

μ -FTIR与Py-GC-MS检测空气降尘微塑料的性能对比与适用性分析

汤庆峰¹, 王佳敏¹, 刘艳¹, 高峡^{1*}, 田世丽¹, 孙玲会², 史迎杰¹,
齐学奎¹, 曲晶明¹

(1. 北京市科学技术研究院分析测试研究所(北京市理化分析测试中心), 北京 100094; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100094)

摘要: 该研究系统对比了傅里叶变换显微红外光谱法(μ -FTIR)与热裂解-气相色谱-质谱联用法(Py-GC-MS)的核心性能、数据差异及适用场景。以城市工业区、生活区、山林背景区空气降尘为研究对象, 经统一前处理后, 通过粒径梯度、基质干扰、老化效应及实际样品验证实验, 多维度剖析两种方法的检测优劣。结果表明: μ -FTIR可实现微塑料无损检测, 精准获取颗粒形貌与聚合物类型, 适用于 $>50\ \mu\text{m}$ 大粒径微塑料定性分析, 但对 $<20\ \mu\text{m}$ 超微塑料的检出率仅18.6%, 抗基质干扰能力弱; Py-GC-MS不受颗粒粒径、形貌限制, 全粒径的检出率超90%, 定量精度与稳定性优异, 可有效适配复杂老化样品, 但无法获取形貌信息、难以区分结构相似聚合物。实际样品检测中, 两种方法识别的微塑料优势组分(PE、PP、PET)高度一致, 但颗粒丰度与质量浓度仅呈中等相关($R^2=0.724$), 受粒径分布与聚合物密度差异的影响无法直接换算。综上, 两种方法优势互补, 建立二者标准化联用体系, 可实现空气降尘微塑料“形貌-组分-质量”全维度表征, 为微塑料检测标准化、污染溯源及风险评价提供技术支撑。

关键词: 空气降尘; 微塑料; 傅里叶变换显微红外光谱; 热裂解-气相色谱-质谱; 方法对比; 检测标准化
中图分类号: O657.7; O657.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)07-0001-09

Comparison of Performance and Applicability Analysis of μ -FTIR and Py-GC-MS for the Detection of Microplastics in Airborne Dust

TANG Qing-feng¹, WANG Jia-min¹, LIU Yan¹, GAO Xia^{1*}, TIAN Shi-li¹, SUN Ling-hui²,
SHI Ying-jie¹, QI Xue-kui¹, QU Jing-ming¹

(1. Institute of Analysis and Testing, Beijing Academy of Science and Technology (Beijing Physical and Chemical Analysis and Testing Center), Beijing 100094, China; 2. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100094, China)

Abstract: To construct a standardized detection system for microplastics in airborne dust and clarify the applicable boundaries of mainstream detection technologies, this study systematically compared the core performance, data differences and applicable scenarios of Fourier transform infrared micro-spectroscopy (μ -FTIR) and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC-MS). Taking airborne dust from urban industrial areas, residential areas, and mountain forest background areas as research objects, the advantages and disadvantages of the two methods were analyzed through four verification tests after unified pretreatment. The results showed that μ -FTIR could realize non-destructive detection and accurately obtain microplastic morphology and polymer types, suitable for the qualitative analysis of large-size microplastics ($>50\ \mu\text{m}$), but its detection rate for ultra-fine microplastics ($<20\ \mu\text{m}$) was only 18.6% with weak anti-interference ability. Py-GC-MS was not limited by particle size and morphology, with a full-size detection rate of over 90% and excellent quantitative accuracy and stability, which was suitable for complex aged samples, but it could not obtain morphological information and distinguish structurally similar polymers. In actual sample detection, the

收稿日期: 2026-04-28; 修回日期: 2026-06-01

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFF0614203); 北京市科学技术研究院创新工程项目(26CA013-01); 创新培育项目(26CB003-15)

* 通讯作者: 高峡, 博士, 研究员, 研究方向: 材料物理与化学, E-mail: gaoxia@iccas.ac.cn

dominant microplastic components (PE, PP, PET) identified by the two methods were highly consistent, while the particle abundance and mass concentration were only moderately correlated ($R^2 = 0.724$) and could not be directly converted due to differences in particle size distribution and polymer density. In conclusion, the two methods have complementary advantages. The standardized combined application can realize the comprehensive characterization of "morphology-composition-mass" of microplastics in airborne dust, providing technical support for the standardization of microplastic detection, pollution traceability and risk assessment.

