

微塑料识别方法研究热点与趋势的文献计量分析

芦珂毅, 李 扬*, 陈旭东, 张世龙, 张 蕾, 窦艳艳, 吕晶晶, 秦肖风

中原工学院智慧能源与环境学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年10月30日; 录用日期: 2025年11月27日; 发布日期: 2025年12月5日

摘 要

微塑料作为一种新兴环境污染物, 其精准识别对开展风险评估与实施污染防控具有重要意义。文章基于文献计量学方法, 整合Web of Science与中国知网数据库截至2024年底的学术文献数据, 结合可视化工具VOSviewer以系统分析微塑料识别技术的研究进展。结果表明, 自2019年起该领域年度发文量呈现显著上升趋势, 研究热点主要集中于拉曼光谱技术优化与机器学习算法在检测中的应用。中国在科研产出规模和国际合作活跃度方面位居全球前列。关键词共现分析揭示, 当前研究重点聚焦于高灵敏度检测方法、复杂基质中的定量分析能力提升以及多技术融合路径探索。未来研究需着力突破纳米级塑料颗粒的识别技术瓶颈, 推动跨学科协同创新, 并加快检测技术的标准化进程。

关键词

微塑料, 文献计量学, 识别方法, 研究趋势

Bibliometric Analysis of Research Hotspots and Trends in Microplastic Identification Methods

Keyi Lu, Yang Li*, Xudong Chen, Shilong Zhang, Lei Zhang, Yanyan Dou, Jingjing Lyu, Xiaofeng Qin

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

Received: October 30, 2025; accepted: November 27, 2025; published: December 5, 2025

Abstract

As an emerging contaminant, microplastics necessitate precise identification to support robust risk

*通讯作者。

文章引用: 芦珂毅, 李扬, 陈旭东, 张世龙, 张蕾, 窦艳艳, 吕晶晶, 秦肖风. 微塑料识别方法研究热点与趋势的文献计量分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(12): 1619-1630. DOI: 10.12677/aep.2025.1512175

assessment and effective pollution control. This study adopts bibliometric methods to integrate academic literature from the Web of Science and CNKI databases up to the end of 2024, employing the visualization tool VOSviewer to systematically analyze the research progress in microplastic identification technologies. Results indicate a significant increase in annual publication output since 2019, reflecting growing scholarly attention. Research has primarily focused on optimizing Raman spectroscopy techniques and applying machine learning algorithms in detection processes. China ranks among the leading countries globally in terms of research output and international collaboration. Keyword co-occurrence analysis reveals that current research priorities include high-sensitivity detection methods, enhanced quantitative analysis in complex matrices, and the integration of multiple technological approaches. Future efforts should prioritize overcoming technical challenges in identifying nanoscale plastic particles, promoting interdisciplinary collaboration, and advancing the standardization of detection methodologies.

Keywords

Microplastic, Bibliometrics, Identification Method, Research Trends

Copyright © 2025 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

微塑料是直径小于 5 毫米的塑料物质，作为一种新兴污染物，广泛存在于水体、土壤和大气等多种环境介质中，并已在人体组织、血液、母乳及肺部中被检出，显示出对生态系统和人类健康的潜在威胁[1][2]。准确识别微塑料的类型、来源及其分布特征，是建立起环境风险评估体系、制定有效防控策略的关键基础。早期研究主要集中在宏观尺度上的存在检测；随着分析技术的进步，拉曼光谱和傅立叶变换红外光谱等光谱技术逐渐成为微塑料识别的主要手段[3][4]。近年来，随着机器学习和卷积神经网络等智能算法的发展，这些技术与传统检测方法的结合推动了微塑料识别向自动化和高通量方向迈进[5]。

然而，微塑料的识别领域仍面临诸多问题与挑战。首先，不同环境介质中的微塑料在颗粒尺寸、颜色和形态上存在显著差异，且常伴随复杂的基质干扰，这使得样品的前处理与分离过程面临较大困难；其次，光谱法在实际应用中易受到信噪比低、谱图重叠以及数据库不完善等因素的影响，从而降低识别的准确性与可靠性[6]。现有的智能化识别方法虽然具有一定的应用潜力，但仍高度依赖高质量的训练数据集，其不同区域和尺度上的适用性与泛化能力仍需进一步验证。此外，标准化的检测流程尚未形成统一规范，研究之间缺乏可比性，这也限制了相关成果的推广应用[7]。

目前，全球塑料产量持续增长，塑料制品的应用范围也在不断扩大，而当前针对微塑料污染的管控与治理措施尚未形成系统化体系，导致环境中微塑料污染物不断积累，并通过风化、降解和自然破碎等过程长期存在，使得微塑料污染问题日益严峻。国内外在微塑料识别方面的研究已在技术创新和环境行为分析等领域取得了阶段性成果，但在系统梳理研究热点与预测发展趋势方面仍显不足。目前尚缺乏对该研究领域的系统性分析，尤其是从文献计量角度对微塑料识别方法的研究现状、热点及发展趋势进行全面综述的成果。文献计量研究融合文献数据与统计分析方法，借助可视化图像直观展示研究领域的整体知识框架、核心结构、发展历程及前沿方向，为相关研究提供切实可行且具有参考价值的理论支持[8]。

VOSviewer 在文献计量学中主要用于对学术文献进行可视化分析。该工具通过处理大规模文献中的关键词、作者、机构、国家以及参考文献之间的关联关系，生成网络图谱、聚类图或热度图，从而直观揭示研

究热点、核心作者群、合作网络以及学科发展的演化趋势[9]。基于此,本研究借助文献计量可视化工具,结合 Web of Science (WOS)与中国知网数据库,对微塑料识别领域的相关文献进行可视化分析,统计该领域的发文量变化、主要发表机构及高被引论文,并分析发文国家的地理分布,构建国家间的科研合作网络。通过对关键词的挖掘与分析,揭示微塑料识别领域的研究热点与发展趋势,从而为该领域的后续研究提供理论支持与方向指引。

