

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM_{2.5} 各组分污染特征及来源分析 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM_{2.5} 浓度变化模拟 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM_{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM_{2.5} 化学组分季节变化及来源分析 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM_{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM_{2.5} 金属元素来源及健康风险评估 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM_{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM_{2.5} 污染气象成因分析 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO₂-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄@SiO₂ 催化 H₂O₂ 降解亚甲基蓝效能及机制 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响

李汶璐, 王志超, 杨文焕, 张博文, 李卫平*

(内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

摘要: 微塑料普遍存在于河口、海岸和深海沉积物中,能直接或间接地对沉积环境中细菌和真菌群落产生影响.为探究微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响,通过向沉积物中分别添加不同丰度(2%、5%、10%)和类型(PE、PVC)的微塑料颗粒,进行30 d的微塑料污染模拟实验,分析不同微塑料处理中微生物群落结构和多样性差异.结果表明,微塑料对菌群多样性无显著影响,但能降低群落丰富度,且添加PE和10% PVC下降最显著;添加微塑料使放线菌门、拟杆菌门和酸杆菌门等相对丰度上升,后壁菌门相对丰度显著下降;伯克霍尔德氏菌科和假单胞菌科等涉及氮循环的菌群在添加PE以及2%和10% PVC后相对丰度显著增加,而鞘氨醇单胞菌科等与多种有害污染物生物降解作用有关菌群的相对丰度明显下降;KEGG代谢通路预测显示,添加PE和较高丰度(5%、10%) PVC使菌群膜转运蛋白、细胞运动和外来物质生物降解等功能显著改善,氨基酸代谢、碳水化合物代谢和能量代谢等功能受到抑制.研究可为微塑料污染对沉积物养分转化和外源污染物降解的影响研究提供理论基础.

关键词: 微塑料; 沉积物; 微生物; 群落组成; 多样性; 功能

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2606-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109135

Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments

LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, ZHANG Bo-wen, LI Wei-ping*

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Microplastics are ubiquitous in estuarine, coastal, and deep-sea sediments and can directly or indirectly affect bacterial and fungal communities in the sedimentary environment. In order to investigate the effects of microplastics on bacterial community composition and diversity in sediments, a 30-day microplastic pollution simulation experiment was conducted by adding microplastic particles with different abundances (2%, 5%, and 10%) and types (PE and PVC) to sediments, and the differences in microbial community structure and diversity under the different microplastic treatments were analyzed. The results showed that microplastics had no significant effect on the diversity of bacteria but reduced the community richness, with the most significant decline occurring after the addition of PE and 10% PVC microplastics. The relative abundances of Actinobacteriota, Bacteroidota, and Acidobacteriota increased with the addition of microplastics, whereas the relative abundance of Firmicutes decreased significantly. The relative abundances of Burkholderiaceae, Pseudomonadaceae, and other bacteria involved in nitrogen cycling increased significantly after adding PE and 2% and 10% PVC microplastics, whereas the relative abundance of Sphingomonadaceae and other bacteria associated with the biodegradation of a variety of harmful pollutants decreased significantly. KEGG metabolic pathway prediction demonstrated that PE and high concentration (5% and 10%) PVC addition significantly improved the functional gene of membrane transporters, cell motility, and biodegradation of exogenous substances but inhibited amino acid metabolism, carbohydrate metabolism, and energy metabolism. This study can provide a theoretical basis for studying the effects of microplastic pollution on nutrient transformation and degradation of exogenous pollutants in sediments.

Key words: microplastics; sediment; microbes; community composition; diversity; function

塑料制品近年来已被广泛应用于工业、农业、医药和市政等多个领域^[1].最新数据显示,截至2019年全球塑料产量已达4亿t;且如果按当前生产和废物管理模式继续下去,到2050年大约1.2亿t塑料废物将进入填埋场或自然环境中^[2].大多数塑料碎片会随时间破碎成较小颗粒,通常将尺寸小于5 mm的塑料颗粒定义为微塑料^[3].Thompson等^[4]首次证实显微镜下观察到的微塑料碎片和纤维在海洋环境中广泛存在,该研究引发了学术界对微塑料这一新兴污染物的关注^[5].环境微塑料污染正成为整个地球表层生态系统最严重的威胁之一.

近年来,沉积物中的微塑料污染研究越来越受到学者们的重视.有研究表明,沉积物中的微塑料丰度往往高于水体,虽然塑料的密度通常比水轻,但是

由于风力、水动力条件、生物富集和微塑料自身的形状等因素的影响,水体中的微塑料会沉降并积蓄在沉积物中^[6].如广州市珠江沿岸水体中微塑料丰度为 $379 \sim 7\,924 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$,而沉积物中丰度高于水体为 $80 \sim 9\,598 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)是最常见的微塑料类型^[7].Wang等^[8]的研究发现北江沿岸地区表面沉积物中的微塑料丰度为 $178 \sim 544 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,且通过SEM图像表明微塑料经历了不同程度的机械侵蚀和化学风化.Zhang等^[9]研

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007119); 国家重点研发计划项目(2019YFC0409204)

作者简介: 李汶璐(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为微塑料与微生物相互作用, E-mail: 825036305@qq.com

* 通信作者, E-mail: sjlwp@163.com

究了三峡大坝支流湘西河回水区中微塑料含量,发现河流沉积物中的丰度为 $80 \sim 864 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中积累的微塑料类型除了与地表水中相似的聚乙烯和聚丙烯外,还发现了聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和颜料. 有研究发现,沉积物中的微塑料兼顾两方面特征,一是其本身可作为颗粒污染物,二是由于微塑料表面构造与材料热力学属性等可以吸附其他污染物或微生物^[10];沉积物中的微塑料一部分输入海洋,另一部分会永久或半永久性残留在污染区域并逐年累积,尤其在一些封闭的内陆河湖和水库中,当沉积物中赋存微塑料后,因在沉积物中微塑料不能被紫外线光解,只能依靠生物降解,存留的时间相对更长^[5],这会显著增加当地环境压力^[11].

