

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

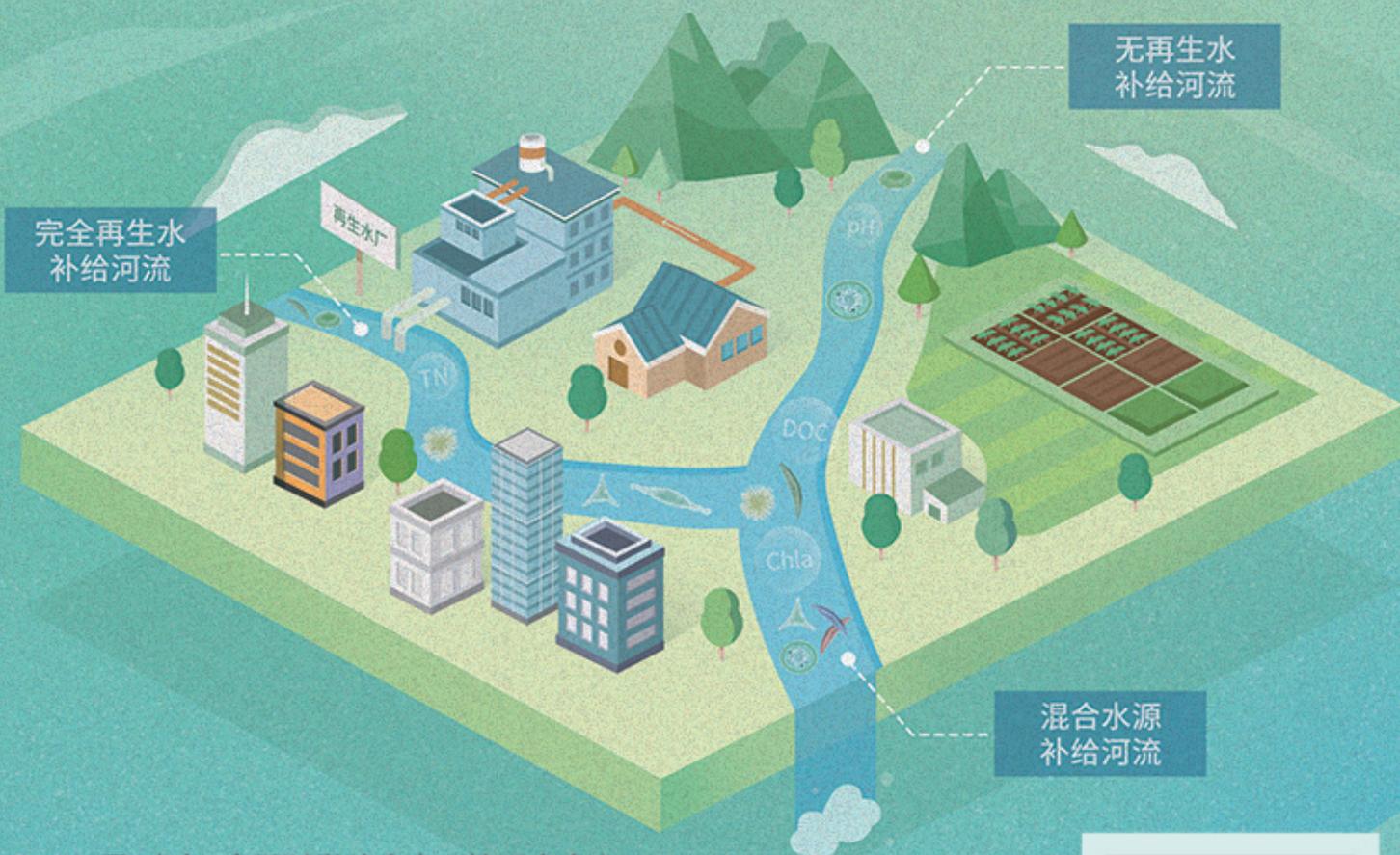
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性

竹兰萍<sup>1</sup>, 徐飞<sup>1,2\*</sup>, 王佳颖<sup>1</sup>, 朱智豪<sup>1</sup>, 张拓<sup>1,3</sup>, 张富斌<sup>1</sup>

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637002; 2. 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 通过明确嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落多样性的差异, 为嘉陵江生态环境保护修复提供理论依据. 选择嘉陵江中下游滨岸带的人工湿地、天然湿地、林地和农田这4种典型土地利用类型作为研究样地, 利用高通量测序技术对土壤真菌群落进行测序, 分析不同土地利用类型对土壤真菌群落多样性、结构和功能的影响. 结果表明, 林地与天然湿地土壤真菌的 Chao1 指数显著高于其他两种土地利用类型 ( $P < 0.05$ ), 林地土壤真菌的 Shannon 指数显著高于农田和人工湿地两种土地利用类型 ( $P < 0.05$ ); 嘉陵江流域滨岸带土壤真菌被划分为15个菌门, 在门分类水平上的优势真菌群落(相对丰度  $> 0.01$ ) 分别为: 子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、油壶菌门(Olpidiomycota)、罗兹菌门(Rozellomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)和壶菌门(Chytridiomycota); 相比之下, 罗兹菌门偏好选择林地生境, 而油壶菌门和被孢霉门偏好选择农田, 担子菌门在人工湿地具有显著优势; 天然湿地中的优势功能类群为植物病原菌, 人工湿地中的优势功能类群为粪腐菌, 农田中优势功能类群为动物病原菌-真菌寄生菌; 冗余分析表明, 土壤含水率(MC)、全氮(TN)、有机碳(TOC)和碱解氮(AN)是影响真菌群落变化的主要环境因子. 由此可见, 林地是嘉陵江流域真菌多样性最高和功能类群最均衡的土地利用类型, 其次为天然湿地, 人为干扰导致嘉陵江滨岸带土壤真菌群落多样性水平降低.

**关键词:** 嘉陵江; 土地利用类型; 土壤真菌; 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)12-5808-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202020

## Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River

ZHU Lan-ping<sup>1</sup>, XU Fei<sup>1,2\*</sup>, WANG Jia-ying<sup>1</sup>, ZHU Zhi-hao<sup>1</sup>, ZHANG Tuo<sup>1,3</sup>, ZHANG Fu-bin<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China; 2. Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China; 3. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** By clarifying the diversity of soil fungal communities in different land use types along the waterfront of the Jialing River, we can provide a theoretical basis for the ecological environment protection and restoration of the Jialing River. Four typical land use types, including artificial wetland, natural wetland, forestland, and agricultural land in the waterfront area of the middle and lower reaches of the Jialing River, were selected as the research sites. The soil fungal communities were sequenced using high-throughput sequencing technology. The diversity, structure, and function of the soil fungal community were analyzed by different land use types. The results showed that there were some differences in soil physical and chemical properties among different soil types, and the nutrient content of forestland and agricultural land soil was significantly higher than that of artificial wetland and natural wetland ( $P < 0.05$ ). The Chao1 index of soil fungi in forestland and natural wetland was significantly higher than that in the other two land use types ( $P < 0.05$ ), and the Shannon index of soil fungi in forestland was significantly higher than that in agricultural land and constructed wetland ( $P < 0.05$ ). The community structure of soil fungi in natural wetland and artificial wetland was similar. The number of species from high to low was ranked forestland, natural wetland, artificial wetland, and agricultural land. Soil fungi in the waterfront area of the Jialing River were divided into 15 phyla. The dominant fungal communities (relative abundance  $> 0.01$ ) were Ascomycota, Basidiomycota, Olpidiomycota, Rozellomycota, Mortierellomycota, and Chytridiomycota. In contrast, Rozellomycota preferred forest habitats, whereas Olpidiomycota and Mortierellomycota preferred agricultural land, and Basidiomycota had a significant advantage in artificial wetlands. The dominant functional group in natural wetland was plant pathogens, the dominant functional group in artificial wetland was dung saprotrophs, and the dominant functional group in agricultural land was animal pathogens-fungal parasites. Redundancy analysis showed that soil moisture content (MC), total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC), and available nitrogen (AN) were the main environmental factors affecting the change in fungal community. Forestland was the land use type with the highest fungal diversity and the most balanced functional groups in the Jialing River basin, followed by natural wetlands. Human disturbance led to the decrease in the diversity level of soil fungal communities along the Jialing River waterfront.

