

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

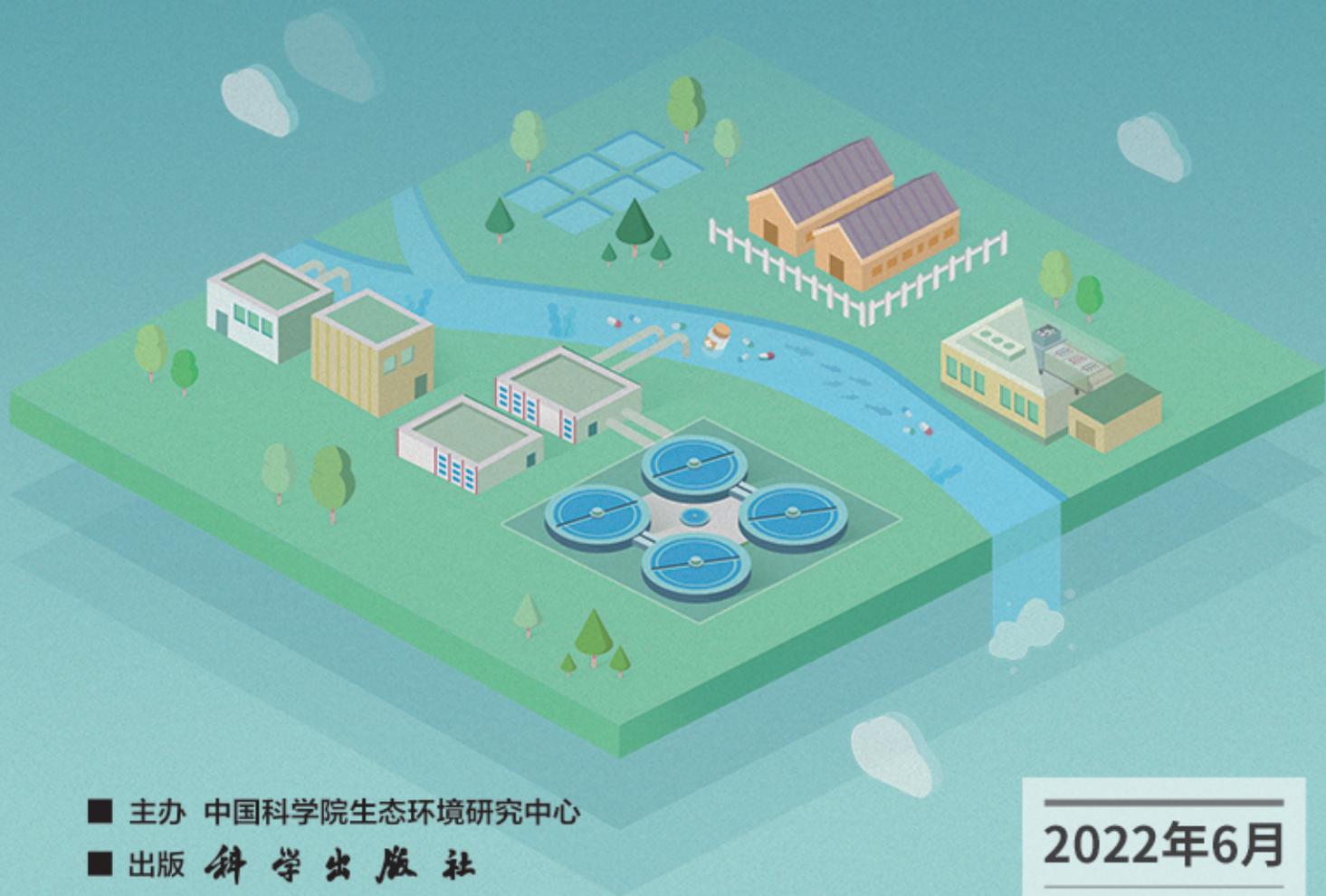
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响 ..... 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 ..... 黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析 ..... 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 ..... 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM<sub>2.5</sub> 来源 ..... 彭超, 李振亮, 曹云擎, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势特征及其影响来源分析 ..... 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 ..... 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 ..... 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 ..... 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 ..... 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染特征及气象影响分析 ..... 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟寰, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 ..... 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 ..... 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 ..... 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 ..... 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 ..... 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 ..... 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 ..... 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 ..... 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 ..... 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 ..... 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 ..... 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 ..... 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 ..... 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 ..... 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 ..... 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 ..... 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 ..... 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 ..... 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 ..... 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 ..... 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 ..... 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 ..... 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 ..... 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 ..... 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 ..... 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 ..... 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 ..... 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 ..... 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 ..... 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 ..... 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 ..... 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 ..... 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 ..... 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 ..... 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 ..... 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 ..... 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 ..... 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 ..... 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 ..... 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 ..... 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 ..... 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 ..... 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 ..... 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 ..... 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

# 城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应

陈玉芳<sup>1</sup>, 闫振华<sup>1\*</sup>, 张燕<sup>1</sup>, 赵海洲<sup>2</sup>

(1. 河海大学环境学院浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司华东分院, 南京 210049)

**摘要:** 微塑料作为环境微生物的附着载体已经引起了世界范围内的广泛关注. 然而, 水环境中微塑料往往呈现垂向分布特征, 附着的细菌群落结构和功能是否会随之产生变化仍少见报道. 因此, 选取了水环境中常见的微塑料聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 和聚氯乙烯 (PVC) 为研究对象, 通过野外水体垂向暴露, 结合高通量测序技术, 探究微塑料垂向分布下附着的细菌群落结构变化和功能表达响应. 结果表明, 相较于 PVC 微塑料, 附着于 PET 微塑料上的细菌群落  $\alpha$  多样性更高; 随着暴露水深的增加, 附着于 PET 和 PVC 两种介质的细菌群落丰富度和多样性均随之增加, 且深水条件下 (90 cm), 附着于两种微塑料的细菌  $\alpha$  多样性指数均明显高于其在 30 cm 和 60 cm 的值. 蓝藻门 (Cyanobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes) 和疣微菌门 (Verrucomicrobia) 为 PET 和 PVC 附着细菌群落的优势物种. 进一步分析发现, 深水环境明显改变了附着于微塑料的细菌群落结构. 相关功能预测表明, 嘧啶代谢、氨基糖和核苷酸糖的代谢、淀粉和蔗糖代谢和酰胺生物合成代谢功能表达与水深深度呈正相关性; 深水条件下, 附着于两种微塑料的细菌功能表达明显增加, 且 PET 上附着细菌的功能表达明显高于 PVC. 微塑料材质类型和水深深度均会影响附着的细菌群落结构组成和功能响应, 相对而言, 水深环境的影响更加显著, 这可能与光照和浊度在垂向上的差异性有关. 研究结果为揭示微塑料污染影响下的微生物响应和环境危害提供了基础支撑.

