

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响

郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 作为土壤微生物系统的一个重要组成部分, 真菌可以明显地对土壤环境的变化起到指示作用; 城市中的人为活动很容易影响到土壤状况, 因此城市土壤往往有人为重金属富集现象的出现. 对城市内部不同功能区土壤中的真菌群落结构进行分析, 旨在探明城市内部不同功能区中重金属含量对土壤真菌群落结构的影响, 为城市土壤生态系统的修复与保护和城市环境质量的提高与改善等提供理论基础. 以重庆市北碚区 5 个城市功能区, 共计 8 个采样点的城市土壤作为研究对象, 采用高通量测序技术, 研究土壤中真菌多样性及群落结构特征. 北碚不同功能区土壤中 Cd 和 Hg 的含量均超过重庆市环境背景值, 其中, 紫色土基地外围土壤 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层出现轻度污染, 京东方外围绿化带 20 ~ 40 cm 土层和智能研究院 0 ~ 20 cm 土层处于重金属污染警戒状态. 大部分采样点的 Sobs、Chao1 和 Ace 指数均随着土壤深度的增加而减小. NMDS 分析结果表明, 京东方外围绿化带 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层与 40 ~ 60 cm 土层真菌群落相似性差异较大, 智能研究院 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层的真菌群落相似性差异也较大. 从群落组成方面分析, 在门水平上, 土壤中子囊菌门丰度最高, 其次为未分类的真菌门类和担子菌门; 在属水平上, *unclassified_k_Fungi*、*unclassified_p_Ascomycota*、*unclassified_o_Sordariales*、*Scopuloides*、*Robillarda* 和 *Dactylonectria* 有较高的丰度. 冗余分析 (RDA) 表明, Pb 和 Zn 对样品的影响程度最大, 对土壤真菌群落结构的影响显著. 本研究加深了对不同城市功能区的重金属含量与真菌群落结构之间关系的认识, 为合理利用和规划城市土壤提供科学依据.

关键词: 城市土壤; 不同功能区; 重金属; 真菌群落结构; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2022) 01-0510-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104273

Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil

GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, YU Zi-jie, YANG Jun-shun, LUO Hong-yan*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: As an important part of the soil microbial system, fungi can clearly indicate changes in the soil environment. Human activities in the city can easily affect the soil condition, so the phenomenon of artificial heavy metal enrichment often appears in urban soil. The objective of this study was to analyze the fungal community structure in different urban functional areas and to determine the effect of heavy metal content in different urban functional areas on the soil fungal community structure. This study provides theoretical basis for protecting and repairing the urban soil ecosystem and transforming and improving urban environmental quality. Soil samples from eight sampling sites in five functional areas of Beibei District in Chongqing were taken as the research objects. The diversity and community structure of fungi in soil were studied using high-throughput sequencing technology. The content of Cd and Hg in the soil of different functional areas in Beibei District exceeded the environmental background value of Chongqing. The 20-40 cm and 40-60 cm soil layers of JD were slightly polluted. The 20-40 cm soil layer and 0-20 cm soil layer of JLD and ZYY, respectively, were in the alerting state of heavy metal pollution. The Sobs index, Chao 1 index, and Ace index of most sampling points decreased with the increase in soil depth. The NMDS analysis showed that the composition of fungal communities between the 0-20 cm and 20-40 cm soil depths in both JD and ZYY were quite different. From the perspective of community composition, Ascomycota was the most abundant phylum in the soil, followed by unclassified_k_Fungi and Basidiomycota. At the genus level, *unclassified_k_Fungi*, *unclassified_p_Ascomycota*, *unclassified_o_Sordariales*, *Scopuloides*, *Robillarda*, and *Dactylonectria* had higher abundances. The redundancy analysis (RDA) showed that Pb and Zn had the greatest effect on the samples, and the effect on the fungal community structure was significantly different. This study has deepened the understanding of the relationship between the content of heavy metals in different urban functional areas and the structure of fungal communities and has provided a scientific basis for the rational use and planning of urban soil.

Key words: urban soils; different functional areas; heavy metal; fungal community structure; high-throughput sequencing

城市工厂产生的工业“三废”、汽车尾气的排放以及居民生活排放的各种垃圾等会不断挑战城市土壤中重金属的承载能力^[1,2], 这就会使得城市土壤具有很容易被人为活动所扰动的特点^[3]. 而土壤中的微生物存在不容易分解这些重金属的特性, 所以它们只能在环境中迁移、转换并积累. 当土壤中的重金属超过一定范围时, 它们就会对微生物造成一定的毒性影响, 进一步地会影响到土壤生态系统的平衡甚至是破坏整个环境系统的功能^[4,5]. 微生物作为表征土壤功能稳定性和生态系统结构的重要指

数, 可以很好地反映出土壤环境污染的状况^[6]. 其中, 土壤真菌作为土壤微生物的重要类型之一, 可以促进物质循环, 参与有机物的分解并为植物提供营养元素, 是生态系统健康的重要指示物种^[7]. 真菌比细菌对重金属污染更为敏感, 土壤在受重金属污

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301315); 重庆市自然科学基金项目 (Cstc2019jcyj-msxmX0304); 西南大学基本科研业务费专项资金重点项目 (XDJK2019B072)

作者简介: 郭大陆 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物, E-mail: gdl199701@163.com

* 通信作者, E-mail: luol1974@swu.edu.cn

染后,土壤真菌生物量显著减少,土壤真菌群落组成变化显著^[8~10]。因此,研究重金属对城市土壤真菌群落结构的影响将有助于揭示城市土壤中重金属含量与真菌群落结构之间的关系。李一蒙等^[11]的研究表明,与城市或郊区土壤所在地的环境背景值相比,城市土壤中的重金属含量明显更高,并且在城市土壤中发生了不同程度的污染,但每个城市功能区的污染程度差异很大。卢瑛等^[12]对南京市城市和郊区土壤中的 Pb 含量进行了研究并比较,结果显示,城市土壤中的 Pb 含量是南京市环境背景值的 4~5 倍。闫华等^[13]的研究结果表明,在不同重金属污染水平下,稻田土壤的真菌群落结构存在显著差异。Guo 等^[14]的研究使用高通量测序技术发现,微生物群落结构在重金属污染土壤中发生了变化,并获得了重金属敏感和具有抗性的真菌。肖诗琦等^[15]的研究表明,在土壤受到铀胁迫后,土壤真菌群落结构与对照组明显不同。目前,大多数研究都集中在重金属含量及污染程度方面,而关于城市内部不同功能区重金属污染的差异与土壤真菌群落结构之间关系还鲜有报道。因此,本研究采取重庆市北碚区不同功能区的城市土壤,分析重金属含量与真菌群落结构之间的关系,阐明城市内部不同功能区土壤重金属含量分布差异的原因,以期对城市土壤生态系统的修复与保护、城市环境质量的提高与改善以及合理利用和规划城市土壤等提供重要的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北碚区位于重庆市核心区的西北部,是重庆市 9 个主城区之一,常住人口为 81.10 万人(2018 年)。地处东经 106°18'02"~106°40'57",北纬 29°37'~30°05'08",属于东南亚季风环流控制的亚热带湿润气候,具有冬季温暖、春早、夏季多炎热和干旱、秋迟多雨、热量丰富、降雨充沛、风力小、湿度高、多云雾、少冰雪和日照天数少等特点。年平均气温 18.3℃、年平均降水量 1 105.4 mm。北碚区最高点为海拔 1 316 m 的金刀峡镇天竹林,最低点为海拔 175 m 的童家溪镇嘉陵江边。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

