

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023100702

CSTR:32061.14.hjhx.2023100702

周雨柔, 姚娜, 胡超, 等. 亚热带浅水型内湖水体与沉积物微塑料分布特征及来源: 以大明湖为例[J]. 环境化学, 2025, 44(3): 1006-1014.
ZHOU Yurou, YAO Na, HU Chao, et al. Distribution characteristics and sources of microplastics in water and sediment of subtropical shallow inner lake: A case study of Daming Lake[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (3): 1006-1014.

亚热带浅水型内湖水体与沉积物微塑料分布特征及来源: 以大明湖为例*

周雨柔^{1,2} 姚娜² 胡超^{1,2} 张娴³ 张萌^{1,2}
吴俊伟² 刘鑫珍¹ 胡春华^{1**}

(1. 南昌大学资源与环境学院, 南昌, 330031; 2. 江西省生态环境科学研究与规划院, 南昌, 330039;
3. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门, 361021)

摘要 淡水湖泊中微塑料(MPs)污染备受各界关注. 当前, 我国亚热带浅水湖泊的MPs污染情况研究还不多, 尤其是环鄱阳湖区的污染情况知之甚少. 为掌握我国最大淡水湖泊鄱阳湖的典型蓄滞洪区MPs污染现状, 以鄱阳湖最大的蓄滞洪区以及第二大内湖——大明湖为研究对象, 对2022年枯水期大明湖流域水体及沉积物MPs样品进行采集分析, 具体采用消解抽滤法和浮选分离-浮选抽滤法分离富集, 采用显微镜检法和拉曼光谱法进行鉴定分析. 结果表明, 大明湖水体及沉积物中微塑料丰度范围分别为1900—10900 n·m⁻³、960—1860 n·kg⁻¹, 其中大明湖中部湖区微塑料丰度最低, 北部湖区及入湖口丰度值较高. 研究区微塑料形态主要有纤维、薄膜、碎片、颗粒, 聚合物组成主要为聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)等; 水体及沉积物中均以纤维状微塑料为主(44.9%、42.6%); 粒径大小均以小粒径(≤0.5 mm)微塑料为主(>50%); 透明色微塑料在水体与沉积物中均占主导地位(>55%). 大明湖水域微塑料潜在主要来源包括居民生活污水排放、农业及渔业活动等, 建议后续进一步溯源, 为大明湖微塑料的污染精准防治提供科学依据, 同时建议重视蓄滞洪区农业生产生活用途的塑料垃圾管控.

关键词 大明湖, 水体, 沉积物, 微塑料, 分布特征.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Distribution characteristics and sources of microplastics in water and sediment of subtropical shallow inner lake: A case study of Daming Lake

ZHOU Yurou^{1,2} YAO Na² HU Chao^{1,2} ZHANG Xian³ ZHANG Meng^{1,2}
WU Junwei² LIU Xinzhen¹ HU Chunhua^{1**}

(1. School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 2. Jiangxi Academy of Eco-Environmental Science Research & Planning, Nanchang, 330039, China; 3. Key Laboratory of Urban Environment & Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, 361021, China)

Abstract Microplastics (MPs) pollution in freshwater lakes is becoming increasingly concerned

2023年10月7日收稿(Received: October 7, 2023).

* 国家自然科学基金(41663002)和江西省重点研发计划项目(20232BBG70011, 20203BBG72W007)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (41663002) and the Key Research and Development Projects of Jiangxi Province (20232BBG70011, 20203BBG72W007).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: nchuchunhua@163.com

around the world. Studies on MPs pollution of subtropical shallow lakes in China were not well-documented, especially, the MPs pollution in Poyang Lake was little known. In order to study the MPs pollution status of flooded wetland area in Poyang Lake, the largest freshwater lake in China, Daming Lake as a typical sub-lake and the largest flooded wetland area was taken as the research object. Water column and sediment samples of Daming Lake basin were collected and analyzed during the dry season in 2022. Digestion extraction method and flotation separation - flotation filtration method were used to extract the MPs in water column and sediment, respectively. Microscopy and Raman spectrometer were employed for identification and analysis of MPs in water column and sediment of Daming Lake. Results showed that the abundance of microplastics in the water column and sediment of Daming Lake ranged from 1900—10900 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ and 960—1860 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, with the lowest in the middle lake area of Daming Lake and the highest in both of the north lake area and the lake inlets. The shape of microplastics was mainly fibers, films, fragments and particles, and the polymer composition is mainly polypropylene (PP), polyethylene (PE), polyvinyl chloride (PVC), etc. Fibrous microplastics were dominant in water column (44.9%) and sediment (42.6%). The particle size of microplastics was mainly small particle size (≤ 0.5 mm, $> 50\%$). Transparent microplastics dominated in both water column ($> 55\%$) and sediment ($> 55\%$). The main potential sources of MPs in Daming Lake were found such as the domestic sewage discharge, agricultural and fishery activities, etc. It's suggested that further detection of the MPs pollution sources was needed and could provide theoretical guidance for the pollution prevention and control of microplastics in Daming Lake. Meanwhile, the management and treatment of plastic waste from agricultural activities was suggested to pay more attention in the flooded wetland areas.

