

海洋微塑料的分析技术研究进展

蔡明桐

广东海洋大学化学与环境学院, 广东 湛江

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月10日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

海洋塑料污染已成为全球关注的重大环境问题, 其衍生的微塑料因粒径微小、分布广泛、易被生物摄食等特性, 对海洋生态系统乃至人类健康构成潜在威胁。当前微塑料污染日益严峻, 微塑料在环境中的迁移、转化、归趋和生态毒理效应研究亟需深化, 而建立标准化、高效的分析方法既是环境监测的基础, 也是开展上述研究的重要前提。本文系统综述了当前国内外海水样品微塑料的采集、预处理及定性、定量检测技术, 梳理了人工智能(AI)、高光谱成像技术(HSI)等新型检测技术的应用进展, 对比了各类方法的优势与局限, 针对现有技术短板明确了未来发展方向。本文对现有技术的系统整合, 尤其是传统方法与新兴技术的融合尝试, 既反映了跨学科融合的发展趋势, 也为后续相关研究提供了参考, 对初涉该领域的研究人员具有一定的参考价值。

关键词

微塑料, 新型环境污染物, 检测方法, 海洋污染

Research Progress in Analytical Techniques for Marine Microplastics

Mingtong Cai

Faculty of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: February 10, 2026; accepted: March 10, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

Marine plastic pollution has become a major global environmental concern, and microplastics derived from it pose potential threats to marine ecosystems and even human health due to their characteristics of small particle size, wide distribution, and high susceptibility to ingestion by organisms. As microplastic pollution grows increasingly severe, research on the migration, transformation, fate, and ecotoxicological effects of microplastics in the environment urgently requires further advancement, and

establishing standardized and efficient analytical methods is not only the foundation of environmental monitoring but also an essential prerequisite for conducting such research. This paper systematically reviews current technologies for the collection, pretreatment, qualitative, and quantitative detection of microplastics in seawater samples worldwide, summarizes the application progress of emerging detection technologies such as artificial intelligence (AI) and hyperspectral imaging (HSI), compares the advantages and limitations of various methods, and clarifies future development directions to address the shortcomings of existing technologies. The systematic integration of existing technologies in this paper—particularly the attempt to integrate traditional methods with emerging ones—not only reflects the trend of interdisciplinary integration but also provides a valuable reference for subsequent related studies, offering practical guidance and theoretical support to researchers who are new to this field and promoting the in-depth development of microplastic detection and environmental monitoring research.

Keywords

Microplastics, Emerging Environmental Pollutants, Analytical Methods, Marine Pollution

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

塑料在人们的生活中无处不在。塑料制品的问世极大便利了人们的日常生活，却也引发了严峻的环境污染问题。塑料具有稳定的化学性质，进入环境后降解速率极慢，且能在外力驱动下实现长距离、长时间的迁移扩散[1]，对生态系统构成持续性影响。

目前学界普遍认可的微塑料界定标准为粒径小于 5 mm 的塑料颗粒，其形态涵盖纤维、碎片、薄膜、泡沫等多种类型。海洋微塑料主要包括初级微塑料与次级微塑料两种，其中初级微塑料包括用于个人护理产品或工业原料的塑料微珠，以及原始尺寸小于 5 mm 的塑料制品，次级微塑料则是塑料垃圾风化或受到物理化学作用而破碎形成[1][2]。1972 年，Carpenter 等在美国 Florida 沿海首次发现了微塑料[3]。随后，微塑料在全球各地的水中不断被检出[4][5]。同时，微塑料可被不同营养级的生物体摄入，目前已在 1300 多种水生和陆生物种体内检测到[6]。微塑料自身可能含有化学添加剂，如颜料、增塑剂和抗氧化剂等[7]。此外，它们还能吸附环境中的有毒有害物质，包括有机污染物、重金属和放射性核素[8]。微塑料进入生物体后，可能引发消化道炎症反应，其携带的增塑剂、重金属等污染物会沿营养级逐级富集，对高等生物乃至人类健康构成潜在风险[9]。目前，在人体主动脉组织[10]、胎盘、肾脏、粪便[11]及血液[12]中均已检测到微塑料乃至更小的纳米塑料。随着研究的深入，微塑料污染问题，尤其是海洋微塑料污染，已引发国际社会的广泛关注[13]。

截至 2025 年底，在 Web of Science (WOS)核心合集数据库的文献计量分析显示，微塑料分析技术的发展格局已发生显著演变：传统目视鉴别法的应用占比快速萎缩，傅里叶变换红外光谱(FTIR)与拉曼光谱(Raman)已成为当前微塑料定性定量分析的主导技术，热裂解-气相色谱-质谱联用(Py-GC-MS)作为精准结构鉴定的“金标准”稳步发展，而人工智能(AI)与高光谱成像等新兴智能化技术则快速崛起，推动微塑料分析方法整体向自动化、高通量与精准化方向转型(如图 1)。据全球塑料工业联合会发布的数据可知，2022 年世界塑料制品的生产已经达到了历史的一个高峰，年产量 3.5 亿吨[14]，全球塑料的全生命周

期排放及海岸带微塑料污染特征也已被大量研究证实[15][16]。

近年来,虽然已有学者在不同环境介质中微塑料的采集、分离提取、定性鉴别分析方面进行了研究,但由于聚合物的类型,微塑料本身尺寸范围大,聚合物类型、形状、颜色多样,加之缺乏标准化的分析操作方法,使得目前微塑料的表征方式和检测方法没有一致的定论,所获得的结果偏差较大,导致不同研究机构之间的数据难以比较[17]-[20]。

微塑料分析技术缺乏统一规范,不仅难以深入解析核心科学问题,更对微塑料污染的综合治理构成阻碍。基于现有国内外研究成果,本文全面阐述海洋中微塑料的采集、分离提取及定性定量分析方法,系统对比各类技术的适配场景与局限,结合当前领域存在的核心短板,明确未来微塑料分析技术与研究的发展路径。

