

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM_{2.5} 污染特征及其对能见度的影响 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co₃O₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浞江为例 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb²⁺ 的去除 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb²⁺ 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A²/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 张若晨, 陈川, 李威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca²⁺ 对污泥硝化活性和絮体沉降性能的影响 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N₂O 排放的影响 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N₂O) 分布和释放 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响

杨胜香^{1,2}, 李凤梅², 彭禧柱², 曹建兵³, 高智席¹

(1. 遵义师范学院资源与环境学院, 贵州省黔北土壤资源与环境特色重点实验室, 遵义 563006; 2. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 吉首 416000; 3. 湘西州环境保护局, 吉首 416000)

摘要: 开展野外田间试验, 在铅锌尾矿废弃地上添加不同碳氮磷源改良剂进行植被重建, 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废弃地的改良效果。结果表明: ①添加不同碳氮磷源改良剂促进了植物在尾矿上定居和生长, 植被盖度从6个月的2.0%~20.0%增长到30个月的62.5%~98.5%; 生物量从6个月的9.4~115 g·m⁻²增长到30个月的389.0~2358.3 g·m⁻²。②添加不同碳氮磷源改良剂增加了尾矿营养元素含量(有机碳、水溶性碳、硝态氮和有效磷分别增加了6.0%~93.3%、1.3%~49.3%、12.3%~214.7%和2.7%~81.3%)和提高了土壤酶活性(脱氢酶、β-葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶活性分别提高了0.3~2.8、0.1~1.4、0.1~0.6和0.1~0.5倍)。③添加不同碳氮磷源改良剂不同程度地降低了尾矿中重金属有效态含量(DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb和DTPA-Zn分别下降了2.5%~40.2%、1.4%~25.6%、1.4%~15.2%和0.4%~24.9%)和植物体内重金属(Cd、Cu、Pb和Zn分别下降了12.1%~58.7%、6.4%~46.0%、20.2%~68.0%和11.7%~58.1%)含量。④Pearson相关性分析表明, 植被盖度、生物量与尾矿营养元素和土壤酶活性呈显著正相关, 与尾矿重金属有效态含量呈显著负相关; 植物地上部分重金属含量与尾矿重金属有效态含量、营养元素和土壤酶活性相关性不明显。综合分析表明, 碳氮磷源改良剂是铅锌尾矿废弃地植被恢复良好的改良材料。

关键词: 铅锌尾矿; 碳氮磷源改良剂; 基质改良; 植物生长; 土壤性质

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4253-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201812190

Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings

YANG Sheng-xiang^{1,2}, LI Feng-mei², PENG Xi-zhu², CAO Jian-bing³, GAO Zhi-xi¹

(1. Key Laboratory of Soil Resources and Environment in Qianbei of Guizhou Province, College of Resources and Environment, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China; 2. College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China; 3. Xiangxi Environmental Protection Bureau, Jishou 416000, China)

Abstract: A field trial was conducted with abandoned Pb-Zn mine tailings to evaluate the effectiveness of amendments with different C/N/P ratios on plant growth, soil nutrients and enzyme activities, and heavy metal concentrations in plant tissues and the mine tailings. The following results were noted. ① The application of amendments with different C/N/P ratios promoted plant growth and development. The vegetation cover and biomass increased from 2.0%-20.0% and 9.4-115 g·m⁻² at 6 months to 62.5%-98.5% and 389-2358.3 g·m⁻² at 30 months, respectively. ② When compared with the control tailings, the mean values of organic carbon, water soluble organic carbon, nitrate nitrogen, and available phosphorus in the treatments with different C/N/P ratios increased 6.0%-93.3%, 1.3%-49.3%, 12.3%-214.7%, and 2.7%-81.3%, respectively. Similarly, the addition of amendments with different C/N/P ratios enhanced the soil enzyme activities of dehydrogenase, β-glucosidase, urease, and phosphatase 0.3-2.8, 0.1-1.4, 0.1-0.6, and 0.1-0.5 times those in the tailings. ③ The addition of amendments with different C/N/P ratios decreased the concentrations of diethylenetriamine pentaacetate (DTPA)-extracted Cd, Cu, Pb, and Zn in the mine tailings and the accumulation of Cd, Cu, Pb, and Zn in plant tissues in different degrees. DTPA-Cd, DTPA-Cu, DTPA-Pb, and DTPA-Zn decreased 2.5%-40.2%, 1.4%-25.6%, 1.4%-15.2%, and 0.4%-24.9%, respectively, compared with the control tailings. ④ Pearson's correlation coefficients showed that the vegetation cover and biomass were correlated positively with the soil nutrient elements and enzyme activities and negatively with DTPA-extractable metal concentrations. No correlations were observed between the plant metal concentrations and soil DTPA-extractable metal concentrations, nutrient elements, and enzyme activities. Generally, amendments with different C/N/P ratios aided phytostabilization of some types of mine tailings is the preferred option for full remediation of these mine wastelands.

Key words: Pb-Zn mine tailing; amendments with different C/N/P ratios; amelioration; plant growth; soil properties

尾矿废弃地, 又称尾矿库, 是金属矿山最常见 并且最难治理的废弃地裸地, 它不仅自身重金属污

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561076); 贵州省自然科学基金项目(黔科合基础[2019]1322); 贵州省教育厅科技拔尖人才计划项目(黔教合KY字[2018]065); 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合KY字[2016]047); 贵州省黔北土壤资源与环境特色重点实验室开放项目(黔教合KY字[2017]010); 遵义师范学院博士启动基金项目(遵师BS[2017]13)

作者简介: 杨胜香(1972~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿山重金属污染治理与生态恢复, E-mail: yangsx1998@163.com

染严重,也是持久的重金属污染源^[1].尾矿中的有毒有害物质易随雨水和扬尘扩散,污染周边土壤、水体和大气,带来严重的生态环境问题,甚至威胁到当地人民的健康^[2].原位基质改良与植被重建技术是近年来发展起来的最具发展潜力的尾矿废弃地生态恢复技术,该技术的核心思想是在尾矿中添加改良材料,改善尾矿的理化性质并降低重金属毒性,种植合适的耐性植物,使植物在尾矿上生长、繁殖并形成稳定的植物群落,实现将重金属污染长期固定在原地^[3,4].

