

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

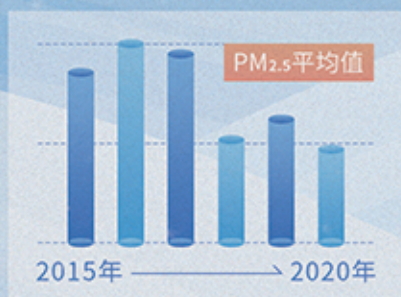
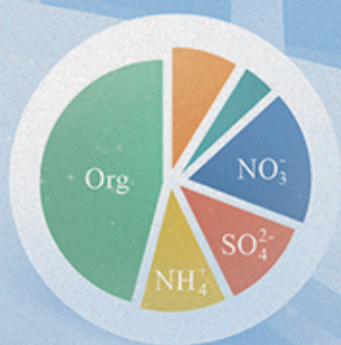
# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

### 北京冬季奥运会历史同期大气PM<sub>2.5</sub>污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,  
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期  
Vol.43 No.8



# 目次

|                                                           |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 北京冬季奥运会历史同期大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征分析·····               | 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895) |
| 天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····                       | 郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)                                           |
| 长江中游地区 PM <sub>2.5</sub> 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····       | 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)                                            |
| 滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····                        | 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)                                     |
| 典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····                              | 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)                                  |
| 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····                                 | 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)                                         |
| 河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····                        | 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)                                          |
| 京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····                         | 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)                                           |
| 2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····                     | 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)                                |
| 钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····                                | 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)                       |
| 长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····                                | 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)                               |
| 基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····                  | 庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)                                             |
| 梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····                  | 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)                                 |
| 基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····                           | 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)                                      |
| 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····                           | 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)                           |
| 联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····                              | 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)                                        |
| 江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····                                 | 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)                             |
| 天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····                                | 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)                                           |
| 宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····                | 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)                                      |
| 再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····                           | 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)                                               |
| 太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····                            | 杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)                               |
| 太湖氧化亚氮 (N <sub>2</sub> O) 排放特征及潜在驱动因素·····                | 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)                                |
| 海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····                                | 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)                                           |
| 玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····                       | 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)                                    |
| 环境 pH 条件下 Fe <sup>2+</sup> 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····    | 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)                                               |
| 新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····                         | 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)                                |
| 宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····                         | 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)                                     |
| 宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····                                    | 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)                                          |
| 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····                                | 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)                               |
| 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····                           | 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)                                  |
| 基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····                              | 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)                                      |
| 柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····                              | 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)                                |
| 不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····                         | 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)                            |
| 橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····                             | 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)        |
| 3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····                              | 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)                                    |
| 连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····                                    | 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)                                        |
| 改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····                             | 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志刚 (4282)                                     |
| 不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····                             | 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)                           |
| 水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····                    | 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)                                              |
| 外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····                     | 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)                              |
| 不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····                         | 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)            |
| 基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····                  | 庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)                             |
| 汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····                           | 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)                                        |
| 岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····                                | 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)                                          |
| 戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····                           | 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)                                      |
| 长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····                               | 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)                                 |
| 秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N <sub>2</sub> O 排放的影响·····        | 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)                   |
| 聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····                                   | 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)                                              |
| 微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····                                     | 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)                                         |
| 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····                             | 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)                                                |
| 《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107) |                                                                        |

# 基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响

庞发虎<sup>1,2</sup>, 李晓琦<sup>2</sup>, 段莉阳<sup>2</sup>, 陈彦<sup>2</sup>, 姬明飞<sup>1</sup>, 张浩<sup>1,2</sup>, 韩辉<sup>1,2</sup>, 陈兆进<sup>1\*</sup>

(1. 南阳师范学院水资源与环境工程学院, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南省南水北调中线水源区流域生态安全国际联合实验室, 南阳 473061; 2. 南阳师范学院生命科学与农业工程学院, 南阳 473061)

**摘要:** 重金属污染会影响微生物组成和群落结构, 其与微生物的相互关系一直是重金属污染生态研究的热点. 河南省新乡市是中国著名的电池生产城市, 因电池生产废水灌溉造成严重的土壤重金属污染. 目前有关新乡市长期灌溉电池废水造成的重金属污染对微生物群落组成和代谢功能的影响鲜见报道. 采集了新乡市某长期生产电池厂旁 3 个重金属污染位点, 重金属含量测定表明 Cd 和 Pb 超过相关标准, 分别超标 34 ~ 66 倍和 1.5 ~ 2.32 倍. 采用高通量测序分析了细菌和真菌群落组成, 结果表明细菌由芽孢杆菌属、节杆菌属、鞘氨醇单胞菌属和类诺卡氏菌属等优势属, 真菌由油壶菌属、小不整球壳属、*Gibellulopsis* 和被孢霉属等优势属组成, 表明经过长期的重金属胁迫, 新乡长期重金属污染土壤富含重金属抗性细菌和真菌. 环境因子和微生物群落相关性分析表明, 总量 Cu、DTPA 提取态 Cu 和水溶态 Pb 显著影响细菌群落组成, 总量 Cd、Ni、Pb、Zn、DTPA 提取态 Cu 和水溶态 Pb 显著影响真菌群落组成. 目前, 关于重金属污染对微生物群落代谢影响的研究较少, 采用非靶向代谢组学分析表明, 不同位点间代谢产物具有差异. 通路富集分析表明, 这些差异代谢物涉及代谢过程、环境信息处理和翻译等遗传信息加工等, 在微生物缓解重金属导致的胁迫和环境适应中可能起到作用.

**关键词:** 新乡市; 重金属污染; 微生物群落和功能; 高通量测序; 代谢组学

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4333-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110024

## High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function

PANG Fa-hu<sup>1,2</sup>, LI Xiao-qi<sup>2</sup>, DUAN Li-yang<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, JI Ming-fei<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, HAN Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Zhao-jin<sup>1\*</sup>

(1. International Joint Laboratory of Watershed Ecological Security and Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Middle Route Project of South-North Water Diversion in Henan Province, School of Water Resources and Environmental Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China; 2. School of Life Science and Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**Abstract:** Heavy metal contamination affects microbial composition and diversity. The interaction between heavy metal contamination and soil microorganisms has been a hot topic in ecological research. Battery manufacturing has been going on for over six decades in Xinxiang City, resulting in severe soil heavy metal contamination due to battery wastewater runoff. Few studies have investigated the effect of heavy metal contamination due to long-term battery wastewater runoff on microbial diversity and metabolomics in Xinxiang City. In this study, we collected samples from three heavy metal contaminated sites in Xinxiang City and found that Cd and Pb exceeded the recommended thresholds by 34-66 fold and 1.5-2.32 fold, respectively. High-throughput sequencing showed that *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Sphingomonas*, and *Streptomyces* were the dominant bacteria genera, while *Olpidium*, *Plectosphaerella*, and *Gibellulopsis* were the dominant fungi genera, indicating that heavy metal contaminated soil in Xinxiang City was rich in heavy metal tolerant bacteria and fungi due to the long-term heavy metal stress. Correlation analysis showed that total Cu, DTPA extract Cu, and water soluble Pb were significant factors in bacterial diversity, while total Cd, total Ni, total Pb, total Zn, DTPA extract Cu, and water soluble Pb were significant factors in fungal diversity. To better understand the effect of heavy metal contamination on the metabolism of soil microorganisms, we conducted non-targeted metabolomic profiling, which showed significant differences in metabolites across the samples. Pathway enrichment analysis showed that these differential metabolites were involved in pathways such as metabolism, environmental information processing, and genetic Information Processing, which may play a role in heavy metal stress mitigation and environmental adaptation.