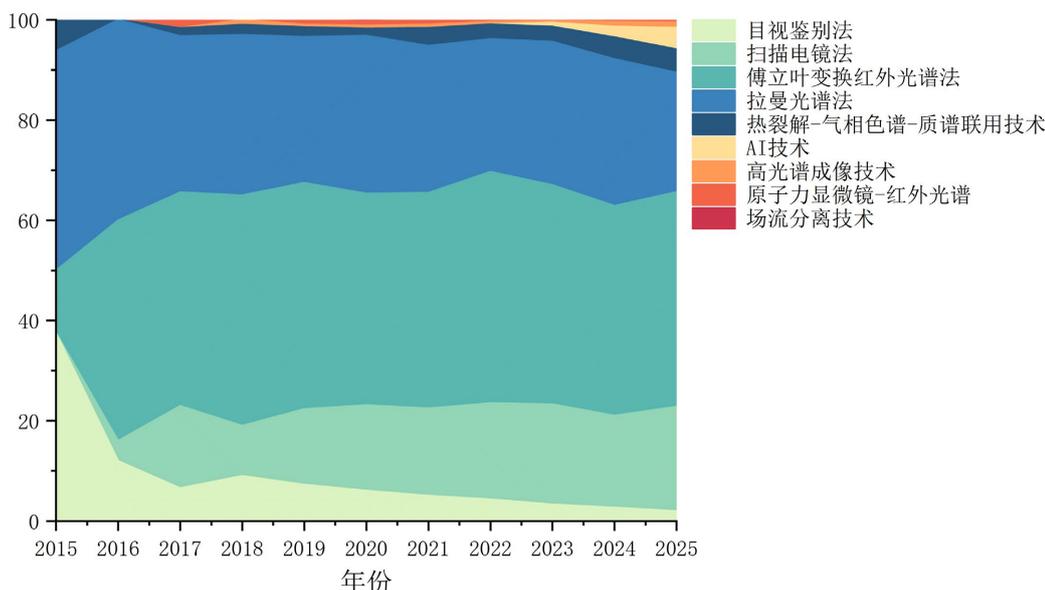


Figure 1. The change in the proportion of various analytical techniques in the literature over the past decade
图 1. 2015~2025 年微塑料分析技术文献占比变化趋势

2. 样品采集

2.1. 拖网

针对海洋不同深度水体的微塑料采集,需匹配差异化采样设备:(1) 表层水通常选用拖网式采样装置,例如 Manta 网,采样时需沿海水横截面匀速推拽采样装置,拖绳以纺丝杆固定于船尾外侧,且拖网需朝向迎风方向,以此规避船体扰动对采样精度的影响[21]。(2) 采集中层水多采用 Bongo 拖网。(3) 深层水域底层水体样品,使用底栖拖网进行采集。

采样筛网孔径的差异会导致收集到的微塑料质量存在显著变化。目前,最常用的采样筛网孔径范围为 333~335 μm [22]。为减少误差,可在拖网开口处安装流量计,以实时测量流经筛网的水体体积[23][24]。

2.2. 非塑料容器

选择大样本法采集表、中层水时常采用非塑料的容器进行采集样品。采样全过程中,实验操作人员都需穿着棉质而非人工纺织布材质服装,减少对塑料纤维测定的影响[25]等对样品进行密封保存,尽量避

免直接暴露于大气。

2.3. AI 技术

AI 技术, 尤其是机器学习与计算机视觉, 已在微塑料(MPs)自动化采集领域展现出显著应用价值[26] [27]。针对水体、滩涂及海底沉积物等多环境介质的 MPs 采集需求, 各类智能采集设备(如 3D 打印仿生机器鱼、无人机、智能探测车等)已逐步投入实践, 大幅提升了采样效率与覆盖范围。这类设备通过搭载数字摄像头捕获目标区域图像, 结合深度学习模型(包括 YOLACT、Mask-RCNN、YOLO 系列(YOLOv4, YOLOv6, YOLOv7, YOLOR, YOLOX)、SSD、MobileNet_V2 等)开展目标检测与特征识别, 能够精准区分塑料颗粒与环境杂质并定位其空间位置, 最终实现采集设备的自主导航、靶向捕获与智能操控[28]。

3. 样品前处理

3.1. 物理化学分离法

3.1.1. 密度法

密度分离法的原理是利用目标组分微塑料与杂质的密度差异, 实现轻组分微塑料与重组分杂质的分离。重组分会沉降于底部, 轻组分微塑料则会浮于溶液表面, 收集溶液表面的微塑料。NaCl 价廉易得, 常选择饱和 NaCl 溶液(密度为 $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)作为密度分离法的浮选液[29] [30]。

3.1.2. 过滤法

过滤法是一种简单有效的分离方法, 采用孔径较小的滤膜对样品进行减压过滤, 将微塑料保留于滤膜上。此方法适用于较大颗粒的微塑料, 但对于亚微米级别的颗粒, 其分离效率较低。

3.2. 基于表面性质的分离法

3.2.1. 油提法

油提法基于微塑料的亲油性实现分离, 常用蓖麻油、菜籽油等植物油作为萃取介质——植物油可包裹样品中微塑料颗粒, 降低其整体密度, 使其从水相上浮至油相完成分离。该方法的操作流程为: 将样品加入到含有盐溶液和油的混合体系中, 经多次搅拌、静置和收集油相, 合并、过滤油相并用乙醇洗涤, 可得到纯化的微塑料。Scopetani 等[31]证实了油提法在分离微塑料上, 对不同密度的聚合物平均回收率均超过 90%, 相较于饱和 NaCl 溶液对高密度微塑料的低萃取效率, 油提法无需使用 ZnBr_2 等有毒浮选剂, 更具环境友好性。油提法对各密度的微塑料采集效果均较好, 在无需保留微塑料外观结构时, 该法可替代密度分离法。但在复杂基质样品中易夹带疏水性杂质。该方法成本低、效率高, 但适用性及影响因素尚不明确, 限制了其应用[32]。该方法适用于采集大多数微塑料, 但样品基质中的亲油性杂质和吸附微塑料的小颗粒沉积物[14]也可能被同时收集, 且洗涤油相的试剂可能会破坏微塑料的结构。

3.2.2. 泡沫浮选法与浊点萃取法

泡沫浮选法与浊点萃取法都依赖表面活性剂的作用, 通过调节微塑料的表面特性来实现分离。泡沫浮选法通过加入表面活性剂使微塑料附着在气泡表面, 随着气泡浮升而被带到水面, 适用于疏水性微塑料的分离[33]。而浊点萃取法则利用表面活性剂的胶束增溶效应, 在达到临界胶束浓度时, 使微塑料颗粒与胶束结合, 通过升温促进两相分离, 适合分离小颗粒微塑料[34]。尽管两者的操作机制不同, 泡沫浮选法对较大颗粒疏水性微塑料较为有效, 浊点萃取法则在细小颗粒的分离中表现出色。两种方法在海洋微塑料的处理上都有广泛应用, 但各自的适用范围和效果有所差异。

3.3. 其他前处理方法

3.3.1. 目检法

目检法是利用肉眼直接观察或在显微镜的协助下,将微塑料挑出,并根据微塑料形态结构颜色等特点分类,能够分析各种环境介质中的微塑料[35]。虽然目检法设备简便,但极大程度上依赖操作人员的视觉差异,存在遗漏、误判等问题,假阳性和假阴性结果的比例随着颗粒尺寸的减小而增加,例如,只有1.4%的视觉上与MPS相似的颗粒被发现具有合成聚合物[17],需要反复判断,小心谨慎。