**关键词:** 微塑料; 生物膜; 垂向分布; 群落结构; 功能

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3088-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108209

## Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water

CHEN Yu-fang<sup>1</sup>, YAN Zhen-hua<sup>1\*</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHAO Hai-zhou<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., (CMIE) East China Branch, Nanjing 210049, China)

**Abstract:** Microplastics have received increasing attention worldwide due to their carrier effects. In the aquatic environment, microplastics always show a vertical distribution, which thereby may change the structure and function of the attached microbial communities. However, few studies have focused on this alteration. In this study, the structural changes and functional expression responses of the attached bacterial communities to microplastics under vertical distribution were investigated in the field combined with high-throughput sequencing technology. Polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC) were selected as the target microplastics, which were frequently detected in the aqueous environment. The results showed that the  $\alpha$ -diversity of bacterial communities attached to PET microplastics was much higher than that of those attached to PVC microplastics. The abundance and diversity of the bacterial communities attached to PET and PVC both increased with the increase in water depth. The  $\alpha$ -diversity index of bacteria attached to the two typical microplastics was significantly higher in deep water (90 cm) than that in water 30 cm and 60 cm deep. The Cyanobacteria, Proteobacteria, Planctomycetes, and Verrucomicrobia were the dominant phyla in the attached bacterial communities. In addition, the deep water distinctly altered the bacteria community attached to different microplastics. The results of functional prediction showed that the functional expression of pyrimidine metabolism, amino sugar and nucleotide sugar metabolism, starch and sucrose metabolism, and aminoacyl-tRNA biosynthesis were positively correlated with water depth. In addition, the functional responses of the bacterial communities attached to microplastics were also increased, especially in deep water. Further, the bacterial functions of those attached to PET were significantly higher than that of those attached to PVC. This suggests that both the microplastic polymer and the water depth could affect the structure and function of the attached bacterial communities and that the water depth was more important, which may be related to the difference in the vertical distribution of light and turbidity. The results of this study provide a new insight into the microbial response to and environmental risk of microplastic pollution.

**Key words:** microplastic; biofilm; vertical distribution; community structure; function

微塑料是指粒径小于 5 mm 的塑料碎片或颗粒, 主要来源于大塑料的裂解<sup>[1]</sup> 和小塑料的直接排放等<sup>[2]</sup>. 近年来, 微塑料作为一种新污染物, 已在全球范围内引发了广泛关注. 有研究发现, 微塑料在海洋、湖泊、水库和河流等水环境中分布广泛<sup>[3,4]</sup>, 并可通过其自身的物理、化学和载体等多重作用威胁

生物体的生长、发育和繁殖<sup>[5]</sup>, 甚至会随着食物链由低营养级向高营养级传递<sup>[6,7]</sup>, 最终威胁人类健

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979080); 中央高校基本科研业务费专项 (B200202113)

作者简介: 陈玉芳 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境微生物学, E-mail: 201305020032@hhu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: hwahuer@hhu.edu.cn

康和生态安全. 因此, 水环境中的微塑料污染又被称为“水中 PM<sub>2.5</sub>”污染.

环境中的微塑料由于具有比表面积大、表面坚硬、疏水性强和官能团丰富等特点, 可为环境微生物提供理想的生态位<sup>[8-10]</sup>, 极易被微生物快速附着并定殖, 并形成与周围环境显著不同的“塑料圈(plastisphere)”. 有研究显示, 微塑料表面附着的细菌群落结构和功能与塑料聚合物的类型、营养盐状况、浊度和温度等环境因素密切相关<sup>[11,12]</sup>. 定殖于微塑料表面的细菌一方面会改变微塑料的密度, 加快沉降, 使其免受风化和紫外辐射等影响<sup>[13,14]</sup>, 进而减缓微塑料的非生物降解; 另一方面, 微塑料表面生物膜的定殖也能导致微塑料降解菌的富集, 进而加快微塑料的生物降解<sup>[15]</sup>. 因此, 附着的细菌群落与微塑料之间存在紧密的相互作用, 探讨微塑料表面附着的细菌群落结构和功能对掌握两者在环境中的迁移与归趋具有重要的生态意义.

当前, 已有研究分析了附着于微塑料表面的细菌群落结构<sup>[16]</sup>、多样性<sup>[17]</sup>和功能<sup>[18]</sup>等变化, 初步阐述了其与环境因素的交互作用过程. 但在自然水体中, 微塑料往往因密度和老化程度等因素差异而呈现垂向分布特征<sup>[19,20]</sup>, 附着于其上的细菌群落是否会因微塑料垂向分层而产生差异目前仍然无法确定. 本研究以我国水环境中常见的两种微塑料: 聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)和聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)为供细菌附着的载体, 在天然水体中进行微塑料垂向分布暴露实验, 通过分析不同分层微塑料表面附着细菌群落结构、生物多样性、功能响应和变化, 阐述微塑料垂向分布下的细菌群落响应规律, 研究结果对评估实际环境中微塑料污染风险具有重要指导意义.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

以环境中常见的两种微塑料类型(PET 和 PVC)为基质, 探索附着生物膜的响应. 两种塑料均

来自于日常生活用品, 其中 PET 为矿泉水瓶, PVC 为包装袋. 将两种塑料制品分别剪裁成 5 mm × 5 mm 的正方形塑料片, 用酒精擦拭后超声处理 5 min, 以去除微塑料上携带的原始微生物.

### 1.2 生物膜培养

水体微塑料垂向暴露采用圆柱形不锈钢丝网进行(直径约 20 cm, 高约 25 cm, 孔径 > 1 mm). 首先, 分别将 PET 和 PVC 微塑料片等量地(45 个)放入不锈钢滤网中(共 18 个滤网), 随之将滤网分 3 层固定在不锈钢绳上, 每层间隔 30 cm. 为了避免底层沉积物再悬浮的干扰效应, 将上述装置垂向等距地放入暴露水体中固定, 距离湖底 30 cm, 距离水面分别为 30、60 和 90 cm. 此外, 钢丝下端坠有重物以维持该装置在水中的稳定. 每种微塑料设置 3 个平行.

微塑料的暴露选择在河海大学东湖(118°46'55.25"E, 31°54'59.03"N), 水深与长江下游典型城市河湖水体的深度相一致, 约 1.2 m, 其不同于海洋和深大水库, 无天然分层现象. 微塑料暴露时间为 2019 年 11 月 5 日至 12 月 5 日, 实验期间每隔 10 d 检查生物膜的生长情况. 该时间段内, 无明显降水汇入, 不会强烈扰动湖水和底泥, 使其处于相对稳定状态, 且水温适宜有利于微生物的生长和稳定. 实验期间, 利用 Hach 探头原位检测东湖 3 种深度下的 pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、浊度和水温, 并采集水样测定水体中的氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和总磷(TP). 总体上, pH、DO、ORP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和温度在水体垂向上没有明显差异, 浊度具有一定的垂向差异性. 水体理化性质具体数值如表 1 所示.

### 1.3 生物膜提取

生物膜的提取根据 Wang 等<sup>[21]</sup>的方法进行. 将暴露装置中的微塑料取出后, 迅速置于冰上并带回实验室. 附着在微塑料上的生物膜用无菌去离子水仔细清洗, 随后刮片收集并采用 0.22 μm 的无菌纤维膜进行过滤, 收集附着的微生物. 收集到的生物膜置于液氮保存, 以待后续 DNA 提取和细菌群落分析.