**Key words:** Xinxiang City; heavy metal contamination; microbial community and function; high-throughput sequencing; non-targeted metabolomic

土壤重金属污染已成为危害全球环境质量以及人类生存和发展的主要问题之一. 由于金属冶炼、矿山开采和重金属废水灌溉等原因, 中国受重金属污染耕地面积约占全部耕地的 1/5, 严重影响粮食安全<sup>[1]</sup>. 重金属一旦进入土壤环境中就会慢慢积累, 会影响微生物组成和群落结构等土壤生态系统. 受到重金属污染的土壤, 往往富集多种耐重金属的微生物, Pacwa-Płociniczak 等<sup>[2]</sup>的研究表明 150 a 以上污染的白玉草 (*Silene vulgaris*) 根际 Cd 抗性细菌

数量随污染程度增加而增加. 开展从微生物群落结构及多样性、均匀性方面揭示土壤功能的研究, 能深刻阐明土壤微生物对重金属胁迫的敏感程度及其变化趋势, 为改进土壤微生物修复重金属污染技术提供理论依据. 目前, 高通量测序技术因其高覆盖

收稿日期: 2021-10-06; 修订日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2004145, 41601332)

作者简介: 庞发虎 (1975 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: pangfahu@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhaojin\_chen@163.com

度、高灵敏度、高准确性和低成本等特点,在重金属污染土壤微生物群落组成、影响因素等研究中得到广泛的应用<sup>[3~6]</sup>. 代谢组学(metabolomics)是对生物体代谢产物进行定性定量分析的一门学科,通过对生物体产生的代谢物进行分析可以揭示生命活动的现象和过程. 微生物在重金属污染的环境中通过调节其代谢活动,不仅使其在此环境中生存,还可协助降低环境污染. 目前,对重金属污染土壤中群落微生物代谢物的研究开展较少<sup>[7]</sup>. Wang 等<sup>[8]</sup>的研究采用高通量测序结合代谢组学,分析 Cd 污染土壤盐胁迫对微生物群落组成和代谢产物的影响,结果表明盐胁迫降低土壤细菌、真菌多样性和改变其群落组成,同时使土壤微生物代谢产物发生改变.

河南省新乡市是中国著名的轻工业城市,被誉为“中国电池工业之都”. 电池企业众多,企业排放的电池废水造成的土壤重金属污染问题较为突出. 研究者对新乡市电池废水灌溉造成的土壤和农作物重金属污染进行了研究,其周边耕地土壤均受到不同程度的 Cd、Ni、Zn 和 Cu 等的污染,这些区域已成为农产品安全生产的高风险区<sup>[9~12]</sup>. 目前有关新乡长期灌溉电池废水造成的重金属污染对土壤微生物群落组成和代谢功能影响鲜见报道<sup>[13]</sup>. 因此,本文以新乡市某电池厂周边长期污染农田为研究对象,采用高通量测序结合代谢组学的方法,研究微生物群落组成、影响因素和代谢特征,揭示土壤微生物对电池废水灌溉污染的响应和适应性.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集和理化性质、重金属含量测定

根据文献资料,以河南省新乡市郊区某电池厂为中心,沿旁边河流根据距离远近,设置 3 个采样点,位点 A(电池厂外河边农田土壤)、位点 B(电池厂 2 km 外河边农田土壤)和位点 C(电池厂 4 km 外河边农田土壤). 于 2019 年 10 月采用五点采样法采集土壤,每样品设置 6 个生物学重复. 将收集的土壤样品置于预先灭菌容器中存于冰盒,运回实验室用于后续高通量测序和代谢组分析,剩余土壤样品用于理化指标测定. 对收集土壤样品测定基本理化性质,包括 pH 值、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)和硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、有效磷(AP)、速效钾(AK)和有机碳(SOC),具体步骤参考文献<sup>[14]</sup>. 采用欧盟 DIN 38414-S4(1984)标准提取过程提取水溶性重金属,用二乙基三胺五乙酸(diethylenetriaminepentaacetic acid, DTPA)提取土壤有效态重金属,土壤消解液、水溶性重金属浸提液和 DTPA 浸提液采用电感耦合等离子体发射光谱检

测土壤镉(Cd)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)和铅(Pb)这 5 种重金属元素含量.

### 1.2 土壤总 DNA 提取和高通量测序

采用 FastDNA<sup>®</sup> Spin Kit for Soil 试剂盒(MP Biomedicals, USA)提取土壤微生物总 DNA,采用细菌通用引物 338F/806R 和真菌通用引物 ITS1F/ITS2R 对细菌和真菌进行 PCR 扩增,扩增体系参照 Chen 等<sup>[15]</sup>,测定浓度和纯度后送上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序 MiSeq PE300 (Illumina Inc, San Diego, CA, USA).

### 1.3 高通量数据分析

将 Illumina MiSeq 测序得到的下机数据(Raw Data)经处理后得到 Tags 序列,与数据库(Gold database)进行比对,检测嵌合体序列,并最终去除其中的嵌合体序列,得到最终的有效数据(Effective Tags). 采用 QHME(quantitative insights into microbial ecology)进行生物信息学分析,根据序列的相似度,将序列归为多个 OTU(operational taxonomic unit). 为了得到每个 OTU 对应的物种分类信息,采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析,并在各个分类水平统计每个样品的群落组成.

### 1.4 代谢组分析

准确称取 1 g 土壤样品,加入 20  $\mu\text{L}$  内标和 1 mL 50% 甲醇溶液,研磨、涡旋振荡、离心取上清液,用 0.22  $\mu\text{m}$  的有机相针孔过滤器过滤,  $-80^\circ\text{C}$  下保存,用于后续分析. 非靶向代谢组分析采用 Agilent 7890B Infinity 气相色谱仪偶联 Agilent 5977A 气质联用仪进行测定,测定条件参照文献<sup>[16]</sup>. 采用主成分分析(principal component analysis, PCA)来观测所有样品代谢物的聚类模式以及组内样品的重复性. 采用成对的正交偏最小二乘分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)来提高组间的区分程度并筛选代谢标志物,筛选 VIP 值  $>1$ 、 $P < 0.05$  的代谢物作为组间比较的差异代谢物. 采用数据库 METLIN (<https://metlin.scripps.edu/>)和 HMDB (<http://www.hmdb.ca/>)进行差异代谢物的鉴定.

### 1.5 数据处理

土壤理化性质和重金属含量、高通量测序结果等数据分析在 SPSS 17.0 中进行,组间差异性检验采用  $t$  检验和单因素方差分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 理化性质和重金属含量

表 1 所示为电池厂周边污染土壤样品的特性及



重金属含量测试结果,结果表明土壤样品 pH 值介于 8.02 ~ 8.16 之间. 不同位点 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 有所差异,但未达到显著水平. 位点 A 的 TP、AP 和 SOC 均高于位点 B 和 C. 对土壤中 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 5 种重金属含量进行了测定, ω[ 总量 Cd, (T-Cd) ] 介于 27.35 ~ 53.06 mg·kg<sup>-1</sup>, ω[ 总量 Cu, (T-Cu) ] 介于 43.18 ~ 86.21 mg·kg<sup>-1</sup>, ω[ 总量 Ni, (T-Ni) ] 介于 59.01 ~ 93.79 mg·kg<sup>-1</sup>, ω[ 总量 Pb, (T-Pb) ] 介于 258.38 ~ 394.17 mg·kg<sup>-1</sup>,

ω[ 总量 Zn, (T-Zn) ] 介于 72.78 ~ 115.23 mg·kg<sup>-1</sup>, 重金属含量的趋势为位点 A 高于位点 B 高于位点 C. 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)的规定,Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的风险筛选值分别为 0.8、100、190、170 和 300 mg·kg<sup>-1</sup>. Cd 和 Pb 超过相关标准,分别超标 34 ~ 66 倍和 1.5 ~ 2.32 倍,表明主要为 Cd 和 Pb 污染. 对土壤 DTPA 提取态和水溶态重金属进行了测定,结果如表 1 所示.