由于城市土壤受人为因素的影响比较大,所以其分布往往都会具有土壤物质来源复杂、不连续和土层混乱等特点。分析城市土壤首先最重要的就是土壤剖面的选取以及样本采集。因此在选择采样点时本研究主要考虑以下 3 个方面:①在城市不同功

能区(商业区、科研基地、城市广场、居民区和高新区)设点;②城市土壤由于存在层次混乱和人为因素干扰大的特点,故在本研究中,分别将 0~20、20~40 和 40~60 cm 的 3 个土层样品作为分析样品和剖面记录,同时为了使分析样品更具有代表性,采用 5 点取样法进行取样,每个土样均为多点混合样;③每个城市功能区剖面点的选择应该尽可能地具有代表性,避免人工填充物,以避免产生极端的分析结果^[2]。采样地点具体分布情况见图 1,商业区采样点 1 个:状元碑步行街(BXJ);科研基地采样点 1 个:国家紫色土基地外围(JD);城市广场采样点 1 个:佳程广场(JC);居民区采样点 2 个:五路口(WLK)和文星湾(WXW);高新区采样点 3 个:京东方外围道路(JL)、京东方外围绿化带(JLD)和中科院智能研究院(ZYY)。状元碑步行街和中科院智能研究院由于土层较薄,只采集了两个剖面,分别采集 0~20 cm 和 20~40 cm 的剖面土壤。

每个采样点各土层深度采集样品 500 g,去除枯枝落叶等杂质后,将样品用保鲜箱装存带回实验室,并分出一部分鲜样置于 -80℃ 冰箱中保存以供土壤总 DNA 的提取;然后将剩余的土壤样品先风干后再研磨,分别过 20 目和 100 目筛后用于土壤基本理化性质的测定。



图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location diagram of the study area

1.2.2 土壤基本理化性质测定

根据文献^[16]提供的测定方法测定供试土壤的基本理化性质,如表 1 所示。

表 1 供试土壤不同剖面基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of different sections of the tested soil

功能区	采样点	土层深度 /cm	pH	EC /mS·cm ⁻¹	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(全氮) /g·kg ⁻¹	ω(全磷) /g·kg ⁻¹	ω(全钾) /g·kg ⁻¹	ω(碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω(有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω(速效钾) /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹
商业区	BXJ	0~20	8.20	0.18	20.02	0.53	0.61	24.13	121.76	9.18	106.00	20.06
		20~40	8.50	0.13	6.82	0.33	0.38	23.55	70.55	5.74	71.00	19.73
科研基地	JD	0~20	7.90	0.25	4.39	0.57	0.54	33.02	61.10	15.30	93.00	15.95
		20~40	5.70	0.12	14.36	0.77	0.58	35.42	99.80	42.08	90.00	15.53
		40~60	5.40	0.09	15.97	0.20	0.73	34.13	106.02	46.67	103.00	15.79
城市广场	JC	0~20	8.40	0.13	9.84	0.59	0.69	32.39	82.24	6.50	109.00	18.53
		20~40	8.70	0.11	6.81	0.32	0.72	32.51	70.49	6.12	78.00	12.69
		40~60	8.60	0.12	5.77	0.28	0.67	33.10	66.47	5.74	87.00	18.43
居民区	WXW	0~20	8.20	0.25	9.07	0.52	0.33	29.02	79.26	10.33	230.00	18.59
		20~40	8.50	0.17	27.11	0.54	0.47	19.06	149.24	11.86	250.00	19.28
		40~60	8.50	0.16	26.45	0.50	0.58	30.14	146.69	8.80	380.00	17.96
	WLK	0~20	8.00	0.17	24.18	1.07	0.59	24.13	137.88	15.68	77.00	22.17
		20~40	8.40	0.11	11.01	0.63	0.45	25.69	86.81	11.86	106.00	19.96
		40~60	8.30	0.12	13.88	0.51	0.45	23.16	97.94	13.77	100.00	22.75
高新区	JL	0~20	7.80	0.14	26.80	0.34	0.70	31.50	148.03	11.09	100.00	21.41
		20~40	8.30	0.19	13.84	0.74	0.70	37.25	97.78	7.27	64.00	21.52
		40~60	8.30	0.16	12.78	0.64	0.70	36.68	93.67	7.65	65.00	18.64
	JLD	0~20	8.20	0.15	11.95	0.64	0.57	31.69	90.46	4.97	84.00	14.86
		20~40	8.20	0.15	12.24	0.76	0.53	31.43	91.57	4.59	71.00	13.59
		40~60	8.10	0.16	13.31	0.85	0.68	32.66	95.71	4.21	97.00	17.57
	ZYY	0~20	8.20	0.10	10.28	0.61	0.23	21.72	83.96	7.65	45.00	14.43
		20~40	8.10	0.13	11.10	0.50	0.26	23.55	87.16	4.97	41.00	18.07

1.2.3 土壤重金属污染水平

土壤 Cr、Hg、Cu 和 Zn 用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮后,采用火焰原子吸收分光光度法测定; Pb 和 Cd 含量采用电感耦合等离子体质谱仪测定; As 含量采用原子荧光光度法测定^[11]. 内梅罗污染指数^[17]通常用来衡量土壤中的重金属污染水平,其计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = [(P_{\text{均}}^2 + P_{\text{最大}}^2)/2]^{1/2},$$

式中, $P_{\text{均}}$ 和 $P_{\text{最大}}$ 分别是平均单项污染指数和最大单项污染指数,内梅罗指数的计算参照国家土壤环境质量标准(GB 15618-2018).

1.2.4 土壤真菌群落多样性测定

土壤真菌多样性测定:土壤样品基因组 DNA 的提取及纯化按照 E. Z. N. A. Soil DNA Kit 说明书操作,提取后采用核酸定量仪 NanoDrop2000 测定 DNA 浓度,并经 2% 琼脂糖凝胶电泳对 DNA 样品进行检测,检测合格后用于构建文库;以各土壤样品总 DNA 为模板,对真菌 ITS 区通用引物 ITS1-F (5'-CTTGGT CATTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2-R (5'-GCTGCGT TCTTCATCGATGC-3') 进行 PCR 扩增;采用 Illumina MiSeq 测序平台对 PCR 扩增产物进行双端测序分析,测序数据的优化和统计方法见文献[18]. 测序委托上海美吉生物医药科技有限公司完成.

1.3 数据处理

使用 Uparse 软件(<http://drive5.com/uparse/>)

对测得所有序列进行 OTU 划分,基于 97% 的相似性生成 OTU 表格,并构建稀释曲线. 应用 Mothur 程序 (https://www.mothur.org/wiki/Download_mothur) 计算常用的生物多样性指数. 以 Unite 为数据库,得到不同样本的真菌在门和属水平上的组成. NMDS、RDA、LEfSe 分析均通过美吉云平台(www.i-sanger.com) 完成,并利用 Microsoft Excel 2010 对其余试验数据进行计算和作表.