一直以来,在尾矿治理和植被恢复中过度强调重金属毒性及其对植被重建的限制作用^[5].然而,最近一些研究指出,在中性或偏碱性的尾矿中,有机质和营养元素(如 N 和 P)的缺乏才是限制植物在尾矿废弃地上生长和定居的主要因子^[6~8].尾矿不是真正意义的土壤,主要以沙粒和粉粒为主,结构松散、无土壤团粒结构、养分贫瘠、重金属含量高和持水保肥能力差^[9].为了改善尾矿基质理化性质,促进土壤演化化和土壤培育,有利于植被恢复与重建,这就需要在尾矿废弃地生态恢复的初期选择有机质、氮、磷等丰富的改良材料. Santibañez 等^[10]将有机质丰富的葡萄和橄榄废弃物添加到铜尾矿,显著增加了尾矿中有机碳、氮、磷等营养元素含量,提高了微生物活性,促进了植物生长. Li 等^[8]在铅锌尾矿中添加农业有机废弃物(鸡粪、作物秸秆、蘑菇渣、酒糟、中药渣和污泥)作为改良剂,结果表明,这些有机质丰富的材料显著改善了铅锌尾矿的营养状况、增加了土壤酶活性和微生物多样性,有效降低了重金属有效态含量. Mignardi 等^[11]研究了天然磷矿石和磷酸盐肥料对矿山土壤中重金属的固化作用,结果显示改良处理后矿土中水溶态 Co 和 Ni 均降低了 99%. 碳是植物必需的生命元素,氮、磷是植物生长必不可少的矿质性营养元素和关键的限制性养分,它们对改善土壤物理结构、促进团聚体的形成、维持土壤的生物地球化学循环,特

别是碳、氮和磷循环具有重要的意义^[12].同时,有机质还可以螯合或者络合部分重金属离子,缓解其毒性和提高基质持水保肥的能力^[13];氮和磷是阴阳离子的有效吸附剂,可提高土壤的缓冲能力^[14].因此,在尾矿基质改良中有意选择碳、氮、磷丰富的材料作为改良剂是十分必要的,这样既可以弥补尾矿中营养元素的不足,又可以促进尾矿土壤的熟化过程和植物的生长.然而,目前对碳氮磷改良剂及其组合对尾矿废弃地植被恢复过程中重金属元素的迁移、营养物质的累积、微生物活性的变化缺乏系统地研究.本文选取铅锌尾矿作为研究对象,通过开展野外田间试验,在铅锌尾矿废弃地上建立添加不同碳氮磷源改良剂的生态恢复小区,分析添加不同碳氮磷源改良剂对植物群落、重金属迁移和营养元素累积的影响,探究碳、氮和磷驱动的土壤学过程,以期采取人工辅助手段加快重金属尾矿废弃地生态恢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

本研究在湖南省湘西土家族苗族自治州花垣县浩宇化工有限公司铅锌尾矿库进行,地理坐标为东经 109°15'~109°38',北纬 28°10'~28°38'.该区域属中亚热带山地气候,年平均气温 15~16.9℃,年降水量为 1 250~1 500 mm,年平均日照时数 1 291~1 406 h,丘陵地貌,海拔高度为 300~1 800 m,原始植被为中亚热带典型山地植被.浩宇尾矿库闭库时间为 3 a,面积约 50 000 m².2013 年 11 月对该尾矿库进行了生态调查和立地分析,结果显示:尾矿弱碱性,pH 值为 8.2 左右;营养物质贫乏,有机碳含量为 1.6 g·kg⁻¹,总氮和总磷含量分别为 27.1 和 17.9 mg·kg⁻¹;重金属 Cd、Pb、Zn 含量较高,分别为 16.4、671 和 1 412 mg·kg⁻¹;土质疏松,尚未形成团粒结构,不利于植被定居而处于裸露状态(表 1).

表 1 铅锌尾矿和中药渣的基本理化性质¹⁾

Table 1 General physico-chemical properties of Pb-Zn mine tailings and medicinal herb residue

项目	pH	电导率 /dS·m ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹	总氮 /mg·kg ⁻¹	总磷 /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹
尾矿	8.2±0.3	1.7±0.14	1.6±0.38	27.1±6.5	17.9±5.3	16.4±0.38	25.6±0.68	671±54.6	1412±228
中药渣	5.0±0.1	3.2±0.36	531±54.6	98.3±1.7	504±13.6	0.12±0.01	12.2±0.55	31±3.6	125±14.9

1) 表内数值为均值±标准误差, n=10

1.2 实验设计与过程

2014 年 3 月在尾矿库中间位置建立了约 900 m²(25 m×35 m)的实验地.本实验选用中药渣(Medicinal herb residue)、尿素[(NH₂)₂CO]、过磷

酸钙[Ca(H₂PO₄)₂]作为碳源、氮源和磷源改良剂[中药渣采自湘泉制药厂,其主要成分为中草药植物熬制成中药后形成的废渣,其基本理化性质见表 1(含有机碳≥50%);尿素为石家庄柏坡正元化肥

有限公司生产(含氮 $\geq 46.4\%$);过磷酸钙为湖北吉顺磷化有限公司生产(有效 $P_2O_5 \geq 12\%$)]。将实验地分割成 28 个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 实验小区,设计 7 种不同处理,分别为:①尾矿(CK)、②尾矿+尿素(N)、③尾矿+磷肥(P)、④尾矿+药渣(MHR)、⑤尾矿+药渣+尿素(MHR+N)、⑥尾矿+药渣+磷肥(MHR+P)、⑦尾矿+药渣+尿素+磷肥(MHR+N+P),每个处理 4 个重复,随机排列。根据盆栽实验结果^[15],改良剂添加量分别为:中药渣($15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、尿素($150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和过磷酸钙($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),2014 年 3 月将改良剂添加至各个实验小区,采用犁耕法将其与 $0\sim 30\text{ cm}$ 尾矿基质混匀。

2013 年 10~12 月对浩宇尾矿库附近区域进行植被调查,采集乡土耐性植物种子(包括草本、灌木和乔木)。开展室内盆栽实验,根据发芽情况筛选出 10 种供试植物,分别为:芒(*Miscanthus sinensis*)、狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、苧麻(*Boehmeria nivea*)、斑花败酱(*Patrinia punctiflora*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、百花泡桐(*Paulownia fortunei*)和柏树(*Platyclusus orientalis*)。根据植物千粒重和发芽率,确定田间试验的播种量,播种植物名称与播种量见表 2。2014 年 4 月将称取的 10 种植物种子混匀,采用撒播法,播种于实验地。植物在自然条件下生长,实验期间不采取灌溉或其他农艺措施。

