

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响

彭禧柱¹, 杨胜香^{1*}, 李凤梅¹, 曹建兵², 彭清静¹

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 锰锌矿业重金属污染综合防治技术湖南省工程实验室, 湖南省 2011 计划“锰锌钒产业技术”协同创新中心, 吉首 416000; 2. 湘西州花垣县环境保护局, 花垣 416000)

摘要: 开展野外田间试验, 在铅锌尾矿中添加 3 种工业有机废物(酒糟、中药渣、蘑菇渣)作为改良剂, 从植物生长、营养元素、土壤酶活性、尾矿及植物重金属含量等方面研究其对铅锌尾矿的改良效果。结果表明: ① 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣处理后尾矿中 DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb 和 DTPA-Zn 含量分别降低了 24.2%~27.3%、45.7%~48.3%、18.0%~20.9% 和 10.1%~14.2%; 有机质、铵态氮、有效磷含量分别增加了 2.27~2.32 倍、12.4~12.8 倍和 4.04~4.74 倍; 土壤脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶活性分别提高了 5.51~6.37 倍、1.72~1.96 倍、6.32~6.62 倍和 2.35~2.62 倍。② 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣促进了植物种子萌发和种苗生长, 植被盖度分别到达了 84%、79% 和 86%; 其中, 黑麦草的生物量增加了 4.2~5.6 倍, 狗牙根的生物量增加了 15.7~17.3 倍; 黑麦草和狗牙根地上部分重金属含量均显著降低。③ 植被盖度、生物量与尾矿基质营养元素和土壤酶活性呈极显著正相关, 与尾矿重金属有效态含量呈极显著负相关; 植物地上部分重金属含量与尾矿基质营养元素、土壤酶活性呈极显著负相关, 与尾矿基质重金属有效态含量呈极显著正相关。综合分析表明, 可以将酒糟、中药渣、蘑菇渣作为改良剂用于铅锌尾矿废弃地的生态恢复。

关键词: 铅锌尾矿; 工业有机废弃物; 基质改良; 生物化学性质; 植物生长

中图分类号: X171.5; X753 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0301-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.039

Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings

PENG Xi-zhu¹, YANG Sheng-xiang^{1*}, LI Feng-mei¹, CAO Jian-bing², PENG Qing-jing¹

(1. Hunan Provincial Engineering Laboratory of Control and Remediation of Heavy Metal Pollution from Mn-Zn Mining and the Collaborative Innovation Center of Manganese-Zinc-Vanadium Industrial Technology (the 2011 Plan of Hunan Province), College of Bio-resources and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China; 2. Huayuan Environmental Protection Bureau, Huayuan 416000, China)

Abstract: A field trial was conducted in an abandoned Pb/Zn mine tailings to evaluate the effectiveness of three industrial wastes [sweet sorghum vinasse (SSV), medicinal herb residues (MHR) and spent mushroom compost (SMC)] as organic amendments on plant growth, soil nutrients and enzyme activities, and heavy metal concentrations in plant tissues and the mine tailings. The main findings were as follows: ① The mean concentrations of diethylene-triamine-pentaacetic acid (DTPA)-extractable Cd, Cu, Pb and Zn in SSV, MHR and SMC treatments decreased by 24.2%-27.3%, 45.7%-48.3%, 18.0%-20.9% and 10.1%-14.2% as compared to the control tailings. When compared to the control tailings, the mean values of organic matter, ammonium-N and available P in SSV, MHR and SMC treatments increased by 2.27-2.32, 12.4-12.8 and 4.04-4.74 times, respectively. Similarly, the addition of SSV, MHR and SMC significantly enhanced soil enzyme activities (dehydrogenase, β -glucosidase, urease and phosphatase), being 5.51-6.37, 1.72-1.96, 6.32-6.62 and 2.35-2.62 times higher than those in the control tailings. ② The application of these wastes promoted seed germination and seedling growth. The vegetation cover reached 84%, 79% and 86% at SSV, MHR and SMC subplots. For *Lolium perenne* and *Cynodon dactylon*, the addition of SSV, MHR and SMC led to significant increases in the shoot biomass yields with 4.2-5.6 and 15.7-17.3 times greater than those in the tailings. Moreover, the addition of SSV, MHR and SMC significantly reduced the concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the shoots of *L. perenne* and *C. dactylon* in comparison with the control tailings. ③ Pearson's correlation coefficients showed that the vegetation cover and biomass were positively correlated with soil nutrient elements and enzyme activities. Significant negative correlations were observed between DTPA-extractable metal concentrations and vegetation cover and biomass. The metal concentrations in plants were positively correlated with soil DTPA-extractable metal concentrations and negatively correlated with soil nutrient elements and enzyme activities. The results obtained in this field study confirmed that the three

收稿日期: 2015-07-04; 修订日期: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561076, 41471257, 21266008); 湖南省高校科技创新团队支持计划项目; 湖南省研究生培养创新基地项目(201501); 吉首大学校级科研项目(15JDY022)

作者简介: 彭禧柱(1987~)男, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染治理与生态恢复, E-mail: 50051613@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: yangsx1998@163.com

organic-rich industrial wastes could be used as amendments for aided phytostabilization of some types of mine tailings.

