

# 城市地表水中微塑料的环境检测实验方法优化与污染特征分析

李金玉

九江市庐山生态环境监测站, 中国·江西 九江 332800

**摘要:** 针对城市地表水微塑料检测的代表性、效率与可比性瓶颈, 本研究优化了“采样-前处理-鉴定”全流程。通过优化布点策略、改进消解与分离工艺、构建“光学-拉曼-NTA”三级鉴定体系, 并结合全流程 QA/QC, 显著提升了检测效率与数据可靠性。应用该方法对某工业城市的检测发现, 微塑料丰度为 0.3~4.2 个/L, 呈现从工业区到郊区递减的分布特征, 其形态以纤维和碎片为主, 聚合物以 PE、PP、PET 占优, 污染主要源于生活 (45%)、工业 (35%) 和环境降解 (20%)。该优化体系为精准调查微塑料污染提供了关键技术支撑。

**关键词:** 微塑料; 城市地表水; 检测方法优化; 污染特征

## Optimization of Environmental Detection Methods for Microplastics in Urban Surface Water and Analysis of Pollution Characteristics

Li Jinyu

Jiujiang Lushan Ecological Environment Monitoring Station, China Jiangxi Jiujiang 332800

**Abstract:** To address the challenges of representativeness, efficiency, and comparability in the detection of microplastics in urban surface waters, this study optimized the entire 'sampling-preprocessing-identification' process. By refining the sampling site strategy, improving digestion and separation processes, and establishing a three-tier identification system of 'optical-Raman-NTA', combined with full-process QA/QC, the detection efficiency and data reliability were significantly enhanced. Applying this method to an industrial city, it was found that microplastic abundance ranged from 0.3 to 4.2 items/L, showing a decreasing trend from industrial areas to suburbs. The shape of microplastics was mainly fibers and fragments, with polymers predominantly PE, PP, and PET. The pollution sources were mainly domestic (45%), industrial (35%), and environmental degradation (20%). This optimized system provides key technical support for the precise investigation of microplastic pollution.

**Keywords:** Microplastics; Urban surface water; Optimization of detection methods; Pollution characteristics

## 0 引言

在塑料生产、使用和废弃过程中, 大量塑料垃圾进入环境, 在物理、化学和生物作用下破碎降解, 形成尺寸小于 5 毫米的塑料碎片、颗粒或纤维, 即“微塑料”(Microplastics, MPs)。作为一种新兴的全球性污染物, 微塑料已广泛存在于海洋、土壤、大气乃至极地与高山等偏远地区, 其对生态系统和人类健康的潜在威胁已成为环境科学领域的研究热点与前沿议题。目前国内外学者已对城市地表水微塑料的污染状况开展了广泛研究, 但在检测方法层面仍面临诸多挑战, 严重制约了研究数据的准确性与可比性。为突破上述瓶颈, 本研究以提升

城市地表水微塑料检测的代表性、准确性、效率和可比性为目标, 系统性地优化了从样品采集、前处理到鉴定分析的全流程实验方法, 并构建了严格的全流程质量保证与质量控制(QA/QC)体系。在此基础上, 将优化后的方法体系应用于某典型工业城市的地表水环境, 深入剖析其微塑料的丰度、空间分布、物理形态及化学聚合物组成等污染特征, 并结合多元统计方法对污染来源进行初步解析。本研究旨在建立一套科学、高效、标准化的城市地表水微塑料检测方法, 为精准评估我国城市水环境微塑料污染现状与风险提供可靠的技术支撑和数据基础。

# 1 城市地表水微塑料检测方法体系及瓶颈分析

## 1.1 样品采集环节的挑战

微塑料的来源包括较大的塑料碎片较大的废弃塑料在紫外线辐射、风力、水流剪切力等作用下分解而成,以及工业生产中使用的塑料颗粒以及合成纤维的洗涤产生的排放<sup>[1]</sup>。样品采集作为检测流程的基础环节,其科学性直接决定后续数据的代表性,当前实践中却面临多方面核心挑战<sup>[2]</sup>。在采样代表性上,点位布设多依赖经验,未能覆盖排污口等关键污染节点,且缺乏针对不同水体的垂直分层采样,无法精准捕捉微塑料的核心污染区域与分布特征。外源污染控制同样存在矛盾,轻便的聚乙烯容器自身会释放微塑料,而低污染的玻璃容器又不适合野外作业,加之采样工具缺乏统一的除塑处理,极易引入环境干扰<sup>[3]</sup>。此外,采样参数设定缺乏统一标准,采样体积差异悬殊易导致漏检,而对高悬浮物水体的前处理方式也无明确规定,可能造成微塑料损失或影响后续分析。

## 1.2 样品前处理环节的瓶颈

前处理环节是实现微塑料与水体中杂质有效分离的关键步骤,当前流程却存在效率与准确性的双重瓶颈<sup>[4]</sup>。在消解阶段,强氧化剂虽能去除有机质,但会破坏部分微塑料结构导致计数偏差;而温和试剂又对复杂有机质去除率不足,干扰后续鉴定。在分离阶段,主流的密度浮选法对高密度微塑料回收率低,造成样品损失;过滤环节的滤膜则易吸附纤维并破裂,加剧损耗<sup>[5]</sup>。此外,整个流程耗时长(24-48小时),步骤繁琐,不仅效率低下,还增加了转移过程中的微塑料损耗风险。

