

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11  
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 ..... 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 ..... 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 ..... 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征、来源及健康风险评估 ..... 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征 ..... 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 ..... 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 ..... 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 ..... 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 ..... 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 ..... 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 ..... 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 ..... 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 ..... 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 ..... 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评估 ..... 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 ..... 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 ..... 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 ..... 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评估 ..... 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 ..... 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 ..... 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 ..... 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 ..... 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 ..... 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 ..... 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 ..... 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 ..... 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N<sub>2</sub>O 释放的影响 ..... 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A<sup>2</sup>/O 污染物去除特性 ..... 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 ..... 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 ..... 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 ..... 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 ..... 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 ..... 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉迁移的影响 ..... 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 ..... 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 ..... 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 ..... 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 ..... 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 ..... 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 ..... (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

# 铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响

贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰

(山西大学黄土高原研究所, 黄土高原生态恢复山西省重点实验室, 太原 030006)

**摘要:** 植物的叶际和根际微生物与宿主植物之间存在复杂的相互关系, 能促进植物的生长, 增强宿主植物对逆境胁迫的耐受性. 本实验选择铜矿区主要恢复植被白羊草为研究对象, 采用高通量测序的方法, 分析白羊草叶际和根际真菌群落结构与多样性差异, 探究白羊草叶片和根部富集的重金属含量对叶际和根际真菌群落特征的影响. 结果表明, 在白羊草的根际和叶际区域, 子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota)均为优势菌门. 白羊草根际真菌群落的多样性和丰富度显著高于叶际真菌. 白羊草植株叶际和根际真菌多样性受到不同重金属的影响, 白羊草叶际多样性主要受到叶片 Zn 和 Cu 含量的影响, 而根 Pb 含量是影响根际真菌群落多样性的关键因子. 此外, 叶际子囊菌门的孢菌科与叶片 Cd 含量有极显著正相关关系, 根际丛赤壳科与根 Zn 含量显著正相关, 可作为重金属污染区域生态恢复的指示菌种. 本研究为铜尾矿生态恢复过程中发掘和利用叶际或根际真菌资源提供科学依据, 也为筛选重金属污染区生态修复的植物-微生物共生体提供基础.

**关键词:** 铜尾矿; 叶际; 根际; 真菌群落; 重金属; 白羊草

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5193-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004239

## Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for *Bothriochloa ischaemum* in Copper Tailings Area

JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, CHAI Bao-feng

(Shanxi Key Laboratory of Ecological Restoration on Loess Plateau, Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** There are complex interrelationships between plant microorganisms (phyllosphere and rhizosphere) and host plants, which can promote plant growth and enhance the tolerance of host plants to stress. In this study, we selected the dominant species *Bothriochloa ischaemum* as the research subject in a copper tailings dam. Using high-throughput sequencing, we investigated the structures of the fungal communities and diversities in the phyllosphere and rhizosphere of *B. ischaemum*. This study also explored the effects of heavy metal content on fungal community characteristics. The results showed that Ascomycota and Basidiomycota were the dominant phyla in the phyllosphere and rhizosphere of *B. ischaemum*. The diversities and richness of the rhizosphere fungal community were higher than that of the phyllosphere fungal community. The diversities of rhizosphere and phyllosphere fungal communities was affected by different heavy metals. Phyllosphere fungal diversity was mainly affected by the content of Zn and Cu in leaves, and the content of Pb in roots was the key factor affecting the diversity of the rhizosphere fungal community. Furthermore, Pleosporaceae had a very significant positive correlation with Cd in the phyllosphere, and Nectriaceae had a significant positive correlation with Zn in the rhizosphere. These fungal communities could be used as indicators of ecological recovery in areas with heavy metal pollution. The results could provide an ecological basis for the exploration and utilization of phyllosphere or rhizosphere fungi resources during ecological restoration processes. This study also provides guidance for selecting the plant-microbial symbionts during ecological restoration in areas with heavy metal pollution.

**Key words:** copper tailing; phyllosphere; rhizosphere; fungal community; heavy metal; *Bothriochloa ischaemum*

我国矿产资源储量丰厚、品种齐全,多种金属矿藏储量均位于世界前列,在社会经济发展中具有重要作用<sup>[1]</sup>. 山西是我国重要的能源基地,已探明储量的有煤、铁、铝、铜和钼等 49 种,除煤炭资源储量居于全国首位外,铜、锌和金等有色金属储量也相对丰富. 但是,长期的矿业生产活动在促进经济增长的同时,引发一系列生态环境问题,主要表现为地质破坏、植被破坏和生物多样性丧失等<sup>[2]</sup>. 其中,采矿废弃物的堆积是造成环境污染的主要问题之一. 金属尾矿不仅占用大量周边土地,尾矿砂还能以风或水为载体传播扩散,造成水体和土壤污染,导致农田绝产和减产,甚至危害人体健康<sup>[3]</sup>. 因此,针对有色金属矿区尾矿生态系统修复具有重要意义. 关于矿区

生态修复技术的研究表明,植物-微生物联合修复因其成本较低、能够改变废弃地性质及从根本上改变矿区的生态环境,被认为是解决废弃地环境问题的最佳途径之一<sup>[4]</sup>. 一些修复植被能够富集、固定土壤中的重金属等污染物,并为微生物提供营养物质,

收稿日期: 2020-04-27; 修订日期: 2020-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31600308); 山西省应用基础研究优秀青年基金项目(201901D211196); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0005); 山西省回国留学人员科研项目(2016-006); 山西省教育厅研究生创新计划项目(2019SY029); 山西省“1331 工程”重点创新团队建设计划“受损土壤系统生态修复创新团队”项目; 高等学校服务产业创新学科建设计划“土壤污染生态修复学科群”项目(20181401)

作者简介: 贾彤(1985~),女,博士,副教授,主要研究方向为微生物生态学, E-mail: jiatong@sxu.edu.cn

促进其生存,同时,微生物又能提高植物对尾矿胁迫环境的耐受性,加强植物对重金属的富集能力<sup>[5]</sup>.因此,明确矿区生态修复中优势植被的微生物群落特征,有利于筛选合适的微生物菌种,对受损生态系统生态修复具有一定科学价值.