Key words: Pb/Zn mine tailings; organic industrial wastes; amelioration; biochemical properties; plant growth

矿产资源的开发在给人类带来巨大经济利益的同时,也产生了大量的尾矿。通常情况下,每处理 1 t 矿石产生 0.5 ~ 0.95 t 的尾矿^[1]。尾矿排出后一般堆放在尾矿库内,我国现有尾矿库约 12 718 座,总库容量达 500 亿 m³^[2]。随着采选矿技术的日益提高,矿石可开采的品位相应降低,尾矿的产生量也在逐年增加。截止 2010 年,我国尾矿总堆积量高达 80 余亿 t,且每年以 8 ~ 10 亿 t 的排放量递增^[3]。我国重金属尾矿占地面积巨大,不仅自身重金属污染情况严重,也是严重且持久的重金属污染源。

尾矿治理是矿山重金属污染治理和生态环境保护所面临的紧迫任务,对尾矿进行生态修复可以起到控制污染、改善景观、减轻污染对人类的健康威胁^[4]。基于植被重建的尾矿原位稳定技术因经济、环保、易实施等特点,在世界范围内得到了广泛的认可。然而对植物来讲,尾矿是一个非常恶劣的生长环境,存在许多限制植物生长的因素。主要表现在物理结构不良、持水保肥能力差、重金属含量高、有机质及大量营养元素(如 N、P)缺乏等^[5,6]。因此,通常的做法是在重金属尾矿中添加改良剂,降低尾矿基质的重金属毒性、改善物理结构、提高有机质及营养元素含量,有利于植物的定居和生长。

各种各样的材料,如石灰、沸石、粉煤灰、赤泥、禽畜类粪便、污水污泥、作物秸秆等被作为改良剂,用于重金属尾矿恢复植被时的基质改良^[7~9]。其中,有机质丰富的材料备受欢迎,它们可以提供大量营养元素,缓解重金属毒性,改善尾矿的理化性质、促进尾矿土壤的熟化过程和植物的生长^[10]。张宏等^[11]在铜尾矿中添加腐熟鸡粪作为改良剂,研究了不同比例腐熟鸡粪改良铜尾矿后对尾矿基质生物化学性质及 3 种豆科植物决明(*Cassia tora*)、田菁(*Sesbania cannabina*)、菽麻(*Crotalaria juncea*)生长的影响。结果表明,在铜尾矿基质中添加鸡粪改良后大大降低了尾矿基质中有效态 Cu、Zn 含量,显著提高了土壤微生物量 C、脲酶和脱氢酶的活性,促进了 3 种豆科植物的生长。Chiu 等^[12]分别在铅锌尾矿和铜尾矿中添加粪肥和生活污泥作为改良剂,种植耐性植物香根草(*Vetiveria zizanioides*)和大棕叶芦(*Phragmites australis*),结果发现,改良处理后明显减少了铅锌尾矿中有效态 Pb、Zn 含量和铜尾矿中有效态 Cu 含量,增加了两种尾矿基质 N、P 的积

累,促进了植物生长。最近,许多研究将一些工业有机废弃物作为改良剂,用于重金属污染土壤的生态修复^[13,14]。酒糟、中药渣、蘑菇渣是我国各地普遍存在的工业有机废弃物,产出量大,有机质及营养丰富。目前国内外对这些废弃物的综合利用主要集中在饲料、有机肥料、生物燃料、园艺栽培、生产沼气等方面^[15~17],利用这类有机废弃物作为改良剂用于环境污染修复的报道很少。笔者前期的盆栽实验研究表明,酒糟、中药渣、蘑菇渣在降低重金属含量、提高营养成分、恢复土壤的生态功能等方面具有较大的潜力^[18,19]。然而,目前改良修复的研究多数处在室内盆栽实验阶段,室内或温室条件下的研究结果不能很好地反映田间修复的实际。本研究选取湖南湘西典型铅锌尾矿库废弃地作为实验地,选用当地工业衍生的有机废弃物酒糟、中药渣、蘑菇渣作为改良剂,通过田间实验对铅锌尾矿库开展植被重建,种植耐性植物黑麦草(*Lolium perenne*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和野菊(*Dendranthema indicum*),探讨酒糟、中药渣、蘑菇渣作为尾矿改良剂的可行性,以期工业有机废弃物的合理利用寻找途径,为尾矿库废弃地生态修复提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在湖南湘西自治州太丰矿业集团铅锌尾矿库进行(109°11' ~ 110°55' E, 27°44' ~ 29°47' N)。湘西自治州地处湖南省西北部,湘、渝、黔边陲,境内具有丰富的矿产资源和植物资源,铅锌矿、锰矿储量分别居全省第一位和全国第二位,素有“有色金属之乡”的美称^[20]。该地区为丘陵地带,属中亚热带山地气候,原始植被为中亚热带典型山地植被,年平均气温 16.7℃,年平均降雨量 1 421 mm,无霜期 270 d。尾矿的基本理化性质为:弱碱性,pH 值为 8.5 左右;Cd、Pb、Zn 含量较高,均值分别为 37、713 和 2 652 mg·kg⁻¹;肥力差,有机质、总氮、总磷含量分别为 2.8 g·kg⁻¹、0.04 mg·kg⁻¹ 和 12 mg·kg⁻¹;土质疏松(黏粒 13%、壤粒 22%、沙粒 65%),未形成团粒结构,植被无法定居而处于裸露状态(表 1)。