2. 文献数据处理

基于 WOS 核心数据库进行检索,检索式为 TS = (“microplastic identification”),设置检索文献语言为英文,文献检索类型为研究型论文,检索时间截止为 2024 年 12 月 31 日,经过筛选后共有 403 篇。基于中国知网数据库进行检索,在高级搜索页面搜索主题为“微塑料识别”,检索时间截止为 2024 年 12 月 31 日,共有 119 篇研究论文类型的文献。

使用可视化文献计量学软件 VOSviewer 1.6.20 进行数据可视化分析,使用函数绘图数据分析软件 Origin 2024 绘制基本图谱,通过 Excel 进行数据计量统计。

3. 结果与分析

3.1. 研究发文量统计

在文献计量学领域,年发文量是反映学科科学进展与发展趋势的重要指标。本研究基于 WOS 数据库与中国知网数据库,对相关文献的年发文量进行了统计分析。以出版年份为依据,将每年发表的文献总数定义为年发文量,其变化趋势如图 1(a)所示。WOS 数据库的统计结果显示,在 2019 年之前,该领域累计发文量为 15 篇;2012 年发表了该领域的首篇文献;随后发文量逐年上升,2019 年为 19 篇,2020 年为 35 篇,2021 年为 43 篇,2022 年为 56 篇,2023 年为 98 篇,2024 年达到 136 篇。中国知网的统计数据显示,该领域在 2018 年仅发表 1 篇文献,2019 年发文量增至 7 篇,2020 年为 16 篇,2021 年为 17 篇,2022 年为 23 篇,2023 年为 25 篇,2024 年达到 30 篇。

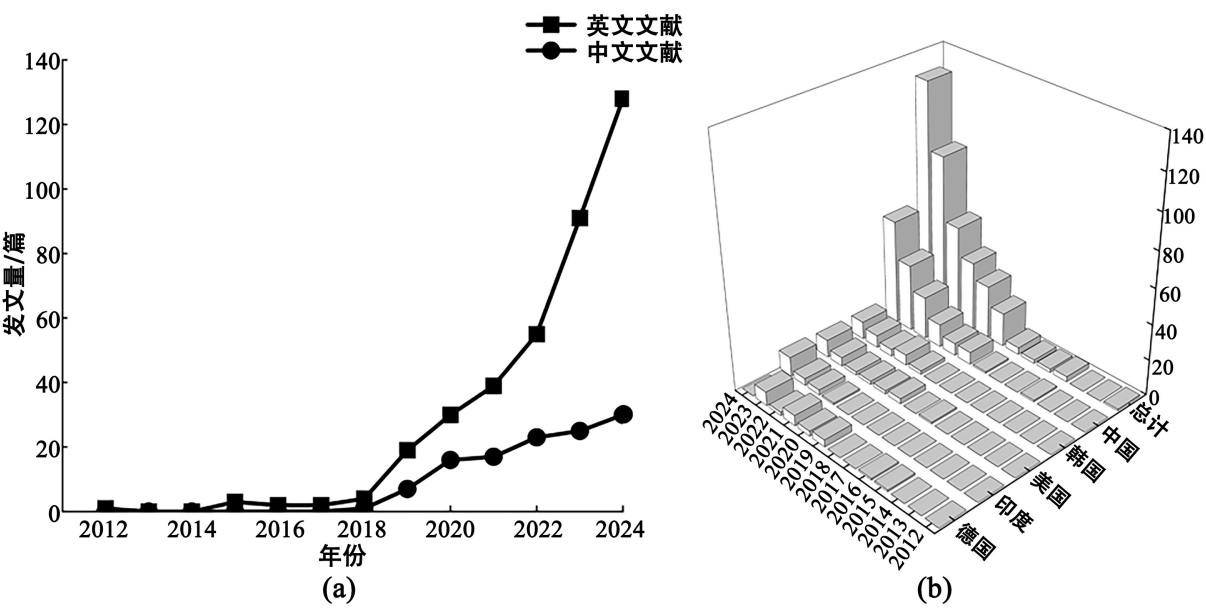


Figure 1. Annual publication volume statistics (a: annual publication volume; b: annual publication volume by country)
图 1. 年度发文量统计(a: 年发文量; b: 各国年发文量)

2012~2024 年间，全球微塑料识别领域年度发文量总体呈现显著增长趋势，可划分为三个阶段：2012~2018 年总发文量为 15 篇，为起步阶段；2019~2022 年每年文献产出量较为稳定且相较于前五年显著增多，相邻年间发文量差值不超过 16，为稳步发展阶段；2023~2024 年进入快速发展阶段，每年发文量相较于上一年皆增长 40 篇左右。值得注意的是，2024 年全年发文量为 136 篇占检索文献总量 403 篇的 33%，表明微塑料识别研究已成为当前热点领域，并预示其未来将持续快速发展。

