

城市景观湖泊中微塑料的分布特征

王永凯, 任鸿钊, 许强, 戚鹏宇, 李炎博, 李扬*

中原工学院智慧能源与环境学院, 河南, 郑州

收稿日期: 2026年4月29日; 录用日期: 2026年5月28日; 发布日期: 2026年6月15日

摘要

为探究城市景观湖泊微塑料污染特征, 本研究采集郑州市7个代表性湖体表层水样, 分析微塑料的丰度、形态、尺寸及聚合物类型。结果表明, 微塑料在所有点位均有检出, 丰度范围为139.74~285.46 n/L, 平均值为(196.00 ± 53.17) n/L, 空间差异性显著, 人类活动密集、水体流动性差的点位丰度更高。微塑料以碎片状(39.26%)和薄膜状(29.33%)为主, 尺寸 < 100 μm 的占比超过70%。聚合物类型以聚甲醛(POM)和聚酰胺(PA)为主, 反映周边工业及垂钓活动的影响。研究表明, 郑州市城市景观湖体微塑料丰度处于中等偏高水平, 人类活动与水文条件是主要控制因素。

关键词

微塑料, 景观湖, 水体, 分布特征

Distribution Characteristics of Microplastics in Urban Landscape Lakes

Yongkai Wang, Hongzhao Ren, Qiang Xu, Pengyu Qi, Yanbo Li, Yang Li*

School of Smart Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou Henan

Received: April 29, 2026; accepted: May 28, 2026; published: June 15, 2026

Abstract

To investigate the pollution characteristics of microplastics in urban landscape lakes, surface water samples were collected from seven representative lakes in Zhengzhou City. The abundance, morphology, size, and polymer types of microplastics were analyzed. The results showed that microplastics were detected at all sampling sites, with abundances ranging from 139.74 to 285.46 n/L and an average value of (196.00 ± 53.17) items/L. Significant spatial heterogeneity was observed, with higher abundances at sites characterized by intensive human activities and poor water mobility.

*通讯作者。

文章引用: 王永凯, 任鸿钊, 许强, 戚鹏宇, 李炎博, 李扬. 城市景观湖泊中微塑料的分布特征[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(6): 1000-1009. DOI: 10.12677/aep.2026.166101

The dominant microplastic morphologies were fragments (39.26%) and films (29.33%), and particles smaller than 100 μm accounted for over 70% of the total. The main polymer types were polyoxymethylene (POM) and polyamide (PA), reflecting the influence of surrounding industrial activities and recreational fishing. This study indicates that microplastic pollution in urban landscape lakes of Zhengzhou is at a moderately high level, and human activities together with hydrological conditions are the key controlling factors.

Keywords

Microplastics, Landscape Lake, Water Body, Distribution

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微塑料通常被定义为粒径小于 5 mm 的塑料颗粒、纤维或碎片,自 2004 年 Thompson 等首次提出“微塑料”概念以来,这类污染物因其在环境中的持久性、广泛分布及潜在的生态风险,逐渐成为环境科学领域的研究热点[1][2]。微塑料的来源可分为初级微塑料(如化妆品中的塑料微珠、工业磨料等)和次级微塑料(大块塑料垃圾在物理、化学和生物作用下破碎形成)[3][4]。它们能够吸附环境中的重金属、持久性有机污染物等有毒物质,并可能通过食物链传递,对生态系统和人体健康构成潜在威胁[5][6]。

早期关于微塑料的研究主要集中在海洋生态系统,大量研究证实微塑料已广泛分布于全球各大洋、海岸带及深海沉积物中[7]。近年来,随着研究的深入,学术界普遍认识到内陆水体是微塑料向海洋迁移的重要通道,约 80% 的海洋微塑料被认为来源于陆源输入[8]。因此,研究重心逐渐转向与人类活动更为密切的淡水生态系统,包括河流、湖泊、水库等[9][10]。

城市景观湖体是城市水系统的重要组成部分,通常具有水域面积小、水深浅、水体流动性差、换水周期长等特点。这类水体多位于高密度建成区或城郊结合部,周边人口密集,人类活动频繁,易受大气干湿沉降、地表径流、垃圾随意丢弃、生活污水排放、旅游垂钓活动等局部污染源的影响[11]。与大型天然湖泊相比,城市景观湖体对外界干扰的缓冲能力较弱,污染物易于在湖内累积,因此其微塑料污染问题可能更为突出[12]。然而,目前国内针对城市景观湖体微塑料分布特征的系统性研究仍相对有限,尤其在中国中部地区,相关基础数据较为匮乏。