1.2 实验设计

2012 年 3 月在尾矿库中间位置建立了 600 m² 的实验样地, 将实验样地 (20 m × 30 m) 分割成 20 个 2 m × 2 m 实验小区, 分别添加当地工业有机废弃物酒糟、中药渣、蘑菇渣作为改良剂 (酒糟取自湘泉酒厂、中药渣取自湘泉制药厂、蘑菇渣取自湘西蘑菇种植场), 改良剂的添加量为 30 t·hm⁻², 没有添加改良剂的处理和添加正常土的处理 (30 t·hm⁻²) 作为对照。本实验中, 添加正常土作为对

照主要原因是当地居民采用覆土的方式对尾矿废弃地进行治理。改良剂的基本理化性质见表 1。实验小区采用随机区组设计, 每个处理 4 个重复。将改良剂均匀平铺在实验小区地表, 用铁铲将实验小区尾矿基质铲松, 与 0 ~ 20 cm 尾矿混匀。在每个实验小区内混合种植黑麦草、狗牙根、紫花苜蓿和野菊。黑麦草、狗牙根和紫花苜蓿的播种量为 5 g·m⁻², 野菊花的播种量为 2.5 g·m⁻², 播种方式为撒播。

表 1 尾矿与改良剂的基本理化性质 (mean ± SE, n = 5)

Table 1 General physico-chemical properties of the mine tailings and amendments used in the study (mean ± SE, n = 5)

参数	尾矿	正常土	酒糟	中药渣	蘑菇渣
pH	8.48 ± 0.09	5.31 ± 0.09	6.42 ± 0.04	5.01 ± 0.03	6.54 ± 0.35
电导率 EC/dS·m ⁻¹	1.67 ± 0.14	0.12 ± 0.01	3.93 ± 0.71	3.22 ± 0.36	2.64 ± 0.14
有机质/g·kg ⁻¹	2.85 ± 0.17	8.93 ± 0.31	769.86 ± 7.43	831.25 ± 10.40	510.09 ± 40.28
总氮/mg·kg ⁻¹	0.04 ± 0.01	0.22 ± 0.03	1.14 ± 0.12	0.38 ± 0.01	0.77 ± 0.10
总磷/mg·kg ⁻¹	12.12 ± 2.34	29.27 ± 2.52	904.65 ± 88.44	636.63 ± 109.87	710.95 ± 72.23
总钾/mg·kg ⁻¹	454.87 ± 23.67	852.19 ± 38.24	2 737.12 ± 268.76	2 061.31 ± 151.44	1 432.48 ± 188.42
Cd/mg·kg ⁻¹	37.37 ± 0.38	0.32 ± 0.02	0.29 ± 0.08	0.44 ± 0.05	0.68 ± 0.05
Cu/mg·kg ⁻¹	11.46 ± 0.64	6.40 ± 0.54	7.22 ± 0.36	8.94 ± 0.60	7.65 ± 0.69
Cr/mg·kg ⁻¹	22.31 ± 0.42	6.71 ± 0.33	5.84 ± 0.18	9.28 ± 0.51	8.63 ± 0.36
Mn/mg·kg ⁻¹	388.76 ± 51.58	136.45 ± 29.46	105.89 ± 50.37	98.21 ± 24.12	105.21 ± 37.32
Pb/mg·kg ⁻¹	712.63 ± 53.75	19.17 ± 6.61	3.14 ± 0.30	3.20 ± 0.06	6.29 ± 0.90
Zn/mg·kg ⁻¹	2 652.19 ± 228.43	145.21 ± 26.42	65.46 ± 3.84	124.76 ± 15.33	119.58 ± 27.21

1.3 样品采集与分析

2012 年 10 月对实验小区进行植被调查和样品采集。采用目测法记录每个实验小区的植被覆盖度。在每个实验小区内设置一个 0.5 m × 2 m 的小样方, 剪取距地面 5 cm 的植物地上部分进行生物量和重金属含量测定 (为了避免破坏植被, 本实验没有对植物根进行分析)。在每个实验小区内按梅花布点法采集 5 个土样混为一个样, 采集深度 0 ~ 30 cm, 采集量 1 kg 左右, 装入塑料密封袋, 立即运回实验室。在实验室内采用四分法分成两份, 一份储存于 4℃ 用于土壤酶活性分析; 一份在室温下自然风干, 用于土壤理化性质及重金属含量分析。

尾矿的基本生物化学性质测定: pH 值采用电位法 (土: 水 = 1: 2.5, 质量比); 电导率采用电导法 (土: 水 = 1: 2.5, 质量比)。有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定^[21]; 铵态氮采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定^[22]; 有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[23]。脱氢酶采用 TTC (三苯基氯化四氮唑) 比色法^[24]; 葡萄糖苷酶采用硝基苯水杨酸比色法^[25]; 脲酶采用靛酚蓝比色法^[26]; 磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法^[27]。