图 1(b)为发文量最多的前五个国家的年度发文量统计，分别为中国、韩国、美国、德国、印度。2015 年总发文量为 3 篇，中国发文量为 1 篇，德国发文量为 1 篇；2016 年总发文量为 2 篇，德国发文量为 1 篇；2017 年总发文量为 2 篇，美国发文量为 1 篇；2018 年总发文量为 4 篇，中国发文量为 1 篇；2019 年总发文量为 19 篇，中国发文量为 7 篇，美国发文量为 4 篇，德国发文量为 4 篇；2020 年总发文量为 30 篇，中国发文量为 7 篇，韩国发文量为 2 篇，美国发文量为 2 篇，德国发文量为 3 篇；2021 年总发文量为 39 篇，中国发文量为 13 篇，韩国发文量为 6 篇，美国发文量为 2 篇，德国发文量为 6 篇，印度发文量为 1 篇；2022 年总发文量为 55 篇，中国发文量为 24 篇，韩国发文量为 4 篇，美国发文量为 2 篇，德国发文量为 2 篇，印度发文量为 3 篇；2023 年总发文量为 91 篇，中国发文量为 38 篇，韩国发文量为 7 篇，美国发文量为 5 篇，德国发文量为 8 篇，印度发文量为 4 篇；2024 年总发文量为 128 篇，中国发文量为 59 篇，韩国发文量为 10 篇，美国发文量为 10 篇，印度发文量为 11 篇。从上述数据中可以看出，在 2012 年~2018 年间各国发文量零散，年均总量不足 5 篇。自 2019 年起，中国逐渐成为该研究领域的主导力量，当年占比达 37%，至 2024 年进一步提升至 46%，接近全球总量的一半。同期内，其他国家的论文发表量虽呈增长趋势，但总体水平仍低于中国，仅维持在个位数或十余篇之间。微塑料识别领域在过去十年中经历了从各国分散起步到快速扩展的转变，中国已在该领域逐步确立了核心地位。其他国家的参与则显示出该领域正在形成广泛的国际合作与竞争格局，预示未来的研究将持续保持高度活跃。

3.2. 关键词分析

3.2.1. 关键词频率分析

关键词作为学术文献的核心要素，能够直接反映文章的研究主题、方法和创新点，是对研究内容最精炼的语义概括。在文献计量学领域，高频关键词的出现频率与分布特征往往代表着特定学科的研究热点与发展趋势。经统计过后，列出出现频率最高的 14 个中英文文献高频关键词与起始年份，如表 1 所示。

Table 1. High frequency keywords in Chinese and English literature
表 1. 中英文文献高频关键词

| 排名 | 英文文献关键词 | 频率 | 最早年份 | 排名 | 中文文献关键词 | 频率 | 最早年份 |
|----|--|-----|------|----|---------|----|------|
| 1 | Microplastics | 186 | 2012 | 1 | 微塑料 | 98 | 2018 |
| 2 | Raman spectroscopy | 61 | 2017 | 2 | 检测方法 | 14 | 2019 |
| 3 | Surface-enhanced Raman scattering (SERS) | 18 | 2020 | 3 | 检测技术 | 11 | 2019 |
| 4 | Detection | 17 | 2012 | 4 | 土壤 | 9 | 2020 |
| 5 | Polyethylene | 15 | 2020 | 5 | 拉曼光谱 | 7 | 2020 |
| 6 | Polystyrene | 14 | 2018 | 6 | 来源 | 7 | 2020 |
| 7 | Environmental samples | 12 | 2017 | 7 | 污染特征 | 6 | 2022 |
| 8 | Identification | 12 | 2015 | 8 | 新污染物 | 5 | 2023 |
| 9 | Water | 11 | 2019 | 9 | 检测 | 5 | 2019 |
| 10 | Machine learning | 10 | 2019 | 10 | 水环境 | 4 | 2021 |

续表

| | | | | | | | |
|----|-----------------------------------|----|------|----|------|---|------|
| 11 | Polypropylene | 10 | 2020 | 11 | 环境行为 | 4 | 2022 |
| 12 | Fourier transform infrared (FTIR) | 9 | 2015 | 12 | 生态风险 | 4 | 2021 |
| 13 | Classification | 9 | 2020 | 13 | 农田土壤 | 3 | 2023 |
| 14 | Quantification | 9 | 2019 | 14 | 分析方法 | 3 | 2020 |

拉曼光谱技术是微塑料识别领域的重要研究方向，在国内外相关研究中均占据显著地位[10][11]。数据显示，在 2020 年至 2024 年间，该技术的应用频率达到 30 次，表明其在微塑料识别中具有良好的适用性，并反映出基于该技术的创新研究路径正在不断拓展。表面增强拉曼散射(SERS)基于拉曼散射的物理机制，通过金属纳米结构表面产生的电磁场增强和化学增强效应，可将拉曼信号强度提升 104 至 1014 倍 [12][13]。文献分析表明，当前关于微塑料识别技术的研究多集中于拉曼光谱与 SERS 方法，相关研究热度持续上升，说明基于拉曼光谱或 SERS 的微塑料识别技术已成为当前及未来的重要研究趋势[14]。

从技术维度分析，中英文文献均聚焦于光谱分析技术的研究，且技术类论文普遍呈现出“检测技术 - 仪器开发 - 数据处理”的完整研究链条[15]。英文文献中，“Raman spectroscopy”(61 次)、“Surface-enhanced Raman scattering”(18 次)、“Fourier transform infrared”(9 次)作为高频关键词，占据了技术类关键词的核心位置，充分体现了光谱技术在微塑料识别领域中的主导地位。尽管中文文献中未出现具体细分技术术语，但“拉曼光谱”(7 次)、“检测技术”(11 次)、“检测方法”(14 次)等关键词的高频出现，表明国内研究同样以光谱技术为核心，且更侧重于工程化应用的探索。值得注意的是，英文文献中“Machine learning”(10 次)与“Classification”(9 次)等关键词的频次呈上升趋势，反映出该领域对智能化识别方法的关注日益增强。这种技术热点的演化既反映了分析方法的逐步成熟，也揭示了研究方式从“单一技术”向“多技术融合”的转变。拉曼光谱与 SERS 的高频出现，表明现今学者正致力于通过信号增强与噪声抑制等手段提升检测下线。而机器学习的关键词词频逐步升高，体现了数据处理的智能化需求，尤其在复杂环境基质中传统光谱难以处理重叠信号，可通过算法进行有效解耦。中英文文献的差异反映了研究导向的分化。英文文献注重“技术前沿探索”，如 SERS 基底创新与开发算法。中文文献更关注于“技术落地应用”，如检测方法标准化与场景适用性。这种分化可能源于实际问题驱动。中国面临的严重土壤与水体复合污染，因此强调技术的真实环境中的稳健性。国际研究更多受基础科学基金支持，倾向在可控条件下突破技术极限。