郑州市作为河南省省会,是国家中心城市之一,建成区面积大,人口密度高。近年来,郑州市高度重视城市生态环境建设,先后开挖或改造了数十个城市景观湖泊,如北龙湖、如意湖、西流湖等。这些湖体不仅提升了城市景观品质,也在调节区域小气候、涵养水源、提供休闲游憩空间等方面发挥着重要作用。然而,随着周边城镇化进程的加快和人类活动强度的增加,这些景观湖体面临日益严峻的水环境压力,微塑料污染状况尚不明确。本研究选取郑州市 7 个具有代表性的城市景观湖体,系统采集表层水样,分析微塑料的丰度、形态、尺寸及聚合物类型等分布特征,探讨人类活动和水文条件对微塑料分布的影响。研究结果为城市景观湖体微塑料污染的源头管控和生态风险评估提供科学数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

郑州市位于河南省中北部,黄河中下游分界处南岸,总面积约 7567 km^2 ,常住人口约 1300 万。该市

属暖温带大陆性季风气候, 年均气温 14.2℃, 年均降水量约 640 mm。近年来, 郑州市大力推进“水系连通”和“公园城市”建设, 形成了多个集景观、休闲、生态于一体的城市湖泊。综合考虑湖体功能、周边土地利用类型、人类活动强度等因素, 在郑州市共设置 7 个采样点(S1~S7), 采样点信息如表 1 所示。在每个采样点使用不锈钢采水器采集表层水样, 每组 1 L, 每个采样点重复取 3 组平行样。水样现场立即用 0.054 mm 孔径的不锈钢筛网过滤, 筛上物用超纯水冲洗后转移至棕色玻璃瓶中, 4℃冷藏保存, 24 h 内送回实验室处理。

Table 1. Location of each sampling point

表 1. 采样点信息

编号	名称	平均水深	经度	纬度
S1	绮湖	2.0~2.5 m	113°40'50"	34°35'5"
S2	轩辕湖	2.5~3.0 m	113°44'6"	34°25'2.86"
S3	新郑龙湖湿地	1.5~2.0 m	113°42'29"	34°37'21"
S4	西流湖	2.0~2.5 m	113°33'47"	34°45'3"
S5	北龙湖	4.5 m	113°43'38"	34°49'21"
S6	如意湖	2.0 m	113°43'11"	34°46'29"
S7	龙子湖	2.3 m	113°47'37"	34°47'28"

2.2. 样品预处理

采用 30% 的 H_2O_2 溶液对现场采集的样品进行消解[13]。将棕色玻璃瓶中采集到的样品转移至玻璃烧杯中, 加入两倍体积的 H_2O_2 溶液并放置在 60℃ 的水浴锅中静置消解 48 小时。使用真空抽滤装置对消解后的混合溶液进行抽滤, 滤膜选用孔径为 0.45 μm 的纤维素网格滤膜, 抽滤过的滤膜放置在玻璃培养皿中用铝箔纸密封保存。

2.3. 微塑料检测方法

首先将网格滤膜放置在显微镜(Motic, BA310 Digital, 中国)载物台上, 显微镜通过摄像头连接至计算机, 使用显微镜专用软件(Motic Images Plus 3.0 ML)观察出微塑料疑似物, 并统计疑似物的尺寸和形态, 标定疑似物在网络滤膜上的位置。之后使用激光共聚焦显微拉曼光谱仪(Ideaoptics, gora-Lite, 中国)对疑似物进行光谱检测。光谱仪的参数设置为: 波数范围为 60~3500 /cm, 分辨率小于 5 /cm, 激发波长为 785 nm。使用光谱分析软件(gora. Dawn)对检测结果进行分析, 将检测得到的光谱数据与不同材质的微塑料标准样品光谱数据进行对比, 相似度在 70% 以上的则判定为该材质类型的微塑料。最后对确定为微塑料的疑似物进行数量统计以进行丰度值的计算[14]。

2.4. 质量控制

为避免外源污染, 所有采样和实验器具均采用不锈钢或玻璃材质, 使用前经超纯水清洗 3 次以上, 烘干后立即用铝箔包裹。样品处理过程中, 实验人员穿戴纯棉实验服和一次性丁腈手套, 操作在超净工作台内进行。进行实验时设置 3 个全程空白(超纯水代替水样), 所有空白样品中仅检出极其少量的纤维状微塑料(3 组空白样中微塑料的平均丰度 < 1 n/L), 因此对实验结果不产生影响。

