于 1 的植物。其中大叶醉鱼草具有耐贫瘠、耐旱、生物量大等优势, 可将其作为典型的重金属耐性先锋植物, 用于矿区废弃地的植物修复。

关键词: 重金属; 铅锌矿; 耐性植物优势种; 迁移

The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province

XING Dan¹, LIU Hongyan^{2,3,*}, YU Pingping², WU Longhua³

1 Institute of Pepper, Guizhou Academy of Agricultural Science, Zunyi 563006, China

2 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China

3 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The key of Phytoremediation depends on screening, identification and domestication of tolerance species and hyperaccumulator. Chosed 4 lead-zinc mine areas as study areas in northwestern Guizhou Province, selected tolerance dominant species of heavy metals by investigating community ecological with method of clustering analysis. At the same time, analyzed the capability of migration and enrichment of heavy metals, which were Pb, Zn, Cu and Cd, in the tolerance dominant species. The results showed that there were 22 species of higher plants, which belonged to 13 families 21 chasses, in the 4 lead-zinc mine areas. And selected 9 tolerance dominant species of heavy metals, they were *Buddleja davidii*, *Artemisia lavandulaefolia*, *Artemisia annua*, *Stellaria media*, *Sonchus oleraceus*, *Saccharum spontaneum*, *Pteridium revolutum*, *Anaphalis margaritacea* and *Equisetum ramosissimum*. The transfer coefficients of the tolerance dominant species which were more than one were *Artemisia annua* (Cu), *Anaphalis margaritacea* (Zn), *Buddleja davidii* (Zn/Pb/Cd) and *Artemisia lavandulaefolia* (Cu/Zn/Pb/Cd). There was no specie which enrichment coefficients was more than one were none. There were some special advantages in the *Buddleja davidii*, such as arid-resistant, great biomass and so on. Thus,

基金项目: 教育部“211 工程”重点学科建设项目 (211KST(2009-02))

收稿日期: 2011-06-22; 修订日期: 2011-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongyan.1@163.com

taken *Buddleja davidii* as a pioneer of tolerance species for Phytoremediation in the lead-zinc mine areas.

Key Words: heavy metals; lead/zinc mine; tolerance dominant species; migration

铅锌矿废弃地是一种重金属含量高的生境,对周围环境造成严重的重金属污染,因而需要寻求一种较好修复铅锌矿废弃地、治理重金属污染的方法。目前,国内外学者将研究焦点聚集在一种对环境友好且成本低的技术上,即植物修复技术。利用此技术的基础是筛选培育出具有重金属耐性和超富集能力的植物。重金属耐性植物是指具有某种特殊的生理机制,在重金属污染的土壤中,能够抵抗重金属的胁迫而正常生长、定居乃至繁殖后代的一类特殊植物^[1-2]。目前认为超富集植物应同时满足 4 个条件^[3-5]:①植物地上部富集某种重金属的量要达到一定临界标准,其临界含量标准(以干重计)是 Au 1mg/kg, Cd 100mg/kg, Pb、Cu、Ni、Mn 和 Co 等多数重金属为 1000mg/kg, Zn 10000mg/kg;②植物地上部的重金属含量应高于根部,即须满足 $S/R > 1$ (S 和 R 分别指植物地上部分与地下部分的重金属含量);③植物地上部位的重金属含量应高于土壤中该重金属含量,即富集系数 >1 ;④与一般植物相比超富集植物能够忍耐较高浓度重金属的毒害,一般植物则会发生毒害甚至死亡。

经自然演替,渣场废弃地会生长一定数量的植被。这些植被可能会含有重金属耐性植物,也有可能存在超富集植物。对尾矿废弃地上生长的植物进行调查,有望找到适宜于植物修复的重金属耐性植物和超富集植物。近年来,我国的一些研究学者,在铅锌矿区发现的重金属耐性植物,如小叶杨(*Populus simonii* Carr.)和刺玫蔷薇(*Rosa davurica* Pall.)对 Zn 具有较高的耐性^[6],凤尾蕨(*Pteris cretia* L. var. *nervossa* (Thunb) Ching et S. H. Wu)^[7]对 Pb 的耐性高,蔗茅(*Erianthus rufipilus* (Steud.) Griseb.)和大乌泡(*Rubus multibracteatus* Lévl. et Vant.)^[8]、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)^[9]对 Pb、Zn 有耐性具有较高耐性;超富集植物如东南景天(*Sedum alfredii* Hance) (Zn)^[10]、土荆芥(*Chenopodium ambrosioides* L.) (Pb)^[11]、龙葵(*Solanum nigrum* L.) (Cd)^[12]。