随着全球微塑料污染问题的加剧，识别样本的数量和复杂性显著增加，传统光谱检测方法已难以完全满足实际需求。虽然拉曼光谱和傅里叶变换红外光谱具有较高的检测精度，但其操作复杂、耗时较长、依赖人工分析等局限性也逐渐显现。这些技术瓶颈催生了对更高效、更高精度检测方法的需求，而机器学习的发展恰好契合了这一趋势。卷积神经网络与随机森林等代表性机器学习算法已在微塑料识别中展现出显著优势，通过构建和优化光谱数据库及高效识别模型，有效提升了识别效率与容错能力[16][17]。Wang 等在研究中开发了一种基于改进型快速区域卷积神经网络(Faster R-CNN)的微塑料识别模型，有效解决了不同尺度微塑料的检测难题，识别准确率超过 99%，同时显著降低了传统方法中常见的误检与漏检现象[18]。机器学习的另一显著优势在于能够精准识别复杂背景中的微塑料。Qiu 等在中国太湖地区开展的土壤微塑料研究中，采用随机森林算法构建的模型对数据拟合效果最佳，成功预测了复杂环境中微塑料的空间分布特征，并有效识别了其来源与影响因素，展现出传统光谱技术难以实现的分析能力 [19]。自动化与普适性同样是机器学习在微塑料识别中的关键优势。Lei 等的研究表明，随机森林、K 近邻以及多层感知器等算法在较低光谱分辨率条件下，即使颗粒未处于激光焦平面内，仍能保持超过 95%

的识别准确率[20]。该方法突破了传统技术必须依赖人工精细预处理的限制,显著提升了微塑料识别的灵活性与分析效率,且具备良好的跨实验室适用性及复杂环境适应能力。

从环境介质与污染特征的角度分析,中文文献的高频关键词凸显了对陆地生态系统(尤其是农田土壤)的高度关注,研究多集中于微塑料颗粒在农田土壤中的分布特征、聚合物组成及其与作物吸收之间的关联。相比之下,英文文献更侧重于水体、沉积物和大气等跨介质环境中微塑料的检测技术开发,但在土壤相关研究的精细程度上明显弱于中文文献。这一差异在一定程度上反映了我国面临的耕地污染压力,以及对土壤中微塑料研究的迫切需求。从研究深度与学科交叉角度来看,中英文文献均展现出较强的技术开发导向。英文文献中“Quantification”(9次)与“Identification”(12次)等关键词突出体现了该领域对识别精度的高度重视;中文文献则通过“新污染物”(5次)、“环境行为”(4次)等术语反映出国内将微塑料纳入新兴污染物的研究趋势,体现出科研工作对相关政策导向的积极响应。

3.2.2. 关键词共现分析

利用 VOSviewer 对文献关键词进行共现分析,结果如图 2(a)所示。关键词共现分析有助于揭示研究领域的主流方向与核心主题。图中不同颜色的关键词代表不同的研究聚类,相同颜色的关键词属于同一聚类,表明其在研究主题或内容上具有高度关联性,通常在文献中高频共现[21][22]。对出现频率在三次及以上的关键词进行时间维度上的共现分析,结果如图 2(b)所示。关键词的颜色深浅代表其首次出现的时间,清晰地揭示了研究热点的演变趋势。由于 2023~2024 年为微塑料识别领域文献发表的高峰期,多数高频关键词集中出现在这一时间段。分析表明,近两年研究热点发生了显著变化:2023 年主要聚焦于微观检测技术与基础分析方法,围绕“微塑料识别”“拉曼光谱”和“定量分析”等技术层面展开;而 2024 年则逐步拓展至应用场景、环境影响评估以及技术融合等方向。在 2023 年微观检测技术研究的基础上,以“水”为代表的实际应用场景、“人工智能”“机器学习”驱动的技术融合方向,以及与“微塑料污染”相关的环境影响分析,共同构成了当前的研究新趋势[23][24]。

两个关键词之间的连接线条粗细反映了它们的关联强度,该强度由共现次数计算得出。线条越粗,表示两个关键词的相关性越高。如图 3 所示,关键词网络呈现出以“microplastics”为核心,多种技术与环境场景交叉融合的研究格局。“microplastics”以 158 次出现频率和 315 的总连接强度成为网络中的核心节点,其高连接强度体现了与其他关键词的广泛关联性。“identification”(总连接强度 267)和“quantification”(总连接强度 182)构成了次级核心节点,表明该领域研究高度依赖于精准的识别与定量方法。从环境载体来看,海洋环境、沉积物和水体是当前微塑料研究的主要对象。其中,沉积物的总连接强度为 117,表明其在微塑料环境迁移过程中的研究关注度较高。海洋环境相关关键词主要指向微塑料在海洋生态系统中的分布特征及其生物累积机制。此外,“particles”(总连接强度 148)与“pollution”(总连接强度 142)的高频共现,凸显了微塑料作为新型颗粒污染物所具有的环境风险属性。在技术层面,“FTIR”(总连接强度 69)、“Raman spectroscopy”(总连接强度 67)和“spectroscopy”(总连接强度 84)构成了主要的技术研究群体。这些技术的总连接强度均与“identification”和“quantification”高度相关,表明光谱分析是识别微塑料化学组成和实现定量检测的核心手段。“Nile red”(总连接强度 78)作为一种荧光染色剂,常与光谱技术结合使用,用于微塑料的可视化检测。此外,“nanoplastics”(总连接强度 74)作为微塑料的一个细分研究方向,已逐渐形成独立的研究分支。其与“particles”和“microplastics”的强连接关系,反映出科研界对更小粒径塑料颗粒的环境行为及其潜在毒性效应的高度关注。