已有研究表明,沉积物中的物质循环和能量流动是由微生物驱动,其与群落组成和代谢功能密切相关^[12]. 目前有限的研究显示,微塑料积累会显著影响沉积物中酶活性和微生物群落结构^[13~15],并可能会进一步影响环境中碳、氮和磷等元素的循环过程^[13,15],但有关不同类型和丰度微塑料对微生物多样性影响的研究还鲜见报道. 因此,本研究在前期研究基础上,通过外源添加 2 种类型(PE、PVC)和 3 种丰度(占沉积物干重质量分数为 2%、5%、10%)微塑料颗粒模拟沉积物中的微塑料污染,探究不同类型和丰度微塑料对沉积物微生物群落组成和多样

性的影响,揭示微塑料污染的潜在微生物生态效应,以为沉积物中微塑料污染的生态风险评估提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试沉积物于 2021 年 4 月采自岱海流域三道河附近,用彼得逊不锈钢采泥器采集表层沉积物(2~5 cm),将沉积物样品装入铝箔封口袋中密封后运回实验室,剔除样品中砾石、植物残体和贝壳等杂质后,测定供试沉积物的基本理化性质和微塑料丰度,其中微塑料提取采用密度分离法,将沉积物样品在 70℃ 下干燥 24 h 至恒重,添加 30% H_2O_2 消解有机物,利用 NaCl 溶液($1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)进行浮选,上清液沉降 24 h 后用玻璃纤维过滤器(滤膜尺寸为 47 mm;孔径为 $0.45 \mu\text{m}$)进行真空抽滤,将滤纸在 40℃ 下干燥 24 h 后进行提取. 采用立体显微镜(M65FC)和激光共聚焦显微镜(OLS4000)鉴定微塑料,用 Nano Measure 1.2 软件统计微塑料丰度(单位是 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$). 微塑料的粒径以最长的一边的长度计,若粒径小于 $500 \mu\text{m}$ 或难以确定,则采用傅里叶红外光谱仪(RXI)对微塑料颗粒进行成分识别,具体情况见表 1. 本研究供试沉积物中微塑料丰度相对较小,本底值对后续实验的影响较小.

表 1 供试沉积物基本理化性质及微塑料丰度

Table 1 Basic properties of tested sediment and abundance of microplastics

| 项目 | pH 值 | 含水率 /% | 含盐率 /‰ | ω [总有机碳(TOC)] / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | ω [总磷(TP)] / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | ω [总氮(TN)] / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 微塑料丰度 / $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|----|------|-----------|-----------|---|--|--|--|
| 参数 | 9.40 | 58.58 | 2.4 | 23.05 | 1.423 | 3.230 | 89 ± 2.67 |

为真实模拟沉积物中微塑料污染,供试微塑料选用聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和聚乙烯(polyethylene, PE)均购自于上海冠部机电科技有限公司,2种微塑料颗粒均为无规则球状结构,纯度为 99.9%,粒径为 $550 \mu\text{m}$. 实验开始前先对微塑料颗粒进行预处理,将其浸泡在辛烷和戊烷中,并放置于干燥箱中烘干,然后在紫外线洁净台消毒 1 h 以减少微生物污染,最后 4℃ 保存备用.

1.2 实验方法

模拟实验在恒温箱中进行,根据已有沉积物中微塑料含量调查研究^[16],分别设置 2 种微塑料类型(PVC、PE)和 3 种丰度(沉积物干重质量的 2%、5%、10%),并设置不添加微塑料的对照组(CON),共计 7 种处理方式(表 2),每个处理方式重复 3 次. 每种处理下取 1 kg 供试沉积物于 1 L 烧杯中培养,按比例将不同微塑料添加到沉积物中,并用不锈钢勺分多次搅拌、混合均匀. 保持(27 ± 3)℃ 和 60%

的沉积物含水率于恒温箱内培养,模拟日光照射,每 12 h 交替光照和黑暗环境,实验过程中每日添加超纯水保持培养水位,使液面刚好没过沉积物 1 cm. 从添加微塑料后 24 h 开始计时,第 30 d 从每个培养容器中取 3 个重复沉积物样品进行分析,每个样品重量约为 5 g,用于沉积物 DNA 提取和测序分析.

表 2 微塑料污染模拟实验设置

Table 2 Microplastic pollution simulation experimental setup

| 处理编号 | 添加微塑料类型 | 添加微塑料丰度/% |
|-------|---------|-----------|
| CON | — | 0 |
| PVC2 | 聚氯乙烯 | 2 |
| PVC5 | 聚氯乙烯 | 5 |
| PVC10 | 聚氯乙烯 | 10 |
| PE2 | 聚乙烯 | 2 |
| PE5 | 聚乙烯 | 5 |
| PE10 | 聚乙烯 | 10 |

1.3 沉积物微生物群落的高通量测序

选用 FastDNA Spin Kit(MP Biomedicals)试剂盒

提取沉积物样品 DNA. 通过正向引物 338 F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和反向引物 806 R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对细菌 16S 的 V3 ~ V4 区进行 PCR 扩增. PCR 产物用 Axygen DNA 凝胶提取试剂盒进行纯化, 用 Quant-iT PicoGreen dsDNA 检测试剂盒进行定量. 用 Illumina MiSeq 平台对纯化的扩增子进行高通量测序.

