

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651)	《环境科学》征稿简则 (3718)
信息 (3836, 3885, 3893)	

来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析

秦芙蓉¹, 张仕颖^{1,2}, 夏运生^{1,2*}, 张乃明^{1,2}, 吴程龙¹, 何忠俊¹, 岳献荣¹, 田森林³

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 3. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为了筛选用于锡矿区生态恢复的优势植物, 对云南来利山锡尾矿废弃地进行实地调查, 记录并采集了 15 种优势植物样本及相应根际土壤。测定其铜 (Cu)、镉 (Cd)、砷 (As)、镍 (Ni)、铅 (Pb) 和锡 (Sn) 含量, 计算这 15 种植物对 6 种重金属的转移和富集系数, 同时测定分析了植物根系菌根感染率及根际土壤的化学性质, 综合评估本土植物的应用潜力。结果表明, 废弃地土壤 pH 均值为 3.13, 呈强酸性; 有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮和有效磷均值分别为 6.07 g·kg⁻¹、5.74 g·kg⁻¹、0.62 g·kg⁻¹、8.66 g·kg⁻¹、30.84 mg·kg⁻¹ 和 2.08 mg·kg⁻¹, 养分较贫瘠; 土壤 Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn 含量均值分别为 347.40、1.02、1.34、168.47、25.81 和 2 299.02 mg·kg⁻¹, 其中 Cd 的含量已达到三级污染警戒值, Cu 和 Pb 含量大且空间分布差异大, 呈现 Cu、Pb 和 Cd 复合污染的风险。此外, 木犀榄 (*Olea europaea* L.) 和桉木 (*Eucalyptus japonica* Thunb.) 根系的菌根感染率相对较高, 桉木 (*Alnus cremastogyne* Burk.)、小丝琴竹 [*Bambusa multiplex* (Lour.) Raeusch. ex Schult. ‘Alphonse-Kar’ R. A. Young]、灯心草 (*Juncus effusus* L.) 和莎草 (*Cyperus rotundus* L.) 等对重金属有较强的吸收和转运能力, 其余植物也适应锡尾矿废弃地的生长环境, 具有修复该矿区的潜在价值。

关键词: 锡尾矿废弃地; 本土植物; 筛选; 重金属; 转运与富集

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3963-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009008

Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings

QIN Fu-rong¹, ZHANG Shi-ying^{1,2}, XIA Yun-sheng^{1,2*}, ZHANG Nai-ming^{1,2}, WU Cheng-long¹, HE Zhong-jun¹, YUE Xian-rong¹, TIAN Sen-lin³

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To investigate the dominant plants in ecological restoration of tin mining areas, field investigations were conducted in a tin tailings area in Lailishan, Yunnan Province, and 15 dominant plants and corresponding rhizosphere soils were collected. The plant root mycorrhizal infection rate; the copper (Cu), cadmium (Cd), arsenic (As), nickel (Ni), lead (Pb), and tin (Sn) contents; and the chemical properties of the rhizosphere tailings were determined. The transfer and enrichment coefficients of six heavy metals were calculated for each of the 15 plants to comprehensively evaluate the application potential of native plants. The rhizosphere tailings had an average pH value of 3.13, which was acidic. The organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline hydrolyzed nitrogen, and available phosphorus content of the soils was 6.07 g·kg⁻¹, 5.74 g·kg⁻¹, 0.62 g·kg⁻¹, 8.66 g·kg⁻¹, 30.84 mg·kg⁻¹, and 2.08 mg·kg⁻¹ respectively, indicating relatively nutrient-poor soil. The average Cu, Cd, Ni, Pb, As, and Sn contents of the soils were 347.40, 1.02, 1.34, 168.47, 25.81, and 2 299.02 mg·kg⁻¹, respectively. Among the heavy metals, the Cd content reached a third-level pollution warning value. The soil also contained a large amount of Cu and Pb which exhibited a different spatial distribution. This area appears to have a high risk of Cu, Pb, and Cd pollution. In addition, the roots of *Olea europaea* L. and *Eucalyptus japonica* Thunb. had a high rate of mycorrhizal infection. *Alnus cremastogyne* Burk., *Bambusa multiplex* (Lour.) Raeusch. ex Schult. ‘Alphonse-Kar’ R. A. Young, *Juncus effusus* L., and *Cyperus rotundus* L. var. had a strong ability to absorb and transport heavy metals. The other plants were also adapted to the growth environment of the tin tailings, with the potential to restore the mining area.