2.5. 数据分析

实验数据使用 Office Excel 进行统计分析, 使用 origin 2018 进行图片绘制, 使用 SPSS 29.0 进行数据

差异性分析。

3. 结果与讨论

3.1. 微塑料丰度分布特征

微塑料在所有 7 个采样点中均有检出,丰度范围为 $139.74 \pm 14.27 \sim 285.46 \pm 74.52$ n/L,平均值为 (196.00 ± 53.17) n/L (图 1)。不同采样点之间丰度差异显著($P < 0.05$),呈现出明显的空间异质性。S6 点丰度最高 (285.46 ± 74.52 n/L),约为区域平均值的 1.5 倍。该采样点位于郑州郑东新区 CBD 中央公园,周边汇集有密集的写字楼、商业综合体和餐饮店铺,是游客活动的密集场所,人类活动极为频繁。塑料包装袋、一次性餐盒、饮料瓶等废弃物产生量大,部分可能通过风力搬运、雨水径流或游客不文明行为进入湖体[15]。此外,该湖体水域面积较小(约 0.11 km^2),库容约 $26 \times 10^4 \text{ m}^3$,水体补给主要依托人工湿地循环与龙湖生态补水联合调度,日换水率为 26.9%,水力滞留时间为 3.7 d,整体属于水动力条件较弱、水体交换速率偏缓的封闭型景观湖泊,易导致微塑料等污染物在水体及底泥中滞留累积。S5 点丰度次之(264.78 ± 72.15 n/L),该点位于北龙湖,同样是郑州市比较出名的旅游场所,尤其在节假日期间游客量非常大,人为输入的塑料垃圾也是该点微塑料丰度较高的原因之一。此外,该湖总库容约 $2680 \times 10^4 \text{ m}^3$,水力停留时间约 179 d,日换水率约 0.56%,整体表现为换水周期长、水动力交换能力弱,有利于微塑料等颗粒污染物在湖区滞留与累积。S3 点丰度最低(139.74 ± 14.27 n/L),该点位于郑州南部郊区的新郑龙湖湿地公园,属于新建成的城市湿地景观。周边主要为住宅小区,人口密度相对郑州市主城区较小,无明显的工业或商业污染源。此外,目前公开文献中缺乏新郑龙湖湿地公园实测换水率与水力停留时间数据。根据其浅水(约 1.5 m)、多塘串联、湿地连通、尾水与径流补给充足的特征,结合《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2019)及国内同类城郊小型湿地湖泊研究,类比推断其日换水率约为 5%~10%,水力停留时间约为 7~15 d,水体更新快、微塑料沉降与富集时间不足,叠加郊区低人为输入与水生植物过滤效应,共同导致其微塑料丰度处于较低水平。上述结果与 Liang 等[16]的研究结论一致,即人类活动强度和人文条件是控制城市水体微塑料空间分布的关键因素。

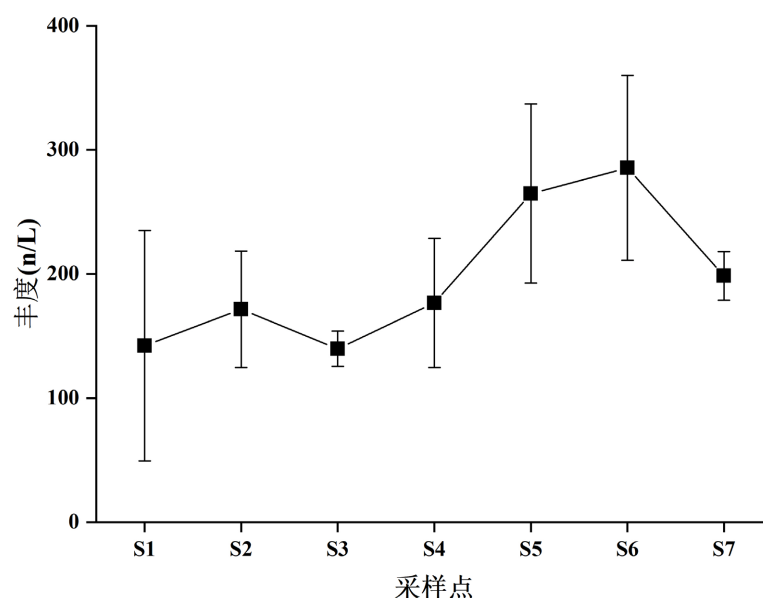


Figure 1. Abundance of microplastics in water bodies at each sampling point
图 1. 不同采样点水体中微塑料丰度

与其他国内外湖泊相比的结果如表 2 所示。郑州市城市景观湖体的微塑料丰度总体处于中等偏高水平。具体而言，显著高于印度 Manipal 湖(0.117~0.423 n/L) [17]、星湖(4.8~10.1 n/L) [18]、太湖(1.7~8.5 n/L) [19]以及美国五大湖(7~18.5 n/L) [20]；与意大利 Mugnone Creek (0.833~16 n/L) [21]和洞庭湖(0.367~2.8 n/L) [22]相比也偏高；但低于土耳其 Küçükçekmece Lagoon (3~124 n/L) [23]部分高值点。这一比较表明，郑州作为快速发展中的特大城市，其城市景观水体已受到一定程度微塑料污染，亟需采取管控措施。

Table 2. Comparison of microplastics abundance in different lakes
表 2. 不同湖泊中微塑料丰度对比