表 2 实验小区内播种的植物与播种量

Table 2 Sown plants and their amounts in the experiment plots

编号	科名	物种名称	拉丁名	播种量 / $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
1	禾本科	芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	0.5
2	禾本科	狼尾草	<i>Pennisetum alopecuroides</i>	1
3	豆科	胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i>	1
4	豆科	马棘	<i>Indigofera pseudotinctoria</i>	1
5	菊科	苍耳	<i>Xanthium sibiricum</i>	0.75
6	菊科	黄花蒿	<i>Artemisia annua</i>	0.75
7	荨麻科	苧麻	<i>Boehmeria nivea</i>	0.75
8	败酱科	斑花败酱	<i>Patrinia punctiflora</i>	0.3
9	玄参科	白花泡桐	<i>Paulownia fortunei</i>	0.1
10	柏科	柏树	<i>Platyclusus orientalis</i>	1.5

1.3 样品采集与分析

土样采集安排在尾矿改良前(0)和改良后的 6、12、18、24 和 30 个月进行。在每个实验小区内采用 5 点取样法,采集深度为 $0\sim 30\text{ cm}$ 土样,采集量为 1 kg 左右,混匀,装入密封袋,做好标记,运回实验室。在实验室内将土样成两份,一份在室温下自然风干,供土壤理化性质分析;一份储存于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 供

土壤酶活性分析。土壤理化性质参照鲁如坤^[16]土壤农业化学分析方法测定:pH 值和电导率分别采用电位法和电导法(土:水=1:2.5,质量浓度比);有机碳和水溶性碳分别采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法与纯水浸提-重铬酸钾氧化滴定法;总氮、铵态氮和硝态氮分别采用半微量凯氏定氮法、KCl 浸提-靛酚蓝比色法与酚二磺酸比色法;总磷和有效磷分别采用酸溶-钼锑抗比色法与 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法。土壤重金属总量采用王水消解法^[17],重金属有效态含量采用 DTPA 浸提法^[18],消解液和浸提液中的重金属元素(Cd、Cu、Pb 和 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。土壤酶活性测定参照关松荫^[19]土壤酶及其研究方法:土壤脱氢酶采用 TTC(三苯基氯化四氮唑)比色法,葡萄糖苷酶采用硝基苯水杨酸比色法,脲酶采用靛酚蓝比色法,磷酸酶采用对硝基苯磷酸钠比色法。

植被调查与样品采集安排在植物种植后的 6、18 和 30 个月。采用数码照相法测算每个实验小区的植被覆盖度^[20]。在每个实验小区内设置一个 $0.5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的小样方,用镰刀割取距地面 5 cm 的植物地上部分进行生物量测定。采集每种植物地上部分,装入自封袋,运回实验室,进行植物重金属含量分析。将采集的植物用蒸馏水洗净,再用去离子水冲洗 3 次,于烘箱内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min ,之后在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘至恒重,磨碎,过 70 目尼龙筛。植物重金属含量采用浓硝酸-高氯酸消解法^[21],植物消解液中的重金属元素(Cd、Cu、Pb 和 Zn)含量采用 iCAP6300 测定。

1.4 数据质量保障与分析

数据质量保障采用双平行样和加标回收法。每批样品每个项目分析时均做 20% 平行样品;重金属元素分析时各元素的加标回收率控制在 95%~105% 之间。

所有数据采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行处理与统计分析,不同处理间的显著性检验采用最小显著差数法(LED, $P < 0.05$),相关性分析采用 Pearson 法,作图软件采用 Origin 8.0。

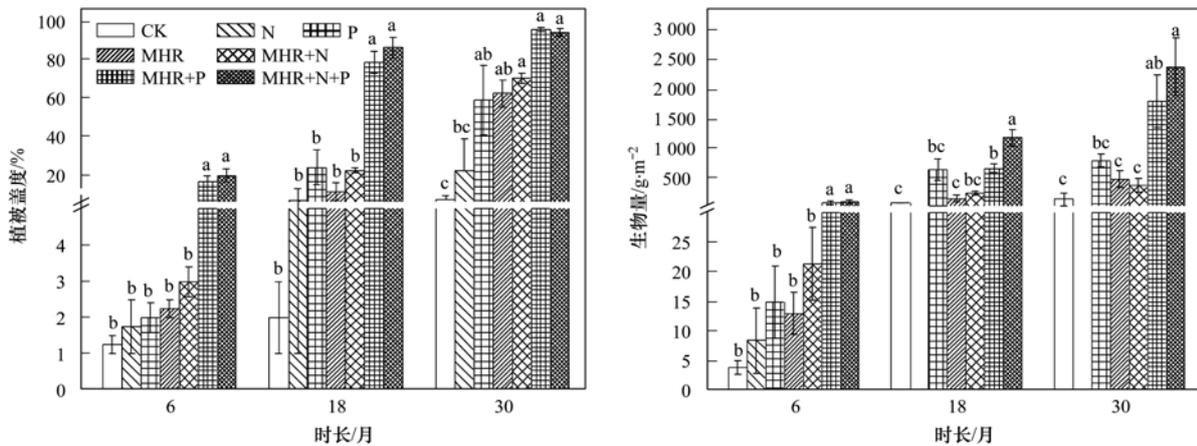
2 结果与分析

2.1 不同碳氮磷源改良剂对植被盖度和生物量的影响

不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿废弃地对植被盖度和生物量的影响见图 1。总体来看,添加不同碳氮磷源改良剂促进了植物在铅锌尾矿废弃地上的定居和生长,且随着恢复时间的延长,植被盖度

和生物量均有增加的趋势. 从植被盖度来看, 对照小区(CK)植被盖度仅为 1.3% (6 个月)、2.0% (18 个月)和 7.3% (30 个月), 添加不同碳氮磷源改良剂后, 植被盖度达到 2.0% ~ 20.0% (6 个月)、11.3% ~ 78.8% (18 个月)和 62.5% ~ 95.8% (30 个月). 与 CK 相比, 6 个月和 18 个月时 MHR + P 和 MHR + N + P 处理较对照有显著差异($P < 0.05$), 30 个月时, 除 P 外, 其它处理较对照均有显著性差异($P < 0.05$). 从生物量来看, 除 N 处理外, 添加不同碳氮

磷源改良剂处理植物生物量较 CK 均有不同程度地增加. CK 生物量分别为 $2.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (6 个月)、 $88.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (18 个月)和 $150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (30 个月), 添加不同碳氮磷源改良剂后生物量达到 $9.4 \sim 115 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (6 个月)、 $158 \sim 1179 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (18 个月)和 $389 \sim 2358 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (30 个月). 与 CK 相比, 6 个月、18 个月和 30 个月时, MHR + P 和 MHR + N + P 处理较对照有显著性差异($P < 0.05$), 其它处理较对照没有显著性差异($P > 0.05$).