关键词聚类不仅能够反映研究主题的集中程度,更揭示出不同方向之间潜在的内在联系。“Raman spectroscopy”与“machine learning”二者虽归属不同聚类,却因频繁共现而体现出光谱技术与智能算法

3.3. 研究机构分析

在全球范围内关于微塑料识别的研究中，高校共发表论文 246 篇，占总数的 61.1%；科研机构发表 138 篇，占比 34.3%。高校与科研机构在该领域研究中占据主导地位。为评估研究机构在微塑料识别领域的学术影响力，本文统计了各机构的发文量与总被引频次，并列出发文量排名前五的机构及其发文量、总被引次数与总引用次数，详见表 2。其中，总被引次数是指该机构研究成果被其他文献引用的总频次，总引用次数是指该机构在研究过程中引用他人成果的总频次。研究结果显示，发文量排名前三的研究机构依次为中国海洋大学、复旦大学与广东海洋大学；中国科学院与浙江大学等机构也在推动微塑料识别研究方面发挥了重要作用。前三名机构的高发文量表明其在该领域具备坚实的科研基础和较强的学术产出能力。

Table 2. The top five institutions in terms of the total number of published articles
表 2. 发文总量排名前五的机构

| 研究机构 | 发文量 | 总被引次数 | 总引用次数 |
|-----------------------------|-----|-------|-------|
| Ocean University of China | 10 | 44 | 336 |
| Fudan University | 6 | 319 | 333 |
| Guangdong Ocean University | 6 | 261 | 331 |
| Chinese Academy of Sciences | 4 | 38 | 188 |
| Zhejiang University | 4 | 87 | 213 |

中国学者的研究主要集中在高灵敏度检测技术的开发、复杂环境基质中检测方法的优化，以及高便携传感器的研发。Liu 等通过磁控溅射或离子溅射技术，在 V 型纳米孔中沉积金纳米颗粒，实现了对 1 μm 聚苯乙烯微珠的显著增强效应，增强因子达 20，并成功应用于大气环境中微塑料的检测[25]。“问题导向”与“技术落地”是中国学者研究的核心理念，强调研究成果在真实环境中的适用性。Huang 等利用光老化诱导纳米塑料表面原位生成银纳米颗粒，无需额外添加 SERS 基底，成功实现了对湖水中 PVC 塑料的检测[26]。技术组合与成本控制也是中国学者研究的重要特点之一，Gao 等将热解 - 气相色谱(Py-GC/MS)与激光直接红外光谱(LDIR)相结合，成功检测出食盐中的 7 种微塑料颗粒[27]。中国学者聚焦于国内典型环境，以“高干扰环境中微塑料的检出 - 识别 - 定性/定量 - 体化”为核心，致力于解决全国范围内“高干扰基质中微塑料检测难”的关键问题。目前，国际研究更侧重于仪器创新以及在纯水体等简单基质中的微塑料检测。相比之下，中国学者的研究方向不仅灵活应对了国内复杂的生态环境挑战，也有效弥补了当前国际研究在复杂基质检测方面的不足，具备推动行业标准制定与全球治理实践的潜力。Wu 等开发的银枝晶复合膜传感器以滤纸为基底，通过简易的化学沉积方法制备，其成本显著低于传统 SERS 基底，并集成吸附、过滤与检测功能，对聚苯乙烯的回收率达到 96.86%~103.96% [28]。

图 3 为国家间合作网络的共现图，其中节点大小代表该国的发文数量，连接强度反映两国之间的合作论文数量。中美之间的连接强度为 8，是合作最为频繁的国家，其主要研究方向聚焦于高效且多维度的微塑料识别方法。例如，来自北京航空航天大学的吴子嫣(Wu Ziyan)与美国地质调查局(United States Geological Survey)的 Janssen Sarah E. 合作，开发了一种适应性强的等离子体膜传感器，用于对富营养化湖水中低微米级微塑料(1~10 μm)进行快速且可靠的检测。该研究采用聚碳酸酯经蚀刻膜作为传感器基底，表现出优异的性能，能够提高成像对比度、减少背景干扰并增强拉曼信号强度，为微塑料识别领域作出了重要贡献[29]。中国在微塑料识别领域的国际合作成果数量最多，达 150 篇，位居全球首位。其次，美国、德国、英国等国家在该领域也积极开展国际合作。美国与其他国家的合计连接强度为 26，位居全球

第一；其中，美国与加拿大合作最为密切，研究重点聚焦于微塑料识别技术的标准化与创新应用，并致力于推动全球污染治理策略的完善。例如，Open Specy 平台的研究团队致力于开发开源工具，以促进微塑料光谱数据的共享与分析[28]；自旧金山湾的研究团队则强调标准化采样方法与统一报告格式的重要性，有效提升了微塑料识别数据的质量与可比性[30]。中国与其他国家的合计连接强度为 24，位列全球第二；英国与德国的合计连接强度均为 16。各国在微塑料识别领域均取得了一定的研究成果，展现出良好的发展态势。