**Key words:** Jialing River; land use type; soil fungi; community structure; high-throughput sequencing

土地作为自然生态系统与社会经济系统的载体,是生物多样性最丰富的生命层,为人类生存和发展提供所需的基本物质和能源<sup>[1,2]</sup>. 土地现象除了自然因素外,还包括人类社会因素,通过对土地进行利用来反映人地关系的协调与依存<sup>[3]</sup>. 随着人口数

收稿日期: 2022-02-07; 修订日期: 2022-03-19

基金项目: 西华师范大学科研基金项目(19E061); 长江生态环境保护修复联合研究项目(CJZDZYJ47); 国家自然科学基金项目(41907132)

作者简介: 竹兰萍(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为微生物生态学, E-mail: z1403279028@163.com

\* 通信作者, E-mail: 29162038@qq.com

量与人类活动范围的增加,社会经济因素变化远远快于自然生态因素,成为影响土壤生态系统的关键因素<sup>[4]</sup>. 土地利用方式变化能引起土壤生态过程、生物化学循环和物种多样性发生变化,进一步影响生态系统的结构与功能<sup>[5]</sup>. 根据区域生态环境状况利用土地资源可以改善土壤结构,增强土壤抵御外界干扰的能力,而以破坏生态环境为代价利用土地资源则会导致土壤质量下降,加剧土壤侵蚀,影响土壤效益<sup>[6]</sup>. 因此,土地资源利用与保护已成为维持生态系统稳定和发展生物多样性的关键因素. 土壤真菌是微生物的主要类群之一,能够分解复杂有机物,与植物体形成寄生或共生关系,在维持土壤生态系统稳定和生物多样性方面具有不可或缺的地位<sup>[7]</sup>. 土壤真菌在环境中具有独特的分布格局使得其存在环境依赖性,当土壤理化性质、植被类型和气候条件等外界环境条件发生变化时,其群落结构和功能会发生相应改变<sup>[8-10]</sup>. 有研究表明,土壤条件和土地利用方式已成为土壤细菌与真菌群落多样性的重要驱动因素<sup>[11]</sup>. 刘立玲等<sup>[12]</sup>的研究认为土壤真菌能有效改善土壤结构与质地,并参与土壤营养元素之间的生物化学循环. 卯吉华等<sup>[13]</sup>研究得出接种丛枝菌根真菌显著促进幼苗株高、根系的生长和生物量积累. 因此,土壤真菌群落结构与功能的变化可作为衡量土地利用方式是否可行和生态环境健康的重要评价指标<sup>[14-16]</sup>,其评价结果能够为受损土壤环境管理提供理论依据.

嘉陵江是长江上游流域面积最大的一级支流,该区域地形复杂且土地利用类型多样<sup>[17]</sup>. 近年来,由于区域人口增长和经济发展,流域资源开发持续加剧,如采砂、垦殖和水利工程建设等人类活动,使得流域内生态受损问题日益突出<sup>[18]</sup>. 目前,该流域内相关研究主要集中在土地利用变化、资源开发与治理、土壤质量变化和生态保护修复方面<sup>[19-21]</sup>. 闫丽丽<sup>[22]</sup>通过对嘉陵江地质地貌与土地利用现状研究得出,不同土地类型转化过程中,建设用地转化为水域、耕地和林地的过程最为明显. 另有研究表明,1985~2005年间嘉陵江流域内的森林面积总体呈现减少趋势,而城镇和居民用地逐渐增加<sup>[23]</sup>. 而关于土壤微生物方面的研究也仅限于不同植被类型恢复过程对土壤微生物量和多样性产生的差异<sup>[24]</sup>,尤其是涉及到嘉陵江流域土地资源开发对土壤微生物在不同环境条件下的群落多样性及结构特征,发掘在不同土壤类型下的显著优势物种,明确不同土地类型的资源利用现状. 因此,为了揭示不同土地利用类型对嘉陵江滨岸带生态环境造成的影响,评价流域

内土地资源利用合理性,本文在嘉陵江中下游滨岸带选取人工湿地、天然湿地、林地和农田为研究样地,采用高通量测序技术与生物信息分析方法,分析不同土地利用类型下土壤真菌群落多样性、群落结构和功能类群的差异,并深入探究真菌群落多样性与环境因子之间的相关性,以期维持和改善嘉陵江流域生态环境质量,并为流域土地利用规划提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域设置在嘉陵江中下游(E105°57'26"~E106°23'32",N30°28'41"~N31°36'57"),流经区域包括阆中、南部、仪陇、蓬安、高坪、顺庆和嘉陵三区四县(市). 该地区主要的气候类型为亚热带湿润季风气候,降雨量集中且强度大,年降雨量多集中在980~1150 mm. 主要土壤类型是紫色土、砂土和水稻土,紫色土占了土壤面积的60%<sup>[25]</sup>. 滨岸带土地利用类型主要包括耕地、林地、草地和建设用地. 沿江两岸自然生态类型复杂,山丘众多,地面坡度大,人口分布密集,导致土地资源分布不均、生态环境恶化<sup>[26]</sup>. 由于南充市地形地貌复杂,耕地面积较大,农业比较发达,土壤易侵蚀加上降水量充裕和强烈的人为因素干扰,导致流域内严重的水土流失,属长江流域重点保护区域.

### 1.2 采样点布设及样品采集

如图1所示,采样点位于嘉陵江南充段滨岸带,于2020年10月,选择人工湿地(artificial wetland, AW)、天然湿地(natural wetland, NW)、林地(forest land, FL)和农田(agricultural land, AL)这4种土地利用类型设置样地.

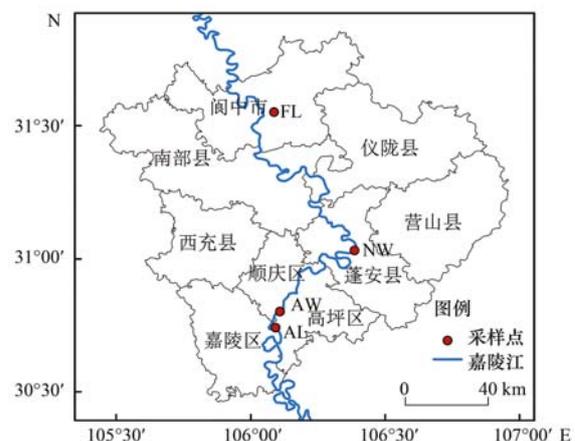


图1 采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

其中,人工湿地主要植被类型包括芦苇(*Phragmites communis*)和花叶芦竹(*Arundo donax*),

植物种类共计 68 种,主要包括乔木、灌木、地表植被和水生植被,此类型土壤含沙量较高.天然湿地主要植被类型是芦苇 (*Phragmites communis*) 和芒草 (*Miscanthus*),植被种类和生物多样性非常丰富,国家级保护物种鸳鸯和胭脂鱼等达到了 18 种,土壤类型为泥炭土.林地主要植被类型是赤杨 (*Alnus japonica*),植被类型和数量丰富.农田作物为油菜

(*Brassica napus*),但不同季节植物种类不固定,样地具体信息如表 1.每种土地利用类型取 3 份平行样,共 12 份样品.将同一样地的土样均匀混合后分成 2 份,一份重约 1 kg,置于室内阴凉处,自然风干,研磨过筛后,测定其土壤理化因子.另一份重约 50 g,去除表面可见的细小石块和植物残留物等杂物后储存于装有干冰的保温箱内,用于土壤真菌 DNA 的提取和测序.

表 1 样地的具体信息

Table 1 Specific information of sample plots

土壤类型	经度(E)	纬度(N)	植被类型	海拔/m	盖度/%
林地(FL)	106.090 1°	31.551 3°	赤杨( <i>Alnus japonica</i> )	392	40.1
农田(AL)	106.093 5°	30.740 3°	油菜( <i>Brassica napus</i> )	270	20
天然湿地(NW)	106.388 8°	31.032 0°	芦苇( <i>Phragmites communis</i> )和芒草( <i>Miscanthus</i> )	294	38
人工湿地(AW)	106.111 7°	30.801 8°	芦苇( <i>Phragmites communis</i> )和花叶芦竹( <i>Arundo donax</i> )	265	30.8

### 1.3 土壤理化性质的测定

测定土壤 pH 采用的方法是电极电位法(1:2.5,土水比),以水为浸提剂;土壤含水率(moisture content, MC)采用烘干法测定.养分指标包括了有机碳、全氮、全磷和碱解氮.土壤有机碳(total organic carbon, TOC)的测定方法采取高温外热重铬酸钾氧化容量法;采用凯氏定氮法测定土壤全氮(total nitrogen, TN);采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤全磷(total phosphorus, TP);通过碱解扩散法来测定土壤碱解氮(available nitrogen, AN).