图中同一组中不同字母表示各处理间差异显著 $P < 0.05$

图 1 不同碳氮磷源改良剂对植被盖度和生物量的影响 ($n=4$)

Fig. 1 Effects of amendments with different C/N/P ratios on vegetation coverage and biomass in Pb-Zn tailings ($n=4$)

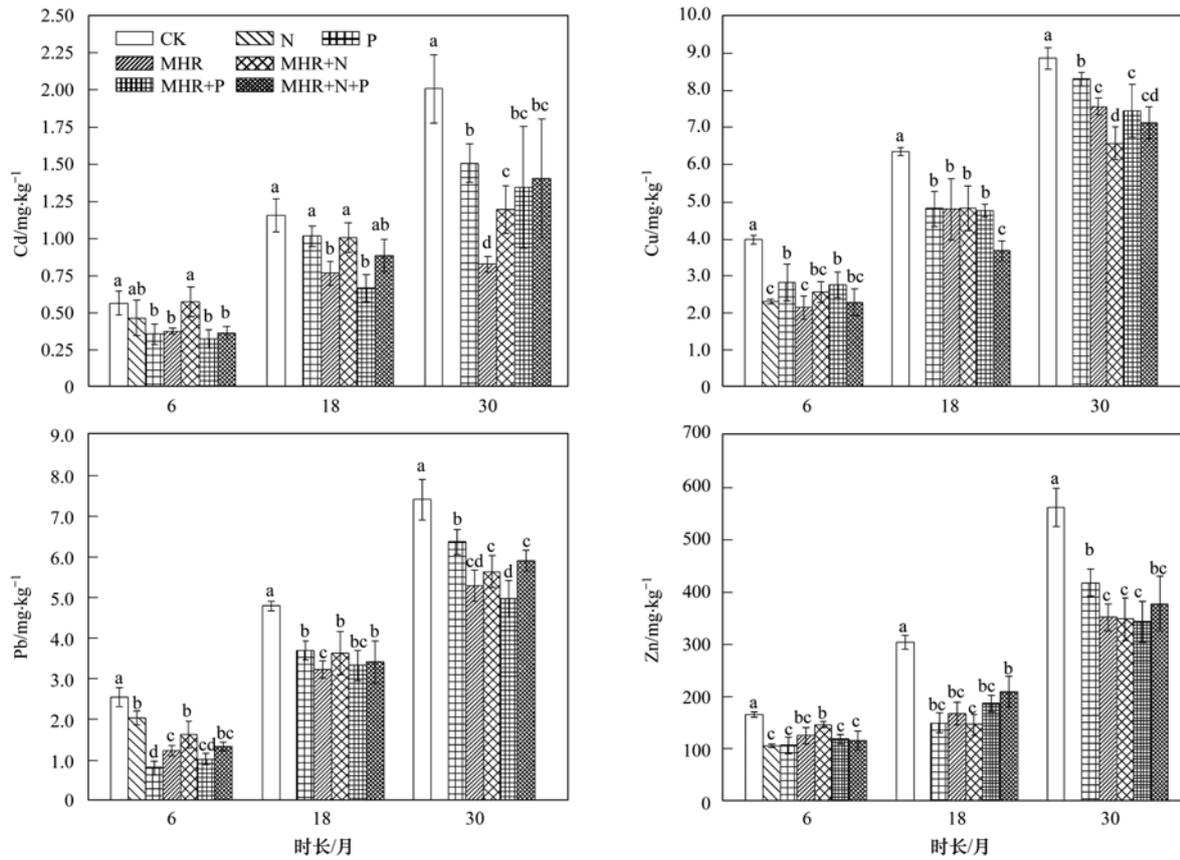
2.2 不同碳氮磷源改良剂对植物体内重金属含量的影响

不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿对植物重金属含量的影响见图 2. 由于不同植物对尾矿废弃地恶劣环境的耐受性不同以及不同植物的生长竞争力不一样, 播种的 10 种乡土耐性植物种子的发芽率和生长情况也不同. 6、18 和 30 个月均采集到的植物有芒草、狼尾草、黄花蒿、斑花败酱和苕麻. 图 2 中所示的植物重金属元素含量数据为 5 种植物重金属含量的平均值. 其中, N 处理在 18 个月和 30 个月时没有植物生长, 故该处理在 18、30 个月没有植物重金属含量数据. 从每个采样时间点来看, CK 处理植物体内 Cd、Cu、Pb、Zn 含量较高, 添加不同碳氮磷源改良剂不同程度降低了植物体内重金属含量. 与 CK 相比, 植物 Cd 含量下降了 12.1% ~ 58.7%, 6 个月时差异显著的处理是 P (36.8%)、MHR (33.3%)、MHR + P (42.1%) 和 MHR + N + P (35.1%); 18 个月时差异显著的处理是 MHR (33.6%) 和 MHR + N + P (42.2%); 30 个月时差异显著的处理是 P (24.9%)、MHR (58.7%)、MHR + N (40.3%)、MHR + P (32.8%) 和 MHR + N + P (29.8%). 与 CK 相比, 植物 Cu 含量下降了 6.4% ~ 46.0%, 6 个月和 18 个月时所有处理较对照均有

显著性差异($P < 0.05$), 30 个月时除 P 外, 其它处理较对照均有显著性差异($P < 0.05$). 与 CK 相比, 植物 Pb 含量下降了 20.2% ~ 68.0%, 6 个月、18 个月和 30 个月时, 所有处理较对照均有显著性差异($P < 0.05$). 与 CK 相比, 植物 Zn 含量下降了 11.7% ~ 51.8%, 6、18 和 30 个月时所有处理较对照均有显著性差异($P < 0.05$). 此外, 随着恢复时间的延长, 植物体内的重金属含量有增加的趋势.

