

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

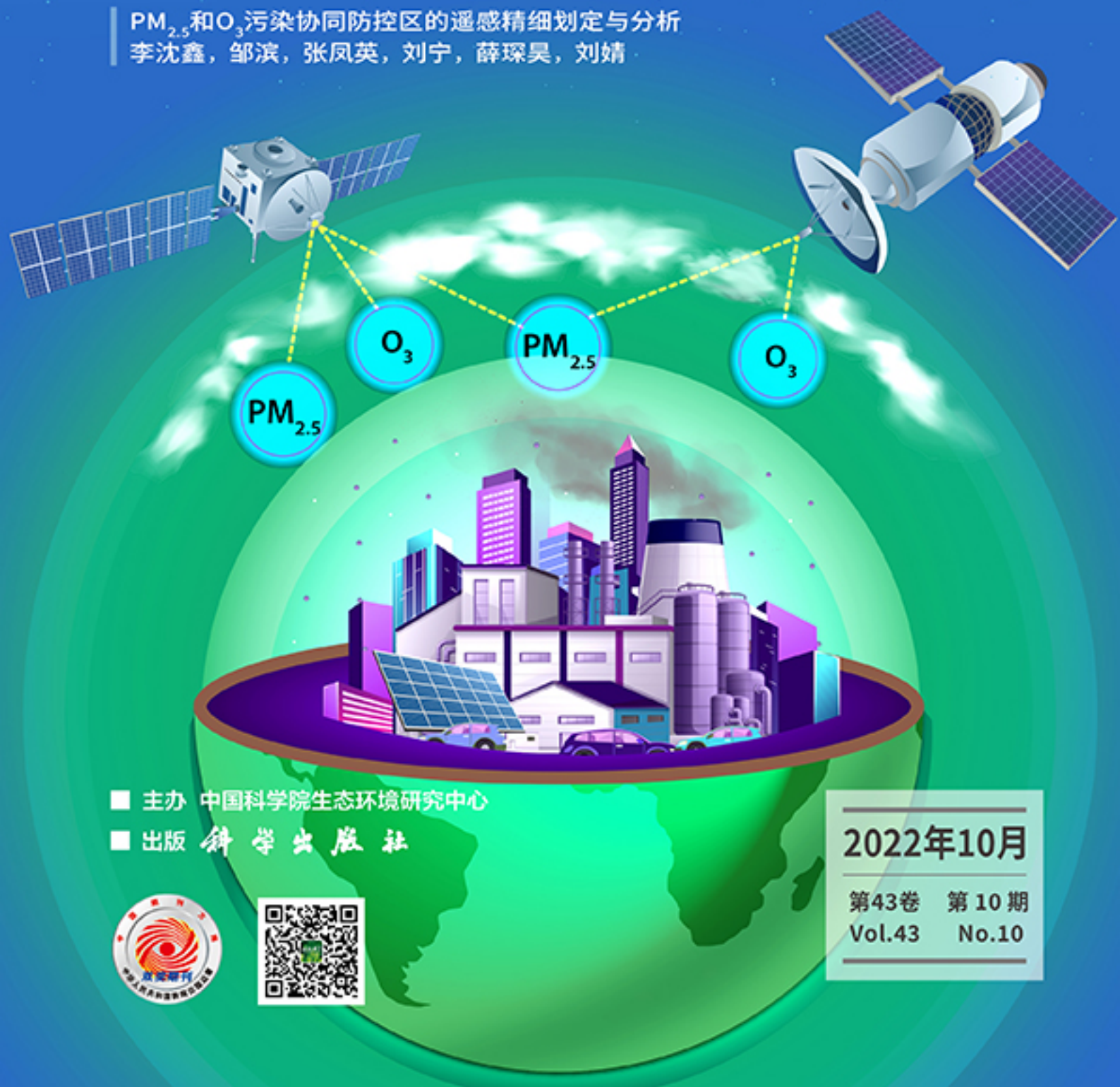
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞潼, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊烟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制

谢天志, 陈永华*, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 430003)

摘要: 植物修复是尾矿区恢复的一项生态技术, 添加基质改良剂可以减轻重金属对植物的胁迫, 提高修复效率. 以木本植物栎树 (*Koelreuteria paniculata*) 作为供试植物, 分别在 100% 尾矿 (S)、90% 的尾矿 + 5% 蘑菇渣 (SMC) + 5% CaCO₃ (MS) 和天然红壤 (RS) 中进行盆栽试验. 探究不同处理下栎树耐受 Pb 和 Zn 的生长富集效应、微观特征变化和基质中微生物多样性变化. 结果表明, 改良剂的添加相比于尾矿可以显著改善尾矿基质的理化结构, 显著提升栎树的生物量、株高和叶绿素含量等相关生理指标, 增加栎树中积累的重金属含量. 处理组 MS 相较于对照组 RS 总根长增长达到 69.3%, 而对照组 RS 平均根径相较于对照组 S 下降 118.7%. 处理组 MS 与对照组 S 相比, Pb 和 Zn 残渣态增加 266.67%, 弱酸可提取态和氧化物结合态显著降低, 重金属对于植株迁移活性减弱. 同时, 多数重金属被栎树截留在根部, 其根系构型的变化表明其在面对高浓度的 Pb 胁迫时具有较强的适应性. 透射电镜 (TEM) 分析表明, 对照组 S 中较高浓度的重金属含量会破坏细胞壁结构, 对植物细胞造成毒害. 改良剂的添加有效缓解了重金属胁迫对栎树各组织的影响, 影响微生物群落的结构, 显著提高微生物丰富度和多样性, 增强栎树对重金属的适应性和植物修复能力.

关键词: 木本植物; 改良剂; 铅锌矿; 微生物多样性; 耐性机制

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4687-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112264

Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in *Koelreuteria paniculata*

XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua*, SU Rong-kui, LIU Hui, YAO Hai-song

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 430003, China)

Abstract: Phytoremediation is an ecological technique for tailing area restoration; adding substrate modifiers can reduce the stress of heavy metals on plants and enhance the restoration efficiency. The woody plant *Koelreuteria paniculata* was used as a test plant and potted in 100% tailings (S), 90% tailings + 5% mushroom residue (SMC) + 5% CaCO₃ (MS), and natural red soil (RS). The effects of physiological responses and tolerance enrichment effects on Pb and Zn tolerance in *K. paniculata* under different treatments were investigated to compare the growth morphology, microscopic morphological changes, and microbial diversity changes in each substrate of *K. paniculata* seedlings. The results showed that compared with the control group S, the MS treatment group could significantly improve the structure and fertility of the tailing substrates; significantly enhance the relevant physiological indicators such as biomass, plant height, and chlorophyll content of *K. paniculata*; and increase the accumulated heavy metal content in *K. paniculata*. In the treatment group, the overall physiological indexes of MS compared to RS biomass and plant height were promoted, and the total root length increased up to 69.3%, whereas the average root diameter of RS in the treatment group decreased 118.7% compared to that in the control group S. The MS treatment group showed a 266.67% increase in Pb and Zn residue state, a significant decrease in the weak acid extractable state and oxide-bound state compared to that in the control group S. The heavy metals were less active for plant migration. Furthermore, most of the heavy metals were trapped in the roots of *K. paniculata*, and the changes in its root conformation indicated its strong adaptability in the face of high Pb stress. Transmission electron microscopy (TEM) analysis showed that the higher concentration of heavy metals in the S control damaged the cell wall structure and caused toxic effects on plant cells. The addition of the modifier effectively alleviated the effects of heavy metal stress on various tissues of *K. paniculata*, affected the structure of microbial communities, significantly increased microbial richness and diversity, and enhanced the adaptability of *K. paniculata* to heavy metals and phytoremediation ability.