1.4 数据统计与分析

运用 QIIME (quantitative insights into microbial ecology) 程序对原始 DNA 序列进行质量优化, 按照 97% 相似度将优化序列聚类为用于物种分类的操作分类单位 (operational taxonomic units, OTUs), 根据细菌 16S rRNA Green genes 为参考数据库 (Release 13.8, <http://greengenes.secondgenome.com/>) 获取 OTU 表. 使用 QIIME2 程序计算细菌群落的丰富度指数 (Chao1)、多样性指数 (Shannon、Simpson) 和覆盖度 (Coverage 指数). 统计每个 OTUs 的相对丰度信息, 并用 Origin 9.0 软件制作不同水平的微生物群落结构. 根据 OTU 表, 采用 PICRUSt2 对获取的 16S rRNA 基因序列在 KEGG 数据库 (kyoto encyclopedia of genes and genomes, 京都基因和基因组百科全书, <http://www.genome.jp/kegg/>) 中进行细菌群落的代谢通路预测^[17].

使用 SPSS 22.0 进行不同处理之间的多重比较, 采用单因素方差分析 (one way anova) 中的 Turkey 统计检验法, 以 0.05 水平统计差异的显著性. 采用 R 语言 3.4.1 进行主成分分析 (PCA), 通过 ANOSIM 分析比较不同处理间微生物群落的差异.

2 结果与讨论

2.1 微塑料对沉积物细菌群落多样性的影响

沉积物中加入不同类型和丰度微塑料对细菌群落丰富度、多样性和覆盖度的影响见表 3. 由表 3 可知, 沉积物样品中有 43 495 ~ 52 262 个细菌有效序列, 依据 97% 序列相似性对所有序列进行聚类后发现, 所有处理共有 2 167 个 OTUs. 7 种处理中,

Coverage 指数均 > 0.97, 说明样本中的细菌序列基本被检出, 即测序结果能反映样本的真实性. 各处理中有效 OTUs 数量存在显著差异 ($P < 0.05$), 不加微塑料的对照组 (CON) 最高为 $48\,522 \pm 27$, 添加微塑料的 6 种处理 OTUs 数量分别为 $48\,080 \pm 26$ 、 $46\,747 \pm 57$ 、 $45\,710 \pm 54$ 、 $46\,836 \pm 78$ 、 $48\,251 \pm 39$ 和 $45\,881 \pm 47$, 均低于 CON 处理, 说明添加微塑料会降低微生物丰度, 且微塑料类型和丰度是影响微生物生长的重要因素. 不同处理 Simpson 和 Shannon 指数未见显著差异, Ace 和 Chao1 指数除 PVC2 处理与 CON 相比不存在显著差异外, 其余各种处理均低于 CON, 说明添加微塑料对菌群多样性影响不明显, 但能显著降低菌群的丰富度.

微塑料对沉积物 α 多样性的影响可能是多种因素共同作用的结果, 如塑料的丰度^[13]、种类^[18]和尺寸^[19]都可能造成评估结果的差异化. 与本研究结果不同的是, Huang 等^[20]在 LDPE 对微生物群落和酶活性影响的研究中, 添加 $0.076 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 丰度 LDPE 的处理在培养后期通过 16S rRNA 高通量测序发现, 微塑料对土壤微生物群落多样性没有显著影响, 但对细菌群落丰富度具有显著促进作用, 这可能由于不同丰度微塑料对菌群结构的影响不同. Seeley 等^[21]的研究结果表明, 添加不同类型微塑料导致沉积物细菌群落多样性差异显著, 在所有 α 多样性指数中, 添加聚乳酸 (polylactic acid, PLA) 处理组的丰富度和多样性最高, 而添加聚乙烯 (PE) 处理组最低, 聚氯乙烯 (PVC) 处理和其他石油基聚合物处理之间也存在明显差异, 聚氨酯泡沫 (polyurethane foam, PUF) 处理和对照组的多样性水平极为相似, 这反映了微生物和微塑料之间的相互作用十分复杂, 除丰度影响外, 还可能取决于微塑料的类型以及沉积物的性质^[22,23].

不同处理下沉积物中细菌 OTUs 主成分分析结果显示 (图 1), 各处理中 3 个重复分别聚在一起, 具有较高的重复性; ANOSIM 检验结果中 $R = 1$, $P = 0.001$, 证实了各处理的组间差异显著大于组内差

表 3 不同类型微塑料对沉积物中细菌群落 α 多样性的影响¹⁾

Table 3 Effects of different types of microplastics on the α diversity of bacterial community in the tested sediments

| 实验处理 | OTU | Shannon 指数 | Simpson 指数 | Ace 指数 | Chao1 指数 | Coverage 指数 |
|-------|--------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------|
| CON | 48 522 ± 27a | 6.147 ± 0.006a | 0.008 ± 0.001a | 2 972.62 ± 3.15a | 2 957.65 ± 32.28a | 0.98 |
| PVC2 | 48 080 ± 26b | 6.177 ± 0.006a | 0.008 ± 0.002a | 2 968.55 ± 15.97a | 2 903.50 ± 56.80a | 0.97 |
| PVC5 | 46 747 ± 57d | 6.139 ± 0.017a | 0.007 ± 0.001a | 2 734.73 ± 9.14c | 2 755.13 ± 42.60c | 0.98 |
| PVC10 | 45 710 ± 54h | 6.110 ± 0.049a | 0.007 ± 0.002a | 2 519.48 ± 8.36b | 2 517.02 ± 10.48b | 0.98 |
| PE2 | 46 836 ± 78e | 6.158 ± 0.014a | 0.008 ± 0.001a | 2 570.20 ± 16.01b | 2 591.92 ± 6.39b | 0.98 |
| PE5 | 48 251 ± 39c | 6.169 ± 0.005a | 0.008 ± 0.001a | 2 543.40 ± 5.03b | 2 531.00 ± 29.49b | 0.97 |
| PE10 | 45 881 ± 47f | 6.131 ± 0.013a | 0.007 ± 0.001a | 2 520.81 ± 6.28b | 2 528.02 ± 16.56b | 0.98 |

