

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2025073104

CSTR:32061.14.hjhx.2025073104

代思波, 燕少玮, 于皓, 等. 生物样本中塑料颗粒的分析方法挑战[J]. 环境化学, 2025, 44(10): 3544-3559.

DAI Sibō, YAN Shaowei, YU Hao, et al. Analytical challenges of plastic particles in biological samples[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (10): 3544-3559.

生物样本中塑料颗粒的分析方法挑战*

代思波^{1,2} 燕少玮^{1,2} 于 皓^{1,2} 文昊楠^{1,2} 刘 倩^{1,2,3**} 江桂斌^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境科学研究中心, 环境化学与环境毒理全国重点实验室, 北京, 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京, 100049; 3. 江汉大学环境与健康研究所, 武汉, 430056)

摘 要 随着环境中塑料的持续累积, 塑料颗粒对生物及人体健康的潜在风险日益凸显. 精准分析生物样本中的塑料颗粒是评估其健康影响的关键环节. 本文系统综述了生物样本中塑料颗粒的分析方法, 包括样品前处理与质量控制程序, 以及扫描电子显微镜-能量色散光谱、傅里叶变换红外光谱、显微拉曼光谱、激光红外直接成像和热裂解-气相色谱质谱联用等检测技术, 评述了各类方法的优势与局限性. 当前分析面临分辨率不足、基质干扰、标准化缺失等挑战. 新兴技术结合人工智能可提升检测精度与效率. 研究范式需从单一污染物转向复合污染物视角, 关注塑料颗粒携带的添加剂、微生物及毒性协同效应. 未来需建立标准化流程, 深化光谱-质谱联用技术, 并结合机器学习推动塑料颗粒的精准风险评估与污染防控.

关键词 微塑料, 纳塑料, 生物样本, 人工智能.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Analytical challenges of plastic particles in biological samples

DAI Sibō^{1,2} YAN Shaowei^{1,2} YU Hao^{1,2} WEN Haonan^{1,2}
LIU Qian^{1,2,3**} JIANG Guibin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Institute of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan, 430056, China)

Abstract The continuous accumulation of plastics in the environment has heightened concerns regarding the potential risks of plastic particles to organisms and human health. Precise analysis of plastic particles within biological samples is crucial for assessing their health impacts. This paper systematically reviews analytical methods for plastic particles in biological samples, encompassing sample pretreatment and quality control procedures, as well as detection techniques including Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, micro-Raman Spectroscopy, Laser-Direct Infrared Imaging, and Pyrolysis-Gas Chromatography Mass Spectrometry. The advantages and limitations of each method are critically evaluated. Current analytical challenges include insufficient resolution, matrix interference, and a lack of standardization. Emerging technologies integrated with artificial intelligence show promise in

2025 年 7 月 31 日收稿(Received: July 31, 2025).

* 国家自然科学基金(22425041, 22188102)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (22425041, 22188102).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: qianliu@rcees.ac.cn

enhancing detection accuracy and efficiency. Future research paradigms should shift from a single-pollutant perspective towards a co-contaminant perspective, focusing on the synergistic toxicity effects of plastic particles combined with additives, adsorbed microorganisms, and other environmental pollutants. Establishing standardized protocols, advancing hyphenated spectroscopic-mass spectrometric techniques, and integrating machine learning are essential for driving precise risk assessment and effective pollution control related to plastic particles.

Keywords microplastics, nanoplastics, biological sample, artificial intelligence.

截至 2025 年, 环境中已累积近 110 亿吨塑料, 这些塑料广泛存在于陆地、海洋和大气环境中^[1,2], 在人类活动较少的自然保护区中也有塑料颗粒检出^[3]. 塑料在机械和老化等作用下碎裂成微塑料(粒径< 5 mm 的塑料颗粒)和纳塑料(粒径<1 μm 的塑料颗粒)^[4], 可以通过摄入、吸入和皮肤暴露进入生物体^[5-9]. 塑料颗粒暴露途径多样, 食用盐、海产品、蜂蜜等食物及饮用水都存在暴露风险^[9-11], 甚至在聚丙烯奶瓶中冲泡的奶粉中也检出了高浓度的微塑料^[12]. 暴露于塑料颗粒会对生物体造成多种潜在危害, 不仅会对小鼠等动物的血糖代谢、脂质代谢和生殖功能造成负面效应^[13,14], 还可能对人体的生殖系统和消化系统产生不利影响^[15,16]. 进入人体的塑料颗粒与多种疾病有关, 血液系统中检出的微塑料与心血管疾病之间存在潜在联系^[17], 脑内的塑料颗粒甚至可能导致痴呆^[18], 这些发现进一步引发了人们对塑料颗粒的广泛担忧^[19,20].

不难看出, 塑料颗粒对人体健康的影响不容忽视, 与之相关的研究开展对生物体内塑料颗粒浓度的分析技术具有较高的要求^[21,22]. 然而, 生物样本(包括人体样本以及鱼类、藻类等动植物样本)的复杂性为塑料颗粒的分析带来了挑战^[23,24], 包括复杂的有机基质对目标颗粒的掩盖与干扰; 样本中塑料颗粒浓度低、粒径小, 对方法的灵敏度和分辨率要求极高; 环境中无处不在的塑料污染导致的背景干扰, 对质量控制提出严峻考验. 本文系统地综述了当前已有研究中使用的分析方法及关键瓶颈, 以期为未来生物样本中塑料颗粒的分析方法升级提供基础性建议.

1 生物样本中塑料颗粒的分析方法(Analytical methods for plastic particles in biological samples)

1.1 前处理方法与质量控制程序

生物样本大多基质复杂, 因而需要通过消解-过滤或离心进行样品的前处理, 如图 1 所示^[6,18,25,26]. 消解的目的是去除塑料颗粒以外的固体颗粒及有机物(包括蛋白质、脂类等)杂质. 常见消解方法分为酸消解^[18]、碱消解^[27]和氧化消解^[6]. 其中酸消解一般使用浓硝酸消解, 消解时间长, 可以有效去除有机杂质, 但可能会破坏塑料颗粒. 碱消解一般使用氢氧化钾、氢氧化钠或四甲基氢氧化铵, 相比酸消解, 碱消解可以更有效地消除蛋白质等大分子有机物. 但碱消解皂化反应效率不高, 脂质难以完全消解, 同时可能破坏以酯键连接的塑料(如聚乳酸)^[28,29]. 氧化消解以芬顿(Fenton)反应为主, 可用于去除样品中的有机物, 反应耗时长, 且氧化过程中产生的气泡会干扰后续的过滤或离心操作^[30]. 此外, 该反应放热明显, 部分塑料颗粒(如聚酰胺)在 70 °C 下会被破坏, 因此需要使用冰浴控制反应温度^[28].

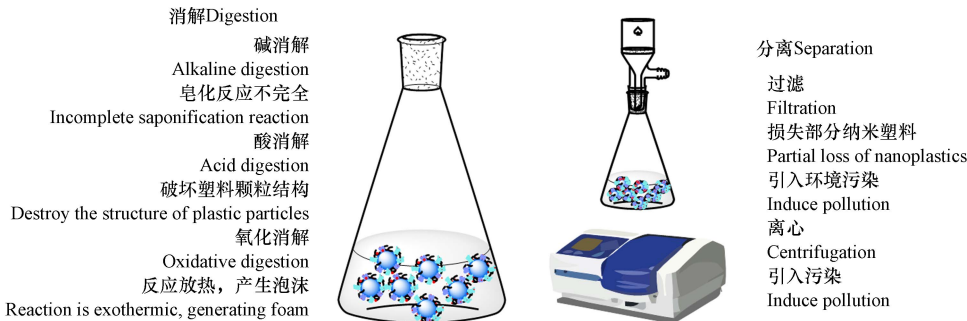


图 1 生物样本塑料颗粒分析前处理方法示意图

Fig.1 Pretreatment methods for plastic particle analysis of biological samples

过滤或离心的目的是将塑料颗粒与溶液分离以降低基质效应,提高样品中塑料颗粒的纯度.过滤是目前主要使用的方法,包括聚醚砜滤膜过滤^[31]、玻璃纤维滤膜^[32]、不锈钢滤膜过滤^[33],需根据消解方法与目标颗粒粒径选择合适的滤膜材质与孔径.聚醚砜滤膜过滤的优点是耗材成本低,操作简单,可以得到微塑料以及部分纳米塑料,但会损失一些粒径较小的塑料颗粒.孔径较小的滤膜过滤时所需压力较大,需要加压过滤或者真空抽滤,会使大量环境空气通过滤膜,此过程可能导致空气中的塑料颗粒^[3]在滤膜上富集,对检测结果造成影响.此外,超高速离心同样可以分离消解液与塑料颗粒,但由于玻璃离心管无法承受过高的转速,目前主要使用聚碳酸酯离心管,这就可能导致离心过程中管壁的聚碳酸酯在机械和扩散作用下进入溶液造成污染^[18].

塑料颗粒在环境中广泛存在^[2,3],检测过程中质量控制就十分重要^[34].常见的质控方法主要包括污染控制、空白对照以及方法回收率监测^[35].污染控制主要表现为避免使用塑料制品,如身穿棉质实验服及手套、佩戴口罩、使用玻璃器皿或不锈钢器具对样品进行处理或储存等.良好的空白对照可以反映环境中以及实验操作引入的塑料颗粒并根据背景污染对实验结果进行校正,从而提高数据的准确性.已有研究中质量控制程序差异较大,难以衡量各方法的准确性,亟需制定相关的标准程序^[36,37].