2.3 不同碳氮磷源改良剂对尾矿重金属有效态含量的影响

不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿废弃地对尾矿重金属有效态含量的影响见图 3. 尾矿基质中 DTPA-Cd、DTPA-Cu、DTPA-Pb、DTPA-Zn 的含量范围分别为 0.16 ~ 0.24、3.85 ~ 4.30、2.53 ~ 3.19 和 114.57 ~ 120.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 与 CK 相比, 添加不同碳氮磷源改良剂处理后, 尾矿基质中重金属有效态含量均有不同程度的下降. 其中, 与 CK 相比, DTPA-Cd 下降了 2.5% ~ 40.2%, 其中差异显著的处理是 P、MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P; 与 CK 相比, DTPA-Cu 下降了 1.4% ~ 25.6%, 差异显著的处理是 MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P; 与 CK 相比, DTPA-Pb 下降了 1.4% ~ 15.2%, 差异显著的处理是 MHR、MHR + P 和 MHR + N + P; 与



图中同一组中不同字母表示各处理间差异显著 $P < 0.05$

图 2 不同碳氮磷源改良剂对植物体内重金属含量的影响 ($n = 4$)

Fig. 2 Effects of amendments with different C/N/P ratios on the concentrations of Cd, Cu, Pb, and Zn in plant tissues in Pb-Zn tailings ($n = 4$)

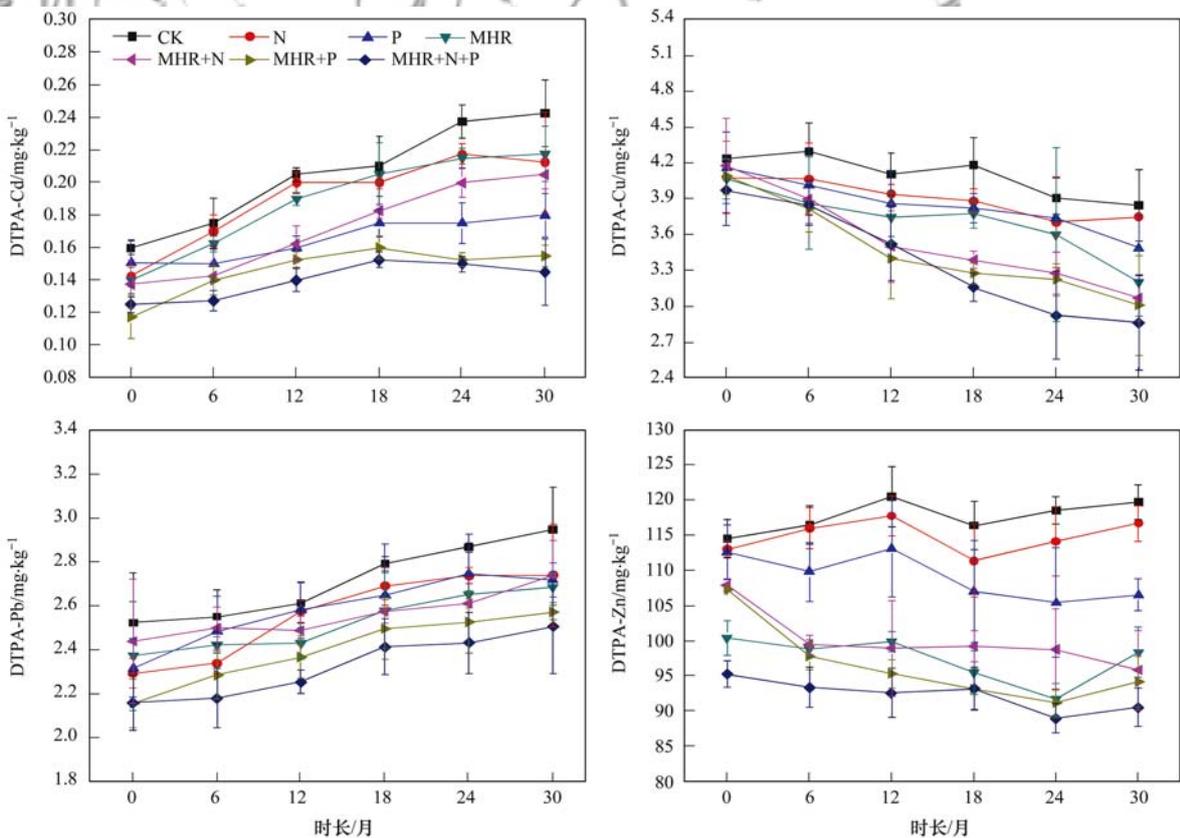


图 3 不同碳氮磷源改良剂对尾矿重金属有效态含量的影响 ($n = 4$)

Fig. 3 Effects of amendments with different C/N/P ratios on DTPA-extractable Cd, Cu, Pb, and Zn concentrations in Pb-Zn tailings ($n = 4$)

CK 相比, DTPA-Zn 下降了 0.4% ~ 24.9%, 有显著性差异的处理是 P、MHR、MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P. 但从时间上看, 随着恢复时间的延长, DTPA-Cd 和 DTPA-Pb 有增加趋势, DTPA-Cu 有下降的趋势, DTPA-Zn 没有显著性差异.

2.4 不同碳氮磷源改良剂对尾矿营养元素含量和 pH 的影响

不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿废弃地对尾矿营养元素含量和 pH 值的影响见图 4. 尾矿中营养元素含量较低, 有机碳含量为 1.12 ~ 1.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水溶性碳、铵态氮、硝态氮、有效磷含量分别为 31.07 ~ 36.14、1.21 ~ 1.35、0.12 ~ 0.16 和 2.09 ~ 2.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 添加不同碳氮磷源改良剂后, 尾矿基质中营养元素含量均有不同程度地增

加, pH 值则显著降低. 与 CK 相比, 有机碳增加了 6.0% ~ 93.3%, 其中, 差异显著的处理是 MHR、MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P; 与 CK 相比, 水溶性碳增加了 1.3% ~ 49.3%, 差异显著的处理是 MHR、MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P; 与 CK 相比, 铵态氮在各个处理 and 3 个采样时间点均没有显著性差异; 与 CK 相比, 硝态氮增加了 12.3% ~ 214.7%、差异显著的处理是 P、MHR、MHR + N、MHR + P 和 MHR + N + P; 与 CK 相比, 有效磷增加了 2.7% ~ 81.3%. 与 CK 相比, 尾矿 pH 值下降了 2.4% ~ 8.8%, 除 P 外, 其它处理与对照均有显著性差异. 从时间上看, 随着恢复时间的延长, 有机碳和硝态氮均有增加的趋势, 水溶性碳、铵态氮和有效磷没有显著性变化.