表 1 东湖不同水深处水质参数均值

Table 1 Mean value of water quality parameters in different depths of East Lake

| 水深深度/cm | pH   | DO/mg·L <sup>-1</sup> | ORP/mV | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> | TP/mg·L <sup>-1</sup> | 浊度/NTU | 水温/°C |
|---------|------|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|-------|
| 30      | 8.43 | 8.23                  | 235.1  | 0.223  | 0.026                 | 4.51   | 18.1  |
| 60      | 8.44 | 8.21                  | 238.4  | 0.296  | 0.024                 | 5.12   | 17.8  |
| 90      | 8.41 | 8.04                  | 236.2  | 0.257  | 0.025                 | 6.87   | 17.7  |

### 1.4 DNA 提取、PCR 扩增和高通量测序分析

生物膜 DNA 的提取采用 HiPure Bacterial DNA Kits(基迪奥生物, 广州)进行, 而后使用 ABI StepOnePlus Real Time PCR System (Life

Technologies, 美国)进行扩增. 将样本中提取的基因组 DNA 作为 PCR 扩增模板, 用带有 barcode 的特异引物扩增 16S rRNA 的 V3 和 V4 区域进行高通量测序, 测序平台为 Illumina MiSeq(基迪奥生物, 广州).

其中, PCR 引物序列为 341F: CCTACGGGNGGC WGCAG; 806R: GGA CTACHVGGGTATCTAAT. 第一轮 PCR 扩增条件: 94℃ 预变性 5 min, 之后 98℃ 变性 10 s, 62 ~ 66℃ 退火 30 s (55℃ for 16s V4), 68℃ 延伸 30 s, 30 个循环, 最后在 68℃ 保持 5 min; 第二轮扩增条件: 94℃ 预变性 2 min, 之后 98℃ 变性 10 s, 65℃ 退火 30 s, 68℃ 延伸 30 s, 12 个循环, 最后在 68℃ 保持 5 min. 两轮扩增产物均使用 AMPure XP Beads 进行纯化. 扩增测序产生的原始数据通过 FASTP 软件对低质量序列进行过滤, 然后通过 FLASH 软件对序列进行组装和合并. 使用 USEARCH 软件核对剩余的嵌合序列.

### 1.5 数据处理与分析

生物信息在 Omicsmart 实时交互平台 (<http://www.omicsmart.com>) 进行分析. 对物种组成多样性信息, 用 Uparse 软件对所有样品的全部 Effective Tags 序列聚类, 以 97% 的一致性将序列聚类成为 OTU (operational taxonomic unit). 随后进行 OTU 分析、物种组成分析、 $\alpha$  多样性分析、 $\beta$  多样性分析和

功能分析. 根据 OTU 的物种注释和丰度信息, 使用 Tax4Fun 软件进行 KEGG Pathway 的功能代谢通路预测. 不同处理之间的多重比较采用单因素方差分析中的 Turkey 统计检验法,  $P < 0.05$  为统计显著性.

## 2 结果与分析

### 2.1 细菌群落多样性分析

原始数据在进行低质量 reads 过滤后再进行组装和再过滤, 共获得 1 491 600 条有效序列, 并将其分配给 51 260 个 OTU. 根据 OTU 聚类结果, 对每个 OTU 序列做代表注释, 得到对应的物种信息和基于物种的丰度分布情况.

基于 OTU 进行  $\alpha$  多样性分析, 包括 Chao1 指数、ACE 指数、Simpson 指数、Shannon 指数和覆盖率, 从而得到物种丰富度和多样性. 各样本  $\alpha$  多样性指数如表 2 所示. 所有样品覆盖率均在 98.8% 以上, 表明该测序深度下, 有效数据量足够大, 基本能反映样品中绝大多数细菌群落的物种信息.

表 2 不同微塑料附着细菌群落  $\alpha$  多样性指数<sup>1)</sup>

Table 2 The  $\alpha$  diversity index of bacterial communities attached to different microplastics

| 组别     | Shannon 指数   | Simpson 指数     | Chao1 指数           | ACE 指数             | 覆盖率/%        |
|--------|--------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------|
| PVC-30 | 6.44 ± 0.40  | 0.899 ± 0.036  | 2 434.22 ± 115.15  | 2 425.00 ± 108.42  | 99.32 ± 0.07 |
| PVC-60 | 6.91 ± 0.27  | 0.936 ± 0.018  | 2 839.35 ± 491.50  | 2 778.12 ± 483.14  | 99.10 ± 0.05 |
| PVC-90 | 7.97 ± 0.10* | 0.953 ± 0.001* | 4 202.94 ± 180.90* | 4 172.90 ± 155.20* | 98.99 ± 0.09 |
| PET-30 | 6.88 ± 0.12  | 0.909 ± 0.008  | 2 644.51 ± 90.32   | 2 578.43 ± 91.80   | 99.09 ± 0.10 |
| PET-60 | 7.71 ± 0.30* | 0.953 ± 0.010* | 3 331.11 ± 114.70* | 3 298.07 ± 134.50* | 99.16 ± 0.09 |
| PET-90 | 9.88 ± 0.10* | 0.995 ± 0.001* | 5 364.99 ± 129.00* | 5 387.55 ± 179.40* | 98.86 ± 0.10 |

1) 数据为平均值 ± 标准差 ( $n=3$ ); \* 表示相同指数下不同处理组之间存在显著差异性

在暴露期内, 微塑料附着细菌群落的丰富度 (Chao1 指数、ACE 指数) 和多样性 (Shannon 指数、Simpson 指数) 均存在显著差异. 就物种多样性而言, PVC 在 90 cm 深度上附着的细菌 Shannon 指数是其在 30 cm 处的 1.2 倍, PET 则是 1.4 倍. 相同水深处, PET 附着的细菌 Shannon 指数明显高于 PVC, 90 cm 处 PET 的 Shannon 指数是 PVC 的 1.24 倍.

在物种丰富度方面, PVC 在 90 cm 深度上附着的细菌 Chao1 和 ACE 指数分别是 30 cm 处的 1.7 倍和 1.72 倍, 且 PET 在 90 cm 深度下的 Chao1 和 ACE 指数分别是 30 cm 处的 2.02 倍和 2.08 倍. 此外, 在相同深度下附着于 PET 的细菌 Chao1 和 ACE 指数也明显高于 PVC. 这表明, 微塑料上附着的细菌总数随水深增加而明显增加, 且 PET 上附着的细菌总数高于 PVC.

### 2.2 细菌群落结构和组成分析

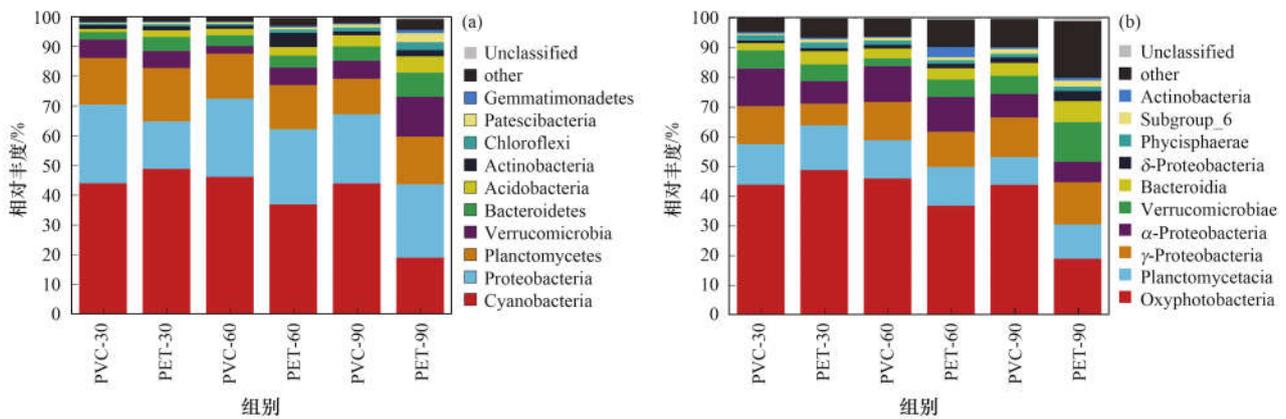
不同微塑料表面附着细菌在门和纲水平上的优势物种组成如图 1 所示. 在门 (phylum) 水平上 [图