1.2 仪器分析

微塑料的检测通常需要借助多种仪器,以实现对微塑料物理、化学特征的全面鉴定.常用的仪器主要包括基于电子束作用的扫描电子显微镜-能量色散光谱、基于分子振动光谱学的傅里叶变换红外光谱与显微拉曼光谱,以及新兴的激光红外直接成像和用于精准定量的热裂解气相色谱-质谱联用等^[25,36].这些技术手段各有侧重,可分别或协同用于测定微塑料的颗粒数量、粒径分布、形貌特征、元素组成、聚合物类型及质量浓度等信息,共同构成了复杂生物与环境样品中微塑料分析的核心技术体系^[33].

1.2.1 扫描电子显微镜-能量色散光谱

扫描电子显微镜-能量色散光谱(Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometer, SEM-EDS)的工作原理是使用聚焦电子束扫描样品表面,电子与样品原子相互作用从而产生二次电子、背散射电子以及特征X射线,进而生成高分辨率图像,可以得到微塑料颗粒的大小、形状和表面形貌等物理特性信息.其中,二次电子主要用于生成表面形貌图像,背散射电子能提供样品组成信息,特征X射线则用于元素分析.SEM-EDS被广泛应用于多种生物样品中塑料颗粒的检测,对包括海蛞蝓 *Bursatella leachii*(塑料颗粒尺寸<500 μm ,类型未知)^[38]、贻贝 *Mytilus edulis*^[39]、心脏^[31]、肺^[40]、下肢关节^[41]、玻璃体液^[33]、阴茎^[42]、脑脊液^[43]、大脑、肝脏、肾脏^[18]、结直肠癌^[44]和血液(检测到聚苯乙烯、聚丙烯颗粒,平均浓度 4.2 particles·mL⁻¹,粒径<100 μm)^[45]在内的生物样本进行了微塑料颗粒检测.

然而,SEM-EDS 存在其局限性:SEM-EDS 检测要求样品具有良好的导电性,而微塑料样品往往不符合要求,通常需要对样品进行金属或碳涂层处理以增强导电性^[46],这无疑增加了操作难度和时长.此外,SEM-EDS 分析微塑料颗粒通常耗时较长,在复杂基质环境下,区分微塑料与其他颗粒需要人工挑选和识别,影响了检测效率和准确率^[47].该方法通常可以揭示碳基分子的存在,缺陷是只能识别样本的元素组成,并不能提供分子式等化学信息,无法对塑料颗粒精确定性^[34,38].

1.2.2 傅里叶变换红外光谱

傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR),作为干涉型红外光谱仪,相比传统色散型光谱仪的优点在于光谱范围更宽、光束能量更强以及分辨率更高,适用于液体、固体等样品的红外吸收光谱检测.其原理是当红外光的频率与分子中基团的振(转)动频率相同时,分子吸收红外光,发生振(转)动能级跃迁,从而得到该分子的振转光谱,也就是红外光谱,将光谱信息与不同基团的伸缩振动和弯曲振动相对应,可以得出分子中的基团信息^[48-50].FTIR 不仅能够识别微塑料的种类,还能提供微塑料的化学组成、大小和形状信息,有助于追踪污染源及阐明其环境行为^[49].

尽管 FTIR 在单次光谱采集方面速度较快,但在实际生物样本分析中,整体通量受限于样品中颗粒物的数量.消解后的生物样品中常含有大量颗粒,对样品区域进行快速扫描后需要逐一对待疑似塑料颗粒进行光谱采集与鉴定,显著降低了分析效率,难以实现真正意义上的高通量筛选.

此外,FTIR 的空间分辨率受红外波长限制(通常为 10—20 μm),难以可靠识别粒径小于 10 μm 的微塑料颗粒,尤其是纳米塑料^[49,51].而这类小尺寸塑料颗粒更易被生物体吸收并在组织中积累,因此仅

依赖 FTIR 可能导致对真实内暴露水平的低估。

尽管存在上述局限, FTIR 仍被广泛应用于沉积物及生物组织等样品中塑料颗粒的检测^[50,52], 包括弹尾虫 *Cryptopygus antarcticus* (检测到聚苯乙烯, 尺寸 $<100\text{ }\mu\text{m}$)^[53]、阿拉斯加鳕鱼 *Gadus chalcogrammus* (检测到人造丝、聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯颗粒, 浓度 $(0.06\pm 0.05)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $100\text{—}500\text{ }\mu\text{m}$)^[54]、浒苔 *U. prolifera* (检测到聚乙烯, 聚苯乙烯, 聚丙烯, 聚对苯二甲酸乙二醇酯, 聚氯乙烯, 聚氨酯等, 平均浓度 (661 ± 331.56) 颗粒/批次, 粒径范围 $13.5\text{—}1000\text{ }\mu\text{m}$)^[55]、鱼类(分别检测到人造丝、聚酰胺, 平均每条鱼检测到 (1.90 ± 0.10) 个颗粒, 粒径分布 $0.13\text{—}14.3\text{ mm}$, 以及聚乙烯、聚丙烯、人造丝、聚苯乙烯、尼龙, 平均每条鱼检测到 (0.27 ± 0.63) 个颗粒, 平均粒径 $(2.11\pm 1.67)\text{ mm}$)^[56,57]、贻贝 *Mytilus edulis* (检测到聚乙烯, 聚对苯二甲酸乙二醇酯, 平均浓度 $2.2\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径 $<1000\text{ }\mu\text{m}$)^[39]、结肠(检出聚碳酸酯, 聚酰胺, 聚丙烯等塑料颗粒, 平均浓度 $(28.1\pm 15.4)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $0.8\text{—}1.6\text{ mm}$)^[58]、痰液(检出聚氨酯、聚酯纤维颗粒等, 平均浓度 $(120.14\pm 173.4)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $20\text{—}500\text{ }\mu\text{m}$)^[59]、肺(检出聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、合成树脂等, 浓度为 $(1.42\pm 1.50)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 颗粒长 $(223.10\pm 436.16)\text{ }\mu\text{m}$, 宽 $(22.21\pm 20.32)\text{ }\mu\text{m}$)^[60]、下肢关节^[41]、胎盘^[61]、血液(检测到聚乙烯、乙烯-醋酸乙烯共聚物等塑料颗粒, 浓度 $(2466\pm 4174)\text{ particles}\cdot\text{L}^{-1}$, 颗粒长 $(127.99\pm 293.26)\text{ }\mu\text{m}$, 宽 $(57.88\pm 88.89)\text{ }\mu\text{m}$)^[45,62]、结直肠癌^[44]、脑、肝脏和肾脏等生物样本^[18]。

1.2.3 显微拉曼光谱

拉曼光谱(Raman Spectroscopy, Raman)是一种基于光与物质相互作用的分析技术。一束光照射样品时, 光子与样品分子发生碰撞, 大部分光子会发生弹性散射。然而, 小部分光子会与分子的振动或转动模式发生能量交换, 导致散射光的频率发生变化, 这种现象称为拉曼散射。拉曼光谱通过测量这些频率变化, 提供了分子振动和转动的独特指纹信息, 从而能够识别样品中的化学物质^[63]。与红外光谱相比, 拉曼光谱对具有对称构象和重复单位的分子更敏感, 因此能够鉴别微塑料和添加剂的化学成分^[64]。

拉曼光谱在微塑料检测中的优点显著。拉曼光谱对分子振动模式敏感, 能提供微塑料的特征分子指纹, 有效区分不同类型的聚合物; 水的拉曼散射信号较弱, 使得拉曼光谱在水相样品中检测微塑料时具有优势, 可直接分析水样中微塑料, 避免复杂水相分离步骤^[65]。此外, 拉曼光谱不仅能够鉴定微塑料的种类, 还能提供有关其化学结构和组成的信息, 适用于对水、土壤等^[66]复杂环境样品的高效检测^[49]。

然而, 拉曼光谱对生物样本中微塑料的检测也存在一些挑战: 需要对生物样品进行适当的前处理, 如消解、过滤或离心等, 以去除杂质和浓缩微塑料颗粒。此外, 拉曼散射效率低, 信号弱, 对于低丰度或低浓度的微塑料检测灵敏度不足, 需要进一步优化技术。同时, 衍射极限 $(0.3\text{—}0.5\text{ }\mu\text{m})$ 阻碍了拉曼光谱在亚微米和纳米级塑料碎片表征中的应用, 难以精确检测和定位纳米尺度的塑料颗粒, 在处理复杂样品时, 可能会出现光谱重叠和干扰的问题。

目前已有研究报道使用拉曼光谱在贻贝 *Mytilus edulis* (塑料颗粒浓度为 $(0.36\pm 0.07)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$)和生蚝 *Crassostrea gigas* (塑料颗粒浓度为 $(0.47\pm 0.16)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$)^[67]等水生生物样本, 人体胎盘(共检测到308个塑料颗粒, 主要为聚苯乙烯与聚乙烯颗粒, 粒径 $<10\text{ }\mu\text{m}$)^[68]、子宫(检测到聚乙烯、聚丙烯塑料颗粒, 平均浓度 $(1.5\pm 1.17)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $2.79\text{—}22.79\text{ }\mu\text{m}$)^[69]、母乳(检测到聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯, 平均浓度 $(0.5\pm 0.63)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $2\text{—}12\text{ }\mu\text{m}$)^[70]、精液(检测到聚苯乙烯、聚乙烯、聚氯乙烯等塑料颗粒, 平均每个样本中检出两个颗粒, 粒径范围为 $0.72\text{—}7.02\text{ }\mu\text{m}$)^[71]等人体生殖系统相关样本以及胃(检测到聚乙烯、聚丙烯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚酰胺、聚对苯二甲酸乙二醇酯, 聚苯乙烯等塑料颗粒, 平均浓度 $(9.4\pm 10.4)\text{ particles}\cdot 50\text{ mL}^{-1}$, 纤维粒径为 $(1196.6\pm 907.1)\text{ }\mu\text{m}$, 层状颗粒粒径为 $(635.6\pm 310.8)\text{ }\mu\text{m}$, 碎片粒径为 $(330.4\pm 261.4)\text{ }\mu\text{m}$)^[72]、血栓(检测到87个塑料颗粒, 主要为聚乙烯, 粒径范围 $2.1\text{—}26.0\text{ }\mu\text{m}$)^[73]、下肢关节(检出聚对苯二甲酸乙二醇酯, 聚乙烯, 人造纤维, 聚酯纤维, 聚丙烯, 聚酰胺, 聚氯乙烯, 聚苯乙烯, 聚碳酸酯, 浓度 $(5.24\pm 2.05)\text{ particles}\cdot\text{g}^{-1}$, 粒径范围 $(50.01\pm 22.07)\text{ }\mu\text{m}$)^[41]、尿液和肾脏(总计检测出66个颗粒, 主要为聚乙烯和聚苯乙烯颗粒, 粒径范围 $1\text{—}29\text{ }\mu\text{m}$)^[74]以及血液^[45]等样品中检出微塑料。