### 1.4 土壤真菌 DNA 提取与 PCR 扩增

通过使用 E. Z. N. A.® Soil DNA 配套提取试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.)对土壤总 DNA 进行提取,选取通用引物(ITS1F/ITS2R)对土壤真菌 ITS rRNA 基因进行扩增,每个样本进行 3 个重复.扩增体系为 TransGen AP221-02: TransStart Fastpfu DNA Polymerase,反应体系为 20  $\mu$ L,使用 4  $\mu$ L FastPfu 缓冲液循环 5 次, 2  $\mu$ L 2.5  $\mu$ mol $\cdot$ L<sup>-1</sup> dNTPs, 0.8  $\mu$ L 的上游引物(ITS1)5  $\mu$ mol $\cdot$ L<sup>-1</sup>, 0.8  $\mu$ L 的下游引物(ITS2)5  $\mu$ mol $\cdot$ L<sup>-1</sup>. 0.4  $\mu$ L FastPfu 聚合酶,0.2  $\mu$ L BSA,10 ng DNA 模板,补加双蒸水至 20  $\mu$ L. PCR 的扩增条件为:95 $^{\circ}$ C 预变性 3 min, 95 $^{\circ}$ C 变性 30 s,退火温度 55 $^{\circ}$ C 持续 30 s,72 $^{\circ}$ C 延伸 45 s,循环 35 次,最后 72 $^{\circ}$ C 维持 10 min 直到冷却<sup>[27]</sup>. PCR 产物用 2% 琼脂糖凝胶进行电泳检测,通过使用 AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒切胶回收 PCR 产物,将回收的 DNA 样本送至上海美吉生物医药科技有限公司,利用 Illumina MiSeq 测序平台对土壤真菌完成高通量测序和文库构建.

### 1.5 数据统计与分析

在美吉生物云平台上使用 Qiime2(v2020.2)软件分析测序数据,在相似度为 100% 的情况下将分

类单元 ASV(amplicon sequence variant)进行归并和聚类分析,采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 ASV 代表序列进行分类学分析,置信度为 0.7.采用 Bayes 方法对 ASV 进行分类注释.利用 Mothur-1.30 软件对真菌群落的 Chao1、Shannon、Simpson 和 Simpsons even 指数进行  $\alpha$  多样性分析,其中 Chao1 指数用于表征微生物群落丰富度,Shannon 指数和 Simpson 指数用于表征微生物群落多样性,Simpsons even 指数用于表征微生物群落均匀度.通过 R-3.3.1(vegan)软件绘图,进行 RDA 冗余分析,并基于 Bray-Curtis 距离直接作图进行 PCoA 主坐标分析,使用 python-2.7 软件对物种相对丰度进行分析.通过 LEfSe(linear discriminant analysis effect size)分析对样本按照不同分类方式进行线性判别,即 LDA 分析,找出对样本划分具有显著差异的物种.FUNGuild(fungi functional guild)作为一种分类工具,其是以微生态 guild 作为分类方式,因物种可以通过相似的途径利用资源而对真菌群落进行分类,通过软件 FUNGuild v1.0 对真菌的功能进行预测分析.用 Excel2010 软件初步处理数据,选用 SPSS23.0 软件进行相关性分析,差异显著性检验采用单因素方差分析(Oneway-ANOVA),并使用 Duncan 法进行组间多重比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型理化性质的差异

通过比较不同土地类型下土壤真菌理化性质的差异(表 2),结果表明,人工湿地和天然湿地的土壤 pH 显著高于农田和林地( $P < 0.05$ ),林地与农田之间的土壤 pH 值差异不显著.此外,农田土壤全磷含量显著高于其他 3 种土地利用类型( $P < 0.05$ ),4 种土地利用类型的含水率、全氮和有机碳均具有显著

差异( $P < 0.05$ ), 表现为林地土壤显著高于其他 3 种土地类型. 天然湿地与人工湿地的碱解氮差异不

显著, 湿地、林地和农田这三者之间的碱解氮含量差异显著( $P < 0.05$ ).

表 2 不同土地利用类型的土壤理化性质差异<sup>1)</sup>

Table 2 Differences in soil physical and chemical properties in different land use types

土壤类型	pH	$\omega(\text{MC})$ /%	$\omega(\text{TN})$ /g·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{TP})$ /g·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{TOC})$ /g·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{AN})$ /mg·kg <sup>-1</sup>
林地(FL)	7.84 ± 0.01c	72.78 ± 9.63a	2.29 ± 0.04a	0.64 ± 0.01b	20.98 ± 0.53a	222.33 ± 34.31a
农田(AL)	7.80 ± 0.00c	21.30 ± 0.00c	1.02 ± 0.01b	1.48 ± 0.01a	10.61 ± 0.10b	113.67 ± 2.08b
天然湿地(NW)	8.12 ± 0.00b	35.05 ± 0.00b	0.61 ± 0.02c	0.56 ± 0.00c	7.88 ± 0.09c	37.07 ± 0.25c
人工湿地(AW)	8.30 ± 0.10a	7.08 ± 3.82d	0.29 ± 0.11d	0.44 ± 0.02d	2.75 ± 0.46d	19.77 ± 6.96c

1) 数据为平均值 ± 标准差; 不同小写字母表示不同土地利用类型间理化性质差异显著( $P < 0.05$ ), 最大的平均数记为 a

## 2.2 不同土地利用类型土壤真菌群落多样性

### 2.2.1 真菌群落 $\alpha$ 多样性

$\alpha$  多样性主要用于研究某一生境中的物种群落多样性, 通过对  $\alpha$  多样性指数进行评估, 可直观体现出物种丰富度与多样性情况<sup>[28]</sup>. 通过比较不同土地类型下的土壤真菌  $\alpha$  多样性指数(表 3), 结果表明, 不同土地利用类型土壤真菌多样性指数具有显

著差异. 林地土壤真菌群落的 Chao1 指数显著高于其他 3 种土地类型( $P < 0.05$ ), 林地土壤真菌的 Shannon 指数显著高于农田与人工湿地两种土地利用类型( $P < 0.05$ ). 人工湿地的 Simpson even 指数显著高于其他 3 种土地利用类型( $P < 0.05$ ). 农田与人工湿地之间的 Chao1 指数差异不显著, 4 种土地利用类型的 Simpson 指数差异不显著.

表 3 不同土地利用类型土壤真菌  $\alpha$  多样性指数<sup>1)</sup>

Table 3 The  $\alpha$  diversity index of soil fungi in different land use types

土壤类型	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Simpson even 指数
林地(FL)	1 533.08 ± 157.16a	5.72 ± 0.10a	0.020 5 ± 0.006 6a	0.035 2 ± 0.014 6b
农田(AL)	307.96 ± 120.71c	3.20 ± 1.80b	0.251 2 ± 0.382 8a	0.063 7 ± 0.050 2b
天然湿地(NW)	689.67 ± 37.80b	3.91 ± 0.73ab	0.079 7 ± 0.047 8a	0.028 2 ± 0.025 2b
人工湿地(AW)	255.98 ± 324.74c	3.56 ± 0.36b	0.063 3 ± 0.057 9a	0.330 3 ± 0.276 6a

1) 数据为平均值 ± 标准差; 不同小写字母表示不同土地利用类型间理化性质差异显著( $P < 0.05$ ), 最大的平均数记为 a

### 2.2.2 真菌群落 $\beta$ 多样性

利用主坐标分析法比较不同土地利用类型土壤真菌群落组成的相似性与差异性, 当样本物种组成越相似, 反映在 PCoA 图中的距离越近<sup>[29]</sup>. 对不同样品中真菌群落基于 Bray-Curtis 距离的算法进行 PCoA 分析(见图 2), 结果表明, 林地、农田和湿地这 3 种土地利用类型之间的土壤真菌群落组成差异显著( $P < 0.05$ ), 天然湿地与人工湿地的真菌群落结构比较接近, 样品的真菌群落分布存在一定重叠.

