

doi: 10.12452/j.fxcxb.25020873

红外和拉曼光谱技术在微塑料检测中的应用： 原理、场景及展望

徐灿^{1,2}, 梁约², 朱晓艳³, 董犇², 苏启枝², 王小慧^{1*},
李丹², 钟怀宁^{2*}

(1. 华南理工大学 制浆造纸工程国家重点实验室, 广东 广州 510641; 2. 广州海关技术中心 国家食品接触材料检测重点实验室(广东), 广东 广州 510075; 3. 宁波海关技术中心, 浙江 宁波 315192)

摘要: 微塑料作为全球性新污染物, 对生态环境和人类健康具有潜在风险, 准确检测其丰度及赋存状态至关重要。光谱技术凭借可识别微塑料类型和无损检测的优势成为主流, 其中红外光谱和拉曼光谱的应用最为广泛。该文系统梳理了光谱技术检测原理与应用场景。红外光谱涵盖中红外、近红外和高光谱成像技术, 在不同尺寸微塑料检测及多环境介质分析中各有优劣。拉曼光谱中, 显微拉曼光谱在小尺寸微塑料检测方面表现突出, 增强拉曼和拉曼成像技术也各具特点。当前, 光谱技术在检测小尺寸、复杂基质中的微塑料时仍面临挑战。通过发展新的高分辨率技术、优化算法、统一检测标准等措施, 有望提升光谱技术在微塑料检测中的效能, 为微塑料污染研究与治理提供有力的技术支持。

关键词: 微塑料; 红外光谱; 拉曼光谱; 检测技术

中图分类号: O657.3; TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2025)12-2649-08

Application of Infrared and Raman Spectroscopic Techniques in Microplastic Detection: Principles, Scenarios, and Prospects

XU Can^{1,2}, LIANG Yue², ZHU Xiao-yan³, DONG Ben², SU Qi-zhi², WANG Xiao-hui^{1*},
LI Dan², ZHONG Huai-ning^{2*}

(1. State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. National Reference Laboratory for Food Contact Material (Guangdong), Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510075, China; 3. Ningbo Customs Technology Center, Ningbo 315192, China)

Abstract: As a novel global pollutant, microplastics carry potential risks to the ecological environment and human health. Thus, accurately detecting the abundance and occurrence state of microplastics is of critical importance. Spectroscopic techniques have become the mainstream, leveraging their advantages in identifying microplastic types and conducting non-destructive testing. Among them, infrared spectroscopy and Raman spectroscopy are applied most extensively. This paper systematically reviews the detection principles and application scenarios of spectroscopic techniques. Infrared spectroscopy encompasses mid-infrared, near-infrared, and hyperspectral imaging technologies, each having its own merits and demerits in detecting microplastics of varying sizes and analyzing different environmental media. In Raman spectroscopy, micro-Raman spectroscopy excels in detecting small-sized microplastics, while enhanced Raman and Raman imaging technologies also have their distinct characteristics. Currently, spectroscopic techniques still face challenges when detecting microplastics in small sizes and complex matrices. By developing new high-resolution technologies, optimizing algorithms, and unifying detection standards, it may be possible to enhance the effectiveness of spectroscopic techniques in microplastic detection, providing powerful technical support for the research and control of microplastic pollution.

Key words: microplastics; infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; detection techniques

收稿日期: 2025-02-08; 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 海关总署科研项目(2024HK190, 2022HK022)

* 通讯作者: 王小慧, 博士, 教授, 研究方向: 生物质材料的改性与应用, E-mail: fewangxh@scut.edu.cn

钟怀宁, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品接触材料污染物检测与评估, E-mail: marco.zhong@iqtc-fcm.com

网络首发时间: 2025-10-22

微塑料(<5 mm)由塑料制品破碎与降解形成,尺寸小、比表面积大且迁移率高,具备吸附、富集和运载有毒有害物质的能力^[1-2]。2050年,全球塑料总产量预计将达到340亿吨^[3],约有12亿吨塑料垃圾将进入自然环境中。目前塑料的回收体系尚不完备,大量未经处理的塑料垃圾已进入水体、土壤等环境介质中,产生微塑料并参与生物链的循环^[4-5]。近年来,微塑料的环境行为和影响已成为当前科学研究的热点之一。由于微塑料对生态环境存在毒害效应,已被联合国环境规划署(UNEP)列为全球性新污染物。在我国,党中央和国务院也积极开展应对塑料污染的重要战略部署,促进提升微塑料污染防治的科学性和精准性。此外,微塑料对人类健康带来的不良影响同样不容忽视,主要来自以下3个方面:一是归因于其自身的尺度效应或理化性质;二是由于吸附在塑料上的持久性污染物的释放;第三则源于塑料单体或添加剂的迁移^[6-7]。为了科学合理地评估微塑料的潜在风险,并制定精准有效的管控措施,获取关于微塑料丰度及其赋存状态的可靠信息显得尤为重要。