1(a)], 丰度前 10 的细菌占总量的 79.66% ~ 95.08%, 蓝藻门 (Cyanobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 为绝对的优势菌门, 其次为浮霉菌门 (Planctomycetes)、疣微菌门 (Verrucomicrobia)、拟杆菌门 (Bacteroidetes). 90 cm 处 PET 附着的蓝藻门丰度 (18.85%) 明显下降, 疣微菌门 (Verrucomicrobia) 相对丰度 (13.35%) 明显高于其他样本. 其中, 蓝藻门 (Cyanobacteria) 主要是通过光合作用获得能力的细菌. 拟杆菌门则是水中常见的细菌, 拟杆菌门的分布会受到微塑料类型和水深深度的影响. 变形菌门为 30、60 和 90 cm 的塑料上的优势菌群, 常常作为初始定殖菌, 其可对水环境中的各种营养资源做出迅速反应以促进生物膜的形成<sup>[22]</sup>. 垂向上随着水深增加, 不同门类的细菌分布变得更加均衡, 细菌种类增多, 多样性提高.

在纲 (class) 水平上 [图 1(b)], 3 个不同水深微塑料附着细菌主要由生氧光细菌纲

(Oxyphotobacteria)、浮霉菌纲(Planctomycetacia)、 $\gamma$ -变形菌纲( $\gamma$ -Proteobacteria)、 $\alpha$ -变形菌纲( $\alpha$ -Proteobacteria)、疣微菌纲(Verrucomicrobiae)、拟杆菌纲(Bacteroidia)、 $\delta$ -变形菌纲( $\delta$ -Proteobacteria)、Phycisphaerae、Subgroup\_6 和放线菌纲

(Actinobacteria)组成. 其中,PET 附着的绝对优势物种光氧细菌纲和浮霉菌纲均呈现出垂向变化的特征,即 30 cm 处丰度大于 60 cm,均大于 90 cm 处. 微塑料类型和水深可能共同影响附着细菌在纲水平上的物种组成.



(a) 门水平; (b) 纲水平

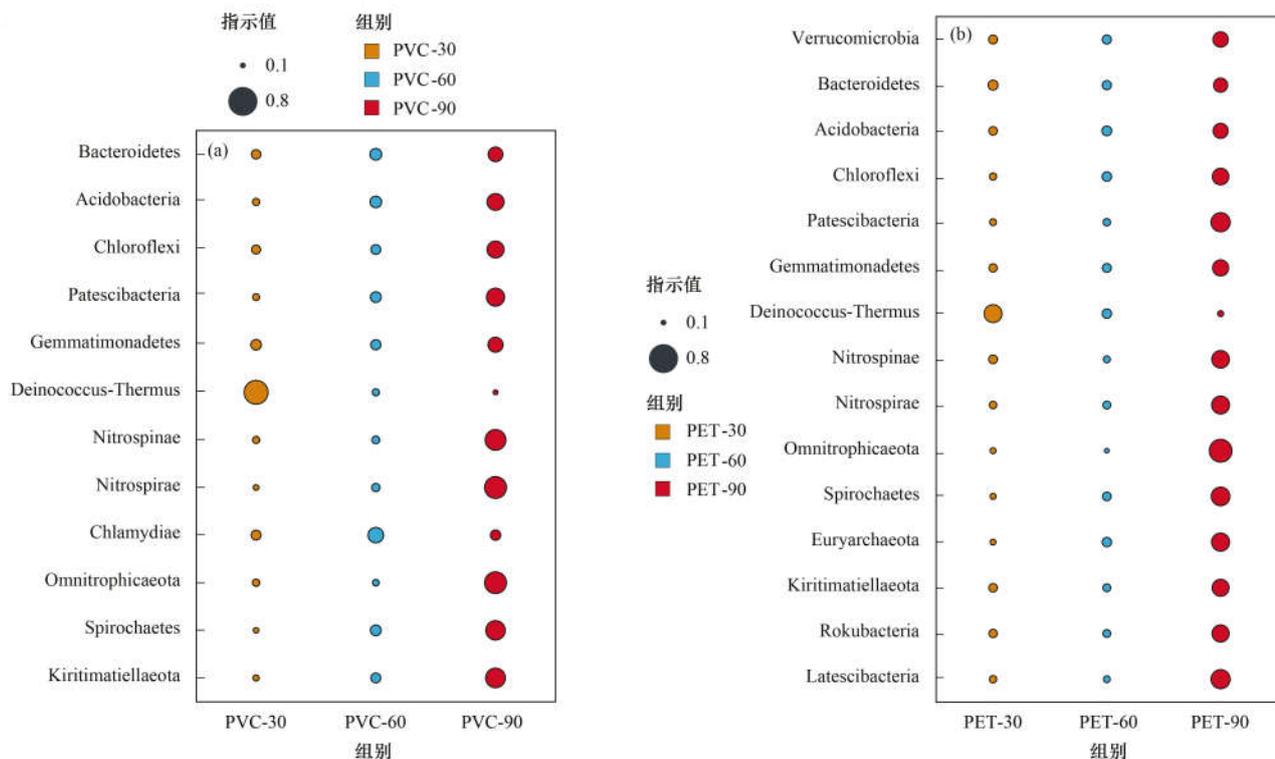
图 1 不同水深细菌群落物种组成和相对丰度分布

Fig. 1 Species composition and relative abundance distribution of bacterial communities in different water depths

为了深入理解不同微塑料附着细菌群落结构的垂向分布差异,通过 Indicator 分析对具有统计学意义的指示物种(biomarker)进行分析( $P < 0.05$ ). 在门和纲水平上,90 cm 处附着于 PVC 和 PET 的物种丰度均显著高于 30 cm 和 60 cm,且附着于 PET 的

细菌物种多样性均高于 PVC.