2 结果与分析

2.1 城市土壤重金属污染状况

通过表 2 中计算的内梅罗指数可以看出,北碚区城市土壤的重金属污染状况整体上不严重. 没有出现重度污染和中度污染的功能区,出现轻度污染的功能区是科研基地,处于土壤重金属污染警戒线的功能区是高新区,其余城市功能区均没有出现重金属污染现象. 紫色土地外围土壤中 20~40 cm 和 40~60 cm 土层均呈现轻度污染;京东方外围绿化带的 20~40 cm 土层和智能研究院的 0~20 cm 土层均处于警戒状态. 此外,北碚区不同功能区土壤中 Cd 和 Hg 的含量均高于重庆市环境背景值;紫色土地外围土壤中 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,佳程广场的 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层以及京东方外围绿化带的 20~40 cm 土层中 Pb 的含量均高于重庆市环境背景值;紫色土地外围土壤的 20~40 cm

土层中铜的含量,佳程广场的 40 ~ 60 cm 土层和京东方外围绿化带的 20 ~ 40 cm 土层中的 Zn 的含量均高于重庆市环境背景值. 总的来说,北碚区不同功能区土壤中的 Cd、Pb 和 Hg 是主要污染因子. Cd 的浓度依次为:智能研究院 > 京东方外围绿化带 > 紫色土地 > 京东方外围道路 > 步行街 > 五路口 > 文星湾 >

佳程广场. Pb 的浓度以佳程广场含量最高,依次为:佳程广场 > 紫色土地 > 步行街 > 智能研究院 > 京东方外围道路 > 文星湾 > 京东方外围绿化带 > 五路口. Hg 的浓度由高到低依次为:京东方外围道路 > 智能研究院 > 文星湾 > 京东方外围绿化带 > 紫色土地 > 步行街 > 五路口 > 佳程广场.

表 2 北碚区城市土壤重金属分布¹⁾

Table 2 Distribution of heavy metals in urban soils in Beibei District										
功能区	采样点	土层深度 /cm	ω (全铬) /mg·kg ⁻¹	ω (全镉) /mg·kg ⁻¹	ω (全铅) /mg·kg ⁻¹	ω (全砷) /mg·kg ⁻¹	ω (全汞) /mg·kg ⁻¹	ω (全铜) /mg·kg ⁻¹	ω (全锌) /mg·kg ⁻¹	内梅罗指数 ($P_{\text{综}}$)
商业区	BXJ	0 ~ 20	28.23	0.47	22.15	1.80	0.12	15.08	68.56	0.56
		20 ~ 40	30.49	0.44	19.34	1.54	0.13	14.27	75.15	0.54
科研基地	JD	0 ~ 20	33.77	0.53	21.22	2.22	0.13	18.59	75.90	0.64
		20 ~ 40	37.86	0.55	24.89	2.45	0.13	22.18	71.22	1.34
		40 ~ 60	28.60	0.56	22.96	2.22	0.16	18.72	72.86	1.36
城市广场	JC	0 ~ 20	31.27	0.36	23.26	1.93	0.11	17.22	68.17	0.44
		20 ~ 40	31.42	0.48	24.15	2.18	0.13	13.59	75.41	0.58
		40 ~ 60	29.83	0.45	26.67	1.77	0.16	20.65	80.01	0.55
居民区	WXW	0 ~ 20	24.15	0.36	16.76	1.50	0.14	12.68	52.18	0.43
		20 ~ 40	20.28	0.53	12.20	1.82	0.12	9.87	44.68	0.64
		40 ~ 60	23.76	0.50	16.73	1.94	0.12	11.77	47.76	0.60
	WLK	0 ~ 20	20.11	0.41	15.73	2.13	0.12	10.22	41.39	0.49
		20 ~ 40	18.81	0.40	13.47	1.87	0.12	10.34	37.51	0.48
		40 ~ 60	20.61	0.58	16.12	2.06	0.17	11.76	49.10	0.69
高新区	JL	0 ~ 20	21.45	0.50	17.62	2.09	0.16	12.82	67.76	0.60
		20 ~ 40	20.73	0.41	12.47	1.91	0.18	10.53	45.60	0.49
		40 ~ 60	19.44	0.27	17.72	2.15	0.13	12.44	53.46	0.33
	JLD	0 ~ 20	24.82	0.55	16.27	1.68	0.13	14.75	60.08	0.66
		20 ~ 40	29.03	0.60	23.69	1.40	0.16	17.59	80.96	0.73
		40 ~ 60	26.96	0.55	20.67	2.08	0.16	14.51	67.31	0.66
	ZYY	0 ~ 20	28.26	0.69	18.93	1.59	0.15	14.28	72.20	0.83
		20 ~ 40	33.00	0.40	19.53	2.14	0.13	21.13	66.22	0.48
	背景值		49.08	0.14	22.20	6.99	0.04	22.00	78.22	

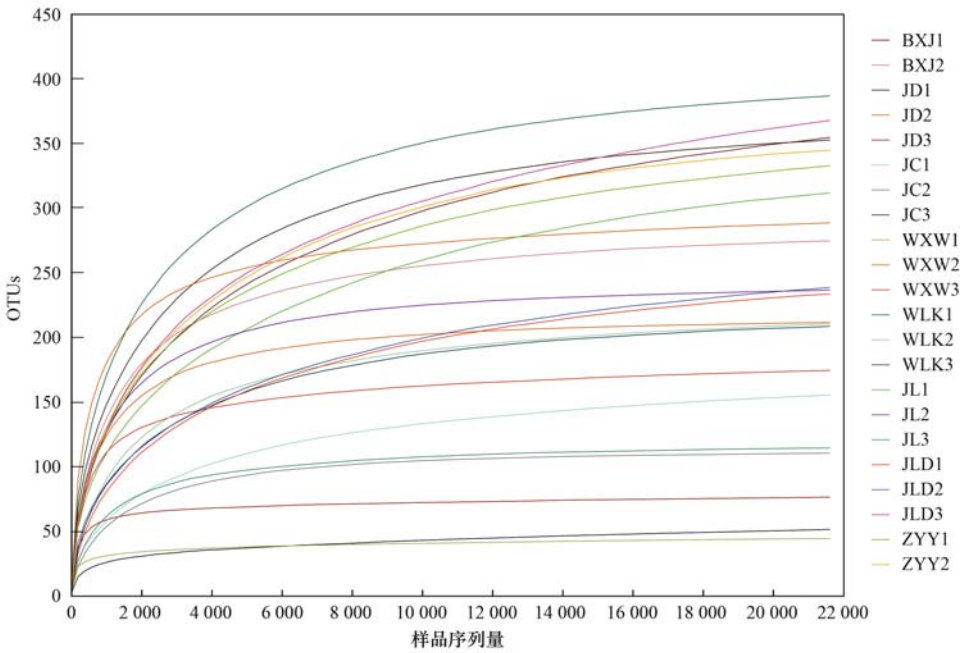
1) 土壤综合污染指数分级: $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 安全; $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 警戒线; $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 轻度污染; $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 中度污染; $P_{\text{综}} > 3.0$ 重度污染

2.2 城市土壤真菌多样性

OTU 稀释曲线随着样品序列数量的增加而变得逐渐趋于平坦,更多的数据只会生成少数新的 OTU; 当测序量达到22 000个时,OTU 的数量基本上已经饱和(图 2). 这表明测序的数量是合理的,并且可以基本上真实地反映北碚区城市土壤 5 个功能区 8 个采样点 22 个样品的真菌群落组成,测序结果涵盖了该试验中的大多数真菌类群. 由表 3 可知,步行街、紫色土地外围、佳程广场、五路口和京东方的 Sobs、Chao1 和 Ace 指数均随着土壤深度的增加而呈现减小的趋势,这表明这些地方的物种丰富度随着土壤深度的增加而降低,而京东方和智能研究院可能是受人为干扰等因素的影响未出现这种规律. 受重金属污染和土层深度的影响,紫色土地外围不同深度土层的 Shannon 指数呈现出:40 ~ 60 cm < 20 ~ 40 cm < 0 ~ 20 cm 的规律,而 Simpson 指数则与其相反,呈现出 40 ~ 60 cm > 20 ~ 40 cm > 0 ~ 20 cm 的规律,这表明 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层的真菌群落多样性高于 0 ~ 20 cm; 受土壤重金属含量的影

响,智能研究院的 0 ~ 20 cm 土层的 Shannon 指数低于 20 ~ 40 cm, Simpson 指数高于 20 ~ 40 cm.