3.3.2. 消解法

消解法包括酸性消解、碱性消解或酶消解能有效去除生物基质干扰。Cole [36]等证明了利用蛋白酶(K 酶)能够消解海水样品中超过97%的浮游生物且不破坏任何微塑料碎片。

3.3.3. 加压溶剂萃取法(PDSE)

PDSE 技术是一种先进的萃取方法,其利用压力驱动原理,通过优化操作参数,显著增强目标化合物在萃取剂中的溶解度。该技术的应用不仅提高了萃取效率,还减少了萃取剂的消耗,从而实现了资源的高效利用。此外,PDSE 技术还易于实现自动化操作,极大地提升了分析的准确性和效率。通过将PDSE 技术与热解及气质联用分析,研究人员能够更深入地探究目标化合物的组成和性质。在一项关于污水处理厂中微塑料的研究中,该组合技术被用于详细分析1 nm 至5000 nm 的微塑料质量浓度[37]。

4. 微塑料及纳米级塑料定性、定量检测技术

评估微塑料的污染程度及其影响,选择合适的检测方法至关重要[38]。不同分析技术在样品适用性、检测精度及粒径覆盖范围上存在显著差异,为便于系统对比各类方法的技术特征,现将微塑料常用分析技术的样品要求、优缺点及粒径适用范围汇总于表1。所选的有效鉴别方法应与采样技术的目标保持一致,同时需要考虑分析微塑料的形态特征和化学成分的重要性。为便于研究人员根据实际样品条件快速选型,本文结合样品基质与目标粒径特征,构建了微塑料分析方法选择决策树(图2),为下述技术的实际应用提供直观参考。

4.1. 定性技术

4.1.1. 目视鉴别法

目视鉴别法一般是通过肉眼或借助体视显微镜的辅助,识别样品中的微塑料,并将其从尺寸、颜色、形态等方面进行分类的分析方法。

4.1.2. 扫描电镜法(SEM)

扫描电镜是一种高分辨率的表面分析技术,通过电子束扫描样品表面并捕捉二次电子信号,生成微塑料颗粒的高分辨率图像。它在微塑料的研究中应用广泛,尤其适用于微塑料颗粒的表面形态分析。SEM 不仅能够提供微塑料的尺寸、形态等信息,还可以与能谱分析(EDX)结合,分析样品的元素组成[39]。其主要优点是操作简便且不破坏样品,能够在不做复杂预处理的情况下观察微塑料的表面特征[40]。然而,SEM 仅能提供表面信息,对微塑料内部结构的分析有限,同时样品需要喷金处理,增加了操作复杂性[41]。因此,通常需要与其他分析方法(如FTIR 或拉曼光谱)结合使用,以实现微塑料的全面识别[42]。

4.1.3. 傅立叶变换红外光谱法(FTIR)

傅立叶变换红外光谱法是微塑料分析中最常用的分析方法之一。红外光谱法拥有高精度、高灵敏度、无损等优点。可以通过红外谱图中物质的化学组成和结构等信息实现微塑料定性分析。在样本被红外光照射的过程当中,样本的分子或者官能团会产生振动能级的转变,吸取频率一致的红外光能量,从而减弱特定波段的红外光能量[43]。由此,携带着样品吸收信息的光束通过检测器进行信号的检测,并进行傅

里叶变换处理, 最终可获得样品的红外光谱[44]。

4.1.4. 拉曼光谱法(Raman)

拉曼光谱法是一种基于光散射现象的分析技术, 通过激光照射样品, 探测分子振动引起的光谱位移, 从而获得微塑料的分子结构信息。拉曼光谱法能够对纳米级微塑料颗粒进行定性分析, 具有较高的灵敏度和分辨率[45]。与傅里叶变换红外光谱(FTIR)相比, 拉曼光谱法具有较少的样品预处理要求, 并且适用于湿样品和不透明样品[46]。该方法的优点在于其对塑料类型的高选择性, 能够准确识别不同种类的塑料材料[47]。然而, 拉曼光谱法也存在一定局限, 特别是在存在荧光干扰的情况下, 可能影响分析结果的准确性[48]。因此, 通常需要与其他分析技术(如 FTIR 或 SEM)结合, 以提供更全面的微塑料分析。

4.1.5. 热裂解 - 气相色谱 - 质谱联用技术(Py-GC-MS)

利用热裂解技术等使微塑料分解, 然后利用气相色谱/质谱联用技术分析。热分析技术根据聚合物的降解产物进行鉴定, 是一种通过聚合物的热稳定性来测量其物理和化学性质变化的破坏性方法。Py-GC-MS 技术的优势在于其不需要对样品进行复杂的预处理, 可直接进样分析, 高灵敏度和选择性, 能够检测到低丰度的微塑料, 并且可以提供微塑料的化学组成信息。

4.1.6. AI 技术

AI 技术在微塑料检测中的核心价值体现在自动化与精准化[49], 其中机器学习与计算机视觉的应用最为广泛。通过使用标注微塑料的形状、尺寸、纹理等关键特征的图像, 可训练 Faster-RCNN、YOLOv5 等深度学习模型, 使其具备处理数码相机、显微镜图像及视频数据的能力, 完成微塑料的自动识别与分类。基于傅里叶变换红外光谱仪、拉曼光谱仪及高光谱相机数据训练的深度学习模型, 可精准判别 PP、PVC、PET 等常见微塑料[26] [50]-[53]。但当前技术仍存在明显短板: 高质量标注数据稀缺导致模型泛化能力不足, 实验室环境训练的模型在自然水体、土壤等复杂基质中的检测效能尚未得到充分验证, 且技术应用分散缺乏系统性整合, 未来需从算法优化、数据共享、实地验证三方面突破, 目前已有诸多研究针对 AI 算法在水介质微塑料检测中的适配性、应用瓶颈开展了系统综述[16], 也有研究实现了基 AI 的微塑料污染识别与环境行为预测[54]。

4.1.7. 高光谱成像技术(Hyperspectral imaging, HSI)

高光谱成像技术(HSI)是一种将空间信息和光谱信息相结合的先进分析方法, 能够通过窄波段连续检测器获取物体的光谱特征, 并将其映射至二维空间轴与一维光谱轴, 从而形成三维数据立方体。这种技术的独特优势在于能够同时捕捉样品的光谱特征与空间分布, 因此, 在微塑料的检测中具有重要的应用价值[55]。然而, 尽管 HSI 技术在水下微塑料检测方面取得了一定的进展, 技术的实际应用仍面临着许多挑战, 特别是在数据降维和波段选择这两个关键环节[56]。