微塑料的检测方法按照原理主要可分为以下几种:光谱法、质谱法(色谱联用)、荧光染色法、光学(散射)法、核磁共振波谱法,以及各类传感方法(电化学、生物等)^[8-13]。本文对Web of Science数据库中近3年关于微塑料检测类的480余篇研究类文献进行整理,各类研究中所用检测方法的占比统计如图1所示,其中超过53%的文献中采用了光谱类型的检测技术。由于具有识别微塑料类型的能力和对本样无损等优势,光谱法已成为检测微塑料的主流,红外光谱和拉曼光谱是最为常用的两大类^[14]。尽管如此,光谱方法仍具有一些局限性。例如,红外光谱由于衍射极限难以识别尺寸小于10 μm的颗粒,拉曼光谱则易受荧光背景的干扰^[15-16]。尤其是对于复杂基质中的微塑料,通过光谱进行快速准确表征还存在较大难度^[17]。这些阻碍促使科研人员不断探索和开发新的技术与方法,以实现微塑料更准确、更高效的分析和检测。

本文基于近年内公开发表的文献资料,系统梳理了光谱技术用于微塑料检测的原理,统计分析了各类方法的应用场景,以为后续微塑料检测方法的开发提供参考依据。此外,本文对突破现有技术局限性的新方法进行了重点阐述,总结了机器学习等大数据模型对检测技术的优化升级,强调了标准化检测流程的重要性。以期光谱技术在微塑料检测领域的进一步发展提供新的思考方向,推动微塑料检测技术不断迈向新的高度。

1 光谱技术在微塑料检测中的原理与应用场景

光谱技术在聚合物材料的分析与检测领域有着广泛的应用,主要为红外光谱和拉曼光谱。当样品受到红外光照射时,依据样品的分子结构,部分红外辐射会被吸收,最终通过透射或反射模式进行测量,故红外光谱属于吸收光谱。拉曼光谱是一种散射方法,使用单色激光(常用波长532、633、785 nm)作为光源对样品进行辐射后,部分散射光子会发生能量转移,进而提供有关样品中分子振动的信息。通过将未知样品在红外或拉曼光谱中产生的特征信号与已知参考光谱进行比对,从而对微塑料进行识别。样品对红外光的吸收取决于化学键永久偶极矩的变化,拉曼光谱信号则基于化学键极化率的变化^[18]。依据红外光的波长(图2),可将其分为近红外、中红外、远红外3个波段,在远红外与微波之间,还存在太赫兹波段^[19]。

对3年内使用光谱技术检测微塑料的文献进行统计分析(图3),其中54.6%采取红外光谱法进行检测,45.4%使用拉曼光谱。在红外光谱中,最常用的波段为中红外区域(波数4 000~400 cm⁻¹,占比

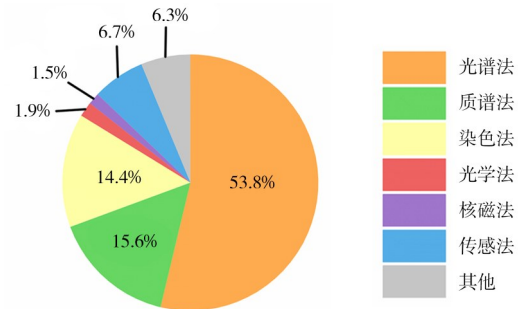


图1 2022~2024年微塑料检测类文献所使用的方法统计图
Fig. 1 Statistical chart of methods used in literature of the detection of microplastic from 2022 to 2024

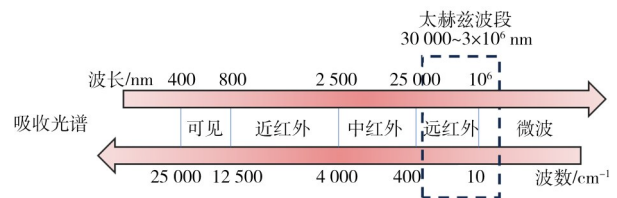


图2 红外光谱的波段划分
Fig. 2 Band division of infrared spectrum

84%)。在拉曼光谱中, 67.6%采用传统激发模式, 其他则通过构筑衬底等方式实现增强拉曼^[20]。

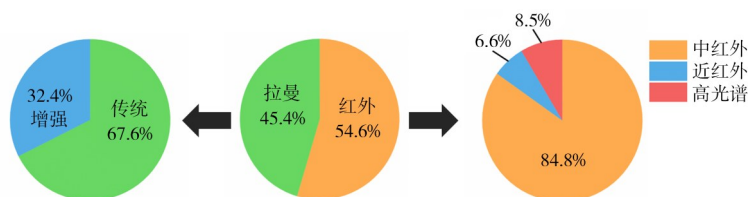


图3 红外与拉曼技术在微塑料检测中的应用

Fig. 3 Application of infrared and Raman techniques in microplastic detection

1.1 红外光谱

在2004年首次引入“微塑料”这一术语的论文中, Thompson等^[21]通过傅里叶变换红外光谱法(FTIR)对海洋中的微塑料进行了鉴定。尽管检测技术不断迭代更新, 红外光谱在全球微塑料研究中的应用仍然最为广泛, 涵盖水体^[22-23]、土壤^[24-25]、大气^[26-27]、食品饮料^[28-29]以及生物组织^[30-31]中的微塑料识别、量化与分析。由于水分子具有非常强且宽的红外吸收, 会影响微塑料和未知颗粒的光谱响应, 故要求样品处于干燥状态, 这在一定程度上阻碍了红外光谱在微塑料检测领域的应用。