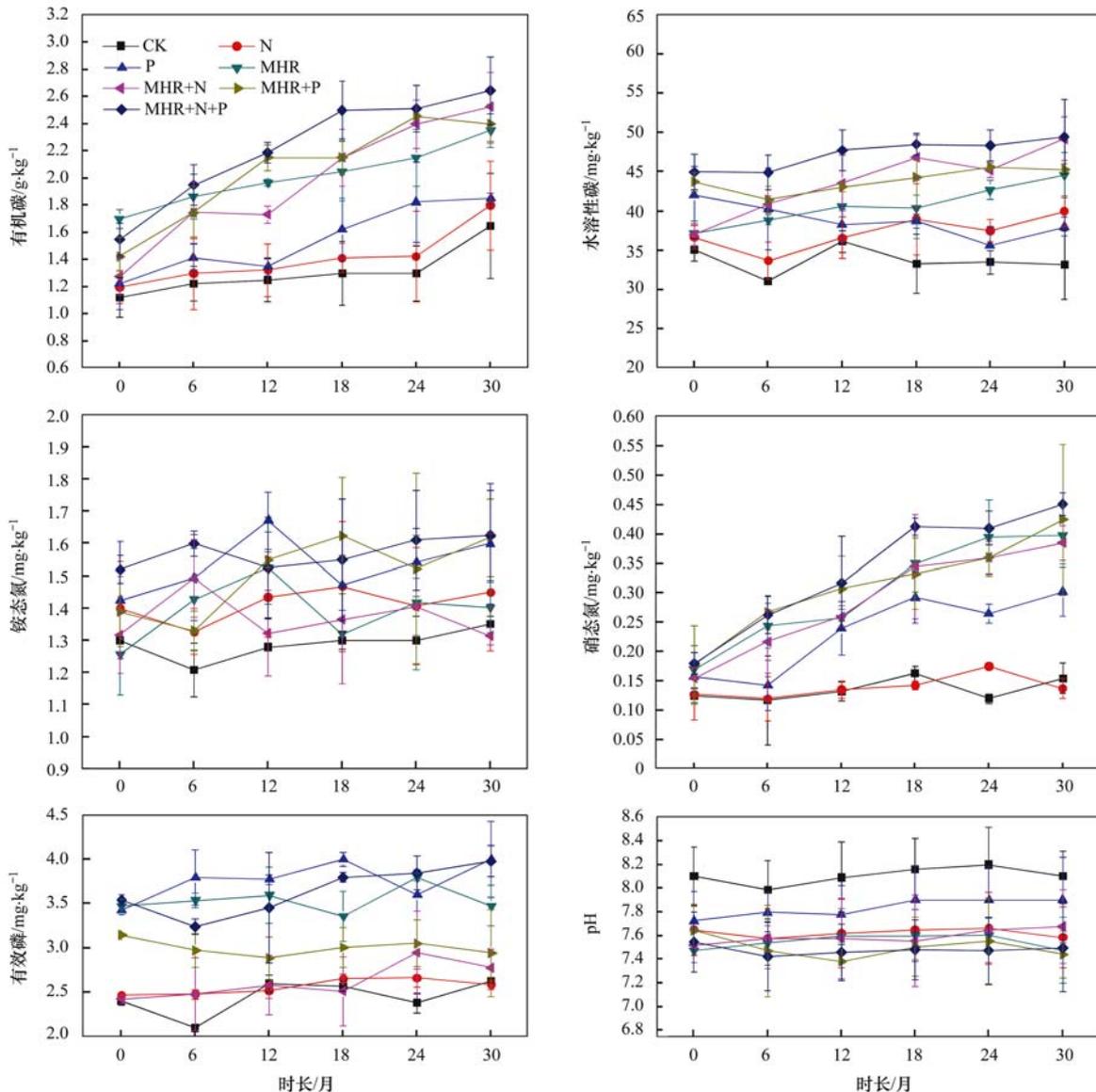


图 4 不同碳氮磷源改良剂对尾矿营养元素含量的影响 ($n=4$)

Fig. 4 Effects of amendments with different C/N/P ratios on the contents of organic carbon, water organic carbon, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus in Pb-Zn tailings ($n=4$)

2.5 不同碳氮磷源改良剂对尾矿土壤酶活性的影响

不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿废弃地对尾矿土壤酶活性的影响见图 5。总体来看,尾矿基质中 4 种土壤酶活性均较低,脱氢酶(以 TPF 计)为 $0.03 \sim 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 β -葡萄糖苷酶(以水杨苷计)为 $13.59 \sim 17.36 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、脲酶(以 NH_4^+-N 计)为 $1.09 \sim 1.34 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、磷酸酶(以 PNP 计)为 $112.24 \sim 126.96 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与 CK 相比,添加不同碳氮磷源改良剂不同程度地提高了脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶活性。