Key words: woody plants; modifiers; lead and zinc ore; microbial diversity; tolerance mechanism

重金属污染已成为全世界关注的环境问题之一^[1]. 重金属尾矿是有色金属矿山开采后选矿过程中排放的固体废弃物, 排出后一般堆放在尾矿库内, 闭库后形成尾矿废弃地^[2], 其不仅占用大量土地, 多种金属毒性并存, 导致植物难以生长^[3]. 同时, 尾矿及其废弃物通过地表径流, 淋滤和渗流等方式进入到水体环境和土壤环境中^[4,5]. 土壤重金属会破坏植物根系组织及功能特性, 并通过食物链富集在动植物体内^[6], 进而进入到人体, 对神经、生殖和消化系统等造成不同程度损害^[7]. 重金属土壤污染问题已成为危及矿区及周边生态环境安全和人体健康的重要因素, 是需要迫切解决的环境难题^[8].

植物修复是利用植物生命代谢, 积累或固定土壤中重金属元素, 以减弱其危害的一种生物修复技术^[9-11]. 这种环境修复技术兼具环境友好, 经济性的特点, 防止通过扬尘和灌溉的方式污染周边土壤. 目前, 植物修复主要关注修复植物筛选与改良剂配置两个方面, 植物筛选研究主要集中在超富集植

收稿日期: 2021-12-27; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52000183); 湖南省教育厅资助科研项目 (20A523); 湖南省生态环境厅环保科研项目 (HBKT-2021029); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目 (CX20202050)

作者简介: 谢天志 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态修复矿山重金属, E-mail: xtz666999@163.com

* 通信作者, E-mail: chenronghua3333@163.com

物^[12]. Pb 和 Zn 超富集植物研究多局限在草本和灌木,受到季节地域的影响较大,很难应用在大型的污染尾矿中^[13]. 相对而言,乔木植物具有生物量大、根系发达等生理优势. 铅锌尾矿区土壤重金属复合污染严重、养分贫瘠和持水性能差,污染矿区植物生长环境恶劣^[14],植被修复十分困难. 因此,可以通过铅锌尾矿中添加改良剂来辅助植物在恶劣土壤环境下生长,该技术的核心思想是通过辅助措施,在重金属尾矿上重新建立植被,并促使它们逐步演替成为能独自维持的和稳定的生态系统,从而实现将重金属污染长期固定在原地^[15].

在污染环境或退化的生态系统中,增强生态系统的功能显得尤为重要^[16]. 以尾矿废弃基质作为新形成的生态系统. 本课题组前期进行了多种乔木用于修复土壤重金属污染筛选^[17],发现乔木栎树耐性效果良好;也进行了改良剂的配置研究,发现有机-无机复合改良剂效果较好,有机改良剂具有丰富的表面官能团和疏松多孔结构,施用可以增加土壤肥力,降低重金属毒性的作用^[18],无机改良剂碳酸钙等碱性物质与土壤中重金属形态分布与土壤 pH 有着密不可分的关系^[19],两者结合具有很好的协同改

良作用. 其中以有机蘑菇渣(SMC)与无机 CaCO₃ 配置的复合改良剂效果最佳,经济性良好^[20,21]. 基于以上基础;本研究以乔木栎树幼苗为供试植物,进行铅锌尾矿改良对比的尾矿生物修复试验,以期为铅锌尾矿污染风险管控和修复治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

栎树(*Koelreuteria paniculata*)购置于河南某苗圃,为株高 80 cm 左右的幼苗. 蘑菇渣购置于湖南长沙花卉市场. 红壤取自于中南林业科技大学生态站,选取未被重金属污染的表土层(0~30 cm). 尾矿矿渣取自于湖南省资兴市的某铅锌矿尾矿库.

1.2 试验设计

选取生长一致的栎树幼苗盆栽种植. 分别在 100% 尾矿(S)、90% 的尾矿 + 5% 蘑菇渣(SMC) + 5% CaCO₃(MS)和 100% 红壤(RS)中进行盆栽试验. 每盆基质储量 8 kg 栽种 1 株栎树,每组设置 10 个平行. 试验时间为 6 个月. 盆栽试验在中南林业科技大学苗圃内进行,年平均降水量为 1 361.6 mm,年平均温度为 17.2℃. 各基质理化性质见表 1 和表 2.

表 1 盆栽试验基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties for potting test

处理组	pH	容重/g·cm ⁻³	土壤孔隙度/%	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	有机质含量/%
S	7.75 ± 0.41	1.22 ± 0.15	51 ± 6.02	93.13 ± 2.55	1.41 ± 0.11
RS	8.5 ± 0.02	1.08 ± 0.07	22.4 ± 3.50	55.4 ± 1.71	0.11 ± 0.06
MS	7.69 ± 0.06	1.14 ± 0.12	44 ± 8.51	89.37 ± 3.84	1.61 ± 0.04

表 2 盆栽试验基质重金属含量¹⁾

Table 2 Pot test substrate heavy metal content

处理组	重金属含量/mg·kg ⁻¹			
	Pb	Zn	Cu	Cd
S	2 651.14 ± 82.20a	793.61 ± 7.87a	73.23 ± 4.33a	21.27 ± 1.17a
RS	60.41 ± 0.68b	126.23 ± 2.01b	19.02 ± 0.51b	0.47 ± 0.05b
MS	2 725.75 ± 17.73a	804.62 ± 1.45a	78.47 ± 0.97a	22.98 ± 0.24a

1) 同列不同字母表示不同处理下栎树重金属含量差异显著($P < 0.05$)

1.3 样品处理与分析

1.3.1 土壤理化性质测定

采用水合热重铬酸钾氧化-比色法^[22]测定有机质含量;pH 酸度计测定土壤 pH;采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定阳离子交换量;土壤基质含水率和容重分别采用烘干法和环刀法测定.

1.3.2 生长指标测定及重金属含量测定

用卷尺测定栎树幼苗从根颈到茎顶端的长度;称重法测定生物量干重,将植物的根、茎和叶置于 105℃ 烘箱内杀青 30 min,调温至 75℃,烘至恒重,通过电子天平称取种植前与收获时的栎树幼苗生物量,取其差值;根系形态构型参数的设置,通过

(WinRHIZO PRO 2007, USA)根系分析系统软件分析根长和表面积等. 土壤和植物样品均采用湿法消解.

1.3.3 生理生化指标测定

用 UV-5100 型紫外可见分光光度计对植物叶片叶绿素含量进行测定.

1.3.4 植物微观结构分析

新鲜植物的根、茎和叶用超纯水洗净,切成颗粒状(2 mm × 2 mm × 2 mm),置于 4℃ 的 2.5% 戊二醛溶液中保存,并委托中南大学采用(HITACHI H-7650, Japan)透射电子显微镜进行测定.