由图 3 的 NMDS 分析发现,当应力值为 0.178 时,步行街不同深度土壤主要分布在第二象限. 紫色土地不同深度土壤主要分布在第三象限. 佳程广场不同深度土壤主要分布在第四象限,其中 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层距离较近,表现出较高的相似性. 文星湾不同深度土壤主要分布在第三象限. 五路口不同深度土壤主要分布在第二象限,其中 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层距离较近,表现出较高的相似性. 京东方外围道路不同深度土壤主要分布在第一象限,其中 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层距离较近,表现出较高的相似性. 京东方外围绿化带 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层分布在第一象限,40 ~ 60 cm 土层分布在第二象限,其中 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层距离较近,表现出较高的相似性. 智能研究院 0 ~ 20 cm 土层分布在第一象限,20 ~ 40 cm 土层分布在第二象限,距离较远,样品中真菌群落相似性差异较大.



BXJ1:步行街0~20 cm 土层; BXJ2:步行街20~40 cm 土层; JD1:紫色土地外围0~20 cm 土层; JD2:紫色土地外围20~40 cm 土层; JD3:紫色土地外围40~60 cm 土层; JC1:佳程广场0~20 cm 土层; JC2:佳程广场20~40 cm 土层; JC3:佳程广场40~60 cm 土层; WXW1:文星湾0~20 cm 土层; WXW2:文星湾20~40 cm 土层; WXW3:文星湾40~60 cm 土层; WLK1:五路口0~20 cm 土层; WLK2:五路口20~40 cm 土层; WLK3:五路口40~60 cm 土层; JL1:京东方外围道路0~20 cm 土层; JL2:京东方外围道路20~40 cm 土层; JL3:京东方外围道路40~60 cm 土层; JLD1:京东方外围绿化带0~20 cm 土层; JLD2:京东方外围绿化带20~40 cm 土层; JLD3:京东方外围绿化带40~60 cm 土层; ZYY1:智能研究院0~20 cm 土层; ZYY2:智能研究院20~40 cm 土层,下同

图2 北碚区城市土壤真菌的稀释曲线

Fig. 2 Rarefaction curves of urban soil fungi in Beibei District

表3 北碚区城市土壤真菌的α多样性指数

Table 3 The α index of urban soil fungi in Beibei District

功能区	采样点	土层深度/cm	Sobs 指数	Coverage 指数	Chao1 指数	Ace 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
商业区	BXJ	0~20	354	0.996 7	417.90	406.82	3.42	0.104 9
		20~40	274	0.999 2	280.18	281.17	3.83	0.051 8
科研基地	JD	0~20	352	0.998 3	376.23	367.36	4.03	0.042 9
		20~40	211	0.999 6	218.20	214.05	3.72	0.062 3
		40~60	76	0.999 7	83.50	81.55	2.97	0.105 4
城市广场	JC	0~20	155	0.998 8	174.50	172.78	2.60	0.139 2
		20~40	110	0.999 8	111.67	111.49	1.92	0.285 4
		40~60	51	0.999 4	70.50	85.32	1.35	0.466 9
居民区	WXW	0~20	44	0.999 7	59.00	49.90	1.98	0.320 3
		20~40	288	0.999 0	307.09	298.96	4.67	0.016 7
		40~60	174	0.999 3	191.14	184.22	3.34	0.112 0
	WLK	0~20	386	0.998 3	406.18	402.85	4.33	0.029 6
		20~40	210	0.998 9	225.81	221.40	2.66	0.170 4
		40~60	208	0.999 1	215.43	216.11	2.66	0.162 5
高新区	JL	0~20	311	0.997 6	335.06	344.33	3.51	0.085 6
		20~40	236	0.999 5	241.50	239.19	3.86	0.045 0
		40~60	114	0.999 7	116.63	117.10	1.82	0.359 3
	JLD	0~20	233	0.998 2	254.17	258.20	2.03	0.380 3
		20~40	238	0.997 8	275.28	272.74	2.51	0.267 1
		40~60	367	0.996 4	430.61	431.84	3.06	0.181 8
	ZYY	0~20	332	0.997 7	361.17	362.12	3.64	0.074 2
		20~40	344	0.998 2	360.74	361.12	3.66	0.073 3

2.3 城市土壤真菌群落组成

由图4可知,在真菌门水平上,不同采样点的不同

剖面主要由子囊菌门(Ascomycota)、未分类的真菌门类(unclassified_k_Fungi)、担子菌门

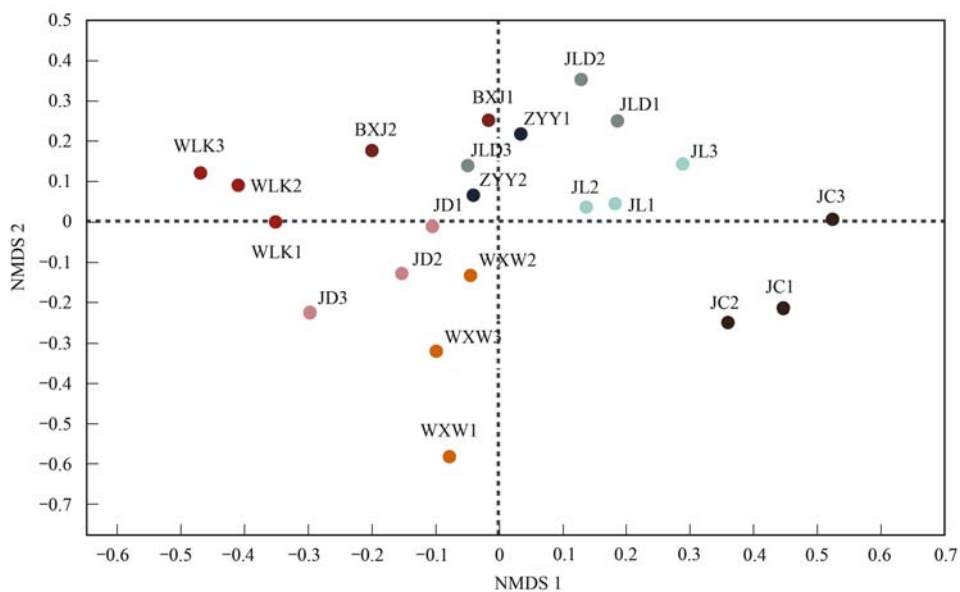


图3 北碚区城市土壤中真菌群落基于 OTU 水平的 NMDS 分析

Fig. 3 NMDS analysis of fungal communities in the urban soil in Beibei District at OTU level

(Basidiomycota) 和毛霉菌门 (Mortierellomycota) 组成; 其中, 子囊菌门、未分类的真菌门类和担子菌门总体上占主导地位, 在整体水平上子囊菌门 (15.76%~88.67%) 丰度最高, 其次为未分类的真菌门类 (0.33%~73.52%) 和担子菌门 (1.86%~56.87%)。