1) 数据降维问题

HSI 所生成的三维数据立方体包含数百个连续波段, 这会导致所谓的“维度灾难”。冗余波段不仅增加了数据存储和计算的负担, 还可能引入噪声干扰, 从而降低分类模型的性能。当前常用的降维方法如主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)和局部线性嵌入(LLE)各自存在局限: PCA 尽管 PCA 可以有效减少冗余波段, 但它对非线性数据适应性较差, 难以捕捉微塑料与环境基质之间的细微光谱差异[57]; LDA 在处理样本不平衡时易受影响, 特别是在自然水体中微塑料颗粒稀疏, 这会加剧 LDA 的偏差; LLE 作为非线性降维方法, 尽管适用于复杂的数据结构, 但其计算复杂度较高, 难以满足实时检测的需求[58]。

2) 数波段选择问题

波段选择是高光谱成像技术的另一个关键难点。现有波段选择方法大致可分为基于信息熵的无监督选择

和基于相关性的监督选择两类,但现有方法难以在“信息完整性”和“计算效率”之间找到最佳平衡:无监督方法(如互信息法)能够保留光谱的核心特征,但易筛选出冗余波段,导致计算效率低下[57];监督方法(如支持向量机递归特征消除 SVM-RFE)可以针对性地选择与微塑料识别最相关的波段,但依赖于高质量标注样本,而自然水体中微塑料的光谱特性可能会因污染或老化而发生变化,从而降低这些方法的鲁棒性[58]。

此外,海洋环境中的盐度、叶绿素浓度等因素的动态变化,使得实验室优化的波段组合在实际应用中可能失效,进一步增加了波段选择的难度[56]。为了提高波段选择的效率,未来的研究应克服这些问题,寻找更加鲁棒和高效的波段选择策略[58]。

总的来说,高光谱成像技术在微塑料检测中的应用面临着数据降维和波段选择这两个核心瓶颈。要实现其广泛的实用化应用,未来的技术发展需要在算法优化、数据共享、实际验证等方面取得显著进展[57],通过优化空间分辨率、光谱范围和分类模型,可进一步提升 HSI 对微塑料的识别效率[59]。

Table 1. Comparison of analytical techniques for surface morphology, composition and concentration of microplastics [60] [61]
表 1. 微塑料表面形态、组成与浓度的分析技术对比[60] [61]

分析方法	样品制备	优点	缺点	尺寸要求
目视鉴别法	无须特殊处理	便捷、简单,可在拉曼光谱或傅立叶红外光谱分析前进行预分离处理	误判率较高,数量估测不准确	>1 mm, <1 mm 借助显微镜
扫描电镜法	低真空度操作时 无须喷镀薄层金膜	无需特殊样品处理,即可实现元素分布分析及样品表面形貌表征;空间分辨率高	存在电荷效应,需要在高真空环境下进行特殊涂层处理;会造成样品损伤且成本较高	>20 nm
傅立叶变换 红外光谱法	无须特殊处理 (复杂样品需除杂)	具备样品可视化功能;可自动采集数据并生成图像,无损鉴定、操作简便,图谱库丰富,能消除水蒸气和二氧化碳干扰	结果极易受环境中 H ₂ O 和 CO ₂ 干扰;需要无尘环境	>10 μm
拉曼光谱法	无须特殊处理 (复杂样品需除杂)	无需添加试剂且对样品无损害,能够满足复杂样品的分析要求,适用于湿样,与 FT-IR 技术互补	受环境基质影响严重,存在明显荧光干扰,结果易受激发光波段选择影响,且检测过程较耗时	>10 μm, Micro-Raman 可低至 1 μm
热解/ 气相-质谱法	采样器配 热解吸系统	鉴定单一聚合物,无需投加额外溶剂,样品用量少,支持直接进样无需预处理	破坏性分析;实验条件要求高	无具体要求,但 过小可能引起误判
AI 技术	须彻底除杂	能够快速自动识别、分类和量化 MPs, 适配多场景数据	数据瓶颈突出;实用性有待验证;应用缺乏系统性	不同的 AI 技术 类型存在不同的 尺寸要求
高光谱成像 技术	须彻底除杂, 颗粒之间无重叠	可实现原位探测	灵敏度容易受波长、光谱等干扰,并且数据分析步骤比较繁琐	>250 μm

4.2. 定量技术

近年来, Micro-FT-IR、Micro-Raman、Py-GC-MS 等高效定量分析方法的快速发展,大幅优化了微塑料定量分析的准确性与可靠性。Micro-FT-IR 与 Micro-Raman 的定量逻辑虽与目检法相近,但通过红外光谱、拉曼光谱技术替代传统肉眼颗粒识别,显著增强了分析结果的精确度与客观性。Py-GC-MS 技术[62]则借助对高聚物的升温裂解处理,结合差示扫描量热法监测样品池重量随温度的动态变化,实现对微塑料的精准定量。该方法能有效区分不同组分的塑料,在共混物的同步定量分析中展现出独特优势。Duemichen 等[63]通过在 Py-GC-MS 前处理环节引入固相萃取技术,不仅进一步提升了目标组分的检出灵敏度,还拓宽了该方法在复杂基底环境样品分析中的适用范围。受研究区域与监测目标差异影响,不同研究所采用的定量检测技术各不相同,相关典型应用案例汇总于表 2。