在植物叶、花和果实等植物的地上有效部分组成的生境统称为叶际,生存在其表面和内部的微生物,称为叶际微生物(phylosphere microorganisms)<sup>[6,7]</sup>.据统计,地球上叶际微生物的总数超过 $10^{26}$ 个细胞,它们能够促进植物生长、提高生产力和抑制病原微生物等<sup>[8,9]</sup>.目前研究表明,植物种类、季节变化和宿主植物基因型以及环境等均可对叶际微生物群落结构产生影响<sup>[10-12]</sup>.例如,温度、水分以及太阳辐射被认为是地中海松(*Pinus halepensis*)叶际真菌的主要影响因子<sup>[13]</sup>.潘建刚等<sup>[14]</sup>的研究表明部分叶际真菌对植物种类表现出定植的特异性.然而,对于重金属污染条件下植物叶际微生物群落的驱动因素尚不明确.类似地,在植物的根系周围也存在着大量根际微生物,它们以寄生、共生以及附生等形式存在于植物根系周围<sup>[15,16]</sup>.这些微生物除了影响植物对养分的吸收外,还会影响土壤养分的分解和转化<sup>[17]</sup>,提高植物对胁迫环境的耐受性.例如,丛枝菌根真菌能够促进植物根系生长,增加根系的吸收面积,提高植物的养分和水分吸收能力<sup>[18]</sup>,还能通过分泌胞外酶,改变重金属的形态,提高宿主对重金属的耐受性<sup>[19]</sup>.有研究表明,土壤是决定根际微生物群落组成的主要驱动因子<sup>[20]</sup>.土壤复杂的理化性质能够影响植物的生理特征,进而影响到植物与根际微生物的整合<sup>[21]</sup>.此外,根际微生物还受到植物种类<sup>[22]</sup>、植物的生长发育阶段<sup>[23]</sup>以及微生物互作<sup>[24]</sup>等因素的影响.

微生物与宿主植物之间存在着复杂的相互作用,不仅能促进宿主植物的生长,还会影响植物与其他生物因子之间的关系.研究表明,植物地下部分与微生物的交互作用能够对地上部分的交互作用产生影响<sup>[25]</sup>.丛枝菌根真菌、芽孢杆菌和假单胞菌能够诱发植物的系统抗性反应,抵抗病原微生物的入侵<sup>[21]</sup>.此外,患早疫病的番茄可能会通过植物间的菌丝网络将保护信号传递到健康的植株上,导致更高的抗病水平<sup>[26]</sup>并促进植物对植食性动物的防御<sup>[27]</sup>.因此,通过探究叶际和根际微生物的群落特征及其影响因素,有助于进一步明确植物与微生物、微生物与微生物的相互作用.目前大多数研究集中在自然环境下单一的微生物群落,而将二者结合起来,比较分析叶际和根际微生物群落,及其对重金属污染地区植物体内重金属的响应仍相对较少.

中条山北方铜业铜矿峪矿位于山西省运城市垣曲县,是我国七大铜矿基地之一,年产矿量达700万t以上,长期的矿业生产活动对当地生态系统造成严重破坏.前期调查发现,十八河尾矿坝已形成固有植被类群<sup>[28]</sup>,优势种为白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),对矿砂贫瘠养分以及重金属污染等胁迫条件具有较高耐受性<sup>[1]</sup>.因此,本实验选择铜尾矿区主要恢复植被白羊草为研究对象,分析重金属污染环境白羊草中叶际和根际真菌群落结构与多样性的差异,探讨白羊草叶际和根际真菌与植物属性和环境因子的关系,阐明白羊草叶际和根际真菌的群落结构与多样性在铜尾矿重金属胁迫环境中的响应,以期铜尾矿生态恢复过程中发掘和利用叶际或根际真菌资源提供科学依据,进而提高铜尾矿区的生态修复效率.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

山西省运城市垣曲县北方铜业铜矿峪矿十八河尾矿库于1969年建坝.选矿产生的废弃物以矿砂的形式逐年堆积于铜尾矿坝,每3~5a在原子坝基础上堆积形成一个新的子坝,并在矿砂表层覆盖30cm厚客土,尾矿坝初期坝底标高486m,坝顶标高509m,现已堆筑16道子坝,堆积高度84m,总坡比1:6.该区域属大陆性季风气候,四季分明,春季干旱多风,夏季雨量集中,冬季少雪干燥.年均降雨量为780mm,年均气温14℃,无霜期大于200d<sup>[29]</sup>.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 白羊草和土壤样品采集

2017年7月在536号子坝(恢复20a)进行样本采集,通过随机取样选取相距50m以上的1m×1m样方,采集健康白羊草植株的叶片和根系,并用毛刷轻轻分离白羊草根系样本上的土壤获取白羊草根际土壤样品,此过程中佩戴无菌手套,防止样品污染,将白羊草的叶片、根和根际土壤分装于无菌塑封袋内.白羊草叶、根和根际土壤各设置3个重复,总共采集9个样本.其中,一部分叶片和根系用于植物养分和重金属含量测定,另一部分叶片和根际土壤样品存于实验室-80℃低温冰箱,用于DNA提取.

#### 1.2.2 白羊草叶片和根的理化性质测定

采集后用于测定理化的白羊草叶片和根在混合冷冻研磨仪(MM400, China)粉碎,植物叶片和根系的全氮(TN)、全碳(TC)和全硫(TS)用vario MACRO cube元素分析仪(德国)测定<sup>[30]</sup>.研究区域不同子坝之间通过排水渠进行分隔,最终汇合到子坝底层排水口,子坝之间随降水导致的堆积物重金

属迁移影响相对较小. 样品重金属 [ 铬 (Cr)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、铅 (Pb) 和锌 (Zn) ] 含量用 ICP-AES (Icap 6000, Thermo Fisher, UK) 测定<sup>[31]</sup>.