## 2.3 不同土地利用土壤真菌群落结构及指示物种分析

### 2.3.1 土壤真菌群落的 ASV 分布

Venn 图用于统计多组或多个样本中所共有和独有的物种数目(如 ASV 数目), 可直观地表现出环境样本的物种(如 ASV)组成是否具有相似性或者重叠(图 3). 对 4 种土地利用类型土壤样本的测序序列按 100% 的相似性阈值进行 ASV 聚类, 共检测到真菌 ASV 数目 5 445 个, 各类型样地土壤真菌 ASV 数量分布为: 林地 > 天然湿地 > 人工湿地 > 农田, 且

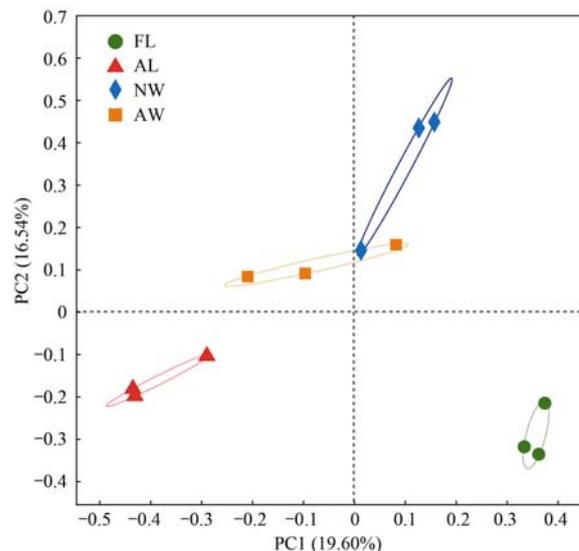


图 2 基于 ASV 丰度的 PCoA 分析

Fig. 2 PCoA analysis based on ASV abundance

人工湿地与天然湿地 ASV 数目差异较大. 4 种类型样地共有的 ASV 为 35 个. 林地独有 2 698 个土壤真菌 ASV, 分布数目最多, 约占 49.55%. 人工湿地独有的 ASV 数为 424, 分布数目最少, 占了总数的

7.79%。而天然湿地与农田独有的土壤真菌 ASV 分布数目居中。

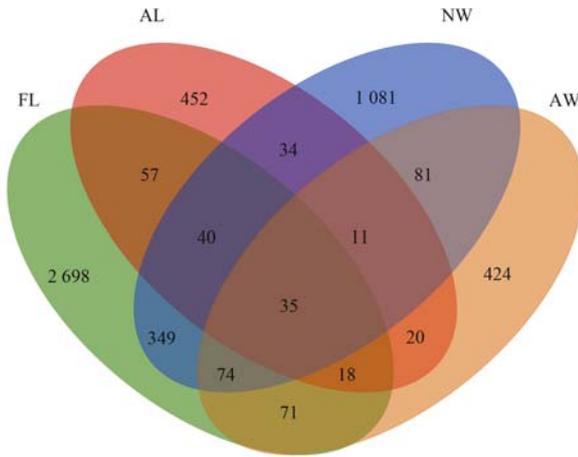


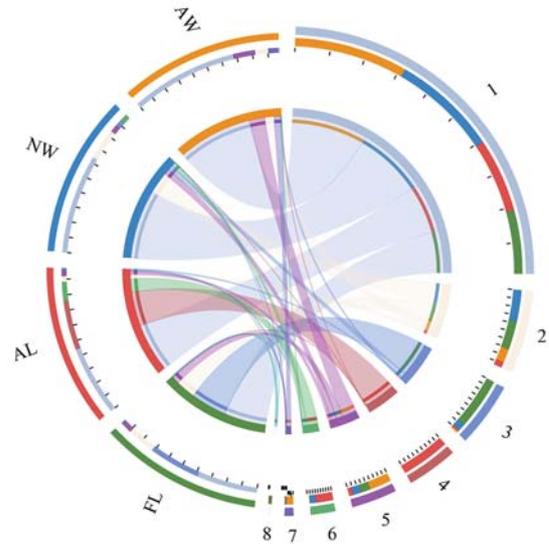
图3 ASV 韦恩图

Fig. 3 ASV Venn diagram

### 2.3.2 土壤真菌群落的菌门分布

群落 Circos 图是一种描述样本与物种间对应关系的可视化圈图,其可以直观呈现出各样本在某一分类学水平上含有的优势物种名称和在不同样本中的分布比例<sup>[30]</sup>。在真菌门分类水平上对获得的 ASV 序列进行划分,如图 4 所示,全部真菌共划分为 8 个菌门,其中优势真菌门共 6 个。4 种土壤类型中子囊菌门(Ascomycota)均为优势菌门,所占比例为 40%~70%,在人工湿地土壤中的相对丰度最高,在林地土壤中的相对丰度最低。罗兹菌门(Rozellomycota)在林地土壤中的相对丰度最高,达到了 33%。在农田土壤中,以油壶菌门(Olpidiomycota)和被孢霉门(Mortierellomycota)为次优势菌门。在人工湿地中,以担子菌门(Basidiomycota)为次优势菌门,占比为 15%。

LEfSe 可从两组或多组样本中发现最能解释组间差异的物种特征,并通过这些特征判断对组间差异的影响程度<sup>[31]</sup>。本文利用非参数因子克鲁斯卡尔-沃利斯秩和检验分析检测不同土地利用类型土壤真菌在各分类水平上的结果,获取显著差异物种,并构建群落进化分支图(图 5),阈值为 3.5。结果表明,在门分类水平上,农田的被孢霉门(Mortierellomycota)和林地的罗兹菌门(Rozellomycota)的相对丰度具有显著优势。在纲分类水平上,农田的被孢霉纲(Mortierellomycetes)和天然湿地的锤舌菌纲(Leotiomycetes)为各土地类型显著优势纲。在目分类水平上,农田的被孢霉目(Mortierellales)、小囊菌目(Microascales),林地的 Branch02、革菌目(Thelephorales)和天然湿地的柔膜菌目(Helotiales)为各土地类型的显著优势目。



1. Ascomycota, 2. unclassified\_k\_fungi, 3. Rozellomycota,
4. Olpidiomycota, 5. Basidiomycota, 6. Mortierellomycota,
7. Chytridiomycota, 8. others