考虑到这些植物未必能适应其他地区的气候条件,本研究以黔西北 4 个不同恢复年限的铅锌矿为研究对象,通过群落生态调查筛选出研究区域中重金属耐性植物优势种,并研究在植被恢复过程中,耐性植物优势种对重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 的迁移富集情况,寻找超富集植物或具有发展为超富集植物潜力的植物,为本区域铅锌矿废弃地的植物修复提供一定的科学依据和基础资料。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黔西北是贵州铅锌矿分布的主要地区,位于扬子准地台的西南缘,康滇地轴之东^[13]。根据当地铅锌矿渣堆置时间的长短选择了地形地貌、气候等相同或相近的 4 个矿区(图 1)作为研究对象。4 个矿区分别是水城县大湾镇红花岭(K1),矿渣堆置时间为 10a 左右;赫章县野马川龙场坝(K2),矿渣堆置时间为 20a 左右;威宁县金钟镇冒水井(K3),矿渣堆置时间为 30a 左右;赫章县妈姑镇水塘村(K4),矿渣堆置时间大于 40a。研究区域地势均较高,海拔 2000m 左右,属亚热带季风气候带。由于受低纬度高海拔的影响,研究区域夏季温凉,冬季寒冷,年平均气温 10—13℃,年平均降雨量 1000—1400mm。4 个矿区均是无人管理的荒地,自然生长着各种植物,处于自然恢复状态。

4 个矿区均属氧化型铅锌矿山,溶矿岩石为白云岩、白云质灰岩,矿石的组成矿物主要有白铅矿、菱锌矿、



图 1 试验采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study areas

铅矾、水锌矿、异极矿、褐铁矿,常夹少量原生矿石中的金属矿物(方铅矿、闪锌矿等)残余,矿石品位一般是铅低锌高^[13-14]。当地人采用土法炼锌的冶炼技术生产粗锌,该技术对 Zn 的回收率低,对其他伴矿元素 Pb、Cu、Cd 等基本上没有回收。经调查,四个铅锌矿渣场的主体废弃物为锌提炼后的废渣(包括铅锌矿冶炼残渣、冶炼用陶质桶残片、煤灰和燃烧不完全的煤渣等),废渣中残留大量的重金属如 Pb、Zn、Cu、Cd 等。据研究,废渣中 Pb 主要以短柱状的金属 Pb 形式存在;Zn 的存在形式较 Pb 复杂得多,除金属 Zn 外,多呈硅锌矿 $\{Zn_2[SiO_4]\}$ 、锰硅锌矿 $\{(Zn,Mn)_2[SiO_4]\}$ 、纤维状的丝锌铝石 $\{Zn_8Al_4[(OH)_8](SiO_4)_5\} \cdot 7H_2O$ 等矿物形式存在,以及含 Zn 的 Fe、Al 玻璃体形式存在^[15]。

1.2 基质样品采集与测定

1.2.1 样品采集与预处理

2008 年 5 月对 4 个渣场进行调查,用 GPS 精确定位,按蛇形线路随机选取五点,用不锈钢土铲采集矿渣 0—20cm 的表层混合样品。每个矿区取样面积约 300m×300m,取 6 个混合样品,每个样品在采集时戴有一次性塑料手套,避免样品间交叉污染。将野外采回的样品放在塑料布上自然风干,剔除杂物、木棒研压过 2mm 尼龙筛后四分法缩分,用玛瑙研钵磨细缩分样品,并通过 0.149mm 孔径的尼龙筛用于重金属全量测定。

1.2.2 测定方法

Cu、Zn 含量测定参考 GB/T 17138—1997, Pb、Cd 含量测定参考 GB/T 17141—1997。测定仪器为 AA800 型原子吸收分析仪(美国 PE 公司)。

1.3 植被调查与样品采集

1.3.1 植被调查与样方确定

根据群落植物结构和分布特点,确定群落调查所需要的最小样方面积(1m×1m),每个矿区随机选取 10 个样方,分别记录各样方中植物的种类、各物种的个体数及其盖度,经统计分析得到各群落的物种优势度,其计算公式如下:

$$\text{优势度}(\%) = (\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$$

式中,

$$\text{相对密度}(\%) = \text{某种植物的个体数} / \text{所有植物种个体数} \times 100$$

$$\text{相对盖度}(\%) = \text{某种植物的盖度} / \text{所有植物盖度之和} \times 100$$

$$\text{相对频度}(\%) = \text{某种植物的频度} / \text{所有植物频度之和} \times 100$$

1.3.2 植株样品采集与测定

在 4 个铅锌矿区,根据随机、等量、多点混合的原则采集植株样。每种植物样品的混合样点数为 5 个,与矿区基质样品采集一一对应。同时,要求每种植物样品的长势,即株高、茎粗、叶子的大小与疏密程度等基本相同。将采集回来的植物样品分为根、茎、叶 3 部分,分别用自来水充分冲洗以去除粘附的泥土和污物,再用去离子水冲洗,之后放入烘箱于 105℃ 左右杀青 5min,再于 70℃ 左右烘干至恒重。烘干后的植物样品用不锈钢植物粉碎机粉碎,过 40 目筛,装密封袋备用。

采用《土壤农化分析》^[16]中相关方法测定植物样品中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量,测定仪器为 AA800 型原子吸收分析仪(美国 PE 公司)。

1.4 质量控制

本试验每批样品中测定 2 个空白值,用以检查和控制样品在处理、测试过程中可能带来的污染;随机抽取 15% 的样品进行平行和加标测试,测定结果允许相对误差为 <10%,试验回收率为 94%—110%。

