

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力

王小慧, 肖细元*, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕

(中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 为探讨象草与木本植物苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力, 开展室内盆栽试验, 分析间作对植物生物量和重金属吸收累积、土壤溶液重金属含量动态变化影响及根际微生物群落组成响应特征。结果表明, 和单作相比, 象草和苦楝(KX)间作两者地上部生物量分别增加 26.5% 和 13.2%, 象草和构树(GX)间作下构树地上部生物量增加 13.5%, 象草生物量无明显变化。和象草间作后苦楝地上部 Cd 含量显著提高 24.9%, 两者地上部 Cd 和 Pb 累积量明显提高($P < 0.05$); 间作构树显著增加象草地上部 Cd 和 Pb 含量及累积量, 但构树地上部 Cd 和 Pb 含量明显降低。总体而言, 间作处理显著提高单盆植物地上部 Cd 和 Pb 共同累积总量, 且 KX 间作下单盆地上部 Cd 和 Pb 共同累积总量($1\,065\ \mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)最高。整个修复期间, KX 和 GX 间作下土壤溶液 pH 和溶解性有机碳(DOC)含量均高于未修复土壤(CK)。修复结束(第 150 d)时, KX 和 GX 间作下土壤溶液 DOC 含量分别较 CK 显著增加 40.5% 和 33.1% ($P < 0.05$), 与 CK、象草和构树单作相比, KX 间作下土壤溶液 Cd 含量分别显著降低 56.1%、35.5% 和 46.5%, GX 间作下分别显著降低 54.5%、33.2% 和 44.6% ($P < 0.05$)。间作下根际土壤微生物香农指数(Shannon)和 Chao1 指数均显著高于 CK, 且特有 OTUs 数量明显高于 CK、苦楝和构树单作, 放线菌门(Actinobacteriota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)等优势细菌丰度增加。与 CK、象草和苦楝单作相比, KX 间作下放线菌门(Actinobacteriota)丰度分别增加 31.6%、20.9% 和 25.3%, GX 间作下分别增加 32.3%、21.5% 和 25.9%。因此, 象草和木本植物间作有利于改善土壤环境质量, 增加修复植物的地上部生物量及其对 Cd 和 Pb 富集, 降低土壤重金属迁移风险, 尤其是象草和苦楝间作更适于修复矿区多金属污染土壤。

关键词: 间作; 重金属; 土壤溶液; 根际微生物; 矿区土壤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0426-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203259

Potential of Intercropping *Pennisetum purpureum* Schum with *Melia azedarach* L. and *Broussonetia papyrifera* for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas

WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan*, GUO Zhao-hui, PENG Chi, WANG Xiao-yan

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study the potential of intercropping *Pennisetum purpureum* Schum with *Melia azedarach* L. and *Broussonetia papyrifera* for phytoremediation of heavy-metal contaminated soil around mining areas, a pot experiment was conducted to investigate the effects of intercropping on plant biomass, heavy metal accumulation, dynamic changes in heavy metal content in soil solution, and response characteristics of the rhizosphere microbial community. The results indicated that the shoot biomass of *P. purpureum* and *M. azedarach* from their intercropping system (KX) was increased by 26.5% and 13.2%, respectively, and the shoot biomass of *B. papyrifera* from the intercropping system of *P. purpureum* and *B. papyrifera* (GX) was increased by 13.5% compared with their corresponding monoculture systems. The shoot Cd content of *M. azedarach* in the KX treatment was significantly increased by 24.9% ($P < 0.05$), and their Cd and Pb accumulation in shoots were also significantly increased. The shoot contents and accumulations of Cd and Pb from *P. purpureum* in the GX treatment were significantly increased; however, those in *B. papyrifera* shoots were decreased. The total accumulations of Cd and Pb in each pot from intercropping systems were higher than that from the monoculture treatment, with that from the KX treatment being the highest at $1\,065\ \mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$. During the 150-day cultivation process, the pH value and dissolved organic carbon (DOC) content in the soil solution under the intercropping systems of KX and GX were higher than those of original soil (CK). After 150 d cultivation, the DOC contents of the soil solution under the KX and GX treatments were significantly increased by 40.5% and 33.1% in comparison with that under CK ($P < 0.05$), respectively. Compared with those from CK and *P. purpureum* and *B. papyrifera* monoculture treatments, the Cd content in soil solution from the KX treatment was significantly decreased by 56.1%, 35.5%, and 46.5%, and that in the GX treatment was decreased by 54.5%, 33.2%, and 44.6% ($P < 0.05$), respectively. The Shannon and Chao1 indices of rhizosphere microorganisms under the intercropping systems were significantly higher than those under CK. The number of unique OTUs in intercropping systems was significantly higher than that in CK and the *M. azedarach* and *B. papyrifera* monocultures. Intercropping improved the abundance of dominant bacteria such as Actinobacteriota and Acidobacteriota, and the abundance of Actinobacteriota increased by 31.6%, 20.9%, and 25.3% in the KX treatment and by 32.3%, 21.5%, and 25.9% in the GX treatment, respectively, in comparison with those in CK and the *P. purpureum* and *M. azedarach* monocultures. It was concluded that intercropping *P. purpureum* with wood plants could increase their shoot biomass and the accumulations of Cd and Pb, as well as soil environmental quality, whereas the availability and migration risk of heavy metals in soil were reduced. Moreover, the intercropping of *P. purpureum* and *M. azedarach* was more beneficial to the remediation of polymetallic-contaminated soil around mining areas.

Key words: intercropping; heavy metals; soil solution; rhizosphere microorganisms; mining areas

收稿日期: 2022-03-28; 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 湖南省环保科研课题项目(湘财建二指[2019]0011号)

作者简介: 王小慧(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复, E-mail: 1441535674@qq.com

* 通信作者, E-mail: xiaoxy@csu.edu.cn

人类活动引起的土壤重金属污染已成为一个严重的环境问题. 据报道, 我国有超过 100 万 km^2 的土地污染是由重金属或类金属污染所引起^[1]. 其中, 金属矿采选冶炼活动是造成周边环境重金属污染的重要原因之一^[2,3]. 对我国 1443 处工农业用地土壤重金属含量的文献调研结果表明, Cd、Pb 和 As 污染风险严重, 是优先控制重金属, 且矿区为优先控制区域^[4]. 植物修复因其成本低、绿色低碳易管理, 且能增加矿区植被覆盖率, 减少水土流失, 在矿区重金属污染土壤生态修复方面具有重要现实意义和较强可操作性^[5].