1.1.1 (中)红外光谱 红外光谱具有透射和反射两种模式。透射模式下需要红外透明的基底以消除干扰(如氧化铝和硅等), 且对于深色或不透明颗粒的适用性较差。在分析尺寸大于200~500 μm 的微塑料时, 更为常用的是衰减全反射(ATR)技术^[32]。测量时将具有高折射率的ATR晶体(如金刚石和硒化锌等)压在样品表面, 当红外光在晶体与样品界面反射时, 会穿透样品到达几微米的深度, 从而获得样品的红外数据。由于需要一定压力才能使晶体与颗粒表面形成相互作用, 该方法可能会对样品或仪器产生损害。此外, ATR方法需对颗粒进行逐个分析, 耗时较长^[33]。

分析尺寸较小的微塑料颗粒时, 将FTIR光谱仪与光学显微镜相结合的显微傅里叶变换红外光谱法(μ -FTIR)最为适用。 μ -FTIR的空间分辨率受衍射极限制约(理论上4 000 cm^{-1} 时约为1.7 μm , 500 cm^{-1} 时约为13 μm), 实际上能有效鉴定和量化大于10~20 μm 的颗粒^[34]。复杂体系中微塑料的红外光谱分析, 去除其他有机和无机基质的干扰尤为重要, 其常用方法有密度分离、化学或酶消解。此外, 为提升分析代表性和统计确定性, 需减少颗粒总数以避免或降低微塑料与其他颗粒团聚重叠带来的分析误差, 通常只提取部分样品分散于滤膜或载玻片上。 μ -FTIR可针对性地选择自动或手动模式以分析预选颗粒或整个待测区域, 有效的前处理手段可提高检测效率。Hernandez等^[35]的研究表明, 通过0.1 mg/L尼罗红染色颗粒进行预先筛选, 能提高红外光谱量化微塑料的准确性, 并缩短分析时间。

1.1.2 近红外光谱 除中红外光谱外, 近红外(NIR)光谱在微塑料分析领域(波数12 500~4 000 cm^{-1})也具备较强的应用潜力。一些化学键的倍频和组合频振动出现在近红外区, 当用近红外光照射样品时, 分子吸收特定频率的光, 从而产生对应的特征近红外吸收光谱。近红外吸收光谱可用于物质的定性和定量分析, 在高分子材料中, 可通过观察C—H、C—O和N—H等键的特征谱带差异识别微塑料的类型^[36]。由于倍频振动的吸收系数相较于基频振动更低, 这使得近红外辐射比中红外辐射穿透得更深, 并在微塑料分析方面展现出独特优势。例如, 近红外光谱具备高通量和快速现场检测的能力, 可分析体积较大的样品, 并提供特征指纹信息。此外, 近红外光谱对水以及生物膜等污染物的敏感性较低, 可简化样品的前处理过程^[37]。

由于倍频和组合频的振动信号会出现重叠, 近红外光谱大多需要结合化学计量学或数据模型对微塑料进行分析。Wu等^[38]采用便携式近红外光谱仪, 借助乘法散射校正预处理的支持向量机定性模型, 精准鉴别了垃圾焚烧灰分中的微塑料。Zou等^[39]通过近红外光谱技术, 基于多种机器学习模型开发出一种快速且可同步识别有色和无色塑料碎片的方法, 具有在复杂环境中保持高准确率的特点。采用基于近红外的颗粒分析技术分析尺寸200~500 μm 左右的颗粒, 可作为微塑料预筛选的第一步^[37]。值得注意的是, 不同特性的传感器会导致光谱仪产生的信号存在显著差异, 数据分析方式也会影响鉴别效果^[40]。

1.1.3 高光谱成像 高光谱成像技术能够获取物体在多个窄波长范围内的光谱与空间数据。在物体的高光谱图像中, 每个像素都涵盖一定的波长范围, 由此形成的光谱轮廓会受到物体化学成分与结构

的影响^[41]。高光谱成像技术为光谱数据增添了空间元素,测量速度相对较快且样品处理量少,但也对数据处理和模型建立提出了更高的要求^[42-43]。Xu等^[44]研究了高光谱成像技术结合3种机器学习模型对微塑料分类检测的策略。其中,一维卷积神经网络对聚乙烯、聚丙烯和聚氯乙烯微塑料有95%的识别准确率。Chen等^[45]探讨了高光谱中不同波段区域对微塑料鉴别的影响,发现短波红外(SWIR, 800~1 600 nm和1 000~2 500 nm)高光谱成像系统构建的模型优于可见光近红外波段(VNIR, 400~1 000 nm),最终能检测土壤中低至1.6%的聚乙烯和5.0%的聚酰胺,且无需消解和分离步骤。

由于在高光谱成像过程中存在大量的数据和相关性冗余,随着数据维度(特征数量)的增加,数据分析和模型构建变得较为困难。此外,高光谱成像技术的检测效果还会受到微塑料浓度、颜色和环境湿度等因素的影响^[46]。为提升高光谱成像技术的准确性和稳定性,需增大微塑料识别模型中的数据量并对模型结构与参数进行优化。