1.5 数据处理

用 DPS 数据处理系统进行群落参数估计(群落物种多样性)、多元方差分析、聚类分析等,其他数据处理用 Excel 2003 软件进行。

2 结果与分析

2.1 矿区植被恢复过程中群落物种的组成及优势度

群落生态调查结果显示,4 个铅锌矿区共发现高等植物 22 种,分属 13 科 21 属(表 1)。其中,蕨类植物 2

科 2 属 2 种,即蕨科蕨属的毛轴蕨和木贼科木贼属的节节草。被子植物中单子叶植物 1 科 3 属 3 种,即禾本科的甘蔗属甜根子草、蔗茅属蔗茅和狼尾草属长序狼尾草;其余植物均为双子叶植物,共 10 科 16 属 17 种。

在自然恢复过程中,群落中多年生草本植物比 1、2 年生植物具有较强的抵抗环境变化的能力,因而其占绝对优势,共有 12 种,占整个植物种的 54.55%。2 年生草本植物种类最少,仅有苦苣菜、楔叶独行菜两种植物,占整个植物种的比率为 9.09%。

在矿区植物群落中,优势明显、对环境适应能力强的植物常为耐性植物优势种。物种优势度指标反映了该种植物在群落中所占的优势程度。表 1 显示,不同植物的优势度差距较大,其中大叶醉鱼草、甜根子草、繁缕和野艾蒿的优势度较高,分别为 25.9%、20.6%、22.4% 和 20.9%。

表 1 植被群落物种组成及优势度
Table 1 The species composition and dominance of community

矿区 Study areas	1 年生草本 (优势度) Annuals (Dominance)	2 年生草本 (优势度) Biennials (Dominance)	多年生草本 (优势度) Perennials (Dominance)	灌木 (优势度) Shrubs (Dominance)
K1	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i> (1.42%)、土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> (10.3%)、通泉草 <i>Mazus japonicus</i> (4.08%)	楔叶独行菜 <i>Lepidium cuneiforme</i> (1.17%)	甜根子草 <i>Saccharum spontaneum</i> (20.6%)、野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> (8.67)、珠光香青 <i>Anaphalis margaritacea</i> (16.5%)、毛轴蕨 <i>Pteridium revolutum</i> (16.9%)	大叶醉鱼草 <i>Buddleja davidii</i> (18.4%)、海桐叶白英 <i>Solanum pitosporifolium</i> (1.96%)
K2	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i> (3.71%)、繁缕 <i>Stellaria media</i> (22.4%)	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> (21.7%)	甜根子草 <i>Saccharum spontaneum</i> (3.95%)、蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> (1.35%)、野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> (4.73%)、菊状千里光 <i>Senecio laetustus</i> (3.07%)、蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> (1.54%)、毛轴蕨 <i>Pteridium revolutum</i> (9.08%)	大叶醉鱼草 <i>Buddleja davidii</i> (18.6%)、三花悬钩子 <i>Rubus trianthus</i> (9.95%)
K3	繁缕 <i>Stellaria media</i> (7.52%)	楔叶独行菜 <i>Lepidium cuneiforme</i> (1.59%)	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> (20.9%)、南黄堇 <i>Corydalis davidii</i> (4.48%)、节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> (16.0%)、甜根子草 <i>Saccharum spontaneum</i> (8.70%)、黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> (1.41%)、珠光香青 <i>Anaphalis margaritacea</i> (3.83%)、长序狼尾草 <i>Pennisetum longissimum</i> (4.45%)	大叶醉鱼草 <i>Buddleja davidii</i> (25.9%)、接骨草 <i>Sambucus chinensis</i> (5.25%)
K4	繁缕 <i>Stellaria media</i> (9.53%)	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> (1.71%)、楔叶独行菜 <i>Lepidium cuneiforme</i> (1.52%)	甜根子草 <i>Saccharum spontaneum</i> (2.80%)、长序狼尾草 <i>Pennisetum longissimum</i> (5.81%)、马刺蓟 <i>Cirsium monocephalum</i> (9.61%)、野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> (17.2%)、黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> (15.1%)、珠光香青 <i>Anaphalis margaritacea</i> (5.30%)、南黄堇 <i>Corydalis davidii</i> (9.28%)、毛轴蕨 <i>Pteridium revolutum</i> (1.42%)	大叶醉鱼草 <i>Buddleja davidii</i> (16.3%)、海桐叶白英 <i>Solanum pitosporifolium</i> (1.06%)、接骨草 <i>Sambucus chinensis</i> (3.34%)

2.2 矿区重金属耐性植物优势种的筛选

有些植物在重金属污染的环境中能够生存,但他们对重金属的耐性和积累在种间和种内存在明显的差异^[17],其中优势度高的耐性植物对污染环境抵抗能力强,能够更好地适应该逆境环境并良好生长,是较好的修复材料^[18]。因而,需要寻找一种方法对所调查的植物进行优势程度等级划分。