图 2 展示了门水平下 PVC 和 PET 样本丰度差异显著的物种类别. 结果显示,在门水平下共获得 16 类具有显著性差异的菌门. 其中,PET 和 PVC 样本中共有菌门为 11 种,说明细菌群落具有一定的相



(a) PVC 微塑料; (b) PET 微塑料

图 2 附着于两种微塑料细菌群落在门水平下的指示物种分析

Fig. 2 Indicator analysis of bacterial communities attached to two typical plastics at the phylum level

似性. PVC 特有的差异菌门为衣原体门 (Chlamydiae), 附着于 PET 微塑料特征菌群为拟杆菌门 (Bacteroidetes)、广古菌门 (Euryarchaeota)、Rokubacteria 和黏胶球形菌门 (Latescibacteria). 此外, 特征物种具有一定的垂向分布差异性. 在 30 cm 水深处, 异常球菌-栖热菌门 (Deinococcus-Thermus) 是 PET 和 PVC 仅有的特征菌门. 在 60 cm 水深处, 衣原体门是 PVC 样本唯一的指示物种; PET 无显著性差异物种. 在水深 90 cm 处, 附着于 PVC 和 PET 的差异物种类别分别为 10 和 14, 这与上述  $\alpha$  多样性指数规律一致. 90 cm 处附着于 PVC 主要的差异菌门为 Omnitrophicaeota、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae)、硝化刺菌门 (Nitrospinae)、Kiritimatiellaeota 和螺旋体门 (Spirochaetes); PET 在 90 cm 处主要的差异物种为 Omnitrophicaeota、Patescibacteria、黏胶球形菌门、螺旋体门和广古菌门.

对所有微生物样本基于 unweighted unifracs 距离算法进行降维分析, 通过 NMDS 分析 3 种深度下细菌群落的差异性. 如图 3 所示, stress 值为 0.042, 表明 NMDS 分析具有可靠性. 结果显示, 在 PET 生物膜中, PET-30 和 PET-60 距离最近, 这表明两处细菌群落较为相似; 而 PET-90 与 PET-30 和 PET-60 距离变远, 表明在湖水深处, PET 附着细菌群落发生了明显的改变; 对 PVC 而言, 3 种深度下的距离都较远, PVC 附着菌群随着水深变化明显, 相似性明显降低.

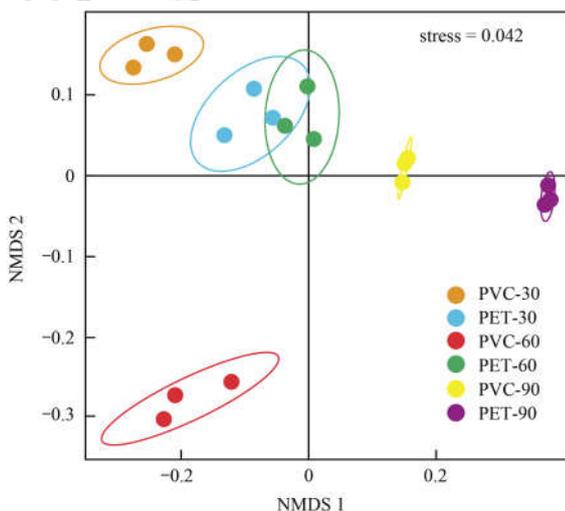


图 3 OTU 水平下基于未加权细菌群落 NMDS 排序

Fig. 3 Bacterial community NMDS sequence based on unweighted UniFrac at OTU level

### 2.3 垂向分布下细菌群落代谢功能分析

为了调查塑料类型和水深深度对生物膜群落功能多样性的影响, 从 16S 获得的数据序列注释到 KEGG 数据库中, 分析塑料生物膜菌群的代谢通路.

通过 Tax4Fun 对附着于生物膜上的细菌功能进行预测分析<sup>[23]</sup>, 发现了代谢、环境信息处理、遗传信息处理、细胞转化、疾病和有机系统共 6 类一级功能层生物代谢通路, 且上述代谢通路相对丰度依次减小. 进一步对二级功能层生物代谢进行分析, 发现共有 34 个子功能组成. 如图 4(a) 所示, 二级功能主要由碳水化合物代谢、辅助因子和维生素、氨基酸代谢、多酮类化合物和萜类化合物代谢、其他氨基酸代谢组成.

三级功能垂向组成依二级功能改变而改变, 不同基质上附着细菌功能具有一定的差异性. 如图 4(b) 所示, ABC 转运体、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢、卟啉和叶绿素代谢、精氨酸和脯氨酸代谢功能表达与水深的深度呈负相关; 且在同一深度下, 附着于 PVC 的细菌功能表达强于 PET. 此外, 嘧啶代谢、氨基酸和核苷酸的代谢、淀粉和蔗糖代谢和氨基酸生物合成代谢功能表达与水深深度呈正相关, 其在 90 cm 处的功能表达丰度显著高于 30 cm 和 60 cm 处的样本. 整体而言, 三级微生物代谢通路具有一定的垂向规律: ABC 转运体、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢、卟啉和叶绿素代谢、精氨酸和脯氨酸代谢和丙酮酸代谢在水深 30 cm 和 60 cm 处的功能表达相对丰富; 双组分信号系统、氧化磷酸化、细菌分泌系统、嘧啶代谢、氨基糖和核苷酸代谢、淀粉和蔗糖代谢、甲烷代谢和氨基酸生物合成等功能易于在深水处表达.

### 3 讨论

水体微塑料可作为微生物附着的载体. 本研究将两种微塑料在水体中进行垂向暴露后发现, 微塑料表面附着的细菌群落多样性随着水深的增加而明显增加, PET 表面附着细菌群落多样性明显高于 PVC, 且各样本功能具有一定的垂向分布规律.

#### 3.1 微塑料类型对细菌群落结构的影响

微生物群落结构与微塑料类型密切相关, 不同类型的微塑料由于其内在性质不同而影响微生物的群落结构. 微塑料的粗糙度<sup>[24]</sup>、亲水性<sup>[25]</sup>、比表面积<sup>[11]</sup>和表面基团<sup>[26]</sup>等均会影响微生物的定殖. 本研究中, 同一深度下 PET 附着细菌群落的  $\alpha$  多样性指数均高于 PVC 微塑料, 这可能是因为 PVC 作为一种“有毒”微塑料<sup>[27]</sup>, 抑制了细菌的生存和繁殖. 已有研究发现, PVC 会抑制 *nirS* 基因丰度<sup>[28]</sup>和反硝化细菌数量<sup>[29]</sup>, 进而影响氮的转化. 此外, 塑料生产过程中的各种化学添加剂 (如增塑剂、阻燃剂和稳定剂等) 的释放也会对附着微生物产生毒性抑制效应, 进而干扰其正常生长. 附着于微塑料表面的微生