由图5可以看出, 在属水平上, *unclassified_k_Fungi*、*unclassified_p_Ascomycota*、*unclassified_o_Sordariales*、*Scopuloides*、*Robillarda* 和 *Dactylonectria* 为优势菌属。其中, *unclassified_k_Fungi* 在佳程广场 40~60 cm 土层中含量最高 (73.52%), *unclassified*

p_Ascomycota 在佳程广场 0~20 cm 土层中含量最高 (63.57%), *unclassified_o_Sordariales* 在文星湾 0~20 cm 土层中含量最高 (54.70%), *Scopuloides* 在京东方外围绿化带 20~40 cm 土层中含量最高 (50.76%), *Robillarda* 在京东方外围道路 40~60 cm 土层中含量最高 (56.07%), *Dactylonectria* 在文星湾 40~60 cm 土层中含量最高 (30.21%)。

2.4 城市土壤中重金属含量与真菌群落结构的冗余分析

RDA 分析表明 (图6), 对于不同功能区、不同采样点以及不同深度的城市土壤中真菌群落结构影

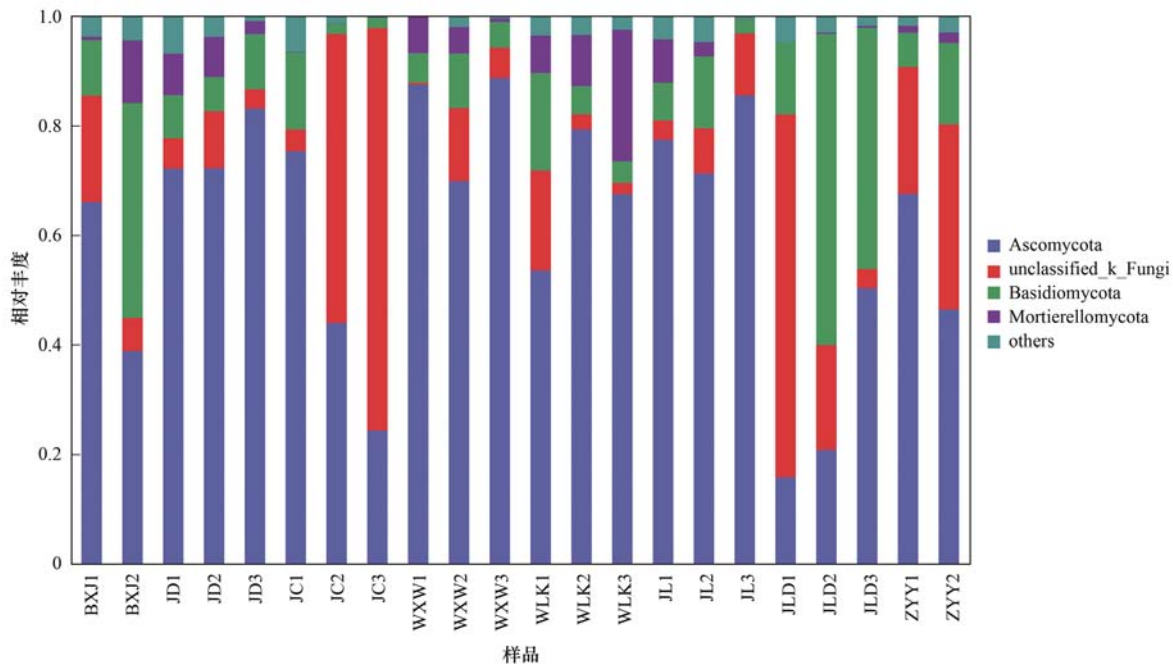


图4 北碚区城市土壤中主要真菌门的相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of major fungal phyla in urban soil in Beibei District

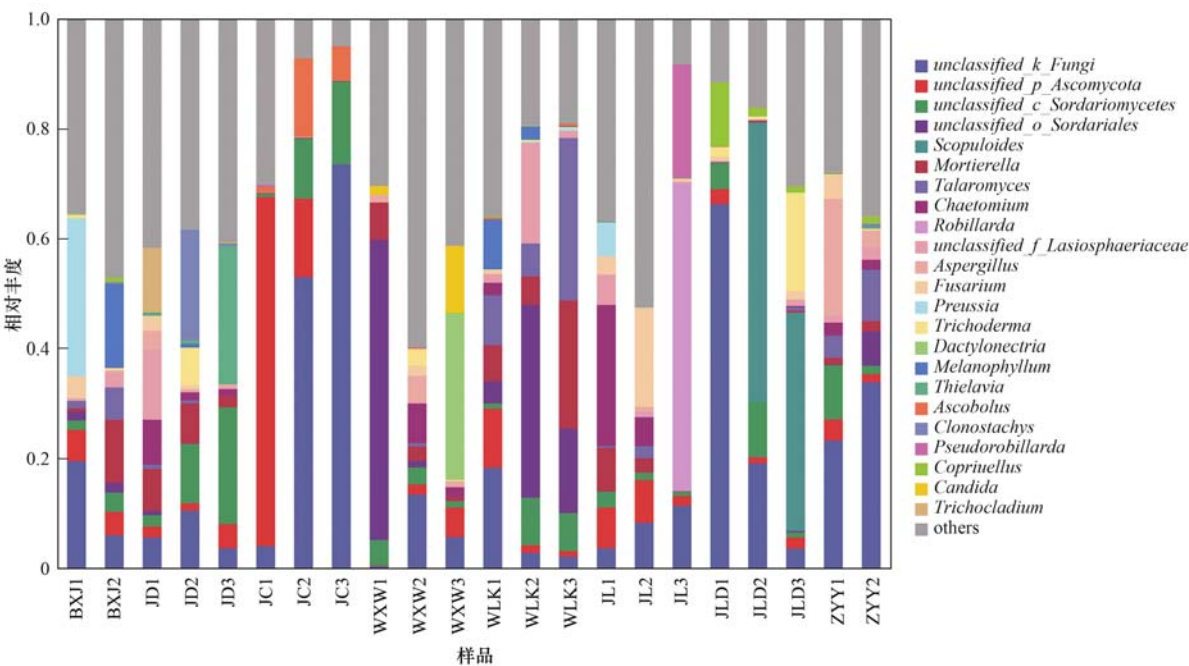


图 5 北碚区城市土壤中优势真菌属的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of superiority fungal genera in urban soil in Beibei District

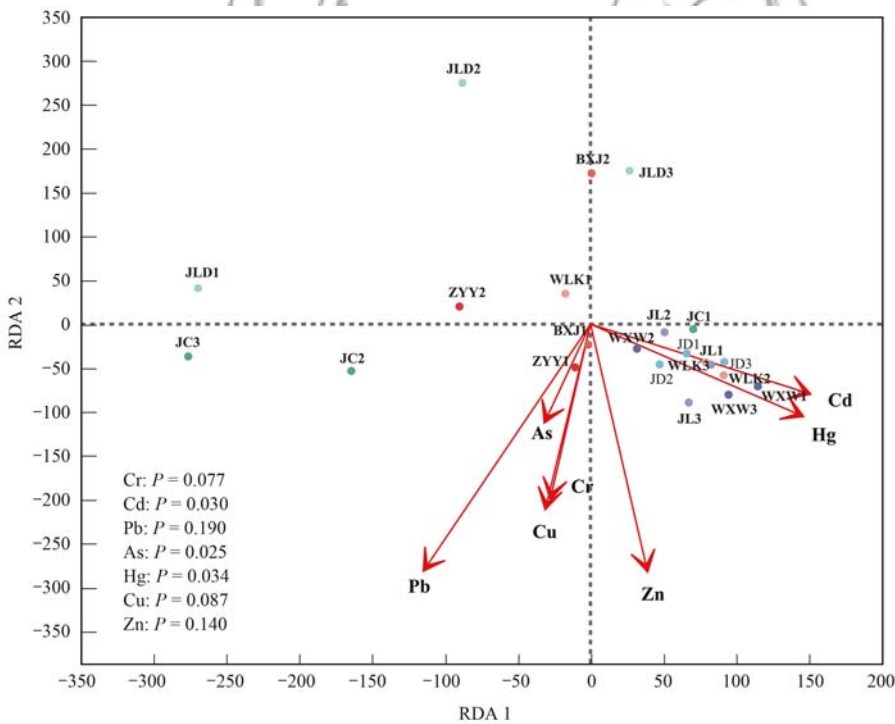


图 6 北碚区城市土壤中重金属含量与真菌门水平的冗余分析

Fig. 6 RDA analysis of fungal communities with heavy metal content in urban soil in Beibei District at the phylum level