Keywords Daming Lake, water body, sediment, microplastics, distribution characteristics.

自十九世纪以来,塑料凭借着低廉的价格和高性价比被广泛生产和使用,塑料制品为人类生活提供了诸多便利,但人类一度长期缺乏对废弃塑料制品的有效回收与管控.大量废弃的塑料制品随着自然风化、物理摩擦、紫外线裂解等逐渐被分解为粒径小于 5 mm 的碎片,即微塑料^[1].微塑料具有难降解性,其在食物链中易于累积放大,最终危害到食物链顶端的人类健康^[2],甚至被称为“影响人类生存的最后杀手”.据相关研究报道,塑料制品可以在自然环境中存留至少 400 年^[3].因此,微塑料污染引发的生态安全值得引起人类高度关注.

当前,国际上越来越多的研究人员已开始关注内陆水域中微塑料污染^[4].2013 年, Eriksen 等^[5] 研究报道了北美劳伦森大湖区(即北美五大湖区)的水体存在微塑料颗粒,这是首次报道淡水湖泊中的微塑料污染情况.同年, Faure 等^[6] 对位于欧洲最高山脉——阿尔卑斯山脉的日内瓦湖微塑料污染进行了研究,发现了表层湖水中微塑料的存在,且其丰度达到 48100 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$.我国于 2018 年也开展了内陆水域的微塑料污染调查,发现湖南洞庭湖和湖北洪湖水体中微塑料的广泛存在,其中通江湖泊-洞庭湖水体微塑料丰度为 900—2800 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$,非通江湖泊-洪湖水体微塑料丰度则高达 1200—4600 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[7].内蒙古的王志超及其团队在我国八大淡水湖之一的乌梁素海的冰盖中发现了微塑料的存在,且微塑料平均丰度高达 57000—141000 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[8].

由于湖泊生态系统具有相对稳定的水文特征,微塑料往往可以在湖泊中长期积累,致使湖泊成为流域中微塑料的汇^[9].因此,研究湖泊湿地生态系统中微塑料在泥-水介质上的污染赋存特征对理解典型水环境系统中微塑料污染现状具有重要意义.该文选取我国最大淡水湖鄱阳湖的内湖——大明湖(水面面积 100 km^2)为研究区域,开展水体及沉积物中微塑料分布特征调查,为探知水稻种植与淡水渔业生产集约区的微塑料污染特征提供研究基础.该研究成果将在我国内湖水体微塑料污染防控、农业用水质量安全保障乃至人类健康风险防控指导上具有现实意义.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

余干大明湖地处江西省北部(北纬 28.76°—28.86°, 东经 116.49°—116.54°), 隶属鄱阳湖南岸内湖, 为国家级蓄滞洪区, 处余干县康山大堤圩区内, 水面面积 100 km², 水深常年在 3 m 左右, 是鄱阳湖第二大内湖. 区域多年平均气温为 17.8 °C, 气温-14.3°C—40°C; 多年平均降水量为 1586.4 mm, 4、5、6 月为降雨集中季节, 占全年降水量的 40%—50%, 4—6 月平均降雨量都在 200 mm 以上, 有明显的伏旱和秋旱现象, 年平均相对湿度为 81%. 大明湖具有丰富的水生生物资源, 水生生物多样性高, 是重要的渔农生产基地和优质农产品供给区. 历史上大明湖内长期存在着生产性捕捞, 且大明湖沿岸分布着高度集约化的水稻种植区、淡水渔业生产区以及人口密集的村镇居民区. 据统计, 大明湖流域内有两镇两乡, 户籍人口约 6.7 万人, 水稻种植面积约 51 km², 精养池塘面积约 43 km², 其他生产活动(果蔬种植)约 1.2 km².

1.2 样品采集

选取典型枯水年的 2022 年农业退水期(9 月), 采用梅花点取样法在大明湖水域分 3 个湖区, 北湖、中湖、南湖均匀设置 11 个采样点, 其中中心湖区设置 8 个采样点(采样间隔 3 km), 入湖口 3 个(S9—11, 图 1), 每个点位采集 3 个平行样, 将同一采点位样品充分混匀, 带回实验室.