Key words: tin tailings wasteland; native plants; select; heavy metals; transport and enrichment

云南省被誉为有色金属王国,其矿产资源非常丰富。来利山锡(Sn)矿是滇西地区著名的锡多金属矿床之一^[1],开发利用锡矿资源促进了当地经济的发展,也会带来较大的生态危害和安全隐患。尾矿废弃地是重金属污染严重的地区之一^[2],国内外学者针对矿区废弃地上的植被进行了诸多调查研究^[3-6],发现了不少耐性本土植物,且本土植物定居

在废弃污染区,可以有效改善土壤酸碱度和土壤结构,提升土壤肥力,从而减少水土侵蚀及污染物的流

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2021-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802603, 2018YFD0800603); 云南省重点研发计划项目(2018BC004-02)

作者简介: 秦芙蓉(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为矿区生态修复, E-mail: 809784674@qq.com

* 通信作者, E-mail: yshengxia@163.com

失. 陆金等^[7]对铜(Cu)、Pb、Zn、Cd、镍(Ni)和Mn含量高的铜陵狮子山尾矿库调查研究,筛选出刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、苦卖菜(*Ixeris polycephala* Cass.)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.)和白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)等可作为潜在的富集植物. 黄建洪等^[8]对来利山锡尾矿废弃地进行针对性调查,发现羽序灯心草(*Juncus ochraceus* Buchenau)可作为潜在先锋植物修复酸性矿山废弃地. 因此,在锡尾矿废弃地寻找更多重金属富集和耐性的优势本土植物具有重要意义.

近年来,前人在矿区及废弃地植被恢复方面也取得了不少成果. 郑国强等^[9]根据云南个旧锡矿区重金属镉(Cd)、锰(Mn)、铅(Pb)、砷(As)和锌(Zn)等不同等级的污染,发现羽叶鬼针草(*Bidens aximawicziana* Oett.)、龙葵(*Solanum nigrum* L.)和宝山堇菜(*Viola baoshnensis*)等可作为恢复利用的优势植物种. 方向京等^[10]对个旧锡矿废弃地植被恢复研究,确定旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)、清香木(*Pistacia weinmannifolia* J. Poisson ex Franch.)及杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliv.)等植物适合用于锡矿山废弃地生态修复的先锋植物. 而菌根真菌作为一类广泛存在于土壤中并与高等植物形成共生关系的真菌,有利于宿主植物多样性的恢复^[11], Zhan等^[12]对个旧锡矿废弃地重金属复合污染土壤进行的修复研究,得出了丛枝菌根能改善污染区常见作物玉米对重金属的耐受性机制,因此废弃地的植物调查研究中对于菌根侵染状况的了解也很重要.

研究区来利山锡尾矿废弃地多数以微细粒锡石的形式存在,且以沙粒和粉粒为主,堆存量较大,部分尾矿废弃地为裸地,不仅造成资源的浪费,而且占据大量的土地. 本文以来利山锡尾矿废弃地为研究对象,通过调查取样,对废弃地的肥力与重金属含量特征,样本植物菌根侵染率及重金属吸收累积等进行分析,评价锡尾矿废弃地本土植物对重金属的吸收转运与富集能力,通过筛选出适应该地区生态恢复的优势植物,以期对锡尾矿废弃地植被恢复与生态重建提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

来利山锡矿位于云南省西部的德宏州梁河县以北,地处三江(金沙江、澜沧江和怒江)构造带南段腾冲地块,属滇西锡成矿带中的腾冲-梁河锡成矿亚带. 采样区属于南亚热带季风气候,年均气温18.3℃,年均降雨1403.8 mm,水热条件优越,有利于植物生长,为植物修复尾矿废弃地提供了良好的

气候条件. 来利山矿体以锡矿为主,海拔在2672.80 m,该矿区多采用露天开采,开采过程中造成的大量废弃采矿场、废土石堆场和尾矿废弃地等,形成了大面积的废弃地,严重破坏当地生态环境.

1.2 样品采集

2019年5月下旬在云南来利山锡尾矿废弃地进行本土植物的实地调查和采样记录,并对植物进行拍照. 在每个样区内随机采集生长期接近、生长旺盛和代表性较好的植物3~5株,采集其地上部和地下部,装入塑料袋保存并记录,同时在植物样品根际采集相应的0~20 cm深度的土壤,约500 g混合成一个土壤样品.

根据来利山锡尾矿废弃地自然生境的植物调查,结合实地采集照片,对照文献[13,14]中国植物图像库(PPBC)等对植物进行植物种名鉴定. 共采集到拔毒散、血菟、桉木、蒲苇、南天竹、木犀榄、桉木、小琴丝竹、杜鹃、蕨、石松、旱柳、灯心草、莎草和藁草等15种植物.

1.3 样品的处理与测定方法

植物样品分为地上部和地下部,先用自来水充分冲洗,再用蒸馏水清洗干净后,晾干水分进行称重,放入纸质信封置于烘箱中在105℃条件下杀青30 min,然后将温度调至75℃烘干至恒重,称取干重. 将烘干后的植物样品进行粉碎研磨、装袋保存,编号待分析测定. 土壤样品剔除石块和植物根系等使其自然风干后磨碎过筛,分别过2、1和0.149 mm筛,再将样品装袋保存和编号待测定.