### 1.2.3 白羊草叶际和根际高通量测序

白羊草根际土壤样本进行 DNA 提取, 根际土壤总 DNA 提取采用 the E. Z. N. A. Soil DNA Kit 试剂盒 (sangon 公司, 中国). 采集后用于高通量测序的叶片, 首先使用无菌磷酸缓冲盐溶液 (PBS: NaCl、KCl、Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 进行洗涤, 洗涤方法为将采集的叶片放置在 250 mL 锥形瓶中, 添加无菌 PBS 溶液 100 mL, 在摇床 (ZWY-200D, China) 中将转速调整为 150 r·min<sup>-1</sup>, 时间为 30 min, 进行叶片表面的彻底清洗, 最后将清洗液收集于 1 000 mL 广口瓶中, 此过程重复 3 次. 最后将收集的清洗液于 0.2 μm 的滤膜中进行过滤, 收集滤膜, 放置于塑封袋于干冰保存, 与根际土壤总 DNA 样品一同送上海美吉公司进行真菌高通量测序. 测序选择引物为: ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'), 使用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物, 利用 Illumina 公司的 MiSeq PE300 平台进行测序.

### 1.3 数据分析

使用 Trimmomatic 软件对原始序列进行数据去杂和质控过滤, 得到优化数据. 使用的 UPARSE 软件 (version 7.1, <http://drive5.com/uparse/>) 对得到的高质量序列按照 97% 的相似度进行操作分类单元 (Operational taxonomic units, OTU) 的聚类. 对 OTU 代表序列进行物种注释, 用 Qiime 软件 (Version 1.7.0) 中的 blast 方法<sup>[32]</sup> 与 Unit 数据库<sup>[33]</sup> 进行物种注释分析, 并分别在各个分类水平进行统计叶际和根际真菌群落组成. 白羊草重金属含量分析利用 SigmaPlot 12.5 完成. 叶际和根际的真菌群落组成差异性分析和韦恩图通过 R 软件完成. 叶际和根际真菌群落与植物重金属含量的相关性分析通过 SPSS 13.0 完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 白羊草叶片和根的重金属含量

从图 1 可知, 白羊草叶片和根系中重金属含量具有明显差异. 除 Pb 含量外, 白羊草根系重金属含量均高于叶片, 重金属 Cr 在白羊草体内富集, 且根内 Cr 含量 (819.7 mg·kg<sup>-1</sup>) 高于叶片 (410.1 mg·kg<sup>-1</sup>). 通过邓肯检验, 白羊草根内 Cu 含量显著高于叶片内 Cu 含量 ( $P < 0.05$ , 图 1).

### 2.2 白羊草叶际和根际真菌群落结构

通过高通量测序, 白羊草叶际和根际真菌群落

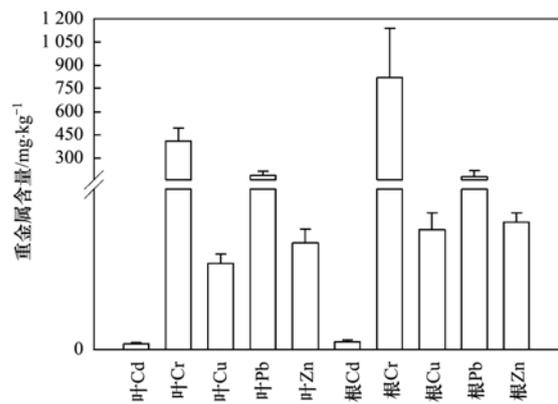


图 1 白羊草叶片和根系内的重金属含量

Fig. 1 Heavy metal contents in leaf and root of *B. ischaemum*

共得到 5 门, 21 纲, 47 目, 99 科, 178 属. 其中, 在 OTU 水平上, 白羊草叶际和根际真菌共有的 OTU 数为 174 个, 白羊草根际真菌特有的 OTU 数 (241 个) 显著高于叶际真菌特有的 OTU 数 (66 个), 是叶际真菌特有 OTU 数的 3.65 倍 (图 2)

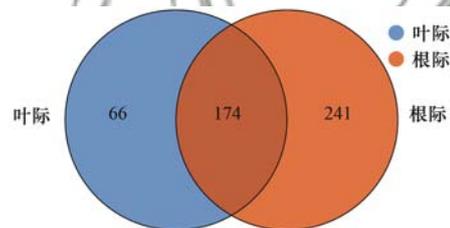


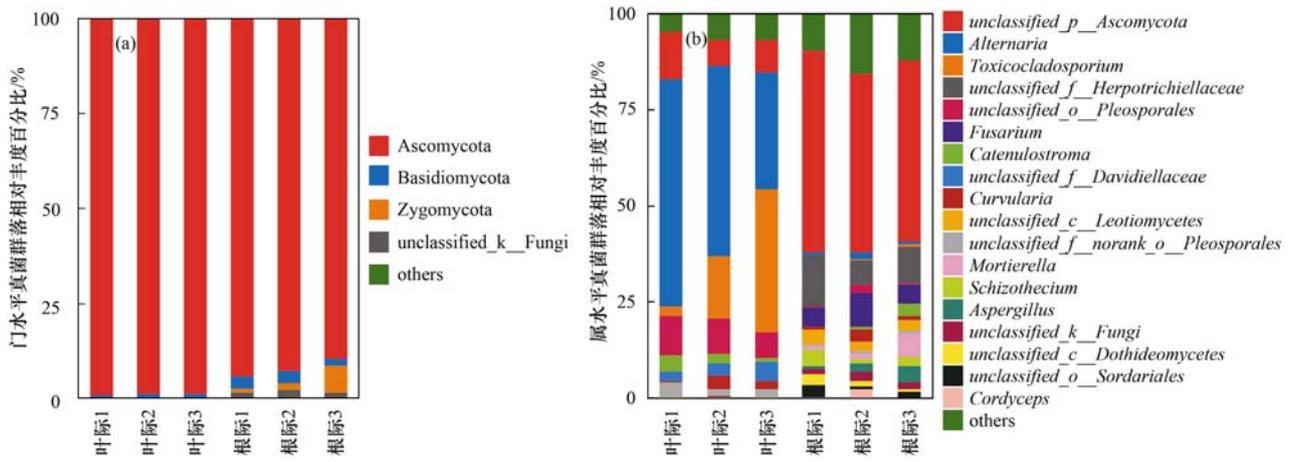
图 2 白羊草叶际和根际真菌群落共有及特有的 OTU 数

Fig. 2 OTU numbers of phyllosphere and rhizosphere fungal communities of *B. ischaemum*