1.3.5 基质土壤细菌转录组测序分析

PCR 扩增采用(TransGen Biotech, Pfu 高保真

DNA 聚合酶, China), 荧光定量仪器为 Microplate reader (BioTek, FLx800, USA), 采用 (Illumina, TruSeq Nano DNA LT Library PrePKit, USA) 制备测序文库. 委托杭州研趣信息技术有限公司对高通量测序的原始下机数据根据序列质量进行初步筛查.

1.4 数据分析方法

试验数据采用 Excel 进行数据转换统计, 使用 SPSS 22.0 统计软件进行单因素方差分析测试, 使用 Origin 2018 图表制图.

2 结果与分析

2.1 3 种基质处理下对栎树生长的影响

2.1.1 对株高增量与生物量增量的影响

不同基质对栎树株高和生物量的变化影响, 如表 3 所示, 株高呈现出 MS > RS > S 的趋势, 总生物量为 MS > S > RS 的趋势. 同时, 不同基质下栎树存活率略有差异, MS 和 RS 基质培养未出现死亡现

象, 而 S 基质培养栎树死亡率达 20%. 处理组 MS 各项生理指标均高于其他两组, 比对照组 S 平均株高增加 38.11%, 茎和叶生物量分别增加 99.6% 和 118.4%, 具有显著促进生长作用. 处理组 MS 和对照组 S 根部无显著差异, 但均显著重于对照组 RS 48.4% ($P < 0.05$).

2.1.2 对栎树根结构的影响

3 种基质对栎树的根系构型产生了不同影响, 如表 4 所示, 与对照组 S 相比, 处理组 MS 的总根长增加了 59.8%, 总表面积增加了 47.15%, 总根数增加了 57.28% ($P < 0.05$). 表明添加 SMC 和 CaCO_3 可以缓解重金属对根系的毒害作用, 促进根系生长. 在平均根径方面, 对照组 S 和处理组 MS 及 RS 相比增加了 37.9% 和 121.9%. 可以看出, 生长在原生矿区的栎树在面对高浓度的重金属胁迫时, 会通过增厚平均根茎来减少比表面积的物理策略应对根系的生理逆境.

表 3 3 种基质条件下栎树生物量变化¹⁾

Table 3 Changes in biomass of *K. paniculata* under three substrate conditions

处理组	平均高度/cm	总生物量/g	根生物量/g	茎生物量/g	叶生物量/g
S	74.33 ± 1.53b	18.12 ± 1.51ab	8.43 ± 1.33a	7.29 ± 2.18b	2.39 ± 0.33b
RS	82.03 ± 5.57b	15.62 ± 1.74c	4.49 ± 0.53b	9.04 ± 0.53b	2.07 ± 0.71b
MS	102.66 ± 7.57a	28.11 ± 8.55a	8.35 ± 2.27a	14.55 ± 4.18a	5.22 ± 2.16a

1) 同列不同字母表示不同处理下栎树生长指标差异显著 ($P < 0.05$)

表 4 3 种基质条件下栎树根系构型变化¹⁾

Table 4 Root system conformation variation of *K. paniculata* under three substrate conditions

处理组	根长/cm	根表面积/cm ²	表面积/cm ²	平均根径/mm	总根数
S	1 106.77 ± 202.48b	688.12 ± 223.49b	29.48 ± 13.38a	1.81 ± 0.275a	12 046.70 ± 3 398.31b
RS	1 044.71 ± 160.94b	266.61 ± 39.40c	5.75 ± 0.77b	0.82 ± 0.015b	8 243.70 ± 546.27b
MS	1 768.88 ± 327.82a	1 012.56 ± 113.41a	41.43 ± 7.32a	1.39 ± 0.365a	18 947.30 ± 2 781.61a

1) 同列不同字母表示不同处理下栎树重金属含量差异显著 ($P < 0.05$)

2.1.3 3 种基质对栎树叶绿素含量影响

3 种基质下栎树叶绿素含量变化, 如图 1 所示, 处理组 RS 与对照组 MS 相比, 叶绿素 a 含量增加 13.5% 和叶绿素 b 含量增加 12.1%. 3 种基质生长下栎树叶绿素 a/b 的含量波动在 3% 以内, 表明栎树仍然能够通过稳定叶绿素 a/b 值来维持其生长, 以提高在高水平 Pb 胁迫下的光能利用效率. 在叶绿素含量上, 处理组 MS 与对照组 S 含量相当, 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素分别增长 3.8% 和 2.3% 和 9.7%.

2.1.4 3 种基质胁迫下栎树对 Pb 和 Zn 的富集能力分析

如表 5 所示, 通过 3 种基质处理对栎树 Pb 和 Zn 富集量可知, 栎树对 Pb 和 Zn 的吸收主要集中在根部. 栎树各器官中 Pb 含量均呈现 MS > S > RS 的

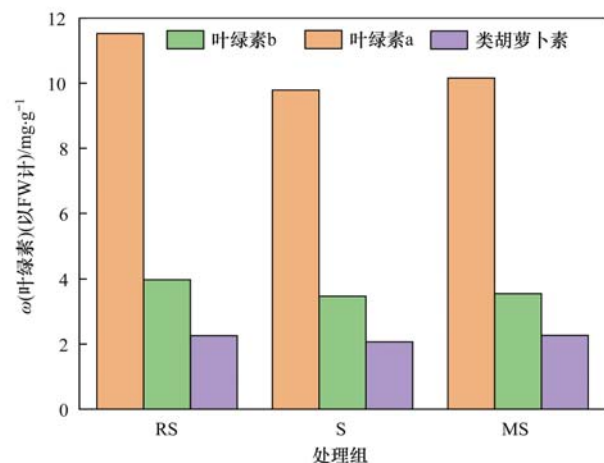


图 1 3 种基质下栎树叶片中叶绿体含量变化

Fig. 1 Changes in chloroplast content in *K. paniculata* leaves under three substrates

趋势. 处理组 MS 对比对照组 S, Pb 转运系数显著提升近 100%, 说明 SMC 和 CaCO_3 施加会通过增加生物量来提高对 Pb 的积累转运能力. 处理组 MS 中 Zn 转运系数与对照组 S 基本持平, 其原因可能是 Zn 是

植物必需的生长微量元素, 同时是叶绿体的重要组成元素, 栲树体内通过 Zn 转运蛋白主动运输, 往叶片中转运积累 Zn 提高光合作用, 这也导致 Zn 的积累量远高于 Pb.

