

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

# 目次

## 综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李助之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

## 研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的  $PM_{2.5}$  来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季  $PM_{2.5}$  中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节  $PM_{2.5}$  水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物  $PM_{2.5}$  中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省  $PM_{2.5}$  分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域  $PM_{2.5}$  预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 ..... 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) ..... 信息(685, 935, 956)

# 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征

周鹏飞<sup>1</sup>, 张世文<sup>1,2,\*</sup>, 罗明<sup>3</sup>, 魏洪斌<sup>3</sup>, 宋强<sup>1</sup>, 方兵<sup>1</sup>, 庄红娟<sup>1</sup>, 陈弘扬<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 2. 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 淮南 232001; 3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

**摘要:** 为了筛选出适合矿业废弃地复垦生态修复的植物材料, 通过在排土场布设生态修复试验, 开展不同生态修复模式对植物多样性及重金属富集迁移特征影响的研究. 结果表明, 不同生态修复模式下共出现存活植物 8 科 10 种, 多为草本植物, 乔灌木小区修复效果最佳, 植物覆盖度达到 100%, 存活率超过 69%, 植物群落多样性指数表现为: 乔灌木 > 灌木 > 乔木 > 草, 湿地松、大叶女贞、芒麻、紫薇和车前草为不同生态修复模式下的优势植物, 植物体内大部分重金属含量高于正常值, 其中, 湿地松和紫薇叶茎部的富集转移系数接近或超过 1, 对 Cd 表现出较强的富集和转移能力, 属于 Cd 富集型植物, 大叶女贞和车前草根部分具有较高的重金属滞留率, 属于根部囤积型植物, 芒麻各部分重金属含量不高, 是重金属规避型植物, 具备潜在土壤重金属污染固定修复能力. 综合考虑植物多样性、植物富集迁移能力等, 乔灌木结合为最佳修复模式, 湿地松、紫薇和车前草可作为矿业废弃地复垦生态修复的目标植物.

**关键词:** 矿业废弃地; 生态修复试验; 植物多样性; 重金属; 富集迁移

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0985-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202105298

## Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas

ZHOU Peng-fei<sup>1</sup>, ZHANG Shi-wen<sup>1,2,\*</sup>, LUO Ming<sup>3</sup>, WEI Hong-bin<sup>3</sup>, SONG Qiang<sup>1</sup>, FANG Bing<sup>1</sup>, ZHUANG Hong-juan<sup>1</sup>, CHEN Hong-yang<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Engineering Laboratory of Anhui Province for Comprehensive Utilization of Water and Soil Resources and Construction of Ecological Protection in Mining Area with High Groundwater Level, Huainan 232001, China; 3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** In order to select plant materials suitable for the ecological restoration of abandoned mining land, ecological restoration experiments were set up in landfills. The effects of different ecological restoration measures on plant diversity and heavy metal enrichment and migration characteristics were studied. The results showed that under different ecological restoration measures, a total of eight families and 10 species of surviving plants appeared, most of which were herbs. The restoration effect of the arbor shrub and grass plots was the best; the plant coverage reached 100%, and the survival rate was over 69%. The diversity index of the plant community was as follows: arbor shrub grass > shrub grass > joe grass > grass. The dominant plants under different ecological restoration measures were *Pinus elliotii*, *Ligustrum lucidum*, *Boehmeria nivea*, *Lagerstroemia indica*, and *Plantago asiatica*. The contents of most heavy metals in plants were higher than the normal values. Among them, the enrichment and transfer coefficients of the leaf stems of *P. elliotii* and *L. indica* were close to or greater than 1, showing a strong ability of enrichment and transfer to Cd; these two plants belong to Cd-enrichment type plants. The roots of *L. lucidum* Ait and *P. asiatica*, which are root-hoarding plants, had a high retention rate of heavy metals. *Boehmeria nivea* was a heavy metal-avoidance plant with a low content of heavy metals in each part and had the ability to fix and repair potential soil heavy metal pollution. Considering the diversity of plants and the ability of plant enrichment and migration, the combination of trees, shrubs, and grasses was the best restoration mode. *Pinus elliotii*, *L. indica*, and *P. asiatica* can be the target plants for ecological restoration in the abandoned land of mining areas.

**Key words:** mining wasteland; ecological restoration experiment; plant diversity; heavy metals; enrichment of migration

矿产资源的开发带动了国民经济的发展,但与此同时也形成了大量的矿业废弃地,废弃地中存在的金属硫化物通过长期的氧化产生大量的重金属及高含量的硫酸盐,在地表生物地球化学作用下,污染矿区及周边土壤和河流<sup>[1,2]</sup>. 这些污染不仅会制约矿山本身的发展,同时也会给周边地区人民的生产生活及健康带来不利的影响<sup>[3]</sup>.

近年来,由于耐性植物修复技术具有成本低及修复效果好等优点受到国内外学者大量的研究,陈洁宜等<sup>[4]</sup>的研究对广东大宝山矿 8 种优势植物进行调查分析,发现芒草 (*Miscanthus*) 和乌毛蕨

(*Blechnum orientale*) 具有土壤重金属污染固定修复能力. Wan 等<sup>[5]</sup>的研究分析了湖南省矿山植物的重金属含量,发现柔毛堇菜 (*Viola principis*) 对 Cd、Pb 和 As 具有超富集能力. 对于重金属污染严重的矿区,不仅要筛选耐性植物,还要考虑植物间搭配,构建一个具有植物多样性的生态系统. 而植物多样性是衡量生态恢复的重要指标,Conti 等<sup>[6]</sup>的研究发现

收稿日期: 2021-05-30; 修订日期: 2021-07-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800701); 自然资源科技项目(2020-K-8)

作者简介: 周鹏飞(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为矿区生态修复, E-mail: 1416621953@qq.com

\* 通信作者, E-mail: mamini190@126.com

植物多样性可以显著增强土壤的碳储量,王震洪等<sup>[7]</sup>的研究发现植物多样性通过植物群落结构减轻土壤元素损失,间接调控土壤保持功能,维持生态系统营养的持续性.汪雁佳等<sup>[8]</sup>的研究通过对不同恢复模式下植物多样性和生态系统健康变化进行分析,发现植物多样性与生态系统土壤保持功能一致,能够促进生态系统的恢复.

目前,对于矿区植物修复工作多集中于野外调查和盆栽试验等,而关于矿业废弃地在实际复垦修复条件下应以何种植物修复模式及植物物种修复鲜见报道.本文通过在粤北南岭矿业废弃地布设试验小区,以复垦修复后不同耐性植物为研究对象,分析不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征,优选出最佳的植物修复模式,初步筛选出适合矿业废弃地复垦生态修复的植物材料,以期对矿区重金属污染治理及植被恢复提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选址于粤北南岭矿业废弃地的一个废弃排土场,面积约0.08 km<sup>2</sup>,海拔572~705 m,年平均气温16.8℃,多年平均降雨量为1673 mm,历史上长期的民采民选活动导致大量废弃物的堆积,重金属Pb、Cd、Cu和Zn复合污染严重,同时也是矿区

主要的污染源.

本试验选取不同的耐性乔灌木植物作为修复材料,乔木选取湿地松(*Pinus elliottii*)和大叶女贞(*Ligustrum lucidum*),灌木选取芒麻(*Boehmeria nivea*)和紫薇(*Lagerstroemia indica*),植物混合草种包括狗牙根(*Cynodon dactylon*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、车前草(*Plantago asiatica*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)、商陆(*Phytolacca acinosa*)、茼蒿(*Chrysanthemum coronarium*)、艾草(*Artemisia argyi*)、斑茅(*Saccharum arundinaceum*)和山毛豆(*Tephrosia candida*).