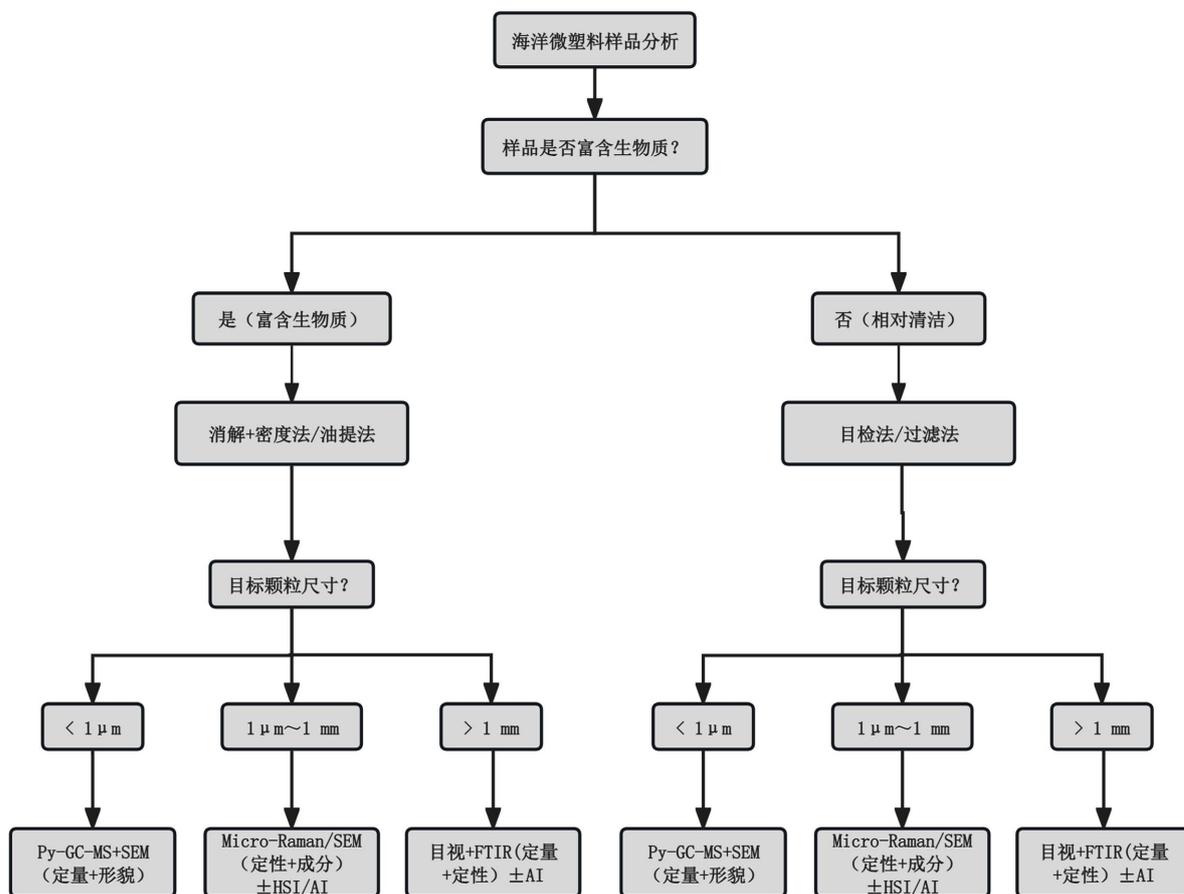


Figure 2. Decision tree for the selection of analytical methods for marine microplastics

图 2. 海洋微塑料样品分析方法选择决策树

Table 2. Case studies on microplastic separation and detection in different regions

表 2. 不同地区微塑料分离检测实例研究

研究区域	分离方法	检测方法	分析结果	参考文献
劳伦琴五大湖表层海水		SEM-EDX	微塑料丰度： 1.47 × 10 ⁵ ~2.14 × 10 ⁵ items/m ³	[61]
苏格兰周边海面海水	目检法	microFTIR, FTIR	微塑料丰度：0~1.215 items/m ³	[64]
珠江口(香港近岸海域)	30% H ₂ O ₂ 消解	光学显微镜、 FTIR、Raman	微塑料丰度：3.973 ± 1.177 items/m ³ ； 主要类型：30% PP/EPR、30% PE	[65]
波罗的海表层海水	用 300 μm 滤膜过滤	目检法	微塑料丰度：0~0.8 items/m ³	[66]
渤海锦州湾表层海水	0.05 mol/LFeSO ₄ 和 30% H ₂ O ₂ 消解， NaCl 溶液密度分离	目检法、FTIR	微塑料丰度：0.34~2.36 items/m ³ ； 微塑料尺寸：0.05~180 μm； 主要类型：PP55.0%、PE23.5%、PS7.6%	[67]
伊朗恰巴哈尔湾 表层海水	目检法	ATR-FTIR	微塑料丰度：0.04~1.41 items/m ³ ； 主要类型：69% PE 和 PP	[68]
巴西瓜纳巴拉湾	筛分法	红外光谱法	微塑料丰度：1.40~21.3 items/m ³	[69]
连云港海州湾 海域表层海水	30% H ₂ O ₂ 消解	目检法、FTIR	微塑料丰度：1.00~5.93 items/m ³ ； 主要类型：37.71%人造纤维、41.71% PET	[70]
塔拉地中海	目检法	ATR-FTIR	4064 个微塑料颗粒；主要类型：65.5% PE (其中 10.6%存在明显污损)、21.2% PP	[71]

续表

黄河三角洲南部	5 μm 滤膜真空过滤、 70 $^{\circ}\text{C}$ 消解 72 h	目检法、 $\mu\text{-FTIR}$	微塑料丰度：500~7830 items/ m^3 (均值 2350 items/ m^3)； 主要类型：33% PE、21% PP	[72]
德国诺德奈岛沉积物	饱和 NaCl 溶液密度分离	Py-GC/MS, SEM-EDX	微塑料丰度：1.0~2.0 items/kg	[73]
温哥华海滩沉积物	油提法(菜籽油)	目视统计法、FTIR	微塑料平均回收率：96.1% \pm 7.43%、 可以回收已确认的疏油纤维	[74]
大西洋、 地中海深海沉积物		μRaman , SEM	微塑料丰度：1.5 \pm 1.45 items/ m^3	[60]
香港海岸线表层沉积物	筛网、目检法		微塑料丰度：16~258 items/ m^2	[75]

4.3. 亚微米和纳米级微塑料的表征技术

随着微塑料污染问题的日益严峻，亚微米(小于 1 μm)和纳米级(小于 100 nm)塑料的表征技术已成为环境科学研究中的重要议题。由于其微小的粒径和高比表面积，这些纳米塑料的检测和表征具有更高的难度和复杂性。为了有效识别和分析这些细小颗粒，近年来多种新型表征技术得到了发展和应用，主要包括原子力显微镜 - 红外光谱(AFM-IR)、热解气相色谱-质谱(Py-GC-MS)、场流分离技术(FFF)等。

4.3.1. 原子力显微镜 - 红外光谱(AFM-IR)

AFM-IR 技术结合了原子力显微镜(AFM)和红外光谱(IR)分析的优势，可以在纳米尺度上对样品进行红外光谱分析。该技术具有高空间分辨率，能够直接分析亚微米和纳米级塑料颗粒的化学组成[76]。AFM-IR 技术的优势在于其能够在表面形貌的基础上获得分子级别的光谱信息，是分析纳米塑料颗粒的一项重要工具[77]。

4.3.2. 热解气相色谱 - 质谱(Py-GC-MS)

热解气相色谱 - 质谱(Py-GC-MS)是一种非常有效的高灵敏度分析方法，能够分析极低浓度的塑料颗粒。该技术通过热裂解过程将微塑料聚合物转化为较小的化学片段，然后使用气相色谱与质谱联用技术进行定性与定量分析[73]。Py-GC-MS 能够在较小的样品量和低丰度情况下识别复杂的塑料化学成分，尤其适合于亚微米级和纳米级塑料的痕量分析[19]。

4.3.3. 场流分离技术(FFF)

场流分离技术(FFF)是一种通过外部场(如流体力学场、离心场、电场等)分离不同粒径颗粒的技术。在处理亚微米和纳米塑料时，FFF 技术能够高效地对粒径范围广泛的微塑料进行分离。它特别适用于水样、空气样品中微小颗粒的分离和纯化，能够实现高分辨率的粒径分析[78]。该技术常与其他分析方法(如光散射、紫外吸收等)联合使用，以提高纳米塑料颗粒的检测灵敏度。

