



鄱阳湖湿地不同水期微塑料表面细菌群落分布特征

赵俊凯¹, 俞锦丽^{2,3}, 罗思琦¹, 简敏菲^{1,3}, 胡启武^{2,3*}, 刘淑丽¹

1 江西师范大学生命科学学院 生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室, 江西 南昌 330022

2 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022

3 江西师范大学 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022

赵俊凯, 俞锦丽, 罗思琦, 简敏菲, 胡启武, 刘淑丽. 鄱阳湖湿地不同水期微塑料表面细菌群落分布特征[J]. 微生物学报, 2024, 64(8): 3030-3046.

ZHAO Junkai, YU Jinli, LUO Siqi, JIAN Minfei, HU Qiwu, LIU Shuli. Distribution characteristics of bacterial communities on microplastic surface in wet and dry seasons in Poyang Lake wetland[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(8): 3030-3046.

摘要:【目的】微塑料(粒径<5 mm)具有疏水表面、吸附能力强、难降解等特征,可长期留存于环境中,并且易被微生物所定殖,对生态系统存有潜在风险。本研究以鄱阳湖湿地微塑料表面微生物为研究对象,探究不同水期微塑料表面细菌群落结构分布特征。【方法】分别在丰水期和枯水期采集湿地水体、沉积物及沉积物中微塑料样品。借助16S rRNA基因高通量测序技术,对样品的细菌多样性及群落结构展开分析。【结果】不同水期环境中的细菌丰富度和多样性皆高于微塑料表面。丰水期水体和沉积物细菌群落结构相似,环境与微塑料表面细菌结构差别较大,枯水期水体和沉积物以及微塑料表面细菌群落结构差别均较大。环境样品中的细菌门水平上以变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和放线菌门(*Actinobacteria*)为主,而丰水期微塑料表面细菌群落主要包括变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门(*Firmicutes*),枯水期微塑料表面细菌群落与环境中相似。微塑料表面细菌群落中假单胞菌属(*Pseudomonas*)相对丰度比环境中高。丰水期和枯水期细菌群的关键种中大部分属于变形菌门,包括鞘氨醇单胞属(*Sphingomonas*)等。【结论】本研究揭示了鄱阳湖湿地不同水期环境中以及微塑料表面细菌群落结构差异,研究可以丰富和完善我国湖泊湿地中微塑料的相关知识,为湖泊环境治理与管控提供理论支持与依据,以便对鄱阳湖湿地进行生态系统管理。

关键词: 鄱阳湖; 微塑料; 丰水期; 枯水期; 细菌分布

资助项目: 国家自然科学基金(42007389, 32060275)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42007389, 32060275).

*Corresponding author. E-mail: huqiwu@jxnu.edu.cn

Received: 2024-02-01; Accepted: 2024-05-22; Published online: 2024-05-24

Distribution characteristics of bacterial communities on microplastic surface in wet and dry seasons in Poyang Lake wetland

ZHAO Junkai¹, YU Jinli^{2,3}, LUO Siqu¹, JIAN Minfei^{1,3}, HU Qiwu^{2,3*}, LIU Shuli¹

1 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Bioresource Utilization, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China

2 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China

3 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China

Abstract: [Objective] Microplastics (particle size < 5 mm) with hydrophobic surface, strong adsorption capacity, and difficult degradation can be retained in the environment for a long time and easily colonized by microorganisms, which poses a potential risk to the ecosystem. To study the distribution characteristics of microorganisms on the surface of microplastics in the wetland of Poyang Lake in wet and dry seasons. [Methods] Samples of water, sediments, and microplastics in sediments were collected from the wetland during the wet and dry seasons. The bacterial diversity and community structure in the samples were analyzed by high-throughput sequencing of the 16S rRNA gene. [Results] The richness and diversity of bacteria in the environment were higher than those on the microplastic surface in wet and dry seasons. During the wet season, the bacterial community structure was similar between the water and sediment samples and had large differences between the environment and the microplastic surface. During the dry season, the bacterial community structure was different among different samples. At the phylum level, the bacteria in the environment were dominated by *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, and *Actinobacteria*, while the bacteria on the microplastic surface during the wet season mainly included *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, and *Firmicutes*. The dominant bacterial phyla on the microplastic surface were similar to those in the environment during the dry season. The relative abundance of *Pseudomonas* on the microplastic surface was higher than that in the environment. Most of the keystone bacterial species in the wet and dry seasons belonged to *Proteobacteria*, including *Sphingomonas*. [Conclusion] This study reveals the differences in the bacterial community structure in the environment and on the microplastic surface in the Poyang Lake wetland in wet and dry seasons. The findings can enrich the knowledge about microplastics in lake wetlands in China and provide a theoretical basis for the management of lake environments including the Poyang Lake wetland.

Keywords: Poyang Lake; microplastics; wet season; dry season; bacterial distribution

塑料因具有价格低廉、良好的可塑性及坚固耐用等优势特质而在多种领域中获得了广泛的应用^[1]。研究表明,每年约有1 000万t塑料进入海洋,预计至2050年全球的海洋塑料垃圾质量将首次超过海洋鱼类的总质量^[2]。自然条件下塑料不易被降解而是在环境中不断积累^[3],在长期的物理、化学、生物作用下降解为更小的塑料颗粒^[4],其中粒径<5 mm的被称为微塑料(microplastics, MPs)^[5]。微塑料作为一种新型污染物^[6],分布范围广,而且相对表面积比较大、疏水性强,具有较强的吸附能力^[7],会吸附周围环境中的有害物质^[8-9]。微塑料独特的性质促使其表面形成生物膜^[10],成为有害微生物的独特栖息地^[11],可能对环境造成严重危害^[12-13]。近年来微塑料带来的不利影响受到广泛关注^[14],在沉积物、土壤和水体等介质中,甚至是人类器官^[15]中都检测出微塑料,其对生态系统和人类健康具有潜在风险^[16]。

鄱阳湖位于江西省北部,是中国最大的淡水湖^[17],其生物多样性十分丰富,为多种稀缺物种提供栖息地^[18]。鄱阳湖属于过水吞吐型湖泊^[19],其水文特征较为特别,丰枯季节水位差可达15 m^[20]。近年来,鄱阳湖的微塑料污染问题受到广泛关注,鄱阳湖湿地环境中以及生物体内均发现存在微塑料颗粒^[21]。然而,针对不同水期条件下鄱阳湖湿地环境以及微塑料表面微生物群落组成结构及其多样性变化的研究相对薄弱^[22-24]。因此,深入探究鄱阳湖湿地不同水期微生物群落结构与功能,对维持鄱阳湖区域生态环境的健康和可持续发展有着重要意义。

本研究选取鄱阳湖湿地三泥湾区域作为研究区,分别在丰水期的8月份和枯水期的12月份对湿地的水体、沉积物以及沉积物中的微塑料样品进行采集。通过测序手段测定样品中细菌群落多样性和群落组成,剖析不同水期鄱阳

湖湿地环境中与微塑料表面细菌群落的结构差异,探讨丰水期和枯水期微塑料对其表面细菌群落结构的影响及其变化驱动机制,进一步揭示鄱阳湖微塑料污染的潜在生态隐患,为鄱阳湖湿地的生态系统管理提供基础数据以及科学决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

鄱阳湖(115°49′–116°46′E, 28°24′–29°46′N),是我国面积最大的淡水湖泊,为多种生物提供了重要栖息地,也是重要的候鸟迁徙地,同时发挥着重要的生态系统服务功能。鄱阳湖属过水吞吐型湖泊,洪枯季的湖面面积和蓄水量差异较大,5–9月为丰水期,10月至次年2月为枯水期,湿地水位随着季节性洪枯水位的变化而变化^[25]。本研究的研究区设置在南矶山湿地三泥湾区域,如图1所示。

1.2 样品采集

采样时间为2023年8月29日丰水期以及12月13日枯水期。使用消毒过的不锈钢铲收集50 cm×50 cm的沉积物(深度为0–10 cm),将其放置于经乙醇消毒处理的白盘中。使用经过灭菌处理的镊子把疑似的微塑料拣出,并用超纯水清洗,随后放入10 mL离心管中。收集2 L(深度为10 cm)的未经过滤的湖水并存放于已灭菌的玻璃瓶中。采集1 kg表层沉积物,充分混合后取一部分放入10 mL离心管中。水体和沉积物各采集3个重复。所有样品均置于冷藏箱保存,立即运至实验室,样品在–20 °C冰箱中储存。

1.3 样品预处理

野外采集样品,主要通过视觉判断是否为微塑料样品,在实验室内将处理好的微塑料样品置于密闭无菌培养皿内,利用傅里叶变换红



图 1 鄱阳湖区域的采样点图 地图来源江西省自然资源厅, 江西省地图册(jiangxi.gov.cn), 审图号为赣 S(2023)28 号

Figure 1 The sampling location of the Poyang Lake region. The map comes from the Department of Natural Resources of Jiangxi province, Jiangxi Provincial Atlas (jiangxi.gov.cn), and the plan review number is Gan S (2023) 28.