名称	国家	丰度	参考文献
Manipal 湖	印度	0.117~0.423 n/L	[17]
星湖	中国	4.8 ± 2.2~10.1 ± 7.6 n/L	[18]
五大湖	美国	7~18.5 n/L	[19]
巢湖	中国	0.25~3.2 n/L	[20]
Mugnone Creek 湖	意大利	0.833~16 n/L	[21]
Chennai 湖	印度	57 n/L (平均)	[22]
洞庭湖	中国	0.367~2.8 n/L	[23]
滇池	中国	2.205 n/L (平均)	[24]
Küçükçekmece Lagoon 湖	土耳其	3~124 n/L	[25]
松山湖	中国	0.00229 ± 0.00098 n/L	[26]
太湖	中国	1.7~8.5 n/L	[27]
景观湖	中国	139.74 ± 14.27~285.46 ± 74.52 n/L	本研究

3.2. 微塑料尺寸分布特征

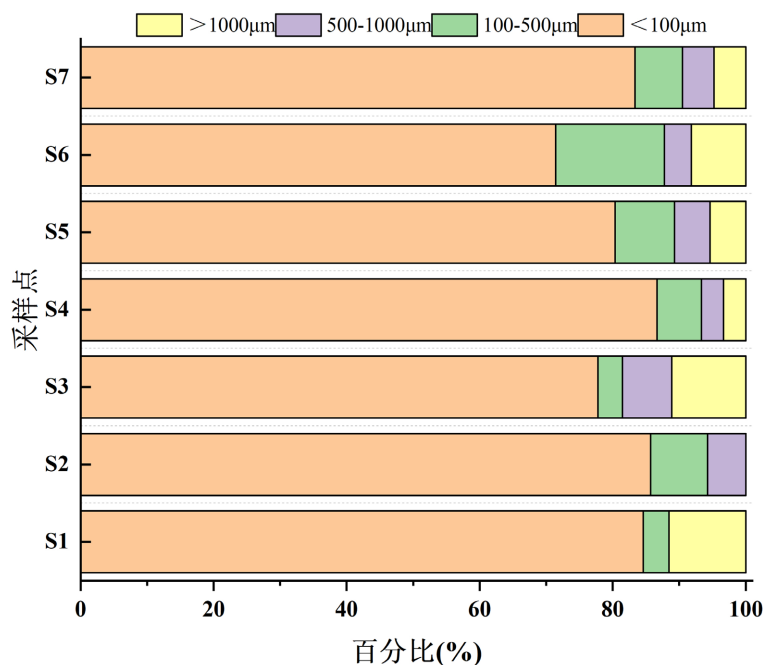


Figure 2. Proportion of microplastics sizes at each sampling point
图 2. 不同采样点微塑料尺寸占比

将检测出的微塑料按照不同的尺寸范围进行划分,结果如图2所示。其中小于 $100\ \mu\text{m}$ 的微塑料占比最高,在各个采样点中占比均超过70%,最高达到86.67%。而各个采样点水样中尺寸小于 $500\ \mu\text{m}$ 的微塑料累积占比则达到了81.48%~94.29%。此外,微塑料的尺寸分布在空间上无明显差异,表明小粒径微塑料在郑州市景观湖体中普遍占比较高。

小粒径微塑料的占比较高可能的原因包括大块塑料进入环境后,在外力作用下不断破碎,粒径逐渐减小,而小颗粒一旦形成,水体中的悬浮能力更强,不易沉降,能够在水中长期滞留[28];其次,本研究使用的滤膜孔径为 $0.054\ \text{mm}$,能够有效截留更小粒径的颗粒,避免了传统研究中因使用较大孔径(如 $0.3\ \text{mm}$ 或 $0.45\ \text{mm}$)滤膜而造成的 $<0.3\ \text{mm}$ 微塑料低估问题[29]。大量研究也报道了类似的粒径分布特征,如在三峡库区河流中, $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微塑料占主导[30],韩国汉江中, $<300\ \mu\text{m}$ 的颗粒占比超过80%[31]。这些结果共同表明,小粒径微塑料是淡水环境中的主要存在形式。值得注意的是,小粒径微塑料具有更大的比表面积和更强的污染物吸附能力,更易被浮游生物、贝类、鱼类等误食,并通过食物链传递[32]。因此,尽管本研究未进行专门的生态风险评估,但 $<0.1\ \text{mm}$ 微塑料的高占比本身就具有潜在的环境风险警示意义。

3.3. 微塑料的形状分布特征

将各个采样点检测出的微塑料分成颗粒、薄膜、纤维和碎片四种形状,不同采样点水样中微塑料的形状占比如图3所示。总体而言,碎片状微塑料占比最高,达到了39.26%,其次为薄膜状(29.33%)和颗粒状(15.28%)微塑料,而纤维状微塑料则占比相对较低,为14.74%。