这些新兴技术为纳米级塑料的检测提供了有效的工具，并且不断推动着微塑料污染领域的科学进展。随着技术的进一步发展，预计亚微米和纳米塑料的检测将更加精确，为环境监测和污染治理提供更加有力的支持。

5. 总结

微塑料因其分布广泛、迁移性强、毒性累积等特性，已成为全球关注的重大环境污染物，其污染治理与科学研究仍面临多重关键瓶颈，亟有几个方面需解决和加强：

1) 需要建立标准化的微塑料采集与预处理技术。当前微塑料分析技术的核心瓶颈在于缺乏统一标准体系，具体体现在三方面：一是采集环节的拖网孔径、采样介质等关键参数无明确规范；二是预处理阶

段的密度分离、消解、萃取等方法选型差异较大，导致同一样品的分析结果偏差；三是定性定量检测技术的适配标准不统一，FTIR、拉曼光谱、AI 检测等技术的应用场景缺乏明确界定。因此，亟需出台分介质(海水、沉积物、生物体)的分析技术标准，规范样品采集 - 预处理 - 检测的全流程操作，保证研究结果的准确性、可靠性、可比性，为不同地区、不同研究机构的数据对比提供基础。

2) 中国作为塑料生产和使用的大国，需要构建“法规约束 - 监管强化 - 技术创新”三位一体的管控体系。一方面出台相关法律法规，控制和降低塑料的污染。另一方面通过加强全链条监管，鼓励促进可降解塑料制品的研发与使用。并将微塑料检测技术(如 FTIR、拉曼光谱标准化应用)纳入环境监测体系，为管控提供技术支撑。

3) 加速推进纳米塑料的相关研究，微塑料在环境外力作用下持续破碎，最终会形成纳米级塑料。由于尺寸上的差异，现行微塑料分析方法无法完全适用于纳米级微塑料，当前研究虽已取得一些进展，但多数仍停留在试验阶段，仅能实现对加标样品纳米塑料的检测分析，然而对环境中纳米塑料的检测仍存在挑战，需进一步优化样品预处理和高灵敏度分析技术，以实现不同环境介质中全粒径微塑料的检测。

4) 深化微塑料复合毒理效应研究，由于微塑料表面易附着有机污染物，其毒理效应的相关研究也亟待加强。对于微塑料对人类健康的影响，需要通过大量收集流行病学和临床样本数据，明确微塑料及其复合污染物的毒理机制，量化其对人体健康的潜在风险，为污染风险评估与管控提供科学依据。

综上，解决上述关键问题，需技术研发、监管实践与跨学科研究的协同推进，方能推动微塑料污染治理向科学化、系统化方向发展，切实保障生态环境与人类健康。

参考文献

- [1] Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M.N., Butterfield, D. and Whitehead, P.G. (2016) A Theoretical Assessment of Microplastic Transport in River Catchments and Their Retention by Soils and River Sediments. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **18**, 1050-1059. <https://doi.org/10.1039/c6em00206d>
- [2] Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., *et al.* (2015) Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science*, **347**, 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- [3] Carpenter, E.J., Anderson, S.J., Harvey, G.R., Miklas, H.P. and Peck, B.B. (1972) Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, **178**, 749-750. <https://doi.org/10.1126/science.178.4062.749>
- [4] Wang, J., Peng, J., Tan, Z., Gao, Y., Zhan, Z., Chen, Q., *et al.* (2017) Microplastics in the Surface Sediments from the Beijiang River Littoral Zone: Composition, Abundance, Surface Textures and Interaction with Heavy Metals. *Chemosphere*, **171**, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.074>
- [5] Lee, J., Hong, S., Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, Y.C., Jang, M., *et al.* (2013) Relationships among the Abundances of Plastic Debris in Different Size Classes on Beaches in South Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **77**, 349-354. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.013>
- [6] Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsecs, T., Trauner, M., Reiberger, T., *et al.* (2019) Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series. *Annals of Internal Medicine*, **171**, 453-457. <https://doi.org/10.7326/m19-0618>
- [7] Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, A.D., Garcia-Vallejo, J.J. and Lamoree, M.H. (2022) Discovery and Quantification of Plastic Particle Pollution in Human Blood. *Environment International*, **163**, Article 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- [8] Kanhai, L.D.K., Officer, R., Lyashevskaya, O., Thompson, R.C. and O'Connor, I. (2017) Microplastic Abundance, Distribution and Composition along a Latitudinal Gradient in the Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, **115**, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.025>
- [9] Garini, Y., Young, I.T. and McNamara, G. (2006) Spectral Imaging: Principles and Applications. *Cytometry Part A*, **69**, 735-747. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20311>
- [10] Lin, C., Huang, S., Lin, T. and Wu, P.C. (2023) Metasurface-Empowered Snapshot Hyperspectral Imaging with Convex/Deep (CODE) Small-Data Learning Theory. *Nature Communications*, **14**, Article No. 6979. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42381-5>
- [11] Cozzolino, D., Williams, P.J. and Hoffman, L.C. (2023) An Overview of Pre-Processing Methods Available for