表 1 土壤主要理化性质和重金属含量<sup>1)</sup>

Table 1 Main chemical characteristics and heavy metal contents of soil samples

| 土壤理化性质                                                  | 位点 A            | 位点 B            | 位点 C             |
|---------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| pH 值                                                    | 8.16 ± 0.14ab   | 8.25 ± 0.1b     | 8.02 ± 0.24a     |
| ω(TN)/ g·kg <sup>-1</sup>                               | 1.64 ± 0.45     | 1.16 ± 0.45     | 1.67 ± 0.84      |
| ω(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)/ mg·kg <sup>-1</sup> | 1.80 ± 0.32     | 1.74 ± 0.31     | 1.79 ± 0.35      |
| ω(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)/ mg·kg <sup>-1</sup> | 10.35 ± 0.36    | 12.56 ± 0.48    | 11.67 ± 0.43     |
| ω(TP)/ mg·kg <sup>-1</sup>                              | 317.14 ± 36.11b | 211.82 ± 42.6a  | 258.86 ± 60.27ab |
| ω(AP)/ mg·kg <sup>-1</sup>                              | 19.52 ± 6.08b   | 6.88 ± 4.16a    | 10.17 ± 4.45a    |
| ω(TK)/ g·kg <sup>-1</sup>                               | 2.71 ± 0.59a    | 1.59 ± 0.32b    | 3.17 ± 0.58a     |
| ω(SOC)/ g·kg <sup>-1</sup>                              | 24.35 ± 2.31b   | 14.48 ± 2.43a   | 22.05 ± 3.68b    |
| ω(T-Cd)/ mg·kg <sup>-1</sup>                            | 53.06 ± 9.66a   | 30.05 ± 7.33b   | 27.35 ± 5.88b    |
| ω(T-Cu)/ mg·kg <sup>-1</sup>                            | 74.35 ± 15.54b  | 43.18 ± 15.06a  | 86.21 ± 38.11b   |
| ω(T-Ni)/mg·kg <sup>-1</sup>                             | 93.79 ± 12.26b  | 63.28 ± 11.29a  | 59.01 ± 22.17a   |
| ω(T-Pb)/mg·kg <sup>-1</sup>                             | 394.17 ± 47.46b | 273.97 ± 46.89a | 258.38 ± 85.77a  |
| ω(T-Zn)/mg·kg <sup>-1</sup>                             | 115.23 ± 23.84b | 72.78 ± 8.64a   | 74.91 ± 13.85a   |
| ω[ DTPA 提取态 Cd (DTPA-Cd) ]/mg·kg <sup>-1</sup>          | 3.09 ± 1.55b    | 1.31 ± 0.45a    | 2.91 ± 0.93b     |
| ω[ DTPA 提取态 Cu (DTPA-Cu) ]/mg·kg <sup>-1</sup>          | 2.91 ± 1.9a     | 5.76 ± 1.86a    | 2.68 ± 0.91b     |
| ω[ DTPA 提取态 Ni (DTPA-Ni) ]/mg·kg <sup>-1</sup>          | 1.31 ± 1.64     | 1.66 ± 0.69     | 1.79 ± 0.48      |
| ω[ DTPA 提取态 Pb (DTPA-Pb) ]/mg·kg <sup>-1</sup>          | 14.1 ± 3.95b    | 9.37 ± 3.19a    | 12.59 ± 2.97ab   |
| ω[ DTPA 提取态 Zn (DTPA-Zn) ]/mg·kg <sup>-1</sup>          | 5.32 ± 5.23     | 4.58 ± 2.04     | 6.69 ± 2         |
| ω[ 水溶态 Cd (W-Cd) ]/mg·kg <sup>-1</sup>                  | 0.15 ± 0.03ab   | 0.12 ± 0.04a    | 0.17 ± 0.01b     |
| ω[ 水溶态 Cu (W-Cu) ]/mg·kg <sup>-1</sup>                  | 1.44 ± 0.36b    | 0.71 ± 0.28a    | 1.09 ± 0.26b     |
| ω[ 水溶态 Ni (W-Ni) ]/mg·kg <sup>-1</sup>                  | 0.16 ± 0.05a    | 0.98 ± 1.07b    | 0.34 ± 0.02ab    |
| ω[ 水溶态 Pb (W-Pb) ]/mg·kg <sup>-1</sup>                  | 0.66 ± 0.17a    | 0.84 ± 0.47a    | 1.23 ± 0.09b     |
| ω[ 水溶态 Zn (W-Zn) ]/mg·kg <sup>-1</sup>                  | 0.22 ± 0.14b    | 0.10 ± 0.03a    | 0.11 ± 0.01a     |

1) 数据为平均数 ± 标准差,同一行不同小写字母表示处理在 P < 0.05 水平达到显著

2.2 微生物群落组成

高通量测序结果表明,位点 A、B 和 C 土壤样品细菌由 40 个门和 946 个属的细菌组成,门水平上:变形菌门(Proteobacteria, 占比 18.72% ~ 23.72%,下同)、放线菌门(Actinobacteria, 21.46% ~ 26.80%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 15.03% ~ 22.78%)、酸杆菌门(Acidobacteria, 9.20% ~ 12.60%)和厚壁菌门(Firmicutes, 6.76% ~ 10.20%)为优势菌门;属的水平上:芽孢杆菌属(Bacillus)、节杆菌属(Arthrobacter)、类诺卡氏菌属(Nocardioidees)、鞘氨醇单胞菌属(Sphingomonas)、盖勒氏菌属(Gaiella)和红色杆菌属(Rubrobacter)等 15 个优势属占全部序列的 19.43% ~ 22.04% (图 1). 真菌群落分析表明由 15 个门和 343 个属组成,其中:油壶菌门(Olpidiomycota)、子囊菌门

(Ascomycota)和被孢菌门(Mortierellomycota)占全部序列的 91.28% ~ 95.72%. 属水平上:油壶菌属(Olpidium)、小不整球壳属(Plectosphaerella)、Gibellulopsis 属、毛壳菌属(Chaetomium)、头梗霉属(Cephalophora)、Lophotrichus 属和 Paramyrothecium 属等 19 个优势属占全部序列的 51.45% ~ 70.42% (图 2).

采用实时荧光定量 PCR 对土壤细菌和真菌丰度进行测定,位点 A、B 和 C 土壤细菌丰度分别为 1.28 × 10<sup>9</sup>、5.73 × 10<sup>8</sup> 和 4.07 × 10<sup>8</sup> 拷贝数·g<sup>-1</sup> (以土壤计,下同),真菌丰度分别为 3.03 × 10<sup>8</sup>、1.45 × 10<sup>8</sup> 和 2.18 × 10<sup>8</sup> 拷贝数·g<sup>-1</sup>,均呈现位点 A 显著高于位点 B 和 C 的趋势.

为了比较不同采样点间群落结构的差异性,采用主坐标分析(PCoA)进行分析,结果如图 3 所示.