1.2 试验设计

研究区域地形为坡地,平整地形后坡面坡度为15°,建立8个试验小区.复垦修复前后试验小区土壤基本理化性状如表1所示.

每个试验小区的面积为6 m<sup>2</sup>(3 m×2 m),各试验小区的土壤在经过石灰、有机肥和钝化剂等改良材料进行初步改良后,经雨水平衡一个月,移栽乔灌木苗,播撒草种,并在试验小区中设置不同的乔灌木配比组合,具体布设情况见图1.乔、灌木苗木移栽时,乔木湿地松和大叶女贞平均株高为90 cm,冠幅40 cm,灌木芒麻和紫薇平均株高50 cm,冠幅30 cm.乔灌木种植深度20~30 cm,种植密度为2株·m<sup>-2</sup>,草种选择播撒的方式,用量为0.1 kg·m<sup>-2</sup>,试验所用植物均购自于本地.

表1 试验小区修复前后土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil before and after remediation in the test plot

| 试验小区 | pH          | ω(OM)<br>/g·kg <sup>-1</sup> | CEC<br>/cmol·kg <sup>-1</sup> | ω(Pb 全量)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | ω(Cd 全量)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | ω(Cu 全量)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | ω(Zn 全量)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|-------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 修复前  | 3.62 ± 0.12 | 3.91 ± 0.26                  | 7.06 ± 0.29                   | 5 535.33 ± 678.93                | 1.7 ± 0.66                       | 145.33 ± 4.51                    | 457.67 ± 43.89                   |
| 修复后  | 8.46 ± 0.68 | 37.03 ± 10.16                | 10.08 ± 1.91                  | 3 599.71 ± 1 070.93              | 1.53 ± 0.54                      | 132.96 ± 7.90                    | 415.54 ± 93.51                   |

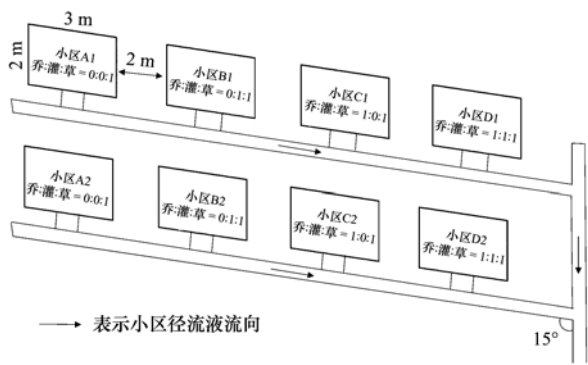


图1 试验小区设计处理

Fig. 1 Design and treatment of the experimental plot

1.3 样品的采集与测试

小区于2019年12月底布设完成,2020年7月初对试验小区内的土壤和植被进行收集,每个试验小区“S”型取3份土样样品,深度为0~20

cm,采集量约为1 kg.将采集的土壤样品混匀风干,挑出土中的石块、植物残体,自然风干备用.对每个小区内乔灌木调查种类、株数、株高、冠幅和盖度等指标,草本调查随机设置3个50 cm×50 cm小样方,调查样方内植物种类、株数、株高和盖度等指标,以样方平均值估算整个小区植物多样性情况,同时在各小区采集生长较好且具有多度的植株.将植物分为根、茎和叶部分,用自来水及去离子水冲洗,装袋放入烘箱105℃杀青1 h,然后在65℃温度下烘干至恒重.植物和土壤样品中Pb、Cd、Cu和Zn总量采用美国PE公司生产的ICP-4300DV测定.为了确保试验数据可靠,土壤和植物样品消解过程中采用国家标准土壤样品GBW07406(GSS-6)和国家标准植物样品GBW07602(GSV-1)进行质量控制,土壤和植物样

品中所测元素的回收率均在 92%~104% 之间, 结果符合质量控制要求。

#### 1.4 数据分析与处理

##### 1.4.1 植物多样性

(1) 重要值(IV)是反映不同植物在群落中作用与地位的综合数量指标<sup>[9]</sup>, 计算公式为:

$$IV = (D_r + C_r + H_r)/3 \quad (1)$$

式中,  $D_r$  为植物相对多度;  $C_r$  为植物相对盖度;  $H_r$  为植物相对高度。

(2) 为了反映各个小区内的植物组成及多样性程度, 根据调查数据, 采用 Patrick 丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )和群落多样性指数  $D$  (群落) 进行分析<sup>[10]</sup>, 计算公式如下:

$$R = S \quad (2)$$

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (4)$$

$$J = H/\ln S \quad (5)$$

式中,  $S$  为样方中植物种类的数量;  $P_i$  为第  $i$  种植物的株数占总株数的比例。

(3) 分别计算群落中乔木层、灌木层和草本层的多样性指数, 权重为不同生长型的相对盖度和叶层相对厚度之和的平均值<sup>[11]</sup>, 结合权重进行总体多样性的测算, 具体公式如下:

$$W_i = [(C_i/C) + (h_i/h)]/2 \quad (6)$$

$$D(\text{群落}) = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3 \quad (7)$$

式中,  $h$  为群落各生长型的平均高度;  $C$  为群落的总盖度;  $W_i$  为群落第  $i$  个生长型多样性指数的加权参数;  $h_i$  为第  $i$  个生长型的平均高度;  $C_i$  为第  $i$  个生长型的盖度。其中, 草本层按草本实际高度计算, 灌木层按实际高度的 1/2 计算, 乔木层的叶层厚度按实际高度 1/3 计算。  $D(\text{群落})$  为群落总体多样性指数;  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$  分别为乔木层、灌木层和草本层的多样性指数;  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  分别为乔木层、灌木层和草本层的给定加权参数, 经计算分别为: 0.230 5、0.503 3 和 0.266 2。

##### 1.4.2 植物富集、迁移与滞留率

植物富集系数(BCF)反映植物从土壤中吸收重金属的能力, 植物转移系数(TF)反映植物吸收重金属后从根部转移到地上部的能力<sup>[12]</sup>, 滞留率是根部重金属含量与地上部重金属含量之差与根部重金属含量的比值, 体现植物对重金属耐性能力高低<sup>[13]</sup>。它们计算公式如下:

$$BCF = C_{\text{植物}}/C_{\text{土壤}} \quad (8)$$

$$TF = C_{\text{地上}}/C_{\text{根部}} \quad (9)$$

$$\text{滞留率} = (C_{\text{根部}} - C_{\text{地上}})/C_{\text{根部}} \quad (10)$$

式中,  $C_{\text{植物}}$  表示植物各器官的重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{土壤}}$  表示土壤中重金属的含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{地上}}$  表示植物地上部(茎、叶的平均值)的重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{根部}}$  表示植物地下(根)部的重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同修复模式下植物组成及重要值

试验小区修复 6 个月后, 通过对 8 个小区进行样方调查, 发现共出现存活植物 8 科 10 种, 其中包括 2 种乔木、2 种灌木和 6 种草本植物。根据不同修复模式下各植物的生长指标, 计算得到不同修复模式下植物的重要值(表 2), 研究发现不同修复模式下优势植物存在重复现象, 其中乔木层湿地松和大叶女贞, 灌木层芒麻和紫薇, 草本层车前草为对应修复模式下的优势植物, 车前草重要值均超过 50%, 其余存活草本植物在不同修复下重要值变化不大, 表明车前草相对于其他草本植物更能适应废弃地的生长, 车前草本身具有耐贫瘠、生长速度快和生物量大等特点, 在复垦修复条件下土壤肥力得到提升, 车前草长势更加旺盛, 因此车前草在各种修复处理草本层中占据了主要地位<sup>[14]</sup>。不同修复模式对单个植物影响相对较低, 乔灌木相对草本植物适应能力更强。韩芳等<sup>[15]</sup>对废弃采石场初期群落结构的研究发现, 不同立地类型下对草本植物优势种影响不大, 灌木耐干旱能力更强, 与本研究的结果相一致。