土壤基本化学性质参照文献[15]. pH采用1:2.5的土水比,酸度计(Starter-3 C,奥豪斯仪器有限公司)测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;采用凯氏定氮法测定全氮,氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定全磷,碱熔-火焰光度计法测定全钾;土壤碱解氮、速效磷和速效钾测定分别采用碱性扩散法、0.5 mol·L⁻¹酸氢钠浸提法和0.1 mol·L⁻¹乙酸铵浸提-火焰光度法. 丛枝菌根染色方法参考文献[16]. 植物样品中重金属含量采用硝酸-高氯酸消解,土壤重金属全量采用盐酸-硝酸-高氯酸消解,消解后的样品采用电感耦合等离子体质谱仪(ICAP RQ和ACJ36)、氢化物原子荧光仪(AFS-8520和ACJ27)测定Cu、As、Ni、Pb、Cd和Sn含量. 为了保证测试分析的可靠性,重金属相关指标检测由中国冶金地质总局昆明地质勘查院完成,分析测试过程中采用空白样、平行双样、国家标准样品进行质量保证和质量控制,采用了国家标准土壤样品(GBW07406 GSS-6)、国家标准植物样品(GBW07603 GSV-2)进行质量控制,对消解及元素

分析过程进行质量控制. 标准物质测定回收率分别为: Cu 97.5% ~ 103.2%、As 85.5% ~ 92.7%、Ni 94.3% ~ 98.3%、Pb 92.6% ~ 105.2%、Cd 87.4% ~ 107.0% 和 Sn 96.3% ~ 103.6%. 整个分析过程所用试剂均为优级纯,测试分析过程用水为去离子水,玻璃器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上后再清洗.

1.4 植物样品的处理和测定

转运系数 (BTF)^[11] = 植物地上部某种元素含量/植物根部该元素含量

富集系数 (BCF)^[11] = 植物体内某种元素含量/土壤中该种元素含量

菌根侵染率 (%)^[16] = (根段中被菌根侵染的长度/检测根段的长度) × 100%

数据整理和作图用 Excel 2019, 数据统计分析用 SPSS 24.0.

2 结果与分析

2.1 锡尾矿废弃地土壤化学性质及重金属含量

表 1 表明, 锡尾矿废弃地土壤 pH 值范围为 2.03 ~ 5.19, 处于酸性水平. 阳离子交换量较低, 均值为 20.74 cmol·kg⁻¹, 在酸性环境下易造成尾矿颗粒表面负电荷减少, 降低对重金属的吸附作用, 增加重金属的迁移性和生物活性^[17]. 此外, 调查区土壤

有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷均值分别为 6.07 g·kg⁻¹、5.74 g·kg⁻¹、0.62 g·kg⁻¹、8.66 g·kg⁻¹、30.84 mg·kg⁻¹ 和 2.08 mg·kg⁻¹, 可见肥力较低. 速效钾范围为 23.76 ~ 584.69 mg·kg⁻¹, 变异系数较大, 有研究表明, 高温多雨且长期的重金属污染会导致钾营养元素的衰退^[18], 当 pH 小于 2.5 时, 土壤中钾元素的流失速率明显增加.

对废弃地土壤重金属含量的调查结果如表 2 所示, 各重金属含量变异系数都在 0.3 以上, 说明该尾矿废弃地重金属含量存在较大空间变异性^[3]. Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn 含量均值分别为 347.40、1.02、1.34、168.47、25.81 和 2 299.02 mg·kg⁻¹, 其中 Cu、Cd、Pb 和 As 的平均含量分别高出云南土壤重金属含量背景值^[19] 的 7.5、4.64、4.15 和 2.3 倍, 参照《土壤环境质量标准》GB 15618-1995, Pb 含量的最大值接近三级污染警戒值, Cu 和 Cd 的含量远超过土壤环境质量二级标准, 且 Cd 的含量已达到三级污染警戒值, Cu 含量的最大值超过土壤环境质量三级标准. 可见 Cu、Pb 和 Cd 是该锡尾矿区废弃地的主要重金属胁迫因子, 会对本地生态环境安全产生影响, 同时对人体健康带来危害, 可以通过添加改良剂或钝化剂来降低重金属的植物有效性^[20].