通常情况下矿区土壤结构较差, 缺乏养分且重金属复合污染较重, 从而影响植物生长和定居^[6,7]. 因此, 在其生态修复过程中, 植物的选择至关重要. 一些较高重金属耐受和富集能力的草本和木本能源植物, 因其高生物量和经济价值且能够适应矿区极端土壤条件而备受关注^[8]. 充分利用二者的生态位差异进行间作强化修复效率并改善土壤环境质量, 为矿区重金属污染土壤修复提供了新思路^[9]. 目前已开展草、木本植物间作修复重金属污染土壤相关研究. 如不同耐性乔灌木植物共植可有效应用于矿业废弃地复垦生态修复, 提高了植物多样性和植物对重金属的富集和迁移^[7]. 利用芦竹分别与构树和桑树两种木本植物间作修复湖南某工矿区多金属污染土壤, 发现间作促进植物生长及其对重金属的吸收和累积^[10]. 这表明草、木本植物间作对植物修复效率有积极影响. 减少地表径流和下渗引起重金属污染面扩大的风险也是矿区生态修复关注的重点^[5], 而土壤溶液是土壤重金属水平和下渗迁移的载体^[11], 目前有关矿区重金属污染土壤间作修复过程中土壤溶液重金属含量变化研究较少. 重金属胁迫下, 微生物响应比动植物更为敏感, 土壤微生物可以驱动碳、氮和磷等养分循环, 且可以改变根际土壤重金属有效性, 影响修复植物的生长和重金属富集, 是表征植物修复效率的重要指标之一^[12,13]. 有研究发现, 伴矿景天与毛竹间作显著增加了根际土壤变形菌门、酸杆菌和放线菌等优势细菌丰度, 并提高植物修复效率^[13].

象草 (*Pennisetum purpureum* Schum) 是一种生长速度快且生物量大, 抗逆性强的多年生禾本科能源草本植物^[14], 富集 Cd 能力较强且可多次刈割, 已较多应用于 Cd 污染土壤修复^[15,16]. 苦楝 (*Melia azedarach* L.) 和构树 (*Broussonetia papyrifera*) 均是我国湖南、江西、湖北等长江流域地区的乡土树种, 具有生物量大、分布广等特点, 在矿区污染土壤中能正常生长^[17,18]. 苦楝对重金属 Cd、Pb 和 Cu 具有

较高耐受能力, 在 $\omega(\text{Cd})$ 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上能正常生长^[19]. 有研究发现, 构树对多种重金属也具有较强耐性和富集能力^[17], 与超富集植物蜈蚣草、富集植物芦竹间作均可有效修复重金属污染土壤^[10,20]. 然而, 目前有关象草与构树、苦楝的间作修复尚未见报道, 土壤溶液重金属变化和土壤微生物群落结构响应特征更少涉及. 因此, 本研究拟以湖南某铜矿选冶区周边多金属复合污染土壤为对象, 开展象草与苦楝/构树间作修复盆栽试验, 探讨间作对植物生长、重金属吸收累积、土壤溶液重金属含量动态变化影响和根际微生物群落组成响应特征, 以期为矿区污染土壤生态修复植物选择及组合技术提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与植物

供试土壤采自湖南省衡阳市某铜矿选冶区附近 (东经 $112^{\circ}05'00''$, 北纬 $26^{\circ}54'01''$, 海拔高度 122 m), 土壤自然风干后过 2 mm 筛备用. 土壤 pH 值为 6.63, $\omega(\text{碱解性氮})$ 、 $\omega(\text{有效磷})$ 和 $\omega(\text{速效钾})$ 分别为 59.5、4.22 和 $159 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{有机质})$ 为 $65.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤 $\omega(\text{总 As})$ 、 $\omega(\text{总 Cd})$ 、 $\omega(\text{总 Pb})$ 分别为 142、29.3 和 $990 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均超过《建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018) 中的一类用地筛选值 [$\omega(\text{As}) 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{Cd}) 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{Pb}) 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] ^[21]. 象草芽节购买于湖南省某牧草基地, 构树和苦楝幼苗购买于湖南省某苗木基地, 为一年生苗, 株高为 50 ~ 60 cm.

1.2 试验设计

本试验设置 5 个处理, 分别为象草单作 (XM, 6 株)、苦楝单作 (KM, 6 株)、构树单作 (GM, 6 株)、象草-苦楝间作 (KX, 3 株苦楝和 3 株象草)、象草-构树间作 (GX, 3 株构树和 3 株象草), 每处理设置 4 个重复. 将过筛后土壤充分混匀后装入长 34 cm × 宽 22 cm × 高 19 cm 塑料盆中, 每盆装入 10 kg. 每盆土壤加入 $2.7 \text{ g CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $0.5 \text{ g NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 1.6 g KNO_3 作为基肥, 用去离子水溶解加入土壤. 土壤以 70% 的田间持水量平衡 2 周后, 选取长势一致的植物幼苗移栽盆中. 象草、苦楝和构树单作处理为每盆两行, 每行 3 株植物, 行距和行内株距均为 10 cm; 间作处理为象草和苦楝/构树各一行, 每行 3 株植物, 行距和行内株距和单作一致. 盆栽试验在温室自然光照条件下进行, 温度保持 18 ~ 30℃, 光照周期为 $10 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, 不定期浇去离子水保持土壤田间持水量为 60%. 种植 1 个月后, 将土壤溶液取样器 (Rhizon MOM) 缓慢竖直插入各盆栽中间位置, 同时

保证其在土壤中插入深度相同,之后每隔 1 个月采集土壤溶液,共采集 4 次。

1.3 样品采集分析

种植 150 d 后,收获所有植物和土壤,将根、茎和叶分开洗净晾干并测定鲜重,105℃ 杀青 30 min 后于 60℃ 烘干至恒重称重,再粉碎待分析。采用抖土法收集植物根际土壤鲜样,经 4、-20 和 -76℃ 梯度冷冻用于分子生物学试验分析。土壤采用五点取样法,自然风干磨碎后过 20 目和 100 目筛备用。

土壤溶液 pH 和土壤基本理化性质参照鲁如坤^[22]的方法进行测定分析。土壤和植物样品分别采用 HNO_3 -HF- HClO_4 和 HNO_3 - HClO_4 消解^[23]。消解液中 As、Cd 和 Pb 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, iCAP 7400, Thermo) 测定。土壤标准物质 (GBW-08303) 和植物标准物质 (GBW-07603) 用于消解过程的质量控制,回收率均在 95%~105% 范围内。土壤溶液 As、Cd 和 Pb 含量采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7500c, Thermo Scientific, USA) 测定,土壤溶液有机碳 (DOC) 含量采用总有机碳分析仪 (TOC-L, Japan) 测定。

1.4 高通量测序细菌 16S rRNA

土壤 DNA 提取和 Illumina MiSeq 高通量测序依托上海美吉生物医药科技有限公司完成。使用土壤 DNA 提取试剂盒 (FastDNA[®] SPIN Kit, 美国 MP Biomedicals 公司) 对植物根际土壤 DNA 进行抽提,根据试剂盒说明书进行操作。提取的 DNA 采用引物 341F (CCTAYGGGRBGCASCAG) 和 806R (GGACTACNNGGTATCTAAT) 对 V3~V4 细菌 16S rRNA 基因区域进行 PCR 扩增 (ABI GeneAmp[®] 9700 型 PCR 仪)。将 PCR 产物用 QuantiFluor[™]-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量。使用

TruSeq[™] DNA Sample Prep Kit (美国 Illumina 公司) 用于 MiSeq 文库构建后, MiSeqPE300 (美国 Illumina 公司) 进行上机测序。

1.5 数据处理与分析

富集系数 (BCF) = 地上部重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 土壤重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

转运系数 (TF) = 地上部重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 根部重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

单株植物地上部重金属累积量 ($\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$) = 茎重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) × 茎生物量 (g) + 叶重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) × 叶生物量 (g)