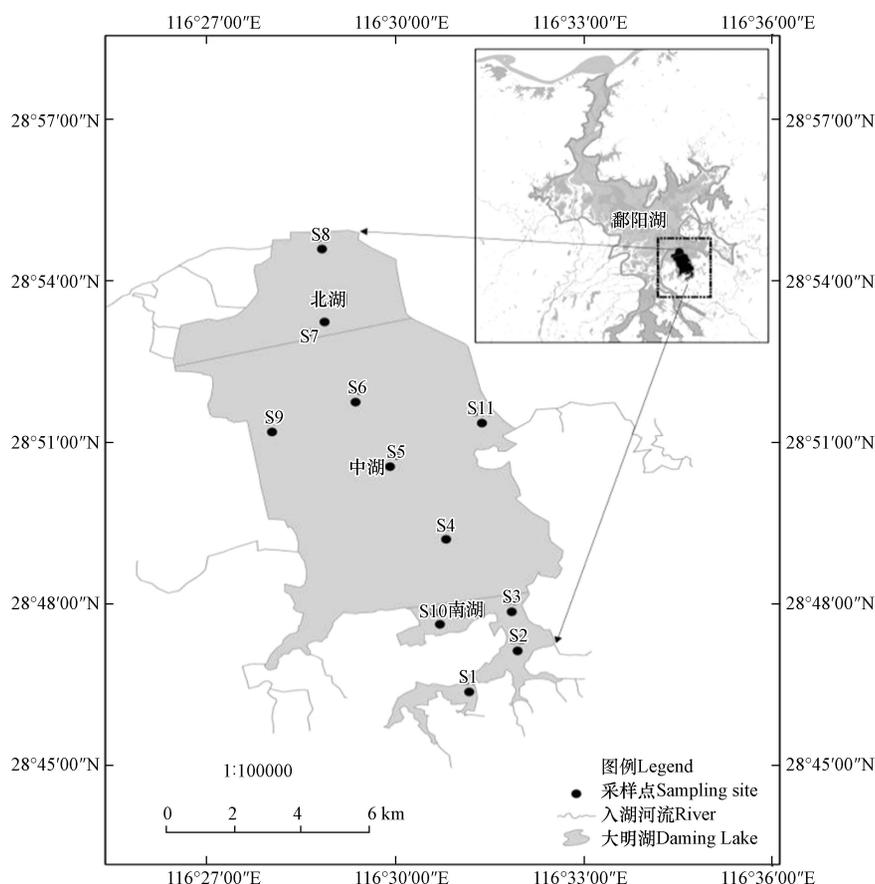


图 1 江西省大明湖采样点位分布图

Fig.1 Sampling sites in Daming Lake (Jiangxi, China)

对湖泊表层水样(水下 0.5 m)及表层沉积物(深度 0—20 cm)采集相应样品^[10]. 采样前所有采样工具均用超纯水清洗 2—3 遍, 使用 5 L 采水器采集湖泊表层水样, 每个采样点采集水样 10 L, 并用不锈钢筛网过滤(孔径为 20 μm), 再用纯水将截留物冲洗进采样瓶(250 mL)中, 当天运回实验室冰箱(4 °C)保存; 采用金属材质彼得森采泥器采集湖泊表层沉积物样品, 采集的样品装入铝箔材质采样袋中, 随水样当天运回实验室低温(4 °C)保存.

1.3 微塑料分离及提取

水样首先进行干燥处理, 样品完全干燥后, 加入 30% H_2O_2 溶液进行消解, 用铝箔纸密封, 摇床振荡 72 h, 直至溶液澄清, 再用 $0.47 \mu\text{m}$ 聚四氟乙烯滤膜对上清液进行真空过滤^[10], 将滤膜保存于玻璃培养皿中, 低温干燥, 以备观察.

采用饱和 NaCl 浮选与 H_2O_2 消解相结合的方法对沉积物样品进行预处理^[11]. 称取冷冻干燥后的样品 50 g, 先将密度为 $1.2 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的饱和 NaCl 溶液加入样品中进行初次分离浮选^[12], 浮选静置时长为 24 h, 重复上述过程 3 次, 用饱和 NaCl 溶液对 1—5 mm 和 $<1 \text{ mm}$ 粒径范围的颗粒回收率分别达到 97.5% 和 95.5%. 再用 30% H_2O_2 进行消解处理, 此后步骤与水样处理一致.

1.4 微塑料物理化学性质检测

每个采样点位选取 3 个平行样进行观察检测, 采用体式显微镜 (SZX16, Olympus, Japan), 在放大 40—100 倍下通过软件 IMSA-2000 对干燥滤膜上的微塑料进行拍照计数. 微塑料按形态特征分为纤维、颗粒、碎片、薄膜状共 4 种类型^[13]. 按颜色分为红色、蓝色、绿色、透明、白色和黑色共 6 类^[14]. 根据其粒径不同可分为小于 0.5 mm 、 $0.5—1 \text{ mm}$ 、 $1—2 \text{ mm}$ 和 $2—5 \text{ mm}$ 等 4 个梯度^[15].

选择具有代表性的微塑料样品, 采用拉曼光谱仪 (DXR, Thermo Fisher, USA), 根据已知的聚合物光谱确定微塑料的聚合物类型, 对微塑料样品的化学组成进行识别.

1.5 质量控制

为保证数据的准确性, 实验所用仪器均为非塑料材质制品. 实验中进行了空白对照以除去空气中微塑料的干扰. 在空白对照组样品中仅检测到 0.10 ± 0.08 个纤维, 数据可忽略不计. 实验中所用化学溶液均使用滤膜过滤, 实验工具均用超纯水洗涤至少 3 遍.

1.6 数据处理

采样点位分布图采用软件 ArcGIS 10.7 绘制. 实验数据分析统计和绘图分别用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2021 进行处理及绘制. 水体微塑料丰度单位用 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ 表示, 而沉积物丰度单位用 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 来表示; 微塑料粒径设置为小于 0.5 mm 、 $0.5—1 \text{ mm}$ 、 $1—2 \text{ mm}$ 和 $2—5 \text{ mm}$ 4 个梯度^[15].