1.2.4 激光红外直接成像

传统光谱学分析大多依赖于视觉识别, 降低了检测效率, 检测结果存在一定的主观性。激光红外直

接成像(Laser Direct Infrared, LDIR)高度自动化,采用固定波数扫描样本并标记潜在的塑料颗粒,随后精准扫描各标记颗粒并将得到的红外光谱与聚合物标准谱图数据库比对,经由计算得出目标颗粒的匹配度,从而在更短的时间内自动分析更多的颗粒,大大提高了分析通量,适合样品量大的监测项目^[75]。

量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)是 LDIR 系统的核心光源,它是一种可调谐的中红外量子级联激光器,由多个不同半导体材料的薄层有序组成,通过调整这些薄层的厚度(约几纳米)产生量子阱。在电场作用下,电子在不同量子阱之间隧穿,每次隧穿都会发射一个光子,形成高能量、高聚焦性和高相干性的激光束。QCL 产生的激光束用于照射样品,样品中的微塑料颗粒会与激光相互作用。一部分光会被样品反射,另一部分会被吸收并转化为热能,引起样品表面温度的微小变化。系统配备低温制冷的碲镉汞探测器,对红外光具有高灵敏度。当反射光到达探测器时,会产生与入射光强度成比例的电信号。通过分析这些电信号,可以得到样品的反射光谱,并将其转换为吸收光谱,用于识别和定量分析微塑料。QCL 的运行机制使其能够快速检测到微塑料颗粒的反射光信号,提供高灵敏度的检测^[76]。

以 Agilent 8700 LDIR 为例,搭载了量子级联激光器,光源强度高,光谱采集速度快,自动化程度高。其前处理方法包括窗片测试法和滤膜测试法:窗片测试法适用于测试微塑料颗粒较多的样品,颗粒分散度好,最大程度地降低了分析误差,并且成本低;滤膜测试法适用于测试微塑料颗粒较少的样品,无需样品转移,减少了污染的可能性。分析过程中,首先使用固定波数的激光扫描样品,并对颗粒进行编码,通过软件对颗粒进行识别,其准确度显著高于肉眼识别,极大地减少了人工工作量;随后以自动模式在 8 s 内采集颗粒物的全谱信息,并与 Agilent 搭建的数据库进行对比,一般将匹配度大于 65% 的颗粒视为匹配成功,从而对不同颗粒进行分类;最后统计样品中的颗粒种类和粒径分布,按照种类赋予塑料颗粒不同的颜色,并呈现在最终的谱图中。通过自动进行颗粒识别、光谱采集和数据分析,可显著减少人为因素干扰,提高分析结果的准确性和重复性。

目前,由于 QCL 和相关光学组件的制造成本较高,使得 LDIR 仪器的价格相对昂贵,在一定程度上限制了其广泛应用,特别是在一些资源有限的实验室或监测机构。Agilent 8700 LDIR 的自动模式仅能分辨 10—500 μm 的微塑料颗粒,其缺点在于忽视了粒径更小、悬浮更久,更容易进入生物体的塑料颗粒,尤其是纳米级别的纳塑料。这一现象一方面可归因于目前的激光光源无法达到更高的分辨率,另一方面可能由于研究人员在实验设计时忽视了更低粒径的纳塑料^[18]。仪器官方建议前处理方案选择使用 20 μm 的滤膜对样品进行过滤,并检测滤膜上的微塑料颗粒,这同样会导致更小粒径微塑料的损失。

LDIR 是目前检测微塑料的新方法,同时也是近年常用的生物与人体样本中微塑料检测手段,已应用于鸟肺^[77]、心脏(分别在心包、心包脂肪组织、心肌、左心耳、心外膜脂肪组织检测到聚甲基丙烯酸甲酯、聚氯乙烯、聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚苯乙烯、聚碳酸酯、聚酰胺、聚氨酯、聚丙烯等塑料颗粒,浓度分别为 $(15721\pm29896)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(2424\pm4239)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(23.3\pm26.2)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(2307\pm1965)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(1638\pm3289)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径<469 μm)^[31]、人脑^[18]、脑脊液^[43]、阴茎(检测到聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚苯乙烯、聚丙烯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚氯乙烯、聚氨酯、聚四氟乙烯等塑料颗粒,共计 46 个,粒径范围在 20—500 μm)^[42]和肺^[40]、骨髓^[78]、睾丸和精液^[79]和结直肠癌(检测到聚碳酸酯、聚酰胺、聚丙烯等塑料颗粒,平均浓度 $(28.1\pm15.4)\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径范围为 0.8—1.6 mm)^[44]等生物样本的微塑料检测^[33,59,79-90]。

1.2.5 热裂解气相色谱质谱联用

上述光谱学方法可以有效实现微塑料颗粒的定性检测,包括粒径大小、元素组成、化学键信息等,从而推测微塑料颗粒的种类。然而,对微塑料的定量分析却受限于微塑料颗粒数量浓度,无法给出更加准确的信息,如增塑剂等添加剂的种类、塑料颗粒的质量浓度等。热裂解气相色谱质谱联用技术(Pyrolysis-gas chromatography mass spectrometry, Py-GCMS)在精确定量塑料颗粒质量浓度的同时可以测定增塑剂等添加剂的种类和浓度,是目前分析微塑料颗粒的重要手段。它主要包含了三个阶段:热裂解,气相色谱分离和质谱检测。热裂解是指对塑料施加高温使聚合物发生裂解,生成可挥发的小分子化合物。热解产生的小分子碎片被载气带入气相色谱系统,在色谱柱内,各组分在固定相和流动相之间进行反复分配,利用不同组分分配系数的差异实现分离^[91]。分离后的组分依次进入质谱仪,被电离、加速、聚焦后形成离子束,在电场和磁场作用下,离子按质荷比分离,在检测器产生信号,形成质谱图。通

过质谱图可确定组分的分子量、结构等信息,实现定性和定量分析.

Py-GCMS 作为一种新兴方法广泛用于生物样本中微塑料的检测,包括斑马螺 *Zebra snail*、黄鳝 *M. anguillicaudatus* 和石龙子 *P. gladiator*(检测到聚苯乙烯颗粒,浓度范围 0.093—0.785 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)^[92]、鸟肺(检出氯化聚乙烯、丁苯橡胶、聚丙烯、聚氯乙烯、聚酰胺等塑料颗粒,平均浓度 416.22 $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径范围为 20—50 μm)^[77]、人玻璃体液(检测到聚酰胺,聚氯乙烯、聚苯乙烯等塑料颗粒,共计 8543 个,粒径< 50 μm)^[33]、睾丸和精液(均检出聚氯乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯等塑料颗粒,粒径范围在 20—100 μm ,精液样本中塑料颗粒平均浓度 (0.23±0.45) $\text{particles}\cdot\text{mL}^{-1}$,睾丸样本中塑料颗粒平均浓度 (11.60±15.52) $\text{particles}\cdot\text{mL}^{-1}$)^[79]、血液(检测到聚对苯二甲酸乙二醇酯,聚乙烯,聚苯乙烯,聚甲基丙烯酸甲酯等塑料颗粒,平均浓度 (0.97±1.57) $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,粒径≥ 700 nm)^[32]、骨髓(检测到聚乙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚酰胺等塑料颗粒,平均浓度 (51.29±19.90) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径<100 μm)^[78]、动脉粥样硬化斑块(检测到聚乙烯、聚氯乙烯等,其中聚乙烯塑料颗粒平均浓度 (21.7±24.5) $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$,粒径<1 μm)^[17]、人脑、肝脏和肾脏(检测到聚乙烯、聚氨酯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚苯乙烯、聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚酰胺、聚氯乙烯、聚丙烯等塑料颗粒,2024 年人脑样本中塑料颗粒浓度为 (4763±1160) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,2016 年人脑样本中塑料颗粒浓度为 (3420±2279) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,2024 年肝脏中塑料颗粒浓度为 (666±540) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,2016 年肝脏中塑料颗粒浓度为 (538±412) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,2024 年肾脏中塑料颗粒浓度为 (465±346) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,2016 年肾脏中塑料颗粒浓度为 (142±104) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 上述颗粒粒径< 1 μm)^[18]和脑脊液(检测到聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯等塑料颗粒,浓度为 (3.51±2.02) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径< 100 μm)^[43]、胎盘(检出聚乙烯、聚氯乙烯、聚酰胺等塑料颗粒,平均浓度 (126.8±147.5) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,粒径>1 μm)^[61].

同时,该方法存在一定的局限性,包括样品需求量大、检出限存在差异、假阳性问题等.该方法上样量一般为毫克级别^[36],而生物样本中塑料颗粒的浓度较低,这意味着需要对样品中的塑料颗粒进行一定程度的富集才能达到样品量的需求.此外,不同类型塑料颗粒的检测需要调整热解温度、气相色谱柱升温程序等条件,而条件的变化也意味着方法检出限存在差异^[93].对于生物样本中微塑料的检测,尤其是人体样本中微塑料的检测,Py-GCMS 的检测结果显示聚乙烯的出现频率和含量远超其他几种微塑料,这可能是脂肪酸导致的假阳性问题^[34],脂肪酸在热裂解的条件下可以分解成与聚乙烯相同的化合物,产生类似的信号峰.