Key words: airborne dust; microplastics; μ -FTIR; Py-GC-MS; method comparison; detection standardization

大气微塑料是全球广泛关注的新型持久性有机污染物, 空气降尘作为大气微塑料的主要干沉降载体, 可通过生态循环、呼吸暴露等途径威胁区域生态安全与人体健康^[1-6]。空气降尘基质组分复杂、微塑料粒径跨度大、老化程度不均, 对检测技术的精准性与稳定性要求较高, 检测方法不统一、技术规范缺失是当前制约大气微塑料污染系统研究的核心瓶颈^[7-8]。

现阶段, 环境介质中微塑料的检测技术已逐步趋于多样化, 包括显微镜法、电镜法、红外光谱法、色谱-质谱法等^[9-16], 其中, 傅里叶变换显微红外光谱法(μ -FTIR)与热裂解-气相色谱-质谱联用法(Py-GC-MS)是应用最广泛、最成熟的两类主流核心技术。 μ -FTIR 具有无损检测、颗粒形貌可视化溯源的技术优势, Py-GC-MS 则定量精度高、复杂基质抗干扰能力突出^[9, 13-14]。但现有研究多聚焦单一方法的应用探究, 针对空气降尘复杂基质体系, 两种方法的性能差异机制、数据关联性、系统误差来源及精准适用边界仍缺乏全方位、系统性的对比论证, 导致不同研究团队检测数据可比性差、行业无统一检测标准, 严重阻碍了大气微塑料检测技术的标准化落地与行业规范化发展^[17-18]。

基于上述短板, 本研究统一样品前处理与检测实验条件, 以城市工业区、生活区、山林背景区三类典型功能区空气降尘为研究载体, 通过多维度方法学验证实验, 系统剖析两种主流检测方法的核心性能差异、数据偏差机理与适用场景, 明确方法优劣与技术边界, 构建标准化、可落地的联用检测体系, 以期为空气降尘微塑料精准检测、检测方法标准化建设及污染风险研判提供理论支撑与实验依据。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、丁苯橡胶(SBR)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氯乙烯(PVC)、聚碳酸酯(PC)6种微塑料标准品(粒径10~500 μm , 纯度>99%, 上海麦克林生化科技有限公司); 30%过氧化氢、氯化锌、乙二醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 实验用水为超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

LUMOS II 傅里叶变换显微红外光谱仪(德国 Bruker 公司); EGA/PY-3030D 多功能热裂解仪(日本 Frontier 公司); GCMS-QP2010 Ultra 气相色谱-质谱联用仪(日本 Shimadzu 公司)及配套前处理设备, 仪器均经校准合格。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集 参照《环境空气降尘的测定重量法》^[19], 在北京市布设三类典型功能区采样点: 工业区、城市生活区、偏远山林背景区。每个功能区布设3个采样点, 采用标准圆柱形集尘缸(直径15 cm, 高度30 cm)进行被动沉降采样, 采样高度距地面1.5~2.0 m, 避开高大建筑物、树木及污染源直接影响区域, 每月回收1次, 连续采集6个月, 共获得有效样品18份。针对雨、雪、雾等特殊天气, 采样前为集尘缸加装防水防尘罩, 雨雪天气结束后, 及时移除防护罩, 确保采样连续性; 若采样期间遭遇强降雨或暴雪, 导致样品被大量稀释, 该月份样品视为无效, 重新补采。样品回收后, 立即带回实验室, 去除集尘缸内的树叶、石子等粗大杂质, 置于40 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中干燥48 h, 去除样品中的水分; 将处理后的样品装入无塑密封袋中, 置于4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏柜中避光保存, 待检测。

1.2.2 样品前处理 所有样品采用统一的前处理流程: 准确称取5.000 0 g降尘样品, 置于50 mL玻璃离心管中, 加入50 mL 30%过氧化氢溶液, 置于50 $^{\circ}\text{C}$ 数控水浴锅中恒温消解10 h; 消解完成后, 将样品冷却至室温, 通过5 μm 石英纤维材质的微孔滤膜进行真空抽滤, 用超纯水冲洗滤膜3次, 去除残

留的过氧化氢与消解产物；随后在滤渣中加入 $1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 氯化锌浮选液，静置48 h；富集完成后，再次真空抽滤，收集滤膜上的颗粒物，将滤膜均匀分为两份，分别用于 μ -FTIR与Py-GC-MS检测。