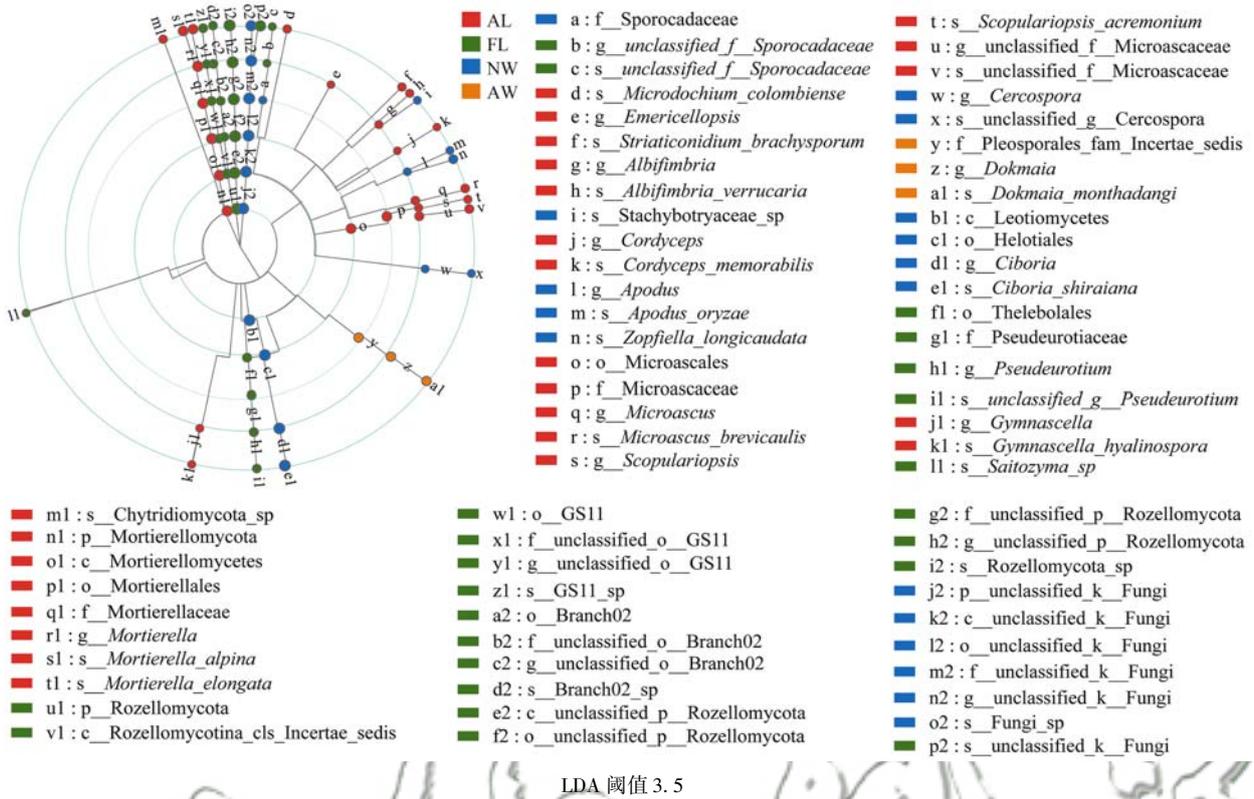
图4 不同土地利用类型中土壤真菌群落分布

Fig. 4 Distribution of soil fungal community in different land use types

在科分类水平上,农田的被孢霉科(Mortierellaceae)、小囊菌科(Microascaceae)、林地的假散囊菌科(Pseudeurotiaceae)和天然湿地的Sporocadaceae为各土地类型的显著优势科。在属分类水平上,农田的被孢霉属(Mortierella)、小囊菌属(Microascus)、帚霉属(Scopulariopsis)、虫草菌属(Cordyceps)、翅孢壳属(Emericellopsis)、Albifimbria和Gymnascella、林地中的假散囊菌属(Pseudeurotium)、天然湿地中的Ciboria、Apodus、尾孢属(Cercospora)和人工湿地的dokmaia为各土地类型的显著优势属。

### 2.4 不同土地利用土壤真菌的功能类群分析

利用 FUNGuild 功能预测工具分析不同土地利用类型土壤真菌群落的营养型。如图 6 所示,土壤真菌功能可按照营养方式分为 3 种类型,分别为腐生营养型、共生营养型和病理营养型,按照对环境资源的吸收利用方式可分为 12 种类型,分别为木质腐生真菌(wood saprotrophs)、植物病原菌(plant pathogens)、动物病原菌(animal pathogens)、丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi)、杜鹃花类菌根真菌(ericoid mycorrhizal fungi)、外生菌根真菌(ectomycorrhizal fungi)、叶内生真菌(foliar endophytes)、地衣共生真菌(lichenized fungi)、地衣寄生真菌(lichenicolous fungi)、菌寄生真菌(mycoparasites)、未定义腐生真菌(undefined saprotrophs)和未定义根内生真菌(undefined root endophytes)。植物病原菌在天然湿地中的相对丰度



LDA 阈值 3.5  
图 5 不同土地利用类型土壤真菌的进化分支

Fig. 5 Cladogram of soil fungal community for the differ

显著高于其他土地类型,类腐菌和真菌寄生菌在人工湿地中的相对丰度显著高于其他土地类型,土壤腐生菌、动物寄生菌、真菌寄生菌、动物病原菌和植物病原菌在农田中的相对丰度高于其他土地类型. 以上结果表明,土地利用方式改变了嘉陵江滨岸带土壤真菌的功能类群结构.

2.5 环境因子与真菌群落结构及多样性之间的相关性

土壤真菌  $\alpha$  多样性与土壤环境因子的相关性分析表明(表 4),含水率、全氮、有机碳和碱解氮与 Chao1 指数呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 Shannon 指数呈现显著相关( $P < 0.05$ ). pH 与 Simpsons even 指数呈显著正相关,全磷与真菌多样性指数均无相关性. 这表明土壤含水率、全氮、有机碳和碱解氮对土壤真菌群落丰富度和均匀度均具有显著促进作用.

为揭示土壤真菌群落与环境因子的关系,在门分类水平上,以土壤理化性质作为环境变量,对优势

菌进行冗余分析. 如图 7 所示,轴 1 和轴 2 对真菌优势菌门的解释度分别为 25.99% 与 17.19%,总和为 43.18%. 土壤含水率(MC,  $r^2 = 0.6131$ ,  $P = 0.009$ )、全氮(TN,  $r^2 = 0.6622$ ,  $P = 0.004$ )、有机碳(TOC,  $r^2 = 0.6246$ ,  $P = 0.006$ )和碱解氮(AN,  $r^2 = 0.555$ ,  $P = 0.013$ )为影响真菌群落变化的主要环境因子. 子囊菌门与土壤 pH 有显著正相关性,而与土壤含水率、全氮、全磷、有机碳和碱解氮呈显著负相关. 油壶菌门与土壤全磷的相关性最强,呈正相关,而与土壤含水率呈负相关. 罗兹菌门与土壤含水率、全氮、有机碳和碱解氮呈显著正相关,而与土壤 pH 呈负相关性.

3 讨论

3.1 不同土地利用类型土壤真菌群落多样性与理化性质的差异分析

土壤真菌  $\alpha$  多样性作为评价真菌群落多样性的重要指标,对生态系统恢复和持续性发展至关重要

表 4 土壤真菌  $\alpha$  多样性指数与环境因子的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation analysis between  $\alpha$  diversity index of soil fungi and environmental factors

	pH	MC	TN	TP	TOC	AN
Chao1 指数	-0.472	0.929 **	0.864 **	-0.262	0.860 **	0.753 **
Shannon 指数	-0.224	0.704 *	0.651 *	-0.303	0.644 *	0.589 *
Simpson 指数	-0.231	-0.218	-0.112	0.448	-0.101	-0.057
Simpson even 指数	0.674 *	-0.529	-0.468	-0.298	-0.520	-0.420

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

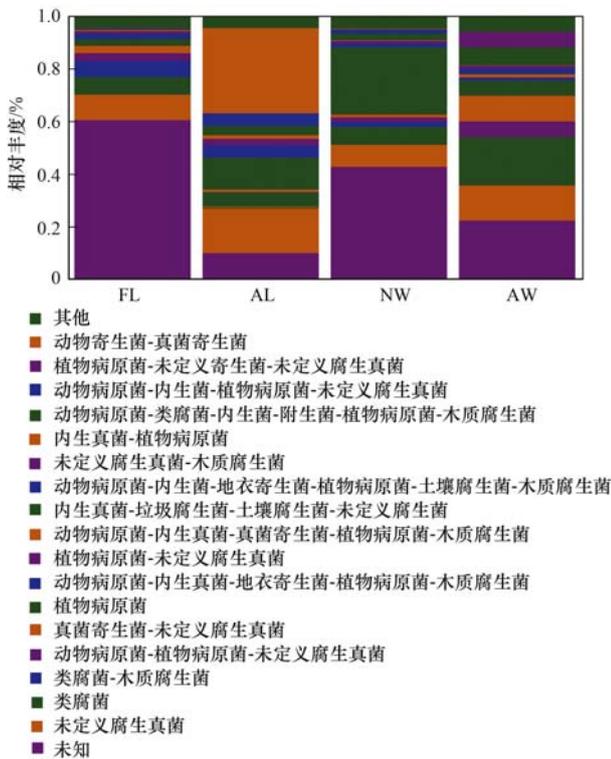
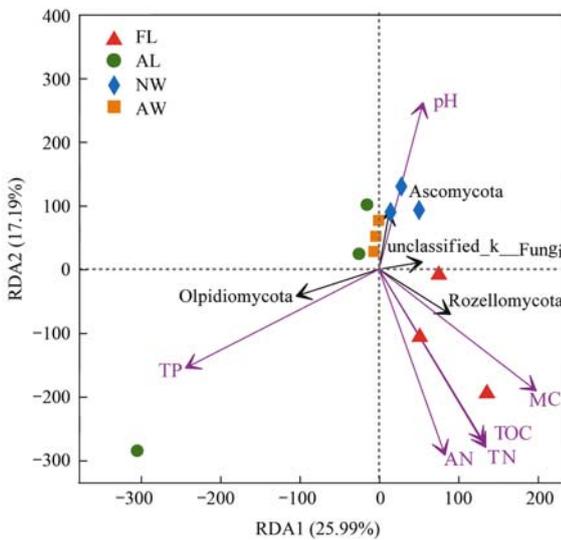