表 1 中整理了已报道的塑料颗粒的检测方法、涉及到的生物样本以及对应的参考文献.

表 1 生物样本中塑料颗粒的检测
Table 1 Detection of plastic particles in biological samples

检测方法 Detection methods	样本 Sample	聚合物种类 Polymer type	浓度 Concentration	颗粒尺寸 Particle Size	参考文献 Reference
SEM-EDS	海蛞蝓 <i>Bursatella leachii</i>	NA	NA	<500 μm	[38]
	贻贝 <i>Mytilus edulis</i>	PET, PE	2.2 $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$	<1000 μm	[39]
SEM-EDS+FTIR	肺部	PP, PET, Resin	(1.42±1.50) $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$	长(223.10±436.16) μm 宽(22.21± 0.32) μm	[60]
	弹尾虫 <i>Cryptopygus antarcticus</i>	PS	NA	<100 μm	[53]
FTIR	阿拉斯加鳕鱼 <i>Gadus chalcogrammus</i>	Rayon, PE, PET	(0.06±0.05) $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$	100—500 μm	[54]
	浒苔 <i>U. prolifera</i>	PE, PS, PP, PAS, PET, PP, PVC, PEU	(661±331.56) $\text{particles}\cdot\text{patch}^{-1}$	13.5—1000 μm	[55]
	鱼类	Rayon, PA	(1.90±0.10) $\text{particles per fish}$	0.13—14.3 mm	[56]
		PE, PP, Rayon, PS, PA	(0.27±0.63) $\text{particles per fish}$	(2.11±1.67) mm	[57]
	血液	PP, ETPM, EVA, PA	(2466±4174) $\text{particles}\cdot\text{L}^{-1}$	长(127.99 ± 293.26) μm 宽(57.88 ± 88.89) μm	[62]
	痰液	PU, PES	(120.14±173.4) $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$	20—500 μm	[59]
SEM-EDS+ FTIR+Raman	人体下肢关节	PET, PE, rayon, PES, PP, PA, PVC, PS, PC	(5.24±2.05) $\text{particles}\cdot\text{g}^{-1}$	(50.01 ± 22.07) μm	[41]
	血液	PS, PP	4.2 $\text{particles}\cdot\text{mL}^{-1}$	< 100 μm	[45]

续表 1

检测方法 Detection methods	样本 Sample	聚合物种类 Polymer type	浓度 Concentration	颗粒尺寸 Particle Size	参考文献 Reference
Raman	生蚝 <i>Crassostrea gigas</i>	NA	(0.47±0.16)particles·g ⁻¹	5—25 μm	[67]
	贻贝 <i>Mytilus edulis</i>		(0.36±0.07)particles·g ⁻¹		
	胎盘	PE, PS	308 particles in total	< 10 μm	[68]
	子宫肌瘤与子宫肌层	PE, PP	(1.5±1.17)particles·g ⁻¹	2.79—22.79 μm	[69]
	母乳	PE, PVC, PP	(0.5±0.63)particles·g ⁻¹	2—12 μm	[70]
	胃	PE, PP, PMMA, PA, PET, PS	(9.4±10.4)particles·50 mL ⁻¹	纤维 (1196.6 ± 907.1) μm 层状 (635.6 ± 310.8) μm 碎片 (330.4 ± 261.4) μm	[72]
	血栓	PE	87 particles	2.1—26.0 μm	[73]
Raman	精液	PS, PE, PVC	2 particles per sample	0.72—7.02 μm	[71]
	肾脏,尿液	PE, PS	66 in total	1—29 μm	[74]
SEM-EDS+LDIR	心包	PMMA, PVC, PE, PET, PA, PC, PS, PP, PU	(15721±29896)particles·g ⁻¹	< 469 μm	[31]
	心包脂肪组织		(2424±4239)particles·g ⁻¹		
	心肌		(23.3±26.2)particles·g ⁻¹		
	左心耳		(2307±1965)particles·g ⁻¹		
	心外膜脂肪组织		(1638±3289)particles·g ⁻¹		
SEM-EDS+FTIR+LDIR	阴茎	PET, PP	46 in total	20—500 μm	[42]
	结直肠癌	PC, PA, PP	(28.1±15.4)particles·g ⁻¹	0.8—1.6 mm	[58]
LDIR+Py-GCMS	鸟肺	CPE, BR, PP, PVC, PA	416.22 particles·g ⁻¹	20—50 μm	[77]
	人玻璃体液	PA, PVC, PS	8543 particles in total	< 50 μm	[33]
	精液	PVC, PE, PS	(0.23±0.45) particles·mL ⁻¹	20—100 μm	[79]
	睾丸		(11.60±15.52) particles·mL ⁻¹		
	骨髓	PE, PS, PVC, PA	(51.29±19.90)μg·g ⁻¹	< 100 μm	[78]
Py-GCMS	血液	PET, PE, PS, PMMA	(0.97±1.57)μg·mL ⁻¹	≥ 700 nm	[32]
	斑马螺 <i>Zebra snail</i>	PS, PMMA	0.093—0.785 μg·g ⁻¹	NA	[92]
	黄鳝 <i>M. anguillicaudatus</i>				
	石龙子 <i>P. gladiator</i>				
SEM-EDS+Py-GCMS	颈动脉斑块	PE, PVC	(21.7±24.5)μg·mg ⁻¹	< 1 μm	[17]
SEM-EDS+FTIR+Py-GCMS	大脑(2024)	PE, PU, PMMA, PS, PC, PET, PA, PVC, PP	(4763±1160)μg·g ⁻¹	< 1 μm	[18]
	大脑(2016)		(3420±2279)μg·g ⁻¹		
	肝脏(2024)		(666±540)μg·g ⁻¹		
	肝脏(2016)		(538±412)μg·g ⁻¹		
	肾脏(2024)		(465±346)μg·g ⁻¹		
	肾脏(2016)		(142±104)μg·g ⁻¹		
SEM-EDS+LDIR+Py-GCMS	脑脊液	PP, PE, PS, PVC	(3.51±2.02)μg·g ⁻¹	< 100 μm	[43]
FTIR+Py-GCMS	胎盘	PE, PVC, PA	(126.8±147.5)μg·g ⁻¹	>1 μm	[61]

注: NA表示原文未注明, not available; PET, 聚对苯二甲酸乙二醇酯, Polyethylene terephthalate; PE, 聚乙烯, Polyethylene; PP, 聚丙烯, Polypropylene; Resin, 树脂; PS, 聚苯乙烯, Polystyrene; Rayon, 人造丝; PAS, 聚芳砜, Polyarylsulfone; PEU, 聚醚聚氨酯, Polyether urethane; PA, 聚酰胺, Polyamide; ETPM, 三元乙丙橡胶, Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM); EVA, 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物, Ethylene-Vinyl Acetate; PU, 聚氨酯, Polyurethane; PES, 聚醚砜, Polyethersulfone; PVC, 聚氯乙烯, Polyvinyl Chloride; PC, 聚碳酸酯, Polycarbonate; PMMA, 聚甲基丙烯酸甲酯, Polymethyl Methacrylate; CPE, 氯化聚乙烯, Chlorinated Polyethylene; BR, 顺丁橡胶, Butadiene Rubber.

2 生物样本中塑料颗粒的分析方法演变(Evolution of analytical methods for plastic particles in biological samples)

2.1 仪器方法创新

随着生物样本中微塑料的相关研究逐年增加, 其分析方法也在随之更迭. 最开始单纯依靠 SEM-EDS 只能指出疑似微塑料的碳基颗粒^[34,38]; 随后结合 FTIR 等光谱学手段, 在识别塑料颗粒的同时可以提供详细的化学信息, 却受限于视觉识别无法提高分析效率和准确性^[49]; 近年来新兴的 LDIR 可以自动识别并检测塑料颗粒, 却在分辨率上难以提高, 主要识别 10 μm 及以上的微塑料^[18]. 因此, 在光谱学识别方面仍需方法创新, 近年来已有原子力显微镜-红外光谱、表面增强拉曼光谱以及高光谱等新技术手段被引入塑料颗粒的环境检测中. 上述新技术手段仍依赖于视觉识别和人工分辨, 视野窄, 通量低, 未能有效提升样品分析效率, 在结合人工智能实现自动识别、分辨后, 可用于复杂生物样品的高通量检测(图 2).

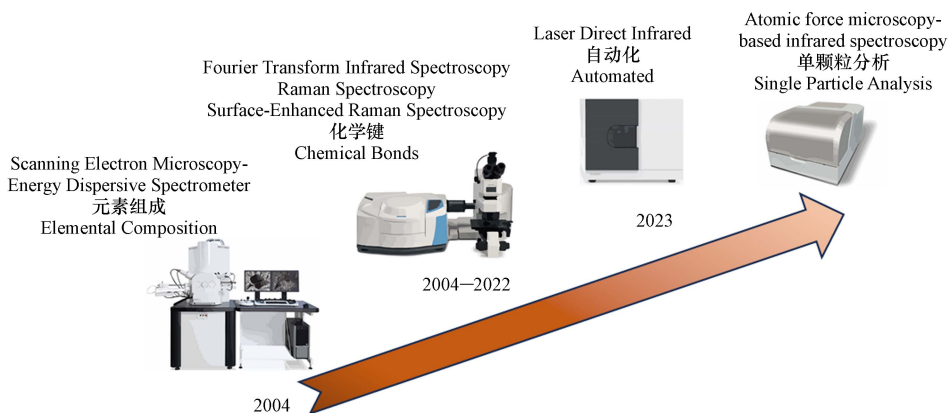


图 2 显微成像及光谱识别塑料颗粒技术演变

Fig.2 Evolutional of microscopic imaging and spectral detection techniques for plastic particles

其中原子力显微镜-红外光谱(Atomic Force Microscopy-based Infrared Spectroscopy, AFM-IR)技术结合了原子力显微镜的空间分辨率和红外光谱的化学分析能力, 克服了传统红外光谱的光学衍射极限和 AFM 无法进行化学成分分析的限制^[94]. 其工作原理是利用 AFM 探针检测样品吸收红外辐射后的热膨胀, 从而实现纳米尺度的化学分析和成像. 当样品吸收红外光时, 温度升高导致热膨胀, 对 AFM 探针产生瞬态力, 使探针振荡. 通过测量悬臂振荡幅度与波长的关系, 可以获得样品的红外吸收光谱, 同时通过接触共振测量样品的机械性. AFM-IR 技术以其纳米级的空间分辨率和强大的化学分析能力, 在材料科学和生命科学等领域展现出巨大的应用潜力, 为研究人员提供了一种全新的工具来检测样品中的塑料颗粒^[95]. AFM-IR 受限于其扫描速度慢、视野狭窄、操作复杂、对样品平整度要求高等缺陷, 导致分析通量极低, 难以应用于大规模环境筛查. 为了降低检测难度、提高通量, AFM-IR 需要与其他技术联用, 同时结合机器学习或人工智能技术来进一步提高分析效率与准确度.