聚类分析是将样本数按照其性质的疏密程度自动进行分类的方法。本研究以物种优势度作为聚类指标,选用聚类分析中离差平方和法(聚类效果最好,应用也广泛^[19])、卡方距离系数(具有更强的分辨能力^[20])对各个群落物种优势度聚类分析,聚类结果见图 2。

在确定聚类分析的具体分类时,应选用使组内差异较小、组间差异明显的阈值 T (分辨率)作为分类标

准^[21]。由图 2 看出,红花岭、龙场坝、冒水井和水塘村 4 个矿区的阈值分别取 0.51、0.50、0.95 和 1.09 时,能够满足要求,此时 4 个群落植物的优势度划分为 4 个等级(表 2)。

根据不同群落物种优势度大小和等级划分情况,将优势度高的植物作为本研究所筛选出的重金属耐性植物优势种,共筛选出 9 种植物,隶属于 6 科 8 属(表 2)。其中红花岭矿区筛选的重金属耐性植物优势种是甜根子草、大叶醉鱼草、毛轴蕨和珠光香青;龙场坝矿区的是大叶醉鱼草、繁缕和苦苣菜;冒水井矿区的是大叶醉鱼草、野艾蒿和节节草;水塘村矿区的是野艾蒿、大叶醉鱼草和黄花蒿。

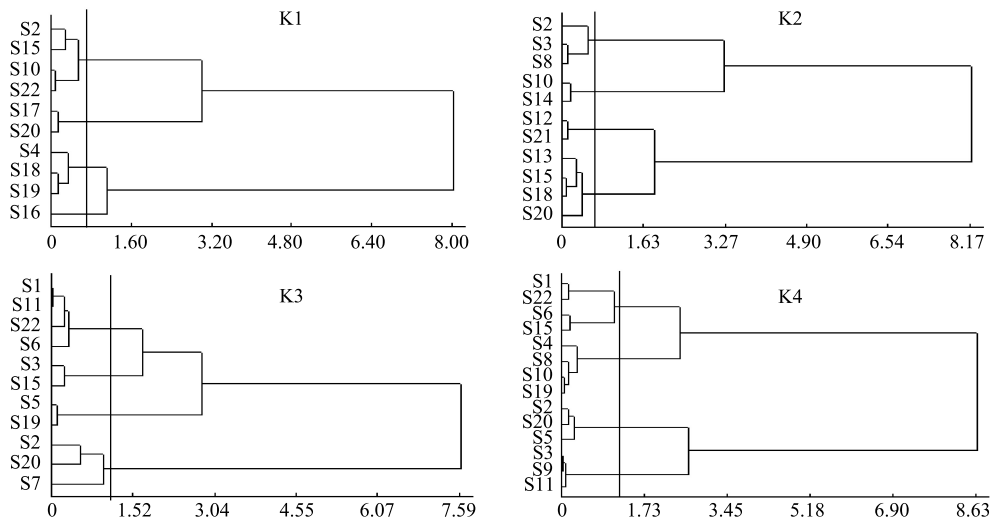


图 2 不同群落重金属耐性植物系统聚类谱系图

Fig. 2 Hierarchical cluster analysis diagram of tolerant plants in different communities

S1 为长序狼尾草、S2 为大叶醉鱼草、S3 为繁缕、S4 为海桐叶白英、S5 为黄花蒿、S6 为接骨草、S7 为节节草、S8 为苦苣菜、S9 为马刺薊、S10 为毛轴蕨、S11 为南黄堇、S12 为蒲公英、S13 为千里光、S14 为三花悬钩子、S15 为甜根子草、S16 为通泉草、S17 为土荆芥、S18 为小蓬草、S19 为楔叶独行菜、S20 为野艾蒿、S21 为蔗茅、S22 为珠光香青

表 2 不同群落重金属耐性植物优势度等级划分

Table 2 Classification of species dominance of tolerant plants in different communities

群落 Communities	阈值 Threshold	优势度高 Highest	优势度较高 Higher	优势度中等 Medium	优势度低 Low
K1	0.51	甜根子草、大叶醉鱼草、 毛轴蕨、珠光香青	土荆芥、野艾蒿	通泉草	海桐叶白英、小蓬草、楔叶 独行菜
K2	0.50	繁缕、苦苣菜、 大叶醉鱼草	毛轴蕨、三花悬钩子	千里光、甜根子草、小蓬 草、野艾蒿	蒲公英、蔗茅
K3	0.95	大叶醉鱼草、野艾蒿、 节节草	甜根子草、繁缕	接骨草、南黄堇、长序狼 尾草、珠光香青	楔叶独行菜、黄花蒿
K4	1.09	野艾蒿、大叶醉鱼草、 黄花蒿	马刺薊、繁缕、南黄堇	长序狼尾草、珠光香青、 接骨草、甜根子草	苦苣菜、楔叶独行菜、毛轴 蕨、海桐叶白英