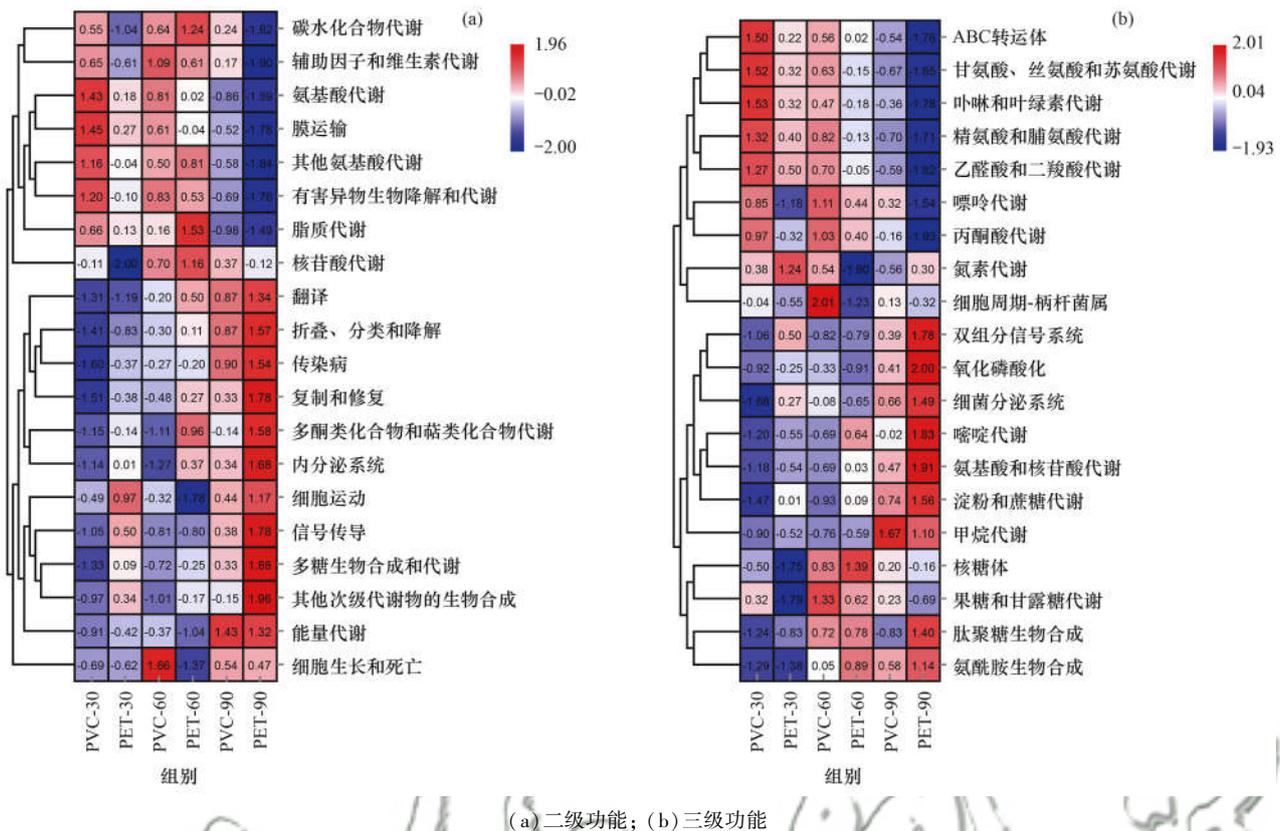


图 4 细菌群落功能丰度热图  
Fig. 4 Abundance heat map of bacterial community

物会改变微塑料自身的密度等特性<sup>[19]</sup>,反作用于微塑料本身,从而影响微塑料在淡水环境中的迁移行为和分布特征.然而,目前关于微塑料在水体中垂向迁移规律的相关研究仍旧匮乏,需要开展进一步研究.

### 3.2 水深深度对微生物群落结构的影响

水深深度也会影响细菌的群落结构,无论是在门还是纲水平上,深水环境都在一定程度上刺激了细菌的生长代谢.在门水平上,蓝藻门在 PET 塑料上的丰度随着水深深度的增加而显著降低,而 PVC 则基本无变化;90 cm 处 PVC 塑料附着的疣微菌门丰度与其在 30 cm 处相近,PET 塑料上的附着物显著增加.在纲水平上,不同水深 PVC 附着的生氧光细菌纲相对丰度基本一致,其附着在 PET 塑料上的相对丰度随着水深的增加而显著减小.对比同一深度下不同底物上的细菌丰度变化,发现浅水处附着在 PVC 和 PET 塑料上的生氧光细菌纲丰度相似,深水处两者相对丰度差异较大,说明相较于微塑料类型,水深深度对细菌群落结构影响更大,这一结果与已有的研究相一致<sup>[11]</sup>.

生氧光细菌是一种利用光能进行自身同化代谢的细菌,其在 PET-30 处大量检出,而在深水处由于阳光稀少无法进行光合作用,PET-90 处生氧光细菌

数量明显减少.蓝藻门和生氧光细菌纲在 PVC 上无垂向变化,这可能是由于 PVC 更易释放添加剂,对光产生遮蔽效应抑制光合作用造成的<sup>[30]</sup>.疣微菌是一种在富营养环境下利用硫酸盐降解多糖,在寡营养条件下化能自养代谢获取能量的微生物<sup>[31]</sup>,其在 90 cm 处的丰度显著增加,可能和深水环境有利于其生长繁殖有关. Helgason 等<sup>[32]</sup>的研究发现疣微菌更易在深水环境处生存.  $\gamma$  变形菌纲为变形菌门下的纲,其在 90 cm 处的丰度相较于浅水明显上升,表明  $\gamma$  变形菌纲适合在深水中生存.垂向分布上,随着水深的增加优势物种发生明显改变,但多样性水平随着水深增加而提高,这可能和深水环境距离沉积物更近,更易与底部沉积物进行营养物质和微生物群落交换有关<sup>[33]</sup>.

微塑料类型和水深深度不仅会影响物种多样性,还会对细菌群落结构产生一定的差异性.通过对门水平上的差异物种进行研究,发现附着于微塑料的细菌丰度在垂向暴露下具有显著差异性.附着于 PVC 和 PET 的异常球菌-栖热菌门是水深 30 cm 处的指示物种,其在 30 cm 处的物种丰度均显著高于 60 cm 和 90 cm,这可能和浅水环境辐射和水温相对较高,该菌门耐辐射和高温易于在浅水环境繁殖有关.拟杆菌门可降解聚合物<sup>[34]</sup>,常作为次级生产者

定殖在微塑料表面<sup>[35]</sup>. 其在 PVC-90 处大量附着, 表明深水环境更有利于拟杆菌门以 PVC 为碳源而生长繁殖. 硝化螺旋菌门和硝化刺菌门是一类亚硝酸盐氧化菌, 其能在氮转化过程中固定部分无机碳进而调控碳氮循环<sup>[36]</sup>, Chen 等<sup>[37]</sup>的研究发现微塑料生物膜具有促进亚硝酸盐氧化的作用. 螺旋体门属于致病菌, 其主要营腐生或寄生生活<sup>[38]</sup>. 其在 PVC-90 和 PET-90 处大量繁殖, 这可能和表层沉积物再悬浮有关, 使得深水环境浊度相对较高且部分沉积物附着在深水环境微塑料生物膜上, 易于致病菌生长繁殖. 已有研究表明沉积物可作为病原微生物库使其长期生存<sup>[39]</sup>.