表面增强拉曼光谱(Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, SERS)是拉曼光谱的一种变体, 它利用金属纳米结构的表面等离子体共振效应来增强拉曼信号, 这种增强效应使得 SERS 能够检测到更小尺寸的微塑料, 甚至纳米塑料^[96], 是一种极其敏感的检测方法, 广泛应用于化学、生物学、食品和医学领域的小分子检测^[63,97]. SERS 技术在微塑料检测中的应用相对拉曼光谱较晚, 自 2020 年起陆续开始用于环境纳米塑料的检测^[65,98–100], 可以检测到低浓度或低丰度的微塑料, 甚至可实现单个微塑料颗粒的检测^[66]. SERS 继承了传统拉曼光谱的非破坏性分析和化学特异性, 同时克服了其灵敏度不足的问题, 提高了微塑料的检测和识别能力^[101]. 但是, 其信号增强效果严重依赖基底, 重现性和定量准确性是挑战, 同时复杂生物基质可能引起干扰, 未来需开发稳定、均一、可重复制备的 SERS 基底, 并建立稳健的定量模型以推动其实际应用.

与之前的光谱学分析手段不同, 高光谱成像技术可以提供塑料颗粒的三维光谱信息, 主要依赖于光与物质相互作用的基本原理, 通过分析不同波长的光在样品表面的反射、吸收和散射情况, 获取样

品的光谱信息^[102]。具体来说,高光谱成像系统能够记录样品在宽波长范围内的连续光谱数据,形成包含样品每个像素点光谱信息的三维数据立方体,从而实现对样品成分的定性和定量分析。例如,高光谱成像技术可以通过捕捉微塑料在特定波长下的特征光谱实现对其准确识别和分类。这种技术能够提供丰富的分子振动和转动信息,目前已用于土壤样本中塑料颗粒的检测^[103]。高光谱数据量大且信息丰富,但是对处理能力要求高,人工处理数据难度大,未来发展依赖于人工智能等算法用于数据分析^[104]。

以上光谱学方法可以有效实现微塑料颗粒的定性检测,包括粒径大小、元素组成、化学键信息等,从而推测微塑料颗粒的种类,对微塑料的定量分析受限于微塑料颗粒的数量浓度,无法给出质量浓度。而质谱检测如 Py-GCMS 可以很好地分析塑料颗粒的质量浓度,并准确得到微塑料颗粒的种类,可以与光谱学方法检测塑料颗粒数量浓度的结果互补。已有研究指出,光谱识别结合质谱定量的“双中心证据”可以更有效和准确地证明塑料颗粒的存在^[33],今后光谱识别与质谱检测相结合的分析模式有望成为塑料颗粒分析的标准方法。

质谱检测方法也在不断进步,包括火焰离子化质谱^[105]、基质辅助激光解吸飞行时间质谱^[106,107]、单颗粒电感耦合等离子体质谱^[108]等。以火焰离子化质谱(Flame Ionization Mass Spectrometry, FI-MS)为例,该研究开发了一种快速、灵敏检测方法,用于检测微塑料和纳米塑料。其工作原理是将干燥的样品(如粉末、土壤和组织)直接置于火焰中燃烧或加热,利用火焰的高温使塑料分解并离子化。通过火焰热解,各种塑料能够被分解成特征的挥发性有机化合物或半挥发性有机化合物,随后这些化合物被引入质谱仪进行分析^[105]。这种方法在检测微塑料方面展现出了显著的优势,尤其是在人体样本的检测中。首先,FI-MS 的一个突出优点是其快速分析能力。与传统的微塑料检测方法相比,FI-MS 能够在 10 s 内完成样品的分析,可用于实际样本的快速检测。其次,FI-MS 适用于复杂样品基质,能够直接分析小鼠胎盘样品,无需复杂的样品前处理步骤,如组织消化和塑料颗粒的提取。这对于研究微塑料对人体健康的影响具有重要意义,因为其可以避免样品处理过程中的损失和污染,提高检测的准确性和可靠性。其作为新兴技术,谱图解析、聚合物识别规则、定量准确性等仍需大量研究进行验证和标准化;未来需系统建立各类塑料的热裂解指纹数据库,并明确其不同基质中的检出限和定量限。

2.2 研究范式转变

塑料颗粒的分析方法的分辨率和化学信息获取效率正在逐渐提高。但是,现阶段的分析方法仍然无法满足人体健康或毒理学研究的需求。塑料颗粒,虽然已经有诸多毒理学相关的研究来证明它的毒性^[109],但由于没有市售的环境塑料颗粒标准品,研究人员大多采用聚苯乙烯小球替代环境中的塑料颗粒^[99,106,110,111],往往忽略了塑料颗粒的多样性和复杂性。

首先,环境中的塑料颗粒多种多样,塑料颗粒来自多种产品类型,包括轮胎、纺织品和包装材料等^[112],其形貌、粒径、疏水性、聚合物种类等物理化学性质各不相同,而这些特征也会影响塑料颗粒的毒性,市售的聚苯乙烯可一定程度上代表具有类似性质的聚乙烯、聚丙烯等,却无法代表所有种类的塑料颗粒;其次,塑料颗粒可以作为载体吸附多种污染物,据报道,塑料颗粒中的单体和寡聚体等起始物质只有 1975 种,而其负载的添加剂多达 5776 种,还有 3498 种加工助剂和 1788 种非有意添加物质^[113]。此外,在光照、高温和活性氧作用下老化之后塑料颗粒可能释放添加剂如增塑剂、阻燃剂和抗氧化剂及其氧化物等有毒物质^[114,115]。塑料颗粒也可以承载微生物如病毒、细菌等^[116,117],已有研究表明随着塑料颗粒多样性增加,土壤中的抗性基因总丰度显著增加^[118],而微塑料作为潜在载体可以延长病毒的存活时间^[119]。

因此,综合考虑塑料颗粒和它所承载的污染物才能更好地探究塑料颗粒的毒性、健康风险以及污染治理问题^[120],这一视角的转变也推动着分析方法的创新。现阶段对生物样本中塑料颗粒的检测主要集中于对塑料种类、浓度及其形貌特征的探究,仅仅探究了塑料颗粒这一载体,而下一阶段的研究将更加深入地探究塑料颗粒携带的添加剂、病毒、细菌等^[121],从而了解塑料颗粒的迁移带来的健康风险,同时探讨随塑料颗粒进入人体的污染物对健康的影响。为了应对上述研究范式的转变,需要集成显微、光谱、质谱、生物检测技术,实现塑料颗粒及其携带物的多维分析。首先,使用光谱、显微技术快速扫描并锁定颗粒坐标;利用激光显微切割技术精准捕获目标颗粒及其周边的微环境;随后对捕获物进行全组分质谱扫描,进行添加剂的靶向分析与非靶分析;同时使用分子生物学技术如液滴数字聚合酶

链式反应定量其所携带的抗性基因/病毒片段^[122,123], 最终, 将上述化学与生物信息与宿主组织的单细胞转录组、代谢组或蛋白组数据进行空间共定位与关联分析, 从而构建“颗粒-化学-生物”三维数据矩阵, 系统性评估其复合健康风险。

2.3 结合人工智能

传统方法在处理塑料颗粒的光谱数据时, 主要依赖人工识别特征峰或简单的光谱匹配。然而, 塑料颗粒的光谱数据通常具有多维度特征, 包含大量的波数与强度信息, 特征峰的识别需要专业知识, 且人工处理效率低下。例如, 在分析微塑料和纳米塑料时, 需要同时考虑多种特征峰的位置、形状和强度, 以及不同塑料类型之间的细微差异。机器学习和人工智能能够自动提取和识别这些复杂的光谱特征, 例如黑色塑料在近红外区域反射信号极低, 传统方法识别困难, 而使用卷积神经网络对黑色塑料的近红外光谱进行分类, 准确率可以达到 0.98^[124]; 卷积神经网络同样可以用于高光谱检测土壤中的塑料颗粒, 准确率达到 92.6%^[125]; 使用 K 近邻算法处理海水样品的傅里叶变换红外光谱数据, 可达到 90% 的分类准确率^[126]。

显微及光谱分析方法对信号质量要求较高, 而塑料颗粒(尤其是纳米塑料)的光谱信号通常较弱, 容易受到背景噪声和干扰峰的影响。以纳米塑料的拉曼光谱为例, 由于信号强度低, 在复杂环境样本中, 其特征峰可能被背景噪声掩盖或与其它物质的光谱特征重叠。机器学习和人工智能通过算法优化能够有效处理低质量光谱信号^[127]。例如, 通过主成分分析等降维技术可去除噪声成分, 保留主要特征信息; 结合随机森林算法、K 近邻算法等都可以显著提高对低质量光谱信号的识别能力, 分类准确率最高可以达到 98.8%^[128]。