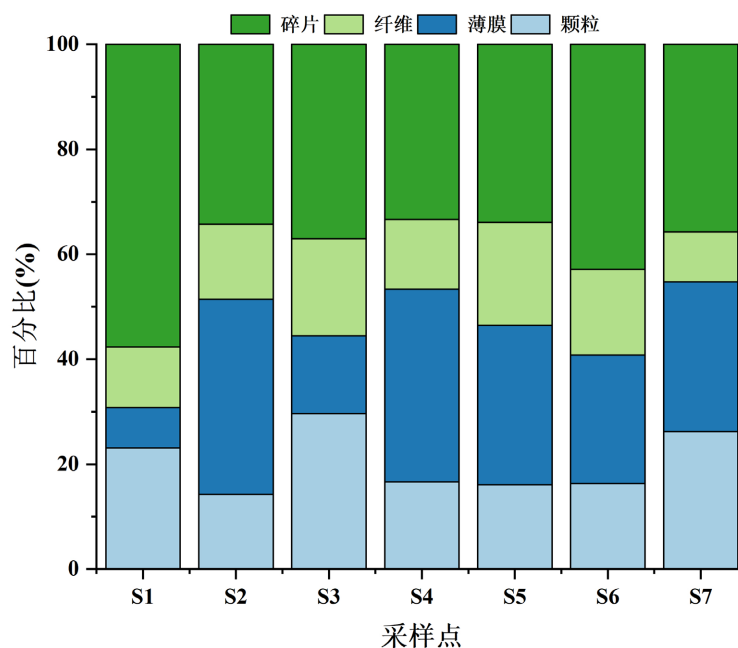


Figure 3. Proportion of microplastics shapes at each sampling point

图3. 不同采样点微塑料形状占比

碎片状微塑料多呈不规则片状,边缘尖锐,表面可见明显的划痕、凹坑或裂纹,这是典型的风化-破碎特征。这类微塑料主要来源于大块塑料垃圾(如塑料袋、塑料瓶、塑料容器)在光照、温度变化、水流冲刷、生物啃咬等作用下发生的物理破碎[33]。郑州市景观湖周边人口普遍较为密集,塑料废弃物产生量大,垃圾收集清运不及时,部分废弃物进入水体并逐步破碎,形成大量碎片状微塑料。薄膜状微塑料同样具

有不规则形状，表面较薄，透明度高，推测主要来源于塑料包装膜、农用地膜、垃圾袋等。

纤维状微塑料在本次研究中占比最低，但几乎每个采样点均有检出，且各点间丰度无显著差异($P > 0.05$)。纤维状微塑料通常来源于纺织品洗涤废水、大气沉降、渔线渔网脱落等[34]。由于本研究采样点多数位于城市建成区内，周边居民生活污水的排放基本都纳入到城市污水管网中，没有明显的点源优势，因此纤维状微塑料在空间上呈现相对均匀的分布特征。这与 Issac 和 Kandasubramanian [35]报道的城市河流中纤维状微塑料分布均匀的现象一致。

3.4. 聚合物类型分布特征

显微拉曼光谱共鉴定出 10 余种聚合物类型：包括聚氯乙烯(PVC)、聚甲醛(POM)、聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰胺(PA)、聚苯醚(PPO)和其他占比较少的一些聚合物种类。各采样点水样中聚合物类型的占比如图 4 所示。各个采样点水样中不同的聚合物类型具有明显的差异性($P < 0.05$)，且在 S5 至 S7 点处均检测到 POM 占比在 30%以上。分析其原因可能是该 3 处采样点均位于郑州东区，从周边土地利用类型来看，郑东新区景观湖流域人类活动密集度高，为 POM 微塑料提供了持续污染源与输送通道。其一，核心区为高密度商住与商务金融用地，CBD、龙湖金融岛及环湖高端住宅区、商业综合体密集，硬化路面覆盖率超 60%，日常家电、卫浴、汽车内饰、办公用品中的 POM 构件经磨损、老化、洗涤产生的微碎屑，随雨水径流快速冲刷入湖；其二，环湖分布科教与科创产业用地，龙子湖高校园区、中原科技城集聚大量科研实验、电子研发、精密加工活动，实验耗材、设备配件、3D 打印原料中的 POM 材料损耗，经生活污水、雨水管网间接汇入水体；从相关产业分布来看，郑东新区及周边经开区、白沙片区集聚汽车零部件、电子信息、精密机械制造企业，POM 因耐磨、耐腐蚀的理化特性，被大量用于生产齿轮、轴承、紧固件、仪器外壳等关键构件，生产加工、设备运维、产品报废拆解环节均会产生 POM 微碎屑，部分未有效处理的废料随生产废水、地表径流进入水环境；另一方面，现代服务业与城市消费产业为广泛排放源，新区金融、商贸、居住、物流产业发达，各类日用消费品、交通设施、市政器材、包装材料中 POM 应用普及，日常使用损耗、洗涤废水、交通路面磨损产生的 POM 微塑料，形成面源污染持续输入湖泊。从而导致外源输入的贡献较大。