1.2 拉曼光谱

拉曼光谱基于非弹性光散射原理,在检测和识别较小尺寸($<20\ \mu\text{m}$)微塑料方面成效显著^[47-48]。拉曼光谱使用可见光范围内的激发激光,波长较短,能够实现精确聚焦,从而可提供更高的空间分辨率。相比 $\mu\text{-FTIR}$,配备有共焦光学显微镜的显微拉曼光谱($\mu\text{-Raman}$)的空间分辨率可达 $1\ \mu\text{m}$ 甚至更低。本课题组在针对食品接触材料和制品(如水瓶、餐盒等)形成微塑料的相关研究中证实拉曼光谱较红外光谱更具优势,因为这类微塑料的尺寸通常更小($<20\ \mu\text{m}$)^[49-51]。此外,拉曼光谱对水不敏感,在用于液体样品和生物组织的研究中更具优势^[52]。目前,显微拉曼光谱技术已广泛应用于量化分析各种环境介质中的微塑料。Ziajahromi和Yun等^[53-54]分别开展了针对土壤环境以及人体组织的研究,均有力地证实了拉曼光谱在检测小尺寸微塑料方面所具备的能力。

尽管拉曼光谱在微塑料检测领域展现出诸多优势,仍存在两大关键因素制约其更为广泛和深入的应用。一是传统自发拉曼的信号较弱,且易被荧光基质干扰,而荧光可能来源于塑料制品本身含有的添加剂、颜料和无机填料^[55];二是随着检测尺度的减小,拉曼光谱较难实现全自动化分析,通过逐点扫描采集信号或人工预筛选可疑颗粒将耗费大量的时间,且准确性有限^[19,56]。采用非线性拉曼技术能提供高光谱的信噪比,同时还不受荧光干扰。但受限于昂贵设备和专业技能,它们在微塑料分析中的应用仍处于起步阶段^[57]。通常,使用长波激光源可抑制荧光干扰,但会造成拉曼响应的减弱,使用短波激光源的高能量则可能造成微塑料的受热分解,因此需要综合多因素选择测试参数^[19,58]。

1.2.1 增强拉曼技术 传统拉曼光谱在微塑料检测方面存在一定的局限性,主要体现在分辨率(衍射极限 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$)、灵敏度(低散射效率)和样品适用性(荧光基质干扰)等方面。针对上述问题,一些新型的增强拉曼技术为突破衍射极限和散射效率低的限制提供了新的策略,其中较为成熟的是表面增强拉曼。

表面增强拉曼利用金属纳米结构的表面等离子体增强电磁能量,通过构造“热点”增强目标物质化学信号,兼具拉曼光谱的无损分析和化学特异性,可实现 $10^3\sim 10^6$ 倍的响应增大^[59]。表面增强拉曼的底物主要有金属纳米颗粒和纳米结构阵列,增强机制包括电磁增强和化学增强。Ruan等^[60]利用银纳米颗粒与塑料之间的聚集效应,构建了一种基于溶胶的表面增强拉曼光谱方法,实现了小至 $20\ \text{nm}$ 的塑料颗粒检测,检测限为 0.0005% ,并成功应用于海鲜包装中的微塑料表征。Qi等^[61]基于二维金纳米颗粒薄膜开发了一种利用表面增强拉曼散射技术识别微塑料的方法,具有简便、高灵敏且低成本的特点。并通过薄膜的电磁放大作用产生“热点”区域,实现了对聚苯乙烯(PS)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的单颗粒检测。表面增强拉曼散射有较好的应用前景,但微塑料的“咖啡环效应”及尺寸问题使其与基底接触困难。Zhao等^[62]提出在液-液界面构建等离子体超表面的新策略,利用流体特性促进微塑料分散和等离子体阵列组装,形成核-壳结构提供“热点”和增强效应,提升了微塑料检测的灵敏度与均匀性,并已在实际基质中得到验证。

目前,表面增强拉曼还存在着底物不稳定、技术壁垒高和颗粒分布不均等问题,需进一步优化以增强其适用性^[59]。此外,还有利用散射力和梯度力实现光学捕获、操纵和分析液体中颗粒的拉曼镊子技术^[63],以及集成原子力显微镜和表面增强拉曼、突破衍射极限以原位获取目标颗粒尺寸和形态细节的针尖增强拉曼^[64]。由于对样品有特定要求,所需设备复杂昂贵,这些技术应用于实际环境介质中的

微塑料检测还存在较大阻碍。

1.2.2 拉曼成像技术 拉曼成像技术通过在目标测量区域的每个“像素”处收集拉曼光谱数据，生成一维轮廓、二维图像或三维渲染图，以提供具有空间定位的化学信息，已被用于识别环境样品中的微塑料及分析混合塑料颗粒^[65-66]。为解决传统自发拉曼光谱测量耗时长和方式受限等问题，Grand等^[67]利用二元光谱滤波器和单像素检测，实现了1平方毫米区域内的6种海洋微塑料的拉曼成像分类，像素停留时间低至1.75毫秒/像素，空间分辨率可达1 μm。Jiao等^[68]通过无像差线扫描共聚焦拉曼成像仪，结合机器学习算法，识别了多种类型和尺寸的微塑料，空间分辨率达2 μm，光谱分辨率为4 cm⁻¹，检测速度较传统点扫描拉曼成像系统提升两个数量级，还可鉴定出塑料中残留的有毒有害物质(如邻苯二甲酸二辛酯残留物)。尽管激光衍射会限制拉曼光谱的成像横向分辨率，但借助算法或可实现超分辨率拉曼成像，从而精确检测和可视化微塑料^[69-70]。