检测塑料颗粒的质谱方法存在一定局限性, 包括低质谱信号难解析、谱图中峰的叠加难处理, 以及体积大、分析时间长, 无法实现原位检测等。机器学习用于质谱数据的分析中, 诸如归一化、基线矫正、峰检测等, 可以有效地提高分析效率, 同时降低后续计算分析的维度和计算负载^[107]。目前人工智能在塑料颗粒的质谱分析中应用较少, 但不可否认的是, 质谱分析方法与机器学习相结合可以提高定性和定量识别的准确性^[129]。

机器学习和人工智能技术在塑料颗粒分析中的应用可以很好地克服传统方法的低信号、信号叠加、谱图难解析的问题, 具备快速高效、准确可靠、适应性强和自动化程度高等优点, 为塑料污染的监测和治理提供了有力的技术支持^[130]。随着技术的不断发展和数据的积累, 机器学习和人工智能在塑料颗粒识别领域将发挥越来越重要的作用^[131]。引入机器学习和人工智能首先要构建数据库, 而目前生物样本中塑料颗粒的数据存在数据类型、检测方法等多维度的差异, 例如塑料颗粒的数量浓度与质量浓度不统一、分析方法缺乏统一的标准程序等。因而机器学习在分析生物样本中塑料颗粒的应用仍存在一定的局限性。

3 总结与展望(Conclusion and prospective)

生物样本中塑料颗粒的分析方法包括显微成像、光谱学方法和质谱方法, 随着仪器的创新和需求的改变, 方法也随之更迭。目前检测以显微成像及光谱学检测为主, 包括扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱、拉曼显微光谱、激光红外直接成像。其中 SEM-EDS 分辨率高, 能检测到颗粒的元素组成, 难以提供更加详细的化学信息; FTIR 和拉曼光谱可提供详细的官能团与化学键信息, 但存在信号低、目标峰易受杂质干扰等问题; LDIR 可以自动化检测样本中的微塑料颗粒, 操作简便, 其面临的挑战是分辨率低, 目前无法检测到粒径小于 5 μm 的塑料颗粒。光谱学方法可以有效实现微塑料颗粒的定性检测, 包括粒径大小、元素组成、化学键信息等, 从而推测微塑料颗粒的种类, 对微塑料的定量分析受限於微塑料颗粒的数量浓度。质谱分析方法可以很好地实现定量分析, 如 Py-GCMS 能准确得到微塑料颗粒的种类、浓度等信息, 这在一定程度上弥补了光谱学方法检测微塑料的不足, 随着 LDIR 与 Py-GCMS 的普及, 类似的光谱与质谱相结合的分析方法或将引领未来分析方法的发展趋势。

生物样本中塑料颗粒的标准分析方法亟需建立。该方法应系统涵盖样本前处理、检测技术以及质量控制等关键环节。在前处理方面, 需规范消化、分离与富集等步骤, 确保塑料颗粒的高效提取与完整性保留; 在检测技术上, 应明确鉴定与定量分析的标准流程, 并推动多种检测方法的联用与验证, 以提

高分析的准确性与可比性. 此外, 应进一步加强质量控制, 规范操作流程, 避免生物样品受到污染, 并使用过程空白进行校正. 对于低塑料含量的生物样品, 应着力降低实验室背景干扰并制定相关标准, 具体措施包括: 建立塑料颗粒分析相关的实验室规范; 减少采样、储存、前处理及检测过程中塑料制品的使用; 规范过程空白的设计与校正流程等.

在方法创新和制定标准程序的同时, 塑料颗粒的分析也要与机器学习和人工智能等手段相结合以克服当前检测技术分辨率低、数据量大、成像耗时长等瓶颈, 有效提升塑料颗粒的识别精度与通量, 提供更强有力的技术支持, 因而常规分析和机器学习的结合有望得出更有效的塑料颗粒检测策略.

如图 3 所示, 生物样本中塑料颗粒分析方法的发展已从单一技术(如 SEM-EDS、FTIR)向光谱高分辨率识别技术(AFM-IR、SERS)与质谱检测相结合、人工智能辅助分析发展, 同时研究范式从颗粒定量转向复合污染物分析. 这一整合框架为未来标准化分析流程的建立和健康风险评估提供了明确方向.

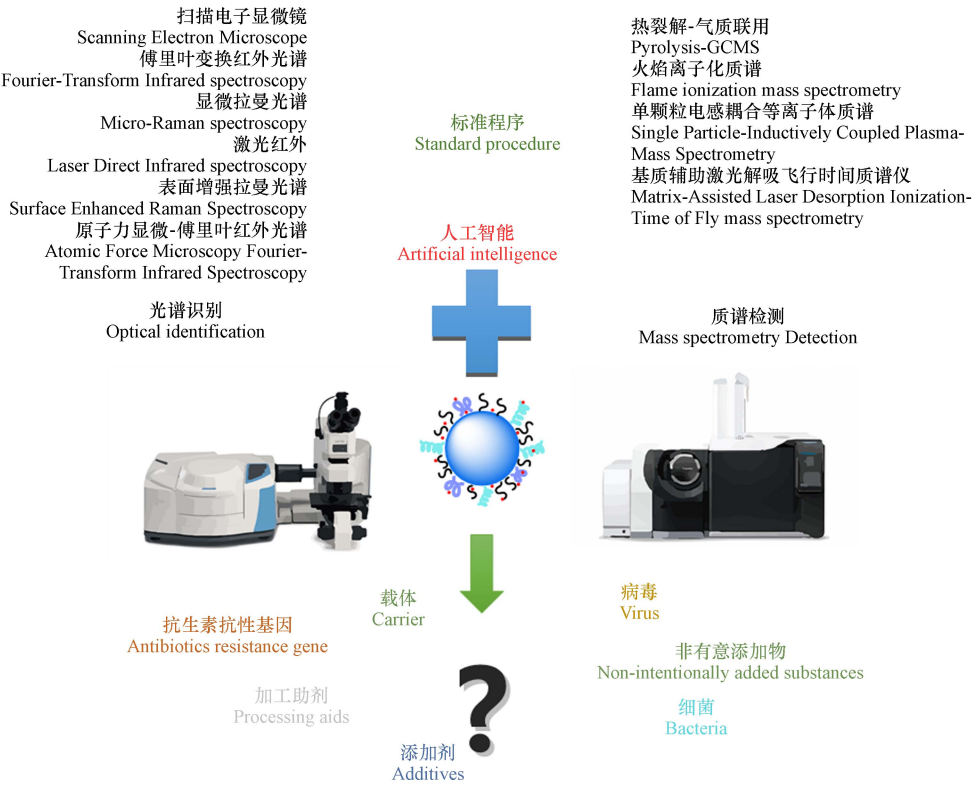


图 3 生物样本中塑料颗粒分析方法发展

Fig.3 Development of analytical methods for plastic particles in biological samples

参考文献 (References)

[1] ALFONSO M B, ARIAS A H, RONDA A C, et al. Continental microplastics: Presence, features, and environmental transport pathways[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149447.

[2] STUBBINS A, LAW K L, MUÑOZ S E, et al. Plastics in the Earth system[J]. *Science*, 2021, 373(6550): 51-55.

[3] BRAHNEY J, HALLERUD M, HEIM E, et al. Plastic rain in protected areas of the United States[J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1257-1260.

[4] VETHAAK A D, LEGLER J. Microplastics and human health[J]. *Science*, 2021, 371(6530): 672-674.

[5] GENG Y, ZHANG Z C, ZHOU W, et al. Individual exposure to microplastics through the inhalation route: Comparison of microplastics in inhaled indoor aerosol and exhaled breath air[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, 10(6): 464-470.

[6] ABBASI S, TURNER A. Human exposure to microplastics: A study in Iran[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123799.

[7] DAI Y H, HAN R, YAO Z M, et al. Intergenerational transfer of micro(nano)plastics in different organisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 488: 137404.

[8] FANG C, AWOYEMI O S, LUO Y L, et al. Investigating microplastics and nanoplastics released from a rubber band used for orthodontic treatment with improved Raman imaging algorithms[J]. *Environment & Health*, 2023, 1(1): 63-71.