表 5 3 种基质对栲树重金属富集含量¹⁾

Table 5 Enrichment of heavy metals in *K. paniculate* seedlings using three substrates

重金属	基质	根	茎	叶	转运系数
Pb	RS	27.54 ± 2.38c	18.32 ± 3.42b	7.05 ± 1.78c	—
	S	215.18 ± 10.92b	60.45 ± 14.01a	45.11 ± 4.66b	0.31 ± 0.1b
	MS	263.53 ± 23.53a	71.56 ± 12.19a	57.87 ± 6.87a	0.62 ± 0.11a
Zn	RS	67.03 ± 7.08b	43.32 ± 7.91b	23.32 ± 2.17c	—
	S	540.33 ± 3.65a	60.16 ± 5.14b	95.56 ± 10.71b	0.46 ± 0.18b
	MS	499.81 ± 48.43a	89.30 ± 12.19a	118.7 ± 10.16a	0.47 ± 0.19a

1) 同列不同小写字母表示不同处理下栲树重金属含量差异显著 ($P < 0.05$); 转运系数无量纲, 其余数值的单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

2.2 3 种基质中 Pb 和 Zn 的形态分布

各基质中 Pb 和 Zn 的形态分布, 如图 2 所示, 铅锌重金属形态变化趋势趋同, 处理组 MS 能降低铅锌尾矿中 Pb、Zn 弱酸可提取态及氧化物结合态含量, 对比对照组 S 分别降低 50.75% ~ 56.68% 和 21.56% ~ 27.6%, 同时显著增加残渣态 Pb 和 Zn 含量, 使残渣态 Pb 和 Zn 分别增加了 165.71% ~ 184.06% 和 140.12% ~ 246.95%, 其中有机结合态 Pb 和 Zn 含量的变化不明显. 残渣态 Pb 和 Zn 的增幅均达到显著水平 ($P < 0.05$).

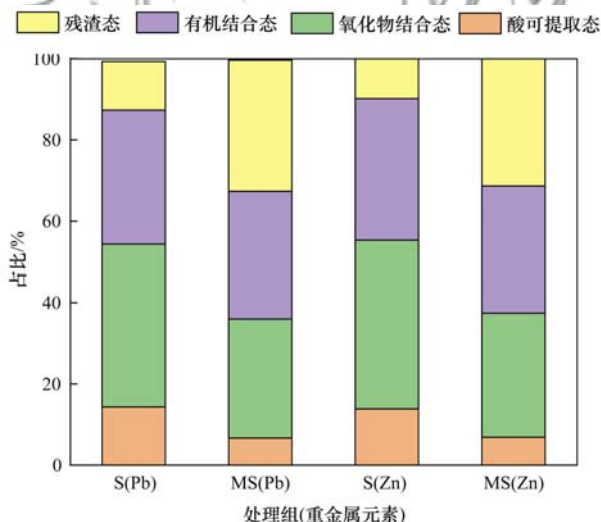


图 2 重金属 Pb 和 Zn 在 MS 和 S 处理组的占比分布

Fig. 2 Distribution proportions of heavy metals Pb and Zn in MS and S treatment groups

2.3 3 种处理胁迫下栲树的根、茎和叶微观结构分析

如图 3 所示, 栲树组织微观结构显示在对照组 RS 中, 根[图 3(a)]、茎[图 3(b)]和叶[图 3(c)]细胞整体结构完整, 细胞膜完整平滑, 细胞器未见受损. 叶片细胞叶绿体完整, 细胞排列规整, 细胞间隙空白清晰可见. 对照组 S 中, 根和茎细胞中均未见明显累积物[图 3(d)和 3(e)], 细胞壁整体结构完整,

但根茎细胞壁较 RS 处理明显增厚, 根细胞出现轻微质壁分离现象, 细胞器未见受损. 叶片细胞中叶绿体含量出现减少且细胞壁出现扭曲裂痕[图 3(f)]. 处理组 MS 中, Pb^{2+} 附着在根细胞壁内侧[图 3(g)], 细胞膜发生扭曲变形现象, 细胞壁上出现区别于大颗粒物质淀粉粒(SG)的细小黑色颗粒, 可能为重金属颗粒的沉淀^[23]. 茎细胞受损程度好于根细胞[图 3(h)], 未见大量 Pb^{2+} , 细胞形态完好. 叶细胞结构完好[图 3(i)], 排列规整, 细胞间隙清晰可见, 未堆积 Pb^{2+} 离子, 但细胞内部却积累了少量的细小颗粒物质.

2.4 3 种处理胁迫下栲树根际细菌多样性分析

2.4.1 物种组成分类单元数统计

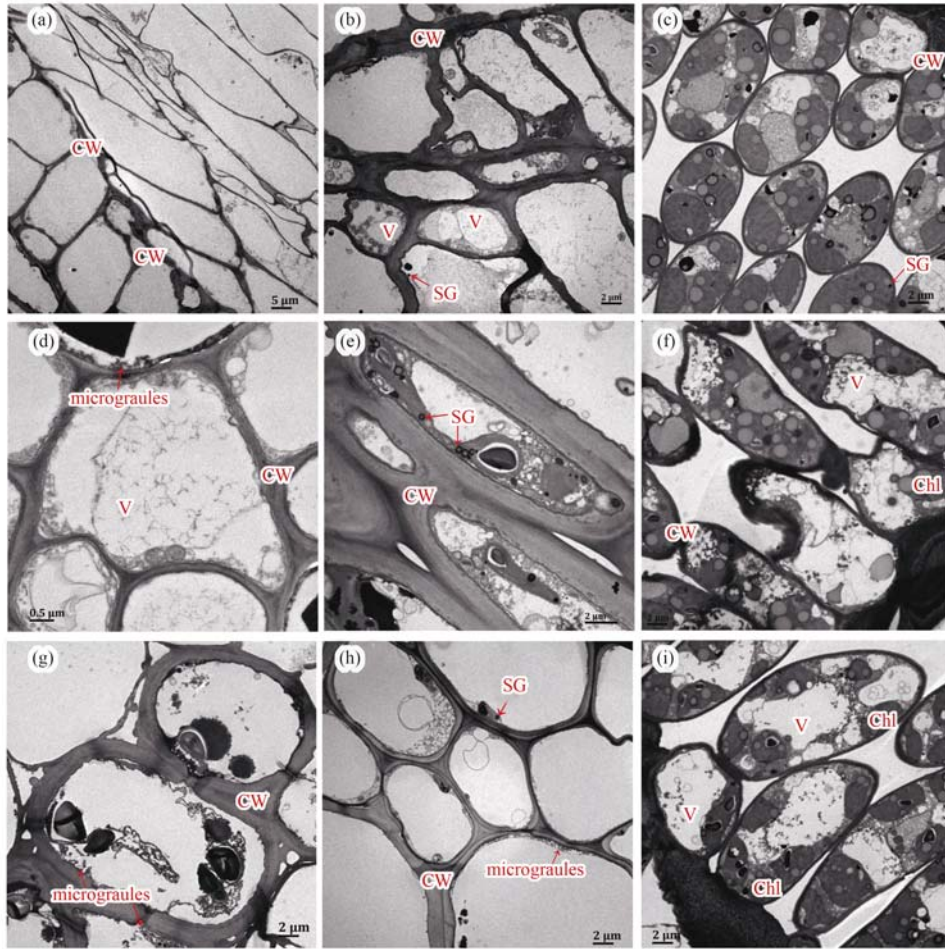
各分类水平所含有的分类单元的数目如图 4 所示, RS 基质中细菌群落类别最丰富, 在属、科分类水平中高于 MS 基质 17.3% 和 21.3%. MS 基质中引入 SMC, 在种、属分类水平高于 S 基质 65.1% 和 11.7%, 而在更高分类水平的比较中, 数量差别较小. 原尾矿渣由于本身的土壤性质, 微生物各门类数量处于最低水平.

