

基于拉曼光谱技术的环境水体微塑料快速检测方法研究

卢伟龙

佛山大学 广东 佛山 528000

摘要：随着塑料污染问题的日益严重，微塑料在环境水体中的普遍存在对生态系统和人类健康带来了潜在威胁。为了有效检测和评估水体中的微塑料，本文研究了基于拉曼光谱技术的快速检测方法。概述了拉曼光谱技术的基本原理和优势，并指出了其在微塑料检测中的应用潜力。进一步分析了环境水体中微塑料的存在特征以及传统检测方法的不足，强调了高灵敏度、快速现场检测、分类识别及应对复杂背景干扰等关键需求。本文提出了四种基于拉曼光谱的微塑料快速检测策略，包括优化仪器便携性、建立微塑料谱库、应用显微成像技术以及结合机器学习进行数据处理。

关键词：拉曼光谱；微塑料；环境水体；快速检测

引言：

微塑料作为一种新兴的环境污染物，其在水体、土壤和空气中的广泛存在对生态环境、食品链及人类健康构成了严重威胁。水体中微塑料的检测长期以来面临灵敏度不足、检测速度慢以及无法区分不同塑料类型等挑战。传统的检测方法如显微镜观察和红外光谱虽然能够在某种程度上识别微塑料，但常常受到复杂样品背景的干扰，且难以满足现场快速检测的需求。因此，开发一种高效、快速且准确的检测技术成为亟待解决的问题。拉曼光谱技术凭借其高灵敏度、无损检测和无需样品前处理等优点，成为了微塑料检测领域中的重要工具。

一、拉曼光谱技术概述

拉曼光谱技术是凭借拉曼散射效应的分子光谱分析手段，普遍应用于化学、物理、材料科学、生命科学等领域，此技术核心原理为，单色光（一般为激光）照射于样品上时，光子跟样品里的分子出现互动作用，部分光子经碰撞后频率出现了偏移，即所谓拉曼散射，此频率偏移跟样品分子的振动、转动能级是相关的，进而获取到分子结构、化学成分和物理状态的信息内容。

拉曼光谱本质上以能量转移的散射效应为特征，分为斯托克斯与反斯托克斯这两种散射，实际应用中前者经常出现，斯托克斯散射中出现的能量损失对应样品分子内部振动模式，反斯托克斯散射牵涉到能量的获得，拉曼光谱技术凭借高分辨率、无损检测和无需复杂样品前处理的特性形成优势，尤其契合复杂样品的快速分析需求。就微塑料检测领域而言，拉曼光谱凭借精准区分不同塑料材料的特性，得到大量应用，各类塑料材料存在特定的分子振动模式，因此其在拉曼光谱里的表现展现出独特性，借助已设立的塑料谱库加以比对，能辨认水样中微塑料的类别、大小以及相对浓度高低，该技术因高灵敏度和高选择性，在

微塑料检测中堪称理想工具。

二、环境水体中微塑料的存在及检测需求

（一）高灵敏度检测方法

在环境水体里，微塑料颗粒浓度一般极低，尤其是处于微米级以下范畴的微塑料，说不定只有几微克每升，高灵敏度的检测方法成为微塑料监测关键，以往的检测途径，就如显微镜观测跟红外光谱手段，虽可检测出微塑料已然存在，但其灵敏度存在局限，难以在复杂背景下精准鉴别区分，为应对此类难题，要采用能达成高灵敏度、低检测限的检测技术。

拉曼光谱技术作为现阶段应用较广的高灵敏度检测办法，拉曼光谱可对微塑料的独特分子振动模式进行识别，借助强劲的拉曼散射信号达成高灵敏度的检测工作，尤其是面对微米级的塑料颗粒，拉曼光谱依旧可给出清晰的分析成效，与其他技术相结合，诸如拉曼显微成像这类，可在微小尺度开展量化分析，进而实现对极低浓度微塑料的精准检验。

（二）快速现场检测

随着环境污染问题急剧恶化，微塑料污染成了全球水体

质量监测的一个紧要议题，就环境监测工作者这一群体而言，快速、现场检测水体微塑料的需求变得迫切，惯用的微塑料检测办法，尤其是依托显微镜和化学分析开展的实验室检测，往往要经历长时间的样品预处理、实验操作与数据分析，难以实现快速响应的要求。

构建便携式、高效的现场检测器具，成为微塑料监测领域的研究焦点，拉曼光谱探测技术，依托其无需繁琐前处理及可实时获取数据的特性，已普遍应用于现场检测里，凭借研发便携式拉曼光谱仪，可以完成对环境水样里微塑料颗粒的快速辨认与定量分析，该设备不仅可在水体采样点开展实时分析，也能在污染源追踪、环境应急处理等方面发挥重大效能。