由图 3 可知, 在门水平, 白羊草叶际真菌的优势真菌门包括子囊菌门 (98.7%) 和担子菌门 (1.1%). 白羊草根际真菌的优势门为子囊菌门 (91.7%)、接合菌门 (3.4%) 和担子菌门 (2.9%) [图 3(a)]. 在属水平, 白羊草叶际真菌优势属包括链格孢属 (46.3%) 和 *Toxicocladosporium* 属 (18.5%). 白羊草根际真菌的优势属中, 镰刀菌属为 6.2% [图 3(b)].

### 2.3 白羊草叶际和根际真菌群落差异性

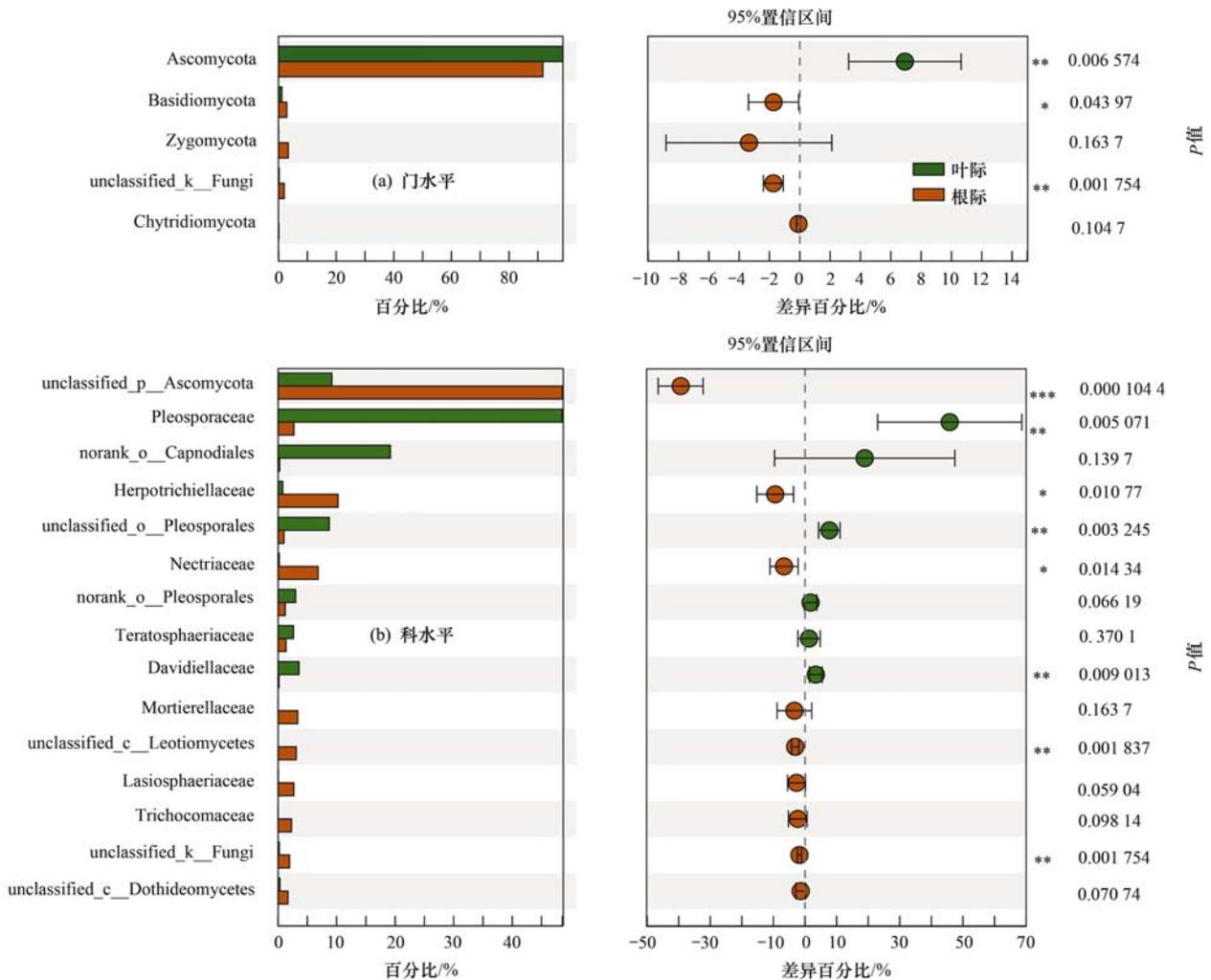
通过对白羊草叶际和根际真菌群落进行差异分析, 结果表明在门水平, 叶际和根际真菌子囊菌门和 unclassified\_k\_Fungi 门均具有极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 担子菌门在叶际和根际之间也存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) [图 4(a)]. 在科水平上, 叶际和根际真菌的 Herpotrichiellaceae 科和丛赤壳科具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 孢菌科、unclassified\_o\_Pleosporales 科、Davidiellaceae 科和 unclassified\_c\_Leotiomycetes 科呈现出极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 叶际和根际真菌的 unclassified\_p\_Ascomycota 科也具有极显著差异 ( $P < 0.001$ ) [图 4(b)].