尾矿、植物重金属含量测定: 尾矿重金属有效

态含量采用 DTPA 浸提法^[28], 称取 10.00 g 土样, 加入 20 mL DTPA 浸提液 [0.005 mol·L⁻¹ DTPA + 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ + 0.1 mol·L⁻¹ TEA (三乙醇胺), pH = 7.3], 于 25℃ 振荡器 180 r·min⁻¹ 振荡 2 h, 过滤。植物重金属含量采用浓硝酸-高氯酸消解法^[29], 称取烘干、磨碎、过 70 目筛的植物样品约 0.5 g, 倒入消化管内, 加 5 mL 浓 HNO₃ 浸泡过夜, 第 2 d 放入消化炉内 90℃ 加热 30 min, 140℃ 加热 30 min, 180℃ 加热 1 h, 冷却, 加 1 mL HClO₄, 然后 160℃ 加热 20 min, 180℃ 加热 2 h, 冷却, 定容, 过滤。尾矿浸提液和植物消解液中的重金属元素 (Cd、Cu、Pb、Zn) 含量采用 iCAP6300 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES 美国, 热电) 测定。质量保证采用双平行样和加标回收法, 各元素的加标回收率在 93.6% ~ 108.5%, 符合元素分析质量控制标准。

1.4 数据分析

所用数据的统计分析均采用 SPSS 16.0 软件进行。单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 用于不同处理间的差异分析, 用最小显著差数法进行显著性检验, 差异显著水平设为 $P < 0.05$ 。Pearson 相关性分析用于植物参数与土壤生物化学性质的相关性分析。作图软件采用 Origin 8.0。

2 结果与分析

2.1 3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿 pH、EC 及重金属有效态含量的影响

3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿 pH、EC 及重金属有效态含量的影响见表 2. 与对照小区相比,添加 3 种工业有机废物显著降低了尾矿基质 pH,显著增加了 EC 值. 从重金属有效态含量来看,铅锌尾矿基质重金属有效态含量相对较高,DTPA-提取态

Cd、Pb、Zn 含量分别为 0.99、47.18 和 97.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著降低了重金属有效态含量,其中 DTPA-Cd 含量下降了 24.2% ~ 27.3%,DTPA-Cu 含量下降了 45.7% ~ 48.3%,DTPA-Pb 含量下降了 18.0% ~ 20.9%,DTPA-Zn 含量下降了 10.1% ~ 14.2%. 统计分析表明,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的处理组间重金属有效态含量无显著差异($P > 0.05$),两组对照处理间重金属有效态含量也没有显著性差异($P > 0.05$).

表 2 3 种工业有机废弃物改良处理对尾矿 pH、EC 和重金属有效态含量的影响¹⁾ (mean $\pm$ SE, $n = 4$)

Table 2 Effects of three industrial organic wastes on pH, EC and DTPA-extractable Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in Pb/Zn tailings

处理	pH	EC / $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	DTPA-Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Cu / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Pb / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Zn / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
尾矿	8.81 $\pm$ 0.02a	1.64 $\pm$ 0.05c	0.99 $\pm$ 0.03a	6.56 $\pm$ 0.45a	47.18 $\pm$ 4.77a	97.42 $\pm$ 3.29a
正常土	8.63 $\pm$ 0.06ab	1.6 $\pm$ 0.11c	0.89 $\pm$ 0.05a	6.27 $\pm$ 0.41a	45.21 $\pm$ 2.90ab	97.01 $\pm$ 2.87a
酒糟	8.42 $\pm$ 0.05b	2.6 $\pm$ 0.14ab	0.73 $\pm$ 0.04b	3.50 $\pm$ 0.28b	38.69 $\pm$ 1.82b	87.63 $\pm$ 1.99ab
中药渣	8.51 $\pm$ 0.02b	2.2 $\pm$ 0.10b	0.75 $\pm$ 0.04b	3.39 $\pm$ 0.27b	37.33 $\pm$ 1.45b	83.60 $\pm$ 4.42b
蘑菇渣	8.44 $\pm$ 0.02b	3.1 $\pm$ 0.09a	0.72 $\pm$ 0.02b	3.57 $\pm$ 0.27b	38.15 $\pm$ 1.70b	85.44 $\pm$ 7.62ab

1) 表中不同字母表示同一重金属各处理间的差异达 0.05 显著水平

2.2 3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿营养元素的影响

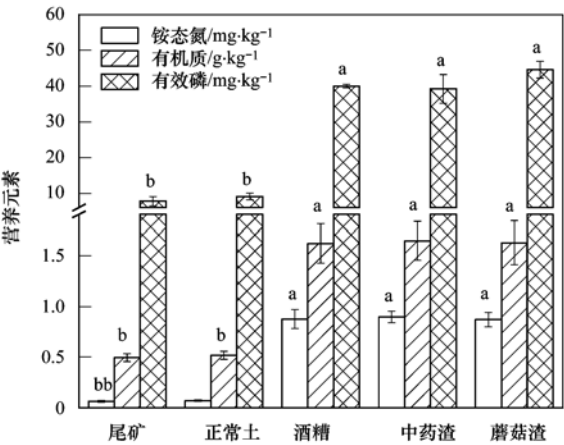
总体来看,铅锌尾矿有机质、铵态氮、有效磷含量较低(图 1). 与没有添加改良剂的对照相比,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著增加了尾矿营养元素的含量. 其中,有机质、铵态氮、有效磷含量分别增加了 2.27 ~ 2.32 倍、12.4 ~ 12.8 倍和 4.04 ~ 4.74 倍. 统计分析表明,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的处理组间有机质、铵态氮、有效磷含量无显著差异($P > 0.05$). 两组对照处理间营养元素含量也没有显著性差异($P > 0.05$).