外光谱(PerkinElmer 公司)鉴定微塑料的聚合物类型后进行分类, 并将其存放于 -20°C 冰箱, 以便后续 DNA 的提取。

1.4 DNA 提取

使用 MOBIO PowerSoil DNA 试剂盒(QIAGEN 公司)对采集的样品进行 DNA 提取。沉积物样品用量 0.5 g, 水体样品用 0.22 μm 滤膜抽滤, 然后将滤膜用无菌刀切好后放入 PowerBead Tube 中, 将采集的微塑料于超纯水中恒温振荡后超声清洗, 然后 4°C 、8 000 r/min 离心 10 min, 取沉淀放入到 PowerBead Tube 中。后续按照试剂盒中的指示, 提取样品总 DNA。

最后利用 1%琼脂糖凝胶电泳技术和 NanoDrop 仪器(上海美谱达仪器有限公司)对其纯度和浓度进行精确检测。提取的 DNA 放置于 -80°C 冰箱中保存, 以减少其降解损失。

1.5 PCR 扩增

以鉴定好的 DNA 作为模板, 使用带有 Barcode 的通用引物对 338F (5'-ACTCCTACG GGAGGCAGCA-3')和 806R (5'-GGACTACHV GGGTWTCTAAT-3')对细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区域进行 PCR 扩增。PCR 反应体系: 10 \times Buffer 2 μL , dNTPs (2.5 mmol/L) 2 μL , 上、下游引物(10 $\mu\text{mol/L}$)各 0.8 μL , *rTaq* DNA polymerase (10 $\mu\text{mol/L}$) 0.2 μL , BSA 0.2 μL , 模板 DNA 10 ng, 加水至 20 μL 。PCR 反应条件: 95°C 预变性 3 min; 95°C 变性 30 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 45 s, 28 个循环; 72°C 终延伸 10 min。收集 PCR 产物 3 μL , 用 1%琼脂糖凝胶电泳检测, 使用 DNA 凝胶回收试剂盒(Axygen Biosciences 公司)纯化回收 DNA。使用 Illumina NovaSeq 测序平台对其开展高通量测序。

1.6 序列处理及数据处理

使用 Trimmomatic v0.33 软件, 对测序得到的 Raw Reads 进行过滤; 然后使用 cutadapt 1.9.1 软件进行引物序列的识别去除, 得到不包含引物序列的 Clean Reads; 其次使用 USEARCH v10.0 软件, 通过 overlap 对每个样品的 Clean Reads 进行拼接, 然后依据不同区域的长度范围, 对拼接后的数据进行长度过滤操作; 最后使用 QIIME 2 2020.6 软件中的 dada2 方法进行去噪, 设置序列相似性为 97%, 得到操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)代表序列。以 Silva 作为参考数据库进行分类学注释, 据物种注释结果, 选取每个样品中门、属分类丰度位居前 10 的物种, 生成物种分布图, 从中可以得到各物种所占比例, 进而判断相对丰度大小。

通过 α 多样性分析可以得出各样品的物种丰度及其多样性。主成分分析可以对环境和微塑料表面细菌群落结构进行比较。根据相关性网络分析中几个参数的比较可以分析得出微塑料表面细菌群落的关键种。

2 结果与分析

2.1 微塑料聚合物类型分析

傅里叶变换红外光谱分析结果表明, 本研究中所采集的微塑料聚合物类型主要包括聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)和聚苯乙烯(polystyrene, PS) (图 2)。

2.2 鄱阳湖湿地不同水期环境及微塑料中细菌群落丰富度和多样性

对丰水期环境以及微塑料测序数据进行去噪, 得到 OTU 代表序列为 942 条, 枯水期细菌原始数据处理后共得到 1 036 条 OTUs。利用软件 USEARCH v10.0 对多样性数值进行评估, 覆盖率均为 1.00。稀释性曲线条数增加且曲线趋向平缓, 表明实验样品测序完整、序列充分(图 3)。

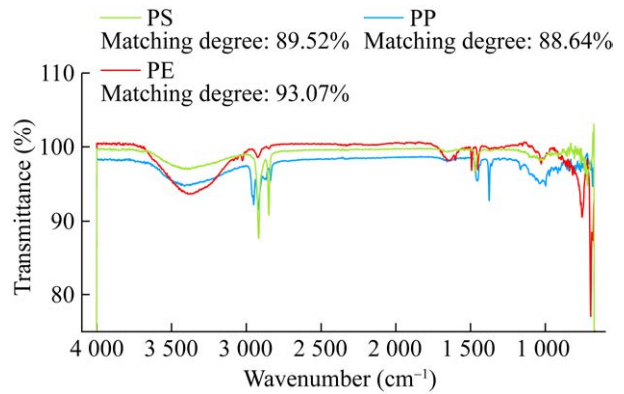


图 2 不同类型微塑料红外光谱图

Figure 2 Fourier transform infrared spectrometer of different types of microplastics. PS: Polystyrene; PP: Polypropylene; PE: Polyethylene.

如图 4 所示, 丰水期环境与微塑料表面细菌共有 OTUs 数目 313 个, 枯水期环境与微塑料表面细菌共有 OTUs 数目 273 个, 3 种基质中共有的 OTUs 表明这些细菌在各基质都能生存。环境与微塑料表面均存在独特的 OTUs, 其中微塑料表面独特的 OTUs 最多且显著高于环境, 水体中的 OTUs 最少。

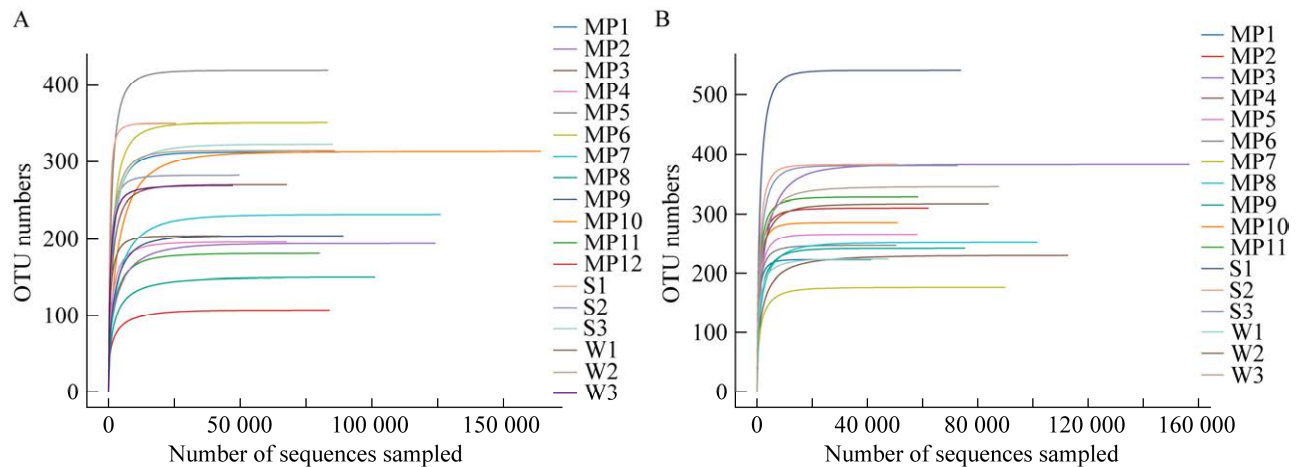


图 3 丰水期(A)和枯水期(B)的环境和微塑料样品稀释曲线 MP: 微塑料; S: 沉积物; W: 水体. 数字代表组数序号(下同)

Figure 3 Dilution curves of environmental and microplastic samples during the wet season (A) and dry season (B). MP: Microplastics, S: Sediment, W: Water. The number represents the group number (same as below).