(a) 门水平; (b) 属水平; 门水平真菌相对丰度百分比大于 1%, 属水平真菌相对丰度百分比大于 2%

图 3 白羊草叶际和根际真菌群落门水平和属水平的相对丰度百分比

Fig. 3 Relative abundance percentages of phyllosphere and rhizosphere fungal communities of *B. ischaemum* at phylum level and genus level



门水平相对丰度仅出现排名前 5 的真菌, 科水平相对丰度仅出现排名前 15 的真菌; \* 表示差异显著,  $P < 0.05$ ,

\*\* 表示差异极显著,  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示差异极显著,  $P < 0.001$

图 4 白羊草叶际和根际优势真菌相对丰度在门水平和科水平的差异性

Fig. 4 Differences of relative abundance of dominant fungal in phyllosphere and rhizosphere of *B. ischaemum* at phylum and family level

## 2.4 白羊草叶际和根际真菌群落多样性

所有白羊草叶际和根际样本的测序文库的覆盖度均达到 99% 以上, 说明绝大部分真菌序列可以被

测出, 测序结果具有较好地代表性. 白羊草叶际和根际真菌群落的香农指数具有极显著差异, 并且根际真菌群落的香农指数 (3.196) 显著高于叶际真菌

(2.025). ACE 指数和 Chao1 指数趋势与香农指数一致(表 1), 根际真菌的丰富度指数均表现为根际真菌群落显著高于叶际真菌( $P < 0.001$ ).

## 2.5 植物养分及重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响

白羊草叶际和根际真菌优势科与叶片和根属性的

相关性结果表明, 叶际真菌中, 子囊菌门的孢菌科与白羊草叶片 TN 和 Cr 含量显著负相关, 与叶片 Cd 含量有极显著正相关关系. 根际真菌中, 子囊菌门的丛赤壳科与根 Zn 含量显著正相关, 担子菌门的绣球菌科与根 TN 含量显著正相关(表 2). 这表明不同植物属性对叶际和根际优势真菌的影响具有一定差异性.

表 1 白羊草叶际和根际真菌群落丰富度与多样性指数<sup>1)</sup>

Table 1 Richness and diversity indexes of phyllosphere and rhizosphere fungal communities of *B. ischaemum*

真菌	97% 相似水平				
	香农指数	辛普森指数	ACE 指数	Chao1 指数	覆盖度/%
叶际	2.025	0.288	219	216	0.999
根际	3.196*	0.123	354***	351***	0.999

1) \* 表示差异显著,  $P < 0.05$ , \*\* 表示差异极显著,  $P < 0.001$

表 2 白羊草叶际和根际优势真菌在科水平与叶片和根属性的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlations among phyllosphere and rhizosphere fungal communities of *B. ischaemum* and leaf and root properties at family level

位置	优势门	优势科	叶 TN	叶 TC	叶 TS	叶 Cd	叶 Cr	叶 Cu	叶 Pb	叶 Zn
叶际	Ascomycota	Pleosporaceae	-0.999**	0.755	-0.299	0.999**	-0.999*	-0.905	0.557	0.826
		Teratosphaeriaceae	-0.935	0.942	-0.625	0.931	-0.917	-0.689	0.821	0.974
		Davidiellaceae	0.996	-0.817	0.393	-0.995	0.99	0.858	-0.638	-0.878
	Basidiomycota	Pleosporaceae	0.381	-0.890	0.997	-0.373	0.338	-0.056	-0.978	-0.832
		Peniophoraceae	-0.631	-0.024	0.546	0.638	-0.666	-0.904	-0.285	0.091
		Filobasidiaceae	-0.497	0.942	-0.978	0.490	-0.458	-0.073	0.997*	0.897
		Schizophyllaceae	-0.192	-0.492	0.876	0.201	-0.236	-0.597	-0.703	-0.388
位置	优势门	优势科	根 TN	根 TC	根 TS	根 Cd	根 Cr	根 Cu	根 Pb	根 Zn
根际	Ascomycota	Herpotrichiellaceae	-0.749	0.205	-0.552	-0.577	0.667	0.353	-0.874	-0.855
		Nectriaceae	0.347	0.281	0.880	0.894	-0.237	0.130	0.541	0.999*
		Lasiochaeraceae	-0.749	0.206	-0.551	-0.576	0.668	0.354	-0.875	-0.855
	Basidiomycota	Marasmiaceae	-0.946	0.565	-0.190	-0.219	0.902	0.685	-0.994	-0.591
		Ceratobasidiaceae	0.413	0.212	0.844	0.860	-0.305	0.059	0.600	0.992
		Sparassidaceae	0.998*	-0.768	-0.085	-0.054	-0.985	-0.858	0.987	0.349

1) \* 表示差异显著,  $P < 0.05$ , \*\* 表示差异极显著,  $P < 0.01$

白羊草叶际和根际真菌群落多样性与叶片和根属性的相关性结果表明, 叶际香农指数与叶片 Zn 含量显著负相关, 并且叶际真菌群落 Chao1 指数与叶片 Cu 含量显著负相关. 根际真菌群落辛普森指数与根 Pb 含量显著负相关(表 3). 这表明植物属性对叶际和根际真菌群落多样性的影响具有一定差异性.

## 3 讨论

### 3.1 叶际和根际真菌群落结构

微生物在生态系统的能量和物质流动中起着至关重要的作用<sup>[34]</sup>. 在白羊草的叶际和根际区域, 子囊菌门和担子菌门均为优势菌门. Essel 等<sup>[35]</sup>的研究发现子囊菌门和担子菌门是小麦和豌豆根际土壤中的优势菌门. 在青杨雌雄株的叶际微生物中子囊菌和担子菌的相对丰度也比较高<sup>[36]</sup>. 同时, 本研究发现白羊草根际, 接合菌门也是主要的优势菌门, 而在叶际其相对丰度较低, 这可能与接合菌门中的大部分微生物为腐生菌有关<sup>[37]</sup>. Bonanomi 等<sup>[38]</sup>的

表 3 白羊草叶际和根际真菌群落多样性与叶片和根属性的相关性<sup>1)</sup>

Table 3 Correlations among phyllosphere and rhizosphere fungal community diversities of *B. ischaemum* and leaf and root properties