表 1 锡矿废弃地土壤的基本化学性质 (n = 23)

Table 1 Basic chemical properties of soils from tin wasteland (n = 23)									
指标	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹
最小值	2.03	1.09	4.25	0.06	0.11	0.32	5.28	0.25	23.76
最大值	5.19	10.11	37.00	8.05	0.87	14.96	50.96	10.00	584.69
均值	3.13	6.07	20.74	5.74	0.62	8.66	30.84	2.08	107.18
变异系数 (CV)	0.15	0.53	0.43	0.04	0.34	0.86	0.46	0.47	0.85

表 2 锡矿废弃地土壤的重金属全量¹⁾ (n = 23)

Table 2 Total heavy metal contents of soils from tin wasteland (n = 23)						
指标	重金属含量/mg·kg ⁻¹					
	Cu	Cd	Ni	Pb	As	Sn
最大值	556.20	2.01	2.3	486	36.1	8 866.14
最小值	108.01	0.56	0.4	39.5	6.13	416.20
平均值	347.40	1.02	1.34	168.47	25.81	2 299.02
变异系数 (CV)	0.35	0.43	0.29	0.55	0.38	0.83
云南省背景值	46.30	0.22	42.50	40.60	18.40	—
土壤环境质量标准 (二级)	50	0.3	40	250	40	—
土壤环境质量标准 (三级)	400	1	200	500	40	—

1) “—”表示标准未规定.

2.2 锡尾矿废弃地优势植物种类

通过对来利山锡尾矿废弃地自然定居的本土植物调查, 共采集记录了 15 种优势本土植物, 分属 12 科, 15 属. 其中禾本科 2 种 (占 13.3%); 莎草科 2 种 (占 13.3%); 锦葵科、苋科、桦木科、小檗科、木

犀科、山茶科、杜鹃花科、蕨科、石松科、杨柳科和灯心草科各一种, 分别占 6.7%. 结合表 3, 以优势种与常见种居多, 少部分为偶见种. 所采集的植物大都以草本植物为主, 这与草本植物生长快、分布广、相对较易形成植物的重金属耐性有关^[19].

表 3 来利山锡尾矿区本土植物调查¹⁾
Table 3 Plant survey of tin tailings area in Lailishan

植物名称	科	属	生活型	丰富度
拔毒散(<i>Sida szechuensis</i> Matsuda)	锦葵科	黄花稔属	Ⅲ	F
血苋(<i>Iresine herbstii</i> Hook. ex Lindl.)	苋科	红叶苋属	Ⅱ	O
桤木(<i>Alnus cremastogyne</i> Burk.)	桦木科	桤木属	V	D
蒲苇(<i>Cortaderia selloana</i>)	禾本科	蒲苇属	Ⅱ	O
小琴丝竹(<i>Bambusa multiplex</i> (Lour.) Raeusch. ex Schult. 'Alphonse-Kar' R. A. Young)	禾本科	簕竹属	Ⅲ	F
南天竹(<i>Nandina domestica</i> Thunb.)	小檗科	南天竹属	Ⅲ	O
木犀榄(<i>Olea europaea</i> L.)	木犀科	木犀榄属	Ⅳ	O
柃木(<i>Eurya japonica</i> Thunb)	山茶科	柃木属	Ⅲ	F
杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i> Planch.)	杜鹃花科	杜鹃属	Ⅳ	D
蕨类(<i>Pteridophyta</i>)	蕨科	蕨属	I	F
石松(<i>Lycopodium japonicum</i> Thunb. ex Murray)	石松科	石松属	Ⅱ	F
旱柳(<i>Salix matsudana</i> Koidz.)	杨柳科	柳属	Ⅳ	F
灯心草(<i>Juncus effusus</i> L.)	灯心草科	灯心草属	Ⅱ	D
莎草(<i>Cyperus rotundus</i> L.)	莎草科	莎草属	Ⅱ	F
藎草(<i>Carex</i> spp.)	莎草科	藎草属	Ⅱ	O

1) I 表示一年生或两年生草本;Ⅱ表示多年生草本;Ⅲ表示灌木;Ⅳ表示小乔木;V表示乔木;D表示优势种;F表示常见种;O表示偶尔见种

分析表 3 的调查结果,来利山锡尾矿废弃地调查区植物群落目前多草本,灌木乔木种类少且单一,尚未大面积进入自然演替,主要是因为来利山锡尾矿废弃地受人为影响频繁,本土植物当中,桤木(*Alnus cremastogyne* Burk.)、小琴丝竹[*Bambusa multiplex* (Lour.) Raeusch. ex Schult. 'Alphonse-Kar' R. A. Young]、灯心草(*Juncus effusus* L.)、莎草(*Cyperus rotundus* L.)和藎草(*Carex* spp.)等本土植物分布范围较广、适应能力较强且数量较多并形成局部小群落,为主要植物种群,对尾矿中重金属元素含量较高、强酸性、养分弱且分布不平衡等不良因子^[11]具有较好的适应性,在生态恢复过程中可考虑将其作为来利山锡尾矿废弃地自然生态恢复的先鋒植物。