基于 α 多样性中 Chao1 指数的大小与物种丰度有关, 数值越大, 物种丰度也越高。在不同水期, 沉积物中细菌的物种丰度均比水体以及微塑料中高, 同时微塑料表面的细菌的物种丰度略低于水体, 并且枯水期的沉积物、水体和微塑料表面细菌的 Chao1 值均大于丰水期。通过香农(Shannon)指数和辛普森(Simpson)指数来判断物种多样性, 数值越小多样性越小。在不同时期, 微塑料表面细菌的丰富度、多样性和均匀度均低于环境样品, 呈现为沉积物 >

水体 > 微塑料(表 1)。

基于样品细菌群落的 OTUs 均一化后分类水平分析, 主坐标分析法(principal co-ordinates analysis, PCoA)可以用来对样品进行分类, 同时可以区分各样品的物种多样性差异。基于 β 多样性分析进行主坐标分析, 图中距离相距越近, 其相似性越高。如图 5A 所示, 在丰水期 PC1 和 PC2 的解释度为 41.46%, 同时丰水期中微塑料样品主要分布在 PCoA 图的右边区域, 而水体、沉积物交错分布在左边, 表明丰水期水体

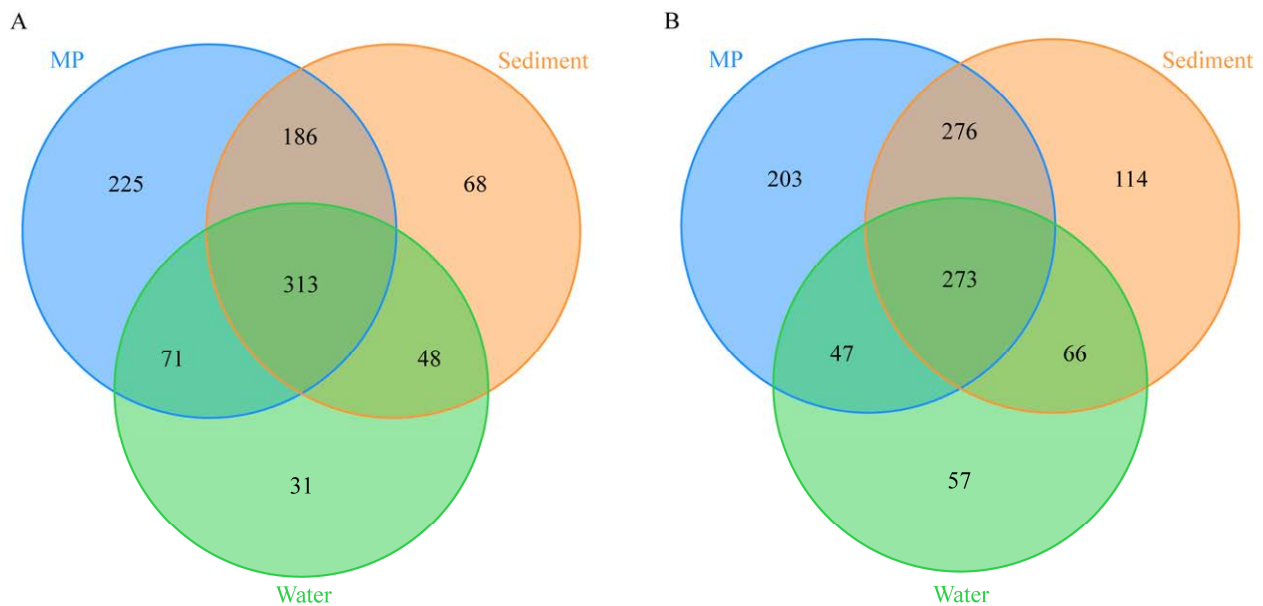


图 4 丰水期(A)和枯水期(B)的环境和微塑料表面 Venn 图

Figure 4 Venn diagrams of environment and microplastic surface in the wet season (A) and dry season (B).

表 1 鄱阳湖湿地环境及微塑料表面细菌 α 多样性指数

Table 1 The alpha diversity index of bacteria on the microplastics' surface and in the wetland environment of Poyang Lake

Substrate	Wet season				Dry season			
	Coverage	Chao1 index	Simpson index	Shannon index	Coverage	Chao1 index	Simpson index	Shannon index
MP	1.00	244.30a	0.90a	4.78a	1.00	267.50a	0.93a	5.69a
Sediment	1.00	318.30a	0.97b	6.69b	1.00	434.70a	0.97b	6.96b
Water	1.00	262.00	0.95ab	5.96ab	1.00	295.30a	0.97ab	6.39ab

Different lowercase letters after the same column of data in the same period indicate that the differences between treatments reached the significant level ($P < 0.05$).

和沉积物的细菌群落结构相似，但是与微塑料中的细菌群落结构相差较大。枯水期 PC1 与 PC2 的解释度为 35.33%，而微塑料和沉积物样品相较于丰水期距离缩短，与水体距离增加(图 5B)。

如图 6 所示，置换多元方差分析(permutational

multivariate analysis of variance, PERMANOVA)得到的 R^2 越大代表分组对差异的解释度越高，分组差异越显著。该结果也说明枯水期水体，沉积物与微塑料细菌群落差异较大，而丰水期的环境细菌群落差异较小，与上述研究结果一致。

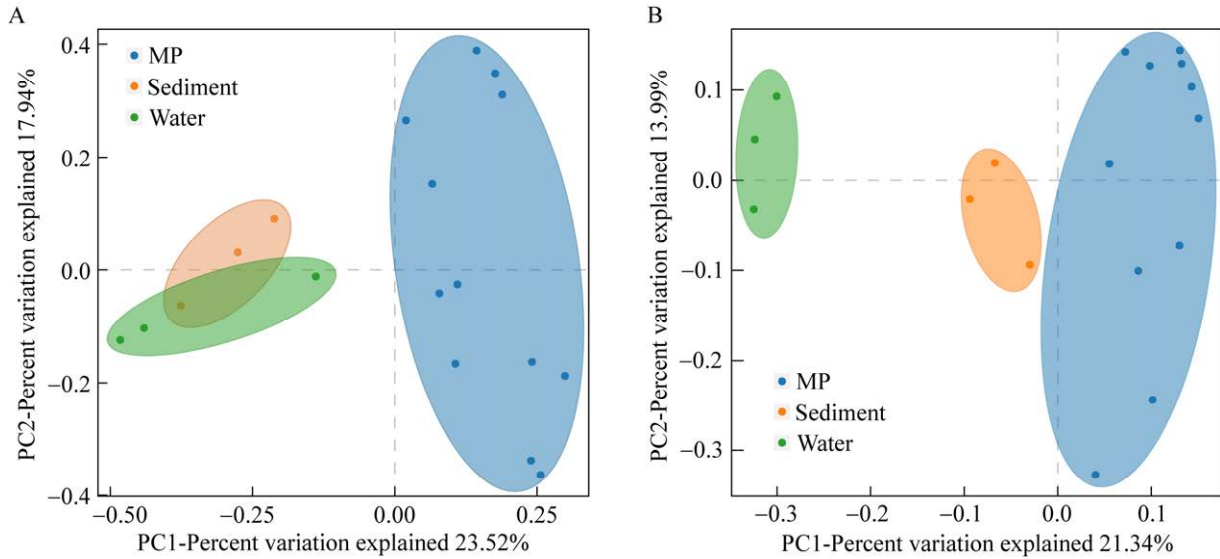


图 5 丰水期(A)和枯水期(B)的细菌主坐标分析

Figure 5 Principal co-ordinate analysis (PCoA) of bacteria in the wet season (A) and dry season (B).