（三）能够区分不同类型的微塑料

微塑料种类呈现多样化，涉及聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚氯乙烯（PVC）等品种，此类塑料于环境水体里分布范围广，且呈现出不同的物理化学性质，各种塑料的分子结构及振动特征独树一帜，这显示它们于拉曼光谱里的表现并非一致，可精准辨别不同类别的微塑料，对污染源追踪、污染治理及生态影响评估起着关键作用。

拉曼光谱技术可借助剖析微塑料的分子振动模式，完成不同类型塑料的精准鉴别，各塑料在拉曼光谱中的特征峰值互有差别，拉曼光谱可得到高分辨率的化学指纹图谱，辅助鉴别微塑料的种类，依托现有的塑料谱库，可在环境水样里迅速判定各种塑料颗粒的种类。

（四）适应复杂水体背景的检测技术

环境水体里不只是含有微塑料，往往还带有大量其他杂质与天然有机成分，诸如浮游植物群、泥沙、化学溶解性物质等，这些物质会干扰微塑料的检测工作，增大分析的复杂系数，检测技术一定要能在复杂水体背景环境下，精准鉴别且分离微塑料颗粒。

拉曼光谱技术借助其独有的分子振动特性，在复杂水体里仍可高效辨别微塑料与其他干扰物，经由提高仪器的光谱分辨能力、优化激光参数、改进光学体系，可降低背景噪声的负面效应，以此改善检测的准确水平，采用数据处理技术，像多变量分析途径（PCA）、偏最小二乘举措（PLS）之类，可从复杂背景之中提取微塑料特征信号，进一步改善分析的精确水平。

三、基于拉曼光谱的微塑料快速检测策略

（一）改进拉曼光谱仪器的便携性及灵敏度

拉曼光谱仪器的改进对微塑料的快速检测极为关键，便

携性为现场检测的一项基本要求，尤其在开展环境监测期间，仪器得具备充足的小型化及轻便属性，以利于在野外或水域采样点实施操作，为实现便携式仪器的合理优化，现代拉曼光谱仪一般借助集成化设计减小仪器的容积，把激光器、光学系统、探测器等关键部件实施小型化操作。固态探测器（例如CCD或InGaAs探测器）与微型激光器被普遍采用，和传统激光系统比，这些部件体积明显更小，却可以在提供足量信号强度时维持高灵敏度，小型化及集成化不仅降低了仪器重量，而且大幅提升了仪器的便携属性，利于现场工作人员实施操作。

灵敏度是拉曼光谱仪器里不可漠视的又一重要参数，微塑料颗粒的浓度偏低，尤其环境水体里分布的微塑料，往往需极高灵敏度方能精准测定，为强化灵敏度，研究者一般会采用功率更高的激光源、更为敏感的探测器与优化设计的光学系统方案，高功率激光能造就更强的拉曼散射信号，高效光学系统依靠提升信号采集效率、降低背景噪声增强仪器的灵敏度，数字信号处理技术的采用，进一步提高了仪器对微弱信号的辨识力，保障在复杂水体环境里检测出微小的微塑料颗粒，便携性及灵敏度的优化是助力拉曼光谱技术广泛用于微塑料检测的核心要素。

（二）开发微塑料的谱库和数据库

构建微塑料的谱库、数据库是达成微塑料精准快检的基础，拉曼光谱分析借助已知物质的光谱特征，建设精准且全面的谱库对区分各类微塑料至关重要，谱库应囊括不同塑料材质的拉曼光谱，涵盖如聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚氯乙烯（PVC）等常见塑料类型。每种塑料在拉曼光谱内的特征峰值跟分子结构、振动模式密切关联，谱库通过呈献这些信息，让拉曼光谱仪可迅速匹配并鉴别水样里的微塑料种类，为保证谱库精准无误，得采集来源多样、形态不同、尺寸有别的微塑料样本，实施标准化的拉曼光谱测定工作，该过程要求对测试条件严格把控，保证各样本光谱数据有代表性。

谱库的打造不只是为满足单一检测需求，也应考虑现实应用中的多样情形，环境水体中的微塑料往往与另外的有机物、无机物和自然污染物混合，这些干扰物质也许会对拉曼光谱分析造成干扰，开发谱库要囊括复杂水体环境下微塑料的光谱特征数据，尤其要考量不同背景物质的干扰要素，处于数据库管理和应用阶段，数据标注的精准度与一致性同样极为关键，凭借创建高质量的数据库，拉曼光谱仪可在复杂背景下更为精准地识别微塑料，增强检测的可靠性与精准度。常见微塑料的拉曼光谱特征峰如表1。