响程度最大的环境因子是 Pb 和 Zn,其次是 Cu、Cd、Hg 和 Cr,影响程度最小的环境因子是 As. 在各个环境因子之间,Pb 与 Zn、Cu、Cr 和 As 呈正相关关系,与 Cd 和 Hg 呈负相关关系. 不同功能区、不同采样点以及不同深度的城市土壤样品受 Pb 的影响程度最大,Pb 对各样点真菌群落结构的影响差异显著.

2.5 城市土壤中真菌群落结构的 LEfSe 分析

由于步行街和智能研究院的土层较薄,只采集

了两个剖面,无法进行 LEfSe 分析,故舍去这两个采样点的处理. 本研究从门到属对城市土壤进行 LEfSe 分析,由图 7 可知,其余 6 个采样点有显著差异的真菌类群有 23 个. 其中,对紫色土基地外围土壤起重要作用的类群为 f_Aspergillaceae. 对佳程广场土壤起重要作用的类群有 5 种,对文星湾和五路口土壤起重要作用的类群分别有 4 种和 5 种,对京东方外围道路土壤起重要作用的类群有 6 种. 对京

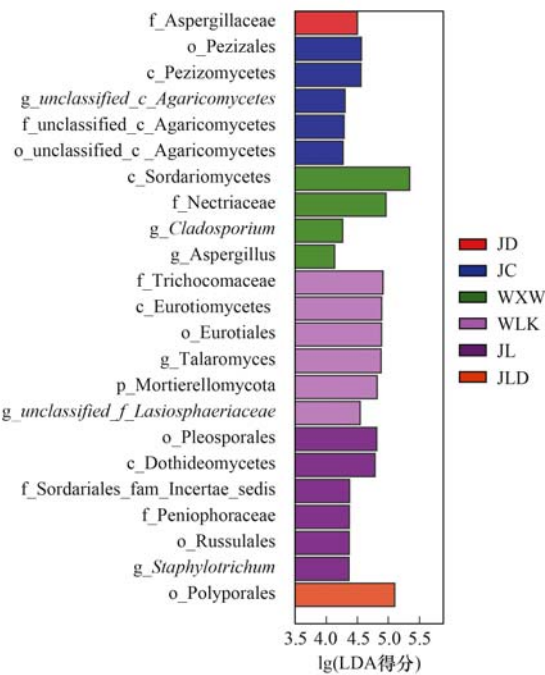


图7 北碚区城市土壤真菌的 LEfSe 分析

Fig. 7 LEfSe analysis of fungi in urban soil in Beibei District

东方外围绿化带土壤起重要作用的类群为 o_Polyporales. 由图 8 可见, 在属水平上, g_Cladosporium、g_unclassified_f_Lasiosphaeriaceae 和 g_Aspergillus 的相对丰度在文星湾和五路口间均存在显著差异; g_Staphylotrichum 的相对丰度在京东方外围道路和文星湾间存在显著差异; g_unclassified_c_Agaricomycetes 的相对丰度在佳程广场和京东方外围绿化带间存在显著差异.

3 讨论

重金属在城市土壤中的来源途径不尽相同, 但主要还是与城市中的人类活动息息相关^[11,19,20], 人为活动所产生的重金属垃圾会增加城市土壤中的重金属含量^[21,22]. 重金属在土壤中很难发生迁移, 并且随着时间的流逝, 重金属会发生愈来愈多的富集. 此外, 城市不同功能区中的人类活动存在着差异性, 所以不同功能区的城市土壤污染状况也会存在很大差异. 本研究表明, 北碚区城市土壤总体上处于安全无污染的状态, 符合城市生态环境保护的要求, 此

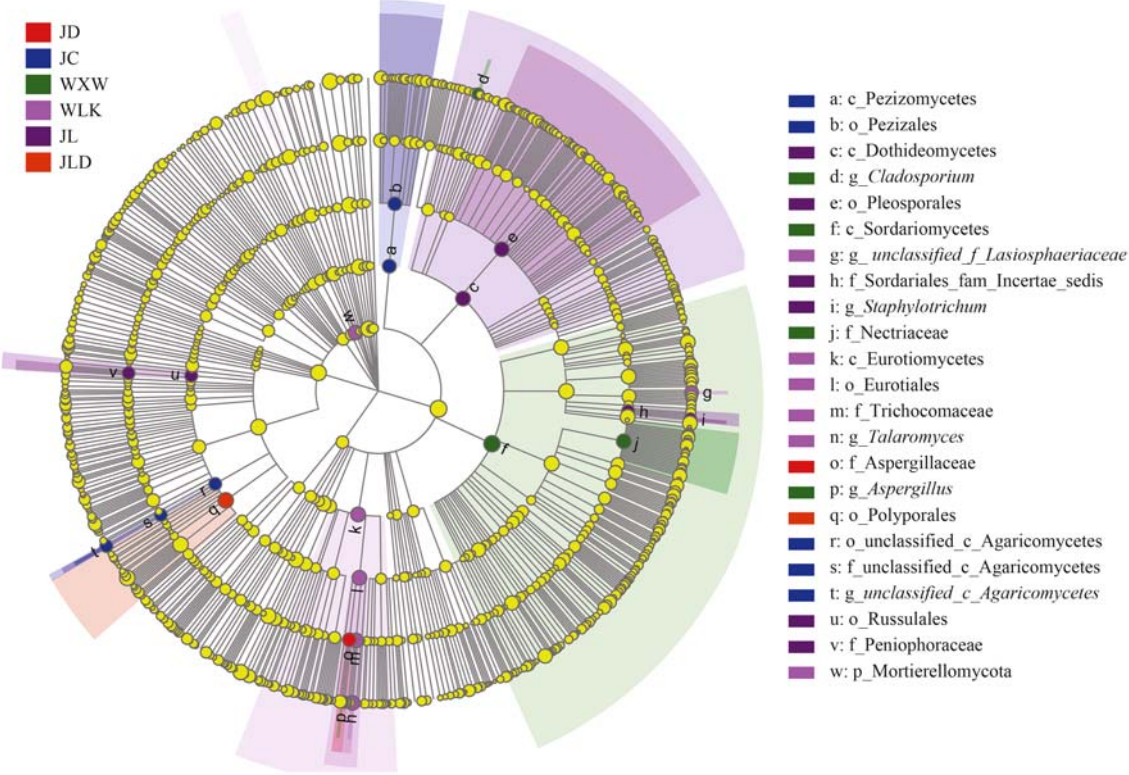


图8 LEfSe 分析 cladogram 图

Fig. 8 Cladogram diagram of LEfSe analysis

外, 北碚不同功能区的城市土壤中重金属 Cd 的含量均超过重庆市环境背景值, 这与前人的研究结果基本相一致^[23]. 但是本研究还发现北碚不同功能区的城市土壤中 Hg 含量也均超过了其环境背景值, 推测可能与北碚城区化石燃料的燃烧、工业产品的

生产、废物的焚烧、农业肥料和杀菌剂的使用等有关, 此外, 人们日常生活中使用的一些医疗器械、日常用品, 如血压计、体温计、日光灯、电闸开关和压力传感器等也是环境汞污染的来源^[24].