2 未来展望

近年来，虽然红外光谱和拉曼光谱已成为微塑料识别与量化的主流技术，但仍存在一些局限性制约了其应用，主要包括由衍射极限带来的检测尺寸限制、检测速度较慢难以实现高通量化、在复杂基质中的准确性难以保证等。未来的研究应致力于攻克上述技术壁垒以优化微塑料的检测方法。随着信息技术的不断发展，机器学习模型与算法在微塑料光谱数据处理和图像分类上的应用愈发频繁，为简化分析流程提供了新的思路。此外，为确保分析结果的准确性与可靠性，建立标准化检测流程至关重要。

2.1 技术局限性的突破

光谱技术在检测小尺寸微塑料时面临着较大挑战，发展高分辨率的光谱技术或将成为关键。例如，纳米傅里叶变换红外光谱(nano-FTIR)和原子力显微镜-红外光谱(AFM-IR)等近场扫描技术，为深入研究小尺寸微塑料的化学组成和结构提供了可能^[71-72]。通过新型光热红外光谱技术，利用空间衍射极限远小于红外光源的高聚焦可见激光束探测样品因光吸收产生的调制变化，可弥合传统与纳米尺度红外光谱在分析塑料颗粒时的分辨率差距。另一方面，结合先进的光学成像技术与光谱分析，有望在提高空间分辨率的同时，增强对小尺寸微塑料的识别能力^[73]。

随着对微塑料污染监测需求的增加，提高检测速度成为光谱分析技术发展的重要方向。通过仪器的自动化设计，实现样品的自动进样、光谱数据的快速采集和分析，能够大大缩短单个样品的检测时间。例如，基于焦平面阵列(FPA)的检测技术可通过增加探测器的像素数量、提高扫描速度等优化策略，实现对大面积样品的快速检测^[74]。在实际环境中，微塑料通常存在于复杂的基质中，这给光谱分析带来了很大的干扰。未来的研究应致力于开发更有效的方法来克服这些困难。一方面，发展样品预处理技术，能够更有效地分离和富集微塑料，减少基质干扰。另一方面，开发具有更强抗干扰能力的光谱分析技术^[75]。例如，通过优化光谱采集参数、采用多元光谱分析方法等，能够从复杂的光谱信号中准确提取微塑料的特征信息，实现对复杂基质中微塑料的准确检测和定量分析^[76]。

2.2 机器学习的应用

机器学习与红外、拉曼光谱技术结合为微塑料检测带来了新的契机^[77]。多项研究表明，机器学习算法与光谱技术结合能快速准确地对微塑料进行分类。Hufnagl等^[78]提出了一种基于随机森林模型的机器学习方法，用于分析环境样本的大型FPA-μFTIR数据集。该模型可以区分20多种不同的聚合物类型，适用于复杂基质拉曼光谱。因设备差异产生的不一致的数据结构，阻碍了公共分析工具的开发。Lei等^[79]提出借助高分辨率全窗口拉曼光谱数据库解决该问题，通过运用开源随机森林、K近邻和多层感知器算法构建机器学习分类模型。当使用拉曼位移间距降至1、2、4或8 cm⁻¹的光谱数据训练模型时，分类准确率超过95%。即便在光谱采样率1 kHz、微塑料颗粒处于激光焦平面外等非理想条件下，模型仍能维持高准确率。该方法可创建出强大且适配不同光谱仪设置与实验需求的分类模型。

机器学习算法依赖大量数据，但获取大规模高质量的红外和拉曼光谱数据存在难度，而有限的样本量会影响算法性能，导致模型泛化能力不足。光谱数据还易受噪声干扰，通常还需进行有效预处理和增强^[80]。为进一步提升检测效果，将光谱信号与图像数据等进行结合，有望显著提高检测的准确性

和可靠性。未来,在技术改进方面,要着重优化光谱采集技术,以此提高信号质量,减少噪声干扰。此外,需要研发更适合微塑料分析检测的算法,整合多模态数据,从而更好地应对复杂多变的实际检测环境^[81]。

2.3 检测流程的标准化

当前,不同研究在前处理方法、检测技术和分析流程等方面缺乏一致性,导致数据质量参差不齐,研究结果难以比较,严重限制了对微塑料污染的准确评估和深入理解。针对微塑料的检测,国际标准化组织(ISO)、美国材料与试验学会(ASTM)和国内机构都发布了一些相关标准。例如,ISO 24187:2023明确了环境中微塑料研究的主要原则,为样品采集、前处理方法以及检测手段选择提供了参考依据^[82];ASTM D8333-20标准化了使用拉曼光谱或红外光谱识别和定量水样中微塑料颗粒与纤维的前处理流程^[83];国标GB/T 40146-2021规定了化妆品中塑料微珠的测量方法^[84]。此外,还有用于水体、土壤和海产品中微塑料检测的地方和团体标准^[85-87]。虽然近年来微塑料检测标准数量逐渐增加,但是实际应用仍面临覆盖领域不足和适用场景有限等挑战^[88-89]。高峡等对国内外微塑料检测标准体系进行总结,深入剖析了不同标准在成分界定和尺寸划分等上的差异,指出关键技术指标不一致给微塑料的研究和监管工作带来了不容忽视的阻碍^[89]。Prata等^[90]提出了规范检测流程的多项措施,以提高微塑料分析与评估的质量:从采样环节开始,科学确定位置与数量,规范工具及操作,并确保样品的代表性;分析过程中,统一微塑料分类标准与检测单位,优化分离、消解等技术步骤,减少对微塑料的损失与破坏。同时,需强化质量控制措施,全程严格把控,确保数据可靠。在各类复杂基质中,实现对微塑料的量化仍然颇具挑战性。通过建立标准化流程,能够提升检测数据的准确性、可靠性和可比性,为深入研究微塑料的环境行为和制定有效的污染防控策略提供有力支持^[91]。