2.3 锡尾矿废弃地优势植物重金属累积与菌根感染状况

为了定量研究来利山锡尾矿废弃地调查区植物对 Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn 吸收情况及积累潜力,寻找该矿区生物量大、重金属耐性强并且具有一定富集能力的植物,本次调查对采集的植物体内重金属含量进行了分析.从表 4 中可以看出,15 种本土植物对重金属的吸收各有不同,其地上部重金属含量范围为:Cu 4.75~12.04、Cd 0.16~0.84、Ni 0.3~7.6、Pb 0.05~4.67、As 0.05~1.07 和 Sn 0.03~0.78 mg·kg⁻¹,植物地下部 Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn 重金属含量范围分别为:6.49~23.87、0.34~1.3、1.2~10.5、0.64~23.57、0.23~2.76 和 0.21~3.43 mg·kg⁻¹.其中植株内的 Cu、Cd、Pb 和

Sn 含量变化较大,Ni 和 As 含量变化相对较小,总体可以看出各植物地下部重金属含量均高于地上部,李俊凯等^[21]和吴劲楠等^[22]也得出了类似的结论.

植物体内重金属含量最高的是 Cu,然后依次是 Pb、As、Ni 和 Cd,同尾矿中的重金属含量高低大体一致,与王洋洋等^[3]和张龙等^[23]的研究结果相似.锡在尾矿中含量高而在植物体内含量偏少,与锡是一种过渡金属且在自然界中主要以氧化物 SnO₂ 的形式存在于锡石中有关^[24],表明植物对重金属元素的吸收不仅受尾矿重金属含量的影响,植物特性和土壤属性等都影响着植物对土壤重金属的富集能力^[25].

有研究表明,丛枝菌根真菌的侵染率一般与土壤的养分密切相关,且能促进植物降解有机污染物和解除重金属毒性等^[26~28].从表 4 中可以看出,丛枝菌根真菌对 15 种不同植物的侵染情况各有不同.自然条件下,木犀榄(*Olea europaea* L.)、柃木(*Eurya japonica* Thunb)分别和丛枝菌根真菌形成共生关系的能力较强,是锡尾矿废弃地的优势丛枝菌根真菌宿主植物.

2.4 锡尾矿废弃地优势植物对重金属的转运与富集特征

植物根系吸收重金属元素后向地上部分转移,这种转移重金属元素的能力用生物转运系数来衡量,转运系数值越高,说明植物转移重金属的能力越强^[29].由图 1 中可以看出,来利山锡尾矿废弃地灯心草、莎草和藎草对 Cu 的转运系数大于 1,杜鹃和

铃木对 Cu 的转运系数分别为 0.49 和 0.36,转运能力较弱. 桫木、木犀榄和小丝琴竹对 Cd 的转运系数分别为 1.29、1.46 和 1.04,对 Cd 有较强的转运能力. 对 Ni 有较强转运能力的本土植物有拔毒散、桫木、蒲苇和小丝琴竹,转运系数均大于 1. 灯心草对 As 的转运系数为 1.81,说明对 As 有较强的转运能力. 小丝琴竹和石松对 Sn 有较强的转运能力,转运系数分别为 2.67 和 1.09. 所采集的本土植物 Pb 转运能力均小于 1,说明其主要累积在根部. 整体表现为同一重金属在不同植物中的转运系数或不同重金属在同一植物中的转运系数存在较大差异,本研究结果与张鹏等^[30]和吴双桃等^[31]的基本一致.

表 4 植物体内重金属及菌根侵染率
Table 4 Concentration of heavy metals and mycorrhiza in plants

植物种类	部位	重金属含量/mg·kg ⁻¹						菌根侵染率/%
		Cu	Cd	Ni	Pb	As	Sn	
拔毒散	地上部	5.32	0.23	3.7	1.13	0.60	0.50	24.6
	地下部	7.12	0.41	3.2	12.63	0.75	3.31	
血菟	地上部	4.75	0.7	2.1	0.36	0.32	0.19	10.8
	地下部	8.08	1.3	5.6	5.53	2.76	2.47	
桫木	地上部	4.93	0.84	3.9	4.67	0.31	0.78	8.0
	地下部	6.49	1.2	2.8	23.57	1.32	2.32	
蒲苇	地上部	11.52	0.22	7.6	0.11	0.87	0.18	17.0
	地下部	12.52	0.39	2.2	1.90	2.21	0.52	
南天竹	地上部	6.62	0.16	2.2	0.34	0.37	0.40	26.3
	地下部	12.62	0.34	4.8	1.89	1.13	0.99	
木犀榄	地上部	8.39	0.79	4.7	0.39	0.32	0.14	37.0
	地下部	16.85	0.54	5.5	17.41	1.66	0.99	
铃木	地上部	5.19	0.84	1.7	0.15	0.16	0.06	33.5
	地下部	14.38	0.98	3.9	0.68	0.23	0.21	
小丝琴竹	地上部	11.68	0.55	2.4	0.29	0.29	0.32	27.4
	地下部	14.29	0.53	1.5	0.64	0.79	0.12	
杜鹃	地上部	11.62	0.41	0.7	0.05	0.32	0.08	22.4
	地下部	23.87	0.60	1.2	0.79	0.57	0.23	
蕨	地上部	8.85	0.21	0.9	0.21	0.54	0.06	29.5
	地下部	9.53	0.57	2.2	19.42	2.15	2.08	
石松	地上部	5.25	0.44	0.3	0.20	0.50	0.24	16.5
	地下部	9.37	0.53	1.4	14.29	0.65	0.22	
旱柳	地上部	8.63	0.54	2.5	0.32	0.17	0.03	17.8
	地下部	9.80	0.66	3.4	5.30	0.56	0.18	
灯心草	地上部	12.04	0.72	2.1	0.39	1.07	0.09	17.3
	地下部	9.40	0.86	10.5	15.11	0.59	3.43	
莎草	地上部	9.94	0.42	2.9	0.23	0.05	0.32	21.5
	地下部	9.49	0.53	10.3	0.65	0.37	0.72	
藁草	地上部	11.28	0.31	5.8	0.64	0.66	0.20	22.0
	地下部	10.31	0.45	9.8	9.02	0.74	1.36	