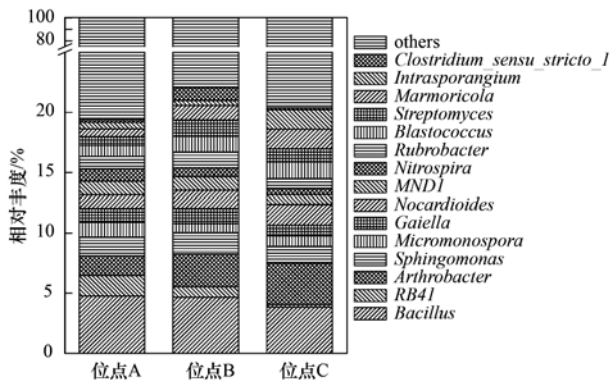


图 1 属水平上细菌相对丰度分布

Fig. 1 Relative abundance of sequences at the genus level of bacterial communities

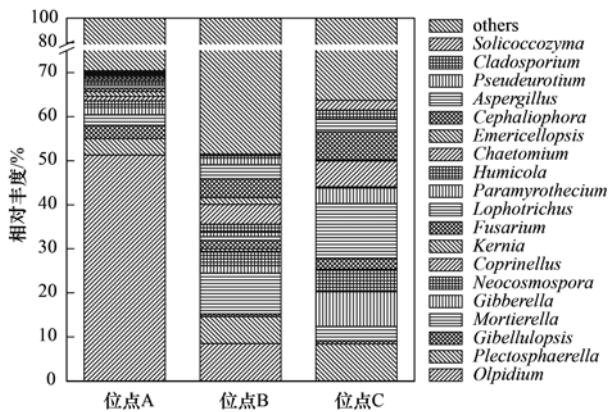


图 2 属水平上真菌相对丰度分布

Fig. 2 Relative abundance of sequences at the genus level of fungal communities

细菌群落的 PCoA 分析中位点 A 分布于左下部、位点 B 分布于上部和位点 C 分布于右侧 (图 3). 与之相似, 位点 A、B 和 C 的真菌群落通过 PCoA 相互分开, 分别位于左上部、右下部和右上角 (图 4). 采用相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM) 以及 Adonis 分析对数数据进行组间差异分析, 结果表明位点 A、B 和 C 的细菌和真菌群落之间差异均达到极

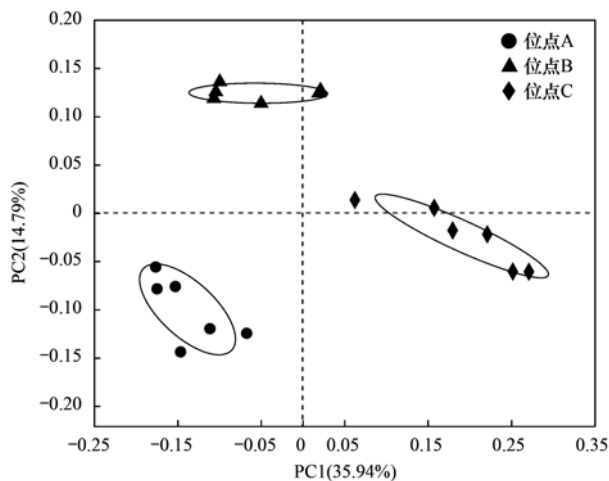


图 3 不同样品细菌群落组成的 PCoA 分析

Fig. 3 PCoA results of bacterial community diversity

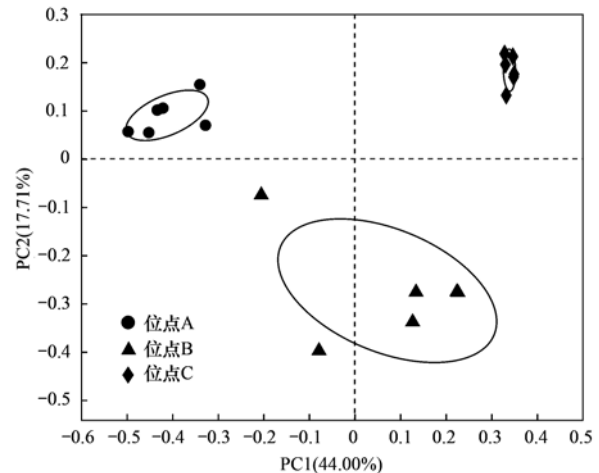


图 4 不同样品真菌群落组成的 PCoA 分析

Fig. 4 PCoA results of fungal community diversity

显著水平 ( $P < 0.01$ ).

### 2.3 影响因素分析

利用 Canoco 4.5 软件对细菌群落与环境因子进行了 RDA 分析. RDA 分析得到的前两个轴分别解释了总体变化的 35.19% 和 10.29%, 总共解释了 45.48% (图 5). RDA 分析结果表明 TK ( $R = 0.6932$ ,  $P = 0.001$ )、T-Cu ( $R = 0.7509$ ,  $P = 0.021$ )、DTPA-Cu ( $R = 0.9997$ ,  $P = 0.001$ ) 和 W-Pb ( $R = 0.9465$ ,  $P = 0.006$ ) 与第 1 排序轴显著正相关, pH 值 ( $R = -0.8773$ ,  $P = 0.023$ ) 与第 1 排序轴显著负相关, 这些环境因子是影响细菌群落组成的主要因素 (图 5). 通过斯皮尔曼相关性分析这些显著影响细菌群落组成的环境因子与细菌丰度前 30 的属的相关性, 结果表明 DTPA-Cu 和 TK 与细菌相关性分析结果较为相似, 与间孢囊菌属 (*Intrasporangium*)、*norank* JG30-KF-CM45 和 *norank* AKYG1722 均显著正相关, 与 *Gaiella*、*norank* Gemmatimonadaceae、*norank* MB-A2-108、MND1 和

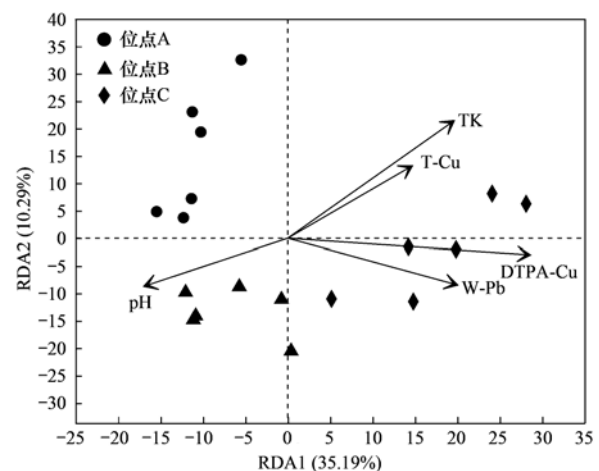


图 5 细菌群落与环境因子的 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of bacterial communities and physicochemical characteristics of soil

微枝形杆菌属 (*Microvirga*) 均显著负相关 ( $P < 0.05$ )。DTPA-Pb 与链霉菌属 (*Streptomyces*)、*Solirubrobacter* 和 *norank Microtrichales* 显著负相关, 与 *norank TK10* 显著正相关。T-Cu 与小单孢菌属 (*Micromonospora*) 显著正相关, 与红色杆菌属 (*Rubrobacter*) 和 *norank MB-A2-108* 显著负相关。

真菌群落与环境因子的 CCA 分析如图 6 所示, 前两个轴分别解释了总体变化的 19.61% 和 11.33%, 总共解释了 30.94%。CCA 分析结果表明 AP ( $R = -0.8982$ ,  $P = 0.005$ )、T-Cd ( $R = -0.9797$ ,  $P = 0.001$ )、T-Ni ( $R = -0.9941$ ,  $P = 0.003$ )、T-Pb ( $R = -0.9935$ ,  $P = 0.003$ ) 和 T-Zn ( $R = -0.9634$ ,  $P = 0.002$ ) 与第 1 排序轴显著负相关, DTPA-Cu ( $R = 0.860$ ,  $P = 0.001$ ) 和 W-Pb ( $R = 0.9999$ ,  $P = 0.021$ ) 与第 1 排序轴显著正相关, 这些环境因子是影响真菌群落组成的主要因素 (图 6)。通过斯皮尔曼相关性分析这些环境因子与真菌丰度前 30 的属的相关性, 结果表明 DTPA-Cu 和 W-Pb 与其他环境因子对真菌群落的影响成相反的趋势。头梗霉属 (*Cephalophora*)、毛壳菌属 (*Chaetomium*)、*Paramyrothecium*、*Albifimbria*、枝孢属 (*Cladosporium*) 和棒孢属 (*Corynespora*) 与 T-Cd、T-Pb、T-Zn 和 T-Ni 显著负相关的同时与 DTPA-Cu 显著正相关, 赤霉属 (*Gibberella*) 和链格孢属 (*Alternaria*) 与总量 Cd、Pb、Zn、Ni 显著负相关的同时与 DTPA 提取态 Cu、W-Pb 显著正相关。镰孢菌属 (*Fusarium*)、*Solicoccozyma*、*Lophotrichus* 和油壶菌属与 T-Cd、T-Pb、T-Zn 和 T-Ni 显著正相关的同时与 DTPA-Cu 显著负相关。