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 微塑料丰度与分布

由图 2 可知, 按照区域划分 (图 1), 大明湖水样中微塑料丰度为 $1900—10900 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均丰度为 $4309 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中南湖 (S1—S3) 微塑料平均丰度为 $3230 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$ 、中湖 (S4、S5) 平均丰度为 $1970 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$ 、北湖 (S6—S8) 平均丰度为 $4037 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$ 、入湖口 (S9—S11) 平均丰度为 $7244 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中居民区排水口 (S10) 微塑料丰度最高, 为 $10900 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$, S5 号点位微塑料丰度最低, 为 $1900 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$, 中湖区到北湖区的微塑料丰度呈递增状.

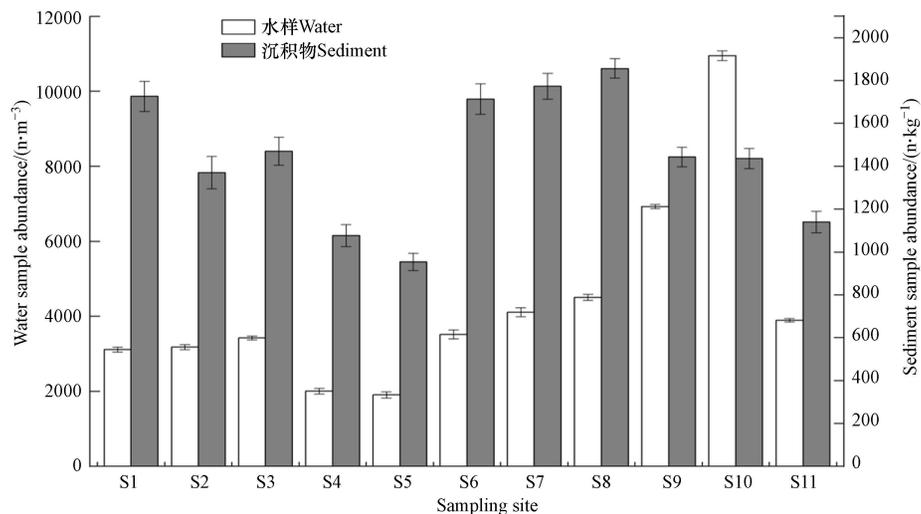


图 2 大明湖微塑料丰度分布

Fig.2 Distribution of microplastic abundance in Daming Lake (Jiangxi, China)

大明湖沉积物中微塑料丰度为 960—1860 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均丰度为 1452 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中南湖(S1—S3)微塑料平均丰度为 1525 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、中湖(S4、S5)平均丰度为 1032 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、北湖(S6—S8)平均丰度为 1787 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、入湖口(S9—S11)平均丰度为 1334 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 北湖区(出口水域)S8 号点位的微塑料含量最高, 达到 1860 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中湖区 S5 号点位最低, 为 960 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 中湖区到北湖区的沉积物中微塑料丰度也是呈递增状态.

11 个采样点位的水体及沉积物存在显著性差异($P<0.01$), 这也就解释了大明湖水体和沉积物中微塑料从整个区域来看呈现相似的分布规律, 但就单个点位来看, 水体和沉积物中的微塑料赋存存在差异, 说明微塑料在不同环境状态下, 赋存于水体及沉积物中的含量不同.

该研究区域中的 S10 号点位处于乡镇污水处理设施排放口, 附近为居民集中区, 受人为因素影响较大. 洗衣服废水中的合成纺织纤维因体积小, 不能被污水处理厂的处理单元完全捕获, 排放到水体中仍会造成环境污染^[6]. S9, S11 号点位同样为入湖口, S9 号点位处于农田灌溉水入大明湖口, 微塑料含量也相对较高. S11 号点位处于水产养殖水入大明湖口, S9 号和 S11 号点位微塑料含量均低于 S10 号点位, 这说明了生活用水造成的微塑料污染最为严重, 水产养殖活动导致的微塑料污染小于农业活动造成的污染. 大明湖中湖(S4、S5)微塑料含量较少, 这可能是因为离人为活动区域较远, 人类活动干扰较少. 大明湖北湖(S6—S8)离入湖口(S9、S11)较近, 且常有渔船活动, 这就可为大明湖下游水域中微塑料丰度较高作解释.

沉积物中入湖口(S9—S11)微塑料丰度相较于水体有所降低, 这可能是因为入湖口水体流速快, 沉积泥沙及微塑料被带入大明湖内. 大明湖北湖(S6—S8)微塑料丰度最高可能是因为该区域位处于下游处, 水面宽阔平坦, 利于微塑料沉积和蓄积. 大明湖中游水流流速较快, 微塑料丰度较低, 由此可知微塑料的迁移在不同水环境中受空间影响较大^[7].