### 3.3 垂向分布下微塑料生物膜功能注释

水深深度和微塑料类型主要通过影响细菌群落组成进而影响细菌的功能. 在不同的水深处, 一级功能层丰度基本一致, 且主要功能为代谢和遗传信息处理, 说明代谢和遗传信息处理在细菌定殖过程中起着重要的功能作用. 在垂向分布下, 各样本二级功能层丰度存在差异. 在水深 30 cm 和 60 cm 处, PET 和 PVC 细菌功能表达主要体现为碳水化合物代谢、辅助因子和维生素代谢、氨基酸代谢、膜运输、其他氨基酸代谢、有害异物生物降解和代谢、脂质代谢和核苷酸代谢这 8 种功能组成. 其中, 碳水化合物代谢和卟啉和叶绿素代谢在 30 cm 和 60 cm 处功能丰度相对较高, 这可能和蓝藻细菌在浅水表面大量进行光合作用有关, 通过碳水化合物代谢为其提供生长发育所需的能量和代谢产物<sup>[40]</sup>. 氨基酸代谢可以促使细菌对氨基酸的吸收, 其对细菌的生存繁衍至关重要<sup>[41]</sup>, 该功能在水深 30 cm 和 60 cm 处表达相对丰富, 说明深水环境在一定程度上抑制了该功能的表达. Bhagwat 等<sup>[42]</sup>的研究发现生物膜可显著增强微塑料对污染物的载体潜力, 且附着于微塑料表面的细菌群落可以促进微塑料的分解<sup>[43]</sup>, 这可能会诱发有害异物降解和代谢功能的表达. 深水环境中, 两种微塑料生物群落功能多样性明显增加, 90 cm 处 PET 附着细菌的功能丰度和多样性显著高于 PVC, 进一步说明 PVC 塑料对附着细菌具有抑制效应. 90 cm 处的细菌群落功能主要体现为翻译、传染病、复制和修复、细胞运动、信号传导、多糖生物合成和代谢等 12 个方面. 其中, 细胞运动和信号传导等过程主要由微塑料编码<sup>[44]</sup>, 隶属于膜运输功能的 ABC 转运体可参与调节多糖的合成和生物代谢相关基因<sup>[45]</sup>. 上述功能均是生物膜形成和成熟过程中必不可少的功能, 这可能和深水环境细菌大量生长繁殖有关. 已有研究指出, 生物膜上的细菌由于附着于微塑料将导致其代谢周转率升高<sup>[46]</sup>, 故深水环

境下细菌丰度和物种多样性的显著增加将会使得细胞运动、信号传导、多糖生物合成和代谢等功能高度表达. 此外, 水深相同处的细菌表现出相近的功能, 进一步说明相较于基质类型, 水深深度对细菌群落结构和功能的影响更加显著.

## 4 结论

(1) 在垂向分布下, 附着于 PVC 和 PET 微塑料的细菌物种丰富度均随着水深深度的增加而增加 (30 cm < 60 cm < 90 cm). 同一水深处, 附着于 PET 微塑料的细菌物种丰富度和多样性均高于 PVC 塑料, 更易附着细菌.

(2) 微塑料类型和水深深度均会影响细菌的群落结构, 相较于底物基质, 水深深度对细菌群落结构影响更大. 3 种深度下的优势菌门主要为: 蓝藻门 (Cyanobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、疣微菌门 (Verrucomicrobia) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes).

(3) 附着于两种微塑料的细菌功能具有一定的垂向分布特征. 附着于 PET 和 PVC 塑料上的细菌在 30 cm 和 60 cm 处的细菌功能相近, 但其在 90 cm 处的功能明显增加, 可能和细菌群落结构变化密切相关, 且 PET 上的细菌功能明显高于 PVC.

### 参考文献:

- [1] Van Cauwenbergh L, Vanreusel A, Mees J, *et al.* Microplastic pollution in deep-sea sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 495-499.
- [2] Waldschläger K, Lechthaler S, Stauch G, *et al.* The way of microplastic through the environment-application of the source-pathway-receptor model (review) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136584.
- [3] 骆永明, 施华宏, 涂晨, 等. 环境中微塑料研究进展与展望 [J]. *科学通报*, 2021, **66**(13): 1544-1562.
- [4] Luo Y M, Shi H H, Tu C, *et al.* Research progresses and prospects of microplastics in the environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(13): 1544-1562.
- [5] Dris R, Imhof H, Sanchez W, *et al.* Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 539-550.
- [6] Huang D L, Tao J X, Cheng M, *et al.* Microplastics and nanoplastics in the environment: macroscopic transport and effects on creatures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124399.
- [7] Yan Z H, Chen Y F, Bao X H, *et al.* Microplastic pollution in an urbanized river affected by water diversion: combining with active biomonitoring [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126058.
- [8] Huang W, Song B, Liang J, *et al.* Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: a review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **405**,

- doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124187.
- [ 8 ] 季梦如, 马旖旎, 季荣. 微塑料圈: 环境微塑料对微生物的载体作用[J]. 环境保护, 2020, **48**(23): 19-27.
- Ji M R, Ma Y N, Ji R. Plasticsphere: the vector effects of microplastics on microbial communities [ J ]. Environmental Protection, 2020, **48**(23): 19-27.
- [ 9 ] Miao L Z, Wang P F, Hou J, *et al.* Distinct community structure and microbial functions of biofilms colonizing microplastics [ J ]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2395-2402.
- [ 10 ] Wright R J, Erni-Cassola G, Zadjelovic V, *et al.* Marine plastic debris: a new surface for microbial colonization [ J ]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(19): 11657-11672.
- [ 11 ] Miao L Z, Yu Y, Adyel T M, *et al.* Distinct microbial metabolic activities of biofilms colonizing microplastics in three freshwater ecosystems [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123577.
- [ 12 ] Chen X C, Xiong X, Jiang X M, *et al.* Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake [ J ]. Chemosphere, 2019, **222**: 856-864.
- [ 13 ] 周倩, 涂晨, 张晨捷, 等. 滨海湿地环境中微塑料表面性质及形貌变化 [ J ]. 科学通报, 2021, **66**(13): 1580-1591.
- Zhou Q, Tu C, Zhang C J, *et al.* Surface properties and changes in morphology of microplastics exposed in-situ to Chinese coastal wetlands [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(13): 1580-1591.
- [ 14 ] Rummel C D, Jahnke A, Gorokhova E, *et al.* Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment [ J ]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, **4**(7): 258-267.
- [ 15 ] Yuan J H, Ma J, Sun Y R, *et al.* Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics [ J ]. Science of the Total Environment, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968.
- [ 16 ] Li C C, Gan Y D, Dong J Y, *et al.* Impact of microplastics on microbial community in sediments of the Huangjinxia Reservoir—water source of a water diversion project in western China [ J ]. Chemosphere, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126740.
- [ 17 ] Wu N, Zhang Y, Zhao Z, *et al.* Colonization characteristics of bacterial communities on microplastics compared with ambient environments ( water and sediment ) in Haihe Estuary [ J ]. Science of the Total Environment, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134876.
- [ 18 ] Hu H, Jin D F, Yang Y Y, *et al.* Distinct profile of bacterial community and antibiotic resistance genes on microplastics in Ganjiang River at the watershed level [ J ]. Environmental Research, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111363.
- [ 19 ] Miao L Z, Gao Y X, Adyel T M, *et al.* Effects of biofilm colonization on the sinking of microplastics in three freshwater environments [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **413**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125370.
- [ 20 ] Kowalski N, Reichardt A M, Waniek J J. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors [ J ]. Marine Pollution Bulletin, 2016, **109**(1): 310-319.
- [ 21 ] Wang L F, Tong J X, Li Y, *et al.* Bacterial and fungal assemblages and functions associated with biofilms differ between diverse types of plastic debris in a freshwater system [ J ]. Environmental Research, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110371.
- [ 22 ] Bhagwat G, Zhu Q Y, O'Connor W, *et al.* Exploring the composition and functions of plastic microbiome using whole-genome sequencing [ J ]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(8): 4899-4913.
- [ 23 ] ABhauer K P, Wemheuer B, Daniel R, *et al.* Tax4Fun: predicting functional profiles from metagenomic 16S rRNA data [ J ]. Bioinformatics, 2015, **31**(17): 2882-2884.
- [ 24 ] Hossain M R, Jiang M, Wei Q H, *et al.* Microplastic surface properties affect bacterial colonization in freshwater [ J ]. Journal of Basic Microbiology, 2019, **59**(1): 54-61.
- [ 25 ] Pinto M, Langer T M, Hüffer T, *et al.* The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession [ J ]. PLoS One, 2019, **14**(6), doi: 10.1371/journal.pone.0217165.
- [ 26 ] Xie H F, Chen J J, Feng L M, *et al.* Chemotaxis-selective colonization of mangrove rhizosphere microbes on nine different microplastics [ J ]. Science of the Total Environment, 2021, **752**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142223.
- [ 27 ] Wang Q J, Wangjin X X, Zhang Y, *et al.* The toxicity of virgin and UV-aged PVC microplastics on the growth of freshwater algae *Chlamydomonas reinhardtii* [ J ]. Science of the Total Environment, 2020, **749**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141603.
- [ 28 ] Seeley M E, Song B, Passie R, *et al.* Microplastics affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling [ J ]. Nature Communications, 2020, **11**(1), doi:10.1038/s41467-020-16235-3.
- [ 29 ] Dai H H, Gao J F, Wang Z Q, *et al.* Behavior of nitrogen, phosphorus and antibiotic resistance genes under polyvinyl chloride microplastics pressures in an aerobic granular sludge system [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120402.
- [ 30 ] 王琳, 马旖旎, 季荣. PS 和 PVC 微塑料对小球藻的生长抑制效应及其影响途径 [ J ]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1538-1544.
- Wang L, Ma Y N, Ji R. Effects of PS and PVC microplastics on the growth of *Chlorella* sp. [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1538-1544.
- [ 31 ] 王泽铭, 李传虹, 马巧丽, 等. 湿度盐度 pH 协同驱动锡林河景观斑微菌群空间异质性 [ J ]. 微生物学报, 2021, **61**(6): 1728-1742.
- Wang Z M, Li C H, Ma Q L, *et al.* Moisture, salinity and pH co-driving spatial heterogeneity of Verrucomicrobial populations in Xilin River landscape [ J ]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, **61**(6): 1728-1742.
- [ 32 ] Helgason B L, Korschuh H J, Bedard-Haughn A, *et al.* Microbial distribution in an eroded landscape: buried A horizons support abundant and unique communities [ J ]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **196**: 94-102.
- [ 33 ] Tu C, Chen T, Zhou Q, *et al.* Biofilm formation and its influences on the properties of microplastics as affected by exposure time and depth in the seawater [ J ]. Science of the Total Environment, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139237.
- [ 34 ] Zhang M J, Zhao Y R, Qin X, *et al.* Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil [ J ]. Science of the Total Environment, 2019, **688**: 470-478.
- [ 35 ] Xu X Y, Wang S, Gao F L, *et al.* Marine microplastic-associated bacterial community succession in response to geography, exposure time, and plastic type in China's coastal