## 2.4 代谢组学分析

根据模式识别模型的 VIP 值筛选潜在标志物,

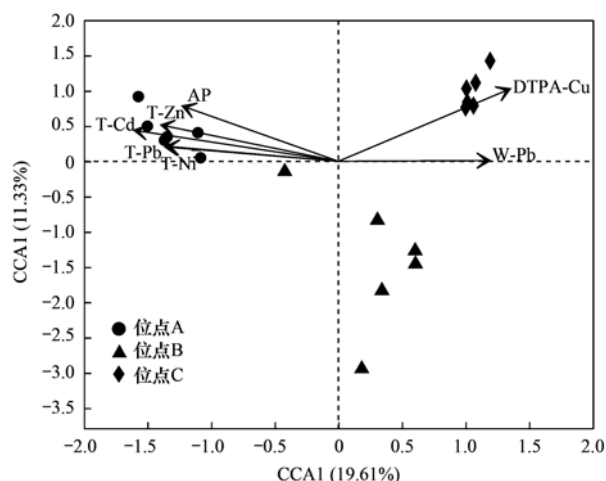


图 6 真菌群落与环境因子的 CCA 分析

Fig. 6 CCA analysis of fungal communities and physicochemical characteristics of soil

通过分析不同样品的组成可以反映样品间的差异和距离, PCA 运用方差分解, 将多组数据的差异反映在二维坐标图上, 坐标轴为能够最大程度反映方差的两个特征值。土壤阳离子和阴离子代谢物 PCA 得分如图 7 和图 8 所示, 其中相同分组的点以椭圆标出, 位点 A 分布于右上部、位点 B 分布于右下部、位点 C 分布于左侧, 样本组之间的代谢产物具有差异。

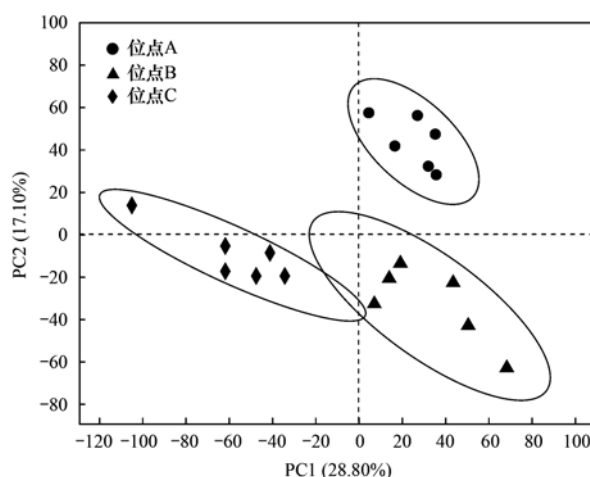


图 7 土壤阳离子代谢物 PCA 分析

Fig. 7 PCA score chart of soil cation metabolites

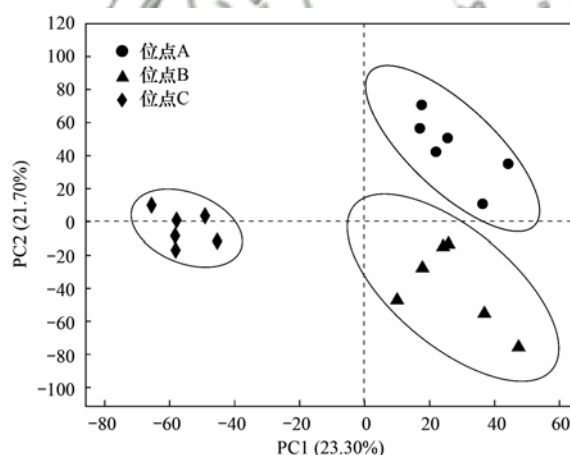


图 8 土壤阴离子代谢物 PCA 分析

Fig. 8 PCA score chart of soil anion metabolites

在位点 A、B 和 C 土壤样品中共检测到 7 615 种代谢物, 筛选其中 VIP > 1 和 T 检验  $P < 0.05$  的代谢物作为差异代谢物。结果表明位点 A 与位点 B 有 245 种差异代谢物, 主要为 2-Methyl-5-(1-propenyl) pyrazine、7-Methoxyflavone 和 (S)-2-Aceto-2-hydroxybutanoic acid 等。位点 A 与位点 B 相比, 代谢产物上调的有 102 种, 下调的有 143 种。位点 A 与位点 C 有 285 种差异代谢物, 主要为 Cinnacsiol D1 glucoside、Armillane、Ganoderiol I 和 Hydroxyhomodestruxin B 等, 位点 A 与位点 C 相比, 代谢产物上调的有 104 种, 下调的有 181 种。位点



B 与位点 C 有 242 种差异代谢物,主要为 2-Methyl-5-(1-propenyl)pyrazine、Heliocide H3 和 8-Hydroxy-2-methoxy-6-methyl-1,4-naphthoquinone 等,位点 B 与位点 C 相比,代谢产物上调的有 104 种,下调的有 138 种.

通路富集分析表明,这些差异代谢物参与氨基酸代谢 (amino acid metabolism)、脂质代谢 (lipid metabolism)、核酸代谢 (nucleotide metabolism)、次级代谢产物生物合成 (biosynthesis of other secondary metabolites) 和化学结构转化 (chemical structure transformation maps) 等代谢过程,消化系统 (digestive system)、神经系统 (nervous system) 和内分泌系统 (endocrine system) 等生物体系统 (organismal

systems) 过程,信号转导 (signal transduction) 等环境信息处理 (environmental information processing),翻译等遗传信息加工 (genetic information processing) 过程.位点 A 与位点 B 显著差异的代谢通路为 27 个,位点 A 与位点 C 显著差异的代谢通路为 26 个,位点 B 与位点 C 显著差异的代谢通路为 13 个(图 9). 其中代谢过程的苯丙素类化合物生物合成 (biosynthesis of phenylpropanoids)、植物激素生物合成 (biosynthesis of plant hormones)、嘧啶代谢 (pyrimidine metabolism)、阿特拉津降解 (atrazine degradation) 和生物体系统 (organismal Systems) 的矿物吸收 (mineral absorption) 等 14 个代谢通路在 2 组以上样品中显示差异 (图 9).