2.4.2 分类学组成分析

各样本在属的分类水平上, 如图 5 所示: MS 基质中 SMC 提高矿渣中的微生物丰富度. 对比 S 基质, MS 中 *A4b* 属型细菌相对丰度大幅增多, *Blrii41* 从无到占据一定比例水平, *Subgroup_10* 相对丰度提升明显. RS 基质中各属分布较为均匀, 与基质 MS 和 S 相比, *Subgroup_6* 属丰度含量保持高位水平, *Thiobacillus* 属是矿渣中特有存在的.

2.4.3 丰度等级曲线

丰度等级曲线对于微生物群落样本而言, 可以直观地反映群落中高丰度和稀有 ASV/OTU 的数量. 折线的平缓程度, 反映了群落组成的均匀度, 折线越平缓, 则群落中各 ASV/OTU 间的丰度差异越



(a) ~ (c) 分别表示红土基质培植下的根、茎和叶细胞的微观结构; (d) ~ (f) 分别表示矿渣基质培植下的根、茎和叶细胞的微观结构; (g) ~ (i) 分别表示矿渣添加改良剂处理下的根、茎和叶细胞的微观结构; CW: 细胞壁, SG: 淀粉粒, Cyt: 细胞质, V: 液泡, micrograules: 颗粒物质, Chl: 叶绿体

图 3 不同基质对栲树组织微观结构的影响

Fig. 3 Effect of different substrates on the tissue microstructure of *K. paniculate*

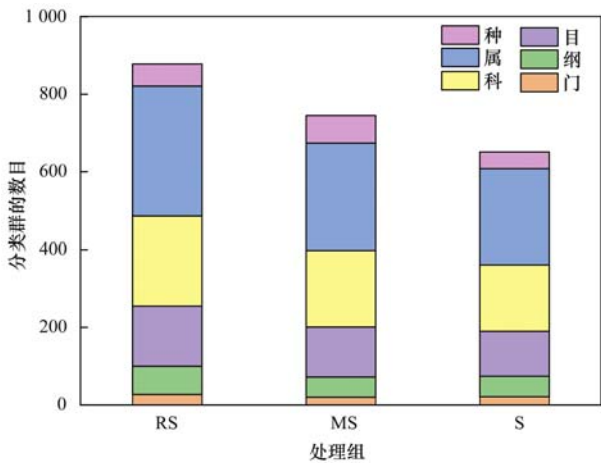


图 4 各水平微生物分类单元数统计

Fig. 4 Statistical chart of the number of microbial taxonomic units at each level

小, 群落组成的均匀度越高, 折线越陡峭, 则均匀度越低. 如图 6 所示, 对照组 RS 折线趋于平缓, 各细菌群落差异较小, 生物多样性较为丰富, 这与属水平物种组成柱状图呈现结果吻合, 处理组 MS 折线相

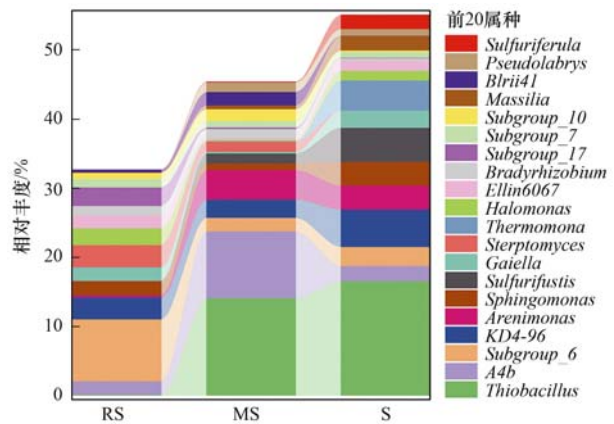


图 5 物种属水平组成

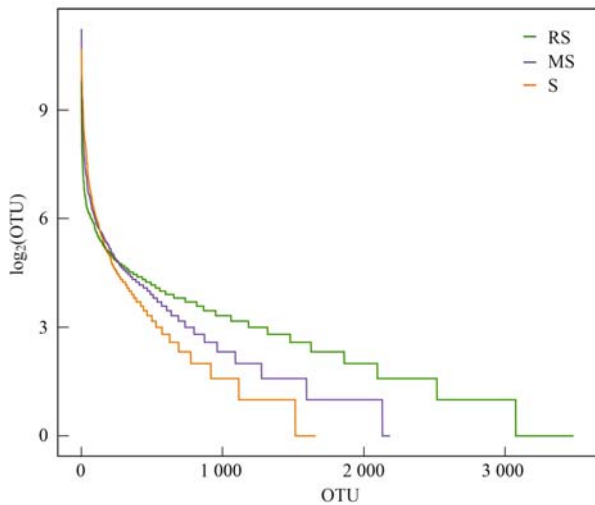
Fig. 5 Histogram of species composition at the genus level

对于对照组 S 来说较为平缓, 已明显改良了土壤微生物群落结构, 而对照组 S 曲线下降速率最快, 表明样本中优势菌群所占比例高, 微生物多样性低.

2.4.4 物种组成热图

物种聚类的属水平物种组成, 如图 7 所示, 样本按照物种组成数据的欧式距离 (Euclidean distance)

进行 UPGMA 聚类,并根据聚类结果排列;否则按照样本的分组或默认顺序排列.在对物种聚类的图中,



横坐标为按丰度大小排列的 OTU 的序号;纵坐标为每个 OTU 在该样本(组)中的丰度(均值)的 log₂(OTU) 对数值;折线在横轴上的长度反映了该样本(组)在该丰度中的 ASV/OTU 数