在整个土壤生态系统中, 土壤微生物起着关键

的作用,微生物可以调节土壤中 80%~90% 的功能,包括抗干扰能力、促进土壤养分转化和保证系统稳定性等^[25]. 土壤中真菌的多样性被认为是可以敏感反映土壤质量变化的指标,可以反映真菌群落结构的整体动态变化^[26],且土壤中微生物生物量的绝大部分是由真菌所构成,具有为植物提供营养元素和分解有机质的功能,是生态系统健康的指示物^[15]. 尽管土壤中细菌和放线菌的数量要远远高于真菌的数量,但是真菌呼吸作用产生的 CO_2 却要占到土壤总呼吸作用产生 CO_2 的 81%~95%,并且在陆地生态系统的碳循环中,真菌的作用不可或缺. 此外,土壤重金属污染还有可能会通过对微生物利用单一碳底物能力的降低来影响群落的结构和多样性. Liu 等^[27]在被重金属污染的稻田研究中发现,稻田土壤中的真菌优势度和微生物生物量因重金属污染而减少了,提高了稻田土壤的代谢商,稻田土壤中 CO_2 的排放量以及与碳素转换相关的生化过程也因此而改变. 外部干扰如重金属污染以及杀菌剂的使用等,可能会造成真菌丰富度或者真菌群落结构的改变^[13]. 在本研究中,不同功能区以及不同采样点的城市土壤中真菌群落结构有明显差异,这与梁强等^[28]对泰安市不同功能区绿地土壤微生物群落结构的研究结果一致. 此外,本研究还发现土壤真菌的多样性、丰富度以及群落结构组成与土壤剖面层次有关,土壤中真菌多样性和丰富度随着深度的增加而呈现递减趋势^[29],这与黄兰婷等^[30]在红壤水稻土和焦克等^[31]在藏东南典型暗针叶林的研究结果相似.

真菌群落结构分析表明,在城市不同功能区,子囊菌门和担子菌门均为优势菌门. 贾彤等^[32]的研究发现子囊菌门和担子菌门是铜尾矿白羊草叶际和根际土壤中的优势菌门. 同时,本研究还发现在城市内部的不同功能区土壤中,未分类的真菌门类也是主要的优势菌门,这可能与城市土壤受人为扰动比较大有一定的关系. 子囊菌门在重金属轻度污染的紫色土基地外围和处于警戒状态的智能研究院土壤中相对丰度较高,说明其具有一定的金属耐性. 在属水平上, *unclassified_c_Sordariomycetes* 真菌在处于轻度污染的紫色土基地外围 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的丰度分别是 10.82% 和 21.33%,在处于警戒状态的京东方外围绿化带 20~40 cm 和智能研究院 0~20 cm 土层的丰度分别是 10.16% 和 9.88%,显著高于其他未受重金属污染的样点,表明该类群可能具有一定的金属耐性.

城市土壤中真菌群落结构受不同种重金属元素的影响而有所不同. 本研究通过冗余分析发现,北碚

不同功能区、不同采样点以及不同深度的城市土壤中真菌群落结构受重金属 Pb 和 Zn 的影响程度最大, Cu、Cd、Hg 和 Cr 的影响次之, As 的影响最小. Pb、Zn、Cu、Cd、Hg、Cr 和 As 这 7 种金属元素对北碚不同功能区城市土壤中的真菌群落结构表现出了两种效应机制,即表现为拮抗效应和协同效应并存,这与闫华等^[13]的研究结果相类似. 不同的是,杨晔等^[33]的研究发现 Cd 对土壤中真菌的抑制作用要更为明显. 在重金属复合污染下红壤微生物活性及其群落结构变化的研究中,滕应等^[34]的研究也认为 Cd 和 Cu 对土壤微生物的毒害作用更为明显,其次是 Zn 和 Pb 的毒害作用最小. 出现这种差异可能是因为供试土壤样品的基本理化性质、土壤类型和土壤中原始重金属元素含量的不同,还有可能是供试土壤中原始的微生物群落结构就有所不同^[35]. 城市土壤重金属对人体健康构成威胁的元素主要涉及 Pb、Zn、Cu 和 Hg 这 4 种,它们被称之为典型的“城市重金属”^[23]. 此外,以往对城市土壤重金属含量的研究主要集中在 Pb、Zn、Cu 和 Cd 这 4 种重金属元素上^[2,11,13,23],但在本研究中除了对 Pb、Zn、Cu、Cd 和 Hg 这 5 种元素的测定,还进一步对北碚不同功能区城市土壤中 Cr 和 As 的含量进行了测定. Cr 是一种广泛应用于化工领域的元素. 工业废弃残留的 Cr 化合物对微生物和动植物具有较高的毒性. Cr 是动物和人类所必需的微量营养元素,但 Cr 浓度过高对动物和人类危害极大,会引起癌症和畸形等严重疾病,甚至导致死亡. 严重的 Cr 污染对大部分真菌有毒害作用, Cr 敏感真菌难以在 Cr 浓度较高的条件下生长, Cr 污染会导致土壤真菌丰度和群落组成发生显著变化^[36]. As 作为 5 大剧毒元素之一,是中国土壤中仅次于 Cd 的第二大污染物. 研究表明, As 污染致使土壤中微生物数量呈现下降趋势,随土壤 As 污染的加剧,土壤中有效态成分所占比例呈下降趋势^[37].

4 结论

(1) 北碚区不同功能区的城市土壤总体上处于安全无污染的状态,符合城市生态环境保护的要求,但不同功能区土壤中 Cd 和 Hg 的含量均超过重庆市环境背景值.

(2) 重金属污染会改变城市土壤真菌的丰度和群落结构,在属水平上, *unclassified_c_Sordariomycetes* 在有轻度污染和警戒状态样点处的丰度高于其余无污染的样点处,表明其可能具有较强的金属耐性.