2.3 矿区基质重金属含量

铅锌矿区基质重金属元素的含量,与冶炼矿石类型、矿石品位、硫化物含量、冶炼工艺及时间、当地的气候条件等有关^[22-23]。由表 3 可以看出,黔西北铅锌矿区矿渣中重金属都有不同程度的积累。其中,Cu 为 114—321mg/kg,Zn 为 4282—7215mg/kg,Pb 为 7219—13729mg/kg,Cd 为 32.2—97.3mg/kg。

2.4 耐性植物优势种各部分重金属含量

重金属在植物体不同器官中的分配情况,与各种重金属本身的活动性以及各种植物对重金属的耐性机制有关。由表 4 可知:(1)矿区植物体不同器官对重金属有不同程度的积累。植物茎部中重金属含量分别是 Cu 为 0—24mg/kg,Zn 为 91.8—637mg/kg,Pb 为 0—196mg/kg,Cd 为 0—34mg/kg;叶部中重金属含量分别是 Cu

为 0—19.6mg/kg, Zn 为 103—1171mg/kg, Pb 为 0—482mg/kg, Cd 为 0—61.3mg/kg; 根部中重金属含量分别是 Cu 为 0—34.9mg/kg, Zn 为 196—1047mg/kg, Pb 为 15.4—568mg/kg, Cd 为 0.561—14.3mg/kg。(2) 不同矿区中同一种植物在不同器官的重金属分布差异较大。以大叶醉鱼草为例, 在红花岭矿区, 茎部中 Cu、Zn、Pb

表 3 铅锌冶炼渣场废弃地重金属含量的多元方差分析结果(平均值±标准差, $n=24$)

Table 3 Multivariate Variance Analysis for heavy metals in lead-zinc tailing deposited (Mean±SD, $n=24$)

指标 Indexs	矿区 Study areas			
	K1 红花岭 Honghualing	K2 龙场坝 Longchangba	K3 冒水井 Maoshuijin	K4 水塘村 Shuitangcun
全铜 Total Cu/(mg/kg)	307 ± 142	321 ± 55.8	189 ± 42.1	114 ± 30.2
全锌 Total Zn/(mg/kg)	5457 ± 795	5086 ± 1181	4282 ± 1439	7215 ± 652
全铅 Total Pb/(mg/kg)	8796 ± 6348	7991 ± 2300	7219 ± 561	13729 ± 3886
全镉 Total Cd/(mg/kg)	69.8 ± 31.2	67.5 ± 36.9	32.2 ± 7.77	97.3 ± 13.8

表 4 耐性植物优势种体内重金属含量

Table 4 Heavy metals concentration of tolerance dominant species

矿区 Study areas	植物名称 Species	植物部位 Organ	Cu/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Pb/(mg/kg)	Cd/(mg/kg)
K1	甜根子草	地上	6.12	310	0.00	0.891
		根	7.09	865	40.7	6.43
	大叶醉鱼草	茎	15.3	401	25.0	0.263
		叶	8.68	305	20.2	0.672
		根	14.6	357	15.4	0.561
	毛轴蕨	茎	6.28	96.2	8.70	0.087
		叶	5.07	103	15.5	0.00
	珠光香青	茎	14.5	346	38.1	2.40
		叶	9.77	397	482	4.05
		根	25.9	350	523	5.97
	大叶醉鱼草	茎	24.0	257	32.5	5.85
		叶	19.6	226	27.9	3.63
K2	苦苣菜	根	34.9	235	28.9	4.39
		茎	0.591	91.8	8.92	0.00
		叶	0.35	177	19.2	1.28
	繁缕	根	0.00	196	18.9	4.23
		茎	0.72	175	7.04	0.63
		叶	0.00	434	15.2	0.00
	大叶醉鱼草	茎	0.00	379	196	9.21
		叶	2.09	181	54.1	8.02
		根	0.00	196	26.2	3.25
	节节草	地上	0.48	134	37.4	4.12
		根	1.12	275	58.4	6.92
		茎	1.30	257	22.9	12.1
K3	野艾蒿	叶	0.00	585	219	21.0
		根	0.681	254	20.8	8.12
		茎	4.49	498	177	3.51
	大叶醉鱼草	叶	6.26	415	77.6	0.00
		茎	4.07	637	96.3	34.0
		叶	7.69	1171	390	61.3
	黄花蒿	根	1.32	635	193	14.3
		茎	16.7	267	26.3	0.00
		叶	3.87	422	151	1.69
		根	4.37	1047	568	9.06

含量均较高,而 Cd 在叶部中的含量较高,茎部中最低;龙场坝矿区,Cu 在各个器官的排序为根>茎>叶,Cd、Zn、Pb 的排序为茎>根>叶;冒水井矿区中,Cu 在各个器官的排序为叶>茎=根,Zn 的排序为茎>根>叶,Pb、Cd 排序为茎>叶>根;水塘村矿区中,Cu 的排序为叶>茎,Zn、Pb、Cd 的排序均为茎>叶。