目前对于内陆河流的微塑料研究较少, 其中 Wang 等^[7]对洞庭湖和洪湖水体微塑料的研究发现洞庭湖水体微塑料丰度为 900—2800 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$, 洪湖水体微塑料丰度高达 1200—4600 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$. 鄱阳湖各湖区微塑料丰度差异较大, 安乐河入鄱阳湖段^[18]沉积物微塑料浓度为 180 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 鄱阳湖湖口与长江连通段沉积物丰度 982 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[19]. 与前人研究结果对比发现, 大明湖微塑料污染水平较高, 这可能是与枯水期湖泊水量偏少有关, 2022 年下半年鄱阳湖流域经历了历史罕见的持续大旱, 大明湖水位在 9 月份处于罕见的低枯状况, 枯水期微塑料浓度高, 这与余厚平等^[20]的研究结论一致.

2.2 微塑料的形态分布特征

微塑料粒径设置可分为 <0.5 、 $0.5—1$ 、 $1—2$ 和 $2—5$ mm 共 4 个梯度. 如图 3 大明湖表层水样与沉积物样粒径大小分布情况大致相同, 粒径 <0.5 mm 的微塑料所占比例最大, 在水样与沉积物样中占比分别为 71.43% 与 59.72%, 其次为 $0.5—1$ mm, 在水样与沉积物样中占比分别为 18.67% 和 23.78%. $2—5$ mm 的粒径占最少, 分别为 2.87% (水样), 3.34% (沉积物). 大明湖表层水体与沉积物中微塑料粒径分布情况与 Tang 等^[21]的研究结果一致, 符合微塑料粒径越大含量越少的规律. 这可能是因为大明湖周围分布了大片农田, 伴随农耕活动以及紫外线的裂解作用, 微塑料加快由大尺寸裂解为小尺寸并且微塑料在地表径流作用下与地面以及湖岸产生摩擦等机械作用使得微塑料破碎分解的速度加快^[22]. 采样时大明湖正处于枯水期, 水流较平缓, 微塑料能浮于水面与外界环境有较长时间的接触, 并通过物理摩擦、生物降解、紫外线裂解等作用缓慢分解.

微塑料的形状占比及显微镜下拍摄的典型微塑料照片如图 4 所示, 观察到的微塑料主要分为纤维状、碎片状、颗粒状和薄膜状. 由图 5 可知, 大明湖水域微塑料主要以纤维状和薄膜状的形态存在于表层水体与沉积物中, 水体中纤维状和薄膜状分别为 44.9%、35.1%; 沉积物中纤维状和薄膜状分别为 42.6%、40.9%. 大明湖水体中微塑料形状分布情况与相关的研究结果相符, 如太湖(48%—84%)^[23]和洞庭湖(41.9%—91.9%)^[7]中占比最大的均为纤维状微塑料. 不同形态微塑料通常具有不同来源, 大明湖中纤维含量高可能是纤维不易分解、居民大量使用纺织品及渔业活动中使用渔网渔具所致^[24]. 薄膜含量较高是因为大明湖周围分布范围较大的农田, 农业活动中覆膜会产生大量薄膜状微塑料, 农用塑料薄膜是农田土壤中微塑料的主要来源^[25]. 颗粒状微塑料在表层水体与沉积物中占比最小, 分别为

4.5%和 5.4%. Napper 等^[26] 从个人护理产品中提取到了 PE 微珠, 可见, 个人洗护用品也是颗粒状微塑料的主要来源. 碎片主要是塑料制品在自然条件下裂解而成, 如塑料包装袋和塑料容器^[27].

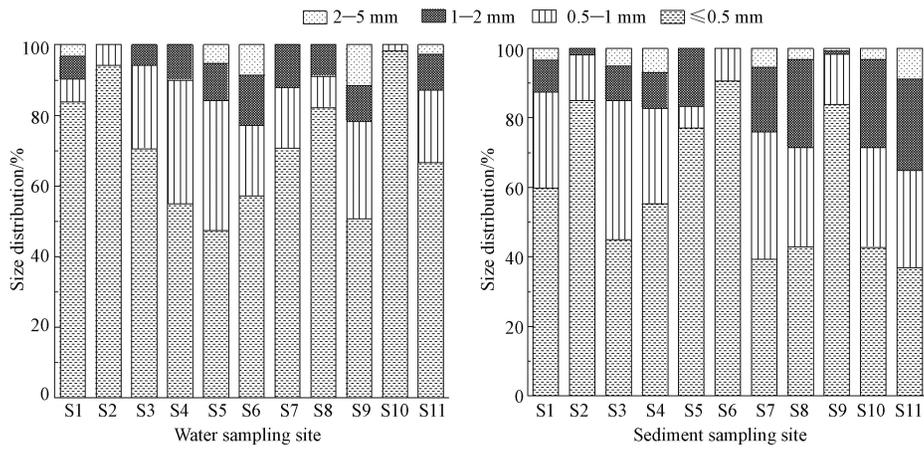


图 3 大明湖微塑料粒径组成(左: 水体; 右: 沉积物)

Fig.3 Particle size composition of microplastics in Daming Lake (Left figure: water column; Right figure: sediment)