1) Simpson 和 Shannon 指数越大, 表示微生物群落多样性越高; Chao1 和 Ace 指数越大, 表示菌群丰富度越高; 不同的小写字母表示基于单因素方差分析和 LSD 检验各处理的差异显著水平 ($P < 0.05$)

异；在所有处理中, CON 和 PVC2 处理间相距较近而与其他处理相距较远, 说明 CON 和 PVC2 处理具有更相似的细菌群落结构. 添加不同类型微塑料处理与对照组的 Venn 图如图 2 所示. 从中可知, CON 和 PVC 处理共享 OTUs 数目为 1 249 个, CON 和 PE 处理共享 OTUs 数目为 1 327 个, 这表明对比两种类型微塑料, 沉积物中添加 PVC 使细菌群落变化更明显. 而 PE 和 PVC 都是由石油衍生的碳氢化合物合成, 都有碳—碳主链, 但它们组成结构和物理性质(即

强度、密度和结晶度等) 并不同, 使不同类型微塑料暴露下微生物群落存在差异^[24]. PE 微塑料为发泡类材质, 较大表面积的发泡类微塑料可从环境中吸附蛋白质等营养物质, 进而促进微生物定殖^[25]; PVC 微塑料为普通树脂颗粒, 其中含有氯键, 且目前为满足市场需求, 通常使用化学添加剂对聚合物进行改性, 使微塑料在降解过程中释放化学成分, 较为典型的是邻苯二甲酸酯, 已有研究表明土壤中邻苯二甲酸酯含量的提高会引起土壤微生物多样性下降^[26].

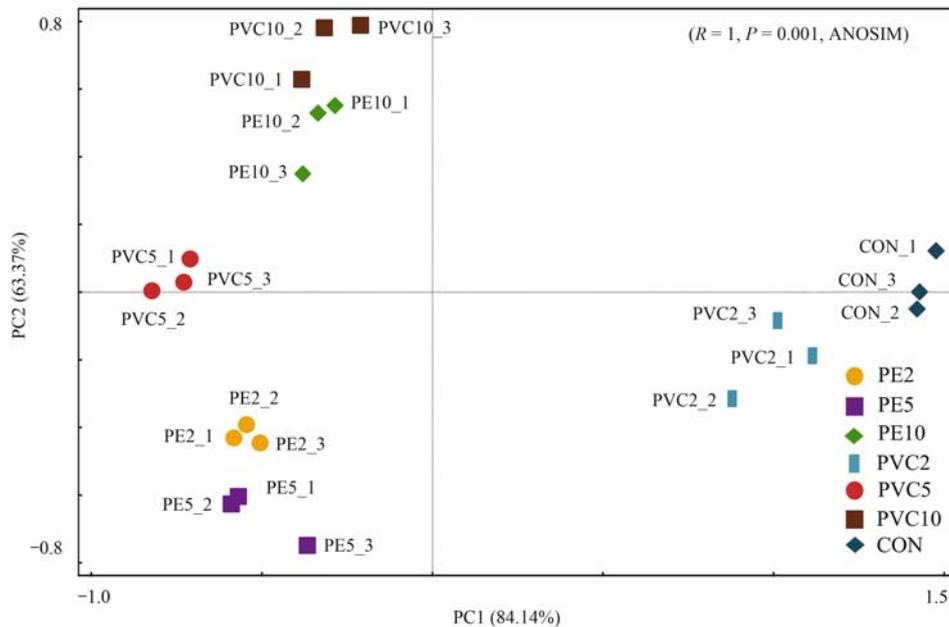
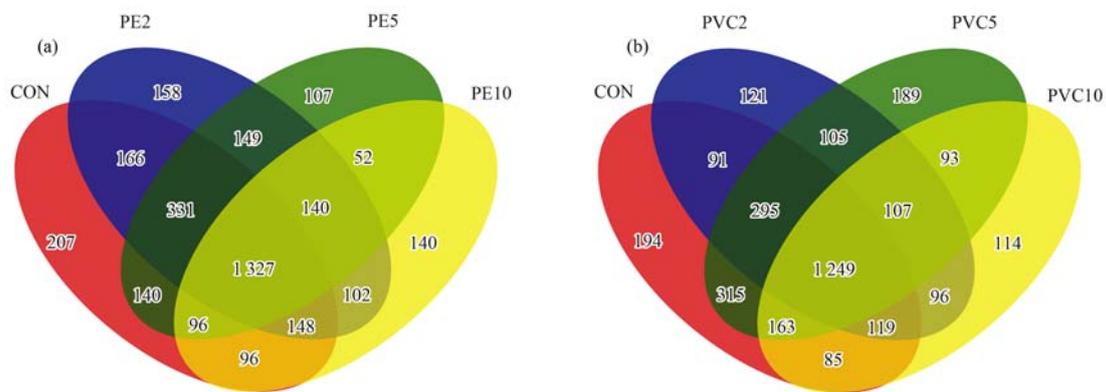


图 1 不同微塑料处理下沉积物细菌主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of bacteria in sediments treated with different microplastics



(a) 对照组和 PE 处理组之间共有 OTUs 数目; (b) 对照组和 PVC 处理组之间共有 OTUs 数目

图 2 样本组内和样本组间细菌 OTUs 数目的 Venn 图

Fig. 2 Venn diagram of the number of bacterial OTUs within and between sample groups

2.2 微塑料对沉积物细菌群落组成的影响

不同类型和丰度微塑料对沉积物细菌在门水平群落组成的影响不同(图 3), 不同处理优势菌门种类相同, 但向沉积物中添加微塑料后各物种相对丰度发生了变化, 这取决于添加微塑料的类型和丰度^[14]. 图 3 中显示了沉积物中丰度排名前 10 的细