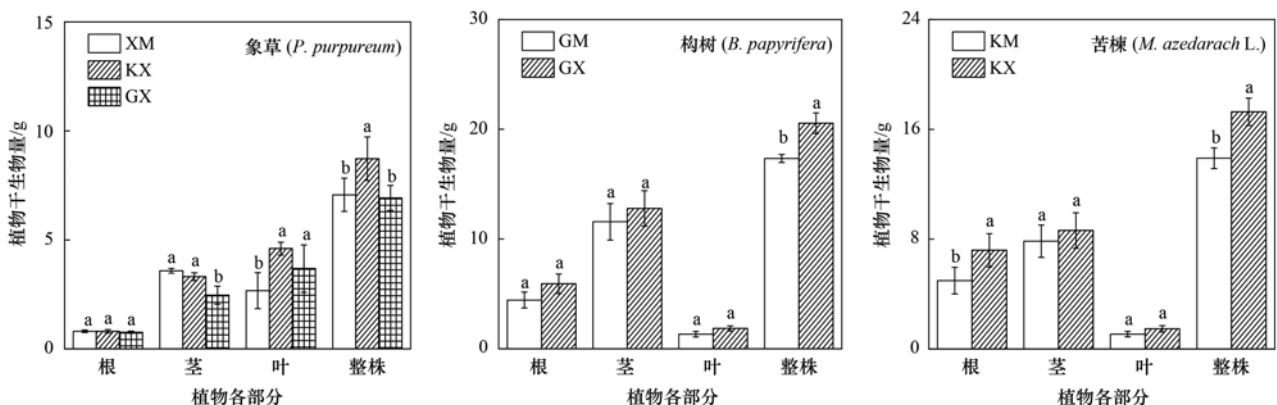
单株植物根部重金属累积量 ($\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$) = 根重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) × 根生物量 (g)

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2019 分析,利用 SPSS 26.0 软件进行单因素 (One-way) 方差分析不同处理间相关指标差异的显著性。下机后得到的细菌 16S rRNA 测序数据通过上海美吉生物医药科技有限公司的云平台进行处理和分析。采用 R 语言 (version 3.3.1) 工具统计和绘制维恩图、细菌群落直方图和热谱图,利用 R (version 3.3.1) (pheatmap package) 分析和绘制相关性热谱图。

2 结果与讨论

2.1 间作对修复植物生长的影响

从图 1 可看出,单、间作处理下象草根生物量无明显差异。与单作比较,KX 间作下象草茎生物量较单作无明显变化,但叶片生物量显著增加,整株生物量显著提高 23.4% ($P < 0.05$); GX 间作下象草整株生物量和单作无明显差异。KX 间作下苦楝根、茎和叶生物量较单作分别提高 44.4%、10.0% 和 36.7%,GX 间作下构树根、茎和叶生物量较单作分别提高 33.4%、10.5% 和 39.8%,间作下苦楝和构树整株生物量分别是单作的 1.24 倍和 1.19 倍。



不同小写字母表示不同处理间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图 1 不同处理下单株象草、苦楝和构树的干生物量

Fig. 1 Dry biomass of *P. purpureum*, *M. azedarach L.*, and *B. papyrifera* under different treatments

这与芦竹间作下桑树地上部生物量均显著增加结果类似^[10]. 可能是象草生物量大且对 Cd 富集能力较强^[16], 降低了土壤 Cd 生物有效性, 缓解了 Cd 对间作植物苦楝和构树的毒害作用.

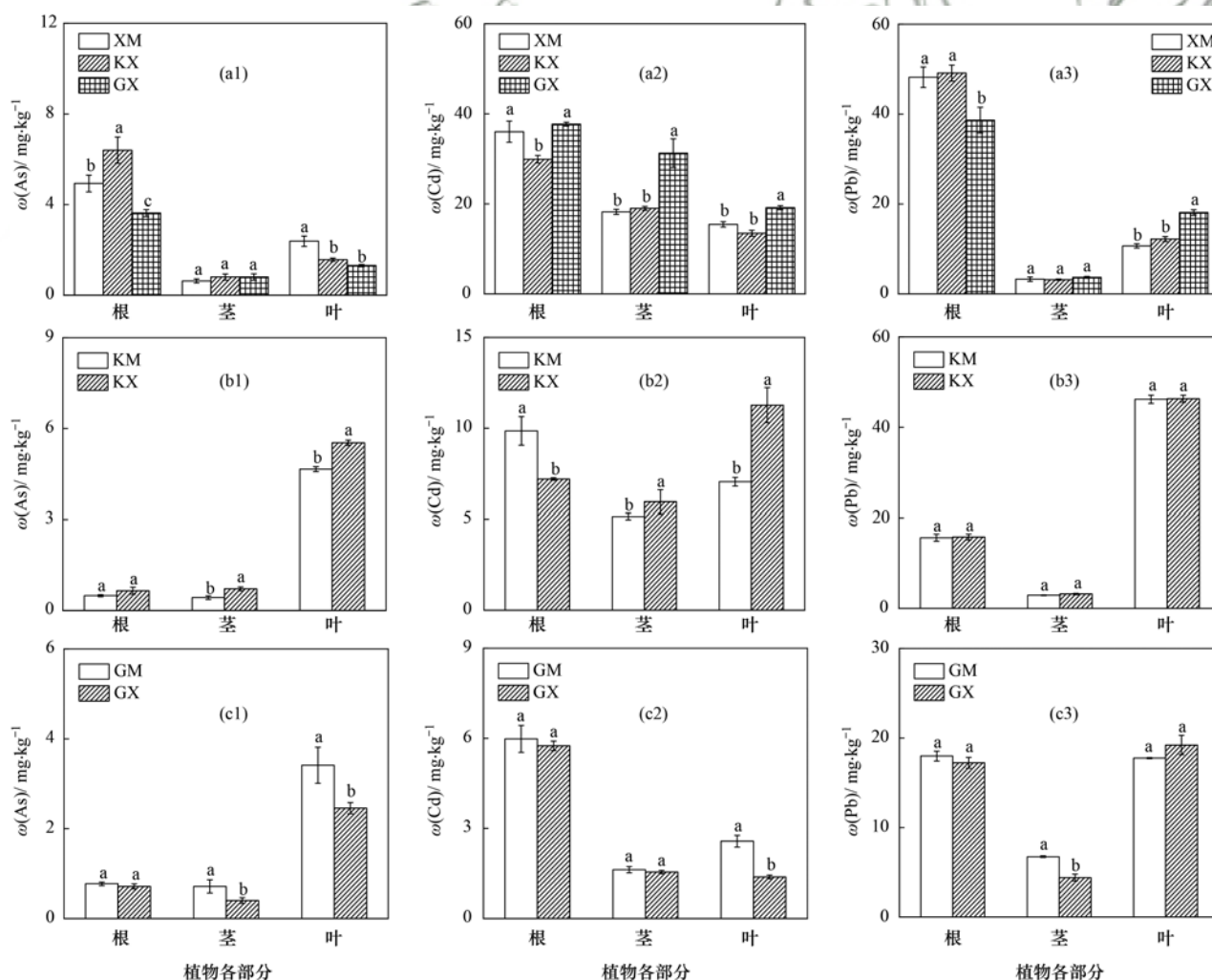
2.2 间作对植物吸收和累积 As、Cd 和 Pb 的影响

2.2.1 植株中 As、Cd 和 Pb 含量及转运

象草植株中 As 含量很低, 根、茎和叶 $\omega(\text{As})$ 分别为 3.6 ~ 6.4、0.6 ~ 0.8 和 1.3 ~ 2.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 2(a1)], 且 As 富集系数也较低(表 1), 表明其是避 As 植物. KX 间作下象草根 As 含量显著高于单作和 GX 处理, 但 GX 处理根部 As 含量显著低于单作处理 ($P < 0.05$). 各处理下象草茎中 As 含量无差异, 间作下叶中 As 含量均显著低于单作. 象草植株中 Cd 含量较高, GX 处理下茎和叶中 Cd 含量较单作分别显著增加 71.6% 和 24.0% [$P < 0.05$, 图 2(a2)]. 各处理下象草 Cd 富集系数高于苦楝和构树, 与构树间作下象草 Cd 富集和转运系数较单作分别显著提高 29.3% 和 36.2% ($P < 0.05$, 表