3 结论

光谱技术在微塑料分析检测领域占有重要地位。本文综述了红外与拉曼光谱用于微塑料检测的原理和场景,分析了对应优势与不足。由于衍射极限和信号强度的制约,光谱技术在检测小尺寸、复杂环境中的微塑料时面临着较大挑战。本文从技术局限性的突破、机器学习的应用和检测流程的标准化3个方面对光谱技术用于微塑料检测进行了展望,以期光谱技术的优化升级提供参考。

参考文献:

- [1] Cui Q, Wang F, Wang X, Chen T, Guo X T. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 164: 117092.
- [2] Yoganandham S T, Hamid N, Junaid M, Duan J J, Pei D S. *Environ. Res.*, **2023**, 236: 116858.
- [3] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. *Sci. Adv.*, **2017**, 3(7): e1700782.
- [4] Gündoğdu S, Mihai F C, Fischer E K, Blettler M C, Turgay O C, Akça M O, Aydoğan B, Ayat B. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 165: 117119.
- [5] Rillig M C, Lehmann A. *Science*, **2020**, 368 (6498): 1430-1431.
- [6] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, Dower J F, Juanes F, Dudas S E. *Environ. Sci. Technol.*, **2019**, 53(12): 7068-7074.
- [7] Vethaak A D, Legler J. *Science*, **2021**, 371(6530): 672-674.
- [8] Adhikari S, Kelkar V, Kumar R, Halden R U. *Polym. Int.*, **2022**, 71(5): 543-551.
- [9] Bhavsar P S, Dongare P R, Shimada Y, Gore A H. *ACS Food Sci. Technol.*, **2023**, 3(12): 2001-2017.
- [10] Dong H, Wang X, Niu X, Zeng J, Zhou Y, Suona Z, Yuan Y, Chen X. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2023**, 167: 117261.
- [11] Murugan P, Sivaperumal P, Balu S, Arya S, Atchudan R, Sundramoorthy A K. *RSC Adv.*, **2023**, 13(51): 36223-36241.
- [12] Tripathy B, Dash A, Das A P. *Crit. Rev. Anal. Chem.*, **2024**, 54(7): 1925-1935.
- [13] Zhou Q, Ma S F, Liu B S, Zhang J, Chen J T, Zhang D Y, Pan X L. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2023**, 167: 117259.
- [14] Lei J, Ma Q, Ding X, Pang Y, Liu Q, Wu J, Zhang H, Zhang T. *Environ. Chem. Lett.*, **2024**, 22(6): 2913-2941.
- [15] Lim J, Shin G, Shin D. *Anal. Chem.*, **2024**, 96(17): 6819-6825.
- [16] Araujo C F, Nolasco M M, Ribeiro A M, Ribeiro-Claro P J. *Water Res.*, **2018**, 142: 426-440.
- [17] Fang C, Luo Y, Naidu R. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 166: 117158.
- [18] Ozaki Y. *Anal. Sci.*, **2021**, 37(9): 1193-1212.