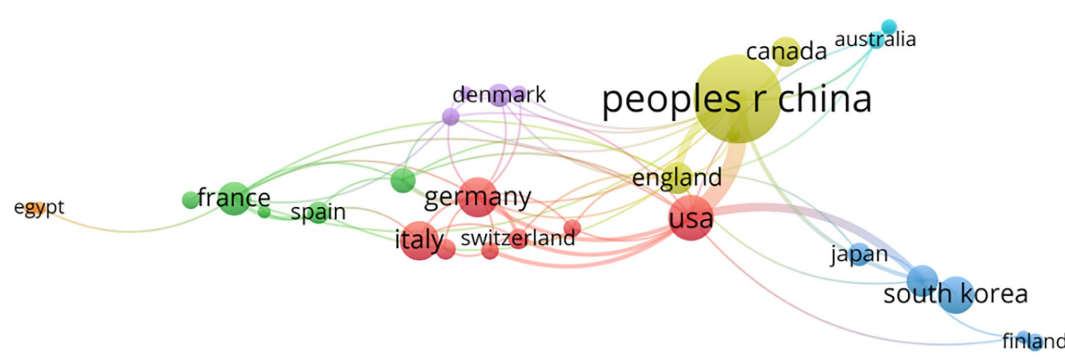


Figure 3. Co-occurrence map of international cooperation networks
图 3. 国家间合作网络共现图

3.4. 研究热点与研究趋势

表 3 列出了被引频次排名前十的文献。其中被引次数最高的是英国约克大学的 Lauren C. Jenner，其团队首次在活体人类肺组织中直接检测到微塑料颗粒，并利用 μ FTIR 技术实现了精准识别[31]。该研究不仅在污染控制研究中展现出严谨的实验设计，还首次将环境科学与临床医学相结合，开创性地推动了微塑料健康效应领域的研究进程，具有重要的学术价值和广泛影响力。其他高被引学者还包括意大利罗马生物学自由大学的 Ragusa A，其研究聚焦于人类胎盘中微塑料和纳米塑料的检测及其对婴儿健康的潜在影响[32]；以及英国萨里大学的 Enfrin M，主要研究方向为塑料基材料的环境行为、毒性效应及其在工程应用中的可持续性[33]。前十位高被引学者中，有三位来自中国机构，表明中国在该领域已具备较强的科研实力和学术影响力。

在按年份对这些高被引文献进一步分析时发现，Jenner 等人发表于 2022 年的研究仍位列首位，该文献被引次数达 653 次[31]。其通过对人体肺组织的直接分析，首次提供了微塑料通过呼吸道进入肺部并沉积的实证证据，为后续微塑料暴露风险的健康评估提供了重要理论基础。同时，该研究所采用的 μ FTIR 光谱法也为微塑料识别方法的精度提升与自动化发展提供了关键技术支撑。

通过对被引频次前十的文献及其关键词的分析可知，当前微塑料识别领域的研究呈现出显著的多学科交叉特征。研究热点主要集中在以下几个方面：一是开发以拉曼光谱和 μ FTIR 光谱为核心的高灵敏度检测技术[34]；二是结合计算机工具辅助分析，推动检测过程的自动化与智能化发展[35]；三是探究微塑料在全球不同环境中的迁移归趋及其与微生物的相互作用；四是探索可降解材料作为替代方案，以提出更具可行性的微塑料污染治理策略[36]。未来的研究趋势正从单纯的“存在检测”向突破纳米颗粒检测瓶颈[37]转变，并致力于实现从“环境监测”到“风险溯源”的研究升级[38]。然而，纳米塑料的检测目前仍高度依赖昂贵的仪器设备，且如何克服复杂环境基质的干扰仍是当前亟需解决的关键科学难题。

高影响力文献的计量分析进一步凸显了微塑料识别研究在学科交叉性和前沿性方面的显著特征。如表 3 所示，该领域的研究主要集中在环境科学方向，多数期刊被归入 Q1 分区，表明其在各自学科中处于

前 25%的高影响力地位，从而确保了所选文献具备较高的学术权威性。此外，多数期刊的影响因子在 8.2 及以上，进一步体现了该领域研究的广泛学术影响力。从期刊的学科分类来看，来源广泛，涵盖了自然科学、生物化学研究方法、湖沼学、多学科科学等多个领域，反映出当前学者高度重视与其他学科的交叉融合，正不断为环境科学研究引入新的理论框架与方法体系，显著提升了研究的深度与创新性。

Table 3. Information on the top 10 most cited literature
表 3. 被引次数前十的文献信息

| 序号 | 作者 | 年份 | 被引次数 | 机构 | 国家 | 期刊 | 影响因子 | 学科分类 | JCR 分区 |
|----|------------|------|------|---|-----|---|------|------------------------------|--------|
| 1 | Jenner, LC | 2022 | 653 | University of Hull | 英国 | SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT | 8.2 | Environmental Sciences | Q1 |
| 2 | Ragusa, A | 2022 | 366 | Maggiore Hosp Carlo Alberto Pizzardi Bologna | 意大利 | POLYMERS | 4.7 | POLYMER SCIENCE - SCIE | Q1 |
| 3 | Enfrin, M | 2020 | 254 | Royal Melbourne Institute of Technology | 英国 | JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS | 12.2 | Environmental Sciences | Q1 |
| 4 | Lv, LL | 2020 | 212 | 广东海洋大学 | 中国 | SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT | 8.2 | Environmental Sciences | Q1 |
| 5 | Xu, GJ | 2020 | 212 | 复旦大学 | 中国 | ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY | 10.9 | Environmental Sciences | Q1 |
| 6 | Rogers, KL | 2020 | 186 | University of Copenhagen | 丹麦 | ANALYTICAL AND BIOANALYTICAL CHEMISTRY | 3.8 | BIOCHEMICAL RESEARCH METHODS | Q1 |
| 7 | Wu, D | 2023 | 157 | 南京医科大学 | 中国 | JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH | 11.4 | Environmental Sciences | Q1 |
| 8 | Primpke, S | 2020 | 131 | Alfred Wegener Inst Helmholtz Zentrum Polar & Meer | 德国 | LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY LETTERS | 5.1 | Limnology | Q1 |
| 9 | Qiana, N | 2024 | 123 | Columbia University | 美国 | PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA | 9.4 | MULTIDISCIPLINARY SCIENCES | Q1 |
| 10 | Bianco, V | 2020 | 112 | Istituto di Scienze Applicate e Sistemi Intelligenti "Eduardo Caianiello" | 意大利 | ADVANCED INTELLIGENT SYSTEMS | 6.8 | COMPUTER SCIENCE | Q1 |