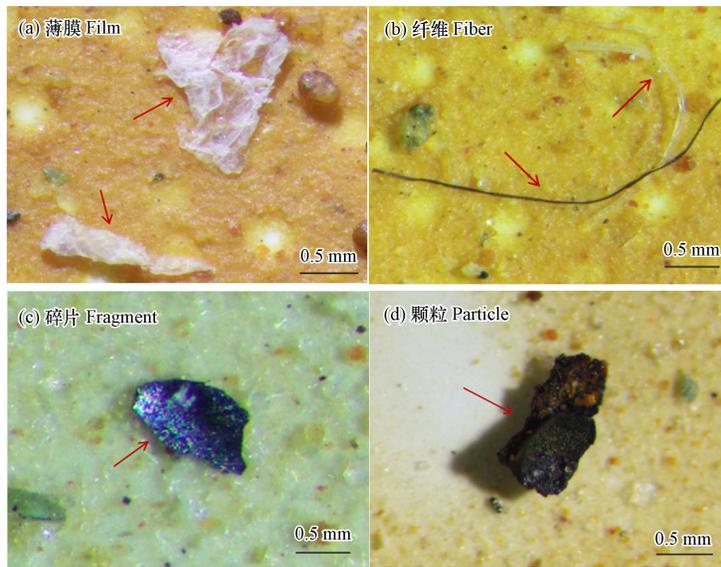


图 4 不同形状微塑料镜检图(×40 倍)

Fig.4 Different shape photos of microplastics under the detection of microscope (×40 magnification)

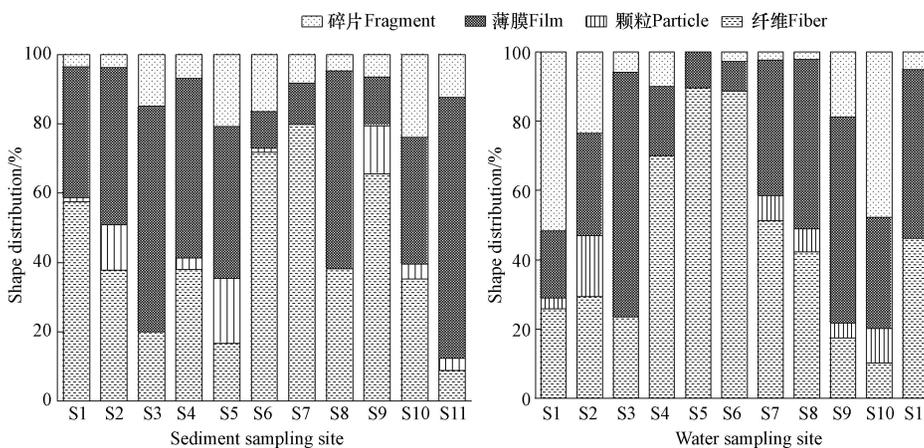


图 5 大明湖微塑料形状分布特征图

Fig.5 Particle shape composition of microplastics in Daming Lake

大明湖水体与沉积物中微塑料颜色组成主要为透明、黑色、白色、蓝色、红色和绿色等 6 种 (图 6). 透明色与白色的区别在于, 透明色的透明度更高, 能透过微塑料本身观察到滤膜. 其中, 在水体中透明色微塑料占主导地位, 占比为 56.52%, 其次为黑色, 占比为 11.96%. 沉积物中透明色占比最大, 占总数的 63.82%. 其次为绿色(9.44%)和黑色(9.25%), 蓝色在水体与沉积物中均占比最少, 分别为 5.95% 和 3.88%.