1), 表明间作构树促进象草对 Cd 的吸收和转运. GX 处理下象草根 Pb 含量较单作降低 19.8%, 而叶中 Pb 含量显著提高 69.4% ($P < 0.05$), 从而 Pb 的转运系数增加 [图 2(a3)]. 间作下苦楝茎和叶中 As 含量较单作分别显著增加 67.6% 和 18.7% [图 2(b1)], Cd 含量分别增加 15.4% 和 59.8% [$P < 0.05$, 图 2(b2)], 各部位 Pb 含量无明显差异 [图 2(b3)], 且 As、Cd 和 Pb 转运系数均显著高于单作处理. 各处理下构树根部 As、Cd 和 Pb 含量均无显著差异, 与单作比较, 间作下其茎中 As、Pb 含量分别显著减少 43.8% 和 34.6%, 叶中 As 和 Cd 含量显著减少 28.0% 和 46.0% ($P < 0.05$), 而 Pb 含量增加 8.3% [图 2(c1)、图 2(c2) 和图 2(c3)].

不同植物间作对重金属的吸收存在差异^[24]. 据报道, 蜈蚣草和桑树间作促进蜈蚣草羽叶吸收 As, 但抑制桑树叶片吸收 As^[25]. 少花龙葵和甜高粱间作明显促进两者地上部对 Cd 的吸收, 但仅促进甜高粱地上部对 Zn 的吸收; 翅果菊和皇草间作同时



(a) 象草, (b) 苦楝, (c) 构树; 不同小写字母表示不同处理间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图2 不同处理下植物各部分 As、Cd 和 Pb 含量

Fig. 2 Contents of As, Cd, and Pb in roots, stems, and leaves of plants under different treatments

提高两者地上部对 Cd 和 Zn 的吸收^[26]. 本研究中, 象草和苦楝间作明显促进苦楝地上部和象草根部 As 的吸收, 但抑制了象草体内 As 向地上转运, 与玉米-豌豆间作促进了玉米根部吸收 Cu, 但降低了 Cu 从玉米根部向地上部转运的结果类似^[27]. 这可能是间作系统中根系分泌物的类型、数量和功能的变化,

提高了象草对 As 的防御机制, 将 As 固定在象草根 部, 减少其向地上部转运, 具体机制有待进一步研究. 和构树间作促进象草地上部对 Cd 的吸收, 但抑制 构树地上部吸收 Cd, 可能是间作植物之间对目标 元素的竞争吸收造成的^[28], 象草对 Cd 的富集能力 较强^[16], 而构树易于富集 Pb^[17].

表 1 不同处理下植物 As、Cd 和 Pb 的富集和转运系数¹⁾

Table 1 BCF and TF of As, Cd, and Pb in plants under different treatments

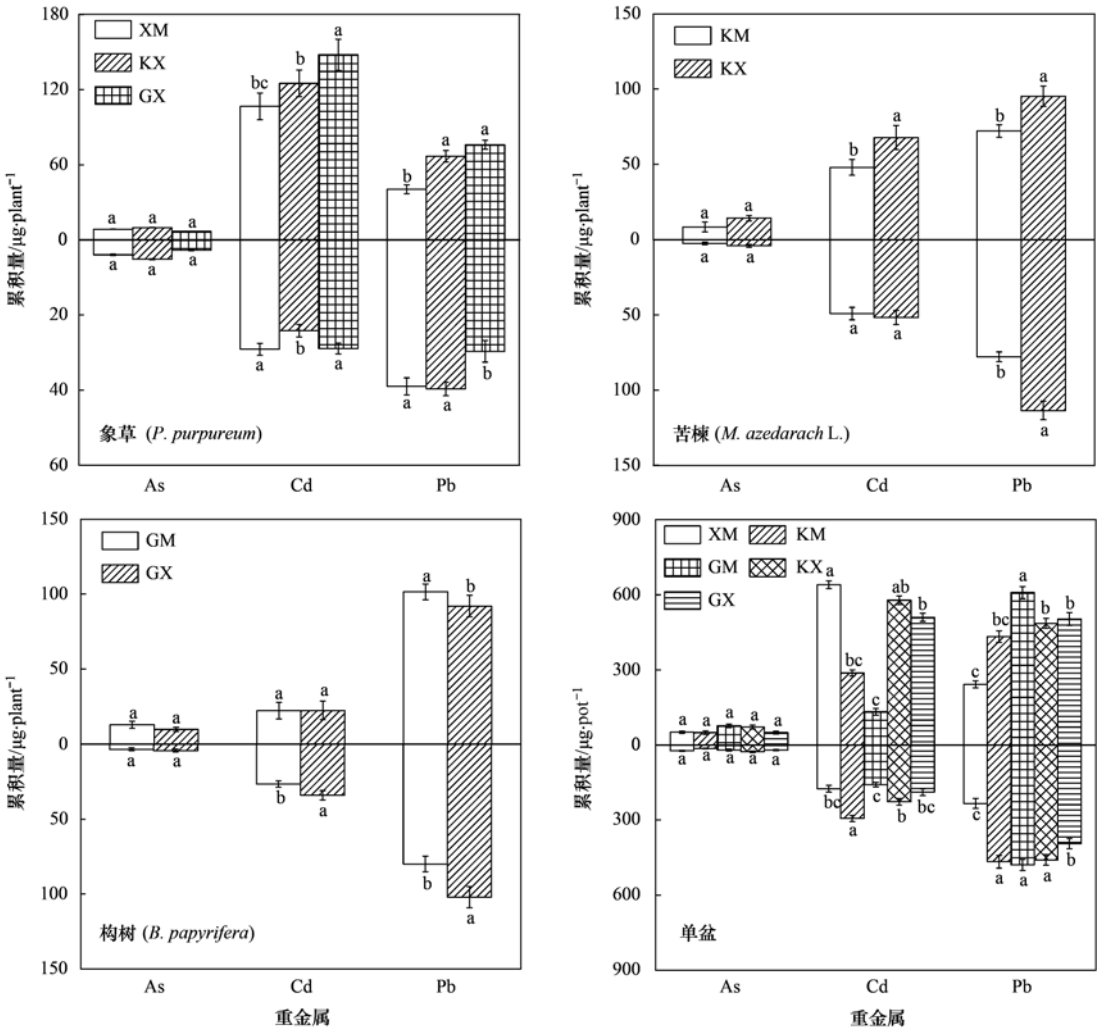
植物	处理	富集系数 (BCF)			转运系数 (TF)		
		As	Cd	Pb	As	Cd	Pb
象草	XM	0.01 ± 0.00a	0.58 ± 0.04b	0.007 ± 0.00a	0.28 ± 0.02a	0.47 ± 0.00bc	0.13 ± 0.07b
	KX	0.009 ± 0.00a	0.54 ± 0.07b	0.009 ± 0.00a	0.20 ± 0.05a	0.53 ± 0.00b	0.17 ± 0.05b
	GX	0.008 ± 0.00a	0.82 ± 0.10a	0.012 ± 0.00a	0.31 ± 0.02a	0.64 ± 0.00a	0.32 ± 0.09a
苦楝	KM	0.007 ± 0.00a	0.18 ± 0.01a	0.008 ± 0.00a	1.91 ± 0.09b	0.55 ± 0.09b	0.52 ± 0.11a
	KX	0.01 ± 0.00a	0.23 ± 0.03a	0.010 ± 0.00a	2.17 ± 0.12a	0.93 ± 0.04a	0.60 ± 0.09a
构树	GM	0.007 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	0.008 ± 0.00a	1.28 ± 0.08a	0.29 ± 0.05a	0.44 ± 0.10a
	GX	0.005 ± 0.00a	0.05 ± 0.00a	0.006 ± 0.00a	0.93 ± 0.07b	0.27 ± 0.01a	0.36 ± 0.09a