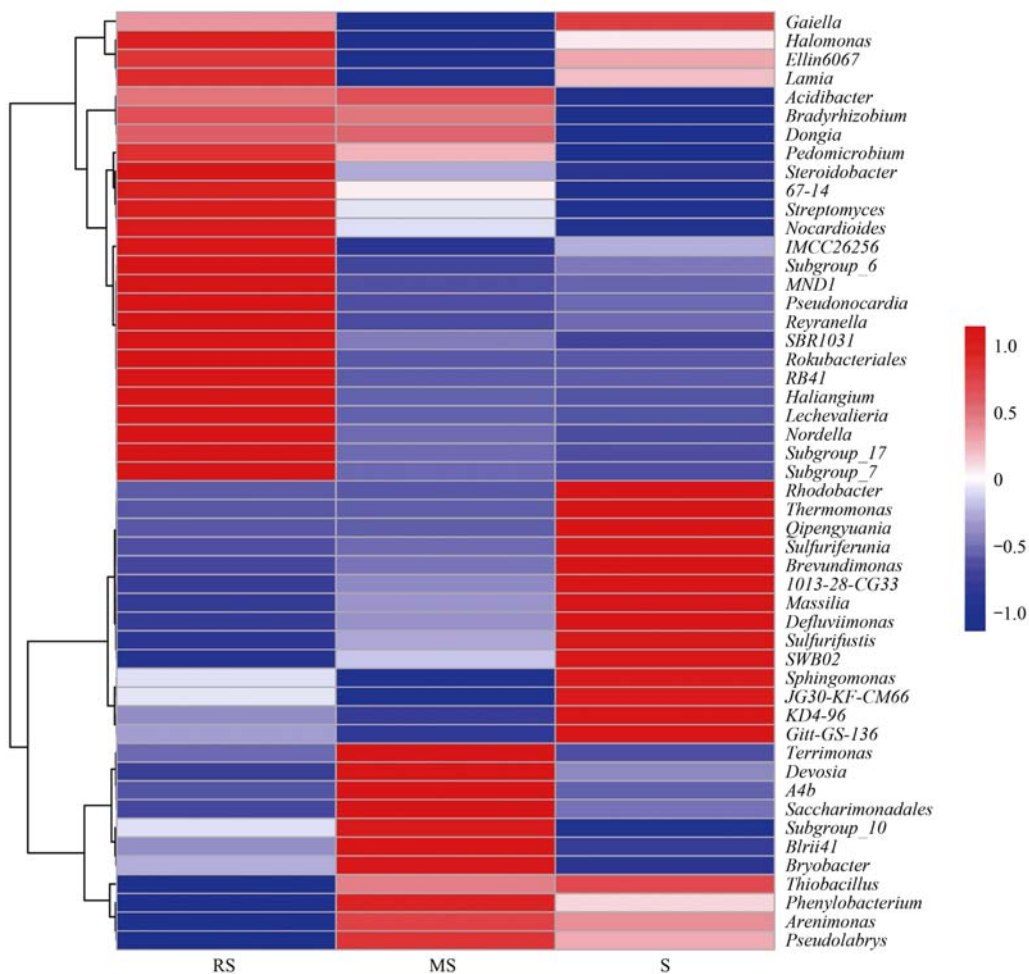
图 6 丰度等级曲线

Fig. 6 Abundance class curve

默认物种按照其组成数据的 Pearson 相关性系数矩阵进行 UPGMA 聚类,并根据聚类结果排列;否则按照物种在样本中的平均丰度排序.为了进一步比较样本间的物种组成差异,实现对各样本的物种丰度分布趋势的展示,本研究中,使用属水平的分类单元组成作为分析对象,因此本文默认使用平均丰度前 50 位的属的丰度数据绘制热图,如图 7 所示. MS 与 S 基质微生物群落属水平同源性强.局部种类出现差异变化,S 基质中微生物属较为集中,优势菌群明显. MS 基质中特有的细菌属热区,很可能是 SMC 施加带入的,它改变了原有的 Pb 重金属矿渣中微生物结构特征,削弱了原有矿渣中微生物的优势地位,并丰富了基质中的微生物种类. RS 基质中菌落整体丰富且均衡.

2.4.5 代谢通路

本试验中,统计了在对照组 S 和处理组 MS 中差异基因序列,如图 8 所示,基因信息数量高达 34 398 条 KEGG 同源序列 (KEGG ortholog group, KO). 在第一层级 (Level 1) 主要有 6 类丰度较高的基



红色块表示该属在该样本中的丰度较其他样本高,蓝色块表示该属在该样本中的丰度较其他样本低

图 7 物种聚类的属水平物种组成热图

Fig. 7 Heat map of species composition at the genus level for species clustering

因功能,按丰度前三依次为:新陈代谢(metabolism)、遗传信息处理(genetic information processing)和细胞转化(cellular processes),前3类功能的丰度之和超过92.4%。在所有细胞组分类别中所含差异基因数量位居前3位,主要包括氨基酸代谢(amino acid

metabolism)5 457条,碳水化合物的代谢(carbohydrate metabolism)5 427条,辅料和维生素的代谢(metabolism of cofactors and vitamins)5 005条等。在遗传信息处理类别中,复制和修复(replication and repair)所含差异表达基因最多(2 073条)。

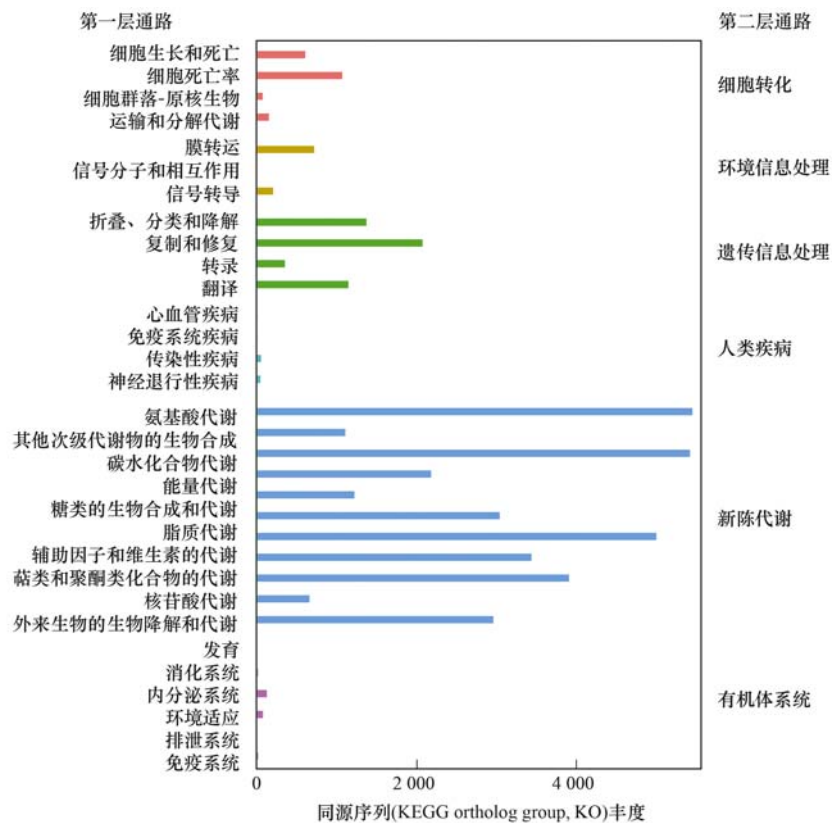


图8 预测的KEGG二级功能通路丰度

Fig. 8 Predicted KEGG secondary functional pathway abundance map

3 讨论

3.1 对栎树生理指标的比较

处理组 MS 栎树生长(株高、生物量和根长)均呈现正向作用。根系作为土壤中接触重金属危害的器官,胁迫5月后,对照组 S 对比处理组 MS,栎树根形态参数(总根长、总根数和根表面积)显著下降,表明矿渣胁迫会减少细胞分裂和伸长,可能会通过改变其增长率和调节构型快速吸附 Pb^[24]。处理组 MS 对根系的促进生长作用明显。而对照组 S 较于 RS,根系生物量不降反增,因此植物对 Pb 的吸收很大程度上取决于根系本身特征^[25]。对照组 S 平均根径显著增加,可能是通过增加表皮和非原生质屏障的厚度来保护根细胞免受重金属的毒害^[26]。同时,根部内皮细胞强化和凯氏带屏障也是根部抵抗重金属离子的重要机制^[27]。本试验表明:栎树通过根系构型变化,利用物理规避策略减少重金属危害,将多数的重金属污染物截留在根部^[28],从一定程度说明栎树具有较强的适应 Pb 污染能力,可能是地上组织