2.3 3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿土壤酶活性的影响

3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿土壤酶活性的影响见图 2. 从中可知,没有添加改良剂的尾矿小区和添加正常土的小区 4 种土壤酶活性均较低. 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣处理均显著提高了土壤酶活性,与没有添加改良剂的对照相比,脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性分别提高了 5.51 ~ 6.37 倍、1.72 ~ 1.96 倍、6.32 ~ 6.62 倍和 2.35 ~ 2.62 倍. 统计分析表明,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的处理组间 4 种土壤酶活性无显著性差异($P > 0.05$). 两组对照处理间土壤酶活性也没有显著性差异($P > 0.05$).

2.4 3 种工业有机废弃物改良铅锌尾矿对植物生长的影响

添加工业有机废弃物促进了植物种子萌发和种苗生长. 从中可知,没有添加改良剂的尾矿小区和添加正常土的小区植被盖度分别为 25% 和 35%,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的小区植被盖度分别到达了 84%、79% 和 86% [图 3 (a)]. 从生物量来看,两个对照小区中紫花苜蓿和野菊没有发芽,因此没有生物量统计数据. 黑麦草、狗牙根在所有小区中均能萌发、生长,但生长在尾矿和正常土小区的幼苗茎叶比较纤细、泛黄,表现出明显的养分不足和中毒症状. 生长在酒糟、中药渣、蘑菇渣小区内的黑麦草和狗牙根一直长势良好,幼苗健壮,后期能够



图中不同的字母表示各处理间的差异达 0.05 显著水平

图 1 3 种工业有机废弃物改良处理对尾矿营养元素的影响

Fig. 1 Effects of three industrial organic wastes on organic matter, ammonium-N and available P in Pb/Zn tailings

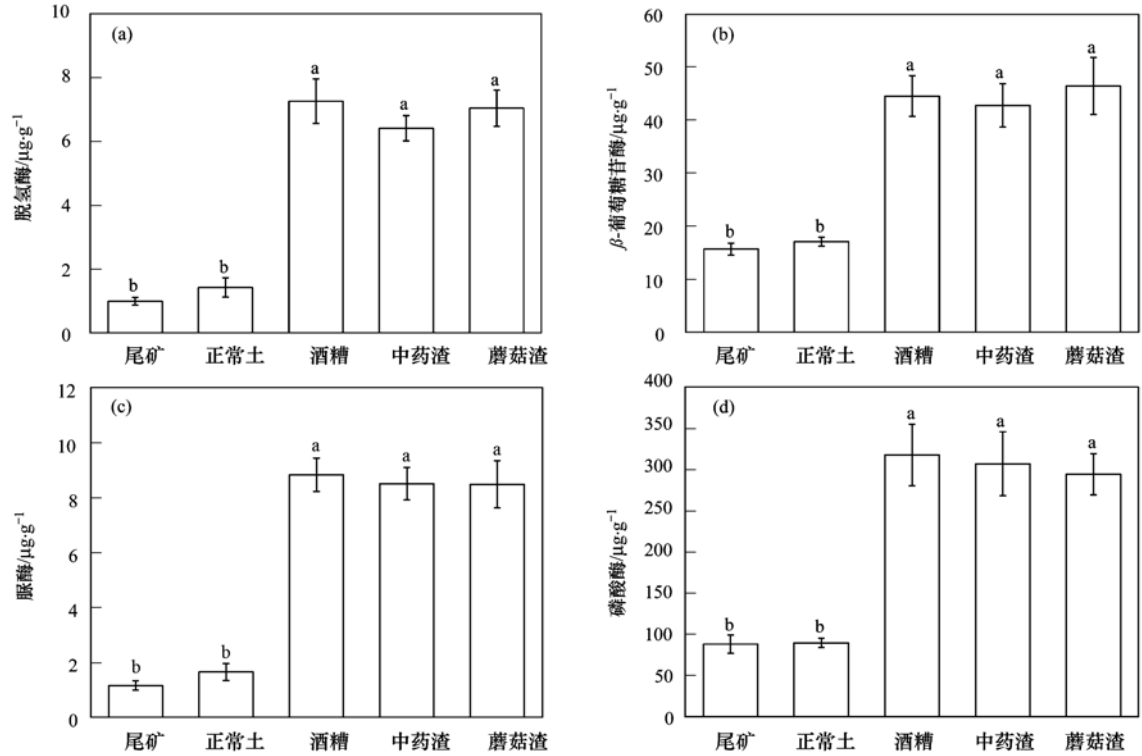


图 2 3 种工业有机废弃物改良处理对尾矿土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effects of three industrial organic wastes on soil enzyme activities in Pb/Zn tailings