富集系数是衡量植物修复重金属的积累能力和修复潜力大小的重要指标^[32],富集系数越高,表明重金属越容易从土壤进入植物体内. 锡尾矿废弃地调查区多草本植物,有研究得出: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^[33]. 对木本植物而言,当富集系数小于 0.2,说明植物对重金属的修复能力较弱;富集系数在 0.2~0.4 之间,对重金属有一定的积累修复能力;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. 结合植物的种类,从图 2 来看,15 种本土植物对 Cu、Pb、As 和 Sn 的富集能力较弱. 血菟、桫木、木犀榄、小琴丝竹、杜鹃、石松、旱柳和莎草对 Cd 的富集系数分别达到了 1、2.6、1.87、1.04、1.26、1.07、1.41 和 1.2,说明这些植物对 Cd 有较强的富集能力. 铃木、蕨、石松、旱柳、灯心草和藁草对 Ni 的富集能力均大于 1,对 Ni 有着较好的富集能力. 灯心草对 As 的富集系数达到

1.81,说明灯心草对 As 有较强的富集能力. 拔毒散对 Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn 的富集系数均小于 0.1,说明不易从尾矿中吸收 Cu、Cd、Ni、Pb、As 和 Sn.

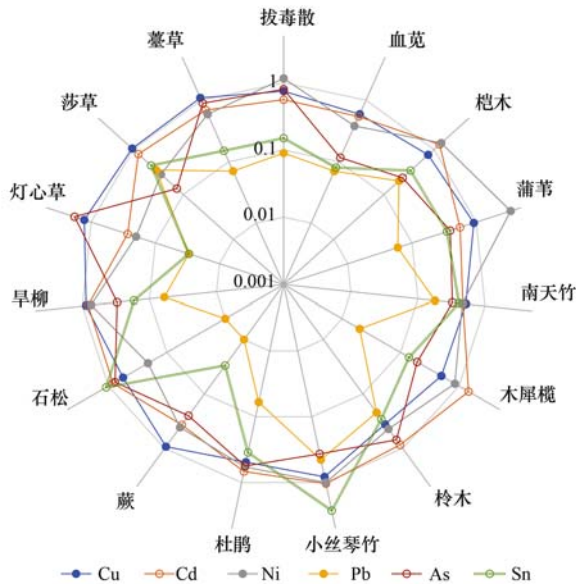


图1 植物对重金属的转运系数

Fig. 1 Transportation factors (TF) of heavy metals in plants

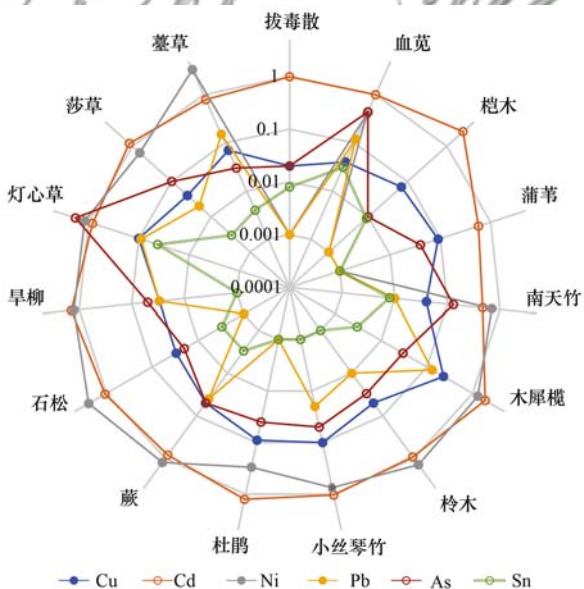


图2 植物对重金属的富集系数

Fig. 2 Bioaccumulation factors (BCF) of heavy metals in plants

3 讨论

锡尾矿废弃地土壤呈酸性,有机质含量极低且植物生长必需的养分(氮、磷)严重缺乏,再加上多种重金属含量高,研究区域植物群落的自我更新能力远跟不上破坏程度,植被自然恢复相当缓慢.且酸化的尾矿明显增加矿区土壤中重金属的潜在危害^[34~36]及营养元素的缺乏.有研究表明,植被建立可以有效防止尾矿废弃地酸化^[37].