(3) 冗余分析表明,北碚不同功能区的城市土

壤中真菌群落结构受重金属 Pb 和 Zn 的影响最大。

参考文献:

- [1] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 934-944.
Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 934-944.
- [2] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J]. 土壤学报, 2003, **40**(6): 921-928.
Wu X M, Pan G X. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing city [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(6): 921-928.
- [3] 傅裕, 杨霞, 王建. 南充市“城-郊-乡”梯度绿地土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(12): 4038-4047.
Fu Y, Yang X, Wang J. Stoichiometric characteristics of soil C, N and P of green space along an urban-suburb-rural gradient in Nanchong [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(12): 4038-4047.
- [4] 高林, 张继光, 吴元华, 等. 镉污染对烤烟根际土壤细菌和真菌群落结构的影响[J]. 土壤通报, 2015, **46**(3): 628-632.
Gao L, Zhang J G, Wu Y H, *et al.* Effect of Cd contamination on soil bacteria and fungi community structure in flue-cured tobacco rhizosphere [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(3): 628-632.
- [5] 王建坤. 铅锌污染对土壤微生物多样性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2009.
Wang J K. The effects of Zinc-lead pollution on the diversity of soil microorganisms [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [6] 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 土壤质量与持续环境——Ⅲ. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, **29**(5): 225-234.
- [7] 王芳. 呼伦贝尔草原蒙古白丽蘑菇圈土壤真菌多样性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
Wang F. Studies on soil fungi diversity of *Leucocalocybe mongolicum* fairy ring in Hulun Buir grassland [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.
- [8] 贺枫. 重金属污染对水稻土团聚体有机碳矿化及微生物群落结构和功能的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [9] Rex D, Clough T J, Richards K G, *et al.* Fungal and bacterial contributions to codenitrification emissions of N₂O and N₂ following urea deposition to soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, **110**(1): 135-149.
- [10] Shalbaya M M A, El-Azeim M M A, Menesi A M, *et al.* Heavy metals and microbial activity in alluvial soils affected by different land-uses [J]. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 2021, **12**(3): 165-177.
- [11] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [12] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤 Pb 的含量及其化学形态[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 156-160.
Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. The concentration and chemical speciation of Pb in Nanjing urban soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(2): 156-160.
- [13] 闫华, 欧阳明, 张旭辉, 等. 不同程度重金属污染对稻田土壤真菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(3): 513-521.
Yan H, Ouyang M, Zhang X H, *et al.* Effects of different gradients of heavy metal contamination on soil fungi community structure in paddy soils [J]. Soils, 2018, **50**(3): 513-521.
- [14] Guo H H, Nasir M, Lv J L, *et al.* Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **144**: 300-306.
- [15] 肖诗琦, 宋收, 陈晓明, 等. 高通量测序揭示铀污染对土壤真菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(8): 1698-1704.
Xiao S Q, Song S, Chen X M, *et al.* Effect of uranium pollution on the soil fungal community as revealed via high-throughput sequencing [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(8): 1698-1704.
- [16] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [17] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [18] 胥伟, 姜依何, 吴丹, 等. 高通量测序研究霉变黑毛茶的真菌多样性[J]. 茶叶科学, 2017, **37**(5): 483-492.
Xu W, Jiang Y H, Wu D, *et al.* RNA sequencing analysis of fungi community diversity in mildew raw dark tea [J]. Journal of Tea Science, 2017, **37**(5): 483-492.
- [19] De Moura M C S, Moita G C, Neto J M M. Analysis and assessment of heavy metals in urban surface soils of Teresina, Piauí State, Brazil: a study based on multivariate analysis [J]. Comunicata Scientiae, 2010, **1**(2): 120-127.
- [20] Yang J, Ma S L, Zhou J C, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables and health risk assessment of inhabitants in Daye, China [J]. Journal of International Medical Research, 2018, **46**(8): 3374-3387.
- [21] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2): 99-107.
- [22] Mahapatra B, Dhal N K, Dash A K, *et al.* Perspective of mitigating atmospheric heavy metal pollution: using mosses as biomonitoring and indicator organism [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(29): 29620-29638.
- [23] 武玲珍. 基于土壤重金属的城市土壤环境质量评价研究——以重庆市北碚区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
Wu L Z. Study on city soil environmental quality evaluation method with heavy metals—a case study of Beibei in Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [24] Buttafuoco G, Tarvainen T, Jarva J, *et al.* Spatial variability and trigger values of arsenic in the surface urban soils of the cities of Tampere and Lahti, Finland [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(10), doi: 10.1007/s12665-016-5707-1.
- [25] Achari G A, Kowshik M. Recent developments on nanotechnology in agriculture: plant mineral nutrition, health, and interactions with soil microflora [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, **66**(33): 8647-8661.
- [26] 邓娇娇, 朱文旭, 张岩, 等. 辽西北风沙区不同人工林土壤

- 真菌群落结构及功能特征[J]. 林业科学研究, 2020, **33**(1): 44-54.
- Deng J J, Zhu W X, Zhang Y, *et al.* Studies on soil fungal community composition and function characteristics of different plantations of sandy area, northwest Liaoning province [J]. Forest Research, 2020, **33**(1): 44-54.
- [27] Liu Y Z, Zhou T, Crowley D, *et al.* Decline in topsoil microbial quotient, fungal abundance and C utilization efficiency of rice paddies under heavy metal pollution across south China [J]. PLoS One, 2012, **7**(6), doi: 10.1371/journal.pone.0038858.
- [28] 梁强, 李传荣, 张锋, 等. 泰安市不同绿地土壤微生物群落结构分析[J]. 山东农业科学, 2017, **49**(2): 99-104.
- Liang Q, Li C R, Zhang F, *et al.* Analysis of soil microorganism community structure in different types of green space in Taian city [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, **49**(2): 99-104.
- [29] 邵元元, 王志英, 邹莉, 等. 百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(3): 819-829.
- Shao Y Y, Wang Z Y, Zou L, *et al.* Effect of chlorothalonil on soil microbial communities of *Larix* artificial shelter-forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(3): 819-829.
- [30] 黄兰婷, 倪浩为, 李新宇, 等. 典型红壤水稻土剖面细菌和真菌分子生态网络特征研究[J]. 土壤学报, 2021, **54**(4): 1018-1027.
- Huang L T, Ni H W, Li X Y, *et al.* Molecular ecological network of bacteria and fungi in paddy soil profile of typical red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **54**(4): 1018-1027.
- [31] 焦克, 张旭博, 徐梦, 等. 藏东南典型暗针叶林不同土壤剖面深度微生物群落特征研究[J]. 生态学报, 2021, **41**(12): 4864-4875.
- Jiao K, Zhang X B, Xu M, *et al.* Depth-related characteristics of soil microbial community along the soil profile of typical dark coniferous forest in southeast Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(12): 4864-4875.
- [32] 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 等. 铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5193-5200.
- Jia T, Guo T Y, Wang R H, *et al.* Effects of heavy metal contents on phyllosphere and rhizosphere fungal communities for *Bothriochloa ischaemum* in copper tailings area [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5193-5200.
- [33] 杨晔, 陈英旭, 孙振世. 重金属胁迫下根际效应的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, **20**(1): 55-58.
- Yang Y, Chen Y X, Sun Z S. Progress on effects of heavy metal pollution in rhizosphere [J]. Agro-Environmental Protection, 2001, **20**(1): 55-58.
- [34] 滕应, 黄昌勇, 骆永明, 等. 重金属复合污染下红壤微生物活性及其群落结构的变化[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 819-828.
- Teng Y, Huang C Y, Luo Y M, *et al.* Changes in microbial activities and its community structure of red earths polluted with mixed heavy metals [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(5): 819-828.
- [35] 程跃扬, 靳振江, 王晓彤, 等. 土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4294-4304.
- Cheng Y Y, Jin Z J, Wang X T, *et al.* Effect of land-use on soil fungal community structure and associated functional group in Huixian karst wetland [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4294-4304.
- [36] Hu J, Meng D L, Liu X D, *et al.* Response of soil fungal community to long-term chromium contamination [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, **28**(9): 1838-1846.
- [37] 史晓凯, 傅恒洪, 程咏梅, 等. 高砷硫铁矿周边农田土壤砷分布及真菌群落结构特征[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(25): 82-89.
- Shi X K, Fu Y H, Cheng Y M, *et al.* Farmland surrounding high arsenic pyrite: distribution of soil arsenic and characteristics of fungi community structure [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(25): 82-89.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)