没有明显重金属毒害症状的原因之一。

与处理组 MS 相比,对照组 S 栎树幼苗叶绿素含量有一定程度的下降,但差异不明显,说明在铅锌矿渣胁迫下叶绿素的合成阻碍较小。此外,栎树的叶绿素 a/叶绿素 b 没有明显差异,说明其没有受到光抑制。这可能是由于不同植物对重金属胁迫的反应机制不同^[29]。Rossato 等^[30]的研究发现叶绿素 b 受 Pb 胁迫的影响比叶绿素 a 大,说明长期的 Pb 胁迫对叶绿素合成的启动剂甘氨酸的影响可能较小。类胡萝卜素在生物体内具有十分重要的生理功能,它是植物光合作用的辅助色素,在保护细胞免受强光,活性氧和敏化色素的有害影响中起到重要的作用^[31],显示出很少的变化。这种现象的原因可能是长期的土壤培养试验使栎树逐渐适应了 Pb 的刺激,这证明栎树对铅锌矿有很好的适应性。

3.2 改良剂对栎树重金属积累效果分析

植被恢复是控制尾矿中重金属毒性及其传播的有效途径之一,植被恢复的目的不是清除土壤中的重金属,而是通过植物根际作用将重金属离子固定

下来,以降低其生物有效性和移动性^[32]. Pb 在植物组织中的浓度与土壤或水中 Pb 的浓度显著相关,在水培单一 Pb 胁迫试验中得到了验证^[33]. 处理组 MS 相较于对照组 S,提升了栎树各部位的 Pb 积累量, Zn 的整体富集趋势与 Pb 相似,但其富集量要大于 Pb,可能与 Zn 是植物必需的生长微量元素有关. 栎树整体变得更具有重金属富集潜力,其转运系数(TF)低于 1,栎树 TF(Pb)高于 *Morus alba*^[34],与 *Erythrina speciosa*(TF 为 0.37~0.56)和 *Schizolobium parahyba*(TF 为 0.27~0.47)相似^[35]. 相较对照组 S,对照组 MS 具有提高有机质含量,降低重金属的有害形态,增加 Pb 残渣态比例等诸多促进生长优势,使植物生长状态更为良好,富集含量提升,Pb 耐受能力进一步提升,这是 SMC 和 CaCO₃ 改良效果的突出表现.

土壤中不同形式的重金属在迁移能力和活性方面会存在明显差异^[36]. Pb 和 Zn 氧化物结合态和酸可提取态具有较强的转移能力,其次是不溶解的磷酸盐形式,残渣态转移能力最低. 在加入改良剂后,草酸盐形式和残渣态的比例增加,表明被转移为弱迁移活性的形式,降低了 Pb 和 Zn 对植物的毒性^[37]. 以上研究表明,加入改良剂可以将 Pb 和 Zn 转移到弱迁移活性中,固定重金属,并降低了其对栎树的毒性,促进植物生长.

3.3 栎树根际细菌多样性分析

土壤微生物可以通过价态转化、生物吸附和细胞外化学沉淀减少或消除重金属在土中的危害^[38],形成重金属累积效应^[39,40],是维持土壤生物学特性的重要组成部分. 其中微生物群落和多样性的变化可用来研究复合改良剂对重金属污染土壤的生态调节作用^[41]. 通过微生物多样性检测分析,3 种基质胁迫下物种组成成分单元数排序为:RS > MS > S,红壤中包含的微生物门类最多,各细菌群落分布均匀,生物多样性较为丰富,土壤基质内代谢功能良好. S 基质中细菌微生物趋于单一化,在此含重金属毒性基质中,微生物通过长期的自然选择,少数菌群被筛选存活,生存优势明显. 在分类学组成分析中,发现 MS 与 S 基质中,微生物群落种类只存在局部差异,改良剂的添加会引入新的菌群;如: *Strotomyces* 菌是重金属污染土壤及耐性植物根际的优势菌群,这类细菌对调节植物耐受重金属及吸收积累重金属具有重要作用^[42]. *Strotomyces* 能通过产生内生芽孢和孢子增强对外界不良环境的耐受性. 并可在尾矿渣中生存. 因此,改性剂对微生物丰富度有促进作用. 原矿渣优势群落被新引入群落取代,显著优化了铅锌矿的微生物群落结构,微生物种类更

丰富,其生存特征可能与蘑菇渣有机质引入和栎树生理效应综合形成有关,可进一步深入探究.

4 结论

(1) 通过基质改良发现 MS 处理组 SMC 和 CaCO₃ 可以改善尾矿理化性质,明显降低铅锌矿渣中 Pb 和 Zn 弱酸可提取态及氧化物结合态含量,同时显著增加残渣态 Pb 和 Zn 含量,增强栎树对尾矿耐受性.

(2) 栎树对 Pb 和 Zn 的吸收主要集中在根部. 铅锌尾矿胁迫会抑制栎树的生长发育,对栎树体内细胞造成伤害,破坏叶绿体结构,抑制光合代谢过程,此时植物会改变根系结构抵御逆境.

(3) MS 基质可以有效缓解重金属胁迫对栎树各组织的影响. 栎树在 MS 处理组生长良好,各部位 Pb 积累量提升,根系生长和转移系数增加,耐铅锌尾矿能力增强. 细胞壁的固定作用是栎树耐 Pb 的重要原因,添加 SMC 和 CaCO₃ 改性剂可以增强细胞壁与液泡内物质结合 Pb 的能力,减轻 Pb 对细胞的损伤.

(4) 铅锌矿矿渣中群落微生物多样性较低,而 SMC 和 CaCO₃ 添加则显著提高菌群的丰度和多样性,维持土壤生物学特性,一定程度上影响微生物群落的结构,为植物提供优于原始矿渣的生长条件,但微生物的改良具体机制还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Li Z R, Deblon J, Zu Y Q, et al. Geochemical baseline values determination and evaluation of heavy metal contamination in soils of lanping mining valley (Yunnan Province, China) [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**, doi: 10.3390/ijerph16234686.
- [2] 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.
- [3] Wang P, Sun Z H, Hu Y A, et al. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
- [4] 石慧斌,唐亮,陈葵,等. 钒钛磁铁矿尾矿重金属铅与锌的浸出规律研究[J]. 环境科学与管理, 2020, **45**(11): 68-73. Shi H B, Tang L, Chen Y, et al. Pb, Zn leaching law in vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Environmental Science and Management, 2020, **45**(11): 68-73.
- [5] Chen T, Yan B, Lei C, et al. Pollution control and metal resource recovery for acid mine drainage[J]. Hydrometallurgy, 2014, **147-148**: 112-119.
- [6] 史燕南,占川,张超杰,等. 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, **41**(2): 89-94. Shi Y N, Zhan C, Zhang C J, et al. Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance

- [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, **41**(2): 89-94.
- [7] 刘焕, 张昆. 矿山重金属污染研究现状及修复技术展望[J]. *云南地质*, 2018, **37**(1): 117-121.
Liu H, Zhang K. The present study situation and recovery prospect of heavy metal pollution of mine[J]. *Yunnan Geology*, 2018, **37**(1): 117-121.
- [8] 熊秋林, 肖红伟, 程朋根, 等. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(4): 816-824.
Xiong Q L, Xiao H W, Cheng P G, *et al.* Pollution distribution of topsoil heavy metals in Beijing and its atmospheric deposition contribution[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2021, **30**(4): 816-824.
- [9] Rathika R, Srinivasan P, Alkahtani J, *et al.* Influence of biochar and EDTA on enhanced phytoremediation of lead contaminated soil by *Brassica juncea*[J]. *Chemosphere*, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129513.
- [10] Wang B, Xie H L, Ren H Y, *et al.* Application of AHP, TOPSIS, and TFNs to plant selection for phytoremediation of petroleum-contaminated soils in shale gas and oil fields [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **233**: 13-22.
- [11] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals: concepts and applications [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(7): 869-881.
- [12] Collina K, Junior F M, Nnamdi N H, *et al.* Comparative studies on the efficacy of *azadirachta indica* and *moringa oleifera* in phytoremediation of some selected heavy metals from contaminated soil[J]. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 2017, **5**(3): 1-11.
- [13] 黄明煜, 章家恩, 全国明, 等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述[J]. *生态科学*, 2018, **37**(3): 194-203.
Huang M Y, Zhang J E, Quan G M, *et al.* Review on research and utilization current status of hyperaccumulation plants for heavy metal contaminated soils and the phytoremediation application prospective of invasive plants [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(3): 194-203.
- [14] Liu K H, Zhang H C, Liu Y F, *et al.* Investigation of plant species and their heavy metal accumulation in manganese mine tailings in Pingle Mn mine, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(16): 19933-19945.
- [15] Gastauer M, Caldeira C F, Ramos S J, *et al.* Active rehabilitation of Amazonian sand mines converges soils, plant communities and environmental status to their predisturbance levels[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **31**(5): 607-618.
- [16] 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 等. 物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3953-3962.
Yang S X, Cao J B, Li F M, *et al.* Ecological effects of species diversity on plant growth and physico-chemical properties in a Pb-Zn mine tailings [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3953-3962.
- [17] 张富运, 陈永华, 吴晓芙, 等. 8 种木本植物对矿渣中重金属的吸收与富集研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, **39**(3): 168-170.
Zhang F Y, Chen Y H, Wu X F, *et al.* Uptake and accumulation characteristics of 8 species of woody plants for heavy metals in lead/zinc mine tailing slag[J]. *Environmental Science and Management*, 2014, **39**(3): 168-170.
- [18] Zhang M Y, Chen Y H, Du L, *et al.* The potential of *Paulownia fortunei* seedlings for the phytoremediation of manganese slag amended with spent mushroom compost [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **196**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110538.
- [19] 钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 等. 碳酸钙对水稻吸收重金属(Pb、Cd、Zn)和As的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(4): 1242-1248.
Zhong Q Y, Zeng M, Liao B H, *et al.* Effects of CaCO₃ addition on uptake of heavy metals and arsenic in paddy fields [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(4): 1242-1248.
- [20] 陈永华, 张富运, 吴晓芙, 等. 改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3852-3859.
Chen Y H, Zhang F Y, Wu X F, *et al.* Effects of different modifier concentrations on lead-zinc tolerance, subcellular distribution and chemical forms for four kinds of woody plants [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3852-3859.
- [21] Xue C, He C Q, Shi Z C, *et al.* Effect of spent mushroom substrate on strengthening the phytoremediation potential of *Ricinus communis* to Cd- and Zn-polluted soil [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, **20**(14): 1389-1399.
- [22] 孙博雅, 程永毅, 肖广全, 等. 典型气田土壤铁还原活性与微生物群落关系研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(10): 4170-4178.
Sun B Y, Cheng Y Y, Xiao G Q, *et al.* Relationship between iron reducing potential of soil and microbial community structure in a typical shale gas field [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 4170-4178.
- [23] Dou C M, Fu X P, Chen X C, *et al.* Accumulation and detoxification of manganese in hyperaccumulator *Phytolacca americana* [J]. *Plant Biology*, 2009, **11**(5): 664-670.
- [24] Davies M S. Effects of toxic concentrations of metals on root growth and development [A]. In: Atkinson D (Ed.). *Plant Root Growth* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. 211-227.
- [25] Wang J J, Guo Y Y, Guo D L, *et al.* Fine root mercury heterogeneity: metabolism of lower-order roots as an effective route for mercury removal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(2): 769-777.
- [26] Cabot C, Sibole J V, Barceló J, *et al.* Lessons from crop plants struggling with salinity [J]. *Plant Science*, 2014, **226**: 2-13.
- [27] Vaculik M, Konlechner C, Langer I, *et al.* Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **163**: 117-126.
- [28] Han L Z, Chen Y H, Chen M L, *et al.* Mushroom residue modification enhances phytoremediation potential of *Paulownia fortunei* to lead-zinc slag [J]. *Chemosphere*, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126774.
- [29] Gong Z Z, Xiong L M, Shi H Z, *et al.* Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency [J]. *Science China Life Sciences*, 2020, **63**(5): 635-674.
- [30] Rossato L V, Nicoloso F T, Farias J G, *et al.* Effects of lead on the growth, lead accumulation and physiological responses of *Pluchea sagittalis* [J]. *Ecotoxicology*, 2012, **21**(1): 111-123.
- [31] Camara B, Bouvier F. Oxidative remodeling of plastid carotenoids [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2004, **430**(1): 16-21.
- [32] 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.
- [33] Leal-Alvarado D A, Espadas-Gil F, Sáenz-Carbonell L, *et al.* Lead accumulation reduces photosynthesis in the lead hyper-accumulator *Salvinia minima* baker by affecting the cell membrane and inducing stomatal closure [J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, **171**: 37-47.
- [34] Zhou L Y, Zhao Y, Wang S F, *et al.* Lead in the soil-mulberry (*Morus alba* L.)-silkworm (*Bombyx mori*) food chain: translocation and detoxification [J]. *Chemosphere*, 2015, **128**: 171-177.
- [35] De Souza S C R, De Andrade S A L, De Souza L A, *et al.* Lead tolerance and phytoremediation potential of Brazilian leguminous tree species at the seedling stage [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **110**: 299-307.
- [36] 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.
- [37] Zhou J T, Wan H X, He J L, *et al.* Integration of cadmium accumulation, subcellular distribution, and physiological responses to understand cadmium tolerance in apple rootstocks [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.00966.
- [38] 李娅芸. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分和微生物多样性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Li Y Y. Effects of typical plant roots decomposition on soil nutrients and soil microbial diversity of southern area in Ningxia [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [39] 谭春玲, 刘洋, 黄雪刚, 等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, **30**(3): 333-342.
- Tan C L, Liu Y, Huang X G, *et al.* Effect of biochar on soil microbial metabolic activities [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(3): 333-342.
- [40] Belogolova G, Gordeeva O, Sokolova M, *et al.* Transformation of lead compounds in the soil-plant system under the influence of *Bacillus* and *Azotobacter* rhizobacteria [J]. *Chemistry and Ecology*, 2020, **36**(3): 220-235.
- [41] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 构树修复对重金属污染土壤环境质量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2639-2645.
- Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Effect of phytoremediation with *Broussonetia papyrifera* on the biological quality in soil contaminated with heavy metals [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2639-2645.
- [42] Álvarez A, Catalano S A, Amoroso M J. Heavy metal resistant strains are widespread along *Streptomyces* phylogeny [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2013, **66**(3): 1083-1088.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)