在锡尾矿废弃地生长的植物能够自然生存并占据优势,表示本土植物本身具备极强的环境适应能力.本调查的锡尾矿上 15 种植物生长状况良好,从它们对 6 金属的转运和富集能力可以看出,大部分植物重金属主要积累在根部.植物对重金属的富集能力与植物特性和土壤理化性质等有关,导致金属尾矿上同种植物对不同重金属的吸收累积会因为植物本身的特性而不同.同一植物不同部位吸收重金属的能力也具有一定的差异,因此生长在尾矿上的耐性植物分为富集型、根部囤积型和规避型^[38].本研究中桉木、小丝琴竹和灯心草均表现出 2 种或以上重金属含量以地上部含量高于根系,可以作为潜在的富集植物考虑.灯心草对重金属的吸收转运情况与黄建洪等^[8]的研究结果一致.拔毒散、蒲苇、木犀榄和桫欏吸收的重金属主要累积在根部,提高自身耐性,属于根部囤积型植物.血苋、南天竹、蕨和杜鹃植株内的重金属含量相对较低,且重金属富集和转运能力较差,但能在重金属含量较高的环境中生长,属于规避型植物.

有研究表明^[11,12,28],丛枝菌根真菌可以促进植物对逆境土壤中氮、磷和钾等元素的吸收,改善植物营养,降低土壤重金属的生物有效性,从而提高植物的重金属耐受性.然而矿区开采对土壤的扰动将直接影响丛枝菌根真菌的生长、繁殖,降低其对宿主植物的侵染能力^[39].锡矿区生态恢复一般先要恢复其自然生态功能,然后恢复结构完整性,最后恢复其可持续性.因此,建议选择适宜的乔灌木及其配置方法结合菌根生物技术来实现锡矿山的系统性生态恢复.

4 结论

(1)来利山锡尾矿废弃地土壤 pH 范围在 2.03~5.19,呈酸性,且有机质、养分含量均处于较低水平,并存在 Cu、Pb 和 Cd 元素的复合污染风险.

(2)生长在锡尾矿废弃地上的 15 种本土植物均能适应矿区的贫瘠环境,对重金属表现出一定的耐性,桉木、小丝琴竹、灯心草和莎草具有修复该矿区的潜在价值,拔毒散、蒲苇、木犀榄和桫欏属于根部囤积型植物,血苋、南天竹、蕨和杜鹃属于规避型植物.本研究中,木犀榄、桫欏与丛枝菌根真菌之间建立的互惠互利共生关系,有助于植物在矿区植被生态修复中发挥重要作用.

(3)锡尾矿区多草本和少量的灌木乔木,调查采样时容易忽略群落演替过程中的植物.为避免这些问题,应以本土植物为主结合盆栽模拟试验和小区试验进一步进行乔-灌-草优势组合筛选研究,提