### 2.2 不同修复模式下植物多样性

由图 2 可知, 不同植物修复模式下植物覆盖度和植物存活率均有所不同, 在进行土壤改良的基础上, 植物覆盖度均达到 50% 以上, 由于修复时间较短, 处于自然演替初期阶段, 覆盖度相对不高, 大小为: 乔灌草 > 灌草 > 乔草 > 草, 而灌木覆盖度优于乔木, 原因可能是灌木发育周期低于乔木, 能较好地覆盖地表, 而草本植物单个盖度相对较低。王曙光等<sup>[16]</sup>的研究通过在新邵县高家坳金矿开展植被修复试验, 发现灌木长势覆盖度均明显好于乔木和草本, 与本研究的结果相一致。植物存活率呈现出: 乔灌草 > 灌草 > 草 > 乔草, 乔草组合植物存活率最低可能与生态恢复初期乔木覆盖度低、养分需求高、对其余植物的生长产生影响有关。同种植物配置对照组之间植物覆盖度和植物存活率影响相对较低。郭志萍等<sup>[17]</sup>的研究发现乔灌草土地具有较高的持水率, 土壤层蓄水能力较强。彭小英<sup>[18]</sup>的研究指出乔灌草结合根系处于不同的土壤中, 加快对凋谢物养

分层之间的养分转化程度,整体修复效果优于其他植物组合模式.

表 2 不同修复模式下植物重要值/%

| 植物   | 小区编号  |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | A1    | A2    | B1    | B2    | C1    | C2    | D1    | D2    |
| 湿地松  | —     | —     | —     | —     | 43.44 | 43.80 | 47.50 | 49.56 |
| 大叶女贞 | —     | —     | —     | —     | 56.56 | 56.20 | 52.50 | 50.44 |
| 苎麻   | —     | —     | 50.19 | 51.48 | —     | —     | 49.67 | 51.75 |
| 紫薇   | —     | —     | 49.81 | 48.52 | —     | —     | 50.33 | 48.25 |
| 车前草  | 52.16 | 50.12 | 55.95 | 52.70 | 62.25 | 61.27 | 55.61 | 55.76 |
| 商陆   | 9.65  | —     | 7.64  | 7.81  | —     | —     | 8.46  | 8.96  |
| 茼蒿   | 7.89  | 7.88  | 7.07  | 9.21  | —     | —     | 9.75  | 9.45  |
| 艾草   | 10.94 | 14.44 | 12.18 | 10.83 | 11.31 | 12.08 | 6.80  | 6.69  |
| 斑茅   | 12.56 | 17.07 | 11.84 | 14.81 | 15.83 | 16.87 | 13.06 | 12.09 |
| 狗牙根  | 6.81  | 10.49 | 5.32  | 4.63  | 10.60 | 9.78  | 6.31  | 7.05  |

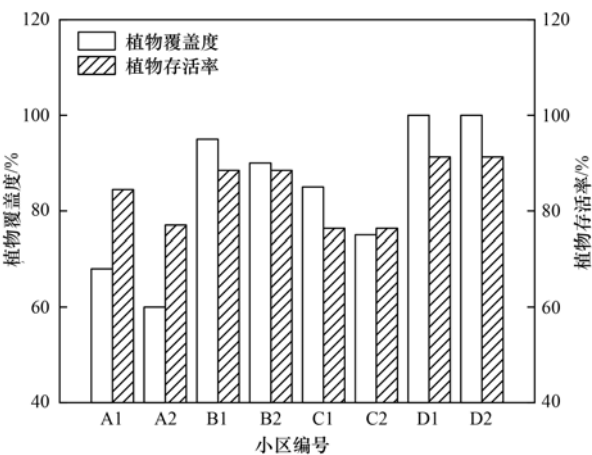


图 2 不同修复模式下植物覆盖度与植物存活率  
Fig. 2 Plant coverage and survival rate under different remediation modes

基于各修复小区植物生长指标,利用 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数对不同修复模式下不同功能群植物多样性进行计算,并对不同功能群植物多样性指数加权,得到不同修复模式下植物群落多样性指数(表 3).从表 3 可知,各修复小区植物群落的构成数量上以草本植物为主,灌木和乔木的数量较少,其中乔灌木小区 4 种多样性指数均为最高,草种小区 4 种多样性指数最低,Patrick 丰富度指数和 Simpson 多样性指数灌木小区优于乔草小区, Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数相差不大.同种植物配置对照组之间植物多样性影响相对较小.郭道宇等<sup>[19]</sup>的研究发现多样的人工配置群落植物多样性优于单一的人工配置群落,且更能促进群

表 3 不同修复模式下植物群落多样性

| 小区编号 | Patrick 丰富度指数 | Shannon-Wiener 多样性指数 | Simpson 多样性指数 | Pielou 均匀度指数 |
|------|---------------|----------------------|---------------|--------------|
| A1   | 6             | 0.302 0              | 0.142 7       | 0.168 6      |
| A2   | 5             | 0.297 3              | 0.146 5       | 0.184 7      |
| B1   | 8             | 0.628 5              | 0.382 1       | 0.659 4      |
| B2   | 8             | 0.648 5              | 0.393 4       | 0.670 6      |
| C1   | 6             | 0.365 1              | 0.220 6       | 0.378 0      |
| C2   | 6             | 0.332 2              | 0.233 8       | 0.354 2      |
| D1   | 10            | 0.779 4              | 0.488 7       | 0.884 1      |
| D2   | 10            | 0.751 0              | 0.476 7       | 0.868 2      |

落向正向演替的方向发展.而造成试验群落多样性水平差异的原因有很多,由于试验在野外进行,既可能受群落中植物本身特性的因素,也可能受到植物群落所在土壤性质及自然因素的影响<sup>[20]</sup>.综合考虑植物覆盖度、存活率和植物群落多样性,乔灌木结合为最佳修复模式.

2.3 不同修复模式下优势植物富集迁移分析

2.3.1 不同修复模式下优势植物重金属分布特征

由图 3 可知,不同修复模式下 5 种优势植物大

叶女贞、湿地松、苎麻、紫薇和车前草体内叶茎根重金属含量差异较大,叶部重金属变化范围为:14.93 ~ 134.48 (Pb)、0.32 ~ 5.03 (Cd)、10.08 ~ 42.28 (Cu) 和 31.23 ~ 97.39 (Zn) mg·kg<sup>-1</sup>,茎部重金属变化范围为:12.22 ~ 99.68 (Pb)、0.23 ~ 2.17 (Cd)、10.61 ~ 27.09 (Cu) 和 20.80 ~ 61.33 (Zn) mg·kg<sup>-1</sup>,根部重金属变化范围为 2.60 ~ 439.75 (Pb)、0.41 ~ 1.91 (Cd)、8.29 ~ 87.16 (Cu) 和 36.48 ~ 191.59 (Zn) mg·kg<sup>-1</sup>.植物体内 Pb 含量最高,其次

是 Zn、Cu 和 Cd, 与土壤重金属含量特征基本一致, 反映植物体内重金属积累量与根际土壤重金属具有一定相关性<sup>[21]</sup>。从不同植物种类来看, 乔木茎和叶中重金属含量相对于灌木和草本而言较低。重金属在同一植物不同器官中的含量也不尽相同, 大叶女贞根部