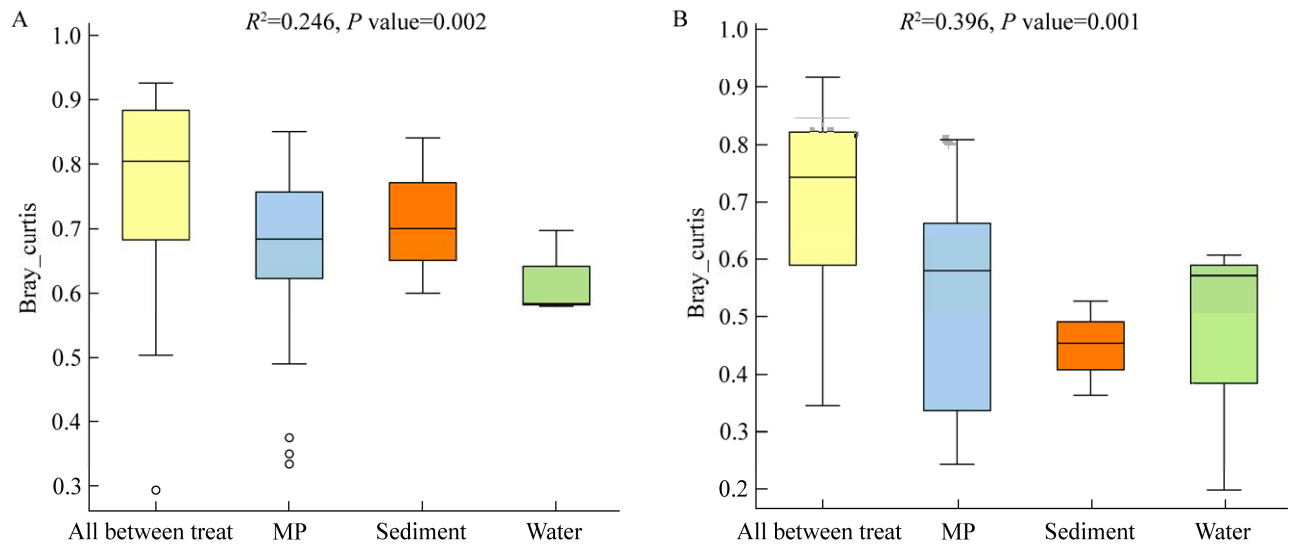


图 6 丰水期(A)和枯水期(B)的置换多元方差分析

Figure 6 PERMANOVA analysis of bacteria in the wet season (A) and dry season (B).

2.3 鄱阳湖湿地不同水期环境及微塑料中细菌群落结构组成

根据不同水期环境中和微塑料表面细菌门水平分布上分类组成, 筛选其中相对丰度前 10 的物种, 并将其他物种合并为 Others (下同)。如图 7 所示, 微塑料表面细菌群落结构与环境存在明显差异。在丰水期环境样品中变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)以及放线菌门(*Actinobacteria*)相对丰度较高, 而微塑料样品中变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门(*Firmicutes*)相对丰度较高。枯水期的变形菌门、拟杆菌门、放线菌门相对丰度较高, 相较于丰水期拟杆菌门的相对丰度有所增加, 微塑料样品与沉积物的细菌组成变得更为接近, 其表面变形菌门相对丰度有所降低而拟杆菌门占比增高。蓝细菌门(*Cyanobacteria*)在水体样品中的占比显著上升且成为优势菌门之一。

根据不同水期环境中和微塑料表面细菌属水平上分类组成, 其中只显示相对丰度前 10 的物种, 未分类的属以 unclassified 作为标记。如图 8 所示, 丰水期微塑料表面细菌群落中马赛菌属(*Massilia*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)相对丰度较高, 在环境中相对丰度小, 而环境中的黄杆菌属(*Flavobacterium*)相对丰度较高。枯水期马赛菌属在沉积物以及沉积物微塑料表面相对丰度相较于丰水期有明显升高, 而水体中相对丰度却降低。同时微塑料表面黄杆菌属的相对丰度较于丰水期也升高, 并且微塑料表面假单胞菌属的相对丰度也较环境中要更高。

2.4 相关性网络分析

根据各样品中的相对丰度及变化情况, 使用斯皮尔曼(Spearman)秩相关性分析, 筛选出相关性 >0.1 且 p 值 <0.05 的数据, 建立细菌属水平相关网络图。相关网络分析被用来识别微生物群落中的关键种, 网络通常由边和节点构成,

一条边由两个节点连接而成。圆圈表示细菌物种, 其大小表示物种平均丰度大小; 线条表示两者间相互作用关系, 黄色为正相关, 蓝色为负相关, 同时线条粗细程度表示相关性强弱。如图 9 所示, 丰水期节点数量为 80, 枯水期为 79, 此处丰水期展示相关性最高的前 48 个属, 枯水期展示前 50 个属。通过网络节点重要性衡量指标“中介中心性”“紧密中心性”和“点度中心性”3 个参数来说明节点的重要性。这 3 个参数的数值越大, 其重要性越高^[26], 并由此筛选出丰水期和枯水期微塑料表面细菌群落中的关键种^[27]。如图 9A 所示, 丰水期关键种分别为未分类的细菌(unclassified_Bacteria)、未分类根瘤菌科(unclassified_Pedospaeraceae)、未分类鞘氨醇单胞菌科(unclassified_Sphingomonadaceae)、甲基娇养杆菌属(*Methylotenera*)、未分类噬几丁质菌科(unclassified_Chitinophagaceae)等; 图 9B 中枯水期关键种为紫色杆菌属(*Janthinobacterium*)、unclassified_Mitochondria、未分类丛毛单胞菌科(unclassified_Comamonadaceae)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、土地杆菌属(*Pedobacter*)等。

3 讨论

3.1 环境与微塑料表面细菌群落物种多样性特征

一般情况, 微生物群落的丰富度和多样性指数越高, 其群落稳定性就越高^[28], 本研究中不同水期的微塑料表面细菌群落物种多样性同周围水体和沉积物存在显著差异。微塑料表面细菌群落丰富度和多样性皆低于周围水体和沉积物, 表明微塑料表面细菌群落结构仍处于非稳定阶段, 这与 Liu 等^[29]的研究结论一致。沉积物的细菌群落丰富度和多样性最高且与微塑料表面共存 OTUs 数量多, 表明沉积物是细菌群落重要的“源”^[30], 为微塑料提供丰富细菌微