- Hyperspectral Imaging Applications. *Microchemical Journal*, **193**, Article 109129. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109129>
- [12] Amigo, J.M., Babamoradi, H. and Elcoroaristizabal, S. (2015) Hyperspectral Image Analysis. a Tutorial. *Analytica Chimica Acta*, **896**, 34-51. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.09.030>
- [13] 薛庆生, 白皓轩, 李辉, 等. 水下高光谱成像探测技术研究进展(特邀) [J]. 光子学报, 2021, 50(12): 1-26.
- [14] Jiang, H., Zhang, Y., Bian, K., Wang, C., Xie, X., Wang, H., *et al.* (2022) Is It Possible to Efficiently and Sustainably Remove Microplastics from Sediments Using Froth Flotation? *Chemical Engineering Journal*, **448**, Article 137692. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137692>
- [15] Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L. (2017) Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances*, **3**, Article 1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [16] Astorayme, M.A., Vázquez-Rowe, I. and Kahhat, R. (2024) The Use of Artificial Intelligence Algorithms to Detect Macroplastics in Aquatic Environments: A Critical Review. *Science of The Total Environment*, **945**, Article 173843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173843>
- [17] Löder, M.G.J. and Gerdt, G. (2015) Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal. In: Bergmann, M., Gutow, L. and Klages, M., Eds., *Marine Anthropogenic Litter*, Springer International Publishing, 201-227. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8
- [18] Rocha-Santos, T. and Duarte, A.C. (2015) A Critical Overview of the Analytical Approaches to the Occurrence, the Fate and the Behavior of Microplastics in the Environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **65**, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.10.011>
- [19] Karami, A., Golieskardi, A., Keong Choo, C., Larat, V., Galloway, T.S. and Salamatina, B. (2017) The Presence of Microplastics in Commercial Salts from Different Countries. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 46173. <https://doi.org/10.1038/srep46173>
- [20] Filella, M. (2015) Questions of Size and Numbers in Environmental Research on Microplastics: Methodological and Conceptual Aspects. *Environmental Chemistry*, **12**, 527-538. <https://doi.org/10.1071/en15012>
- [21] Faure, F., Saini, C., Potter, G., Galgani, F., de Alencastro, L.F. and Hagmann, P. (2015) An Evaluation of Surface Micro- and Mesoplastic Pollution in Pelagic Ecosystems of the Western Mediterranean Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 12190-12197. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4453-3>
- [22] Herb, F., Boley, M. and Fong, W. (2025) Machine Learning Outperforms Humans in Microplastic Characterization and Reveals Human Labelling Errors in FTIR Data. *Journal of Hazardous Materials*, **487**, Article 136989. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136989>
- [23] Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N. and Tassin, B. (2015) Microplastic Contamination in an Urban Area: A Case Study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, **12**, 592-599. <https://doi.org/10.1071/en14167>
- [24] Desforges, J.W., Galbraith, M., Dangerfield, N. and Ross, P.S. (2014) Widespread Distribution of Microplastics in Sub-surface Seawater in the NE Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, **79**, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.035>
- [25] Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., *et al.* (2011) Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, **45**, 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- [26] Li, F., Liu, D., Guo, X., Zhang, Z., Martin, F.L., Lu, A., *et al.* (2024) Identification and Visualization of Environmental Microplastics by Raman Imaging Based on Hyperspectral Unmixing Coupled Machine Learning. *Journal of Hazardous Materials*, **465**, Article 133336. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133336>
- [27] Haram, L.E., Carlton, J.T., Centurioni, L., Choong, H., Cornwell, B., Crowley, M., *et al.* (2023) Extent and Reproduction of Coastal Species on Plastic Debris in the North Pacific Subtropical Gyre. *Nature Ecology & Evolution*, **7**, 687-697. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-01997-y>
- [28] Chong, F., Spencer, M., Maximenko, N., Hafner, J., McWhirter, A.C. and Helm, R.R. (2023) High Concentrations of Floating Neustonic Life in the Plastic-Rich North Pacific Garbage Patch. *PLOS Biology*, **21**, e3001646. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001646>
- [29] Nuelle, M., Dekiff, J.H., Remy, D. and Fries, E. (2014) A New Analytical Approach for Monitoring Microplastics in Marine Sediments. *Environmental Pollution*, **184**, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.027>
- [30] Technical Subgroup on Marine Litter (MSFD TSG ML) (2011) Marine Litter-Technical recommendations for the Implementation of MSFD Requirements. European Commission.
- [31] Scopetani, C., Chelazzi, D., Mikola, J., Leiniö, V., Heikkinen, R., Cincinelli, A., *et al.* (2020) Olive Oil-Based Method for the Extraction, Quantification and Identification of Microplastics in Soil and Compost Samples. *Science of The Total Environment*, **733**, Article 139338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139338>