- [19] K ppler A, Fischer D, Oberbeckmann S, Schernewski G, Labrenz M, Eichhorn K J, Voit B. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2016**, 408: 8377–8391.
- [20] Xie L, Gong K, Liu Y, Zhang L. *Environ. Sci. Technol.*, **2022**, 57(1): 25–43.
- [21] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, Davis A, Rowland S J, John A W, McGonigle D, Russell A E. *Science*, **2004**, 304(5672): 838.
- [22] Liu S, You H, Mu H, Cheng J, Kuang S, Wang F, Chen H, Zheng M, Xu Y, Liu T. *Waste Manag.*, **2023**, 172: 326–334.
- [23] Mukhopadhyay P, Valsalan S A. *Environ. Monit. Assess.*, **2024**, 196(7): 679.
- [24] Bec K B, Grabska J, Pfeifer F, Siesler H W, Huck C W. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 480: 135967.
- [25] Zheng S, Zhou B, Guo N, Li N, Wu J, Chen Y, Han Z. *Waste Manag.*, **2024**, 183: 260–270.
- [26] Liao Z, Ji X, Ma Y, Lv B, Huang W, Zhu X, Fang M, Wang Q, Wang X, Dahlgren R. *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 417: 126007.
- [27] Chen Y, Li X, Zhang X, Zhang Y, Gao W, Wang R, He D. *Environ. Pollut.*, **2022**, 292: 118465.
- [28] Battaglini E, Miralles P, Lotti N, Soccio M, Fiorini M, Coscolla C. *Food Chem.*, **2024**, 443: 138567.
- [29] Hu J L, Zhang T L, Chen J, Lin Q B, Zhong H N, Mu J L. *J. Instrum. Anal.* (胡佳玲, 张天龙, 陈杰, 林勤保, 钟怀宁, 穆景利. 分析测试学报), **2021**, 40(11): 1672–1680.
- [30] Mukhopadhyay P, Valsalan S A. *Environ. Pollut.*, **2024**, 345: 123529.
- [31] Li H, Yang Z, Jiang F, Li L, Li Y, Zhang M, Qi Z, Ma R, Zhang Y, Fang J. *Environ. Res.*, **2023**, 216: 114623.
- [32] Primpke S, Christiansen S H, Cowger W, De Frond H, Deshpande A, Fischer M, Holland E B, Meyns M, O'Donnell B A, Ossmann B E. *Appl. Spectrosc.*, **2020**, 74(9): 1012–1047.
- [33] Ivleva N P, Wiesheu A C, Niessner R. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56(7): 1720–1739.
- [34] Griffiths P R, Mieser E V. *Infrared and Raman Spectroscopic Imaging*. Second, Completely Revised and Updated Edition, New York: Wiley, **2014**: 1–56.
- [35] Hernandez L M, Earner J M, Claveau–Mallet D, Okshevsky M, Jahandideh H, Matthews S, Roy R, Yaylayan V, Tufenkji N. *ACS EST Water*, **2023**, 3(4): 1029–1038.
- [36] Mikulec V, Adamovi c P, Cvetkovi c  , Ive i c M, Gajdo  Kljusuri c J. *Processes*, **2023**, 11(8): 2360.
- [37] Ivleva N P. *Chem. Rev.*, **2021**, 121(19): 11886–11936.
- [38] Wu R, Hao L, Tian H, Liu J, Dong C, Xue J. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 469: 133971.
- [39] Zou H H, He P J, Peng W, Lan D Y, Xian H Y, Lu F, Zhang H. *J. Environ. Sci.*, **2025**, 147: 512–522.
- [40] Bec K B, Grabska J, Pfeifer F, Siesler H W, Huck C W. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 480: 135967.
- [41] Abimbola I, McAfee M, Creedon L, Gharbia S. *Sci. Total Environ.*, **2024**, 934: 173111.
- [42] Ishmukhametov I, Batasheva S, Fakhruллин R. *Analyst*, **2022**, 147(20): 4616–4628.
- [43] Goyette R, Kortazar L, Amigo J M. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 166: 117221.
- [44] Xu L, Chen Y, Feng A, Shi X, Feng Y, Yang Y, Wang Y, Wu Z, Zou Z, Ma W, He Y, Yang N, Feng J. *Environ. Res.*, **2023**, 232: 116389.
- [45] Chen H, Shin T, Park B, Ro K, Jeong C, Jeon H J, Tan P L. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 471: 134346.
- [46] Ali M A, Lyu X, Ersan M S, Xiao F. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 476: 135041.
- [47] Chakraborty I, Banik S, Biswas R, Yamamoto T, Noothalapati H, Mazumder N. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **2023**, 20(9): 10435–10448.
- [48] Chen Q, Wang J, Yao F, Zhang W, Qi X, Gao X, Liu Y, Wang J, Zou M, Liang P. *Microchim. Acta*, **2023**, 190(12): 465.
- [49] Xu C, Hu J L, Dong B, Lin Q B, Wu S L, Chen J, Wang J, Li D, Zhong H N. *Food Packag. Shelf Life*, **2024**, 44: 101307.
- [50] Zhang T L, Hu J L, Duan Y P, Chen S, Li D, Dong B, Mo M Z, Wang J, Zheng J G, Zhong H N. *Food Control*, **2023**, 153: 109901.
- [51] Hu J L, Duan Y P, Zhong H N, Lin Q B, Zhang T L, Zhao C C, Chen S, Dong B, Li D, Wang J. *Food Addit. Contam. A*, **2023**, 40(2): 305–318.
- [52] Anger P M, von der Esch E, Baumann T, Elsner M, Niessner R, Ivleva N P. *Trends Anal. Chem.*, **2018**, 109: 214–226.
- [53] Ziajahromi S, Lu H C, Dwyer J, Fernandes M, Griffith M, Leusch F D L. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(38): 17048–17057.
- [54] Yun X, Liang L, Tian J, Li N, Chen Z, Zheng Y, Duan S, Zhang L. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 477: 135271.
- [55] Silva A B, Bastos A S, Justino C I, da Costa J P, Duarte A C, Rocha–Santos T A. *Anal. Chim. Acta*, **2018**, 1017: 1–19.
- [56] Tse Y T, Chan S M N, Sze E T P. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2022**, 19(20): 13432.
- [57] Zada L, Leslie H A, Vethaak A D, Tinnevelt G H, Jansen J J, de Boer J F, Ariese F. *J. Raman Spectrosc.*, **2018**, 49(7): 1136–1144.
- [58] Ribeiro–Claro P, Nolasco M M, Ara jo C. *Compr. Anal. Chem.*, **2017**, 75: 119–151.