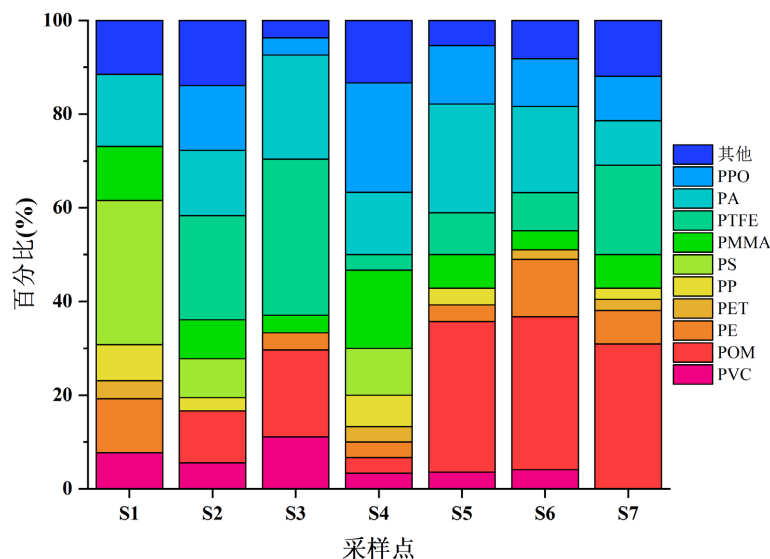


Figure 4. Proportion of polymer types at each sampling point
图 4. 不同采样点聚合物类型占比分布

如图 5 所示, 总体来看, POM 是所有聚合物类型中占比最高的一种, 主要原因是在 S5 至 S7 点处检测出了较多的该种聚合物。其次是 PA 占比也达到了 16.56%。PA 具有高强度、耐磨、柔韧性好等特点, 应用领域广泛, 日常的垂钓活动均会用到由 PA 制作的鱼线和渔网。城市的景观湖是市民进行垂钓娱乐的重要场所之一, 因此不可避免的会有废弃的渔线被随意丢弃或经风、水搬运进入湖体。PVC 虽然在总检出中占比不高(5.05%), 但其本身含有增塑剂等添加剂, 且降解过程中可能释放有毒氯化物[36], 在以往的研究中发现其能够造成较高的生态风险, 因此值得关注。

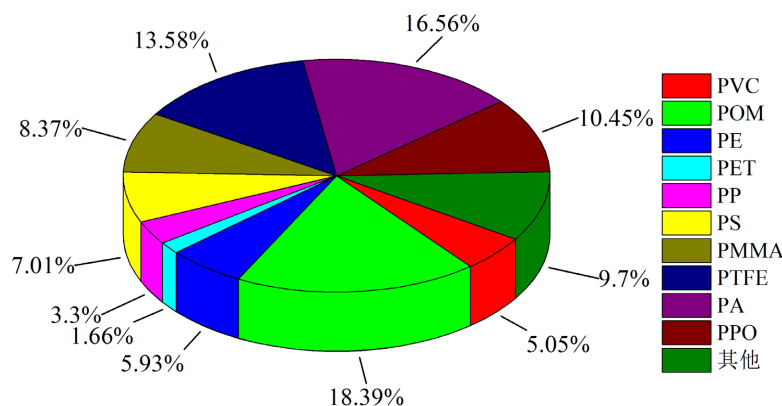


Figure 5. Proportions of different polymer types
图 5. 不同聚合物类型占比分布

3.5. 人类活动与水文条件对分布的影响讨论

综合上述结果, 郑州市城市景观湖体中微塑料的分布受多种因素共同影响, 其中人类活动强度是主导因素。S6 点位于市区核心地带, 周边商业、餐饮、住宅高度密集, 丰度最高, 形态以碎片和薄膜为主, 聚合物以 POM 和 PA 为主, 反映了外源输入性微塑料的典型特征。

水文条件同样起着重要作用。S4 点位于流水补给良好的生态公园内, 水体交换快, 丰度低于平均值。而 S5、S6 等点位于水体滞留区或湖湾, 流动性差, 再加上旅游人员密集, 有利于微塑料的累积。这一发现提示, 在景观湖体设计和运行管理中, 适当增加水体循环和流通性, 有助于降低微塑料的停留时间和富集程度。

此外, 微塑料的粒径分布以 $<100 \mu\text{m}$ 为主, 这一方面反映了现有塑料垃圾的持续破碎, 未来应加强对小粒径微塑料的源头控制, 例如禁止在化妆品和清洁剂中添加塑料微珠, 推广可降解塑料制品, 完善塑料废弃物回收体系等。