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著, $P < 0.05$

2.2.2 植物地上部 As、Cd 和 Pb 累积量

单作和间作下象草、苦楝和构树三者单株地上 部和根部 As 累积量仅为 2.8 ~ 10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, 且

各处理间无显著差异, 说明三者对 As 的去除效率低 (图 3). 有研究也表明, 构树 As 富集量较低, 对土壤 As 主要起稳定作用^[29]. 各处理下象草茎和叶中 Cd



图中上半部分为地上部, 下半部分为根部, 不同小写字母表示不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

图 3 不同处理下单株植物和单盆地上部和根部 As、Cd 和 Pb 累积量

Fig. 3 Accumulation of As, Cd, and Pb in shoots and roots per plant and pot under different treatments

和 Pb 含量低于根部,但单株地上部 Cd 和 Pb 累积量均高于根部,这主要是其地上部生物量明显高于根部(图 1)。KX 处理下象草单株地上部 Cd 和 Pb 累积量较单作分别显著增加 17.2% 和 38.6%,苦楝单株地上部 Cd 和 Pb 累积量较单作显著提高 41.3% 和 32.0% ($P < 0.05$),说明间作均促进了象草与苦楝地上部对 Cd 和 Pb 的累积。此外,间作下苦楝单株根部 Pb 累积量显著高于单作处理。GX 处理下象草单株地上部 Cd 和 Pb 累积量较单作显著增加 65.1% 和 87.9% ($P < 0.05$),而构树单株地上部 Cd 累积量无显著变化,Pb 累积量显著降低,但单株根部 Cd 和 Pb 累积量较单作分别显著增加 28.2% 和 27.7% ($P < 0.05$)。可见,不同植物间作对植物重金属累积量的影响存在差异^[30]。

从单盆重金属累积量来看,XM、KX 和 GX 处理下地上部 Cd 累积量显著高于根部,且 XM 处理下地上部 Cd 累积量($640 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)最大,显著高于其他处理,说明象草适合于修复单一 Cd 污染土壤。GM 处理下单盆植物地上部 Pb 累积量($609 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)最大,显著高于其他处理,表明构树适合用于 Pb 污染土壤修复。GX 和 KX 处理下单盆地上部 Cd、Pb 共同累积总量分别为 $1065 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $1015 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,均高于象草($882.9 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)、苦楝($721.1 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)和构树($742.4 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)单作处理。因此,象草分别与苦楝、构树间作可以应用于矿区 Cd 和 Pb 复合污染土壤的修复,且象草与苦楝间

作效果更佳。为提高对土壤 As 的修复效率,可以考虑间作 As 超富集植物蜈蚣草等^[20]。

2.3 土壤溶液重金属含量动态变化

整个修复期间,单、间作修复下土壤溶液 pH 值和可溶性有机碳(DOC)含量均高于未修复土壤 CK,且随修复时间的延长,KX 和 GX 间作下土壤溶液 DOC 含量呈上升趋势。修复 150 d 后,KX 和 GX 间作下土壤 DOC 含量较 CK 显著分别增加 40.5% 和 33.1% [$P < 0.05$,图 4(a)和 4(b)]。单、间作下土壤溶液 As、Cd、Pb 含量均低于 CK。修复初期(第 60 d),间作处理下土壤溶液 As 含量均明显低于 KM,且随修复时间延长呈下降趋势;第 150 d 时,单、间作处理下土壤溶液 As 含量无明显差异[图 4(c)]。间作下土壤溶液 Cd 含量在整个修复期间均明显低于 XM 和 GM 处理。修复结束(第 150 d)时,KX 和 GX 间作下土壤溶液 $\rho(\text{Cd})$ 仅分别为 $12.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,较 XM 显著降低 35.5% 和 33.2%,比 GM 处理明显减少 46.5% 和 44.6% [$P < 0.05$,图 4(d)]。单、间作下土壤溶液 Pb 含量无显著差异,但修复结束时土壤溶液 Pb 含量均低于修复初期[图 4(e)]。相关性分析表明,土壤 DOC 含量与土壤溶液 Cd 呈显著负相关($P < 0.05$)。这可能是土壤 DOC 的活性官能团与 Cd^{2+} 发生络合或螯合反应,形成 Cd-有机配合物^[31],从而有效降低土壤溶液中 Cd 向地表水及地下水中文迁移风险。