项目	香农指数	辛普森指数	ACE 指数	Chao1 指数		
叶	TN	-0.994	0.936	-0.123	0.382	
	TC	0.828	-0.940	-0.551	-0.891	
	TS	0.787	-0.612	0.626	0.160	
	Cd	-0.824	0.937	0.558	0.895	
	Cr	0.802	-0.924	-0.588	-0.911	
	Cu	0.505	-0.700	-0.858	-0.999*	
	Pb	-0.930	0.811	-0.379	0.127	
	Zn	-0.999*	0.970	-0.008	0.486	
	根	TN	-0.498	0.658	-0.140	-0.495
		TC	0.917	-0.977	0.703	0.916
TS		0.267	-0.072	0.606	0.270	
Cd		0.296	-0.103	0.630	0.299	
Cr		-0.865	0.947	-0.617	-0.863	
Cu		-0.625	0.766	-0.291	-0.623	
Pb		0.981	-0.998*	0.840	0.981	
Zn		0.653	-0.492	0.888	0.656	

1) \* 表示差异显著,  $P < 0.05$

研究发现在未降解的凋落物中,接合菌门的相对丰度较低,而在降解一个月后其相对丰度显著增加.真菌群落组成差异性分析表明,叶际子囊菌门的相对丰度要显著高于根际区域,而担子菌门的相对丰度则显著低于根际.在科水平上,白羊草叶际孢菌科的相对丰度要显著高于根际,而根际中丛赤壳菌的相对丰度显著高于叶际,这种差异可能与微生物自身代谢特性有关.研究表明,丛赤壳类真菌在自然界以寄生或腐生的营养方式生存<sup>[39]</sup>,部分微生物对植物病原菌具有广谱杀伤性,而不会对人类和环境产生危害,常被用作生物防治剂<sup>[40]</sup>.此外,担子菌门中的伞菌纲也具有抗氧化的作用<sup>[41]</sup>且子囊菌门和担子菌门是土壤中主要的真菌分解者,能够分泌一系列胞外酶,降解凋落物中的难降解的木质素和纤维素<sup>[42]</sup>,促进生态系统的物质循环.

### 3.2 叶际和根际真菌多样性

据统计,地球上叶际细菌的平均数量是  $10^6 \sim 10^7 \text{ cell} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[43]</sup>,真菌的数量尚不明确,但估计远低于细菌.本研究结果显示白羊草根际真菌群落的多样性指数、丰富度指数以及特有种数量均显著高于叶际区域,这可能与植物叶际及根际所处的不同环境条件有关.环境状况是影响微生物群落多样性的关键因子<sup>[12]</sup>.有研究表明,根际是根系周围土壤微生物活动强烈的热点,植物根向根际释放各种化学物质和营养物质吸引多种微生物定殖<sup>[44]</sup>,且在根际区域微生物的活性要显著高于非根际区域<sup>[45]</sup>.而相较于根际区域,植物的叶面营养物质和水资源相对匮乏,且环境条件的变化也会对已经存在于叶片表面的微生物产生影响.例如,降雨对植物叶片的冲刷会促进叶表面定殖微生物的迁移,温度及太阳辐射等也会对叶际微生物群落产生不利影响<sup>[10]</sup>.此外,植物的叶片性质如气孔导度、叶片厚度等也会影响叶际微生物的定殖<sup>[46]</sup>.因此,与根际环境条件相比,叶际区域会受到更多不确定因素的影响,这可能是导致白羊草叶际和根际真菌群落存在差异的原因.

### 3.3 植物养分及重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响

在白羊草叶际和根际的优势科中,只有孢菌科和绣球菌科与 TN 含量显著相关,其他微生物与 TC 和 TN 的相关性均不显著,且真菌多样性与白羊草的 TC、TN 也没有显著相关性,表明养分含量并不是白羊草叶际和根际真菌群落的主要影响因子,这与刘利玲等<sup>[36]</sup>的研究结果一致.有研究发现,土壤速效氮是影响榆树根际真菌群落的关键因子,且速效磷、氮以及土壤温度也会对真菌群落结构产生影响<sup>[47]</sup>.这可能表明与植物养分含量相比,根际真菌

受到土壤养分含量的影响更大,但还需要进一步分析.铜、锌、铁和镁等金属在浓度较低时是微生物生长必需的营养物质,参与许多重要的生物代谢过程.然而,在高浓度下,这些物质会对微生物的生长、形态和细胞代谢产生显著影响,导致微生物多样性下降<sup>[48]</sup>.本研究结果表明,Zn 和 Cu 会抑制白羊草叶际真菌的多样性和丰富度,而根际真菌群落多样性主要受到 Pb 的影响.Chen 等<sup>[49]</sup>的研究也发现土壤有机碳、Zn 和 Pb 是影响土壤真菌群落结构的关键因子.此外,叶际真菌中子囊菌门的孢菌科与叶片 Cd 含量有极显著正相关关系,根际真菌中丛赤壳科与根 Zn 含量显著正相关,表明这些微生物对重金属具有一定的耐受性,可将重金属固定于真菌细胞壁内<sup>[50]</sup>.此外,根际真菌能够调节宿主植物对重金属的吸收、转运和分布<sup>[51]</sup>,在重金属污染的土壤修复中具有重要作用.

## 4 结论

(1) 铜尾矿白羊草叶际和根际真菌微生物群落的优势菌是子囊菌门和担子菌门.

(2) 白羊草根际真菌的多样性和丰富度显著高于叶际真菌.

(3) 叶际真菌中子囊菌门的孢菌科与叶片 Cd 含量有极显著正相关关系,根际真菌中丛赤壳科与根 Zn 含量显著正相关,对重金属具有一定的耐受性.