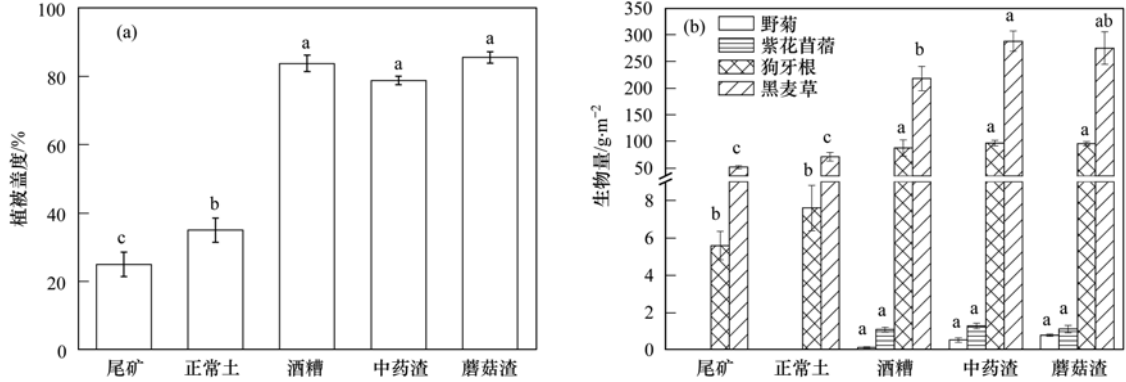


图 3 3 种工业有机废弃物改良处理对植被盖度和生物量的影响

Fig. 3 Effects of three industrial organic wastes on vegetation cover and biomass

开花、结果,完成整个生命周期.与没有添加改良剂的对照相比,酒糟、中药渣、蘑菇渣的实验小区黑麦草的生物量分别提高了 4.2~5.6 倍,狗牙根的生物量分别提高了 15.7~17.3 倍.

2.5 3 种工业有机废弃物对植物地上部分重金属含量的影响

黑麦草、狗牙根地上部分重金属含量见表 3.由于紫花苜蓿、野菊的生物量低于 0.5 g,不足做消化分析,所以没有对紫花苜蓿和野菊地上部分重金属含量进行分析.总体来看,黑麦草、狗牙根地上部分重金属呈相同的趋势,生长在尾矿和正常土小

区的黑麦草、狗牙根地上部分重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 含量相对较高,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著降低了黑麦草和狗牙根地上部分重金属含量,与没有添加改良剂的对照相比,黑麦草地上部分 Cd 含量下降了 75.5%~78.4%,Cu 含量下降了 38.5%~43.4%,Pb 含量下降了 75.1%~76.8%,Zn 含量下降了 69.5%~73.4%.狗牙根地上部分 Cd 含量下降了 45.4%~61.4%,Cu 含量下降了 46.6%~59.3%,Pb 含量下降了 75.7%~79.3%,Zn 含量下降了 78.0%~81.0%.统计分析表明,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的处理组间黑麦草和狗牙根地上部

分重金属含量无显著性差异($P > 0.05$).

2.6 尾矿基质生物化学性质与植物参数的相关性分析

利用 Pearson 相关性分析对尾矿基质生物化学性质与植物参数相关性进行分析(表4). 从中可知,植被盖度、生物量与尾矿基质营养元素(有机质、铵态氮、有效磷)和土壤酶活性(脱氢酶、 β -葡

萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶)呈极显著正相关($P < 0.01$),与尾矿基质重金属有效态含量(DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn)呈极显著负相关($P < 0.01$). 植物地上部分重金属(Cd、Cu、Pb、Zn)含量与尾矿基质营养元素、土壤酶活性呈极显著负相关($P < 0.01$),与尾矿基质重金属有效态含量呈极显著正相关($P < 0.01$).

表3 3种工业有机废弃物改良处理对植物地上部分重金属含量的影响¹⁾/mg·kg⁻¹

处理	黑麦草				狗牙根			
	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn
尾矿	12.63 ± 2.57a	17.44 ± 1.43a	107.44 ± 9.87a	368.21 ± 23.98a	10.86 ± 2.75a	22.14 ± 1.26a	97.82 ± 12.29a	408.76 ± 23.21a
正常土	10.56 ± 1.38b	15.35 ± 1.61b	88.87 ± 7.04b	296.70 ± 19.98b	8.09 ± 2.53a	19.03 ± 1.48b	88.62 ± 10.56b	313.88 ± 24.42b
酒糟	2.92 ± 0.24c	11.02 ± 0.49c	26.74 ± 0.51c	97.91 ± 14.61c	4.19 ± 0.55b	9.02 ± 0.49c	23.77 ± 4.34c	85.58 ± 9.35c
中药渣	2.73 ± 0.12c	9.87 ± 0.18c	25.14 ± 0.69c	112.27 ± 10.82c	4.70 ± 0.84b	10.17 ± 0.89c	21.06 ± 2.63c	89.98 ± 17.93c
蘑菇渣	3.09 ± 0.52c	10.73 ± 1.33bc	24.89 ± 1.63c	106.78 ± 11.42c	5.93 ± 0.74b	11.83 ± 1.31c	20.28 ± 1.47c	77.73 ± 16.52c

1) 表中不同字母表示同一重金属各处理间的差异达0.05显著水平

表4 尾矿基质生物化学性质与植物参数的相关性分析¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficients between plant parameters and soil biochemical properties