菌门, 占所有序列读数 86.43%~97.75%, 其余细菌门被归类为“其他分类 (others)”, 其中绿弯菌门 (Chloroflexi, 19.77%~25.03%)、变形菌门 (Proteobacteria, 12.43%~19.38%) 是所有沉积物处理的优势菌, 其次是脱硫菌门 (Desulfobacterota, 12.19%~23.17%)、厚壁菌门 (Firmicutes, 9.42%

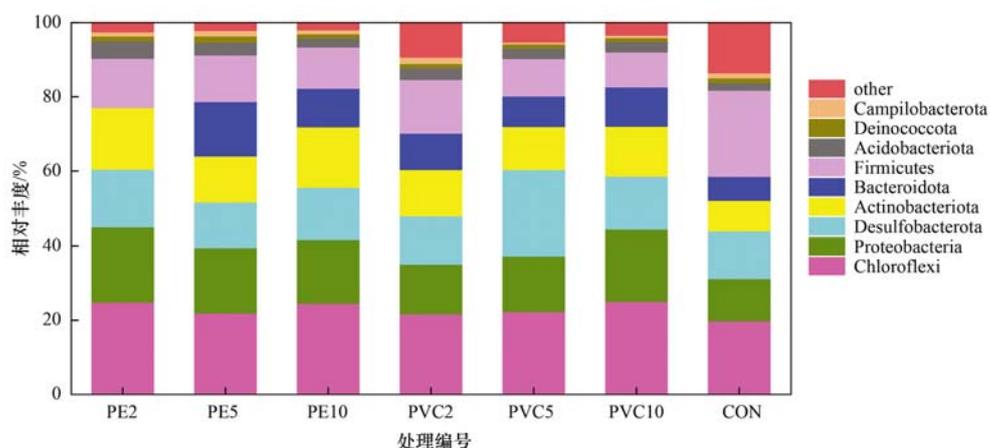


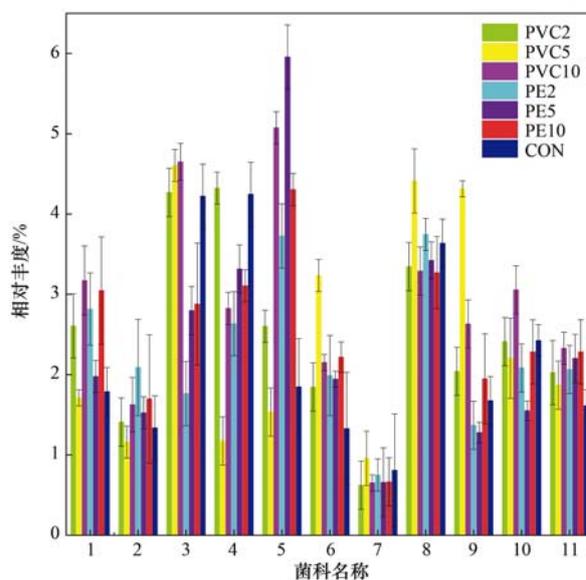
图3 微塑料处理下沉积物细菌群落基于门水平的分布

Fig. 3 Distribution of bacterial community in microplastic treated sediments based on phylum level

~23.24%)、放线菌门 (Actinobacteriota, 8.24% ~ 16.28%)、拟杆菌门 (Bacteroidota, 6.44% ~ 14.75%) 和酸杆菌门 (Acidobacteriota, 2.07% ~ 3.98%)。与对照组相比,放线菌门、拟杆菌门和酸杆菌门等相对丰度在添加微塑料后上升,后壁菌门相对丰度降低,且 PVC10 和 PE10 处理的绿弯菌门和变形菌门相对丰度最大,在总量中的比例分别为 24.50%~25.03% 和 17.22%~19.38%,脱硫菌门相对丰度在 PVC5 处理中最高 (23.17%)。

微塑料可以通过改变沉积物的理化特性或营养条件等进而影响细菌群落结构。变形菌门通常生活在营养丰富且低密度的土壤或沉积物中^[27],由于微塑料的主要成分是碳($\geq 90\%$),本研究中 PVC10 和 PE10 处理添加微塑料丰度较高,可能影响了沉积物中碳储存和转换,使变形菌门丰度较高,这也说明微塑料可能通过改变沉积物营养条件进而改变微生物群落结构。已有研究发现放线菌的几个菌属能够降解合成聚合物^[28],如 Wolińska 等^[28]的研究证明 PE 可以被链霉菌属降解(放线菌中最大的属),Lwanga 等^[29]的研究从蚯蚓肠道中分离到 4 种属于放线菌门的细菌能够显著减小 PE 微塑料的尺寸。在本研究中添加丰度 10% PE 处理的放线菌门相对丰度最高 (16.28%),可能是由于降解 PE 类的放线菌富集在微塑料上导致的,但由于微塑料颗粒较小,未能将其分离出沉积物并分析表面微生物群落,故无法判断是否是微塑料表面富集了放线菌。添加微塑料使酸杆菌群丰度增加可能与沉积物 pH 改变有关,有研究表明酸杆菌门与 pH 呈负相关,侯军华^[2]的研究发现投加聚乙烯微塑料影响土壤酸性,证实了微塑料长期积累可使土壤酸化。