图6 不同土地利用类型土壤真菌群落功能群落组成变化

Fig. 6 Changes in functional community composition of soil fungal community in different land use types



不同颜色和形状的点表示不同土地利用类型土壤中的真菌样本组,其中黑色箭头表示优势菌门,紫色箭头表示对真菌具有显著影响的环境因子

图7 门水平上的土壤真菌与环境因子的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of soil fungi and environmental factors at the gate level

要<sup>[32]</sup>. 通常土壤微生物群落多样性越高、群落结构越复杂,则土壤生态系统越稳定,抗外界干扰能力越强<sup>[33]</sup>. 本研究中,林地土壤真菌群落丰富度在4种土地利用类型中最高,同时,林地与天然湿地土壤真菌多样性指数相近,表明天然植被的生境条件相比

较人工环境更加稳定. 李侠等<sup>[34]</sup>在研究不同土地利用方式下土壤可培养微生物数量及分布特征中认为,林地由于其植被覆盖度高,凋落物多,土壤丰富的有机质含量为微生物提供了丰富的碳源,促进了微生物的生长. 刘文静等<sup>[35]</sup>的研究表明随着土壤水分含量的增加,其微生物群落多样性呈现显著增加的趋势. 这与本研究的结果一致,林地和天然湿地的植被覆盖度最高,每年产生大量凋落物在土壤中固定下来,为土壤养分积累和土壤真菌生长创造了有利条件,提高了土壤真菌群落多样性<sup>[36]</sup>. 同时,菌根真菌与植物体形成了共生关系,进一步促进真菌对养分的吸收利用,形成良性循环. 另外,相比较农田与人工湿地,林地与天然湿地在人为干扰较小的情况下,土壤保水能力较强,为微生物创造了良好的生存环境.

土壤养分作为微生物生存的必要营养物质,其环境因子的差异也成为影响微生物群落结构与多样性的重要因素. 不同土地利用类型下嘉陵江滨岸带土壤理化性质差异显著 ( $P < 0.05$ ),本研究得出林地含水率显著高于其他3种土地类型,林地与农田土壤养分含量显著高于两类湿地. 有研究表明林地由于根系发达<sup>[37,38]</sup>,且林冠层对太阳辐射和雨水起到了一定的拦截作用使得地表径流减少,水分蒸发量较少,土壤含水率、有机质和营养物质得以保留. 谭海燕等<sup>[39]</sup>的研究得出,由于菜地与季节性蔬菜用地长期施肥导致土壤养分含量显著高于种植其他作物的土壤,同时,冬季土壤磷含量明显高于其他季节<sup>[40]</sup>. 这与本研究的结果相似,林地树木较多和稠密的树枝减少了地表径流营养物质和水分的损失,其次,由于采样季节位于冬季,加上农田主要种植蔬菜,在长期施肥过程中导致土壤肥力偏高. 湿地由于缺乏外来营养物质的输入,加上植被自身吸收一部分的元素导致土壤养分含量偏低.

掌握影响土壤真菌群落多样性的因素可以在促进生态系统的平衡与稳定方面发挥重要作用<sup>[41]</sup>. 本研究中,土壤含水率、全氮、有机碳和碱解氮在影响真菌群落方面的贡献较大. 任玉连等<sup>[42]</sup>在研究不同季节下土壤真菌与理化因子的关系得出土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾和含水率与真菌群落结构变化密切相关. 有研究表明含水率在影响土壤真菌群落多样性方面发挥的作用较大<sup>[43]</sup>,土壤含水量决定了土壤微环境中的干湿状态与氧气含量,进一步影响真菌的生存环境<sup>[44]</sup>. 本研究区域选取嘉陵江滨岸带,滨岸带因具有良好的水文调节效应,可通过滨岸带植被根系保留一定的土壤水分<sup>[45]</sup>. 此外,已有研究表明土壤碳氮元素的含量对

微生物群落丰度的影响较大<sup>[46]</sup>。土壤环境因子与真菌群落的相互作用机制较复杂,较好的土壤养分环境会对土壤真菌群落提供适宜的生存环境。嘉陵江滨岸带不同的土地利用类型因植被差异和人为干扰导致土壤含水率、全氮、有机碳和碱解氮含量产生一定的差异,而不同的土壤真菌因适应环境的条件不同,导致土壤微生物利用营养物质的效果也不同。

### 3.2 不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能差异分析

优势菌在决定微生物群落平衡方面起着重要作用,并进一步影响微生物群落结构和组成<sup>[47]</sup>。本研究发现,这4种土地利用类型土壤真菌的优势菌门主要包括子囊菌门、担子菌门和罗兹菌门,其次,在这4种土地类型中均检测到了被孢霉门与油壶菌门,它们在农田中的相对丰度最高。陈伟等<sup>[48]</sup>、张树荫等<sup>[49]</sup>和赵兴鸽等<sup>[50]</sup>的研究结果都表明子囊菌门属于真菌的优势菌门。在门分类水平上,子囊菌门真菌的营养类型大多为腐生菌,而适宜腐生菌生长的环境pH范围为7~8<sup>[51]</sup>。分析结果得出嘉陵江流域滨岸带土壤pH环境属于弱碱性,这表明嘉陵江流域土壤弱碱环境有利于子囊菌门的生存和繁殖。被孢霉菌作为一种腐生油真菌,农业效益较高,近年来受到人们广泛关注,而油壶菌是鞭毛菌亚门油壶菌属的一类低等专性寄生真菌,其作为真菌的传毒介质,感染性极强,能传播16种植物病毒<sup>[52]</sup>。农田种植作物种类不同,抗感染能力不同,因此,对此类真菌传毒机制的探究还有待进一步加强。本研究中,不同土地利用类型的次优势菌门和进化分支中不同等级的优势物种的组成与丰度均有一定的差异,主要是因为在外界环境条件、优势植被和土地管理方面等因素的共同作用下<sup>[53~55]</sup>,导致土壤养分含量和土壤质量的不同,进而影响了真菌群落多样性和结构组成。

FUNGuild分析工具通过预测真菌功能类群,为真菌生态功能的研究提供了一定的基础,而真菌分类群与功能的结合使人们能够进一步评估真菌群落多样性对增加支持共同功能的类群的冗余度的影响<sup>[56]</sup>。相比较细菌,真菌的生活史更复杂,部分真菌为了适应环境的变化而采取不同的营养方式,这也是真菌为了适应不同的生存条件而采取的较高级的生存策略<sup>[57]</sup>。天然湿地植物病原菌相对丰度远高于其他3种类型,植物病原菌对植物生长发展具有一定的危害。有研究表明土壤湿度增加和荫蔽的环境有利于病原菌孢子的萌发,增加病原菌对植物的侵害<sup>[58]</sup>。天然湿地因靠近水域,加上芦苇和芒草因根状茎十分发达,植株较高,自然生长过程中,植被距

离较紧密,导致地下部分光照少,因此促进了植物病原菌的繁殖。人工湿地土壤中的类腐菌相对丰度高于其他土地利用类型。徐飞等<sup>[59]</sup>的研究指出在恢复湿地中由于野生动物活动导致土壤类腐菌含量较高。这与本研究结果具有一定的相似性,人工湿地中的植被类型多为人为种植,而且为公众开放,具有一定的观赏价值,成为了鸟类和蛙类的栖息地与产卵场,进而引入了类腐菌。在人为干扰情况下,土壤真菌选择不同的功能菌适应环境,由此反映出的环境生态问题有助于后续进一步对土地类型进行管理规划。

## 4 结论

嘉陵江滨岸带土地资源的不同利用造成土壤理化性质产生显著差异( $P < 0.05$ ),林地的含水率、全氮、有机碳和碱解氮在4个区域中含量最高,同时其土壤真菌群落丰富度和多样性均显著高于人工湿地与农田,农田由于独特的管理方式使得土壤真菌丰度和多样性降低,有害菌大量繁殖;人工湿地易受到外界干扰导致物种数目少,抵抗性差。由此可知,人类利用土地资源用于耕地和人工构造湿地环境造成土壤真菌多样性下降,一方面应调整不合理的资源利用方式,另一方面找出影响微生物群落多样性下降的原因也至关重要。林地和天然湿地受人类干扰较小,真菌群落结构较稳定,因此,林地和天然湿地生境有利于嘉陵江滨岸带资源保护与生物多样性的提高。