- seawaters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **145**: 278-286.
- [36] Wang J, Qin X, Guo J B, *et al.* Evidence of selective enrichment of bacterial assemblages and antibiotic resistant genes by microplastics in urban rivers [J]. *Water Research*, 2020, **183**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116113.
- [37] Chen X C, Chen X F, Zhao Y H, *et al.* Effects of microplastic biofilms on nutrient cycling in simulated freshwater systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137276.
- [38] 郭芝芝, 苏振华, 邸琰茗, 等. 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 803-812.
- Guo Z Z, Su Z H, Di Y M, *et al.* Analysis on diversity of plankton microbial community in the Beijing-Tianjin-Hebei section of the North Canal River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 803-812.
- [39] Mwanamoki P M, Devarajan N, Thevenon F, *et al.* Assessment of pathogenic bacteria in water and sediment from a water reservoir under tropical conditions (Lake Ma Vallée), Kinshasa democratic republic of Congo [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6821-6830.
- [40] 张瑞海, 宋振, 付卫东, 等. 植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 433-442.
- Zhang R H, Song Z, Fu W D, *et al.* Effects of vegetation restoration on the structure and function of the rhizosphere soil bacterial community of *Solanum rostratum* [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 433-442.
- [41] 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), doi: 10.13227/j.hjcx.202106174.
- 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), doi: 10.13227/j.hjcx.202106174.
- [42] Bhagwat G, Tran T K A, Lamb D, *et al.* Biofilms enhance the adsorption of toxic contaminants on plastic microfibers under environmentally relevant conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(13): 8877-8887.
- [43] Zhu L X, Zhao S Y, Bittar T B, *et al.* Photochemical dissolution of buoyant microplastics to dissolved organic carbon: rates and microbial impacts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **383**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121065.
- [44] Wu X J, Pan J, Li M, *et al.* Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm [J]. *Water Research*, 2019, **165**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114979.
- [45] Han J, Gao Q X, Zhang Y G, *et al.* Transcriptomic and ectoine analysis of halotolerant *Nocardiopsis gilva* YIM 90087<sup>T</sup> under salt stress [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.00618.
- [46] Lyons B P, Cowie W J, Maes T, *et al.* Marine plastic litter in the ROPME Sea Area: current knowledge and recommendations [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109839.

## CONTENTS

|  |   |
|--|---|
| Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region .....   | QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)                  |
| Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China .....                           | HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)          |
| Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> During COVID-19 Control in Suzhou .....   | MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)             |
| Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 .....   | XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)             |
| Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing .....   | PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)        |
| Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM <sub>2.5</sub> in Baoding City in Winter .....  | WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)           |
| Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> in Jiangbei New Area, Nanjing .....   | GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)             |
| Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi .....   | XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)              |
| Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example ..... | ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)         |
| Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis .....  | TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)         |
| Characteristics and Meteorological Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....  | XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)               |
| Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 .....  | ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)               |
| Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province .....   | YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)            |
| Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn .....   | ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)                |
| Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan .....   | SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)       |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City .....  | WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)      |
| Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China .....  | FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)                     |
| Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River .....  | WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)           |
| Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia .....  | ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)          |
| Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism .....  | SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016) |
| Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors .....  | LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)          |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai .....   | ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)       |
| Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake .....  | ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)        |
| Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks .....  | LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)           |
| Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area .....                | ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)        |
| Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin .....  | CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)      |
| Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water .....   | CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)         |
| Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 .....   | QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)           |
| Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City .....                           | WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)             |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years .....   | GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)         |
| Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China .....   | TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)          |
| Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data .....   | GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)       |
| Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution .....   | CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)                                  |
| Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution .....  | SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)             |
| Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water .....   | WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)                          |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing .....   | XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)          |
| Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation .....  | ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)         |
| Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron .....   | CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)                |
| Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System .....  | TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)               |
| Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions .....   | GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)            |
| Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis .....   | LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)              |
| Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 .....   | XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)         |
| Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland .....   | SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)           |
| Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau .....   | WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)      |
| Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China .....   | LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)            |
| Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province .....  | ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)                                      |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....   | DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)           |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey ( <i>Rhinopithecus roxellana</i> ) Habitat in Shennongjia Mountains .....  | YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)          |
| Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation .....  | XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)                 |
| Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice .....  | TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)              |
| Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments .....  | LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)        |
| Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai .....  | LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)          |
| Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops .....  | JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)        |
| Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing .....  | LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)           |
| Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 .....   | LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)         |
| Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data .....  | LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)    |