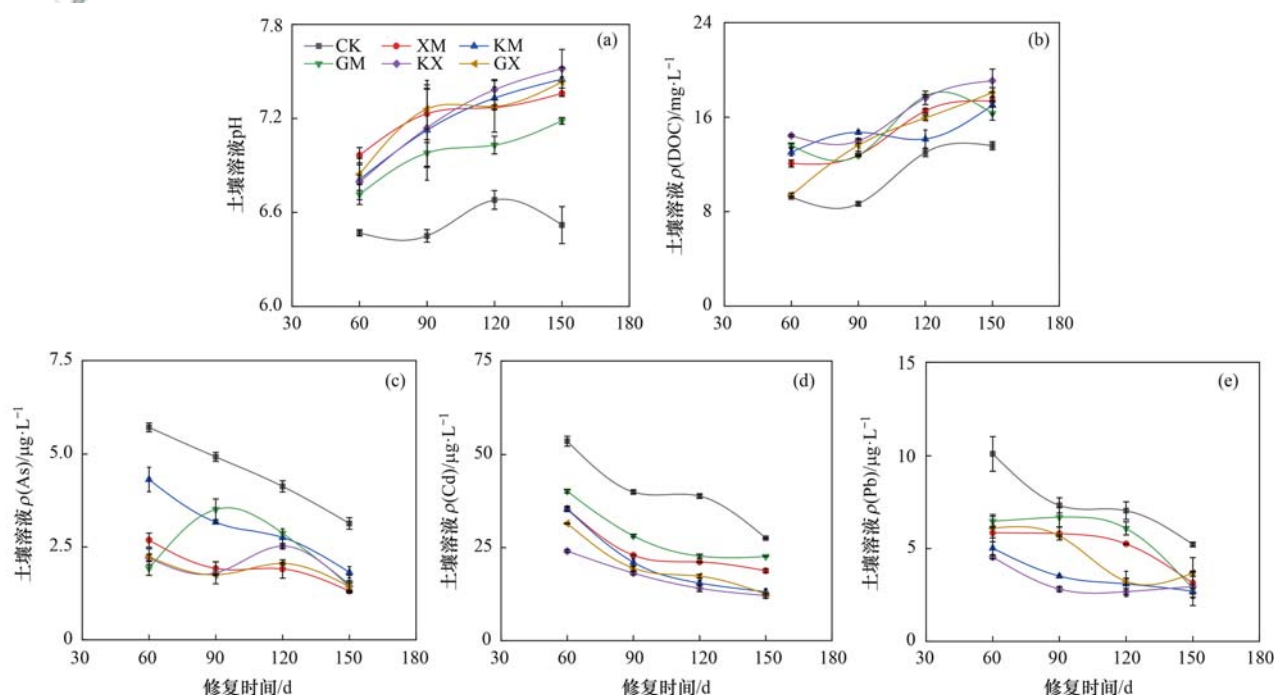


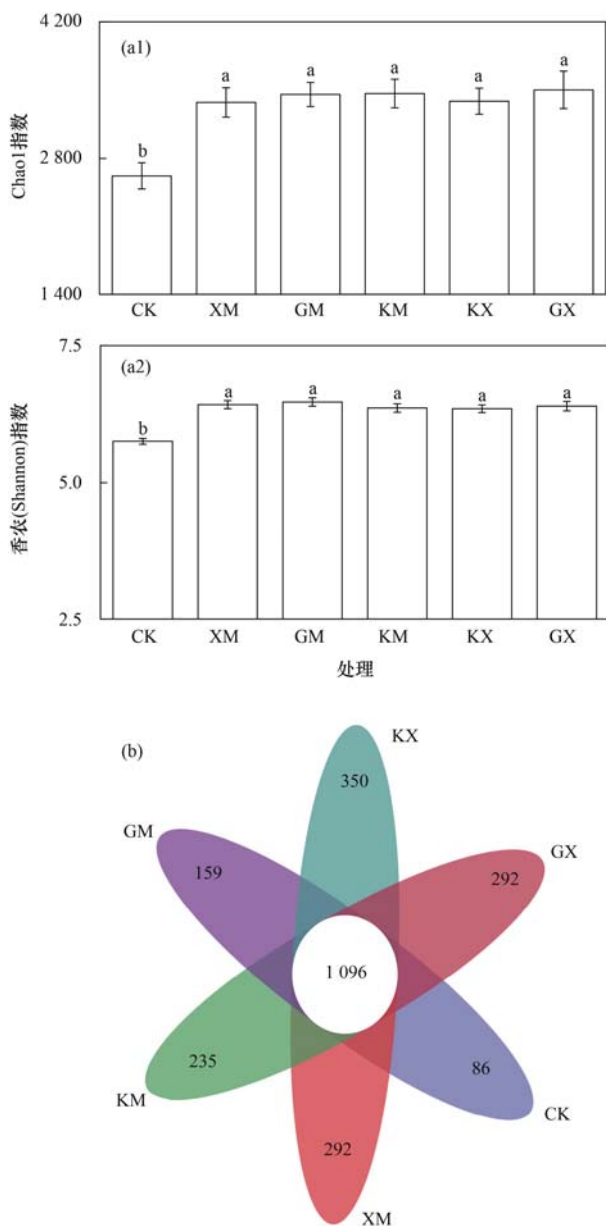
图 4 不同处理下土壤溶液 pH 值、DOC、As、Cd 和 Pb 含量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes in pH, DOC, As, Cd, and Pb in soil solution under different treatments

2.4 间作对根际土壤微生物群落的影响

2.4.1 根际微生物群落结构多样性及丰度

单、间作修复显著提高了修复植物根际土壤微生物群落的丰度和多样性[图 5(a1)和图 5(a2)]. 与 CK 相比,单、间作修复下土壤微生物 Chao1 丰富度指数和香农(Shannon)多样性指数分别显著提高 28.8%~33.7% 和 10.3%~12.5% ($P < 0.05$). 维恩(Venn)图分析结果表明,所有处理下共同 OTUs 数量为 1 096,单、间作修复下 OTUs 数量均显著高于 CK,其中 KX 间作最高(350)[图 5(b)].



(a) α 多样性指数, (b) OUT 水平维恩图; 不同小写字母表示不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

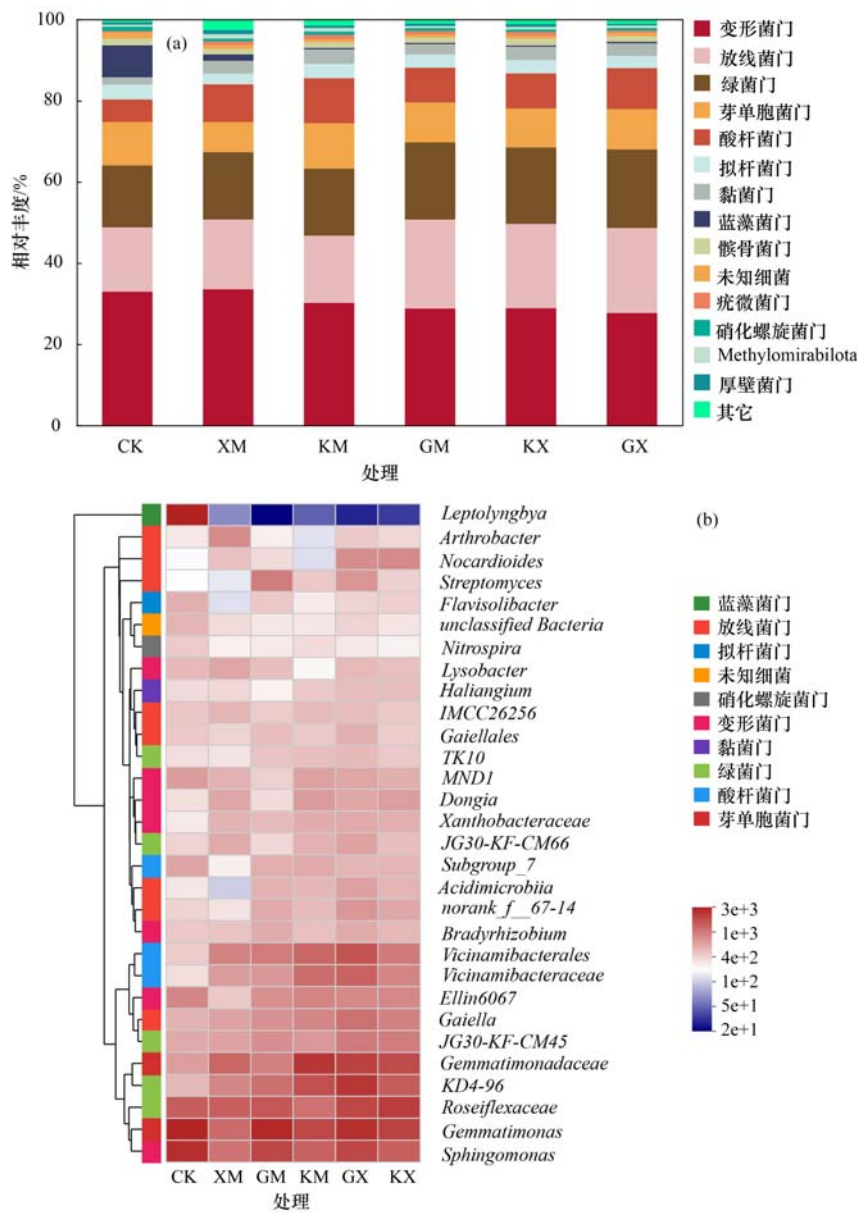
图 5 不同处理下根际土壤微生物群落组成结构多样性

Fig. 5 Diversity of rhizosphere soil microbial community composition under different treatments