Pb、Cd 和 Cu 含量显著高于茎和叶部的含量 ( $P < 0.05$ ), 湿地松根、茎和叶中 Cd 和 Zn 含量均无显著性差异。苎麻和紫薇叶部 Cd、Cu 和 Zn 含量显著高于茎部的含量 ( $P < 0.05$ ), 车前草根 4 种重金属含量均显著高于茎部的含量 ( $P < 0.05$ )。

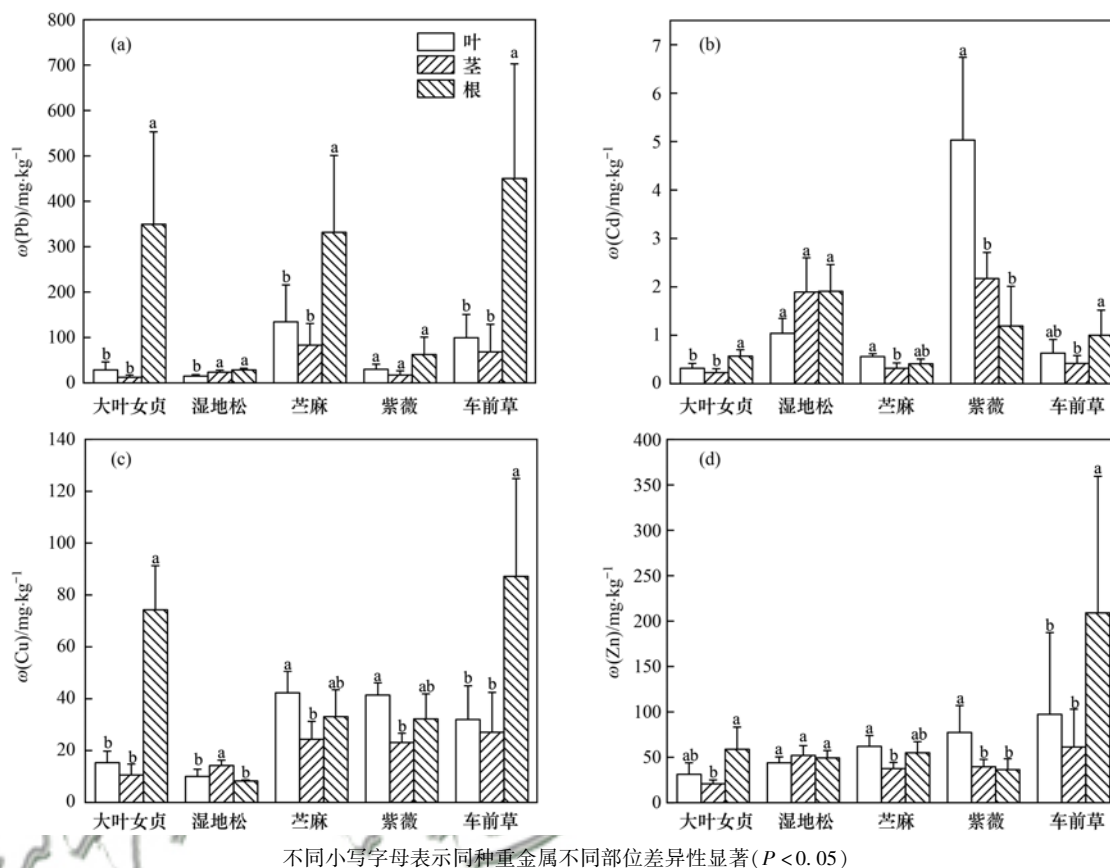


图 3 不同修复模式下植物不同器官重金属含量

Fig. 3 Heavy metal content in different organs of plants under different remediation modes

一般植物体内重金属含量为: 0.10 ~ 41.70 (Pb)、0.20 ~ 3.00 (Cd)、0.40 ~ 45.80 (Cu) 和 1.00 ~ 160.00 (Zn)  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 不同修复模式下 5 种植物体内 4 种重金属均有不同程度的超出。Pb 生物有效性低难以被转运, 大叶女贞、苎麻、紫薇和车前草 Pb 含量均超出正常范围, 但主要集中于根部, 其中车前草、大叶女贞和苎麻根部超标分别为正常值的 9.55、7.38 和 6.95 倍。紫薇体内的 Cd 含量较高, 其中叶部超标为 0.68 倍。Cu 和 Zn 是植物必需的元素, 植物体内重金属 Cu 和 Zn 含量均在正常范围内。一般来说植物 Pb、Cd、Cu 和 Zn 这 4 种重金属超富集临界值为 1000、100、1000 和 1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与超富集植物重金属含量临界值相比, 不同修复模式下 5 种植物体内重金属含量均未达到超富集植物的临界值。

### 2.3.2 不同修复模式下优势植物对重金属的富集、转运与滞留率

植物富集系数反映植物将重金属吸收到体内能

力大小。由表 4 可知, 不同修复模式下 5 种优势植物对 4 种重金属的富集系数不尽相同, 对 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的富集范围分别为 0.01 ~ 0.18、0.22 ~ 4.17、0.08 ~ 0.66 和 0.08 ~ 0.41, 整体表现为:  $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ , 对草本植物而言, 当富集系数低于 0.5, 说明植物对重金属的富集能力较弱; 当富集系数在 0.5 ~ 1.0 之间, 对重金属有一定的积累能力<sup>[22]</sup>; 对木本植物, 当富集系数大于 0.4, 则说明植物对重金属污染的修复能力较强。5 种优势植物不同修复模式下对 Pb 富集能力较弱, 不同修复模式下大叶女贞根部对 Pb、Cu 和 Zn 的富集系数显著高于茎叶部富集系数 ( $P < 0.05$ )。湿地松、苎麻、紫薇和车前草根茎叶对于 Pb 的富集能力差异不显著, 可能与土壤中 Pb 含量较高且难以被吸收有关。紫薇地上部对 Cd 表现出较强的富集能力, 叶和茎的 BCF 分别达到 4.17 和 1.77。湿地松根和茎对 Cd 的富集系数均大于 1, 不同修复模式下所有植物对 Pb、Cu 和 Zn 的富集系数均小于 1。

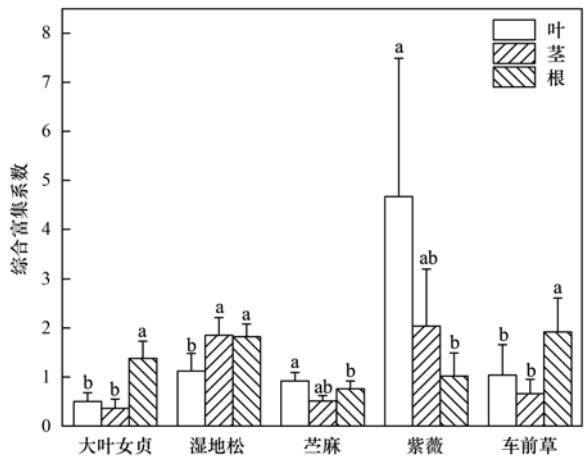
对不同修复模式下不同优势植物进行综合富集能力的分析,有利于了解各优势植物在复合污染条件下的适应能力<sup>[23]</sup>(图4).由图4可知,大叶女贞和车前草根部分综合富集能力显著高于茎叶部( $P <$

0.05).湿地松、苎麻和紫薇的根部和叶部综合富集能力差异性显著( $P < 0.05$ ).紫薇和湿地松叶茎部表现出较高的综合富集能力,综合富集系数分别达4.67和2.05,可作为重金属污染修复的优选树种.