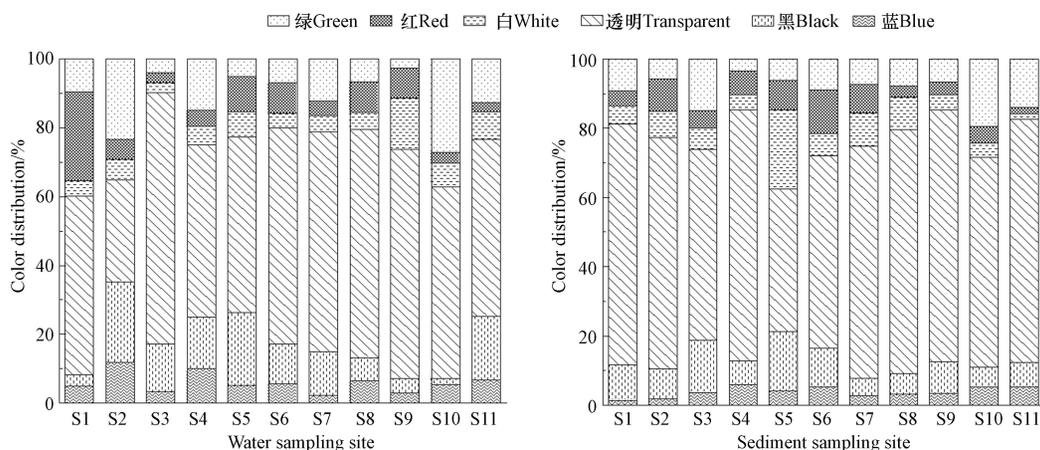


图 6 大明湖微塑料颜色组成图

Fig.6 Color composition of microplastics in Daming Lake

大明湖水体与沉积物中微塑料颜色的分布情况与已有研究结果略有差异, 例如在鄱阳湖水体中占比最大的是彩色微塑料(48.9%)^[28], 而透明微塑料在洞庭湖(71.3%)和洪湖(77.9%)水体中占优势^[7]. 大明湖水体与沉积物微塑料颜色丰富多样, 表明这些微塑料的来源较为广泛, 透明色微塑料可能是农用透明色薄膜的大量使用所产生的并且透明塑料袋使用量较大, 经过风化、摩擦、紫外线裂解成微塑料, 这可能是透明微塑料占比较多的原因^[29-30]. 黑色微塑料可能是汽车轮胎或农用黑色薄膜的大量使用所产生的. 绿色微塑料主要以纤维与薄膜状存在, 可能是渔业活动中大量使用绿色渔网和渗透膜导致的. 此外, 研究发现水生生物更容易误食颜色鲜艳的微塑料颗粒^[31], 这对生物多样性维持存在生态风险, 通过食物链传递, 则最终对人类健康产生危害.

2.3 大明湖微塑料的组成成分及来源分析

该研究采用拉曼光谱法鉴定微塑料的聚合物类型. 选取了具有代表性的 120 个疑似微塑料, 检测结果显示, 100 个微塑料被鉴定为微塑料, 主要包含聚丙烯(polypropylene, PP)、聚乙烯(polyethylene, PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethyleneterephthalate, PET)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和尼龙 6(nylon6). 其中, PP 在所有类型中占主要地位, 约占 48.23%, 其次为 PE, 约占 38.77%; 薄膜和纤维类聚合物以聚乙烯(polyethylene, PE)为主; 碎片类以聚丙烯(polypropylene, PP)聚合物为主(图 7).

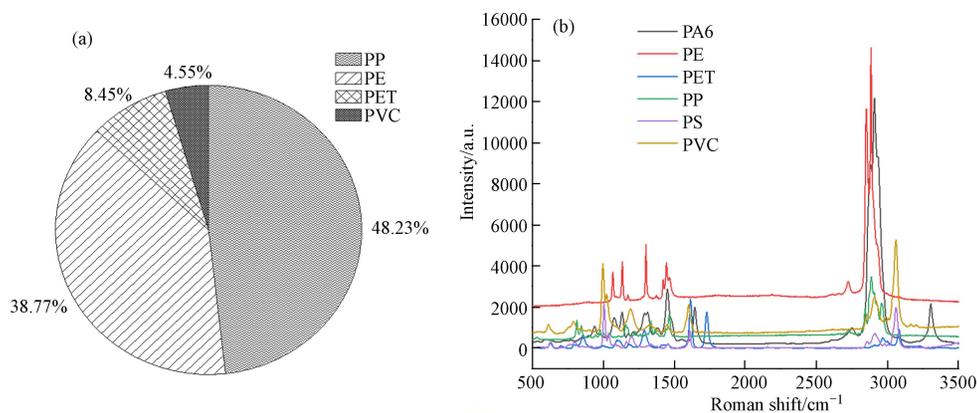


图 7 微塑料聚合物特征分布图(a. 类型占比图; b. 红外光谱图)

Fig.7 Microplastic polymer characteristic distribution map (a. Species proportion map; b.infrared spectrogram)

纤维类的主要成分为 PE 和 PET, PE 主要来源于渔网和鱼线的风化碎裂; PET 主要来源于纺织服装品, 通过洗涤过程随生活污水排入大明湖内; 大明湖上频繁的渔业活动导致大量渔网和渔线在环境中遗留; 居民生活排放废水也是纤维状微塑料的主要来源. 此外, 薄膜类成分为 PE 和 PP, 这两种材料最常见的用途为制作塑料袋, 如食品包装袋、购物袋、保鲜膜等, 而农业大棚和地膜覆盖也是一个不容忽视的主要来源. 大明湖周围围绕着大面积农田, 频繁的农作活动导致地膜加速分裂成薄膜状微塑料, 是薄膜状微塑料的主要来源.

3 结论(Conclusion)

(1) 大明湖表层水体微塑料丰度范围 1900—10900 $n \cdot m^{-3}$, 沉积物中微塑料丰度为 960—1860 $n \cdot kg^{-1}$, 形态均以纤维和薄膜为主, 颜色均以透明和黑色为主. 微塑料的粒径以 $<0.5 \text{ mm}$ 为主, 表层水体与沉积物分布大致相似且微塑料丰度随粒径增大而下降.

(2) 大明湖流域水体及沉积物微塑料都具有较为显著的空间差异, 大明湖下游以及污水排放口处微塑料丰度显著高于其他点位.

(3) 分析发现, 该研究区域的微塑料污染具有多源贡献特征, 具体主要来源为直排生活污水、污水处理厂尾水、农业灌溉退水和排放的养殖废水, 以及农业生产、渔业捕捞、处置不当的生活垃圾等形成的面源污染.