高植被恢复系统的稳定性。

(4) 现有研究多集中于铅锌矿、铜矿、煤矿、锰矿和铁矿等, 对其他矿区尤其是锡矿区调查报道较少, 本研究可为锡矿区开展污染土壤的植物修复提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] Wu H Y, Deng J, Wang Q F, *et al.* SIMS U-Pb zircon geochronological and geochemical study of the Sn deposits in Tengchong, north of the Southeast Asian metallogenic belt: Implications for the timing of mineralization and ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, **111**, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.102954.
- [2] 张弘, 申俊峰, 董国臣, 等. 云南来利山锡矿锡石标型特征及其找矿意义[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(6): 888-897.
Zhang H, Shen J F, Dong G C, *et al.* The study on the typomorphic characteristics of cassiterite of Lailishan tin deposit in Yunnan province and its prospecting significance[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, **55**(6): 888-897.
- [3] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 437-444.
Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [4] Lv J S, Xia Q, Yan T, *et al.* Identifying the sources, spatial distributions, and pollution status of heavy metals in soils from the southern coast of Laizhou Bay, eastern China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(8): 1953-1967.
- [5] 陈清宜, 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.
- [6] Zhan F D, He Y M, Zu Y Q, *et al.* Heavy metal and sulfur concentrations and mycorrhizal colonizing status of plants from abandoned lead/zinc mine land in Gejiu, Southwest China[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2013, **7**(30): 3943-3952.
- [7] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边 17 种乡土植物重金属含量及富集特征[J]. *环境化学*, 2019, **38**(1): 78-86.
Lu J, Zhao X Q, Huang J, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of 17 species indigenous plants in the tailing surrounding in Shizishan, Tongling[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(1): 78-86.
- [8] 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.
- [9] 郑国强, 方向京, 张洪江, 等. 云南省个旧锡矿区重金属污染评价及植被恢复初探[J]. *水土保持通报*, 2009, **29**(6): 208-212, 231.
Zheng G Q, Fang X J, Zhang H J, *et al.* Heavy Metal pollution and vegetation restoration in Gejiu tin deposit in Yunnan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **29**(6): 208-212, 231.
- [10] 方向京, 王伟, 张洪江, 等. 云南省个旧锡矿山废弃地植被恢复技术[J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(6): 40-45.
Fang X J, Wang W, Zhang H J, *et al.* Vegetation restoration technique of mining wasteland in Gejiu Stannary of Yunnan Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, **7**(6): 40-45.
- [11] Brundrett M C. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis[J]. *Plant and Soil*, 2009, **320**(1-2): 37-77.
- [12] Zhan F D, Li B, Jiang M, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi enhance antioxidant defense in the leaves and the retention of heavy metals in the roots of maize[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(24): 24338-24347.
- [13] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 杨利民. 植物资源学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, **55**(1): 158-161.
- [17] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
- [18] 郭朝晖, 朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. *生态环境*, 2004, **13**(4): 553-555.
Guo Z H, Zhu Y G. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent districts[J]. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(4): 553-555.
- [19] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(9): 1260-1266.
- [20] 翁瑕, 龙海洋, 杨昕蒙, 等. 联合改良剂对桉树吸收重金属的作用——以矿区土壤中 Cd、Zn 和 Cu 为例[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3911-3918.
Weng X, Long H Y, Yang X M, *et al.* Effects of combined amendments on the absorption of heavy metals by *Eucalyptus*—taking Cd, Zn and Cu of mine soils as example [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3911-3918.
- [21] 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.
- [22] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1054-

- 1063.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- [23] 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.
- [24] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 2021-2027.
- Shi X, Chen Y T, Wang S F, *et al.* Pb, Zn accumulation and nutrient uptake of 15 plant species grown in abandoned mine tailings[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, **33**(6): 2021-2027.
- [25] 李凤梅, 杨胜香, 曹建兵, 等. 湘西典型锰渣库主要优势植物种类及重金属耐性特征[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2017, **34**(4): 107-113.
- Li F M, Yang S X, Cao J B, *et al.* Species and heavy Metal tolerance of main dominant plants in manganese mine tailings, Xiangxi[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, **34**(4): 107-113.
- [26] Weyens N, Thijs S, Popek R, *et al.* The role of plant-microbe interactions and their exploitation for phytoremediation of air pollutants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, **16**(10): 25576-25604.
- [27] Gadd G M. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation[J]. *Microbiology*, 2010, **156**(3): 609-643.
- [28] 李少朋, 毕银丽, 孔维平, 等. 丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4455-4459.
- Li S P, Bi Y L, Kong W P, *et al.* Effects of the arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4455-4459.
- [29] Li N Y, Guo B, Li H, *et al.* Effects of double harvesting on heavy metal uptake by six forage species and the potential for phytoextraction in field[J]. *Pedosphere*, 2016, **26**(5): 717-724.
- [30] 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.
- [31] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. *生态环境*, 2004, **13**(2): 156-157, 160.
- Wu S T, Wu X F, Hu Y L, *et al.* Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators[J]. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(2): 156-157, 160.
- [32] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 等. 铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- Zhu G X, Xiao H Y, Guo Q J, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of heavy metals in three types of compositae plants from lead-zinc tailings area[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- [33] 吴汉福, 田玲, 翁贵英, 等. 煤矸石山优势植物对重金属吸收及富集特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(2): 317-322.
- Wu H F, Tian L, Weng G Y, *et al.* Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant plants species settled naturally on coal gangue pile[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(2): 317-322.
- [34] Gil-Loaiza J, White S A, Root R A, *et al.* Phytostabilization of mine tailings using compost-assisted direct planting: Translating greenhouse results to the field[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 451-461.
- [35] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.
- [36] Chen Z B, Hu S S. Heavy metals distribution and their bioavailability in earthworm assistant sludge treatment wetland[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **366**: 615-623.
- [37] Mohamed I, Zhang G S, Li Z G, *et al.* Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **84**: 67-76.
- [38] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- Huang X J, Jiang C S, Hao Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- [39] Camenzind T, Hempel S, Homeier J, *et al.* Nitrogen and phosphorus additions impact arbuscular mycorrhizal abundance and molecular diversity in a tropical montane forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(12): 3646-3659.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)