表4 不同修复模式下优势植物对重金属的富集系数<sup>1)</sup>

| Table 4 Concentration coefficient of heavy metals in dominant plants under different remediation modes |    |              |               |               |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 植物                                                                                                     | 部位 | 富集系数         |               |               |               |
|                                                                                                        |    | Pb           | Cd            | Cu            | Zn            |
| 大叶女贞                                                                                                   | 叶  | 0.01 ± 0.00b | 0.32 ± 0.16a  | 0.12 ± 0.04b  | 0.06 ± 0.02b  |
|                                                                                                        | 茎  | 0.01 ± 0.00b | 0.23 ± 0.14a  | 0.08 ± 0.03b  | 0.05 ± 0.02b  |
|                                                                                                        | 根  | 0.11 ± 0.07a | 0.55 ± 0.31a  | 0.58 ± 0.13a  | 0.13 ± 0.04a  |
| 湿地松                                                                                                    | 叶  | 0.01 ± 0.00a | 0.93 ± 0.35b  | 0.08 ± 0.02a  | 0.10 ± 0.03a  |
|                                                                                                        | 茎  | 0.01 ± 0.00a | 1.61 ± 0.36a  | 0.11 ± 0.01b  | 0.11 ± 0.03a  |
|                                                                                                        | 根  | 0.01 ± 0.00a | 1.64 ± 0.25a  | 0.07 ± 0.00a  | 0.11 ± 0.02a  |
| 苎麻                                                                                                     | 叶  | 0.05 ± 0.04a | 0.42 ± 0.18a  | 0.33 ± 0.07a  | 0.13 ± 0.02a  |
|                                                                                                        | 茎  | 0.02 ± 0.02a | 0.22 ± 0.06a  | 0.19 ± 0.05b  | 0.08 ± 0.01b  |
|                                                                                                        | 根  | 0.10 ± 0.07a | 0.29 ± 0.09a  | 0.26 ± 0.09ab | 0.11 ± 0.01a  |
| 紫薇                                                                                                     | 叶  | 0.01 ± 0.01a | 4.17 ± 2.73b  | 0.32 ± 0.05b  | 0.17 ± 0.11a  |
|                                                                                                        | 茎  | 0.01 ± 0.01a | 1.77 ± 1.11a  | 0.18 ± 0.03a  | 0.09 ± 0.04a  |
|                                                                                                        | 根  | 0.02 ± 0.02a | 0.67 ± 0.42ab | 0.25 ± 0.08ab | 0.08 ± 0.04a  |
| 车前草                                                                                                    | 叶  | 0.04 ± 0.03a | 0.52 ± 0.33ab | 0.24 ± 0.11b  | 0.24 ± 0.22ab |
|                                                                                                        | 茎  | 0.06 ± 0.04a | 0.30 ± 0.12b  | 0.21 ± 0.12b  | 0.11 ± 0.07b  |
|                                                                                                        | 根  | 0.15 ± 0.10a | 0.66 ± 0.18a  | 0.66 ± 0.27a  | 0.43 ± 0.28a  |

1) 不同小写字母表示同种重金属不同部位差异性显著( $P < 0.05$ )



不同小写字母表示同种植物不同部位之间差异性显著( $P < 0.05$ )

图4 不同修复模式下优势植物对重金属综合富集能力

Fig. 4 Comprehensive heavy metal enrichment ability of dominant plants under different remediation modes

由表5可知,不同修复模式下5种优势植物对4种重金属转运系数与滞留率也存在一定的差异性,植物转运系数反映植物对重金属的迁移能力,系数越高说明植物转移重金属的能力越强.不同修复模式下5种植物转运系数总体表现为: $Cd > Cu > Zn > Pb$ ,紫薇对Cd的转运能力显著高于其他植物( $P < 0.05$ ),转运系数达到4.38.对Cu具有较高转运能力的植物包括湿地松、苎麻和紫薇,转移系数均大于1,紫薇对Zn转运能力显著高于其他植物( $P < 0.05$ )且

系数大于1,表明对Zn具有较强的转运能力,不同修复模式下5种植物对Pb的转移系数均小于1.

滞留率体现了植物对重金属耐性能力高低,也是植物根部对重金属污染的一种保护性反应.不同修复模式下植物对4种重金属滞留效应总体表现为: $Pb > Zn > Cu > Cd$ ,与转运系数相反,大多数植物对重金属在根部的吸收均有滞留效应,将有害离子积累于根部是植物阻止其对光合作用及新陈代谢活性毒害的一种策略<sup>[24]</sup>.大叶女贞和车前草对4种重金属均有较高的滞留效应,紫薇对Cd滞留率显著低于其他植物( $P < 0.05$ ).湿地松对Cu,苎麻对Cd和Cu,紫薇对Cd、Cu和Zn基本没有滞留效应,这些植物将重金属大部分转移到地上部分,植物在根部可以留有足够储存重金属空间来应对土壤中重金属的高含量<sup>[25]</sup>.

2.4 不同修复模式下优势植物和土壤中重金属关系

矿区土壤重金属与植物重金属之间也存在一定的关系,通过分析各优势植物与对应土壤重金属之间的相关性可知(表6),湿地松地上部Pb和Cu与土壤Pb和Cu呈显著正相关( $P < 0.05$ ),湿地松地下部与土壤Cd呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与土壤Zn呈极显著正相关( $P < 0.01$ ).车前草地上部和地下部均与土壤Cd呈显著正相关性( $P < 0.05$ ).紫薇地上部与土壤重金属Cu之间呈显著正相关( $P <$

0.05),这与陈昌东等<sup>[26]</sup>的研究发现的植物体内重金属元素与土壤中对对应元素呈正相关关系相一致。但不同植物各部位与土壤重金属之间也存在一定的负相关关系,曲豪杰等<sup>[27]</sup>的研究发现土壤污染会一定程度提高植株体内重金属含量,随着污染加重会

抑制植物生长,降低植株的生物量,最终影响植株对重金属的积累,因此复合污染低可能有利于部分重金属的积累。同时也有研究表明土壤理化性质、光照、温度、重金属形态毒性和植物本身特性等均会影响植物对重金属的富集<sup>[28]</sup>。

表 5 不同修复模式下植物对不同重金属的转运系数和滞留率<sup>1)</sup>

| Table 5 Transport coefficients and retention rates of plants for different heavy metals under different remediation modes |      |                  |                   |                 |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 项目                                                                                                                        | 植物   | Pb               | Cd                | Cu              | Zn              |
| 转运系数                                                                                                                      | 大叶女贞 | 0.10 ± 0.09c     | 0.51 ± 0.24b      | 0.18 ± 0.05c    | 0.49 ± 0.19c    |
|                                                                                                                           | 湿地松  | 0.67 ± 0.08a     | 0.78 ± 0.07b      | 1.46 ± 0.19a    | 0.97 ± 0.06b    |
|                                                                                                                           | 苎麻   | 0.36 ± 0.13b     | 1.12 ± 0.22b      | 1.04 ± 0.15b    | 0.92 ± 0.08b    |
|                                                                                                                           | 紫薇   | 0.53 ± 0.28ab    | 4.38 ± 1.64a      | 1.06 ± 0.24b    | 1.67 ± 0.43a    |
|                                                                                                                           | 车前草  | 0.27 ± 0.16bc    | 0.57 ± 0.18b      | 0.38 ± 0.18c    | 0.40 ± 0.20c    |
| 滞留率/%                                                                                                                     | 大叶女贞 | 90.17 ± 8.90a    | 49.04 ± 24.25a    | 82.23 ± 4.56a   | 50.56 ± 18.63a  |
|                                                                                                                           | 湿地松  | 33.34 ± 7.87c    | 22.49 ± 7.03a     | -46.33 ± 18.87c | 2.83 ± 5.52b    |
|                                                                                                                           | 苎麻   | 63.92 ± 12.62abc | -11.80 ± 21.76a   | -3.71 ± 14.97b  | 8.22 ± 8.19b    |
|                                                                                                                           | 紫薇   | 47.71 ± 28.09bc  | -338.36 ± 163.79b | -5.57 ± 24.47b  | -66.61 ± 43.16c |
|                                                                                                                           | 车前草  | 74.16 ± 14.97ab  | 44.16 ± 18.78a    | 62.29 ± 18.80a  | 60.12 ± 19.65a  |