门细菌水平上,所有处理下主要门细菌是变形菌门(Proteobacteria), 占有细菌的 27.7%~33.5% [图 6(a)],这和变形菌门(Proteobacteria)是矿区重金属污染土壤优势菌门的报道一致^[32-34]. 其它优势菌门包括放线菌门(Actinobacteriota)、绿菌门(Chloroflexi)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)和黏菌门(Myxococcota). 前人研究发现,芦竹和构树间作提高了酸杆菌门丰度,但减少了放线菌门丰度^[35]; 景天植物和毛竹间作同时提高了放线菌门和酸杆菌门丰度^[13]. 本研究中,象草与苦楝/构树间作均有利于提高根际土壤放线菌门、绿菌门、酸杆菌门和黏菌门丰度,与 CK、XM 和 KM 相比, KX 间作下放线菌门丰度分别增加 31.6%、20.9% 和 25.3%, GX 处理分别提高 32.3%、21.5% 和 25.9%. 这说明不同植物间作对根际微生物群落组成的影响存在差异,可能是不同植物根系分泌物种类和数量的差异导致^[36]. 属细菌水平下[图 6(b)],隶属放线菌门的节杆菌属(*Arthrobacter*)、诺卡氏菌属(*Nocardioideis*)和链霉菌属(*Streptomyces*)细菌丰度均较 CK 和部分单作有所提高. 因此,象草与苦楝/构树间作修复有利于提高根际土壤微生物群落多样性及优势细菌丰度.

2.4.2 根际微生物群落与土壤环境因子、植物生物量的关系

有研究表明,土壤微生物群落组成与土壤 pH 密切相关^[37]. 皮尔逊相关性热谱图显示,放线菌门、绿菌门、酸杆菌门均与土壤溶液 pH 呈正相关关系(图 7),表明间作修复提高土壤溶液 pH 同时,增加了土壤放线菌门、绿菌门和酸杆菌门丰度. 酸杆菌门是主要的多糖分解者,与土壤碳循环密切相关^[38],本研究中,酸杆菌门和土壤溶液 DOC 含量呈正相关关系,说明本研究中间作提高土壤溶液 DOC 含量,为酸杆菌门提供更多碳源,从而增加修复植物根际酸杆菌门丰度. 放线菌门重金属耐性强,其中节杆菌属可产生铁载体结合重金属,链霉菌属能吸收或结合土壤 Cd 等重金属,降低根际土壤重金属毒性,在植物修复过程中起重要作用^[39,40]. 本研究中,放线菌门和植物生物量呈正相关,与土壤溶液 Cd 和 As 呈负相关,间作增加了放线菌门的丰度及象草、苦楝和构树生物量,同时降低土壤溶液 Cd 和 As 含量. 这说明象草与苦楝/构树间作修复增加了根际土壤放线菌门数量,缓解重金属对修复植物的胁迫,从而促进植物生长.



(a) 门水平细菌相对丰度直方图, (b) 属水平细菌相对丰度热谱图

图 6 不同处理下根际土壤微生物相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of rhizosphere soil microorganisms under different treatments

3 结论

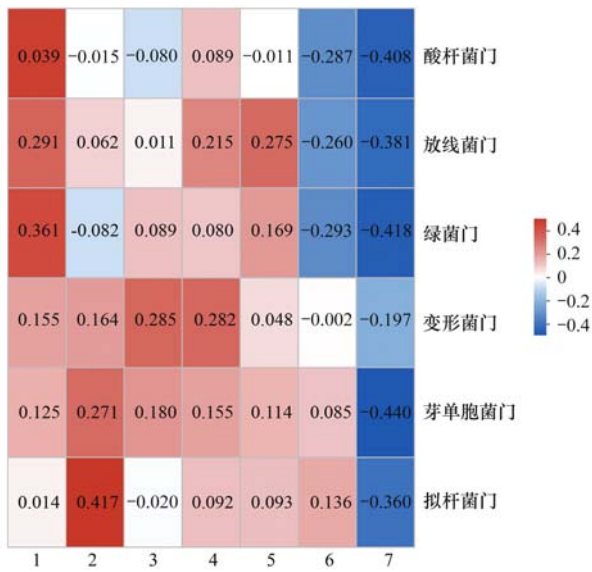
(1)与单作相比,象草和苦楝间作下两者整株生物量分别显著提高 23.4% 和 24.4% ($P < 0.05$),象草和构树间作下仅构树整株生物量增加 18.6%.和象草间作明显促进苦楝对 Cd 的吸收,且提高了象草和苦楝地上部 Cd 和 Pb 累积量.间作构树增加象草地上部对 Cd 的吸收和累积,但抑制构树地上部吸收 Cd 和 Pb.间作修复下单盆地上部 Cd 和 Pb 共同累积总量高于单作,苦楝和象草间作效果更佳.

(2)整个修复期间,象草与苦楝/构树间作均提高土壤溶液 pH 和 DOC 含量,降低土壤溶液 Cd 含量,修复第 150 d 时分别较 CK 显著降低 56.1% 和

54.5% ($P < 0.05$).间作修复均显著提高土壤微生物群落多样性,放线菌门 (Actinobacteriota) 和酸杆菌门 (Acidobacteriota) 等优势细菌丰度增加,主要为隶属放线菌门 (Actinobacteriota) 的节杆菌属 (Arthrobacter)、诺卡氏菌属 (Nocardioides) 和链霉菌属 (Streptomyces),从而改善土壤环境质量,促进修复植物生长.

参考文献:

[1] Liu L W, Li W, Song W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 206-219.
[2] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuip T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 843-853.



1. 土壤溶液 pH, 2. 根部生物量, 3. 土壤溶液 $\rho(\text{Pb})$,
4. 土壤溶液 $\rho(\text{DOC})$, 5. 地上部生物量, 6. 土壤
溶液 $\rho(\text{As})$, 7. 土壤溶液 $\rho(\text{Cd})$

图7 土壤因子、植物地上部和根部生物量与土壤门
水平细菌群落的皮尔逊相关性热谱图分析

Fig. 7 Pearson correlation heatmap exhibiting the relationship
between selected soil properties, shoot biomass, root biomass,
and soil bacterial communities at phylum level

- [3] 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 等. 锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 4015-4023.
Liu L Q, Xiao X Y, Guo Z H, *et al.* Adsorption characteristics and mechanism of Cd and Pb in tiered soil profiles from a zinc smelting site[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 4015-4023.
- [4] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 690-700.
- [5] 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.
- [6] 杨胜香, 袁志忠, 李朝阳, 等. 湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1718-1724.
Yang S X, Yuan Z Z, Li Z Y, *et al.* Heavy metal contamination and bioavailability in Huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1718-1724.
- [7] 周鹏飞, 张世文, 罗明, 等. 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 985-994.
Zhou P F, Zhang S W, Luo M, *et al.* Characteristics of plant diversity and heavy metal enrichment and migration under different ecological restoration modes in abandoned mining areas [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 985-994.
- [8] 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 等. 来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3963-3970.
Qin F R, Zhang S Y, Xia Y S, *et al.* Investigation of dominant

plants and analysis of ecological restoration potential in Lailishan tin tailings [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3963-3970.