### 参考文献:

- [1] 邓楚璇,周英,李上官,等. 基于高通量测序的土壤微生物群落结构对土地利用方式的响应[J]. 四川林业科技, 2021, 42(1): 16-24.  
Deng C X, Zhou Y, Li S G, et al. Response of soil microbial community structure to land use types based on high-throughput sequencing analysis[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2021, 42(1): 16-24.
- [2] 李寒冰,金晓斌,吴可,等. 土地利用系统对区域可持续发展的支撑力评价:方法与实证[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 166-185.  
Li H B, Jin X B, Wu K, et al. Evaluation of the support capacity of land use system on regional sustainable development: methods and empirical evidence [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 166-185.
- [3] 常雪儿,汪洋,甄慧,等. 1990—2018年新疆喀什噶尔河流域土地利用/覆被变化空间耦合及其生态效应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(3): 596-607.  
Chang X E, Wang Y, Zhen H, et al. Spatial couple of land use/cover changes and its consequence for ecological systems in Kaxgar River basin in Xinjiang from 1990 to 2018[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(3): 596-607.
- [4] 牛星. 区域土地利用系统演化分析与状态评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.  
Niu X. Study on evolution development and state evaluation in

- regional land use system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [5] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- Li C F, Cao J F, Lü J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [6] 杨秉珣, 刘泉, 董廷旭. 嘉陵江流域不同土地利用类型土壤微生物功能多样性特征[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(5): 14-20, 26.
- Yang B X, Liu Q, Dong T X. Variation of soil nutrients and microbial community diversity of different land use types in the Jialing River, Sichuan province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(5): 14-20, 26.
- [7] Peng W X, Song T Q, Du H, *et al.* Inconsistent diversity patterns of soil fungi and woody plants among habitat types in a karst broadleaf forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **474**, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118367.
- [8] Fracetto G G M, Azevedo L C B, Fracetto F J C, *et al.* Impact of Amazon land use on the community of soil fungi [J]. *Scientia Agricola*, 2013, **70**(2): 59-67.
- [9] Liu C, Wang S N, Yan J, *et al.* Soil fungal community affected by regional climate played an important role in the decomposition of organic compost [J]. *Environmental Research*, 2021, **197**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111076.
- [10] Sun K N, Fu L Y, Song Y, *et al.* Effects of continuous cucumber cropping on crop quality and soil fungal community [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, **193**(7), doi: 10.1007/s10661-021-09136-5.
- [11] 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 等. 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[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 530-539.
- Jiang N W, Liang C F, Zhang Y, *et al.* Microbial composition and diversity in soil of *Torreya grandis* cv. *Merrillii* relative to different cultivation years after land use conversion [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 530-539.
- [12] 刘立玲, 周光益, 党鹏, 等. 湘西石漠化区 3 种造林模式土壤真菌群落结构的差异[J]. 生态学报, 2022, **42**(10): 4150-4159.
- Liu L L, Zhou G Y, Dang P, *et al.* Differences of soil fungal community structure under three afforestation modes in rocky desertification region of western Hunan province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(10): 4150-4159.
- [13] 卯吉华, 李荣波, 景跃波, 等. 核桃园土壤丛枝菌根真菌多样性及接种效应[J]. 森林与环境学报, 2022, **42**(1): 71-80.
- Mao J H, Li R B, Jing Y B, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi associated with walnut trees and their effect on seedling growth [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, **42**(1): 71-80.
- [14] Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2017, **15**(10): 579-590.
- [15] Zhang M J, Jia J Q, Lu H, *et al.* Functional diversity of soil microbial communities in response to supplementing 50% of the mineral N fertilizer with organic fertilizer in an oat field [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, **20**(8): 2255-2264.
- [16] Yan T T, Xue J H, Zhou Z D, *et al.* Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **794**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148757.
- [17] 李佳林, 廖家红, 王旭熙, 等. 嘉陵江流域土地利用变化的生态系统服务价值评估[J]. 湖北农业科学, 2019, **58**(2): 33-38.
- Li J L, Liao J H, Wang X X, *et al.* Assessment of ecosystem service value of land use change in the Jialingjiang watershed [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, **58**(2): 33-38.
- [18] 齐师杰, 张行南, 夏达忠, 等. 嘉陵江流域土地利用/覆被变化特征及其驱动力分析[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(1): 1-7.
- Qi S J, Zhang X N, Xia D Z, *et al.* Characteristics and driving forces of land use/cover change in Jialingjiang River basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, **30**(1): 1-7.
- [19] 苟明忠. 嘉陵江上游不同土地利用下黄土成壤特征及其环境意义[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.
- Gou M Z. Pedogenic characteristics of loess and its environmental significance under different land-use type in the upper of Jialing River [D]. Nanchong: China West Normal University, 2020.
- [20] 李蕾芳, 陈磊, 史宏伟, 等. 梯级水库建设下的水沙营养盐协同变化规律研究: 以嘉陵江为例[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(1): 179-187.
- Li L F, Chen L, Shi H W, *et al.* The synergistic effect of hydrology, sediment and nutrients under cascade reservoirs construction: a case study of Jialing River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 179-187.
- [21] 李晓雨, 杨放, 彭秀红, 等. 嘉陵江流域采矿废弃物安全现状研究——对小规模堆场的指示意义[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(11): 2755-2762.
- Li X Y, Yang F, Peng X H, *et al.* Security assessment of mining wastes in Jialing River basin: indicative significance for small-scale storage yards [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(11): 2755-2762.
- [22] 闫丽丽. 嘉陵江流域(广元段)地质地貌特征与土地利用演变研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Yan L L. Study on Jialing River basin's (Guangyuan section) geological and geomorphological features and land utilization evolution [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [23] 王莺, 王劲松, 武明, 等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(1): 135-142.
- Wang Y, Wang J S, Wu M, *et al.* Impacts of the land use and climate changes on the hydrological characteristics of Jialing River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(1): 135-142.
- [24] 王海英, 宫渊波, 陈林武. 嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤微生物及土壤酶活性的研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(3): 172-177.
- Wang H Y, Gong Y B, Chen L W. Study on soil microorganism and soil enzyme activity of different vegetation restoration in the upper reaches of Jialingjiang river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(3): 172-177.
- [25] 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 等. 嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1620-1629.
- Liu K H, Xue Y Q, Zhu L P, *et al.* Effect of different land use types on the diversity of soil bacterial community in the coastal zone of Jialing River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1620-1629.
- [26] 徐邓耀. 嘉陵江流域南充段耕地资源保护研究[J]. 四川师