表 1 常见微塑料的拉曼光谱特征峰

塑料类型	拉曼特征峰 (cm^{-1})	峰值说明	实验条件
聚乙烯 (PE)	1445, 2845	CH ₂ 摇摆和C-H伸缩振动峰	激光波长: 785 nm
聚丙烯 (PP)	1375, 2940	CH ₂ 摇摆和C-H伸缩振动峰	激光波长: 785 nm
聚苯乙烯 (PS)	1000, 1600	C-C键弯曲振动和C-H伸缩振动峰	激光波长: 532 nm
聚氯乙烯 (PVC)	960, 1400	C-Cl键伸缩和C-H弯曲振动峰	激光波长: 785 nm
聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)	620, 1710	C=O伸缩振动和C-H弯曲振动峰	激光波长: 785 nm

(三) 运用拉曼显微成像技术开展空间分辨分析

拉曼显微成像技术把拉曼光谱的分子识别效能与显微成像的空间分辨率整合, 能实现对微塑料颗粒的高精度定位与成分鉴定, 该技术针对微塑料检测尤为关键, 由于它能在微米甚至亚微米的尺度上对水样中的微塑料做细致分析, 传统拉曼光谱分析虽能给出样品的化学组成信息, 只是在空间定位方面存在局限, 采用显微镜与拉曼光谱仪相联合, 拉曼显微成像可给出微塑料颗粒位置、形态、尺寸及其化学成分的完整影像, 助力研究人员精准识别与分类不同品类的微塑料。

此项技术的应用对微塑料空间分辨分析尤为关键, 尤其是当处理复杂环境样本之际, 水样中大概含有大量天然有机物、沉积物与不同样式的微塑料颗粒, 传统方法或许很难精准辨别它们的来源与特征, 拉曼显微成像可借助高分辨率的成像途径, 以微小尺度对颗粒实施分辨研判, 进一步挖掘出微塑料的详细数据, 此技术不仅提升了微塑料检

测的灵敏水平, 还强化了数据可视化与定量分析的能力, 使得微塑料检测结果直观又容易领会。

(四) 把机器学习跟拉曼光谱分析结合起来处理数据

伴随数据量的急剧增长, 传统拉曼光谱数据分析途径渐难达成快速精准分析的要求, 尤其在大规模的环境监测工作中, 为增进微塑料检测的精准度与效率, 将机器学习技术跟拉曼光谱数据分析相结合成为重要研究门道, 机器学习有本事从海量光谱数据中提取潜在的模式跟特征, 从而增进对微塑料自动识别及分类的能力, 利用对拉曼光谱数据进行的预处理、特征提取及模式识别, 机器学习算法可自动化地自复杂数据里识别微塑料特征信号, 减少人工介入及误差, 大幅提升分析的速度与精准度。

能采用支持向量机 (SVM)、随机森林 (RF) 和卷积神经网络 (CNN) 等机器学习算法分析拉曼光谱数据, 这些算法借助训练模型可识别不同种类的微塑料, 依靠数据集进行学习, 持续提升分类的精准水平, SVM可用于对不同类型的微塑料归类, RF可从复杂数据里挖掘出极为重要的特征, 而CNN在图像处理及深度学习方面表现亮眼, 可从拉曼光谱图像里提取空间特征, 把这些方法组合起来, 可让微塑料检测更高效自动化, 且可实时处理现场检测所得的复杂数据。

四、结语

基于拉曼光谱的微塑料快速检测技术具有巨大的应用潜力, 特别是在环境水体中的实时监测方面。本文提出的优化策略, 如便携式仪器的开发、微塑料谱库的建设、显微成像技术的应用以及机器学习的数据处理, 将大大提高微塑料检测的灵敏度、速度和准确性。这些技术的结合不仅为微塑料的环境监测提供了新的方向, 也为应对全球塑料污染问题提供了更高效的技术手段。未来的研究应进一步解决现有技术中的局限性, 提升其在实际环境监测中的应用效果, 从而推动水体污染治理和生态环境保护工作的进展。

参考文献:

[1]肖文宇,陈垚,李哲,等.基于文献计量的微塑料对底栖动物影响进展研究[J].环境污染与防治,2025,47(03):6-14.
[2]梁曦爻,窦艳艳,段学军,等.市政污泥中微塑料的分布及风险评估[J].中原工学院学报,2025,36(01):53-58+94.

[3]毕嘉璇,张岚,陈永艳,等.微塑料的人体内暴露水平及检测技术现状[J].环境卫生学杂志,2025,15(02):143-150.
[4]王昊邦.微塑料污染对淡水生态系统的影响及治理方法[J].黑龙江环境通报,2024,37(04):37-39.

作者简介: 卢伟龙 (2000—), 男, 汉族, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向: 资源与环境。