### 参考文献:

- [1] 肖雪毅. 丛枝菌根真菌在植物适应铜尾矿中的作用[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [2] 吴伟业. 矿区生态修复研究进展[J]. 广东化工, 2014, 41(1): 82-83.  
Wu W Y. Ecological restoration research progress of mining area [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(1): 82-83.
- [3] 延吉生. 矿山生态环境综合整治是矿业面临的重要任务[J]. 金属矿山, 2002, (12): 5-7.  
Yan J S. Comprehensive harness of mine ecological environment is an important task of mining[J]. Metal Mine, 2002, (12): 5-7.
- [4] 黄俊伟, 阚绍闯, 陈凯, 等. 有机污染物的植物-微生物联合修复技术研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(6): 757-765.  
Huang J W, Chuang S C, Chen K, et al. Progress on plant-microorganism combined remediation of organic pollutants [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2017, 43(6): 757-765.
- [5] 李崇. 植物微生物联合修复土壤重金属技术综述[J]. 农业与技术, 2016, 36(7): 31, 62.
- [6] Igiehon N O, Babalola O O. Below-ground-above-ground plant-microbial interactions: focusing on soybean, rhizobacteria and mycorrhizal fungi[J]. The Open Microbiology Journal, 2018, 12(1): 261-279.
- [7] Lindow S E, Leveau J H J. Phyllosphere microbiology [J].

- Current Opinion in Biotechnology, 2002, **13**(3): 238-243.
- [ 8 ] Berg G, Grube M, Schloter M, *et al.* Unraveling the plant microbiome: looking back and future perspectives[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, **5**: 148.
- [ 9 ] Rastogi G, Coaker G L, Leveau J H J. New insights into the structure and function of phyllosphere microbiota through high-throughput molecular approaches [ J ]. *FEMS Microbiology Letters*, 2013, **348**(1): 1-10.
- [ 10 ] Leveau J H J. A brief from the leaf: latest research to inform our understanding of the phyllosphere microbiome [ J ]. *Current Opinion in Microbiology*, 2019, **49**: 41-49.
- [ 11 ] Schlechter R O, Miebach M, Remus-Emsermann M N P. Driving factors of epiphytic bacterial communities: a review[J]. *Journal of Advanced Research*, 2019, **19**: 57-65.
- [ 12 ] Espenshade J, Thijs S, Gawronski S, *et al.* Influence of urbanization on epiphytic bacterial communities of the *Platanus × hispanica* tree leaves in a biennial study [ J ]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**: 675.
- [ 13 ] Botella L, Santamaría O, Díez J J. Fungi associated with the decline of *Pinus halepensis* in Spain[J]. *Fungal Diversity*, 2010, **40**(1): 1-11.
- [ 14 ] 潘建刚, 呼庆, 齐鸿雁, 等. 叶际微生物研究进展[J]. *生态学报*, 2011, **31**(2): 583-592.  
Pan J G, Hu Q, Qi H Y, *et al.* Advance in the research of phyllospheric microorganism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(2): 583-592.
- [ 15 ] Sessitsch A, Mitter B. 21st century agriculture: integration of plant microbiomes for improved crop production and food security [ J ]. *Microbial Biotechnology*, 2015, **8**(1): 32-33.
- [ 16 ] Peiffer J A, Spor A, Koren O, *et al.* Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(16): 6548-6553.
- [ 17 ] Morris R M, Nunn B L, Frazar C, *et al.* Comparative metaproteomics reveals ocean-scale shifts in microbial nutrient utilization and energy transduction [ J ]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(5): 673-685.
- [ 18 ] 郭江源, 郭伟, 毕娜, 等. 丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1481-1488.  
Guo J Y, Guo W, Bi N, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of reeds in wetland soils with different salt content [ J ]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1481-1488.
- [ 19 ] 陈保冬, 张莘, 伍松林, 等. 丛枝菌根影响土壤-植物系统中重金属迁移转化和累积过程的机制及其生态应用[J]. *岩矿测试*, 2019, **38**(1): 1-25.  
Chen B D, Zhang X, Wu S L, *et al.* The role of arbuscular mycorrhizal fungi in heavy metal translocation, transformation and accumulation in the soil-plant continuum: underlying mechanisms and ecological implications [ J ]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, **38**(1): 1-25.
- [ 20 ] 葛艺, 徐绍辉, 徐艳. 根际微生物组构建的影响因素研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2019, **31**(12): 2120-2130.  
Ge Y, Xu S H, Xu Y. Review on influencing factors of rhizosphere microbiome assemblage [ J ]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, **31**(12): 2120-2130.
- [ 21 ] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, *et al.* Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, **11**(11): 789-799.
- [ 22 ] Bulgarelli D, Rott M, Schlaeppli K, *et al.* Revealing structure and assembly cues for *Arabidopsis* root-inhabiting bacterial microbiota[J]. *Nature*, 2012, **488**(7409): 91-95.
- [ 23 ] Li X Z, Rui J P, Mao Y J, *et al.* Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 392-401.
- [ 24 ] Faust K, Raes J. Microbial interactions: from networks to models [ J ]. *Nature Reviews Microbiology*, 2012, **10**(8): 538-550.
- [ 25 ] van der Heijden M G, Klironomos J N, Ursic M, *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [ J ]. *Nature*, 1998, **396**(6706): 69-72.
- [ 26 ] Babikova Z, Johnson D, Bruce T, *et al.* How rapid is aphid-induced signal transfer between plants via common mycelial networks? [ J ]. *Communicative & Integrative Biology*, 2013, **6**(6): e25904.
- [ 27 ] de la Peña T C, Pueyo J J. Legumes in the reclamation of marginal soils, from cultivar and inoculant selection to transgenic approaches [ J ]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, **32**(1): 65-91.
- [ 28 ] 景炬辉, 刘晋仙, 李鑫, 等. 中条山铜尾矿坝面土壤细菌群落的结构特征 [ J ]. *应用与环境生物学报*, 2017, **23**(3): 527-534.  
Jing J H, Liu J X, Li C, *et al.* The structural characteristics of a soil bacterial community in a dam of copper mine tailings in Zhongtiaoshan mountains, Shanxi [ J ]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017, **23**(3): 527-534.
- [ 29 ] 刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 等. 中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 318-326.  
Liu J X, Li C, Jing J H, *et al.* Composition and environmental adaptation of microbial community in Shibahé copper tailing in Zhongtiao mountain in Shanxi [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 318-326.
- [ 30 ] 乔沙沙, 周永娜, 刘晋仙, 等. 关帝山针叶林土壤细菌群落结构特征 [ J ]. *林业科学*, 2017, **53**(2): 89-99.  
Qiao S S, Zhou Y N, Liu J X, *et al.* Characteristics of soil bacterial community structure in coniferous forests of Guandi mountains, Shanxi province [ J ]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, **53**(2): 89-99.
- [ 31 ] 邵臻, 张富, 陈瑾, 等. 陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析 [ J ]. *干旱区资源与环境*, 2017, **31**(12): 129-135.  
Shao Z, Zhang F, Chen J, *et al.* Soil moisture changes for different land use types in Loess Plateau gully and hilly region of central Gansu [ J ]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(12): 129-135.
- [ 32 ] Altschul S F, Gish W, Miller W, *et al.* Basic local alignment search tool [ J ]. *Journal of Molecular Biology*, 1990, **215**(3): 403-410.
- [ 33 ] Kõljalg U, Nilsson R H, Abarenkov K, *et al.* Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi [ J ]. *Molecular Ecology*, 2013, **22**(21): 5271-5277.
- [ 34 ] Štursová M, Žižňáková L, Leigh M B, *et al.* Cellulose utilization in forest litter and soil: identification of bacterial and fungal decomposers [ J ]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **80**(3): 735-746.
- [ 35 ] Essel E, Xie J H, Deng C C, *et al.* Bacterial and fungal diversity in rhizosphere and bulk soil under different long-term tillage and cereal/legume rotation [ J ]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **194**: 104302.
- [ 36 ] 刘利玲, 李会琳, 蒙振思, 等. 青杨雌雄株叶际微生物群落