- [9] 贺庭, 刘婕, 朱宇恩, 等. 重金属污染土壤木本-草本联合修复研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(11): 237-242.
He T, Liu J, Zhu Y E, *et al.* The research progress of joint remediation of heavy metal contaminated soil by using woody-weed plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, **28**(11): 237-242.
- [10] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5207-5216.
Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Intercropping *Arundo donax* with woody plants to remediate heavy metal-contaminated soil [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5207-5216.
- [11] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017, (6): 5-9.
- [12] 李雨桐, 杨杉, 张艺, 等. 不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4481-4488.
Li Y T, Yang S, Zhang Y, *et al.* Response of soil archaeal community to heavy metal pollution in different typical regions [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4481-4488.
- [13] Bian F Y, Zhong Z K, Li C Z, *et al.* Inter cropping improves heavy metal phytoremediation efficiency through changing properties of rhizosphere soil in bamboo plantation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125898.
- [14] Wiangkham N, Prapagdee B. Potential of Napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoremediation and its possibility to use as biomass fuel[J]. Chemosphere, 2018, **201**: 511-518.
- [15] 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 等. 整合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3862-3869.
Qin J J, Tang S S, Jiang K, *et al.* Effects of chelate GLDA on the remediation of cadmium contaminated farmland by *Pennisetum Purpureum* Schum [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- [16] 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 等. 柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4810-4819.
Tang Q, Wu G F, Gu J F, *et al.* Effect of citric acid and mowing on enhance the remediation of cadmium contaminated soil by Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum) [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4810-4819.
- [17] Zhao X L, Liu J F, Xia X L, *et al.* The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(7): 5076-5085.
- [18] 康薇, 鲍建国, 郑进, 等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, **23**(1): 78-84.
Kang W, Bao J G, Zheng J, *et al.* Analysis on heavy metal enrichment ability of woody plants at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014, **23**(1): 78-84.
- [19] 龙聪颖, 邓辉茗, 苏明洁, 等. 镉和模拟酸雨胁迫对苦楝幼苗镉含量及叶片抗氧化系统的影响[J]. 核农学报, 2020, **34**(1): 186-194.
- [20] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Phytoextraction potential of *Pteris vittata* L. co-planted with woody species for As, Cd, Pb and Zn in contaminated soil [J]. Science of the Total

- Environment, 2019, **650**: 594-603.
- [21] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行) [S].
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] Yang M, Xiao X Y, Miao X F, *et al.* Effect of amendments on growth and metal uptake of giant reed (*Arundo donax* L.) grown on soil contaminated by arsenic, cadmium and lead [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, **22** (6): 1462-1469.
- [24] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响 [J]. 中国环境科学, 2009, **29** (9): 985-990.
- Jiang C A, Wu Q T, Wu S H, *et al.* Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake [J]. China Environmental Science, 2009, **29** (9): 985-990.
- [25] Wan X M, Lei M, Chen T B, *et al.* Intercropped *Pteris vittata* L. and *Morus alba* L. presents a safe utilization mode for arsenic-contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1467-1475.
- [26] 张杏峰, 吴萍, 冯健飞, 等. 超富集植物与能源植物间作对 Cd、Pb、Zn 累积的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, **40** (7): 1481-1491.
- Zhang X F, Wu P, Feng J F, *et al.* Effects of intercropping on Cd, Pb, and Zn accumulation using hyperaccumulators and energy plants [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40** (7): 1481-1491.
- [27] 徐健程, 王晓维, 聂亚平, 等. 不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究 [J]. 农业环境科学学报, 2015, **34** (8): 1508-1514.
- Xu J C, Wang X W, Nie Y P, *et al.* Effect of maize-pea intercropping on crop copper accumulation under different copper concentrations [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34** (8): 1508-1514.
- [28] Desjardins D, Brereton N J B, Marchand L, *et al.* Complementarity of three distinctive phytoremediation crops for multiple-trace element contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 1428-1438.
- [29] 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.
- [30] 闫秀秀, 徐应明, 王林, 等. 叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 [J]. 环境科学, 2020, **41** (11): 5151-5159.
- Yan X X, Xu Y M, Wang L, *et al.* Effects of intercropping of *Brassica chinensis* L. and *Tagetes patula* L. on the growth and cadmium accumulation of plants [J]. Environmental Science, 2020, **41** (11): 5151-5159.
- [31] 李长欣, 吕严凤, 张梦迪, 等. 热解条件对茶叶渣生物炭特性及镉污染土壤钝化效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2017, **11** (12): 6504-6510.
- Li C X, Lyu Y F, Zhang M D, *et al.* Influence of pyrolysis conditions on properties of tea residue biochar and its passivation effect in Cd contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11** (12): 6504-6510.
- [32] Gupta A, Dutta A, Sarkar J, *et al.* Metagenomic exploration of microbial community in mine tailings of Malankhand copper project, India [J]. Genomics Data, 2017, **12**: 11-13.
- [33] 于方明, 姚亚威, 谢冬煜, 等. 泗顶矿区 6 种土地利用类型土壤微生物群落结构特征 [J]. 中国环境科学, 2020, **40** (5): 2262-2269.
- Yu F M, Yao Y W, Xie D Y, *et al.* Study on the soil microbial community structure associated with six land use in Siding mining area [J]. China Environmental Science, 2020, **40** (5): 2262-2269.
- [34] 马静, 董文雪, 朱燕峰, 等. 东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 [J]. 环境科学, 2022, **43** (7): 3844-3853.
- Ma J, Dong W X, Zhou Y F, *et al.* Characteristics and assembly process of reclaimed soil microbial communities in Eastern Plain mining areas [J]. Environmental Science, 2022, **43** (7): 3844-3853.
- [35] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Effects of tree-herb co-planting on the bacterial community composition and the relationship between specific microorganisms and enzymatic activities in metal (loid)-contaminated soil [J]. Chemosphere, 2019, **220**: 237-248.
- [36] Zhalnina K, Louie K B, Hao Z, *et al.* Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly [J]. Nature Microbiology, 2018, **3** (4): 470-480.
- [37] Hackl E, Zechmeister-Boltenstern S, Bodrossy L, *et al.* Comparison of diversities and compositions of bacterial populations inhabiting natural forest soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70** (9): 5057-5065.
- [38] Banerjee S, Kirkby C A, Schmutter D, *et al.* Network analysis reveals functional redundancy and keystone taxa amongst bacterial and fungal communities during organic matter decomposition in an arable soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **97**: 188-198.
- [39] Alvarez A, Saez J M, Davila Costa J S, *et al.* Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals [J]. Chemosphere, 2017, **166**: 41-62.
- [40] Ma Y, Rajkumar M, Zhang C, *et al.* Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **174**: 14-25.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)