植物参数	有机质	铵态氮	有效磷	土壤酶活性				重金属有效态			
				脱氢酶	β -葡萄糖苷酶	脲酶	磷酸酶	DTPA-Cd	DTPA-Cu	DTPA-Pb	DTPA-Zn
盖度	0.860 **	0.936 **	0.945 **	0.947 **	0.889 **	0.949 **	0.884 **	-0.833 **	-0.888 **	-0.576 **	-0.579 **
生物量	0.807 **	0.927 **	0.935 **	0.912 **	0.807 **	0.938 **	0.865 **	-0.826 **	-0.871 **	-0.629 **	-0.642 **
植-Cd	-0.767 **	-0.846 **	-0.828 **	-0.827 **	-0.792 **	-0.828 **	-0.782 **	0.682 **	0.828 **	0.605 **	0.584 **
植-Cu	-0.710 **	-0.728 **	-0.763 **	-0.696 **	-0.732 **	-0.724 **	-0.595 **	0.642 **	0.716 **	0.392	0.617 **
植-Pb	-0.874 **	-0.935 **	-0.944 **	-0.940 **	-0.899 **	-0.937 **	-0.884 **	0.786 **	0.924 **	0.652 **	0.546 *
植-Zn	-0.796 **	-0.899 **	-0.876 **	-0.912 **	-0.849 **	-0.900 **	-0.828 **	0.741 **	0.918 **	0.765 **	0.561 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

重金属毒性和营养元素缺乏是尾矿限制植物定居的主要因子. 有机质丰富的改良材料广泛被用于尾矿废弃地植被重建时的基质改良,它们作为改良剂主要发挥了如下功能:①改善尾矿的理化性质、提高其持水保肥的能力;②螯合、固定部分重金属离子,缓解其毒性;③缓慢释放养分,可供植物较持久利用;④重建微生物群落,恢复尾矿的生态学功能^[7,10,30].

在众多表征重金属毒性的重金属形态中,DTPA-提取态重金属含量能较好地反映重金属对植物和微生物的毒性,通常被用作衡量重金属毒性大小的指标^[31]. 本研究中,添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著降低了尾矿中DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb和DTPA-Zn含量(表2),其主要作用机制可能体现在以下几个方面:一是重金属离子直接吸附在有机改良剂表面^[10];二是重金属离子与有机改良剂

表面的官能团形成重金属-有机质螯合物^[31];三是重金属离子与有机改良剂中的矿物质发生反应生成沉淀或联合沉淀^[13].

尾矿营养状况的改善不仅促进尾矿基质的土壤熟化过程,而且加速土壤微生物的活动,最终有利于植物的定居和生长. 本研究发现,添加工业有机废弃物显著增加了尾矿有机质、铵态氮和有效磷的含量(图1),同时显著提高了土壤脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性(图2),这与前人研究结果是一致的. Alvarenga 等^[32,33]利用污水污泥、城市固废堆肥和园林废弃物堆肥改良重金属污染土壤,结果发现添加3种有机废弃物显著增加了土壤有机质、速效氮、有效磷和有效钾含量,同时增加了脱氢酶、蛋白酶、纤维素分解酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶的活性,促进了植物生长.

植被恢复是矿业废弃地生态恢复的关键,几乎所有的自然生态系统的恢复总是以植被的恢复为前提的^[5]. 本研究中,添加工业有机废弃物促进了植

物种子的萌发和幼苗的生长. 与对照小区相比, 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣的小区植被盖度和生物量均显著性提高(图3). 这与添加3种工业有机废弃物降低尾矿基质的重金属毒性、增加其养分含量和提高土壤酶活性密切相关. 这种相关关系通过植被盖度、生物量与尾矿基质营养元素和土壤酶活性呈极显著正相关关系得到了进一步的验证(表4). 此外, 重金属在土壤-植物系统中的迁移和累积一直是矿业废弃地植被重建过程中非常关心的问题. 从植物稳定的角度来看, 植物应尽可能少地转移重金属到植物地上部分, 以防止重金属进入食物链, 减少对人类健康的危害^[34]. 本研究中, 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著降低了植物地上部分重金属含量(表3), 且植物地上部分重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 含量均远远低于家畜类重金属毒性限制标准 ($\text{Cd} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} \leq 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} \leq 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35], 其原因可能是: 一方面添加有机改良剂降低了基质中重金属的有效态含量, 从而减少了植物对重金属的吸收; 另一方面添加有机废弃物增加了植物的生物量, 使植物体内重金属浓度被稀释, 进而减少植物重金属的累积量.

覆土修复是一种简单、快速、金属矿山最常用的修复模式. Zhu 等^[36]报道在尾矿上覆盖 30 cm 的表土可有效降低重金属毒性, 促进植物生长. 本研究表明, 与没有添加改良剂的对照处理相比, 添加 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的表土没有显著降低重金属有效态含量(表2), 增加营养元素含量(图1)和提高土壤酶活性(图2), 这可能与正常土的添加剂量较低有关. 矿山取土不但给土源供应地带来严重的生态破坏, 而且多数矿山已面临无土可取. 因此, 寻找新的、有机质及营养元素丰富的替代材料是十分必要的. 我国是世界上白酒生产和消费大国, 白酒年产量高达 500 ~ 600 万 t, 酒糟的年产量约为 2 100 万 t^[15]. 中国对中药的使用追溯到远古年代, 中药的熬制过程中产生大量的药渣, 目前中药渣的年产量超过 300 万 t^[16]. 近年来, 随着随着食用菌栽培技术的普及, 食用菌年生产量达 600 万 t, 每年产生的菇渣高达 360 万 t^[17]. 将其作为改良剂用于尾矿废弃地的植被重建, 不仅可以降低尾矿治理修复的成本, 而且可以实现工业废弃物的资源化利用, 达到“以废治废”的双赢目的.