2.5 重金属耐性植物优势种对重金属的迁移特征

不同重金属在植物体中迁移特性差异较大,用转移系数(植物地上部分中重金属含量/根部中重金属含量)表示重金属在根-地上部分(茎叶)的迁移能力,系数越大,说明植物体内运输重金属的能力越强。由表 5 中转移系数发现:(1)红花岭矿区,甜根子草对四种重金属的转移系数均小于 1,即其地上部重金属含量低于根部,重金属从根部向地上部迁移能力较小;其他两种植物对 Cu 的转移系数均低于 1,而大叶醉鱼草对 Pb、Cd 有较强的转运能力,珠光香青对 Zn 的迁移能力较强。(2)龙场坝矿区,大叶醉鱼草对 Zn、Pb、Cd 的转移系数均大于 1,苦苣菜对四种重金属的转移系数均低于 1。(3)冒水井矿区,大叶醉鱼草地上部 Zn、Pb、Cd 的含量高于根部,野艾蒿对四种重金属的迁移能力都较高。(4)水塘村矿区,野艾蒿对四种重金属的迁移能力都较高;黄花蒿仅对 Cu 的迁移能力较高,Zn、Pb、Cd 主要积聚在根部,转移系数均较小。(5)同种植物对不同的重金属或不同植物对同一种重金属的转移系数存在差异,表明不同植物所处环境对重金属的活化能力是不一样的,因而植物对重金属的迁移能力不同。在这些植物中,对一种重金属元素迁移能力较强的是黄花蒿(Cu)和珠光香青(Zn),对两种或两种以上元素迁移能力较强的是大叶醉鱼草(Zn、Pb、Cd)和野艾蒿(Cu、Zn、Pb、Cd)。

重金属富集系数(地上部重金属含量与土壤中重金属含量的比值)可以用来表征土壤-植物体系中重金属迁移的难易程度,系数越高,说明重金属越容易从土壤中进入植物体内。表 5 中富集系数显示,4 个矿区中重金属耐性植物优势种对 Cu、Zn、Pb、Cd 的富集系数均小于 1,即对 Cu、Zn、Pb、Cd 的迁移能力均较弱。

表 5 重金属耐性植物优势种的转运系数与富集系数
Table 5 Transfer & enrichment coefficients of tolerance dominant species of heavy metals

矿区 Study areas	植物名称 Species	转移系数 Transfer coefficients				富集系数 Enrichment coefficients			
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
K1	甜根子草	0.89	0.27	0.00	0.01	0.02	0.05	0.00	0.02
	大叶醉鱼草	0.90	0.89	1.36	0.97	0.08	0.07	0.08	0.04
	毛轴蕨	—	—	—	—	0.06	0.02	0.01	0.001
	珠光香青	0.42	1.12	0.73	0.61	0.01	0.07	0.07	0.05
K2	大叶醉鱼草	0.61	1.01	1.03	1.03	0.03	0.06	0.01	0.14
	苦苣菜	—	0.67	0.78	0.18	0.001	0.02	0.003	0.002
	繁缕	—	—	—	—	0.002	0.06	0.003	0.01
K3	大叶醉鱼草	—	1.09	7.28	3.22	0.003	0.09	0.02	0.74
	节节草	0.36	0.41	0.55	0.49	0.004	0.04	0.01	0.05
	野艾蒿	1.85	1.11	4.58	1.96	0.003	0.10	0.07	0.82
K4	大叶醉鱼草	—	—	—	—	0.03	0.06	0.01	0.01
	野艾蒿	1.99	1.49	1.36	2.91	0.05	0.14	0.03	0.14
	黄花蒿	2.35	0.43	0.11	0.09	0.12	0.05	0.01	0.003

“—”表示根部未检测

3 结论

在 4 个矿区,通过植被调查共发现高等植物 22 种,隶属 13 科 21 属。利用物种优势度所筛选的重金属耐性植物优势种是繁缕、苦苣菜、甜根子草、毛轴蕨、珠光香青、野艾蒿、节节草、黄花蒿和大叶醉鱼草,它们的富集能力均较弱,但黄花蒿对 Cu、珠光香青对 Zn、大叶醉鱼草对 Zn、Pb、Cd、野艾蒿对 Cu、Zn、Pb、Cd 的转移转移能力较强。

大叶醉鱼草和野艾蒿对重金属的转移系数均较高,其中大叶醉鱼草为多年生半常绿灌木,在重金属复合污染情况下,其高一般为 1.5—2m,具有耐贫脊、耐旱、耐重金属胁迫、生长周期长、生物量大、重金属累积

量高等特点^[24],并具有绿化、观赏作用,因而可将其作为典型的重金属耐性先锋植物,用于渣场的的植物修复。

References:

- [1] Baker A J M. Metal tolerance. *New Phytologist*, 1987, 106(Suppl): 93-111.
- [2] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z H, Huang M H, Lan C Y. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1629-1639.
- [3] Chaney R L, Malik M, Li Y M, Brown S L, Brewer E P, Angle J S, Baker A J M. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279-284.
- [4] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants//Raskin I, Ensley B D, eds. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plant to Clean Up the Environment*. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000:193-229.
- [5] Wei S H, Zhou Q X, Wang X, Cao W. Studies on the characteristics of heavy metal hyperaccumulation of weeds in farmland. *China Environmental Science*, 2004, 24(1): 105-109.
- [6] Liu C Z, Shang H, Yao B, Yu C Z, Liang J S, Hu X Y. A survey on heavy-metal content in plants and soils in zinc-lead mine tailing wasteland. *Forest Research*, 2005, 18(3): 246-249.
- [7] Liu Y L, Wu J, Tang Y, Yang G, Zhu L. An investigation of heavy-metal concentration in cominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2020-2026.
- [8] Chen H L, Zhang S R, Li T, Dai Y, Mao Z. Heavy-metal accumulation and tolerance of plants at zinc-lead mine tailings in Hanyuan. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 505-509.
- [9] Xu H W, Zhang R Z, Xie Y. Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* at lead-zinc mining area. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1136-1141.
- [10] Yang X E, Long X X, Ni W Z, Fu C X. *Sedum alfredii* H: A new Zn hyperaccumulating plant first found in China. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(19): 1634-1637.
- [11] Wu S T, Wu X F, Hu Y L, Cheng S J, Hu J Z, Chen Y F, Xie N Z. Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 156-157, 160-160.
- [12] Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 167-171.
- [13] Yu W L, Fan L W. Geological characteristics of typical lead-zinc deposits and pondering on ore prospecting in northwestern Guizhou Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(3/4): 461-465.
- [14] Jin Z G, Zhang L W, Ye J. Ore-forming materials source of lead-zinc deposits in the northwest Guizhou. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(6): 32-35.
- [15] Wu P, Liu C Q, Yang Y G, Zhang G P. The mineralogical characteristics of heavy metals (Pb, Zn) in historical Zn smelting wastes. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(1): 39-42.
- [16] Bao S D. *Agricultural Soil Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 275-281; 377-382.
- [17] Wei S H, Zhou Q X, Wang X, Cao W, Ren L P, Song Y F. Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12): 1259-1265.
- [18] Sun R L, Zhou Q X. Heavy metal tolerance and hyperaccumulation of higher plants and their molecular mechanisms: a review. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3): 497-504.
- [19] He X Q. *Multivariate Statistical Analysis*. 2nd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2008: 55-59.
- [20] Tang Q Y, Feng M G. *DPS Data Processing System-Experimental Design, Statistical Analysis and Modeling*. Beijing: Science Press, 2006: 442-610.
- [21] Bi S D, Liu L, Gao C Q, Zou Y D, Cao C Y, Ding C C, Li C G, Meng Q L. Arthropod community structure and its fuzzy clustering analysis in jujube orchard. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1893-1897.
- [22] Wu P, Liu C Q, Yang Y G, Zhang G P. Release and transport of (heavy) metals and their environmental effect in mining activities. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(2): 213-218.
- [23] Liu H Y, Xing D, Xiao J J, Liu F. Interactions between natural vegetation succession and waste residue in lead-zinc tailings deposited sites. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3217-3224.
- [24] Xign D, Li R, Cao X X, Liu H Y. Heavy metal tolerance features of *Buddleja davidii* in the indigenous zinc semelting area. *Journal of Mountain*

Agriculture and Biology, 2010, 29(3): 226-230.

参考文献:

- [2] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 黄铭洪, 蓝崇钰. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639.
- [5] 魏树和, 周启星, 王新, 曹伟. 农田杂草的重金属超积累特性研究. 中国环境科学, 2004, 24(1): 105-109.
- [6] 刘成志, 尚鹤, 姚斌, 于成志, 梁景森, 胡希优. 柴河铅锌尾矿耐性植物与优势植物的重金属含量研究. 林业科学研究, 2005, 18(3): 246-249.
- [7] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 杨刚, 祝亮. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量. 生态学报, 2009, 29(4): 2020-2026.
- [8] 陈红琳, 张世熔, 李婷, 代英, 毛竹. 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 505-509.
- [9] 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. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1136-1141.
- [10] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 傅承新. 东南景天 (*Sedum alfredii* H)——一种新的锌超积累植物. 科学通报, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [11] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 陈少瑾, 胡劲召, 陈宜菲, 谢凝子. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究. 生态环境, 2004, 13(2): 156-157, 160-160.
- [12] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.
- [13] 余未来, 范良伍. 黔西北地区典型铅锌矿床地质特征分析及找矿思路. 矿物学报, 2007, 27(3/4): 461-465.
- [14] 金中国, 张伦尉, 叶静. 黔西北地区铅锌矿床成矿物质来源探讨. 地质与勘探, 2007, 43(6): 32-35.
- [15] 吴攀, 刘丛强, 杨元根, 张国平. 炼锌废渣中重金属 Pb、Zn 的矿物学特征. 矿物学报, 2002, 22(1): 39-42.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005: 275-281; 377-382.
- [17] 魏树和, 周启星, 王新, 曹伟, 任丽萍, 宋玉芳. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选. 自然科学进展, 2003, 13(12): 1259-1265.
- [18] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 497-504.
- [19] 何晓群. 多元统计分析 (第二版). 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 55-59.
- [20] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化. 北京: 科学出版社, 2006: 442-610.
- [21] 毕守东, 刘丽, 高彩球, 邹运鼎, 曹传旺, 丁程成, 李昌根, 孟庆雷. 枣园节肢动物群落结构及其模糊聚类分析. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1893-1897.
- [22] 吴攀, 刘丛强, 杨元根, 张国平. 矿山环境中 (重) 金属的释放迁移地球化学及其环境效应. 矿物学报, 2001, 21(2): 213-218.
- [23] 刘鸿雁, 邢丹, 肖玖军, 刘方. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3217-3224.
- [24] 邢丹, 李瑞, 曹星星, 刘鸿雁. 土法炼锌渣场大叶醉鱼草对重金属的耐性特征. 山地农业生物学报, 2010, 29(3): 226-230.