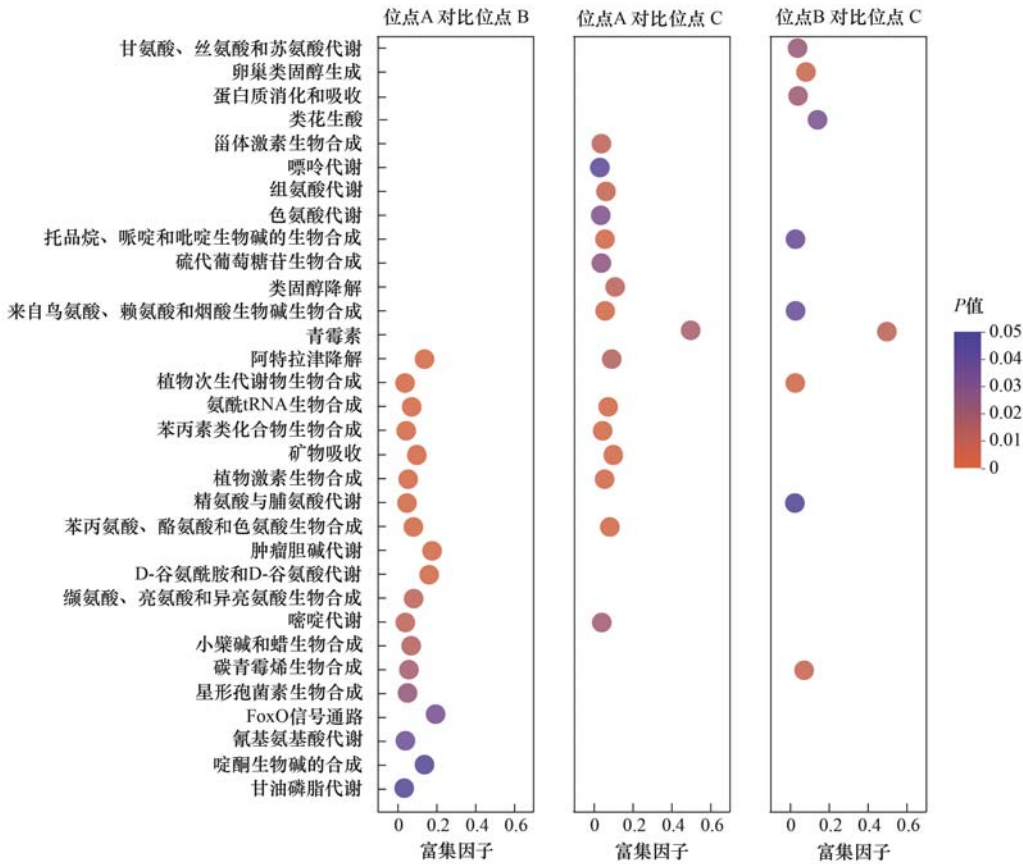


图 9 不同位点间显著差异代谢通路统计

Fig. 9 Significantly differential metabolic pathways identified between samples

3 讨论

微生物对环境扰动(污染)十分敏感,不同种类微生物对环境扰动的敏感程度不同,因此重金属污染可能引起微生物的种类组成和丰度发生明显变化.之前很多研究已经表明长期重金属污染胁迫会改变土壤细菌群落结构组成,重金属耐性细菌相对数量和种类增加,成为重金属污染环境中的优势种群<sup>[2,17]</sup>.为了探究新乡长期重金属污染土壤细菌群落组成及其影响因素,采用高通量测序的方法分析

细菌群落组成,发现优势种群为变形菌门、放线菌门和绿弯菌门等优势菌门,芽孢杆菌属、节杆菌属和类诺卡氏菌属等为优势属(图 1),这些优势种群也广泛存在于 Li 等<sup>[18]</sup>、Luo 等<sup>[19]</sup>和 Ren 等<sup>[20]</sup>研究的重金属污染土壤中,表明经过长期的重金属胁迫,新乡重金属污染土壤富含重金属抗性的细菌.其中优势属芽孢杆菌属<sup>[21]</sup>、节杆菌属<sup>[22]</sup>、鞘氨醇单胞菌属<sup>[23]</sup>、链霉菌属<sup>[24]</sup>和 *Intrasporangium*<sup>[25]</sup>是已报道具有生物固定、转化和吸附等能力,能影响土壤重金属的毒性及其迁移与释放,提高或者降低作物



对重金属积累的细菌种群,是后续新乡重金属污染土壤生物修复的良好菌种资源. 通过对位点 A、B 和 C 的细菌群落多样性指数和主坐标分析( PCoA) 可以发现,位点之间细菌群落差异显著. 土壤中重金属的生物活性不仅取决于总量,在很大程度上更加取决于重金属的形态<sup>[26~28]</sup>. 本实验采用 DTPA 和水作为浸提剂分析了土壤重金属有效形态含量,采用 RDA 进一步分析影响群落的因素,发现 T-Cu 与 DTPA-Cu 对细菌群落组成是一致的,能显著影响细菌群落组成. 同时 DTPA-Cu 和 W-Pb 对细菌群落组成影响也较为相似,表现为 RDA 分析图中箭头方向一致和夹角较小(图 5). 这与 Sullivan 等<sup>[29]</sup> 研究表明的提取态重金属(Zn 和 Cu)是影响纽约州西部厄尔巴岛腐殖质土细菌群落组成的主要因素相一致. 同时,与其他报道类似,环境因子(TK 和 pH 值)也是影响新乡重金属污染土壤细菌群落的显著因素<sup>[30]</sup>.

与细菌群落组成类似,真菌优势门油壶菌门、子囊菌门和被孢菌门,优势属油壶菌属、小不整球壳属和 *Gibellulopsis* 属等也是其他重金属污染土壤中真菌的主要组成,表明这些种群是重金属抗性的真菌类型. 其中优势属毛壳菌属<sup>[31]</sup>、*Neocosmospora*<sup>[32]</sup> 和 *Mortierella*<sup>[33]</sup> 能影响重金属的生物地球化学循环,从而影响污染土壤中植物对重金属的富集. 一般认为不同类群的微生物中原核生物(细菌、放线菌)比真核生物(真菌)对重金属更敏感<sup>[34]</sup>. 本实验中不同位点之间真菌群落组成差异显著高于细菌,油壶菌门和油壶菌属在不同样品中丰度也达到极显著差异,同时真菌在 PCoA 分析图中位点更为分散. 油壶菌门和油壶菌属是许多高等植物根部的专性寄生菌,一般在土壤中真菌占比不是很高. Babin 等<sup>[35]</sup> 研究不同耕作方式和施肥强度等农业管理措施对生菜根际真菌群落差异发现,氮肥处理组油壶菌属占比介于 81.5%~97.0%,极显著高于对照的 0.90%~25.2%,表明油壶菌属是生菜根际农业管理的重要指标. 油壶菌属与理化性质相关性分析表明其与 AP 显著正相关,位点 A 中占比较高可能也与该采位点之前土壤中的管理措施有关. 同时总量重金属(T-Cd、T-Ni、T-Pb 和 T-Zn)与油壶菌属显著正相关,有效态重金属中 DTPA-Cu 和 W-Pb 与油壶菌属显著负相关,表明油壶菌属受到重金属形态的显著影响. 真菌群落组成对重金属的响应与细菌有所差异,总量重金属(T-Cd、T-Ni、T-Pb 和 T-Zn)是影响真菌的重要因素,这与 Lin 等<sup>[36]</sup> 的优势种群与土壤重金属显著相关的研究类似. 有效态重金属中 DTPA-Cu 和 W-Pb 也能显著影响真菌

群落组成,但影响的趋势与总量重金属(T-Cd、T-Ni、T-Pb 和 T-Zn)相反.