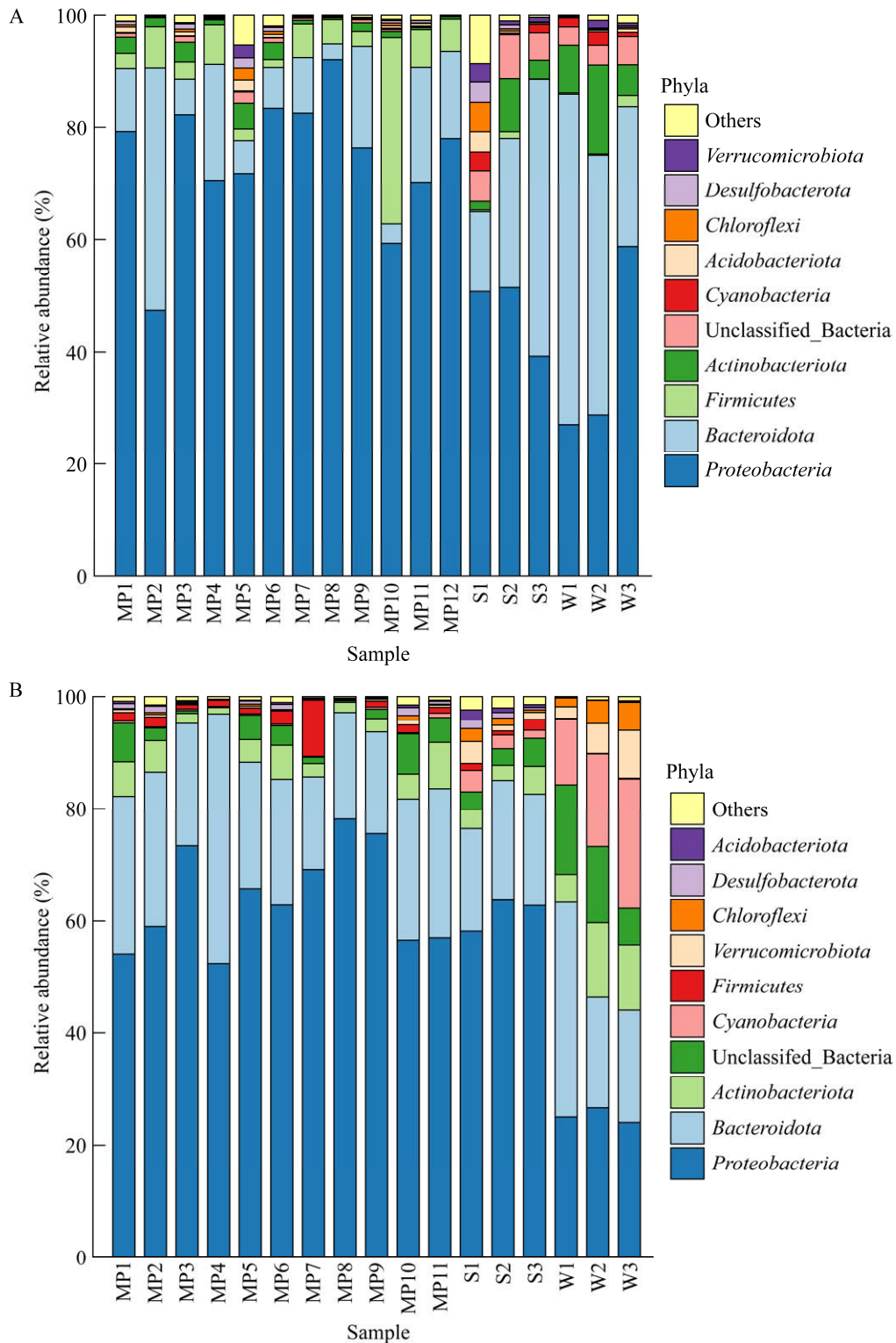


图 7 丰水期(A)和枯水期(B)环境中及微塑料表面细菌门水平分布柱状图

Figure 7 The horizontal distribution of bacterial phyla in the environment and on the microplastic surface during the wet season (A) and the dry season (B).

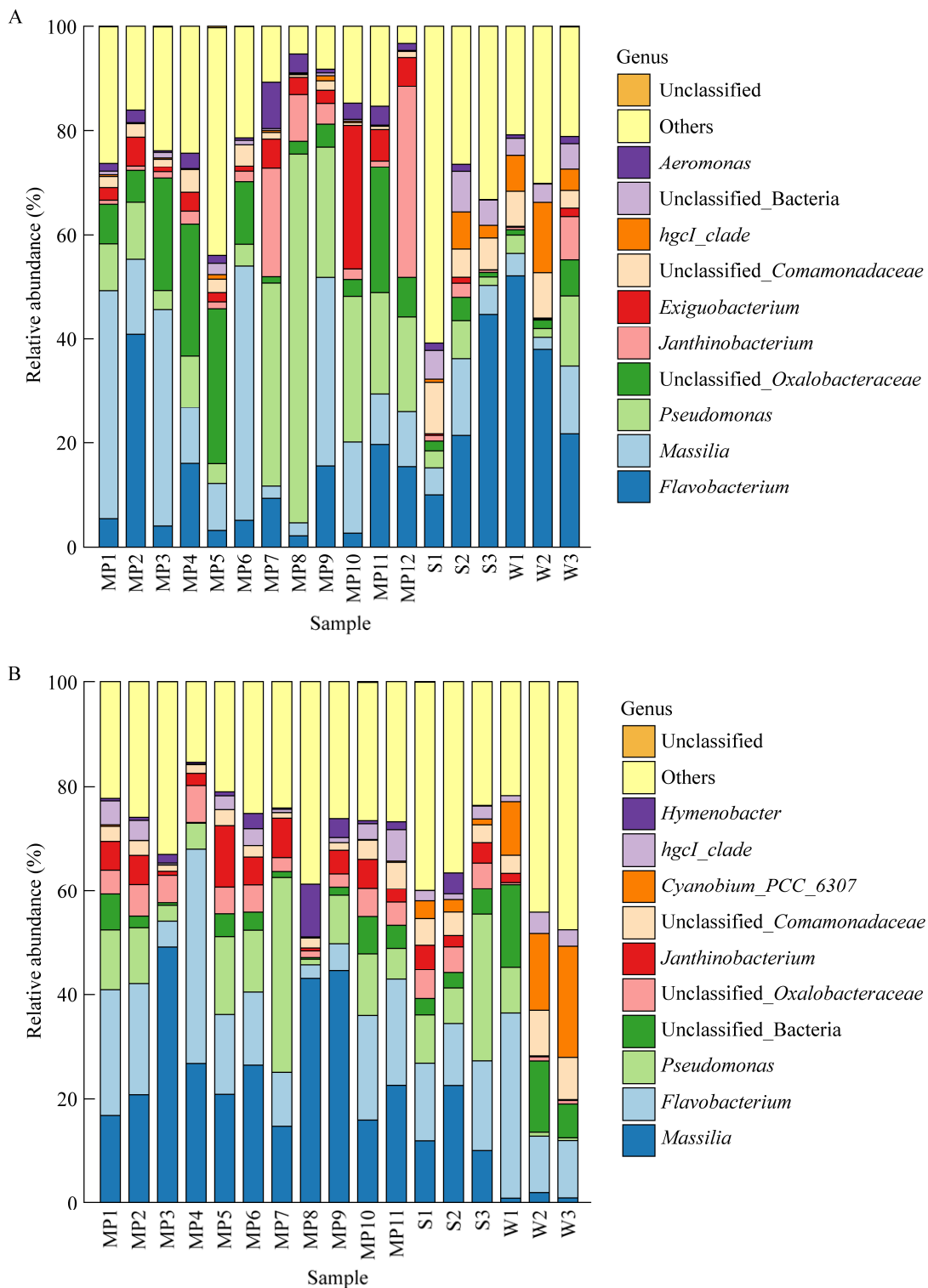


图 8 丰水期(A)和枯水期(B)环境中及微塑料表面细菌属水平分布柱状图

Figure 8 The horizontal distribution of bacterial genus in the environment and on the microplastic surface during wet season (A) and dry season (B).

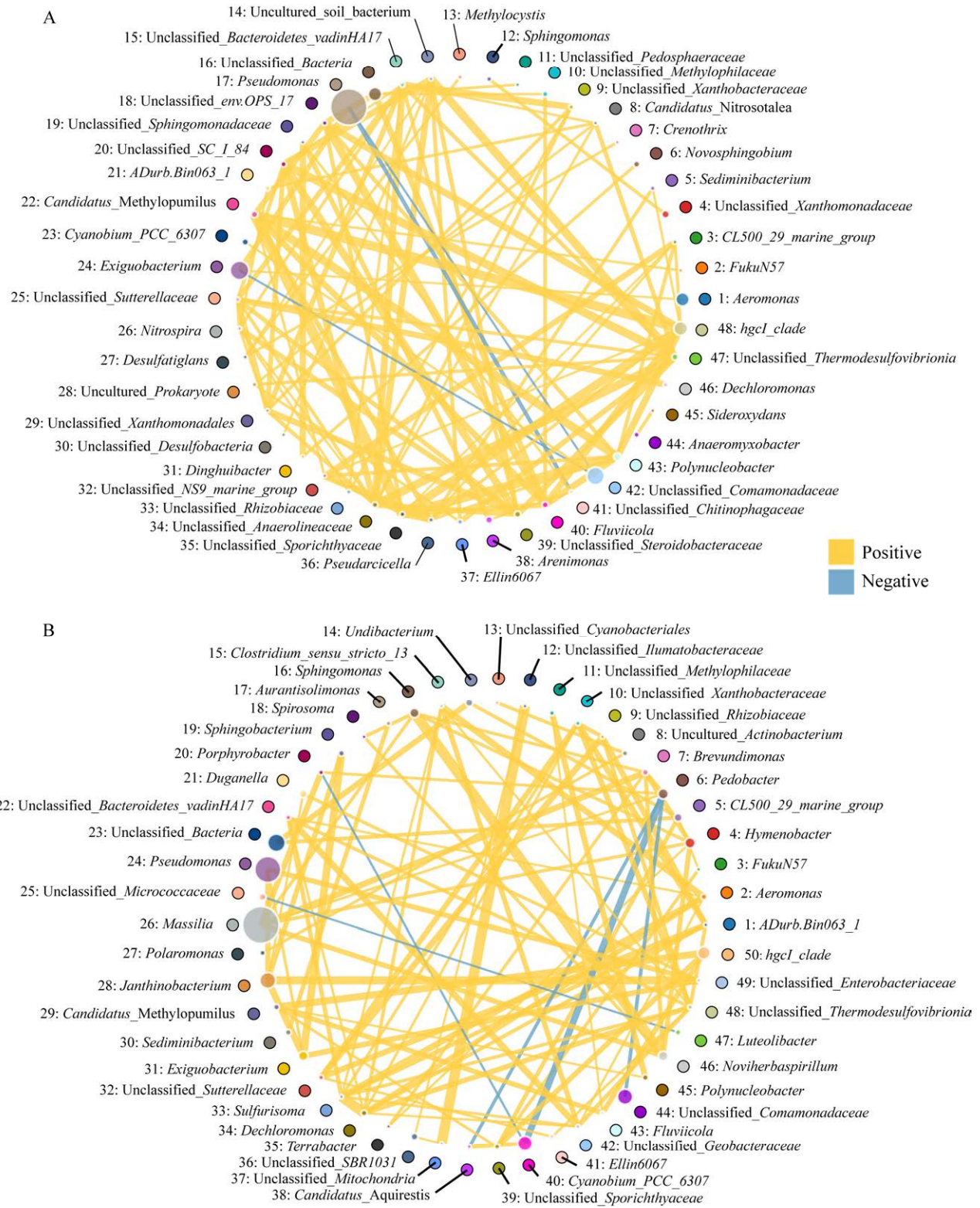


图 9 丰水期网络图(A)和枯水期网络图(B)
 Figure 9 Network diagrams for wet season (A) and dry season (B).