1) 不同小写字母表示同种重金属不同植物之间差异性显著 ( $P < 0.05$ )

表 6 优势植物各部位重金属与土壤重金属相关性<sup>1)</sup>

| Table 6 Correlation between heavy metals in dominant plant parts and heavy metals in soil |     |             |         |         |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|---------|---------|----------|
| 植物                                                                                        | 部位  | 与土壤重金属含量相关性 |         |         |          |
|                                                                                           |     | Pb          | Cd      | Cu      | Zn       |
| 大叶女贞                                                                                      | 地上部 | 0.597       | -0.426  | -0.041  | 0.252    |
|                                                                                           | 地下部 | 0.417       | -0.498  | 0.187   | 0.500    |
| 湿地松                                                                                       | 地上部 | 0.963 *     | 0.942   | 0.976 * | 0.898    |
|                                                                                           | 地下部 | 0.940       | 0.986 * | 0.929   | 0.995 ** |
| 苎麻                                                                                        | 地上部 | -0.030      | 0.706   | -0.316  | 0.885    |
|                                                                                           | 地下部 | -0.285      | 0.447   | -0.321  | 0.844    |
| 紫薇                                                                                        | 地上部 | -0.134      | -0.564  | 0.981 * | -0.020   |
|                                                                                           | 地下部 | 0.305       | -0.426  | 0.909   | 0.078    |
| 车前草                                                                                       | 地上部 | 0.192       | 0.784 * | -0.241  | 0.079    |
|                                                                                           | 地下部 | -0.307      | 0.826 * | -0.146  | 0.135    |

1) \*\* 表示在双侧 0.01 水平上差异显著, \* 表示在双侧 0.05 水平上差异显著

3 讨论

矿业废弃地土壤重金属含量高,营养元素缺乏,严重制约了植物的生长发育,植物遭到严重的破坏,

而筛选出适宜的植物修复模式和植物种类可以有效地改善土壤环境情况,恢复植被覆盖度<sup>[29]</sup>。前人对植物修复模式的优选开展了一系列研究,安俊珍<sup>[30]</sup>的研究通过对金矿区不同植物群落种类,群落结构以及物种多样性指数进行差异性分析,确定该废弃地植被恢复最佳的植物种类和相应的配置,谷金锋等<sup>[31]</sup>的研究通过对尾矿库进行修复试验,发现乔(樟子松、落叶松、柳树)、灌(沙棘、丁香草)和草(紫花苜蓿)相结合对于植物存活率及土壤养分有很大提升。韩煜等<sup>[32]</sup>的研究通过主成分分析对铜矿不同植被恢复模式物种多样性和土壤理化性质进行概括分析,并通过综合评价得出刺槐-狗牙根-苘麻生态恢复效果较高。本研究从植物覆盖度,存活率和植物多样性综合分析得出乔灌草结合为最佳植物修复组合,同时在粤北南岭矿业废弃地开展了乔灌草示范推广应用,生态恢复效果显著(图 5)。通常而言草本植物植株矮小、生物量低且生长缓慢,实际修复效率低,而乔灌植物生物量大且生长周期长,对水肥依赖性弱和维护成本低,因此乔灌草结合在生态

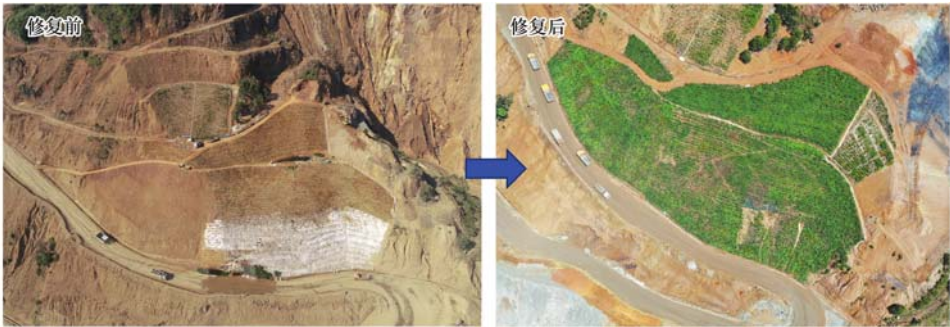


图 5 矿业废弃地示范区修复前后对比

Fig. 5 Comparison before and after restoration of mining abandoned land demonstration area

修复方面具有独到优势<sup>[33]</sup>,这也与袁斯文<sup>[34]</sup>和练冬梅等<sup>[35]</sup>的研究得出矿业废弃地乔灌木为最佳修复模式结果相一致。

本研究发现大叶女贞、湿地松、芒麻、紫薇和车前草为不同修复模式下的优势植物,并且能适应当地的气候状况,适宜在矿山废弃地种植。根据不同植物对于重金属富集转运能力的差异,往往可将植物分为富集型、根部囤积型和规避型植物<sup>[36]</sup>。5种优势植物对4种重金属的富集能力相对较低,可能与废弃地过高的重金属含量有关。宋佳等<sup>[37]</sup>的研究发现Cd-Pb复合污染可以促进车前草对Cd的富集,刘丽杰等<sup>[38]</sup>的研究通过对车前草进行不同含量Cd<sup>2+</sup>处理,发现车前草在一定的重金属含量范围内表现出一定的生理适应性,积累一定含量的Cd<sup>2+</sup>,具有植物修复的潜能。紫薇和湿地松具有较高综合富集能力,对Cd表现出较强的植物富集和转移功能,叶茎部的富集转移系数接近或超过1,其中紫薇叶对Cd的转移系数高达4.38,二者均属于Cd的富集型植物,可作为Cd的污染修复材料,通过定期修剪叶部以减少重金属环境中Cd的毒害<sup>[39]</sup>。同时紫薇地上部具有较高的综合富集能力,这与商侃侃等<sup>[40]</sup>的研究通过隶属函数法评价得出的结论相一致。芒麻对4种重金属的富集系数均小于1,体内重金属含量不高,属于规避型植物,与苟体忠等<sup>[41]</sup>对于丹寨矿区芒麻的研究结果相一致。本研究区域属于粤北南岭山区,水土流失严重,区域以生态恢复和快速提高植被覆盖度为主,修复方向为林草地,不进入食物链<sup>[42]</sup>。综合考虑植物重要值和富集迁移能力,湿地松、紫薇和车前草可作为矿业废弃地复垦生态修复的目标植物。

本研究从植物角度对植物模式进行优选,但通过相关性分析可知土壤与植物重金属之间也密切相关,因此仅从植物角度分析往往不能完全揭示生态修复效果,还需综合考虑土壤指标,包括土壤理化性质、重金属含量等,同时适当考虑经济成本因素,利用生态修复评价模型,量化各优选指标贡献率,构建生态修复评价体系<sup>[43]</sup>,进而优选植物修复模式,在后续研究中会进一步完善。

#### 4 结论

(1)不同生态修复模式下植物覆盖度和植物群落多样性指数均表现为:乔灌木>灌木>乔木>草,植物存活率乔灌木最高,超过69%,乔木最低,均低于60%。从植物覆盖度,植物存活率和植物多样性角度综合分析,乔灌木结合为最佳的植物修复模式。