图 4 为不同类型和丰度微塑料处理下属于绿弯菌门、变形菌门、脱硫菌门和放线菌门 OTUs 数目 >1% 的 11 种细菌科相对丰度的差异。结果显示,与



选择相对丰度 >1% 的细菌科; 1. Anaerolineae, 2. Caldilineaceae, 属于绿弯菌门 (Chloroflexi); 3. Xanthomonadaceae, 4. Sphingomonadaceae, 5. Burkholderiaceae, 6. Pseudomonadaceae, 7. Rhodobacteraceae, 属于变形菌门 (Proteobacteria); 8. Desulfocapsaceae, 9. Desulfosarcinaceae, 属于脱硫菌门 (Desulfobacterota); 10. Norank (Order Gaiellales), 11. Ilumatobacteraceae, 属于放线菌门 (Actinobacteriota)

图4 微塑料对特定细菌科丰度的影响

Fig. 4 Effects of microplastics on the abundance of specific bacterial families

对照组相比,伯克霍尔德氏菌 (Burkholderiaceae) 和假单胞菌科 (Pseudomonadaceae) 的相对丰度在 PE、PVC2 和 PVC10 处理呈显著上升趋势,而在 PVC5 处理呈降低趋势。与之相反,PVC5 处理中脱硫菌科 (Desulfosarcinaceae、Desulfocapsaceae) 的相对丰度显著增加。此外,PE 和较高丰度 PVC (5% 和 10%) 处理对鞘氨醇单胞菌科 (Sphingomonadaceae) 有明显的抑制作用,PE 对 Norank (Order Gaiellales) 和黄单胞杆菌 (Xanthomonadaceae) 也有抑制作用。

在本研究中添加微塑料引起 OTUs 数目发生显著变化的细菌科,如伯克霍尔德菌科、黄单胞杆菌科和假单胞菌科等均涉及氮循环^[30]. 与本研究结果相似的是 Ju 等^[31]的研究发现 PE 会增加伯克霍尔德氏菌科的相对丰度,且证明这与固氮作用有关,也有研究证明假单胞菌科菌具有较高的同步硝化和反硝化能力^[32]. 这也表明微塑料会对沉积物中的氮循环产生影响,其影响机制可能是由于添加微塑料增加沉积物孔隙度从而促进氧扩散,提高硝化作用^[33]. 最近的一项研究也证实土壤中添加 1% 聚乙烯薄膜(2 mm)显著提高了土壤孔隙度和土壤水分蒸发速率^[34]. 在 PVC5 处理中脱硫菌科相对丰度显著高于其他处理,而伯克霍尔德氏、假单胞菌科等受到抑制,可能是因为硫化物能抑制沉积物中的硝化作用,这与 Seeley 等^[21]在沉积物投加聚氯乙烯微塑料后的结果一致. 且已有研究证实在沉积物中添加聚氯乙烯微塑料 16 d 后,硫酸盐还原菌在聚氯乙烯处理过程中产生的硫化物可通过抑制硝化作用继而抑制反硝化作用^[21]. 本研究沉积物暴露于微塑料后,鞘氨醇单胞菌科相对丰度显著降低,鞘氨醇菌的

特点是能够生物降解多种对环境有害的有机化合物,如多环芳烃、二噁英和氯化苯酚等^[35],这表明微塑料的存在可能会对有机污染物的生物降解产生影响.

2.3 微塑料对细菌群落潜在功能的影响

图 5 为不同类型和丰度微塑料处理下细菌群落潜在功能(选择相对丰度 > 1% 的预测功能基因)丰度的差异. 在所有预测的微生物功能中,总共检测到 41 个 2 级功能基因(Kos),其中包括氨基酸代谢、碳水化合物代谢和能量代谢等控制着微生物生存的基本代谢功能基因,还有参与膜转运、复制、修复以及脂质代谢等高比例微生物功能基因(相对丰度 > 4%). 通过对比不同处理中功能基因的相对丰度,发现在添加较高剂量(5%、10%) PVC 和 3 种 PE 处理中膜转运蛋白(membrane transport)、细胞运动(cell motility)和外源物质生物降解及代谢(xenobiotics biodegradation and metabolism)功能有显著改善. 相反,氨基酸代谢(amino acid metabolism)、碳水化合物代谢(carbohydrate metabolism)和能量代谢(energy metabolism)功能基因丰度相比对照组有