- 范学院学报(自然科学版), 1999, **20**(2): 130-135.
- Xu D Y. A study on the protection of cultivated land resources in Nanchong region in Jialing River valley[J]. Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science), 1999, **20**(2): 130-135.
- [27] 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.
- [28] 赵庆庆, 解金昆, 高永超, 等. 不同水文条件下黄河口滨海湿地土壤真菌群落的分布特征[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(1): 95-103.
- Zhao Q Q, Xie J K, Gao Y C, *et al.* The distribution pattern of soil fungal community in coastal wetlands with different hydrologic conditions in the Yellow River estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(1): 95-103.
- [29] 赵健, 王巧娟, 柏耀辉, 等. 河岸过滤中氨氮的削减及其浓度对细菌与氨氧化微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(11): 3821-3829.
- Zhao J, Wang Q J, Bai Y H, *et al.* Ammonium nitrogen removal and effects of its concentration on bacteria and ammonia-oxidizing microorganisms during riverbank filtration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(11): 3821-3829.
- [30] 孙建平, 刘雅辉, 左永梅, 等. 盐地碱蓬根际土壤细菌群落结构及其功能[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28**(10): 1618-1629.
- Sun J P, Liu Y H, Zuo Y M, *et al.* The bacterial community structure and function of *Suaeda salsa* rhizosphere soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, **28**(10): 1618-1629.
- [31] 丁蛟龙, 孟祥杰, 王忍, 等. 长期应用稻鳖共生系统对土壤细菌群落结构及其多样性的影响[J]. 南方农业学报, 2021, **52**(7): 1860-1868.
- Ding J L, Meng X J, Wang R, *et al.* Effects of long-term application of rice-turtle co-culture on soil bacterial community structure and diversity [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, **52**(7): 1860-1868.
- [32] Lin Q, Baldrian P, Li L J, *et al.* Dynamics of soil bacterial and fungal communities during the secondary succession following swidden agriculture in lowland forests [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, **12**, doi: 10.3389/fmicb.2021.676251.
- [33] Zhou J, Fong J J. Strong agricultural management effects on soil microbial community in a non-experimental agroecosystem [J]. Applied Soil Ecology, 2021, **165**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.103970.
- [34] 李侠, 马晓慧, 杜世杰, 等. 不同利用方式土地可培养微生物数量及其垂直分布特征[J]. 江苏农业科学, 2021, **49**(24): 246-250.
- Li X, Ma X H, Du S J, *et al.* Study on quantity and vertical distribution characteristics of soil bacteria, fungi and actinomycetes under different land use patterns [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, **49**(24): 246-250.
- [35] 刘文静, 张建伟, 邱崇文, 等. 水旱轮作对土壤微生物群落构建过程的影响机制[J]. 土壤, 2020, **52**(4): 710-717.
- Liu W J, Zhang J W, Qiu C W, *et al.* Study on community assembly processes under paddy-upland rotation [J]. Soils, 2020, **52**(4): 710-717.
- [36] 秦红, 李昌晓, 任庆水. 不同土地利用方式对三峡库区消落带土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(10): 3494-3504.
- Qin H, Li C X, Ren Q S. Effects of different land use patterns on soil bacterial and fungal biodiversity in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(10): 3494-3504.
- [37] 许楠, 刑军会, 隋心, 等. 土地利用方式对高寒地区湿地土壤细菌群落结构和多样性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, **49**(24): 233-240.
- Xu N, Xing J H, Sui X, *et al.* Effects of land use patterns on structure and diversity of soil bacterial community in wetland of alpine region [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, **49**(24): 233-240.
- [38] 杨翠萍, 脱云飞, 张岛, 等. 降雨对不同土地利用类型土壤水氮变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(6): 220-226.
- Yang C P, Tuo Y F, Zhang D, *et al.* Effects of rainfall on soil water and nitrogen change characteristics under different land uses [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(6): 220-226.
- [39] 谭海燕, 童江云, 包涛, 等. 昆明市滇池片区耕地土壤养分含量空间分布及变化情况分析[J]. 西南农业学报, 2019, **32**(7): 1614-1620.
- Tan H Y, Tong J Y, Bao T, *et al.* Analysis on temporal and spatial variation of soil nutrient content in Dianchi district of Kunming city [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, **32**(7): 1614-1620.
- [40] 王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷累积、损失特征及阻控措施的研究进展[J]. 土壤, 2021, **53**(6): 1115-1124.
- Wang R, Zhong Y M, Li H M, *et al.* Research progresses on characteristics of phosphorus accumulation and loss, as well as loss control measures in high input vegetable fields [J]. Soils, 2021, **53**(6): 1115-1124.
- [41] 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 等. 半干旱区锦鸡儿属植物根际土壤真菌群落多样性及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(12): 4289-4297.
- Li Y Y, Xu T T, Ai Z, *et al.* Fungal community diversity and driving factors in rhizosphere soil of *Caragana* species across semi-arid regions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(12): 4289-4297.
- [42] 任玉连, 范方喜, 彭淑娟, 等. 纳帕海沼泽化草甸不同季节土壤真菌群落结构与理化性质的关系[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(29): 69-75.
- Ren Y L, Fan F X, Peng S X, *et al.* Relationship between soil fungal community structure and physical and chemical properties of different seasons swamp meadow in Napahai wetland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(29): 69-75.
- [43] Chen L L, Xu H B, Sun J H, *et al.* The short-term impacts of soil disturbance on soil microbial community in a degraded *Leymus chinensis* steppe, North China [J]. Soil and Tillage Research, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.still.2021.105112.
- [44] 阳祥, 李先德, 刘吉龙, 等. 不同轮作模式的土壤真菌群落结构及功能特征分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(4): 432-442.
- Yang X, Li X D, Liu J L, *et al.* Analysis on the structure and function of soil fungi community in different crop rotation modes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(4): 432-442.
- [45] 王超, 尹炜, 贾海燕, 等. 滨岸带对河流生态系统的影响机制研究进展[J]. 生态科学, 2018, **37**(3): 222-232.
- Wang C, Yin W, Jia H Y, *et al.* Review on the influence mechanism of riparian zone to the river ecosystem [J]. Ecological Science, 2018, **37**(3): 222-232.

- [46] Wang C, Masoudi A, Wang M, *et al.* Community structure and diversity of the microbiomes of two microhabitats at the root-soil interface; implications of meta-analysis of the root-zone soil and root endosphere microbial communities in Xiong'an new area[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2020, **66**(11): 605-622.
- [47] 张雪, 陈婷, 牛艳慧, 等. Illumina 高通量测序揭示艾比湖湿地 6 种盐生植物根际土壤真菌群落组成及多样性[J]. *微生物学报*, 2021, **61**(12): 3965-3976.  
Zhang X, Chen T, Niu Y H, *et al.* Research on diversity of fungi community in rhizosphere soil of six halophytes in Ebinur Lake Wetland[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, **61**(12): 3965-3976.
- [48] 陈伟, 季秀玲, 张琦, 等. 纳帕海高原湿地真菌群落多样性和组成的分布[J]. *微生物学通报*, 2019, **46**(3): 494-503.  
Chen W, Ji X L, Zhang Q, *et al.* Diversity and composition of fungal community in Napahai plateau wetland[J]. *Microbiology China*, 2019, **46**(3): 494-503.
- [49] 张树萌, 黄懿梅, 倪银霞, 等. 宁南山区人工林草对土壤真菌群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1449-1458.  
Zhang S M, Huang Y M, Ni Y X, *et al.* Effects of artificial forest and grass on soil fungal community at southern Ningxia mountain [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1449-1458.
- [50] 赵兴鸽, 张世挺, 牛克昌. 青藏高原高寒草甸土壤真菌多样性与植物群落功能性状和土壤理化特性的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, **26**(1): 1-9.  
Zhao X G, Zhang S T, Niu K C. Relationships between soil fungal diversity, plant community functional traits and soil attributes in Tibetan alpine meadows [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2020, **26**(1): 1-9.
- [51] 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 等. 岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 4005-4014.  
Zhou J B, Jin Z J, Xiao X Y, *et al.* Investigation of soil fungal communities and functionalities within karst paddy fields [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 4005-4014.
- [52] 蒋军喜, 羊大进, 张景凤, 等. 寄生甜菜根部油壶菌 (*Olpidium* sp.) 种的鉴定[J]. *江西农业大学学报*, 1999, **21**(4): 529-532.  
Jiang J X, Yang D J, Zhang J F, *et al.* Specific identification of a chytrid in sugar beet roots (*Olpidium* sp.) [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1999, **21**(4): 529-532.
- [53] Chen Y L, Cao Y D, Liu S T. Effects of long-term mineral fertilizer application on soil nutrients, yield, and fungal community composition [J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, **54**(4): 597-604.
- [54] Baudy P, Zubrod J P, Korschak M, *et al.* Environmentally relevant fungicide levels modify fungal community composition and interactions but not functioning [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117234.
- [55] Li Y Z, Wang Z T, Li T, *et al.* Wheat rhizosphere fungal community is affected by tillage and plant growth [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **317**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107475.
- [56] Wagg C, Schlaeppi K, Banerjee S, *et al.* Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1), doi: 10.1038/s41467-019-12798-y.
- [57] 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.
- [58] 黎劼. 病原菌对植物的作用及其受环境因子的影响[J]. *河南科技*, 2013, (12): 223, 235.
- [59] 徐飞, 张拓, 怀宝东, 等. 土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2531-2540.  
Xu F, Zhang T, Huai B D, *et al.* Effects of land use changes on soil fungal community structure and function in the riparian wetland along the downstream of the Songhua River [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2531-2540.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration .....	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration .....	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China .....	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City .....	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019 .....	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021 .....	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province .....	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification .....	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China .....	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou .....	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage .....	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles .....	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste .....	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River .....	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River .....	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River .....	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources .....	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic .....	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River .....	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area .....	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water .....	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019 .....	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake .....	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff .....	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources .....	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs .....	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution .....	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI) .....	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar .....	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus .....	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan .....	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai .....	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing .....	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites .....	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model .....	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County .....	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China .....	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China .....	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland .....	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils .....	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat .....	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils .....	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant .....	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River .....	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan .....	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals .....	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration .....	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification .....	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)