- [32] Zuo, Z.J., Wang, J., Wang, Y.H. and Xu, M.X. (2023) Research on Soil Microplastic Separation Methods Based on Density Flotation and Oil Extraction. *China Environmental Science*, **43**, Article 5954.
- [33] Park, J.W., Lee, J.H. and Kim, D.K. (2020) Froth Flotation of Plastic Particles. *Journal of Environmental Engineering*, **132**, 647-653.
- [34] Zhang, Y.C., Liu, Z.Q. and Wang, M.F. (2021) Comparison of Froth Flotation with Density Separation for Microplastic Recovery. *Environmental Science and Technology*, **54**, 7542-7550.
- [35] 王昆, 林坤德, 袁东星. 环境样品中微塑料的分析方法研究进展[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 27-36.
- [36] Cole, M., Webb, H., Lindeque, P.K., Fileman, E.S., Halsband, C. and Galloway, T.S. (2014) Isolation of Microplastics in Biota-Rich Seawater Samples and Marine Organisms. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 4528. <https://doi.org/10.1038/srep04528>
- [37] 郭静芳. 离子色谱法在常规水环境检测分析中的常见问题及处理方法探讨[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版) 自然科学, 2022(4): 166-169. <http://dianda.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=1000003412559>, 2026-03-13.
- [38] Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Han, G.M., Rani, M., Lee, J., et al. (2015) A Comparison of Microscopic and Spectroscopic Identification Methods for Analysis of Microplastics in Environmental Samples. *Marine Pollution Bulletin*, **93**, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.01.015>
- [39] Wang, J. (2021) Scanning Electron Microscopy in the Analysis of Microplastic Morphology. *Journal of Applied Microscopy*, **54**, 98-105.
- [40] Liu, B., Zhang, J. and Li, Y. (2020) Microplastic Identification and Analysis Using SEM-EDX. *Marine Pollution Bulletin*, **95**, 234-240.
- [41] Zhang, C., Wang, X. and Li, M. (2019) Challenges in the SEM Analysis of Microplastics. *Marine Environmental Research*, **142**, 100-106.
- [42] Yang, L.Y. (2018) Combining SEM and FTIR for Microplastic Identification. *Environmental Science & Technology*, **55**, 2456-2463.
- [43] Hou, H.Y., Dong, M.L., Wang, Y.K., et al. (2016) Rapid and Noninvasive Detection of Skin Cholesterol with Diffuse Reflectance Spectroscopy Technology. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **36**, 3215-3221.
- [44] Yang, R., Dong, X., Chen, G., Lin, F., Huang, Z., Manzo, M., et al. (2020) Novel Terahertz Spectroscopy Technology for Crystallinity and Crystal Structure Analysis of Cellulose. *Polymers*, **13**, Article 6. <https://doi.org/10.3390/polym13010006>
- [45] Smith, J.P. (2020) Application of Raman Spectroscopy for Microplastic Detection. *Environmental Chemistry*, **45**, 659-666.
- [46] Li, Y.X. and Zhang, H. (2021) Comparison of Raman and FTIR for Microplastic Analysis. *Marine Pollution Bulletin*, **142**, 223-229.
- [47] Wang, S. and Liu, J. (2019) Advantages of Raman Spectroscopy in Microplastic Identification. *Journal of Analytical Chemistry*, **31**, 413-419.
- [48] Yang, L. (2018) Overcoming Fluorescence Interference in Raman Spectroscopy for Microplastic Analysis. *Environmental Science & Technology*, **52**, 8763-8769.
- [49] M. Khedre, A., A. Ramadan, S., Ashry, A. and Alaraby, M. (2023) Pollution of Freshwater Ecosystems by Microplastics: A Short Review on Degradation, Distribution, and Interaction with Aquatic Biota. *Sohag Journal of Sciences*, **8**, 289-295. <https://doi.org/10.21608/sjsci.2023.195914.1061>
- [50] Liu, Y., Yao, W., Qin, F., Zhou, L. and Zheng, Y. (2023) Spectral Classification of Large-Scale Blended (Micro)Plastics Using FT-IR Raw Spectra and Image-Based Machine Learning. *Environmental Science & Technology*, **57**, 6656-6663. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08952>
- [51] 杨颖, 吴玉暄, 潘巍, 等. 气相色谱/质谱和红外光谱测定鱼胃肠道内微塑料[J]. 中国环境科学, 2025, 45(7): 4012-4020.
- [52] Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V. and Lehtiniemi, M. (2014) Ingestion and Transfer of Microplastics in the Planktonic Food Web. *Environmental Pollution*, **185**, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- [53] Kozlov, M. (2024) Landmark Study Links Microplastics to Serious Health Problems. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00650-3>
- [54] Hu, B., Dai, Y., Zhou, H., Sun, Y., Yu, H., Dai, Y., et al. (2024) Using Artificial Intelligence to Rapidly Identify Microplastics Pollution and Predict Microplastics Environmental Behaviors. *Journal of Hazardous Materials*, **474**, Article 134865. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134865>
- [55] Gebejes, A., Hrovat, B., Semenov, D., Kanyathare, B., Itkonen, T., Keinänen, M., et al. (2024) Hyperspectral Imaging for Identification of Irregular-Shaped Microplastics in Water. *Science of The Total Environment*, **944**, Article 173811.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173811>
- [56] Serranti, S., Palmieri, R., Bonifazi, G. and Cózar, A. (2018) Characterization of Microplastic Litter from Oceans by an Innovative Approach Based on Hyperspectral Imaging. *Waste Management*, **76**, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.003>
- [57] Huang, H., Sun, Z., Liu, S., Di, Y., Xu, J., Liu, C., *et al.* (2021) Underwater Hyperspectral Imaging for in Situ Underwater Microplastic Detection. *Science of The Total Environment*, **776**, Article 145960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145960>
- [58] Xue, R., Lan, R., Su, W., Wang, Z., Li, X., Zhao, J., *et al.* (2023) Mechanistic Understanding toward the Maternal Transfer of Nanoplastics in *daphnia Magna*. *ACS Nano*, **17**, 13488-13499. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c01847>
- [59] Serranti, S., Capobianco, G., Cucuzza, P. and Bonifazi, G. (2024) Efficient Microplastic Identification by Hyperspectral Imaging: A Comparative Study of Spatial Resolutions, Spectral Ranges and Classification Models to Define an Optimal Analytical Protocol. *Science of The Total Environment*, **954**, Article 176630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176630>
- [60] Van Cauwenberghe, L., Vanreusel, A., Mees, J. and Janssen, C.R. (2013) Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments. *Environmental Pollution*, **182**, 495-499. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
- [61] Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., *et al.* (2013) Microplastic Pollution in the Surface Waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*, **77**, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- [62] Dekiff, J.H., Remy, D., Klasmeyer, J. and Fries, E. (2014) Occurrence and Spatial Distribution of Microplastics in Sediments from Norderney. *Environmental Pollution*, **186**, 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.019>
- [63] Dümichen, E., Barthel, A., Braun, U., Bannick, C.G., Brand, K., Jekel, M., *et al.* (2015) Analysis of Polyethylene Microplastics in Environmental Samples, Using a Thermal Decomposition Method. *Water Research*, **85**, 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.002>
- [64] Russell, M. and Webster, L. (2021) Microplastics in Sea Surface Waters around Scotland. *Marine Pollution Bulletin*, **166**, Article 112210. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112210>
- [65] Cheung, P.K., Fok, L., Hung, P.L. and Cheung, L.T.O. (2018) Spatio-Temporal Comparison of Neustonic Microplastic Density in Hong Kong SAR Waters under the Influence of the Pearl River Estuary. *Science of The Total Environment*, **628**, 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.338>
- [66] Setälä, O., Magnusson, K., Lehtiniemi, M. and Norén, F. (2016) Distribution and Abundance of Surface Water Micro-litter in the Baltic Sea: A Comparison of Two Sampling Methods. *Marine Pollution Bulletin*, **110**, 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.065>
- [67] 曲玲, 张微微, 王旭, 郭洪发, 陈元, 明浩, 张守锋, 赵骞, 王菊英. 锦州湾表层海水微塑料分布特征[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 98-104.
- [68] Aliabad, M.K., Nassiri, M. and Kor, K. (2019) Microplastics in the Surface Seawaters of Chabahar Bay, Gulf of Oman (Makran Coasts). *Marine Pollution Bulletin*, **143**, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.037>
- [69] Olivatto, G.P., Martins, M.C.T., Montagner, C.C., Henry, T.B. and Carreira, R.S. (2019) Microplastic Contamination in Surface Waters in Guanabara Bay, Rio De Janeiro, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, **139**, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.042>
- [70] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3212-3221.
- [71] Fondation Tara Océan (2022) Chemical Composition of Microplastics Floating on the Surface of the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **174**, Article 113284. <https://preprod.taraocean.aquaray.com/app/uploads/2022/01/chemical-composition-of-microplastics-floating-on-the-surface-of-the-mediterranean-sea.pdf>
- [72] Ding, R., Li, Q., Wang, K., Tian, J., Lu, L., Li, W., *et al.* (2024) Occurrence and Distribution of Microplastics in the Adjacent Environment of Yellow River Delta, China. *Marine Pollution Bulletin*, **199**, Article 116019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.116019>
- [73] Fries, E., Dekiff, J.H., Willmeyer, J., Nuelle, M., Ebert, M. and Remy, D. (2013) Identification of Polymer Types and Additives in Marine Microplastic Particles Using Pyrolysis-GC/MS and Scanning Electron Microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **15**, 1949-1956. <https://doi.org/10.1039/c3em00214d>
- [74] Crichton, E.M., Noël, M., Gies, E.A. and Ross, P.S. (2017) A Novel, Density-Independent and FTIR-Compatible Approach for the Rapid Extraction of Microplastics from Aquatic Sediments. *Analytical Methods*, **9**, 1419-1428. <https://doi.org/10.1039/c6ay02733d>
- [75] Fok, L. and Cheung, P.K. (2015) Hong Kong SAR at the Pearl River Estuary: A Hotspot of Microplastic Pollution.

Marine Pollution Bulletin, **99**, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.050>

- [76] Benassi, G., *et al.* (2017) Characterization of Microplastic Particles in the Environment Using AFM-IR. *Environmental Science & Technology*, **51**, 7433-7440.
- [77] Zhou, X., *et al.* (2020) AFM-IR for the Detection and Characterization of Nano-Sized Plastics in the Environment. *Nature Communications*, **11**, 1-9.
- [78] Jiang, X., *et al.* (2019) Application of Field-Flow Fractionation (FFF) in the Analysis of Nanoplastics in Marine Environments. *Environmental Science & Technology*, **53**, 2005-2012.