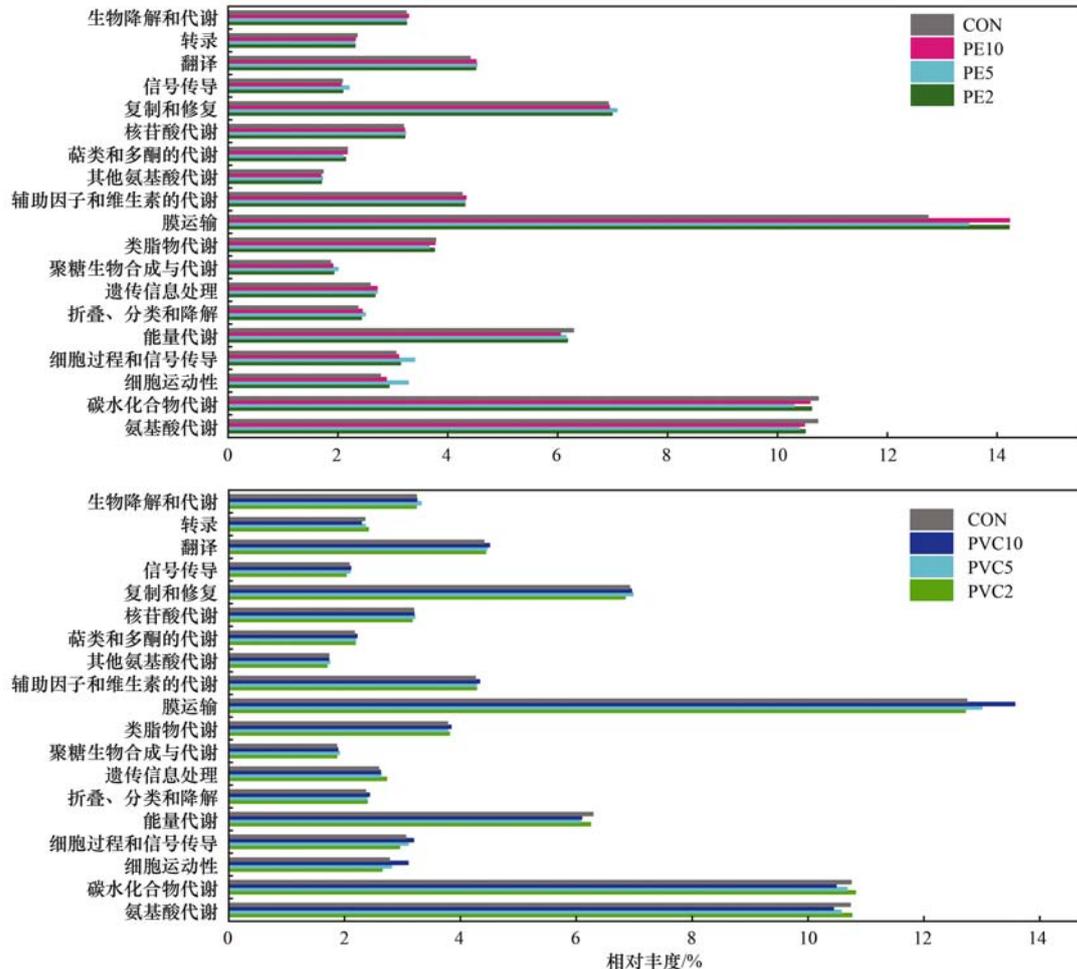


图 5 对比不同微塑料处理组与对照组对细菌 KEGG 代谢通路的影响(level2)

Fig. 5 Effects of different microplastic treatment groups and control groups on the bacterial KEGG metabolic pathway were compared(level2)

所下降。

通过 KEGG 代谢通路预测表明,添加微塑料改善了细胞膜转运蛋白和运动等功能,同时降低了一些必需的代谢途径。膜转运蛋白作为蛋白质系统发挥极其重要的作用,可以调节细菌环境中发生的不良变化,为环境风险评估提供信息^[17]。Fajardo 等^[36]的研究发现在高丰度重金属暴露下,参与转运蛋白的功能基因得以富集。本研究沉积物中添加微塑料可能刺激了细菌的膜转运蛋白功能,从而调节维持细胞内环境稳定的机制^[14]。此外,本研究还发现微塑料处理组有更高的细胞运动性,尤其是在 PE 处理中,这可能利于加快细菌向营养物质运动和躲避有毒物质以适应多变的环境^[37];除微塑料污染的影响外,非生物因素和沉积物养分的变化也影响微生物群落的功能^[38,39]。在本研究中发现添加微塑料后,与微生物必需代谢(如氨基酸代谢、碳水化合物代谢和能量代谢)有关的功能基因丰度减少,这可能与添加微塑料改变沉积物中水分和养分(如固氮作用)有关^[40]。同时,也有研究发现微塑料基质的生物膜中氨基酸代谢途径以及辅助因子和维生素的代谢途径显著增强,这也表明微塑料作为一种独特的微生物栖息地不仅能改变群落结构,还能影响微生物功能,潜在地影响生态系统中微生物群落的生态功能^[41]。

3 结论

(1)添加微塑料会显著降低细菌 OTUs 数目,不同处理 Simpson 和 Shannon 指数未见显著差异,Ace 和 Chao1 指数除 PVC2 处理与 CON 相比不存在显著差异外,其余各种处理均低于 CON,说明添加微塑料对菌群多样性影响不明显,但能显著降低菌群的丰富度。

(2)添加微塑料类型和丰度影响微生物群落组成。在门水平,不同处理优势菌种类相同,但相对丰度发生了变化:放线菌门、拟杆菌门和酸杆菌门等相对丰度在添加微塑料后上升,后壁菌门相对丰度降低。在科水平,添加微塑料引起 OTUs 发生显著变化的细菌主要涉及氮循环,例如伯克霍尔德菌科、黄杆菌科、假单胞菌科等,说明微塑料会影响氮循环;而沉积物暴露于微塑料后,鞘氨醇单胞菌科相对丰度显著降低,表明微塑料可能会影响有机污染物的生物降解。

(3)添加微塑料会影响微生物群落潜在功能,添加 PE 和较高丰度(5%和10%)PVC 能显著改善细菌膜转运蛋白、细胞运动和外来物质生物降解和代谢功能,而氨基酸代谢、碳水化合物代谢、能量

代谢功能基因丰度有所下降。

参考文献:

- [1] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment; sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, **28**(1), doi: 10.1186/s12302-015-0069-y.
- [2] 侯军华. 聚乙烯微塑料对土壤团聚体性质及微生物多样性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [3] Wang J, Peng C, Li H Y, *et al.* The impact of microplastic-microbe interactions on animal health and biogeochemical cycles: a mini-review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145697.
- [4] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672), doi: 10.1126/science.1094559.
- [5] Van Cauwenbergh L, Janssen C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **193**: 65-70.
- [6] Long M, Moriceau B, Gallinari M, *et al.* Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: impact on their respective fates [J]. *Marine Chemistry*, 2015, **175**: 39-46.
- [7] Lin L, Zuo L Z, Peng J P, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 375-381.
- [8] Wang J D, Peng J P, Tan Z, *et al.* Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2017, **171**: 248-258.
- [9] Zhang K, Xiong X, Hu H J, *et al.* Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 3794-3801.
- [10] Koelmans A A, Bakir A, Burton G A, *et al.* Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 3315-3326.
- [11] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al.* Microplastic contamination in an urban area; a case study in Greater Paris [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 592-599.
- [12] 李国强, 薛林贵, 莫天录, 等. 湖泊沉积物微生物多样性研究方法的新进展 [J]. *兰州交通大学学报*, 2015, **34**(6): 12-16, 37.
- [13] Li G Q, Xue L G, Mo T L, *et al.* New progress of research methods for microbial diversity in lake sediment [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, **34**(6): 12-16, 37.
- [14] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil [J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 907-917.
- [15] Fei Y F, Huang S Y, Zhang H B, *et al.* Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135634.
- [16] Chen H P, Wang Y H, Sun X, *et al.* Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function [J]. *Chemosphere*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125271.
- [17] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics

- using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5774-5780.
- [17] Langille M G I, Zaneveld J, Caporaso J G, *et al.* Predictive functional profiling of microbial communities using 16S rRNA marker gene sequences[J]. *Nature Biotechnology*, 2013, **31**(9): 814-821.
- [18] De Souza Machado A A, Lau C W, Till J, *et al.* Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(17): 9656-9665.
- [19] Ren X W, Tang J C, Liu X M, *et al.* Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113347.
- [20] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [21] 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.
- [22] De Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 6044-6052.
- [23] Wang J, Liu X H, Li Y, *et al.* Microplastics as contaminants in the soil environment: a mini-review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 848-857.
- [24] Hermabessiere L, Dehaut A, Paul-Pont I, *et al.* Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 781-793.
- [25] Li R L, Yu L Y, Chai M W, *et al.* The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135025.
- [26] Kong X, Jin D C, Jin S L, *et al.* Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **353**: 142-150.
- [27] Ho A, Di Lonardo D P, Bodelier P L E. Revisiting life strategy concepts in environmental microbial ecology [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(3), doi: 10.1093/femsec/fix006.
- [28] Wolińska A, Kuźniar A, Zielenkiewicz U, *et al.* *Bacteroidetes* as a sensitive biological indicator of agricultural soil usage revealed by a culture-independent approach[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **119**: 128-137.
- [29] Lwanga E H, Thapa B, Yang X M, *et al.* Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: a potential for soil restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 753-757.
- [30] Aanderud Z T, Saurey S, Ball B A, *et al.* Corrigendum: stoichiometric shifts in soil C; N; P promote bacterial taxa dominance, maintain biodiversity, and deconstruct community assemblages[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.00391.
- [31] Ju H, Zhu D, Qiao M. Effects of polyethylene microplastics on the gut microbial community, reproduction and avoidance behaviors of the soil springtail, *Folsomia candida* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 890-897.
- [32] He T X, Li Z L, Xie D T, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification with different mixed nitrogen loads by a hypothermia aerobic bacterium [J]. *Biodegradation*, 2018, **29**(2): 159-170.
- [33] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **97**: 40-49.
- [34] Wan Y, Wu C X, Xue Q, *et al.* Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **654**: 576-582.
- [35] Waigi M G, Sun K, Gao Y Z. Sphingomonads in microbe-assisted phytoremediation: tackling soil pollution[J]. *Trends in Biotechnology*, 2017, **35**(9): 883-899.
- [36] Fajardo C, Garea-Cantalejo J, Botías P, *et al.* New insights into the impact of nZVI on soil microbial biodiversity and functionality [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2019, **54**(3): 157-167.
- [37] Kisand V, Valente A, Lahm A, *et al.* Phylogenetic and functional metagenomic profiling for assessing microbial biodiversity in environmental monitoring[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0043630.
- [38] Mickan B S, Abbott L K, Solaiman Z M, *et al.* Soil disturbance and water stress interact to influence arbuscular mycorrhizal fungi, rhizosphere bacteria and potential for N and C cycling in an agricultural soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(1): 53-66.
- [39] Samaddar S, Han G H, Chauhan P S, *et al.* Changes in structural and functional responses of bacterial communities under different levels of long-term compost application in paddy soils [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, **29**(2): 292-296.
- [40] Chen J H, Wu Q F, Li S H, *et al.* Diversity and function of soil bacterial communities in response to long-term intensive management in a subtropical bamboo forest [J]. *Geoderma*, 2019, **354**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113894.
- [41] 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.

CONTENTS

| | |
|---|--|
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing | AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251) |
| Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model | FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262) |
| Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 | ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274) |
| Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence | TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284) |
| Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem | ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294) |
| Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City | SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304) |
| Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan | REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317) |
| Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou | YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329) |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City | BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336) |
| Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde | HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343) |
| Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China | FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355) |
| Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain | ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363) |
| Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology | HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373) |
| Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity | CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383) |
| Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China | YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395) |
| Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 | CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403) |
| Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation | CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415) |
| Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis | SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427) |
| Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert | ZENG Jing-hai, WANG Can (2436) |
| Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin | ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448) |
| Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin | LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459) |
| Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River | WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467) |
| APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen | SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476) |
| Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments | XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489) |
| Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City | HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500) |
| Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake | HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510) |
| Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication | ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518) |
| Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology | MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527) |
| Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm | ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537) |
| Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin | LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548) |
| Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake | LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557) |
| Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake | YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566) |
| Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment | CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575) |
| Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River | LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586) |
| Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River | XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595) |
| Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments | LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606) |
| Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period | ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614) |
| Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir | GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624) |
| Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake | JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633) |
| Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes | FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640) |
| Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂ | XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650) |
| Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite | JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662) |
| Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material | ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673) |
| Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates | LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685) |
| Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors | LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699) |
| Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions | ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709) |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area | CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719) |
| Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil | ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732) |
| Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils | MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741) |
| Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem | WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751) |
| Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field | XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758) |
| Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers | XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770) |
| Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil | SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779) |
| Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain | GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788) |
| Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain | HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802) |
| Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland | WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812) |
| Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China | LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822) |