3.6. 研究的局限性

本研究采用单次抓取采样, 该方式存在明显局限性, 仅能获取单点瞬时样品, 难以兼顾湖泊空间异质性、时间动态性与水体垂向分层差异, 易受风浪扰动、局部径流输入与水动力环流的偶然因素影响, 样本偶然性较强。此外, 仅开展水体微塑料调查而忽略沉积物等环境介质, 存在明显研究局限: 水体仅为微塑料短期悬浮迁移的载体, 沉积物是湖泊微塑料重要的长期蓄积库; 单一水体介质研究不仅会低估区域微塑料总污染存量, 也无法揭示水-泥界面微塑料沉降、再悬浮的内源迁移过程。同时, 不同类型、密度的微塑料在水相与沉积相中分配特征差异显著, 仅关注水体易造成微塑料组分结构与污染水平评价片面化, 且缺失底泥环境生态暴露途径, 难以系统评估湖泊微塑料的生态风险与环境归趋。

4. 结论

(1) 郑州市 7 个城市景观湖体表层水中均检出微塑料, 丰度范围为 13.16~264.53 items/L, 平均值为 (110.92 ± 30.05) items/L。丰度空间差异显著, 人类活动强度大、水体流动性差的点位丰度更高。

(2) 微塑料形态以碎片状和薄膜状为主, 占比达到了 39.26%和 25.68%。微塑料尺寸以 <0.1 mm 占绝对优势(81.41%), 0.1~0.5 mm 占 7.88%, 两者合计超过 89%。小粒径微塑料占比较高暗示环境中塑料垃圾持续破碎且易于在水体中悬浮。

(5) 共检出 10 余种聚合物, POM 和 PA 为主要类型, 聚合物组成反映了周边工业生产和垂钓活动的点源输入特征。建议加强景观湖周边塑料垃圾收运管理, 规范垂钓活动, 减少一次性塑料制品使用, 同时优化水体循环设计, 以降低微塑料污染风险。

基金项目

河南省大学生创新创业训练计划(S202510465072); 河南省科技研发计划联合基金(252103810259)。

参考文献

- [1] Thompson, R.C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K. and Koelmans, A.A. (2024) Twenty Years of Microplastic Pollution Research—What Have We Learned? *Science*, **386**, Article No. 2746. <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>
- [2] 郭林益, 余薇薇, 朱崑莹, 等. 水环境中微塑料迁移模拟研究进展与展望[J]. 环境科学研究, 2026, 39(2): 311-322.
- [3] Li, J.S., Shan, E.C., Zhao, J.M., et al. (2023) The Factors Influencing the Vertical Transport of Microplastics in Marine Environment: A Review. *Science of the Total Environment*, **870**, Article ID: 161893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161893>
- [4] 张雅珊, 陈宗耀, 马伟芳. 微塑料的迁移转化及其生态风险研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(11): 6080-6098.
- [5] 刘义青, 邹清华, 张又中, 等. 紫外老化对微塑料吸附双氯芬酸的影响[J]. 中国环境科学, 2026, 46(3): 1398-1406.
- [6] 陈涣文, 向奕洁, 曾林, 等. 微塑料和 DEHP 的多物种联合毒性: 陆生、水生动物与植物[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(2): 137-151.
- [7] Li, M., Wang, Y., Xue, H., Wu, L., Wang, Y., Wang, C., et al. (2022) Scientometric Analysis and Scientific Trends on Microplastics Research. *Chemosphere*, **304**, Article ID: 135337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135337>
- [8] Zhao, B., Richardson, R.E. and You, F. (2024) Microplastics Monitoring in Freshwater Systems: A Review of Global Efforts, Knowledge Gaps, and Research Priorities. *Journal of Hazardous Materials*, **477**, Article ID: 135329. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135329>
- [9] 唐红亮, 马金龙, 徐琛琛, 等. 淡水生态系统中微塑料污染的影响与治理研究进展[J]. 人民珠江, 2024, 45(12): 83-95.
- [10] 臧雅婕, 黄晨宇, 桂志影, 等. 全国典型湖泊邻苯二甲酸酯类(PAEs)塑化剂多介质赋存特征及风险评估[J]. 湖泊科学, 2026, 38(1): 47-74.
- [11] 李杰. 城市化背景下郑州市河流景观廊道的时空演变与生态修复研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- [12] 李威, 李吉平, 张银龙, 等. 双碳目标背景下湖泊湿地的生态修复技术[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 157-166.
- [13] Mathew, J., Pulicharla, R., Rezai, P. and Brar, S.K. (2024) Microplastics in Wastewaters: Pretreatment to Detection Trail. *Journal of Water Process Engineering*, **64**, Article ID: 105702. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105702>
- [14] Li, L., Geng, S., Wu, C., Song, K., Sun, F., Visvanathan, C., et al. (2019) Microplastics Contamination in Different Trophic State Lakes along the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Basin. *Environmental Pollution*, **254**, Article ID: 112951. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.119>
- [15] Yang, H., Sun, F., Liao, H., Guo, Y., Pan, T., Wu, F., et al. (2023) Distribution, Abundance, and Risks Posed by Microplastics in Surface Waters of the Yangtze River Basin, China. *Environmental Pollution*, **333**, Article ID: 122086. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122086>
- [16] Liang, B., Gao, S., Wang, Z., Shu, R., Wang, N., Tan, W., et al. (2023) Spatial Distribution Characteristics of