4. 结论

- (1) 自 2012 年以来，微塑料识别领域的研究持续增长，尤其自 2019 年起进入快速发展阶段，标志着该领域已成为国际研究热点。中国在该领域的研究中占据主导地位，其中中国海洋大学、复旦大学等机构的研究贡献尤为突出。当前研究主要聚焦于拉曼光谱、机器学习等先进技术的应用，这些技术不断推动微塑料识别精度的提升与自动化分析的发展。
- (2) 关键词共现分析表明，当前研究的核心关注点包括微塑料的精准检测与定量分析、环境影响评估以及光谱技术的创新应用。特别是在拉曼光谱和表面增强拉曼散射技术的支持下，微塑料识别的灵敏度和准确性显著提高。此外，跨学科技术融合，如机器学习与传统光谱技术的结合，已成为微塑料识别领域的前沿发展方向。
- (3) 尽管相关技术已取得显著进展，纳米塑料的精准识别以及在复杂环境中的微塑料检测仍面临诸多挑战。现有技术在高干扰环境中的适用性仍有限。此外，尽管机器学习与光谱技术的结合展现出巨大潜力，但其广泛应用仍处于初步探索阶段，尚未形成系统化、多尺度的综合评估框架。
- (4) 未基于关键词演化趋势，未来研究将聚焦于突破纳米塑料检测的技术瓶颈、提升拉曼光谱与 FTIR 等光谱技术的应用精度，并推动机器学习与传统光谱技术的深度融合。跨领域的多学科融合将在技术创

新和解决复杂环境基质中微塑料识别问题的过程中发挥关键作用。

(5) 本研究存在一定的局限性。文献检索主要基于“microplastic identification”和“微塑料识别”主题词,可能未完全覆盖该领域所有相关文献。文献计量学方法主要侧重于文献的外部特征分析,难以评估单篇文献的内在质量与研究方法的严谨性。VOSviewer 工具的聚类结果受算法参数与数据清洗方式的影响,可能存在一定的主观性,未来研究可结合内容分析法以弥补纯计量分析的不足。

参考文献

- [1] Min, W., Cheng, J.-X. and Ozeki, Y. (2025) Theory, Innovations and Applications of Stimulated Raman Scattering Microscopy. *Nature Photonics*, **19**, 803-816. <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01707-z>
- [2] 赵淑莉, 陈少坤, 于秀豪, 等. 美丽中国建设过程中重点关注的新污染物监测研究[J]. 中国环境科学, 2024, 44(8): 4576-4587.
- [3] 焦若男, 刘琨, 孔繁艺, 等. 近海微塑料含量的相干反斯托克斯拉曼光谱成像研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1022-1027.
- [4] 郑丽娜, 冯子康, 韩臻, 等. 基于显微拉曼光谱的微塑料定量分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1645-1650.
- [5] 张蔚, 冯巍巍, 蔡宗岐, 等. 基于 MTF 变换的拉曼光谱和卷积神经网络的海水微塑料识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(9): 2420-2427.
- [6] 洪子衿, 张艺严, 马静, 等. 拉曼光谱与机器学习结合的微塑料精确识别研究[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(8): 1047-1057.
- [7] 李静, 张媛, 张莹, 等. 基于 GA-GRNN 算法和显微拉曼光谱的城市河流微塑料识别方法研究[J]. 光散射学报, 2025, 37(1): 69-76.
- [8] 林树燕, 张涵蛟, 杨青, 等. “以竹代塑”发展优势与竹资源高效培育面临的挑战[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(4): 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20250603.1622.002.html>, 2025-06-26.
- [9] 李卓然, 季民, 赵迎新, 等. 全球微塑料研究现状及热点可视化剖析[J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1124-1136.
- [10] 郝若男, 史小红, 刘禹, 等. 乌梁素海水体微塑料空间分布规律及影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3316-3324.
- [11] Rhee, H., Jeong, S., Lee, H., Cho, M.G. and Choi, D.S. (2024) Rapid Detection and Identification of Microplastics from Nonchemically Treated Soil with CARS Microspectroscopy. *Environmental Pollution*, **342**, Article ID: 123080. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123080>
- [12] 贺雨田, 杨颀, 隋海霞, 等. 基于显微光谱法的双壳类海洋生物中微塑料的检测方法研究[J]. 分析测试学报, 2021, 40(7): 1055-1061.
- [13] 郭庆伟, 王倩, 张海东, 等. 新污染物检测技术研究进展[J]. 化学通报, 2024, 87(1): 78-85.
- [14] Chen, Q., Wang, J., Yao, F., Zhang, W., Qi, X., Gao, X., et al. (2023) A Review of Recent Progress in the Application of Raman Spectroscopy and SERS Detection of Microplastics and Derivatives. *Microchimica Acta*, **190**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-06044-y>
- [15] Zarfl, C. (2019) Promising Techniques and Open Challenges for Microplastic Identification and Quantification in Environmental Matrices. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **411**, 3743-3756. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01763-9>
- [16] Hiltunen, A., Huopainen, J., Mäkilä, E., Häkkinen, S., Damlin, P. and Hänninen, J. (2024) Expanding Sample Volume for Microscopical Detection of Nanoplastics. *Marine Environmental Research*, **202**, Article ID: 106806. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106806>
- [17] Xie, L., Gong, K., Liu, Y. and Zhang, L. (2022) Strategies and Challenges of Identifying Nanoplastics in Environment by Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, **57**, 25-43. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07416>
- [18] Wang, J., Dong, J., Tang, M., Yao, J., Li, X., Kong, D., et al. (2023) Identification and Detection of Microplastic Particles in Marine Environment by Using Improved Faster R-CNN Model. *Journal of Environmental Management*, **345**, Article ID: 118802. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118802>
- [19] Qiu, Y., Zhou, S., Zhang, C., Qin, W., Lv, C. and Zou, M. (2023) Identification of Potentially Contaminated Areas of Soil Microplastic Based on Machine Learning: A Case Study in Taihu Lake Region, China. *Science of the Total Environment*, **877**, Article ID: 162891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162891>