(2)不同生态修复模式下共出现存活植物8科

10种,大叶女贞、湿地松、芒麻、紫薇和车前草为不同修复下优势物种,表现出了很强的生长优势。车前草和大叶女贞属于根部囤积型植物,芒麻属于规避型植物,紫薇和湿地松属于富集型植物,综合考虑植物重要值及富集迁移能力,乔灌木推荐植物为湿地松、紫薇和车前草。

#### 参考文献:

- [1] 徐佩,吴超,邱冠豪.我国铅锌矿山土壤重金属污染规律研究[J].土壤通报,2015,46(3):739-744.  
Xu P, Wu C, Qiu G H. Study on the law of soil heavy metals pollution around lead-zinc mining areas in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 739-744.
- [2] Wood J L, Liu W X, Tang C X, et al. Microorganisms in heavy metal bioremediation: strategies for applying microbial-community engineering to remediate soils[J]. Aims Bioengineering, 2016, 3(2): 211-229.
- [3] 周艳,陈楠,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2884-2892.  
Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2884-2892.
- [4] 陈洁宜,刘广波,崔金立,等.广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J].环境科学,2019,40(12):5629-5639.  
Chen J Y, Liu G B, Cui J L, et al. Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan mine area, Guangdong province, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5629-5639.
- [5] Wan X M, Lei M, Yang J X. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China[J]. CATENA, 2017, 148: 67-73.
- [6] Conti G, Díaz S. Plant functional diversity and carbon storage-an empirical test in semi-arid forest ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2013, 101(1): 18-28.
- [7] 王震洪,段昌群,侯永平,等.植物多样性与生态系统土壤保持功能关系及其生态学意义[J].植物生态学报,2006,30(3):392-403.  
Wang Z H, Duan C Q, Hou Y P, et al. The relationship of plant species diversity to ecosystem function in relation to soil conservation in semi-humid evergreen forests, Yunnan province, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3): 392-403.
- [8] 汪雁佳,陆宏芳,林永标,等.粤港澳大湾区不同恢复模式植物群落结构与生态系统健康的动态变化[J].生态学报,2021,41(9):3669-3688.  
Wang Y J, Lu H F, Lin Y B, et al. Plant community structure and health development dynamics of different restoration modes in Guangdong-Hong Kong-Macao bay area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3669-3688.
- [9] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, et al. Natural grassland as the optimal pattern of vegetation restoration in arid and semi-arid regions: Evidence from nutrient limitation of soil microbes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 388-397.
- [10] 汪永英,孟琳,韩冬芸,等.城市森林物种多样性—以哈尔滨城市林业示范基地为例[J].东北林业大学学报,2017,45(3):34-38.  
Wang Y Y, Meng L, Han D H, et al. Species diversity in urban forest—a case study of city forestry demonstration base in Harbin

- [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, **45**(3): 34-38.
- [11] 崔倩, 潘存德, 李贵华, 等. 喀纳斯泰加林群落物种多样性环境解释与自然火干扰[J]. 生态学报, 2018, **37**(6): 1824-1832.
- Cui Q, Pan C D, Li G H, *et al.* Effects of environmental factors and natural fire disturbance on species diversity in Kanas taiga forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(6): 1824-1832.
- [12] Mahdavian K, Ghaderian S M, Torkzadeh-Mahani M. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn, and Ag by plants growing on Koshk lead-zinc mining area, Iran[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, **17**(5): 1310-1320.
- [13] 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 等. 羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3829-3835.
- Huang J H, Fu J L, Yan X R, *et al.* Acid mine wasteland reclamation by *Juncus ochraceus* Buchen as a potential pioneer plant[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3829-3835.
- [14] 刘丽杰, 刘凯, 孙玉婷, 等. 车前草对重金属铜和镍的积累及生理响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, **55**(5): 171-179.
- Liu L J, Liu K, Sun Y T, *et al.* Accumulation copper and nickel (II) ions by *Herba plantaginis* and its physiological responses[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, **55**(5): 171-179.
- [15] 韩芳, 李传荣, 孙明高, 等. 废弃采石场植被自然恢复初期群落的结构特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, **28**(2): 35-39, 49.
- Han F, Li C R, Sun M G, *et al.* Plant community structure at an early ecological restoration stage on an abandoned quarry in Sibao mount[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2008, **28**(2): 35-39, 49.
- [16] 王曙光, 曾若婉, 颜小红, 等. 乔灌草结合在矿区弃渣地植被修复中的应用[J]. 中国水土保持, 2015, (10): 18-20.
- [17] 郭志萍, 李斌, 孙西欢, 等. 不同生态修复模式下土壤水文性质及其对溶质运移的影响[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(12): 4251-4260.
- Guo Z P, Li B, Sun X H, *et al.* Soil hydrological properties and their effects on solute transport under different ecological restoration models in coal mining area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(12): 4251-4260.
- [18] 彭小英. 赣南稀土废弃矿区不同植被恢复土壤理化性质的研究[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2016.
- Peng X Y. Study on soil physicochemical properties of different vegetation restoration in abandoned rare earth mining area of south Jiangxi province[D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2016.
- [19] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报, 2005, **25**(4): 763-770.
- Guo X Y, Zhang J T, Gong H L, *et al.* Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(4): 763-770.
- [20] Jin J S, Wang R S, Li F, *et al.* Conjugate ecological restoration approach with a case study in Mentougou district, Beijing[J]. Ecological Complexity, 2011, **8**(2): 161-170.
- [21] 何东, 邱波, 彭晖晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- He D, Qiu B, Peng J H, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a lead-zinc tailings in Xiashuiwan of Hunan Province[J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- [22] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3845-3853.
- Li J K, Zhang D, Zhou P, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc Mining Area, Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3845-3853.
- [23] 车继鲁, 余树全, 刘晖, 等. 城市绿化树种香樟不同器官对土壤重金属的富集特征[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(9): 2907-2916.
- Che J L, Yu S Q, Liu H, *et al.* Characteristics of heavy metal enrichment efficiency in different organs of urban green tree *Cinnamomum camphora*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(9): 2907-2916.
- [24] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- Xu H W, Zhang R Z, Xie Y. Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* at lead-zinc Mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- [25] Parizanganeh A H, Bijnavand V, Zamani A A, *et al.* Concentration, distribution and comparison of total and bioavailable heavy metals in top soils of bonab district in Zanjan Province[J]. Open Journal of Soil Science, 2012, **2**(2): 123-132.
- [26] 陈昌东, 张安宁, 腊明, 等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1216-1223.
- Chen C D, Zhang A N, La M, *et al.* Soil heavy metal contamination and enrichment of dominant plants in coal waste piles in Pingdingshan area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(6): 1216-1223.
- [27] 曲豪杰, 张涵丹, 谭志超, 等. 纳塔栎和柳叶栎对铅锌矿区污染土壤的修复潜力分析: 田间试验[J]. 生态学报, 2020, **40**(19): 6969-6981.
- Qu H J, Zhang H D, Tan Z C, *et al.* The remediation potential of *Quercus nuttallii* and *Quercus phellos* to heavy metal polluted soil in lead-zinc mining area: a field test[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(19): 6969-6981.
- [28] Shi X, Wang S F, Sun H J, *et al.* Comparative of *Quercus* spp. and *Salix* spp. for phytoremediation of Pb/Zn mine tailings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(4): 3400-3411.
- [29] 张鹏, 杨富淋, 蓝莫茗, 等. 广东大宝山多金属污染排土场耐性植物与改良剂稳定修复研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(2): 545-552.
- Zhang P, Yang F L, Lan M M, *et al.* Phytostabilization with tolerant plants and soil amendments of the tailings of the Dabaoshan polymetallic mine in Guangdong province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(2): 545-552.
- [30] 安俊珍. 风化型土质金矿尾矿植被恢复研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- An J Z. Study on vegetation restoration in weathered soil tailings[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [31] 谷金锋, 蔡体久, 杨业. 高寒山区采矿迹地植被恢复研究[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 29-36.