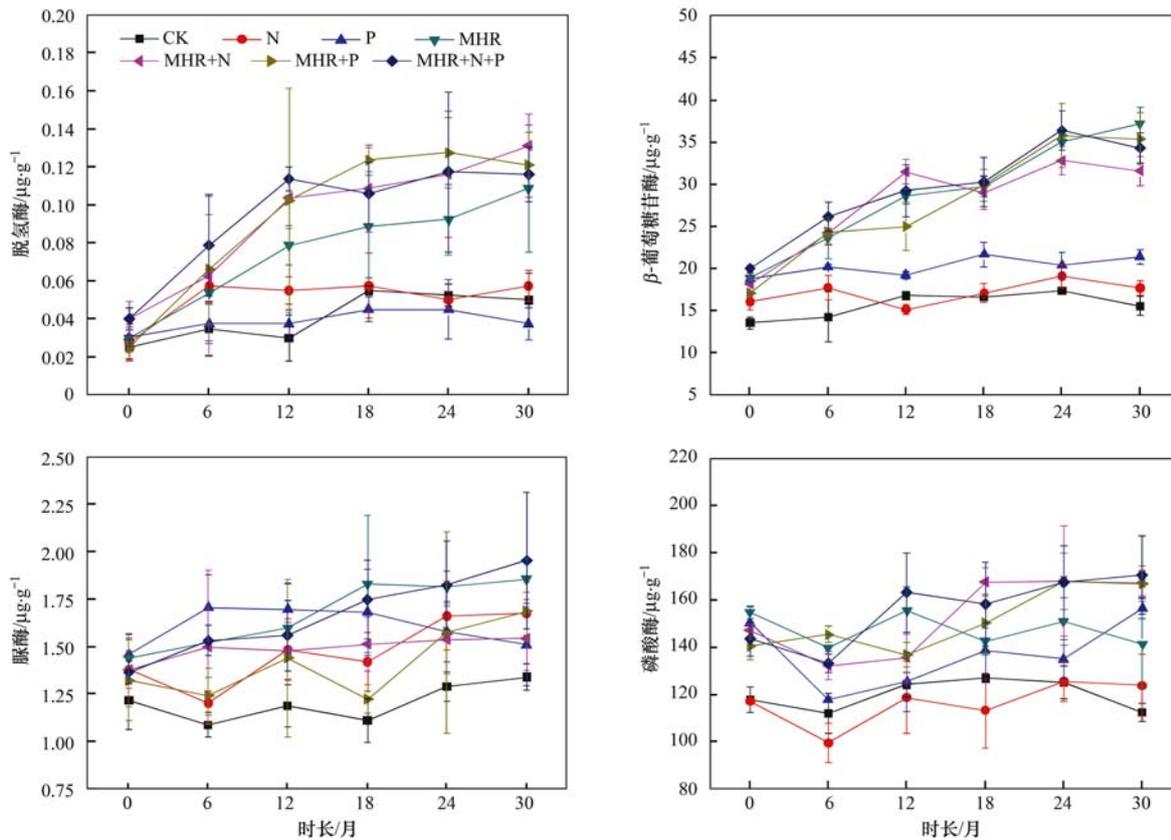


图 5 不同碳氮磷源改良剂对尾矿土壤酶活性的影响($n=4$)

Fig. 5 Effects of amendments with different C/N/P ratios on soil enzyme activities in Pb-Zn tailings ($n=4$)

3 讨论

碳、氮和磷是保证植物正常生长发育的重要生源元素,也是土壤地球生物化学循环的主要生态因子^[22]。尾矿对植物来讲是一个非常恶劣的生长环境,存在物理结构不良、重金属含量高和营养元素缺乏、尤其是 C、N 和 P 缺乏是影响植物定居和生长的主要限制因子^[9]。添加碳氮磷源改良剂可直接改善尾矿的营养状况,促进土壤团聚体形成,满足植物生长发育需要,促进植物在尾矿废弃地上存活、生长和定居。

本研究中,添加不同碳氮磷源改良剂明显促进了植物在铅锌尾矿废弃地上定居和生长,植被盖度

与 CK 相比,脱氢酶提高了 0.3~2.8 倍,差异显著的处理是 MHR、MHR+N、MHR+P 和 MHR+N+P;与 CK 相比, β -葡萄糖苷酶提高了 0.1~1.4 倍,除 N 外,其它处理较对照均有显著性差异;与 CK 相比,脲酶提高了 0.1~0.6 倍,所有处理较对照均有显著性差异;与 CK 相比,磷酸酶提高了 0.1~0.5 倍,除 N 外,其它处理与对照均有显著性差异。从时间上看,随着恢复时间的延长脱氢酶和 β -葡萄糖苷酶有升高的趋势,脲酶和磷酸酶没有显著性变化。

和生物量大幅度增加,且随着恢复时间的延长有增加的趋势(图 1)。这与尾矿中营养元素含量(图 4)和土壤酶活性(图 5)增加有关。这种相关关系通过植被盖度、生物量与尾矿基质营养元素(有机碳、水溶性碳、铵态氮、硝态氮、有效磷)和土壤酶活性(脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶活性)呈显著正相关关系得到了进一步地验证(表 3)。其主要作用机制可能体现在两个方面:一方面添加碳氮磷源改良剂直接提供了植物生长必要的营养元素(铵态氮、硝态氮和有效磷),有机碳和水溶性碳的增加改善了尾矿的理化性质,提高了持水保肥的能力;另一方面添加碳氮磷源改良剂提高了土壤微生物的代谢活性(脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸

酶活性),促进了尾矿基质的土壤熟化过程,有利于植物的定居和生长^[5,8,10].这与前人的研究结果一致.Pardo等^[23,24]利用猪粪和堆肥改良矿山土壤,结果发现改良后的土壤水溶性碳、水溶性氮、有效磷和有效钾含量显著增加,同时纤维素分解酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶的活性显著提高,最终促进了植物生长.然而,N处理在植被恢复后的18个月和30个月无植物生长,这可能与尾矿结构松散有关,单独添加尿素这类速效氮肥极易被淋溶,导致生长的幼苗后期氮肥供应不足而死亡^[14,22].

除营养元素外,重金属毒性也是尾矿废弃地限制植物定居的主要因子^[1,9].本研究中,添加碳氮磷源改良剂不同程度地降低了尾矿中重金属有效态含量(图3),这主要与中药渣和磷肥的性质有关.中药渣存在大量的官能团和比表面积,能够通过吸收、沉淀、螯合等过程与重金属离子形成重金属有机络合物,降低重金属的有效性^[15,25];磷肥则通过 PO_4^{3-} 对重金属的吸附或共沉淀作用降低重金属的生物有效性^[14].从时间上看,随着恢复时间的延长,DTPA-Cd和DTPA-Pb在某些处理中有增长的

趋势.Yang等^[26]对广东大宝山铜矿排土场进行基质改良和植被重建时,发现DTPA-Pb和DTPA-Zn随着恢复时间的增加呈现增长的趋势,研究认为重金属有效态的增加可能是由于恢复过程的扰动和接下来的植物根际作用造成的^[27].此外,重金属在土壤-植物系统中迁移和累积一直是矿山废弃地植被重建过程中人们非常关心的问题.本研究中,与对照相比,添加不同碳氮磷源改良剂不同程度地降低了植物体内重金属含量(图2),其原因是添加碳、氮和磷源改良剂降低了尾矿中重金属有效态含量,从而减少了植物对重金属的吸收.此外,从数值上看,除对照小区植物Zn含量外(30个月),添加碳氮磷源改良剂处理小区植物地上部分重金属Cd、Cu、Pb和Zn含量均低于2005年美国国家调查委员会提出的家畜类重金属毒性限制标准($\text{Cd} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} \leq 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{Zn} \leq 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28],说明添加不同碳氮磷源改良剂处理后植物体内重金属含量在安全范围内,未对周边的野生动物和人群带来潜在风险,但今后对重金属在土壤-植物系统中的迁移、累积仍需长期监测.