- [59] Dai H, Li H, Qiu W, Deng S, Han J, Aminabhavi T. *Trends Anal. Chem.*, **2024**, 176: 117750.
- [60] Ruan X, Xie L, Liu J, Ge Q, Liu Y, Li K, You W, Huang T, Zhang L. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 462: 132702.
- [61] Qi G, Zhao L, Liu J, Tian C, Zhang S. *Mater. Today Commun.*, **2024**, 38: 108293.
- [62] Zhao M, Ma Y, Leng J, Qin S Y, Huang J X, Hu W, Zhao M G, Ma Y. *Sens. Actuators B*, **2024**, 420: 136504.
- [63] Wu M Y, Ling D X, Ling L, Li W, Li Y Q. *Sci. Rep.*, **2017**, 7(1): 42930.
- [64] Yeo B S, Amstad E, Schmid T, Stadler J, Zenobi R. *Small*, **2009**, 5(8): 952–960.
- [65] Kann B, Offerhaus H L, Windbergs M, Otto C. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **2015**, 89: 71–90.
- [66] Tian M, Morais C L, Shen H, Pang W, Xu L, Huang Q, Martin F L. *J. Hazard. Mater.*, **2022**, 422: 126892.
- [67] Grand C, Scotte C, Prado E, El Rakwe M, Fauvarque O, Rigneault H. *Environ. Technol. Innov.*, **2024**, 34: 103622.
- [68] Jiao C, Liao J, He S. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 470: 134191.
- [69] Fang C, Sobhani Z, Zhang X, Gibson C T, Tang Y, Naidu R. *Water Res.*, **2020**, 183: 116046.
- [70] Sobhani Z, Zhang X, Gibson C, Naidu R, Megharaj M, Fang C. *Water Res.*, **2020**, 174: 115658.
- [71] Meyns M, Dietz F, Weinhold C S, Züge H, Finckh S, Gerdts G. *Anal. Methods*, **2023**, 15(5): 606–617.
- [72] Li Y, Zhang C, Tian Z, Cai X, Guan B. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 463: 132933.
- [73] Yan F F, Wang X C, Sun H R, Zhu Z X, Sun W H, Shi X L, Zhang J P, Zhang L, Wang X F, Liu M Y, Cai M G, Zhang Y. *Front. Mar. Sci.*, **2022**, 9: 845062.
- [74] Upadhyay S, Sharma P K, Dogra K, Bhattacharya P, Kumar M, Tripathi V, Karmakar R. *Groundw. Sustain. Dev.*, **2024**, 26: 101185.
- [75] Zhu Z, Han K, Feng Y, Li Z, Zhang A, Wang T, Zhang M, Zhang W. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(30): 36988–36998.
- [76] Fang C, Luo Y, Naidu R. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 166: 117158.
- [77] Piyathilake U, Lin C, Bundschuh J, Herath I. *Environ. Pollut.*, **2023**, 335: 122320.
- [78] Hufnagl B, Stibi M, Martirosyan H, Wilczek U, Möller J N, Löder M G, Laforsch C, Lohninger H. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2021**, 9(1): 90–95.
- [79] Lei B, Bissonnette J R, Hogan Ú E, Bec A E, Feng X, Smith R D. *Anal. Chem.*, **2022**, 94(49): 17011–17019.
- [80] Thangagiri B, Sivakumar R. *Water Air Soil Pollut.*, **2024**, 235 (6): 362.
- [81] Sunil M, Pallikkavaliyaveetil N, Mithun N, Gopinath A, Chidangil S, Kumar S, Lukose J. *J. Water Process Eng.*, **2024**, 60: 105150.
- [82] ISO 24187–2023. Principles for the Analysis of Microplastics Present in the Environment. International Organization for Standardization.
- [83] ASTM D8333–20. Standard Practice for Preparation of Water Samples with High, Medium, or Low Suspended Solids for Identification and Quantification of Microplastic Particles and Fibers Using Raman Spectroscopy, IR Spectroscopy, or Pyrolysis–GC/MS.
- [84] GB/T 40146–2021. Determination of Plastic Microbead in Cosmetics. National Standards of the People’s Republic of China (化妆品中塑料微珠的测定. 中华人民共和国国家标准).
- [85] DB21/T 2751–2017. Determination of Microplastics in Seawater—Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Local Standards in Liaoning Province of the People’s Republic of China (海水中微塑料的测定 傅里叶变换显微红外光谱法. 中华人民共和国辽宁省地方标准).
- [86] T/CSTM 00885–2024. Determination of Microplastics in Soil—Fourier Transform Infrared Microspectroscopy. Group Standard of Chinese Society for Testing & Materials, Zhongguancun (土壤中微塑料的测定 傅里叶变换显微红外光谱法. 中关村材料试验技术联盟团体标准).
- [87] T/CSTM 00887–2024. Determination of Microplastics in Seafood—Fourier Transform Microscopic Infrared Spectroscopy. Group Standard of Chinese Society for Testing & Materials, Zhongguancun (海产品中微塑料测试 傅里叶变换显微红外光谱法. 中关村材料试验技术联盟团体标准).
- [88] Tang Q F, Li Q M, Wei X X, Shao P, Gao L J, Chen Q R, Hu G H, Liu W L, Gao X. *J. Instrum. Anal.* (汤庆峰, 李琴梅, 魏晓晓, 邵鹏, 高丽娟, 陈啟荣, 胡光辉, 刘伟丽, 高峡. 分析测试学报), **2019**, 38(8): 1009–1019.
- [89] Wang J M, Gao X. *J. Instrum. Anal.* (王佳敏, 高峡. 分析测试学报), **2025**, 44(5): 936–946.
- [90] Prata J C, Reis V, da Costa J P, Mouneyrac C, Duarte A C, Rocha-Santos T. *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 403: 123660.
- [91] Zhang Y, Shi P, Cui L. *Mar. Pollut. Bull.*, **2024**, 207: 116950.

(责任编辑: 盛文彦)