- [9] COX K D, COVERNTON G A, DAVIES H L, et al. Human consumption of microplastics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 7068-7074.
- [10] ZHANG Q, XU E G, LI J N, et al. A review of microplastics in table salt, drinking water, and air: Direct human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(7): 3740-3751.
- [11] WANG F B, SONG M Y. Development of “threshold microplastics concentration” concept and framework in drinking water[J]. *Environment & Health*, 2024, 2(7): 422-423.
- [12] LI D Z, SHI Y H, YANG L M, et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation[J]. *Nature Food*, 2020, 1(11): 746-754.
- [13] LIU W J, ZHANG B W, YAO Q Q, et al. Toxicological effects of micro/nano-plastics on mouse/rat models: A systematic review and meta-analysis[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1103289.
- [14] PRÜST M, MEIJER J, WESTERINK R H S. The plastic brain: Neurotoxicity of micro- and nanoplastics[J]. *Particle and Fibre Toxicology*, 2020, 17(1): 24.
- [15] CHARTRES N, COOPER C B, BLAND G, et al. Effects of microplastic exposure on human digestive, reproductive, and respiratory health: A rapid systematic review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(52): 22843-22864.
- [16] YAN Z H, LIU Y F, ZHANG T, et al. Analysis of microplastics in human feces reveals a correlation between fecal microplastics and inflammatory bowel disease status[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(1): 414-421.
- [17] MARFELLA R, PRATTICHIZZO F, SARDU C, et al. Microplastics and nanoplastics in atheromas and cardiovascular events[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2024, 390(10): 900-910.
- [18] NIHART A J, GARCIA M A, EL HAYEK E, et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains[J]. *Nature Medicine*, 2025, 31(4): 1114-1119.
- [19] KARBALAEI S, HANACHI P, WALKER T R, et al. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(36): 36046-36063.
- [20] LI Y, TAO L, WANG Q, et al. Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects[J]. *Environment & Health*, 2023, 1(4): 249-257.
- [21] YANG X, MAN Y B, WONG M H, et al. Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 154025.
- [22] PRATA J C, Da COSTA J P, LOPES I, et al. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134455.
- [23] Microplastics are everywhere: We need to understand how they affect human health[J]. *Nature Medicine*, 2024, 30(4): 913.
- [24] SUN A Q, WANG W X. Human exposure to microplastics and its associated health risks[J]. *Environment & Health*, 2023, 1(3): 139-149.
- [25] CHEN G Y, LI X L, WANG Z B, et al. Human exposure to micro(nano)plastics: Health risks and analysis methods[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 178: 117835.
- [26] SCHWABL P, KÖPPEL S, KÖNIGSHOFER P, et al. Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series[J]. *Annals of Internal Medicine*, 2019, 171(7): 453-457.
- [27] QIN X S, CAO M J, PENG T L, et al. Features, potential invasion pathways, and reproductive health risks of microplastics detected in human uterus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(24): 10482-10493.
- [28] HURLEY R R, LUSHER A L, OLSEN M, et al. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(13): 7409-7417.
- [29] KÜHN S, van WERVEN B, van OYEN A, et al. The use of potassium hydroxide (KOH) solution as a suitable approach to isolate plastics ingested by marine organisms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1/2): 86-90.
- [30] HUANG K Y, LI J P, XIE L Y, et al. Underestimation of regenerated cellulosic microfibrils in the environment: Errors introduced by using extraction methods for microplastics[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2025, 12(6): 754-760.
- [31] YANG Y X, XIE E, DU Z Y, et al. Detection of various microplastics in patients undergoing cardiac surgery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(30): 10911-10918.
- [32] LESLIE H A, van VELZEN M J M, BRANDSMA S H, et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J]. *Environment International*, 2022, 163: 107199.
- [33] ZHONG Y Z, YANG Y H, ZHANG L N, et al. Revealing new insights: Two-center evidence of microplastics in human vitreous humor and their implications for ocular health[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171109.
- [34] XU J L, WRIGHT S, RAUERT C, et al. Are microplastics bad for your health? More rigorous science is needed[J]. *Nature*, 2025, 639(8054): 300-302.
- [35] SHRUTI V C, KUTRALAM-MUNIASAMY G. Blanks and bias in microplastic research: Implications for future quality assurance[J]. *TRAC Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2023, 38: e00203.

- [36] SINGH B, KUMAR A. Advances in microplastics detection: A comprehensive review of methodologies and their effectiveness[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 170: 117440.
- [37] ZHU L, YU Y Y, ZHU J Y, et al. Quality assurance and quality control throughout microplastic analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 163775.
- [38] FURFARO G, D'ELIA M, MARIANO S, et al. SEM/EDX analysis of stomach contents of a sea slug snacking on a polluted seafloor reveal microplastics as a component of its diet[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 10244.
- [39] LI J N, QU X Y, SU L, et al. Microplastics in mussels along the coastal waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 177-184.
- [40] WANG S G, LU W F, CAO Q D, et al. Microplastics in the lung tissues associated with blood test index[J]. *Toxics*, 2023, 11(9): 759.
- [41] LI Z, ZHENG Y F, MAIMAITI Z, et al. Identification and analysis of microplastics in human lower limb joints[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132640.
- [42] CODRINGTON J, VARNUM A A, HILDEBRANDT L, et al. Detection of microplastics in the human penis[J]. *International Journal of Impotence Research*, 2025, 37(5): 377-383.
- [43] XIE J, JI J L, SUN Y, et al. Blood-brain barrier damage accelerates the accumulation of micro- and nanoplastics in the human central nervous system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 480: 136028.
- [44] PAN W, HAO J, ZHANG M Q, et al. Identification and analysis of microplastics in peritumoral and tumor tissues of colorectal cancer[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 16130.
- [45] LEE D W, JUNG J, PARK S A, et al. Microplastic particles in human blood and their association with coagulation markers[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 30419.
- [46] IVLEVA N P. Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: Challenges, advanced methods, and perspectives[J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(19): 11886-11936.
- [47] LUSHER A L, BRÅTE I L N, MUNNO K, et al. Is it or isn't it: The importance of visual classification in microplastic characterization[J]. *Applied Spectroscopy*, 2020, 74(9): 1139-1153.
- [48] VEERASINGAM S, RANJANI M, VENKATACHALAPATHY R, et al. Contributions of Fourier transform infrared spectroscopy in microplastic pollution research: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(22): 2681-2743.
- [49] XU J L, THOMAS K V, LUO Z S, et al. FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 119: 115629.
- [50] ANDOH C N, ATTIOGBE F, BONSU ACKERSON N O, et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy: An analytical technique for microplastic identification and quantification[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 136: 105070.
- [51] MALAFAIA G, BARCELÓ D. Microplastics in human samples: Recent advances, hot-spots, and analytical challenges[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 161: 117016.
- [52] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [53] BERGAMI E, ROTA E, CARUSO T, et al. Plastics everywhere: First evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus* [J]. *Biology Letters*, 2020, 16(6): 20200093.
- [54] DING J F, JU P, RAN Q, et al. Elder fish means more microplastics? Alaska pollock microplastic story in the Bering Sea[J]. *Science Advances*, 2023, 9(27): eadf5897.
- [55] FENG Z H, ZHANG T, SHI H H, et al. Microplastics in bloom-forming macroalgae: Distribution, characteristics and impacts[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 397: 122752.
- [56] LUSHER A L, McHUGH M, THOMPSON R C. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67(1/2): 94-99.
- [57] NEVES D, SOBRAL P, FERREIRA J L, et al. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 119-126.
- [58] IBRAHIM Y S, TUAN ANUAR S, AZMI A A, et al. Detection of microplastics in human colectomy specimens[J]. *JGH Open*, 2021, 5(1): 116-121.
- [59] HUANG S M, HUANG X X, BI R, et al. Detection and analysis of microplastics in human sputum[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2476-2486.
- [60] JENNER L C, ROTCHELL J M, BENNETT R T, et al. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831: 154907.
- [61] GARCIA M A, LIU R, NIHART A, et al. Quantitation and identification of microplastics accumulation in human placental specimens using pyrolysis gas chromatography mass spectrometry[J]. *Toxicological Sciences*, 2024, 199(1): 81-88.
- [62] LEONARD S V L, LIDDLE C R, ATHERALL C A, et al. Microplastics in human blood: Polymer types, concentrations and characterisation using μ FTIR[J]. *Environment International*, 2024, 188: 108751.

- [63] JONES R R, HOOPER D C, ZHANG L W, et al. Raman techniques: Fundamentals and frontiers[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 231.
- [64] PEI W Q, HU R, LIU H, et al. Advanced Raman spectroscopy for nanoplastics analysis: Progress and perspective[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 166: 117188.
- [65] DAI H, LI H Y, QIU W, et al. Nondestructive analysis of plastic debris from micro to nano sizes: A state-of-the-art review on Raman spectroscopy-based techniques[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 176: 117750.
- [66] LI G, YANG Z R, PEI Z G, et al. Single-particle analysis of micro/nanoplastics by SEM-Raman technique[J]. *Talanta*, 2022, 249: 123701.
- [67] VAN C, JANSSEN C. Microplastics in bivalves cultured for human consumption[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 193: 65-70.
- [68] AMEREH F, AMJADI N, MOHSENI-BANDPEI A, et al. Placental plastics in young women from general population correlate with reduced foetal growth in IUGR pregnancies[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120174.
- [69] XU H W, DONG C L, YU Z L, et al. First identification of microplastics in human uterine fibroids and myometrium[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 360: 124632.
- [70] RAGUSA A, NOTARSTEFANO V, SVELATO A, et al. Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk[J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2700.
- [71] LI N, YANG H J, DONG Y L, et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 937: 173522.
- [72] ÖZSOY S, GÜNDOĞDU S, SEZİGEN S, et al. Presence of microplastics in human stomachs[J]. *Forensic Science International*, 2024, 364: 112246.
- [73] WU D, FENG Y D, WANG R, et al. Pigment microparticles and microplastics found in human thrombi based on Raman spectral evidence[J]. *Journal of Advanced Research*, 2023, 49: 141-150.
- [74] MASSARDO S, VERZOLA D, ALBERTI S, et al. MicroRaman spectroscopy detects the presence of microplastics in human urine and kidney tissue[J]. *Environment International*, 2024, 184: 108444.
- [75] ISAAC CHANDRAN P J, VEERASINGAM S. Laser Direct Infrared Spectroscopy: A cutting-edge approach to microplastic detection in environmental samples[J]. *Talanta*, 2025, 284: 127284.
- [76] LÓPEZ-ROSALES A, FERREIRO B, ANDRADE J M, et al. Reviewing the fundamentals and best practices to characterize microplastics using state-of-the-art quantum-cascade laser reflectance-absorbance spectroscopy[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 188: 118229.
- [77] WANG M Z, ZHOU P X, DuBAY S, et al. Assessing microplastic and nanoplastic contamination in bird lungs: Evidence of ecological risks and bioindicator potential[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 487: 137274.
- [78] GUO X L, WANG L, WANG X Y, et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 477: 135266.
- [79] ZHAO Q C, ZHU L, WENG J M, et al. Detection and characterization of microplastics in the human testis and *Semen*[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 877: 162713.
- [80] WU Y H, CHEN Y J, HE R K, et al. Micronanoplastic exposure due to cardiopulmonary bypass in children: A prospective observational study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 489: 137732.
- [81] SUN H X, SU X J, MAO J, et al. Microplastics in maternal blood, fetal appendages, and umbilical vein blood[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 287: 117300.
- [82] YANG Q Y, PENG Y, WU X D, et al. Microplastics in human skeletal tissues: Presence, distribution and health implications[J]. *Environment International*, 2025, 196: 109316.
- [83] LIU S J, LIU X Y, GUO J L, et al. The association between microplastics and microbiota in placentas and meconium: The first evidence in humans[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(46): 17774-17785.
- [84] LU W F, LI X L, WANG S G, et al. New evidence of microplastics in the lower respiratory tract: Inhalation through smoking[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(23): 8496-8505.
- [85] HE S L, ZHANG Y L. Detection and quantification of microplastics in endometrial polyps and their role in polyp formation[J]. *Reproductive Toxicology*, 2025, 132: 108757.
- [86] LIU S J, GUO J L, LIU X Y, et al. Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 854: 158699.
- [87] SUN J N, SUI M S, WANG T, et al. Detection and quantification of various microplastics in human endometrium based on laser direct infrared spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167760.
- [88] WANG M, LIU Q S, ZHANG X P, et al. Identification and analysis of microplastics in human penile cancer tissues[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 969: 178815.
- [89] ZHU L, KANG Y L, MA M D, et al. Tissue accumulation of microplastics and potential health risks in human[J]. *Science of the Total*