- 多样性和结构的差异[J]. 微生物学报, 2020, **60**(3): 556-569.
- Liu L L, Li H L, Meng Z S, *et al.* Differences in phyllosphere microbial communities between female and male *Populus cathayana*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, **60**(3): 556-569.
- [37] Voříšková J, Baldrian P. Fungal community on decomposing leaf litter undergoes rapid successional changes [J]. The ISME Journal, 2013, **7**(3): 477-486.
- [38] Bonanomi G, De Filippis F, Cesarano G, *et al.* Linking bacterial and eukaryotic microbiota to litter chemistry: combining next generation sequencing with <sup>13</sup>C CPMAS NMR spectroscopy[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **129**: 110-121.
- [39] Rodriguez R J, White J F Jr, Arnold A E, *et al.* Fungal endophytes: diversity and functional roles[J]. New Phytologist, 2009, **182**(2): 314-330.
- [40] He D, Xiang X J, He J S, *et al.* Composition of the soil fungal community is more sensitive to phosphorus than nitrogen addition in the alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, **52**(8): 1059-1072.
- [41] Cilerdžić J, Kosanic M, Stajić M, *et al.* Species of genus *Ganoderma* ( Agaricomycetes ) fermentation broth: a novel antioxidant and antimicrobial agent[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2016, **18**(5): 397-404.
- [42] Zhang W W, Yang K, Lyu Z, *et al.* Microbial groups and their functions control the decomposition of coniferous litter: a comparison with broadleaved tree litters[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **133**: 196-207.
- [43] Vacher C, Hampe A, Porté A, *et al.* The Phyllosphere: microbial jungle at the plant-climate interface [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2016, **47**: 1-24.
- [44] Mendes R, Garbeva P, Raaijmakers J M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2013, **37**(5): 634-663.
- [45] Schloter M, Nannipieri P, Sørensen S J, *et al.* Microbial indicators for soil quality [J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, **54**(1): 1-10.
- [46] Li Y S, Wu X K, Chen T, *et al.* Plant Phenotypic Traits eventually shape its microbiota; a common garden test [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, **9**: 2479.
- [47] Liang T Y, Yang G, Ma Y X, *et al.* Seasonal dynamics of microbial diversity in the rhizosphere of *Ulmus pumila* L. var. *sabulosa* in a steppe desert area of Northern China [J]. PeerJ, 2019, **7**: e7526.
- [48] Zampieri B D B, Pinto A B, Schultz L, *et al.* Diversity and distribution of heavy metal-resistant bacteria in polluted sediments of the araça bay, São Sebastião (SP), and the relationship between heavy metals and organic matter concentrations [J]. Microbial Ecology, 2016, **72**(3): 582-594.
- [49] Chen Z M, Wang Q, Ma J W, *et al.* Fungal community composition change and heavy metal accumulation in response to the long-term application of anaerobically digested slurry in a paddy soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **196**: 110453.
- [50] 黄艺, 彭博, 李婷, 等. 外生菌根真菌对重金属铜镉污染土壤中油松生长和元素积累分布的影响[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(5): 923-929.
- Huang Y, Peng B, Li T, *et al.* Growth and element accumulation of *Pinus tabulaeformis* seedlings influenced by inoculation of ectomycorrhizal fungi in Cu and Cd contaminated soil [J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, **31**(5): 923-929.
- [51] Finlay R D. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, **59**(5): 1115-1126.

## CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China .....	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM <sub>2.5</sub> : A Case Study of the Yangtze River Delta .....	..... ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area .....	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanxi University Town .....	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM <sub>2.5</sub> Concentration During 2000-2019 in China .....	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing .....	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background .....	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification .....	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data .....	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu .....	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir .....	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer .....	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 .....	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula .....	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve .....	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain .....	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin .....	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network .....	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section .....	..... XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns .....	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter .....	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier .....	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta .....	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China .....	..... GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree .....	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism .....	..... PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N <sub>2</sub> O Release of ANAMMOX Process .....	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A <sup>2</sup> /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source .....	..... RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules .....	..... ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge .....	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics .....	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites .....	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors .....	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System .....	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants .....	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides .....	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation .....	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China .....	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure .....	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area .....	..... JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems .....	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)