## 1.3 鉴定与分析环节的难点

鉴定与分析环节需同时实现微塑料的计数与定性分析,当前技术体系却存在“速度-精度”的突出矛盾,且数据完整性不足。在技术选型上,光学显微镜(OM)计数快但无法识别聚合物类型,误判率高;而拉曼光谱(RS)虽能精准识别,但检测速度极慢,难以满足大样本量需求<sup>[6]</sup>。在小粒径检测方面,现有技术对小于 $10\mu\text{m}$ 的微塑料及纳米塑料存在明显盲区,分离和识别能力不足,导致数据无法反映污染全貌。此外,不同技术的检测限差异巨大,使得各研究数据难以横向对比,且检测过程本身也可能改变微塑料的物理性质,影响定量结果的可靠性。

# 2 城市地表水微塑料检测方法的优化策略

## 2.1 采样策略的优化

采样策略优化以“提升代表性、控制外源污染”为核

心,结合水体类型差异制定差异化方案。在点位布设上,采用“关键节点+均匀网格”模式,优先覆盖排污口、支流汇入处等高风险区,并根据河流与湖泊的水力特性进行差异化分层布点<sup>[7]</sup>。垂直采样则依据水深设置不同层数,以捕捉微塑料的垂直分布。污染控制方面,统一选用经高温灼烧和超纯水清洗的聚四氟乙烯(PTFE)容器和工具,并规范现场操作以减少空气沉降污染。参数设定上,统一了不同水体的采样体积(河流 $\geq 20\text{L}$ ,湖泊 $\geq 30\text{L}$ ),并对高悬浮物水体进行 $200\mu\text{m}$ 筛网预过滤,以确保检出率并简化后续流程。

## 2.2 前处理流程的优化

前处理流程优化聚焦“高效分离、减少损失”,通过试剂改进、工艺调整与设备升级实现全流程优化<sup>[8]</sup>。在消解环节,采用“复合试剂+梯度温度”方案,针对不同有机质水体调整试剂配比,在保证高去除率的同时避免对微塑料的破坏。分离环节创新使用“密度梯度浮选+错流过滤”组合工艺,通过分层密度溶液高效分离不同密度的微塑料,回收率提升至85%以上,并选用吸附率更低的聚碳酸酯滤膜。此外,通过研发“消解-浮选-过滤”一体化装置,将全流程处理时间从24-48小时缩短至8-10小时,同时将转移损失率降至5%以下。

## 2.3 鉴定与分析技术的优化与整合

鉴定与分析技术优化以“速度-精度平衡、消除粒径盲区”为目标,通过多技术整合与设备升级突破现有局限<sup>[9]</sup>。通过构建“初筛-定性-定量”三级体系,用智能光学显微镜快速初筛,大幅提升效率并降低误判率;用显微拉曼光谱对疑似物精准定性,保持高准确率;针对小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒,采用离心富集与纳米颗粒追踪分析(NTA)技术,填补了纳米塑料检测空白。为满足大样本量需求,开发了“光学-拉曼”联用设备,实现自动化衔接,将单样品分析时间从数小时缩短至2-3小时。此外,引入ICP-MS技术分析微塑料吸附的重金属,为风险评估提供更全面的数据支撑。

## 2.4 全流程QA/QC体系的构建

全流程QA/QC体系构建以“覆盖全环节、标准统一化”为原则,通过空白对照、回收率验证、操作规范三大模块确保数据可靠<sup>[10]</sup>。空白对照体系设置采样、前处理和仪器三类空白,要求其浓度低于0.1个/L,以全程监控污染。回收率验证采用统一标准,使用四种不同类型和粒径的标准微塑料,要求回收率在70%-110%之间,并针对不同水体分别验证。操作标准化方面,制定了详细的SOP规

范,明确各环节关键参数,要求人员持证上岗,并通过季度实验室间比对确保数据可比性。此外,还建立了全程样品追溯体系,形成可核查的电子档案。

### 3 基于优化方法的城市地表水微塑料污染特征分析

#### 3.1 丰度与空间分布特征

依托优化后的“关键节点+均匀网格”采样策略与全流程 QA/QC 体系,对某典型工业城市 3 类地表水的微塑料丰度检测显示,研究区域微塑料丰度整体介于 0.3~4.2 个/L,较传统方法检测结果(0.1~2.8 个/L)更能捕捉低丰度区域的污染细节,且平行样品相对标准偏差(RSD)从 25%降至 12%以下,数据可靠性显著提升。空间分布呈现明显的功能区梯度,工业区周边丰度最高(均值 3.5 个/L),城区次之(均值 1.8 个/L),近郊自然湖泊最低(均值 0.5 个/L)。垂直分布上,深水湖泊中表层丰度略高于底层,而浅水河流因混合均匀,垂直差异不明显。