利用代谢组学技术研究微生物对重金属胁迫应答过程中代谢物的变化情况,以及从代谢水平途径上阐明微生物响应重金属胁迫的机制研究已逐渐受到广大学者的关注<sup>[37,38]</sup>. Tian 等<sup>[16]</sup> 采用代谢组学分析了重金属污染土壤中小白菜根际代谢产物,发现施用二氧化硅纳米材料虽然对小白菜生长影响较小,但能显著增加糖和糖醇、脂肪酸和其他小分子有机酸等代谢产物,增加的比例为 1.3~66.9 倍. 与之类似,本研究通过代谢组学分析表明,不同样品之间代谢产物有明显差异,对这些代谢产物通路富集分析表明最为主要的是代谢途径. 微生物在重金属胁迫下会增加体内的代谢活动,并分泌多种代谢物,有助于减少重金属对微生物的毒性. 差异代谢途径主要有氨基酸代谢、脂质代谢、核酸代谢等. 氨基酸代谢中精氨酸和脯氨酸代谢(arginine and proline metabolism)和组氨酸代谢(histidine metabolism)在位点之间差异显著,精氨酸和脯氨酸代谢能产生相关的渗透调节物质,缓解 Cd 胁迫导致的渗透失衡<sup>[39]</sup>. Pearce 等<sup>[40]</sup> 的研究表明,组氨酸代谢是酵母菌 *Saccharomyces cerevisiae* 缓解 Cu、Co 和 Ni 的重要途径. 重金属污染物通过多种途径在体内诱发产生大量的自由基代谢物和活性氧,从而激发脂质过氧化,最终导致细胞的损伤<sup>[41]</sup>. 膜代谢中甾体激素生物合成(steroid hormone biosynthesis)、小檗碱和蜡生物合成(cutin, suberine and wax biosynthesis)和甘油磷脂代谢(glycerophospholipid metabolism)在位点之间差异显著,研究表明它们在缓解生物和非生物胁迫过程中起到重要作用. Kanwar 等<sup>[42]</sup> 的研究表明甾体激素作为一类次级代谢产物,在缓解重金属导致的氧化胁迫起到作用. 膜代谢中甾体激素生物合成是膜的成分,因此在缓解环境胁迫导致的压力时具有功能<sup>[43]</sup>. Zhang 等<sup>[44]</sup> 采用非靶向代谢组学分析了灵芝(*Ganoderma lucidum*)不同 Cd 胁迫条件下的代谢产物,发现灵芝能富集甘油磷脂代谢产物,从而缓解 Cd 的胁迫压力. 合成的植物激素类次级代谢产物能促进植物的生长,并增强植物对外界逆境的抗性,根系通过分泌物分泌到土壤中<sup>[45,46]</sup>,植物激素生物合成、植物次生代谢物生物合成在位点之间显著差异. 硫代葡萄糖苷(glucosinolate)作为富含 S 的次级代谢产物,在遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)和拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)缓解重金属导致的胁迫中起到作用<sup>[47,48]</sup>,在位点 A 和 C 中差异显著. 以上代谢产物可能在微生物缓解重金属导致的胁迫和环境适应中起到作用.

## 4 结论

(1) 新乡市某长期生产电池厂旁 3 个采位点重金属含量测定表明,  $\omega(\text{T-Cd})$  介于 27.35 ~ 53.06  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $\omega(\text{T-Pb})$  介于 258.38 ~ 394.17  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别超过相关标准 34 ~ 66 倍和 1.5 ~ 2.32 倍。

(2) 高通量测序结果表明, 采位点的细菌由变形菌门、放线菌门和绿弯菌门等优势菌门, 芽孢杆菌属、节杆菌属和类诺卡氏菌属等优势属组成, 真菌由油壶菌门、子囊菌门和被孢菌门等优势门, 油壶菌属、小不整球壳属和 *Gibellulopsis* 属等优势属组成。

(3) 细菌群落与环境因子进行了 RDA 分析表明, T-Cu、DTPA-Cu 和 W-Pb 显著影响细菌群落组成, 真菌群落与环境因子的 CCA 分析表明 T-Cd、T-Ni、T-Pb、T-Zn、DTPA-Cu、W-Pb 显著影响真菌群落组成。

(4) 代谢组学分析样本组之间的代谢产物具有差异。通路富集分析表明: 这些差异代谢物主要包括氨基酸代谢、脂质代谢等代谢过程; 消化系统、神经系统等生物体系统过程; 信号转导等环境信息处理; 翻译等遗传信息加工过程。

### 参考文献:

- [1] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(2): 153-159.
- [2] Xu J M, Meng J, Liu X M, *et al.* Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 153-159.
- [3] Pacwa-Płociniczak M, Płociniczak T, Yu D, *et al.* Effect of *silene vulgaris* and heavy metal pollution on soil microbial diversity in long-term contaminated soil[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2017, **229**(1), doi: 10.1007/s11270-017-3655-3.
- [4] Chen Z J, Tian W, Li Y J, *et al.* Responses of rhizosphere bacterial communities, their functions and their network interactions to Cd stress under phytostabilization by *Miscanthus* spp. [J]. Environmental Pollution, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117663.
- [5] Liu J, He X X, Lin X R, *et al.* Ecological effects of combined pollution associated with e-waste recycling on the composition and diversity of soil microbial communities [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(11): 6438-6447.
- [6] Chen Y, Jiang Y M, Huang H Y, *et al.* Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments[J]. Science of the Total Environment, 2018, **637-638**: 1400-1412.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 姚雪丹, 付建红, 徐彤, 等. 重金属胁迫下的微生物代谢组学研究进展[J]. 生物资源, 2020, **42**(6): 678-685.
- [10] Yao X D, Fu J H, Xu T, *et al.* Metabolomics of microorganisms in response to heavy metal stress[J]. Biotic Resources, 2020, **42**(6): 678-685.
- [11] Wang M, Zhao S W, Wang L F, *et al.* Salt stress-induced changes in microbial community structures and metabolic processes result in increased soil cadmium availability [J]. Science of the Total Environment, 2021, **782**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147125.
- [12] Jiang Y L, Ma J H, Ruan X L, *et al.* Compound health risk assessment of cumulative heavy metal exposure: a case study of a village near a battery factory in Henan Province, China [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2020, **22**(6): 1408-1422.
- [13] Cheng C, Wang R, Sun L J, *et al.* Cadmium-resistant and arginine decarboxylase-producing endophytic *Sphingomonas* sp. C40 decreases cadmium accumulation in host rice (*Oryza sativa* Ciliangyou 513) [J]. Chemosphere, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130109.
- [14] 姜玉玲, 阮心玲, 马建华. 新乡市某电池厂附近污灌农田重金属污染特征与分类管理[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 645-654.
- [15] Jiang Y L, Ruan X L, Ma J H. Heavy metal pollution and classification management of sewage irrigation farmland around a battery factory in Xinxiang, Henan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 645-654.
- [16] 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 等. 重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5133-5141.
- [17] Wang T J, Su N N, Lei P, *et al.* Community structure of heavy metal immobilized bacteria in the lettuce (*Lactuca sativa* L.) rhizosphere in soil polluted by heavy metals and its effects on reducing heavy metal accumulation in lettuce [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5133-5141.
- [18] 陈兆进, 李英军, 邵洋, 等. 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2889-2897.
- [19] Chen Z J, Li Y J, Shao Y, *et al.* Bacterial community composition in cadmium-contaminated soils in Xinxiang City and its ability to reduce cadmium bioaccumulation in pak choi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2889-2897.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Chen Y, Tian W, Shao Y, *et al.* *Miscanthus* cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGUId analyses [J]. Archives of Microbiology, 2020, **202**(5): 1157-1171.
- [22] Tian L Y, Shen J P, Sun G X, *et al.* Foliar application of SiO<sub>2</sub> nanoparticles alters soil metabolite profiles and microbial community composition in the pakchoi (*Brassica chinensis* L.) rhizosphere grown in contaminated mine soil [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(20): 13137-13146.
- [23] Zampieri B D B, Pinto A B, Schultz L, *et al.* Diversity and distribution of heavy metal-resistant bacteria in polluted sediments of the Araçá Bay, São Sebastião (SP), and the relationship between heavy metals and organic matter concentrations [J]. Microbial Ecology, 2016, **72**(3): 582-594.
- [24] Li X Q, Meng D L, Li J, *et al.* Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal



- contamination[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 908-917.
- [19] Luo L Y, Xie L L, Jin D C, *et al.* Bacterial community response to cadmium contamination of agricultural paddy soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **139**: 100-106.
- [20] Ren X M, Guo S J, Tian W, *et al.* Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated agricultural soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.01455.
- [21] Çolak F, Atar N, Yazıcıoğlu D, *et al.* Biosorption of lead from aqueous solutions by *Bacillus* strains possessing heavy-metal resistance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **173**(2): 422-428.
- [22] Pagnanelli F, Petrangeli Papini M, Trifoni M, *et al.* Biosorption of metal ions on *Arthrobacter* sp.: ? biomass characterization and biosorption modeling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(13): 2773-2778.
- [23] Tangaromsuk J, Pokethitiyook P, Kruatrachue M, *et al.* Cadmium biosorption by *Sphingomonas paucimobilis* biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2002, **85**(1): 103-105.
- [24] Ali A, Guo D, Mahar A, *et al.* Role of *Streptomyces pactum* in phytoremediation of trace elements by *Brassica juncea* in mine polluted soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **144**: 387-395.
- [25] Liu H L, Huang J, Zhang S Z, *et al.* Chromate interaction with the chromate reducing actinobacterium *Intrasporangium chromatireducens* Q5-1[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2015, **32**(7): 616-623.
- [26] Bhattacharyya P, Tripathy S, Chakrabarti K, *et al.* Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(4): 543-550.
- [27] Pan X M, Zhang S R, Zhong Q M, *et al.* Effects of soil chemical properties and fractions of Pb, Cd, and Zn on bacterial and fungal communities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136904.
- [28] 崔红标, 范玉超, 周静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群落结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 197-205.
- Cui H B, Fan Y C, Zhou J, *et al.* Availability of soil Cu and Cd and microbial community structure as affected by applications of amendments[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 197-205.
- [29] Sullivan T S, McBride M B, Thies J E. Soil bacterial and archaeal community composition reflects high spatial heterogeneity of pH, bioavailable Zn, and Cu in a metalliferous peat soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **66**: 102-109.
- [30] 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.
- [31] Da Silva Júnior F M R, Volcão L M, Hoscha L C, *et al.* Growth of the fungus *Chaetomium aureum* in the presence of lead: implications in bioremediation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(7): doi: 10.1007/s12665-018-7447-x.
- [32] Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, *et al.* Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes [J]. *Sustainability*, 2015, **7**(2): 2189-2212.
- [33] Cui Z J, Zhang X, Yang H H, *et al.* Bioremediation of heavy metal pollution utilizing composite microbial agent of *Mucor circinelloides*, *Actinomyces* sp. and *Mortierella* sp. [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, **5**(4): 3616-3621.
- [34] Tang J Y, Zhang J C, Ren L H, *et al.* Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: a review on heavy metal pollution [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **242**: 121-130.
- [35] Babin D, Sommermann L, Chowdhury S P, *et al.* Distinct rhizomicrobiota assemblages and plant performance in lettuce grown in soils with different agricultural management histories [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2021, **97**(4), doi: 10.1093/femsec/fiab027.
- [36] Lin Y B, Ye Y M, Hu Y M, *et al.* The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 557-564.
- [37] Bundy J G, Davey M P, Viant M R. Environmental metabolomics: a critical review and future perspectives [J]. *Metabolomics*, 2009, **5**(1): 3-21.
- [38] García-Sevillano M Á, García-Barrera T, Gómez-Ariza J L. Environmental metabolomics: Biological markers for metal toxicity [J]. *Electrophoresis*, 2015, **36**(18): 2348-2365.
- [39] Xie M D, Chen W Q, Lai X C, *et al.* Metabolic responses and their correlations with phytochelatin in *Amaranthus hypochondriacus* under cadmium stress [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 1791-1800.
- [40] Pearce D A, Sherman F. Toxicity of Copper, Cobalt, and Nickel salts is dependent on histidine metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Journal of Bacteriology*, 1999, **181**(16): 4774-4779.
- [41] Prabhakaran P, Ashraf M A, Aqma W S. Microbial stress response to heavy metals in the environment[J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(111): 109862-109877.
- [42] Kanwar M K, Bhardwaj R, Arora P, *et al.* Plant steroid hormones produced under Ni stress are involved in the regulation of metal uptake and oxidative stress in *Brassica juncea* L. [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(1): 41-49.
- [43] Okazaki Y, Saito K. Roles of lipids as signaling molecules and mitigators during stress response in plants [J]. *The Plant Journal*, 2014, **79**(4): 584-596.
- [44] Zhang B, Zhou J, Li Q, *et al.* Manganese affects the growth and metabolism of *Ganoderma lucidum* based on LC-MS analysis[J]. *PeerJ*, 2019, **7**, doi: 10.7717/peerj.6846.
- [45] Bali S, Jamwal V L, Kohli S K, *et al.* Jasmonic acid application triggers detoxification of lead (Pb) toxicity in tomato through the modifications of secondary metabolites and gene expression [J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 734-748.
- [46] Ghorri N H, Ghorri T, Hayat M Q, *et al.* Heavy metal stress and responses in plants[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, **16**(3): 1807-1828.
- [47] Sun X M, Zhang J X, Zhang H J, *et al.* Glucosinolate profiles of *Arabidopsis thaliana* in response to cadmium exposure [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, **200**(1), doi: 10.1007/s1270-008-9897-3.
- [48] Tolrà R P, Poschenrieder C, Alonso R, *et al.* Influence of zinc hyperaccumulation on glucosinolates in *Thlaspi caerulescens*[J]. *New Phytologist*, 2001, **151**(3): 621-626.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                               |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games                                                       | LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)            |
| Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area                                                               | HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)                |
| Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin                             | WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)             |
| Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan | FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)           |
| Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer                                                                                                 | QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)                  |
| Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian                                                                                   | ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)             |
| One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities                      | LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)         |
| Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region              | ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)              |
| Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020                                               | WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)              |
| Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry                                                                                        | YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)          |
| Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin                                                                  | HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)                 |
| Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model                                  | PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)                          |
| Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing                                        | WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)            |
| Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss                                                                                  | WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)          |
| Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley                                                          | LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)                 |
| Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology                                                                         | ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)                     |
| Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province                                                                 | LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)                  |
| Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin                                                                                        | WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)                |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia                              | LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)                   |
| Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River                        | YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)              |
| Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake               | DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)          |
| Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors                                                                  | LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)             |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities                                                                    | LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)              |
| Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater                                                           | HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)              |
| Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe <sup>2+</sup> /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions                                     | LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)               |
| Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang                                               | XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154) |
| Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia                                         | SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)               |
| Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia                                                                                                     | WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)              |
| Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale                                                                                 | WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)                          |
| Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province                            | YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)                |
| Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model                                                       | YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)                  |
| Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou                                                               | ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)        |
| Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties                                                                                 | REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)             |
| Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil                                                                     | ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)        |
| Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals                                                                           | ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)              |
| Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application                                                               | PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)                        |
| Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice                                                                                        | YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)         |
| Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>                                  | ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)         |
| Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity                                        | LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)         |
| Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice                                                           | ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)                  |
| Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions         | FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)           |
| High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function                    | PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)              |
| Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors                                  | CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)                    |
| Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field                                                                  | LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)           |
| Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain                                                                        | LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)               |
| Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon                                                                              | LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)                  |
| Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N <sub>2</sub> O Emission in Guanzhong Plain                                                | BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)           |
| Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.                                                                                    | QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)           |
| Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation                                                                                                            | WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)          |
| Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems                                                                               | CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)                 |