- Microplastics in the Seawater Column and Sediments of the Artificial Reef Area and Adjacent Water in Haizhou Bay. *Science of the Total Environment*, **900**, Article ID: 166236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166236>
- [17] Warriar, A.K., Kulkarni, B., Amrutha, K., Jayaram, D., Valsan, G. and Agarwal, P. (2022) Seasonal Variations in the Abundance and Distribution of Microplastic Particles in the Surface Waters of a Southern Indian Lake. *Chemosphere*, **300**, Article ID: 134556. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134556>
- [18] Li, B., Li, B., Jia, Q., Hong, B., Xie, Y., Yuan, X., *et al.* (2023) Source or Sink Role of an Urban Lake for Microplastics from Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Environmental Research*, **224**, Article ID: 115492. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115492>
- [19] Koelmans, A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Mohamed Nor, N.H. and Gouin, T. (2023) On the Probability of Ecological Risks from Microplastics in the Laurentian Great Lakes. *Environmental Pollution*, **325**, Article ID: 121445. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121445>
- [20] 陈馨, 张仲伟, 刘运钊, 等. 巢湖水体中微塑料组成及分布特征[J]. 环境科学研究, 2022, 35(12): 2716-2721.
- [21] Rimondi, V., Monnanni, A., De Beni, E., Bilocchi, G., Chelazzi, D., Cincinelli, A., *et al.* (2022) Occurrence and Quantification of Natural and Microplastic Items in Urban Streams: The Case of Mugnone Creek (Florence, Italy). *Toxics*, **10**, Article No. 159. <https://doi.org/10.3390/toxics10040159>
- [22] Prapanchan, V.N., Sathya, U., Srihari, S., Kavitha, S., IndhiyaSelvan, V.N. and Subramani, T. (2023) Abundance of Microplastics in Urban Lakes of Chennai, India and Their Possible Health Risks. *Urban Climate*, **49**, Article ID: 101548. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101548>
- [23] 邓冠瑛, 蒋昌波, 尹令实, 等. 基于拉格朗日粒子模型的洞庭湖微塑料迁移分布研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 105-116.
- [24] Yuan, H.Y., Hou, L., Liang, Q.B., *et al.* (2021) Correlation between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake. *Environmental Science*, **42**, 3166-3175.
- [25] Faruk Çullu, A., Sönmez, V.Z. and Sivri, N. (2021) Microplastic Contamination in Surface Waters of the Küçükçekmece Lagoon, Marmara Sea (Turkey): Sources and Areal Distribution. *Environmental Pollution*, **268**, Article ID: 115801. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115801>
- [26] Tang, N., Yu, Y., Cai, L., Tan, X., Zhang, L., Huang, Y., *et al.* (2022) Distribution Characteristics and Source Analysis of Microplastics in Urban Freshwater Lakes: A Case Study in Songshan Lake of Dongguan, China. *Water*, **14**, Article No.1111. <https://doi.org/10.3390/w14071111>
- [27] Zhang, Q., Liu, T., Liu, L., Fan, Y., Rao, W., Zheng, J., *et al.* (2021) Distribution and Sedimentation of Microplastics in Taihu Lake. *Science of the Total Environment*, **795**, Article ID: 148745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148745>
- [28] 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 等. 淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1244-1257.
- [29] Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbins, J. and Janssen, C.R. (2015) Microplastics in Sediments: A Review of Techniques, Occurrence and Effects. *Marine Environmental Research*, **111**, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.007>
- [30] Xie, J., Li, B., Jia, Q., Li, X., Zhao, Q., Fan, P., *et al.* (2025) Neglected Microplastics and Their Risks in Rivers throughout the Three Gorges Reservoir Area. *Toxics*, **13**, Article No.781. <https://doi.org/10.3390/toxics13090781>
- [31] Park, T.J., Lee, S.H., Lee, M.S., *et al.* (2020) Occurrence of Microplastics in the Han River and Riverine Fish in South Korea. *Science of the Total Environment*, **708**, Article ID: 134535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134535>
- [32] 朱娇娇, 刘慧, 王为木, 等. 微塑料及其复合污染对水生生物的毒性与生态风险研究进展[J]. 环境科学学报, 2023, 43(12): 125-136.
- [33] 吴小伟, 黄何欣悦, 石妍琦, 等. 水环境中微塑料的光老化过程及影响因素研究进展[J]. 科学通报, 2021, 66(36): 4619-4632.
- [34] Vaid, M., Mehra, K. and Gupta, A. (2021) Microplastics as Contaminants in Indian Environment: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 68025-68052. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16827-6>
- [35] Issac, M.N. and Kandasubramanian, B. (2021) Effect of Microplastics in Water and Aquatic Systems. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 19544-19562. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>
- [36] 韦婧, 涂晨, 杨杰, 等. 微塑料对农田土壤理化性质、土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 644-652.