4 结论

铅锌尾矿基质条件状况恶劣, 重金属毒性高, 有

机质及营养元素(N、P、K)含量低, 不利于植物定居和生长. 添加酒糟、中药渣、蘑菇渣显著降低了尾矿中重金属有效态含量; 显著增加了营养元素和土壤酶活性; 促进了植物在铅锌尾矿基质的定居和生长, 并减少了植物地上部分重金属含量. 因此, 可以将酒糟、中药渣、蘑菇渣作为改良剂用于一些类型尾矿废弃地的基质改良.

参考文献:

- [1] 周连碧. 铜尾矿废弃地重金属污染特征与生态修复研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [2] 赵武, 霍成立, 刘明珠, 等. 有色金属尾矿综合利用的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(3): 24-28.
- [3] 筱美. 《金属尾矿综合利用专项规划(2010-2015)》发布[J]. 国土资源, 2010, (5): 46.
- [4] Kabas S, Acosta J A, Zornoza R, et al. Integration of landscape reclamation and design in mine tailing in Cartagena-La Unión, SE Spain[J]. International Journal of Energy and Environment, 2011, 5(2): 301-308.
- [5] Bacchetta G, Cappai G, Carucci A, et al. Use of native plants for the remediation of abandoned mine sites in Mediterranean semiarid environments [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 94(3): 326-333.
- [6] Chen F L, Wang S Z, Mou S Y, et al. Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 157: 27-35.
- [7] Kabas S, Faz A, Acosta J A, et al. Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123: 69-76.
- [8] Pardo T, Bernal M P, Clemente R. Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: I. Effects on trace elements and nutrients solubility and leaching risk[J]. Chemosphere, 2014, 107: 121-128.
- [9] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309-313.
- [10] Galende M A, Becerril J M, Barrutia O, et al. Field assessment of the effectiveness of organic amendments for aided phytostabilization of a Pb-Zn contaminated mine soil[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 145: 181-189.
- [11] 张宏, 沈章军, 阳贵德, 等. 鸡粪改良铜尾矿对3种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6522-6531.
- [12] Chiu K K, Ye Z H, Wong M H. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(1): 158-170.
- [13] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal (loid)s contaminate soils-To mobilize or to immobilize? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 266:

- 141-166.
- [14] Lee S H, Kim E Y, Park H, *et al.* *In situ* stabilization of arsenic and metal-contaminated agricultural soil using industrial by-products[J]. *Geoderma*, 2011, **161**(1-2): 1-7.
- [15] 李建, 叶翔. 酒糟综合利用多元化研究[J]. *中国酿造*, 2013, **32**(12): 121-124.
- [16] 刘文伟, 刘玉璇, 赵宇, 等. 中药渣综合利用研究进展[J]. *药学研究*, 2013, **32**(1): 49-50.
- [17] 刁清清, 毛碧增. 蘑菇渣处理现状及在农业生产上的应用[J]. *浙江农业科学*, 2012, (12): 1710-1712.
- [18] Yang S X, Cao J B, Hu W Y, *et al.* An evaluation of the effectiveness of novel industrial by-products and organic wastes on heavy metal immobilization in Pb-Zn mine tailings [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(11): 2059-2067.
- [19] 张晓君, 杨胜香, 段纯, 等. 蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(3): 526-531.
- [20] 陈明辉, 孙际茂, 付益平, 等. 湘西州矿产资源现状及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 2008, **22**(2): 93-96.
- [21] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter[M]. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982.
- [22] Carter M R, Gregorich E G. Soil Sampling and methods of analysis[M]. (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [23] Bray R H, Kurtz L T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil[J]. *Soil Science*, 1945, **59**(1): 39-45.
- [24] Thalmann A. Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC)[J]. *Landwirt Forsch*, 1968, **21**(3): 249-258.
- [25] Hoffmann G, Dedeken M. Eine methode zur kolorimetrischen bestimmung der β -Glucosidaseaktivität in Böden [J]. *Z Pflanzenernaehr*, 1965, **108**: 195-201.
- [26] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, **6**(1): 68-72.
- [27] Tabatabai M A, Bremner J M. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1969, **1**(4): 301-307.
- [28] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, **42**(3): 421-428.
- [29] Allen S E. Chemical analysis of ecological materials[M]. (2nd ed.). Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [30] Li J J, Zhou X M, Yan J X, *et al.* Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **87**: 56-62.
- [31] Galende M A, Becerril J M, Gómez-Sagasti M T, *et al.* Chemical stabilization of metal-contaminated mine soil: early short-term soil-amendment interactions and their effects on biological and chemical parameters [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225**: 1863.
- [32] Alvarenga P, Gonçalves A P, Fernandes R M, *et al.* Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1292-1300.
- [33] Alvarenga P, Palma P, Gonçalves A P, *et al.* Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (II) effects on soil biochemical and ecotoxicological characteristics [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1301-1308.
- [34] Valente T, Gomes P, Pamplona J, *et al.* Natural stabilization of mine waste-dumps-evolution of the vegetation cover in distinctive geochemical and mineralogical environments [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **123**: 152-161.
- [35] NRC (National Research Council). Mineral Tolerance of Animals[M]. Washington: National Academies Press, 2005.
- [36] Zhu Y M, Wei C Y, Yang L Y. Rehabilitation of a tailing dam at Shimen county, Hunan Province: effectiveness assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(3): 178-183.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行