生物群落^[31], Hoellein 等^[32]和刘淑丽等^[26]的研究中也有相似结论。

本研究中微塑料表面细菌结构与环境存在显著差异, 即微塑料可以为细菌提供独特的生态位, 选择性地富集一些细菌^[33], 如假单胞菌属^[34]等。丰水期水体和沉积物表面细菌群落结构相似可能是由于丰水期大量河水进入湖中导致沉积物的再悬浮^[26]的结果。相较于水体, 枯水期微塑料表面的细菌群落结构和沉积物更为相似, 水体和沉积物之间也存在显著差异。这代表微塑料表面细菌结构逐渐趋向稳定^[35]。相较于丰水期, 枯水期水体中悬浮的沉积物沉降, 使水体和沉积物中微生物群落趋向稳定, 与周围水体的细菌相似性降低。Sun 等^[36]在中国桑沟湾海水养殖区研究中也相似的结论, 研究发现周围海水给予微塑料丰富的菌群来源, 随时间流逝, 其与周围海水的菌群结构差异越发显著。

3.2 环境与微塑料表面细菌群落结构特征

门水平上, 微塑料表面细菌群落中常被检测到的主要为变形菌门、拟杆菌门以及厚壁菌门^[37], Yang 等^[38]在珠江三角洲河流的研究结果与此相似。本研究发现无论丰枯水期, 变形菌门在微塑料表面相对丰度显著高于周围环境样品, 呈现为丰水期高于枯水期。微塑料表面细菌主要来源于周围环境^[39], 不同水期细菌群落结构的差异可能与微塑料在环境中存在的时间有关^[40], 如 Zhai 等^[41]所述变形菌门为微塑料表面的初级定殖者, 拟杆菌门为次级定殖者^[42]。本研究中与丰水期相比, 枯水期微塑料表面变形菌门相对丰度下降, 拟杆菌门相对丰度增加, 而拟杆菌门的相对丰度高于丰水期, 因此枯水期微塑料可能处于次级定殖阶段^[43]。属水平上, 假单胞菌属、马赛菌属是本研究中微塑料表面的优势菌属。杨恩东等^[44]研究中发现马赛菌属广泛存在于环境中, 其具有溶磷、降解多环芳

烃菲等功能。李胥等^[45]在青岛近海对 PP 塑料研究中发现, PP 附着细菌在富集过程中假单胞菌属占绝对优势; McCormick 等^[39]的研究表明假单胞菌属在 MPs 表面有富集现象, 假单胞菌属在塑料上的含量是非塑料的 15 倍, 相对丰度占优。本研究中假单胞菌属相对丰度较高却非最高, 不同研究的结果存在差异可能与地理环境、季节等因素^[46]以及测定样本的细菌定殖阶段不同^[43]等有关。上述马赛菌属和假单胞菌属常在微塑料上检测到^[30,47], 可能是目前微塑料细菌群落研究重点。

微塑料会富集与塑料降解有关的细菌组合^[48]。本研究中微塑料表面高丰度的假单胞菌是海洋中人工表面的早期定殖菌属之一^[49], 不少研究证明假单胞菌属可以一定程度上降解微塑料。Yoon 等^[50]分离出假单胞菌属菌具有降解低密度聚乙烯的能力, Wilkes 等^[51]研究表明不同生存环境中提取的假单胞菌属菌能够降解 PE、PP 等多种微塑料, Xie 等^[52]从塑料处理厂筛选假单胞菌菌株经历 30 d 的孵育后, 可使塑料减重 15%。Tischler 等^[53]阐述了变形杆菌属、假单胞菌属和黄杆菌属降解苯乙烯的过程。丰水期中的鞘氨醇单胞菌具有非常丰富的降解相关基因, 能够将多种降解途径相协调共同发挥作用^[54]; 枯水期中的丛毛单胞菌科属于 β -变形菌纲, 具有氧化分解有机物以及吸附污染物的作用^[55]。微生物降解微塑料是一种安全、经济的方式^[23], 需要人们更多的关注。

3.3 鄱阳湖微塑料污染及水位变化对环境微生物的影响

自 2000 年以来, 鄱阳湖干旱事件频发, 尤其以 2022 年干旱情况最为严重^[20]。众多学者在湖区水位变化及来水径流变化等方面对鄱阳湖的枯水情势进行了研究分析^[56-57]; 李世勤等^[58]认为五河来水和长江水量的减小导致了鄱阳湖

的枯水情况；王丹等^[59]对鄱阳湖水位情况进行了分析，得出鄱阳湖比以往更早进入枯水期。湖泊更早进入枯水期且枯水期的时间延长可能会对微塑料表面微生物的群落结构产生影响，因此本研究对鄱阳湖湿地丰、枯水期微塑料表面微生物群落进行研究，进而预测微塑料污染及水位变化对环境微生物的可能影响。本研究中枯水期微生物丰富度和多样性均高于丰水期。可能是由于鄱阳湖枯水期延长、水位大幅降落，使浅滩湿地大面积长时间的裸露^[25]，导致鱼、虾、蚌等水生动物失去生存空间后死亡产生残体，提供大量的碳氮源^[60]，促使微生物大量繁殖，这些微生物进入自然环境，选择性定殖在微塑料表面^[43]，并利用微塑料圈作为其栖息和庇护的场所^[11]，使环境中微生物丰度增大。Liu 等^[61]通过对干旱条件下微塑料的微生物多样性分析，得出相似的结论，即干旱会增加微塑料中微生物的多样性，这可能是干旱会缓解微塑料所引起的微生物之间竞争的结果^[62]；同时 Lozano 等^[63]研究得出，在水分充足的条件下，微塑料中微生物的功能降低了约 34%，而在干旱情况微塑料污染对土壤中微食物网的复杂性和稳定性具有积极影响的结论。本研究中枯水期微塑料表面的微生物更容易形成丰富且有别于周围环境的独特的细菌群落结构，从而可能造成一定的生态风险^[64-65]。

4 结论

(1) 不同水期微塑料表面细菌的丰富度、多样性、均匀度均低于环境，微塑料表面细菌群落与环境显著不同。丰水期环境中细菌群落结构与微塑料相差较大，水体与沉积物结构相差较小，枯水期微塑料与沉积物表面细菌群落结构相差较小，与水体差异显著。

(2) 不同水期微塑料表面细菌群落结构与

环境存在明显差异。枯水期微塑料样品与沉积物的细菌组成变得更为接近，枯水期拟杆菌门的相对丰度高于丰水期。微塑料表面塑料降解菌相对丰度较环境明显增加，微塑料作为独特生态位可能会对环境产生影响。