- [20] Lei, B., Bissonnette, J.R., Hogan, Ú.E., Bec, A.E., Feng, X. and Smith, R.D.L. (2022) Customizable Machine-Learning Models for Rapid Microplastic Identification Using Raman Microscopy. *Analytical Chemistry*, **94**, 17011-17019. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c02451>
- [21] 冯璐, 冷伏海. 共词分析方法理论进展[J]. 中国图书馆学报, 2006(2): 88-92.
- [22] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. 中国图书馆学报, 2010, 36(5): 60-68.
- [23] Prezgot, D., Chen, M., Leng, Y., Gaburici, L. and Zou, S. (2025) Automated Machine-Learning-Driven Analysis of Microplastics by TGA-FTIR for Enhanced Identification and Quantification. *Analytical Chemistry*, **97**, 8833-8840. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c06775>
- [24] Seidel, M., Hutengs, C., Bauer, J., Schneider, B., Ortner, M., Thiele-Bruhn, S., *et al.* (2025) Efficient Screening of Microplastics in Soils Using Hyperspectral Imaging in the Short-Wave Infrared Range Coupled with Machine Learning—A Laboratory-Based Experiment. *Ecological Indicators*, **173**, Article ID: 113301. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113301>
- [25] Liu, J., Xu, G., Ruan, X., Li, K. and Zhang, L. (2022) V-Shaped Substrate for Surface and Volume Enhanced Raman Spectroscopic Analysis of Microplastics. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, **16**, 213-222. <https://doi.org/10.1007/s11783-022-1578-8>
- [26] Huang, X., Huang, J., Lu, M., Liu, Y., Jiang, G., Chang, M., *et al.* (2024) *In Situ* Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for the Detection of Nanoplastics: A Novel Approach Inspired by the Aging of Nanoplastics. *Science of the Total Environment*, **946**, Article ID: 174249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174249>
- [27] Gao, H., Wang, H., Wang, Y., Lin, Y., Yan, J. and Shen, H. (2024) Identification and Quantification of Microplastics in Salts by Complementary Approaches Using Pyrolysis-Gas Chromatography/Quadrupole-Time of Flight Mass Spectrometry (Py-GC/QTOFMS) and Laser Direct Infrared (LDIR) Chemical Imaging Analysis. *Environmental Pollution*, **348**, Article ID: 123820. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123820>
- [28] Cowger, W., Steinmetz, Z., Gray, A., Munno, K., Lynch, J., Hapich, H., *et al.* (2021) Microplastic Spectral Classification Needs an Open Source Community: Open Specy to the Rescue! *Analytical Chemistry*, **93**, 7543-7548. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c00123>
- [29] Wu, Z., Janssen, S.E., Tate, M.T., Wei, H. and Qin, M. (2024) Adaptable Plasmonic Membrane Sensors for Fast and Reliable Detection of Trace Low-Micrometer Microplastics in Lake Water. *Environmental Science & Technology*, **58**, 20172-20180. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06503>
- [30] Miller, E., Sedlak, M., Lin, D., Box, C., Holleman, C., Rochman, C.M., *et al.* (2021) Recommended Best Practices for Collecting, Analyzing, and Reporting Microplastics in Environmental Media: Lessons Learned from Comprehensive Monitoring of San Francisco Bay. *Journal of Hazardous Materials*, **409**, Article ID: 124770. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124770>
- [31] Jenner, L.C., Rotchell, J.M., Bennett, R.T., Cowen, M., Tentzeris, V. and Sadofsky, L.R. (2022) Detection of Microplastics in Human Lung Tissue Using μ F-TIR Spectroscopy. *Science of the Total Environment*, **831**, Article ID: 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- [32] Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., Belloni, A., Gioacchini, G., Blondeel, C., *et al.* (2022) Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers*, **14**, Article No. 2700. <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- [33] Enfrin, M., Lee, J., Gibert, Y., Basheer, F., Kong, L. and Dumée, L.F. (2020) Release of Hazardous Nanoplastic Contaminants Due to Microplastics Fragmentation under Shear Stress Forces. *Journal of Hazardous Materials*, **384**, Article ID: 121393. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121393>
- [34] 白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 等. 机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 1185-1195.
- [35] 丁钰祥, 张家铭, 张洪伟, 等. 傅里叶变换红外光谱在微塑料检测中的应用[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(8): 1157-1165.
- [36] Hufnagl, B., Stibi, M., Martirosyan, H., Wilczek, U., Möller, J.N., Löder, M.G.J., *et al.* (2021) Computer-Assisted Analysis of Microplastics in Environmental Samples Based on μ FTIR Imaging in Combination with Machine Learning. *Environmental Science & Technology Letters*, **9**, 90-95. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00851>
- [37] Sukkuea, A., Inpun, J., Cherdskujai, P. and Akkajit, P. (2025) Automatic Microplastic Classification Using Dual-Modality Spectral and Image Data for Enhanced Accuracy. *Marine Pollution Bulletin*, **213**, Article ID: 117665. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117665>
- [38] 薄录吉, 李冰, 张凯, 等. 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2375-2383.