表3 植物参数与尾矿基质生物化学性质的相关性分析¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficients between plant parameters and soil biochemical properties

植物参数	重金属有效态含量			
	DTPA-Cd	DTPA-Cu	DTPA-Pb	DTPA-Zn
盖度	-0.844 **	-0.949 **	-0.909 **	-0.955 **
生物量	-0.859 **	-0.757 *	-0.806 **	-0.727 *
植-Cd	-0.080	-0.090	0.186	-0.094
植-Cu	-0.088	-0.287	-0.055	-0.317
植-Pb	-0.023	-0.228	0.035	-0.250
植-Zn	0.068	-0.095	0.165	-0.112

植物参数	营养元素				
	OC	SOC	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	AP
盖度	0.859 **	0.810 **	0.614 *	0.940 *	0.551 *
生物量	0.693 *	0.629 *	0.745 *	0.694 *	0.470
植-Cd	-0.006	-0.210	0.098	0.195	0.227
植-Cu	0.187	-0.040	0.096	0.449	0.412
植-Pb	0.152	-0.059	0.001	0.366	0.373
植-Zn	0.022	-0.199	-0.040	0.236	0.270

植物参数	土壤酶活性			
	脱氢酶	β -葡萄糖苷酶	脲酶	磷酸酶
盖度	0.729 *	0.839 **	0.599 *	0.960 **
生物量	0.582 *	0.648 *	0.764 *	0.640 *
植-Cd	-0.059	-0.023	-0.418	0.148
植-Cu	0.119	0.288	-0.193	0.277
植-Pb	0.079	0.180	-0.270	0.234
植-Zn	-0.020	0.068	-0.355	0.084

1) * 表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), ** 表示表示不同处理间差异极显著($P < 0.01$)

4 结论

营养元素缺乏和重金属毒性是尾矿废弃地限制

植物生长的主要因子.添加不同碳氮磷源改良剂改良铅锌尾矿废弃地增加了尾矿基质营养元素含量和土壤酶活性;降低了尾矿中重金属有效态含量;促

进了植物在铅锌尾矿废弃地的定居和生长, 并减少了植物地上部分重金属含量. 随着恢复时间的延长, 植被盖度、生物量, 尾矿基质营养元素含量、土壤酶活性、部分重金属有效态含量以及植物重金属含量有增加的趋势. 综合分析表明, 添加碳氮磷源改良剂有利于铅锌尾矿废弃地的植被重建.

参考文献:

- [1] Karaca O, Cameselle C, Reddy K R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 2018, **17**(1): 205-228.
- [2] Sun W, Ji B, Khoso S A, *et al.* An extensive review on restoration technologies for mining tailings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(34): 911-925.
- [3] 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.
- [4] Wang L, Ji B, Hu Y H, *et al.* A review on in situ phytoremediation of mine tailings[J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 594-600.
- [5] Punia A, Siddaiah N S. Mobility and behaviour of metals in copper mine tailings and soil at Khetri, India[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, **1**: 1-6.
- [6] Forján R, Rodríguez-Vila A, Cerqueira B, *et al.* Comparison of the effects of compost versus compost and biochar on the recovery of a mine soil by improving the nutrient content[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **183**: 46-57.
- [7] Li S Q, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 1314-1323.
- [8] Li Z Y, Yang S X, Peng X Z, *et al.* Field comparison of the effectiveness of agricultural and nonagricultural organic wastes for aided phytostabilization of a Pb-Zn mine tailings pond in Hunan Province, China[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, **20**(12): 1264-1273.
- [9] Stumbea D, Chicoş M M, Nica V. Effects of waste deposit geometry on the mineralogical and geochemical composition of mine tailings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **368**: 496-505.
- [10] Santibañez C, De La Fuente L M, Bustamante E, *et al.* Potential use of organic- and hard-rock mine wastes on aided phytostabilization of large-scale mine tailings under semiarid Mediterranean climatic conditions: short-term field study[J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, **2012**: 895817.
- [11] Mignardi S, Corami A, Ferrini V. Immobilization of Co and Ni in mining-impacted soils using phosphate amendments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, **224**: 1447.
- [12] Zeng Q C, Liu Y, Fang Y, *et al.* Impact of vegetation restoration on plants and soil C; N; P stoichiometry on the Yunwu Mountain Reserve of China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, **109**: 92-100.
- [13] Acosta J A, Abbaspour A, Martínez G R, *et al.* Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study[J]. *Chemosphere*, 2018, **204**: 71-78.
- [14] Sayantan D, Sharden D. Phosphate amendments moderate the arsenate accumulation and its subsequent oxidative and physiological toxicities in *Amaranthus viridis* L. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2017, **87**(4): 1343-1353.
- [15] 李凤梅, 杨胜香, 彭禧柱, 等. 中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(11): 2114-2119.
- Li F M, Yang S X, Peng X Z, *et al.* Effects of medicinal herb residue combined with nitrogen and phosphorus fertilizers on plant growth and physico-chemical properties of a Pb/Zn mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(11): 2114-2119.
- [16] 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, 1999.
- [17] McGrath S P, Cunliffe C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, **36**(9): 794-798.
- [18] 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.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 张学霞, 朱清科, 吴根梅, 等. 数码照相法估算植被盖度[J]. *北京林业大学学报*, 2008, **30**(1): 164-169.
- Zhang X X, Zhu Q K, Wu G M, *et al.* Vegetation coverage assessment by digital photos[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, **30**(1): 164-169.
- [21] Allen S E. *Chemical analysis of ecological materials* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [22] Deng L, Shanguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**(1): 151-165.
- [23] 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.
- [24] Pardo T, Clemente R, Alvarenga P, *et al.* Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: II. Biological and ecotoxicological evaluation[J]. *Chemosphere*, 2014, **107**: 101-108.
- [25] 彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 301-308.
- Peng X Z, Yang S X, Li F M, *et al.* Effects of three industrial organic wastes as amendments on plant growth and the biochemical properties of a Pb/Zn mine tailings [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 301-308.
- [26] Yang S X, Liao B, Yang Z H, *et al.* Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: A case study from southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 427-434.
- [27] Li Y, Sun Q Y, Zhan J, *et al.* Soil-covered strategy for ecological restoration alters the bacterial community structure and predictive energy metabolic functions in mine tailings profiles [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, **101**(6): 2549-2561.
- [28] NRC (National Research Council). *Mineral tolerance of animals* (2nd ed.) [M]. Washington: National Academies Press, 2005.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)