(3) 通过相关性分析确定不同水期微塑料表面细菌关键种，丰水期和枯水期中的关键种大部分为变形菌门，这些关键种将是我们进一步研究的重点。

参考文献

- [1] 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 242-252.
LI WH, JIAN MF, LIU SL, JIANG YM, DENG YB, ZHU L. Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang Lake and the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 242-252 (in Chinese).
- [2] 李大圳, 章宇晴, 付茜茜, 冯丹, 赵媛媛, 俞花美, 邓惠, 葛成军. 海洋环境暴露下生物膜对微塑料的理化性质和环境行为影响研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 339-353.
LI DZ, ZHANG YQ, FU QQ, FENG D, ZHAO YY, YU HM, DENG H, GE CJ. Research progress on the physical and chemical properties and environmental behavior of microplastics exposed to marine environment by biofilm[J]. *Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(3): 339-353 (in Chinese).
- [3] YOSHIDA S, HIRAGA K, TAKEHANA T, TANIGUCHI I, YAMAJI H, MAEDA Y, TOYOHARA K, MIYAMOTO K, KIMURA Y, ODA K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)[J]. *Science*, 2016, 351(6278): 1196-1199.
- [4] 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格. 微塑料和菲对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 496-507.
LIU SS, QIN JQ, WU XG. The effects of microplastics and phenanthrene on soil chemical properties, enzyme activity, and microbial community[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 496-507 (in Chinese).
- [5] JIAN MF, ZHANG Y, YANG WJ, ZHOU LY, LIU SL, XU EG. Occurrence and distribution of microplastics

- in China's largest freshwater lake system[J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 128186.
- [6] HEINDLER FM, ALAJMI F, HUERLIMANN R, ZENG CS, NEWMAN SJ, VAMVOUNIS G, van HERWERDEN L. Toxic effects of polyethylene terephthalate microparticles and di(2-ethylhexyl) phthalate on the calanoid copepod, *Parvocalanus crassirostris*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 141: 298-305.
- [7] LU Y, LI MC, LEE J, LIU CZ, MEI CT. Microplastic remediation technologies in water and wastewater treatment processes: current status and future perspectives[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161618.
- [8] 李大圳, 章宇晴, 付茜茜, 陈海鹰, 邓惠, 葛成军. 红树林退化对微塑料表面细菌群落特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(2): 299-309.
LI DZ, ZHANG YQ, FU QQ, CHEN HY, DENG H, GE CJ. Effects of mangrove degradation on the characteristics of bacterial communities colonizing microplastics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 299-309 (in Chinese).
- [9] 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛. 聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5080-5091.
GUO BL, FENG CC, CHEN Y, LIN D, LI LT. Effects of polystyrene microplastics on growth, physiology, biochemistry, and canopy temperature characteristics of Chinese cabbage pakchoi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5080-5091 (in Chinese).
- [10] 董旭日, 朱礼鑫, 徐佳奕, 李道季. 微塑料附着微生物研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(2): 81-87.
DONG XR, ZHU LX, XU JY, LI DJ. Advances in microorganism attached to microplastics[J]. *Journal of Microbiology*, 2022, 42(2): 81-87 (in Chinese).
- [11] VIRŠEK MK, LOVŠIN MN, KOREN Š, KRŽAN A, PETERLIN M. Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species *Aeromonas salmonicida*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1/2): 301-309.
- [12] WANG YJ, ZHONG Z, CHEN X, SOKOLOVA I, MA LK, YANG QK, QIU KC, KHAN FU, TU ZH, GUO BY, HUANG W. Microplastic pollution and ecological risk assessment of Yueqing Bay affected by intensive human activities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132603.
- [13] KUMAR V, UMESH M, CHAKRABORTY P, SHARMA P, SAROJINI S, BASHEER T, KAUR K, PASRIJA R, BARCELO D. Origin, ecotoxicity, and analytical methods for microplastic detection in aquatic systems[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 170: 117392.
- [14] SCHMID C, COZZARINI L, ZAMBELLO E. Microplastic's story[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 162: 111820.
- [15] JENNER LC, ROTCHELL JM, BENNETT RT, COWEN M, TENTZERIS V, SADOFSKY LR. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831: 154907.
- [16] ALARIF WM, BUDIYANTO F, BAWAKID NO, ALSHEHRI ND, AL-FARAWATI RK, SHABAN YA, ALI AM. The occurrence of microplastic in marine ecosystems in the Middle East: a review[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 67: 103208.
- [17] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 简敏菲, 张振辉. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 732-736.
GONG XF, CHEN CL, ZHOU WB, JIAN MF, ZHANG ZH. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 732-736 (in Chinese).
- [18] 赖政, 盛颖, 肖力婷, 杨慧林, 阳文静, 简敏菲. 鄱阳湖越冬白鹤肠道微生物群落结构及功能预测分析[J]. *微生物学报*, 2023, 63(11): 4302-4314.
LAI Z, SHENG Y, XIAO LT, YANG HL, YANG WJ, JIAN MF. Analysis of gut microbial community structure and functional prediction of overwintering white cranes in Poyang Lake[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(11): 4302-4314 (in Chinese).
- [19] XIONG K, KONG FB. The analysis of farmers' willingness to accept and its influencing factors for ecological compensation of Poyang Lake wetland[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 835-842.
- [20] 曹思佳, 李云良, 陈静, 姚静, 赵贵章, 李志萍. 2022年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(12): 6601-6610.
CAO SJ, LI YL, CHEN J, YAO J, ZHAO GZ, LI ZP. Influence of extreme drought in 2022 on groundwater hydrological regime in the Poyang Lake floodplain area[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(12): 6601-6610 (in Chinese).
- [21] 江为群, 刘淑丽, 简敏菲, 胡启武. 鄱阳湖主要入湖段典型底栖动物体内微塑料累积特征[J]. *生态学报*, 2020, 39(4): 1273-1280.

- JIANG WQ, LIU SL, JIAN MF, HU QW. Deposition characteristics of microplastics in benthic animals from the main estuaries of Poyang Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1273-1280 (in Chinese).
- [22] 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立. 微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4728-4741.
- ZHANG LF, LIU YH, RUAN RS, ZHAO LT, WANG YP, ZHANG Q, CAO LP, CUI X, WU XD, ZHENG HL. Research progress on distribution characteristics and formation mechanisms of microplastics in the environment[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4728-4741 (in Chinese).
- [23] TIWARI N, SANTHIYA D, SHARMA JG. Significance of landfill microbial communities in biodegradation of polyethylene and nylon 6,6 microplastics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 462: 132786.
- [24] SUN XL, XIANG H, XIONG HQ, FANG YC, WANG Y. Bioremediation of microplastics in freshwater environments: a systematic review of biofilm culture, degradation mechanisms, and analytical methods[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160953.
- [25] LI YL, ZHANG Q, YAO J, WERNER AD, LI XH. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(3): 607-616.
- [26] 刘淑丽, 胡启武, 杨慧林, 邹龙, 简敏菲. 鄱阳湖南矶山湿地微塑料表面微生物分布特征[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 206-214.
- LIU SL, HU QW, YANG HL, ZOU L, JIAN MF. Distribution characteristics of microorganisms on microplastic surface in Nanjishan wetland of Poyang Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(6): 206-214 (in Chinese).
- [27] DEBROAS D, MONE A, TER HALLE A. Plastics in the North Atlantic garbage patch: a boat-microbe for hitchhikers and plastic degraders[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 1222-1232.
- [28] HUSE SM, MARK WELCH DB, VOORHIS A, SHIPUNOVA A, MORRISON HG, EREN AM, SOGIN ML. VAMPS: a website for visualization and analysis of microbial population structures[J]. *BMC Bioinformatics*, 2014, 15: 41.
- [29] LIU HY, YUE L, ZHAO YY, LI JT, FU Y, DENG H, FENG D, LI QP, YU HM, ZHANG Y, GE CJ. Changes in bacterial community structures in soil caused by migration and aging of microplastics[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157790.
- [30] 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽. 鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5063-5070.
- ZHAO JK, CHEN X, HU TT, LIAO YY, ZOU L, JIAN MF, LIU SL. Distribution characteristics of microplastic surface bacterial communities under flooded and non-flooded conditions in nanjishan wetland of Poyang Lake[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5063-5070 (in Chinese).
- [31] WU N, ZHANG Y, ZHAO Z, HE JH, LI WJ, LI JF, XU WA, MA YZ, NIU ZG. Colonization characteristics of bacterial communities on microplastics compared with ambient environments (water and sediment) in Haihe Estuary[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134876.
- [32] HOELLEIN TJ, McCORMICK AR, HITTIE J, LONDON MG, SCOTT JW, KELLY JJ. Longitudinal patterns of microplastic concentration and bacterial assemblages in surface and benthic habitats of an urban river[J]. *Freshwater Science*, 2017, 36(3): 491-507.
- [33] 王钰淇, 王海迪, 晏振凯, 程金星, 王庆波, 赵长伟. 淡水中微塑料的污染现状及去除技术研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(8): 1-5, 10.
- WANG YQ, WANG HD, YAN ZK, CHENG JX, WANG QB, ZHAO CW. Research progress on pollution status and removal technology of microplastics in freshwater[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(8): 1-5, 10 (in Chinese).
- [34] YANG Q, LI DW, CHEN W, ZHU LM, ZOU X, HU L, YUAN YJ, HE S, SHI F. Dynamics of bacterioplankton communities during wet and dry seasons in the Danjiangkou Reservoir in Hubei, China[J]. *Life (Basel, Switzerland)*, 2023, 13(5): 1206.
- [35] SONG HY, XIAO SS, ZHOU XH, LI YN, TAO MM, WU F, XU XH. Temporal dynamics of bacterial colonization on five types of microplastics in a freshwater lake[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 913: 169697.
- [36] SUN XM, CHEN BJ, XIA B, LI QF, ZHU L, ZHAO XG, GAO YP, QU KM. Impact of mariculture-derived microplastics on bacterial biofilm formation and their potential threat to mariculture: a case in situ study on the Sungo Bay, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114336.
- [37] YANG YY, LIU WZ, ZHANG ZL, GROSSART HP,