#### 3.2 物理形态特征

借助“智能光学显微镜初筛+拉曼光谱定性”的三级鉴定体系,对检测到的 1260 个微塑料颗粒形态分类显示,研究区域微塑料以纤维状(占比 48%)和碎片状(占比 32%)为主,球状颗粒占比 15%,其他形态占比 5%,且因优化方法可有效识别 < 50  $\mu\text{m}$  颗粒,纤维状颗粒中 100~500  $\mu\text{m}$  粒径占比达 65%,较传统方法(仅识别 > 100  $\mu\text{m}$  颗粒)新增 20% 的小粒径纤维数据。不同水体来源差异明显,城区水体纤维状颗粒(主要为 PET)占比最高,源于衣物洗涤;工业区水体碎片状颗粒(PP、PVC)居多,来自工业废料;近郊湖泊球状颗粒占比较高,可能来自化妆品。得益于技术优化,小粒径(<50  $\mu\text{m}$ )和纳米级颗粒被有效识别,使粒径分布更全面,以 100~500  $\mu\text{m}$  为主(62%),<50  $\mu\text{m}$  颗粒占比达 15%,填补了传统方法的检测盲区。

#### 3.3 化学聚合物组成特征

基于自建的微塑料聚合物数据库与拉曼光谱定性技术,研究区域微塑料共检出 8 种聚合物类型,其中聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为优势聚合物,合计占比达 78%,其余聚合物合计占比 22%,且各聚合物在不同水体中的分布具有功能区指向性。PE 占比最高(32%),在近郊湖泊中富集,主要源于农膜与生活垃圾;PP(25%)在工业区水体中占比显著提升,源于塑料加工废水;PET(21%)在城区水体中占优,多为纤维状,证实其生活来源。得益于优化的密度梯度浮选

技术,以往易被遗漏的 PVC(10%)在工业区水体的富集特征被首次明确。此外,PS、PA 等低占比聚合物因小粒径检测能力的提升,其分布规律也得以清晰呈现。

#### 3.4 污染来源初步解析

结合空间分布、形态及聚合物特征,并通过排污口监测与主成分分析(PCA),研究区域微塑料污染被量化为三大来源。生活源是首要贡献源(45%),主要来自生活污水排放(30%)和地表径流(15%),特征为城区水体中高占比的 PET 纤维。工业源是第二大贡献源(35%),源于工业废水(25%)和固废泄漏(10%),特征为工业区水体中富集的 PP、PVC 碎片。环境降解源为次要贡献源(20%),包括大气沉降(8%)和塑料废弃物自然降解(12%)。PCA 分析验证了该来源划分的合理性,并为污染管控提供了明确靶点。

### 4 结语

本研究针对当前城市地表水微塑料检测中存在的代表性不足、效率低下及数据可比性差等关键瓶颈,系统性地构建并验证了一套覆盖“采样-前处理-鉴定分析”全流程的优化方法体系。通过创新采样策略、改进前处理工艺、整合多级鉴定技术并建立严格的 QA/QC 体系,本研究不仅显著提升了检测的效率与准确性,更填补了小粒径及纳米级塑料的检测盲区,为获取高质量、可对比的微塑料污染数据奠定了坚实的方法学基础。基于该优化方法对典型工业城市的实证研究,清晰地揭示了其地表水环境中微塑料的污染“指纹”。未来应加强跨学科合作,从源头控制、过程阻断到末端治理,全链条地研发微塑料污染削减技术,为保障城市水生态安全和公众健康贡献科技力量。

#### 参考文献:

- [1] 毛若帆. 微塑料在西北典型地区不同环境介质中的污染特征及其来源分析[D]. 陕西:西北农林科技大学, 2021.
- [2] 刘咏雪. 贵阳市南明河流域微塑料分布特征及风险评估研究[D]. 贵州:贵州大学, 2022.
- [3] 李博文. 微塑料介导下东江下游抗生素迁移转化过程模拟研究[D]. 广东:广东工业大学, 2023.
- [4] 冯三三. 青藏高原东部和南部地区水土环境微塑料分布、来源及其迁移转化过程[D]. 华北电力大学, 华北电力大学(北京), 2021.
- [5] 聂华月. 珠江广州段及南薰礁表层水和鱼体内微塑料污染特征分析[D]. 广东:华南农业大学, 2020.
- [6] 王文锋. 华中地区湖泊微塑料污染特征及其与菲、

芑的吸附行为研究[D]. 中国科学院大学, 2018.

[7] 张国珍, 杨思益, 闵芮等. 我国城市地表水中微塑料特征、生态风险及来源分析[J]. 安全与环境学报, 2024,24(3):1209-1222. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0430.

[8] 徐炯基. 高度城市化地区地表水微塑料智能分类及时空污染特征研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2024.

[9] 尚文广. 浅谈微塑料污染与城市环境健康[J]. 环境保护与循环经济, 2018,38(6):88-90. DOI:10.3969/j.issn.1674-1021.2018.06.027.

[10] 关明昌, 干牧凡, 车景璐等. 渭河流域关中段微塑料时空分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2024,44(12):14-26. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0304.