- Gu J F, Cai T J, Yang Y. Research on vegetation restoration of abandoned mine land in alpine areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(3): 29-36.
- [32] 韩煜, 赵伟, 张淇翔, 等. 不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(1): 120-125.
- Han Y, Zhao W, Zhang Q X, *et al.* Effects of different vegetation patterns on ecological restoration in mining wasteland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(1): 120-125.
- [33] 陈勤, 沈羽, 方炎明, 等. 紫湖流域重金属污染风险与植物富集特征[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(14): 198-205.
- Chen Q, Shen Y, Fang Y M, *et al.* Heavy metals pollution risk and characteristics of plant accumulation along Zihu River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(14): 198-205.
- [34] 袁斯文. 铅锌矿废弃地生态修复工程设计及效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- Yuan S W. The research on engineering design and effect of ecological restoration for lead-zinc mine wasteland [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [35] 练冬梅, 姚运法, 张树河, 等. 长汀稀土矿区乔灌草绿化模式生态修复效果研究[J]. 亚热带水土保持, 2016, **28**(2): 1-4.
- Lian D M, Yao Y F, Zhang S H, *et al.* Study on ecological restoration effects of tree-shrub-grass greening patterns for the waste rare earth mine in Changting county of Fujian province [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016, **28**(2): 1-4.
- [36] Mahdavian K, Ghaderian S M, Schat H. Pb accumulation, Pb tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* L. under Pb exposure [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **126**: 21-31.
- [37] 宋佳, 袁阳洋, 邵成龙, 等. Cd、Pb 单一和复合污染条件下 3 种常见中草药对 Pb、Cd 的富集研究[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(19): 349-353.
- Song J, Yuan Y Y, Shao C L, *et al.* Growth, accumulation of Cd and Pb by three common traditional chinese herbal medicines under Cd, Pb and their combined pollution [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(19): 349-353.
- [38] 刘丽杰, 王玥, 金忠民, 等. 车前草对重金属  $Cd^{2+}$  的积累及生理响应[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016, (8): 15-19.
- Liu L J, Wang Y, Jin Z M, *et al.* Accumulation of heavy metal cadmium (II) ions by *Herba plantaginis* and its physiological responses [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2016, (8): 15-19.
- [39] 张龙, 张云霞, 宋波, 等. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- Zhang L, Zhang Y X, Song B, *et al.* Potential of accumulation and application of dominant plants in Lanping Lead-zinc mine, Yunnan Province [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- [40] 商侃侃, 张国威, 蒋云. 54 种木本植物对土壤 Cu、Pb、Zn 的提取能力[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(12): 3723-3730.
- Shang K K, Zhang G W, Jiang Y. The phytoextraction ability of 54 woody species on Cu, Pb, Zn in soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(12): 3723-3730.
- [41] 苟体忠, 宋伟, 严红光. 丹寨汞(金)矿区 11 种本地植物的重金属富集特征[J]. 生物学杂志, 2021, **38**(1): 72-76.
- Gou T Z, Song W, Yan H G. Accumulation of heavy metal in 11 native plants growing in mercury (gold)-mining area of Danzhai county [J]. Journal of Biology, 2021, **38**(1): 72-76.
- [42] 罗明, 周妍, 鞠正山, 等. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架[J]. 生态学报, 2019, **39**(23): 8911-8919.
- Luo M, Zhou Y, Ju Z S, *et al.* Technological model and benefit pre-evaluation of eco-environmental rehabilitation engineering of typical mines in the Nanling area of Northern Guangdong Province under the pilot framework of the eco-restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(23): 8911-8919.
- [43] 陈晶, 余振国, 孙晓玲, 等. 基于山水林田湖草统筹视角的矿山生态损害及生态修复指标研究[J]. 环境保护, 2020, **48**(12): 58-63.
- Chen J, Yu Z G, Sun X L, *et al.* Study on ecological damage of mine and the ecological remediation indexes in view of the holistic approach to conserving mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands [J]. Environmental Protection, 2020, **48**(12): 58-63.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China .....                                                             | LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> ( 577 )            |
| Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability .....                                                                                                                        | ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo ( 586 )                          |
| Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou .....                                                           | HUANG Wen, WANG Sheng-li ( 597 )                                       |
| PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models .....                                                                                                              | WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> ( 608 )             |
| Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China .....                                                                  | SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 619 )                |
| Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City .....                                                                         | CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> ( 629 )                    |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province .....                                                                    | LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> ( 639 )     |
| Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019 .....                                                                                                | PAN Chen, KANG Zhi-ming ( 649 )                                        |
| Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model .....                                                                      | GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> ( 663 )           |
| Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 .....                                                                                                | FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> ( 675 )               |
| Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan .....                                                                                              | SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> ( 686 )          |
| Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong .....                                                                    | YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> ( 696 )                 |
| Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass .....                                                     | ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> ( 707 )                |
| Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer .....                                                                             | YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> ( 714 )           |
| Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China .....                                                                                                      | ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> ( 723 )              |
| Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts .....                                                                                                                  | ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> ( 735 )             |
| Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 .....                                                                                   | TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao ( 743 )                        |
| Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China .....                                            | XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun ( 752 )                                 |
| Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake .....                                                                       | XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> ( 762 )        |
| Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events .....                                                                | ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 770 )             |
| Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen .....                                                    | BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> ( 782 )             |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City .....                                                                               | PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )              |
| Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River .....                                                                           | GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> ( 803 )           |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ..... | CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 813 )     |
| Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai .....                                                                                         | YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang .....                                                        | GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> ( 837 )         |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake .....                                                                                                            | LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> ( 847 )          |
| Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake .....                                                                                       | LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> ( 859 )  |
| Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation .....                                                     | WANG Zi-qiao, LI Xu-yong ( 867 )                                       |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic .....                                                                  | ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> ( 878 )           |
| Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration .....                                             | QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> ( 887 )                   |
| Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar .....                                                                                           | CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 896 )                      |
| Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water .....                                                                                       | ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> ( 907 )           |
| Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge .....                                                         | HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> ( 920 )            |
| Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance .....                                                                                       | FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> ( 928 )            |
| Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan .....                                                                                                   | LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> ( 936 )              |
| Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain .....                                                   | ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song ( 946 )                           |
| Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example .....                                        | JU Tie-nan, LEI Mei ( 957 )                                            |
| Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China .....                                                             | MU De-miao, SUN Yue-bing ( 965 )                                       |
| Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area .....                                                        | HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> ( 975 )    |
| Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas .....                                            | ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> ( 985 )          |
| Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years .....                                                                           | REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> ( 995 )         |
| Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth .....                                                                                                   | CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> ( 1004 )                |
| Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments .....                                                         | WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> ( 1015 )           |
| Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation .....                                                              | CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> ( 1023 )          |
| Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat .....                                                              | LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> ( 1031 )       |
| Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers .....                             | YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 1040 )              |
| Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i> .....                          | LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> ( 1050 )      |
| Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas .....                                                            | JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> ( 1059 )            |
| Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils .....                                                                                                 | DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> ( 1069 ) |
| Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil .....                                                                         | HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> ( 1077 )             |
| Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine .....                                                                                            | HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> ( 1089 )                    |
| Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province .....                                                                                               | WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> ( 1097 )                |
| Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta .....                                           | XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> ( 1108 )          |