参考文献 (References)

- [1] van CAUWENBERGHE L, DEVRIESE L, GALGANI F, et al. Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects[J]. *Marine Environmental Research*, 2015, 111: 5-17.
- [2] PRATA J C. Airborne microplastics: Consequences to human health?[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 115-126.
- [3] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [4] RIOS MENDOZA L M, BALCER M. Microplastics in freshwater environments: A review of quantification assessment[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 113: 402-408.
- [5] ERIKSEN M, MASON S, WILSON S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1/2): 177-182.
- [6] FAURE F, SAINI C, POTTER G, et al. An evaluation of surface micro- and mesoplastic pollution in pelagic ecosystems of the Western Mediterranean Sea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(16): 12190-12197.
- [7] WANG W F, YUAN W K, CHEN Y L, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 539-545.
- [8] 王志超, 杨建林, 杨帆, 等. 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素 a 的响应关系 [J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 673-680.
WANG Z C, YANG J L, YANG F, et al. Distribution characteristics of microplastics in ice sheets and its response to salinity and chlorophyll a in the Lake Wuliangsu Hai[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 673-680 (in Chinese).
- [9] LEBRETON L C M, van der ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15611.
- [10] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3060-3075.
- [11] NUELLE M T, DEKIFF J H, REMY D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 161-169.
- [12] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖“五河”入湖口沉积物中微塑料污染物的特征及其时空分布 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 397-406.
LI W H, JIAN M F, YU H P, et al. Characteristics of microplastic pollution and temporal-spatial distribution in the sediments of the five rivers in the Lake Poyang Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 397-406 (in Chinese).
- [13] LANG M F, WANG G Y, YANG Y Y, et al. The occurrence and effect of altitude on microplastics distribution in agricultural soils of Qinghai Province, northwest China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152174.
- [14] YAN M T, NIE H Y, XU K H, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River Estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879-886.
- [15] 万顺, 徐国策, 李清顺, 等. 大理河流域微塑料空间分布及其来源 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(8): 293-303.

- WAN S, XU G C, LI Q S, et al. Spatial distribution and source of microplastics in the Dali River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(8): 293-303 (in Chinese).
- [16] WANG X W, XI B D, HUO S L, et al. Polybrominated diphenyl ethers occurrence in major inflowing rivers of Lake Chaohu (China): Characteristics, potential sources and inputs to lake[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(8): 1624-1631.
- [17] BALLENT A, CORCORAN P L, MADDEN O, et al. Sources and sinks of microplastics in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 383-395.
- [18] 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 等. 鄱阳湖-赣江各支入湖段沉积物中微塑料分布及其组成特征 [J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 908-916.
- LIU S L, JIAN M F, ZHOU L Y, et al. Distribution and composition of microplastics in sediments in the estuaries of the Ganjiang River leading into Lake Poyang[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 908-916 (in Chinese).
- [19] 周隆胤, 简敏菲, 余厚平, 等. 乐安河—鄱阳湖段底泥微塑料的分布特征及其来源 [J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1222-1232.
- ZHOU L Y, JIAN M F, YU H P, et al. Distribution of microplastics and its source in the sediments of the Le'an River in Poyang Lake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1222-1232 (in Chinese).
- [20] 余厚平, 廖远鑫, 简敏菲, 等. 鄱阳湖五河流域入湖口沉积物中微塑料的赋存特征 [J]. *环境化学*, 2019, 38(8): 1842-1849.
- YU H P, LIAO Y X, JIAN M F, et al. Occurrence of microplastics in the sediments of the five rivers estuaries in Poyang Lake Basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(8): 1842-1849 (in Chinese).
- [21] TANG G W, LIU M Y, ZHOU Q, et al. Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: Implications for anthropogenic impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 811-820.
- [22] RODRIGUES M O, ABRANTES N, GONÇALVES F J M, et al. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1549-1559.
- [23] SU L, XUE Y G, LI L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711-719.
- [24] WAGNER M, JIN G Y, TARASOV P E. The “Bridging Eurasia” research initiative: Modes of mobility and sustainability in the palaeoenvironmental and archaeological archives from Eurasia[J]. *Quaternary International*, 2014, 348: 1-3.
- [25] BRIASSOULIS D, BABOU E, HISKAKIS M, et al. Analysis of long-term degradation behaviour of polyethylene mulching films with pro-oxidants under real cultivation and soil burial conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4): 2584-2598.
- [26] NAPPER I E, THOMPSON R C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 112(1/2): 39-45.
- [27] ALIMI O S, FARNER BUDARZ J, HERNANDEZ L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1704-1724.
- [28] YUAN W K, LIU X N, WANG W F, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170: 180-187.
- [29] 张嘉戌, 邓义祥, 张承龙, 等. 基于环境行为理论的公众一次性塑料减量政策研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(5): 888-897.
- ZHANG J X, DENG Y X, ZHANG C L, et al. Study on the public single-use plastics reduction policies based on the theory of environmental behaviors[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(5): 888-897 (in Chinese).
- [30] LIU P, ZHAN X, WU X W, et al. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks[J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125193.
- [31] 单宁, 祖木热提·艾比布, 米丽班·霍加艾合买提, 等. 微塑料对黑麦草吸收和累积水体中环丙沙星的影响 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2906-2912.
- SHAN N, HABIBUL Z, HOJAHMAT M, et al. Effects of microplastics on ryegrass (*Lolium perenne* L.) uptake and accumulation of ciprofloxacin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(12): 2906-2912 (in Chinese).