CONTENTS

Behavioural time budgets and diurnal rhythms of the female Tibetan gazelles in the Kekexili National Nature Reserve	LIAN Xinming, LI Xiaoxiao, YAN Peishi, et al (663)
The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) and thermocline characteristics in the tropic Indian Ocean	YANG Shenglong, ZHANG Yu, ZHANG Heng, et al (671)
Characteristics of algous facies of planktonic algae in lake honghu and its response to habitat	LU Bilin, YAN Pingchuan, TIAN Xiaohai, et al (680)
Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China	LIU Liang, FAN Hangqing, LI Chungan (690)
Effects of CO ₂ -induced seawater acidification on photosynthesis and calcification in the coralline alga <i>Corallina pilulifera</i>	XU Zhiguang, LI Meizhen, HUO Chuanlin, et al (699)
Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant <i>Cabomba caroliniana</i>	ZOU Weina, YUAN Lin, ZHANG Liquan, et al (706)
Prioritizing biodiversity in conservation planning based on C-Plan: a case study from northeast China	LUAN Xiaofeng, SUN Gongqi, QU Yi, et al (715)
Effects of urbanization on indigenous plant diversity: a case study of Langfang City, China	PENG Yu, LIU Xuehua, XUE Dayuan, et al (723)
Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve	LIU Fang, LI Diqiang, WU Jigui (730)
Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups	LI Haikui, NING Jinkui (740)
Population genetics of <i>Niviventer confucianus</i> and its relationships with habitat area in Thousand Island Lake region	LIU Jun, BAO Yixin, ZHANG Xu, et al (758)
Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia	GU RunYuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al (767)
Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (777)
Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh	TONG Chunfu (786)
The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province	XING Dan, LIU Hongyan, YU Pingping, et al (796)
Sprouting characteristic in restoration ecosystems of monsoon evergreen broad-leaved forest in south-central of Yunnan Province	SU Jianrong, LIU Wande, ZHANG Zhijun, et al (805)
Distribution patterns and changes of aquatic communities in Lashihai Plateau Wetland after impoundment by damming	XIAO Derong, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (815)
Spatial distribution of root biomass of <i>Pinus massoniana</i> plantation in Three Gorges Reservoir area, China	CHENG Ruimei, WANG Ruili, XIAO Wenfa, et al (823)
Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in <i>Larix gmelinii</i> plantations in Northeast China	WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (833)
Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (844)
Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged <i>Pinus massoniana</i> stands	GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (852)
Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure	PENG Sili, SHEN Hong, ZHANG Yuting, et al (863)
The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents	LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing (871)
Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems	TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, CHI Shuyun, et al (879)
Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes	XIAO Zhihua, ZHANG Yixian, ZHANG Xiwen, et al (889)
Combined effect of temperature and salinity on the Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity from the gill of GIFT tilapia juveniles (<i>Oreochromis niloticus</i>)	WANG Haizhen, WANG Hui, QIANG Jun, et al (898)
Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata	WANG Xiaoxue, LI Xuyong, WU Xiuqin (907)
The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls	CAI Miaozhen, WANG Ning, WANG Zhiying, et al (915)
The suitable stand structure and hydrological effects of the cypress protection forests in the central Sichuan hilly region	GONG Gutang, LI Yanqiong, ZHU Zhifang, et al (923)
Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method	ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al (931)
Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images	WANG Cuiping, WANG Haowei, LI Chunming, et al (942)
Evaluation of non-use value of ecotourism resources: a case study in Dalai Lake protected area of China	WANG Pengwei, JIA Jingbo (955)
Review and Monograph	
Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance	YUAN Fei, ZHANG Xinyao, LIANG Jun (964)
Role of silicon in regulating plant resistance to insect herbivores	HAN Yongqiang, WEI Chunguang, HOU Maolin (974)
Scientific Note	
Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in <i>Osmanthus fragrans</i> and <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	ZHAN Feng, YANG Dongmei (984)
Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings	CHEN Xiaowen, QI Xin, WANG Haiyong, et al (993)
Studies of non-structural carbohydrates of <i>Cupressus funebris</i> in different landslides after Wenchuan Earthquake	CHEN Bo, LI Zhihua, HE Qian, et al (999)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 3 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 3 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元