- GADD GM. Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(15): 6501-6511.
- [38] YANG GQ, GONG MT, MAI L, ZHUANG L, ZENG EY. Diversity and structure of microbial biofilms on microplastics in riverine waters of the Pearl River Delta, China[J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129870.
- [39] McCORMICK AR, HOELLEIN TJ, LONDON MG, HITTIE J, SCOTT JW, KELLY JJ. Microplastic in surface waters of urban rivers: concentration, sources, and associated bacterial assemblages[J]. *Ecosphere*, 2016, 7(11): e01556.
- [40] EMADIAN SM, ONAY TT, DEMIREL B. Biodegradation of bioplastics in natural environments[J]. *Waste Management*, 2017, 59: 526-536.
- [41] ZHAI XY, ZHANG XH, YU M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: a review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1127308.
- [42] DELACUVELLERIE A, CYRIAQUE V, GOBERT S, BENALI S, WATTIEZ R. The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 380: 120899.
- [43] HADAD D, GERESH S, SIVAN A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(5): 1093-1100.
- [44] 杨恩东, 崔丹曦, 汪维云. 马赛菌属细菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(6): 1537-1548.
YANG ED, CUI DX, WANG WY. Research progress on the genus *Massilia*[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(6): 1537-1548 (in Chinese).
- [45] 李胖, 张晓华, 于敏. 青岛近海样品中聚丙烯微塑料降解微生物的富集培养及活性研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(10): 60-70.
LI X, ZHANG XH, YU M. Study on the enrichment and activity of polypropylene microplastics degrading microorganisms[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(10): 60-70 (in Chinese).
- [46] AUTA HS, EMENIKE CU, JAYANTHI B, FAUZIAH SH. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 15-21.
- [47] WANG J, QIN X, GUO JB, JIA WQ, WANG Q, ZHANG MJ, HUANG Y. Evidence of selective enrichment of bacterial assemblages and antibiotic resistant genes by microplastics in urban rivers[J]. *Water Research*, 2020, 183: 116113.
- [48] 彭子淇, 李佳岭, 邱丽婷, 舒冉君, 余婷婷. 我国三大水系环境微塑料污染现状及其表面微生物群落特征的研究进展[J]. *微生物学报*, 2023, 63(6): 2261-2275.
PENG ZQ, LI JL, QIU LT, SHU RJ, YU TT. Research progress on microplastic pollution status and surface microbial community characteristics in the three major water systems in China [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(6): 2261-2275
- [49] LEE JW, NAM JH, KIM YH, LEE KH, LEE DH. Bacterial communities in the initial stage of marine biofilm formation on artificial surfaces[J]. *The Journal of Microbiology*, 2008, 46(2): 174-182.
- [50] YOON MJ, JEON HJ, KIM MN. Biodegradation of polyethylene by a soil bacterium and AlkB cloned recombinant cell[J]. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 2012, 3(4): 1-8.
- [51] WILKES RA, ARISTILDE L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 123(3): 582-593.
- [52] XIE HF, CHEN JJ, FENG LM, HE L, ZHOU CX, HONG PZ, SUN SL, ZHAO H, LIANG YQ, REN L, ZHANG YQ, LI CY. Chemotaxis-selective colonization of mangrove rhizosphere microbes on nine different microplastics[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142223.
- [53] TISCHLER D, EULBERG D, LAKNER S, KASCHABEK SR, van BERKEL WJH, SCHLÖMANN M. Identification of a novel self-sufficient styrene monooxygenase from *Rhodococcus opacus* 1CP[J]. *Journal of Bacteriology*, 2009, 191(15): 4996-5009.
- [54] 刘辉, 韦璐璐, 朱龙发, 韦豪, 白云霞, 刘小玲, 李树波. 鞘氨醇单胞菌的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(6): 2738-2752.
LIU H, WEI LL, ZHU LF, WEI H, BAI YX, LIU XL, LI SB. Research progress of *Sphingomonas*[J]. *Microbiology China*, 2023, 50(6): 2738-2752 (in Chinese).
- [55] 张立志, 余思彤, 袁欣, 王钰, 宋兆健, 包永明, 张旭旺. 丛毛单胞菌对邻甲酚及对甲酚的降解特性[J].

- 环境污染与防治, 2020, 42(7): 820-825, 832.
- ZHANG LZ, YU ST, YUAN X, WANG Y, SONG ZJ, BAO YM, ZHANG XW. Degradation characteristics of o-cresol and p-cresol by *Comamonas* sp.[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(7): 820-825, 832 (in Chinese).
- [56] 杨中华, 朱政涛, 槐文信, 白凤朋. 鄱阳湖水利调控对湖区典型丰枯水年水动力水质影响研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 156-167.
- YANG ZH, ZHU ZT, HUAI WX, BAI FP. A Study on the Impact of Water Conservancy Regulation in Poyang Lake on the Hydrodynamic and Water Quality of Typical Flood and Drought Years in the Lake Area[J]. *Journal of Water Resources*, 2018, 49(2): 156-167 (in Chinese).
- [57] 闵骞, 占腊生. 1952–2011年鄱阳湖枯水变化分析[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 675-678.
- MIN Q, ZHAN LS. Characteristics of low-water level changes in Lake Poyang during 1952–2011[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(5): 675-678 (in Chinese).
- [58] 李世勤, 闵骞, 谭国良, 潘汉明, 陈家霖. 鄱阳湖2006年枯水特征及其成因研究[J]. *水文*, 2008, 28(6): 73-76.
- LI SQ, MIN Q, TAN GL, PAN HM, CHEN JL. Cause analysis of low water characteristics of Poyang Lake in 2006[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(6): 73-76 (in Chinese).
- [59] 王丹, 张双虎, 王国利, 王浩. 鄱阳湖枯水期水位变化及其影响因素量化分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(3): 1-10.
- WANG D, ZHANG SH, WANG GL, WANG H. Quantitative analysis of water level changes and influencing factors during the dry season of Poyang Lake[J]. *Journal of Hydroelectric Power*, 2020, 39(3): 1-10 (in Chinese).
- [60] CARTER DO, YELLOWLEES D, TIBBETT M. Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *The Science of Nature-Naturwissenschaften*, 2007, 94(1): 12-24.
- [61] LIU ML, WANG C, ZHU B. Independent and combined effects of microplastics pollution and drought on soil bacterial community[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 913: 169749.
- [62] LIU ML, WANG C, ZHU B. Drought alleviates the negative effects of microplastics on soil micro-food web complexity and stability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(30): 11206-11217.
- [63] LOZANO YM, AGUILAR-TRIGUEROS CA, ONANDIA G, MAAß S, ZHAO TT, RILLIG MC. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(5): 988-996.
- [64] XU CY, HU C, LU JW, YANG T, SHEN CS, LI F, WANG J. Lake plastisphere as a new biotope in the Anthropocene: potential pathogen colonization and distinct microbial functionality[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132693.
- [65] FENG LM, HE L, JIANG SQ, CHEN JJ, ZHOU CX, QIAN ZJ, HONG PZ, SUN SL, LI CY. Investigating the composition and distribution of microplastics surface biofilms in coral areas[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126565.