- [Environment](#), 2024, 915: 170004.
- [90] ZHU L, ZHU J Y, ZUO R, et al. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy[J]. [Science of the Total Environment](#), 2023, 856: 159060.
- [91] SANTOS L H M L M, INSA S, ARXÉ M, et al. Analysis of microplastics in the environment: Identification and quantification of trace levels of common types of plastic polymers using pyrolysis-GC/MS[J]. [MethodsX](#), 2023, 10: 102143.
- [92] ZHOU X X, HE S, GAO Y, et al. Quantitative analysis of polystyrene and poly(methyl methacrylate) nanoplastics in tissues of aquatic animals[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2021, 55(5): 3032-3040.
- [93] JUNG S, CHO S H, KIM K H, et al. Progress in quantitative analysis of microplastics in the environment: A review[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2021, 422: 130154.
- [94] LI Y, ZHANG C M, TIAN Z Y, et al. Identification and quantification of nanoplastics (20–1000 nm) in a drinking water treatment plant using AFM-IR and Pyr-GC/MS[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2024, 463: 132933.
- [95] DAZZI A, PRATER C B. AFM-IR: Technology and applications in nanoscale infrared spectroscopy and chemical imaging[J]. [Chemical Reviews](#), 2017, 117(7): 5146-5173.
- [96] XIE L F, GONG K D, LIU Y Y, et al. Strategies and challenges of identifying nanoplastics in environment by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2023, 57(1): 25-43.
- [97] SCHATZ G C, YOUNG M A, DUYNE R P. Electromagnetic mechanism of SERS[M]//Surface-Enhanced Raman Scattering - Physics and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 19-46.
- [98] XU G J, CHENG H Y, JONES R, et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy facilitates the detection of microplastics <1 μm in the environment[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2020, 54(24): 15594-15603.
- [99] HU R, ZHANG K N, WANG W, et al. Quantitative and sensitive analysis of polystyrene nanoplastics down to 50 nm by surface-enhanced Raman spectroscopy in water[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2022, 429: 128388.
- [100] LV L L, HE L, JIANG S Q, et al. In situ surface-enhanced Raman spectroscopy for detecting microplastics and nanoplastics in aquatic environments[J]. [Science of the Total Environment](#), 2020, 728: 138449.
- [101] HUANG T T, LIU Y Y, WANG L C, et al. MPs entering human circulation through infusions: A significant pathway and health concern[J]. [Environment & Health](#), 2025, 3(5): 551-559.
- [102] PAHLAWAN M F R, KIM Y, ALINE U, et al. Non-destructive identification of microplastics in soil using spectroscopy and hyperspectral imaging[J]. [TrAC Trends in Analytical Chemistry](#), 2025, 187: 118216.
- [103] ALI M A, LYU X Y, ERSAN M S, et al. Critical evaluation of hyperspectral imaging technology for detection and quantification of microplastics in soil[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2024, 476: 135041.
- [104] LI F, LIU D S, GUO X T, et al. Identification and visualization of environmental microplastics by Raman imaging based on hyperspectral unmixing coupled machine learning[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2024, 465: 133336.
- [105] XIAO M Y, YANG Y Q, ALAHMADI H, et al. Rapid detection of microplastics and nanoplastics in seconds by mass spectrometry[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2025, 493: 138322.
- [106] LIN Y, HUANG X, LIU Q, et al. Thermal fragmentation enhanced identification and quantification of polystyrene micro/nanoplastics in complex media[J]. [Talanta](#), 2020, 208: 120478.
- [107] VERBEECK N, CAPRIOLI R M, van de PLAS R. Unsupervised machine learning for exploratory data analysis in imaging mass spectrometry[J]. [Mass Spectrometry Reviews](#), 2020, 39(3): 245-291.
- [108] LI P, HE C J, LIN D H. Extraction and quantification of polystyrene nanoplastics from biological samples[J]. [Environmental Pollution](#), 2022, 314: 120267.
- [109] DENNIS J, ARULRAJ D, MISTRI T K. Unseen toxins: Exploring the human health consequences of micro and nanoplastics[J]. [Toxicology Reports](#), 2025, 14: 101955.
- [110] WANG G H, LIN Y C, SHEN H P. Exposure to polystyrene microplastics promotes the progression of cognitive impairment in Alzheimer's disease: Association with induction of microglial pyroptosis[J]. [Molecular Neurobiology](#), 2024, 61(2): 900-907.
- [111] XIONG Z Y, KONG Q L, HUA J, et al. Cardiotoxicity of polystyrene nanoplastics and associated mechanism of myocardial cell injury in mice[J]. [Ecotoxicology and Environmental Safety](#), 2025, 290: 117712.
- [112] JAMES B D, MEDVEDEV A V, MEDVEDEVA L A, et al. Burnt plastic (pyroplastic) from the M/V X-press pearl ship fire and plastic spill contain compounds that activate endocrine and metabolism-related human and fish transcription factors[J]. [Environment & Health](#), 2025, 3(1): 91-101.
- [113] MONCLÚS L, ARP H P H, GROH K J, et al. Mapping the chemical complexity of plastics[J]. [Nature](#), 2025, 643(8071): 349-355.
- [114] LI H J, BAI L H, LIANG S J, et al. The wheel of time: The environmental dance of aged micro- and nanoplastics and their biological resonance[J]. [Eco-Environment & Health](#), 2025, 4(1): 100138.
- [115] DING B J, YANG F F, HAN W J, et al. Unveiling hidden health risks: Machine learning enhanced modeling of plastic additive release kinetics in fresh produce packaging[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2025, 59(24): 12268-12278.

- [116] LI R L, AN X L, WANG Y J, et al. Viral metagenome reveals microbial hosts and the associated antibiotic resistome on microplastics[J]. *Nature Water*, 2024, 2(6): 553-565.
- [117] CHOLEWIŃSKA P, WOJNAROWSKI K, SZELIGOWSKA N, et al. Presence of microplastic particles increased abundance of pathogens and antimicrobial resistance genes in microbial communities from the Oder river water and sediment[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 16338.
- [118] WANG Y F, LIU Y J, FU Y M, et al. Microplastic diversity increases the abundance of antibiotic resistance genes in soil[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 9788.
- [119] LU J, YU Z G, NGIAM L, et al. Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity[J]. *Water Research*, 2022, 225: 119115.
- [120] ROCHMAN C M, BROOKSON C, BIKKER J, et al. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, 38(4): 703-711.
- [121] LI T, LIU R H, WANG Q, et al. A review of the influence of environmental pollutants (microplastics, pesticides, antibiotics, air pollutants, viruses, bacteria) on animal viruses[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 468: 133831.
- [122] CAVÉ L, BROTHIER E, ABROUK D, et al. Efficiency and sensitivity of the digital droplet PCR for the quantification of antibiotic resistance genes in soils and organic residues[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(24): 10597-10608.
- [123] CAO G J, TAN C, ZHANG Y Y, et al. Digital droplet polymerase chain reaction analysis of common viruses in the aqueous humour of patients with Posner-Schlossman syndrome in Chinese population[J]. *Clinical & Experimental Ophthalmology*, 2019, 47(4): 513-520.
- [124] XIA J J, HUANG Y, LI Q Q, et al. Convolutional neural network with near-infrared spectroscopy for plastic discrimination[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(5): 3547-3555.
- [125] AI W J, LIU S L, LIAO H P, et al. Application of hyperspectral imaging technology in the rapid identification of microplastics in farmland soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151030.
- [126] KEDZIERSKI M, FALCOU-PRÉFOL M, KERROS M E, et al. A machine learning algorithm for high throughput identification of FTIR spectra: Application on microplastics collected in the Mediterranean Sea[J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 242-251.
- [127] XIE L F, MA M L, GE Q Y, et al. Machine learning advancements and strategies in microplastic and nanoplastic detection[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(18): 8885-8899.
- [128] LEI B, BISSONNETTE J R, HOGAN Ú E, et al. Customizable machine-learning models for rapid microplastic identification using Raman microscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(49): 17011-17019.
- [129] LIN J Y, LIU H T, ZHANG J. Recent advances in the application of machine learning methods to improve identification of the microplastics in environment[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 136092.
- [130] SHEN Y L, LAN D Y, HE P J, et al. Nondestructive optical and spectroscopic techniques combined with machine learning for identifying solid waste: A review[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 186: 118195.
- [131] ZHANG C, XIAO L W, WANG J J, et al. Advancing microplastics detection and prediction: Integrating traditional methods with machine learning for environmental and food safety application[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 159: 104964.