整个前处理过程遵循无塑操作原则，所有实验器皿(离心管、烧杯、滤膜等)均经 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温烘烤4 h，去除器皿表面可能附着的外源微塑料；实验用水采用超纯水，试剂均选用优级纯及以上级别，规避外源微塑料污染。

1.2.3 仪器分析方法 μ -FTIR法：将滤膜置于载物台上，先通过光学显微镜观测，记录疑似微塑料颗粒的形态、颜色、粒径等信息；选取疑似微塑料颗粒进行红外光谱扫描，扫描范围为 $4\ 000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ ，分辨率为 4 cm^{-1} ，累计扫描32次，获得红外光谱图；将光谱图与OMNIC标准聚合物谱库进行比对，匹配度 $\geq 70\%$ 时判定为阳性微塑料；统计阳性微塑料的颗粒丰度($\text{items}\cdot\text{g}^{-1}$)、粒径分布及聚合物类型。

Py-GC-MS法：将滤膜置于热裂解仪样品池中， $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持2 min，以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持30 min；随后进行热裂解：裂解温度 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，瞬时裂解0.5 min，裂解接口与气相色谱进样口温度均为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；裂解产物由高纯氦气(纯度 $> 99.999\%$)作为载气带入气相色谱仪，载气流速 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ，分流比1:50。气相色谱条件：采用Ultra ALLOY+-MP色谱柱($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.50\text{ }\mu\text{m}$)，柱温程序为： $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持2 min，以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持10 min，再以 $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持30 min。质谱条件：采用EI离子源，电离能量70 eV，离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，质量扫描范围 $m/z\ 45\sim 350$ ；结合NIST数据库与聚合物专用裂解谱库进行定性分析，通过外标法计算微塑料的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.2.4 方法学验证 ①检出限与定量下限：以无塑料空白降尘样品为基底，添加6种微塑料标准品并设置浓度梯度，采用两种方法平行检测11次，分别以3倍信噪比($S/N=3$)、10倍信噪比($S/N=10$)计算检出限(LOD)与定量下限(LOQ)。②回收率与精密度：配制6种微塑料混合标准样品，设置低、中、高3个加标水平，两种方法各平行检测6次，计算平均回收率和相对标准偏差(RSD)。③粒径梯度实验：选取PE微塑料标准样品，筛分分离出 $< 20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $> 200\text{ }\mu\text{m}$ 4个粒径区间的样品，以无微塑料空白降尘为基底，分别加入各粒径区间的PE标准样品(加标量为中水平)，采用两种方法分别检测，对比两种方法在不同粒径区间的PE微塑料检出率和回收率。④基质干扰与定性准确性实验：以添加6种聚合物的空白降尘为基础样品(加标量为中水平)，分别添加腐殖质、石英粉尘、炭黑3种常见杂质(模拟实际降尘的复杂基质环境)，采用两种方法进行检测，对比两种方法对6种微塑料的定性准确率。⑤老化微塑料实验：选取PE微塑料标准样品，分为两组，一组作为未老化对照组，另一组经功率为30 W的UV 365 nm紫外线照射老化15 d，照射过程在空气氛围中进行，模拟自然环境中微塑料经光照老化的过程。以无微塑料空白降尘为基底，分别加入未老化和老化的PE标准样品(加标量为中水平)，采用两种方法进行检测，对比两种方法对未老化与老化PE微塑料的检测效果差异。⑥实际降尘样品测试：采集不同区域的实际降尘样品，去除明显杂质后，分别采用两种方法进行检测，计算每个样品中微塑料的丰度、质量浓度，对比两种方法检测得到的微塑料组成，结合前5项验证结果，综合考核两种方法的实际适用性。

1.3 数据处理

采用SPSS 26.0软件开展数据统计分析；实验数据均以“平均值 \pm 标准差”($\bar{x}\pm s$)表示，所有检测数据均经异常值检验(Grubbs检验)，剔除异常值后进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 两种方法核心性能差异及机理分析

2.1.1 检出限与定量下限对比 两种检测方法对降尘样品中6种微塑料的检出限与定量下限测试结果如表1所示，两种方法的检测灵敏度差异显著，且对不同聚合物微塑料的检测阈值呈现一致变化规律，方法优势互补、适用场景各有侧重。

从检测灵敏度来看，Py-GC-MS的检测性能显著优于 μ -FTIR。数据显示，Py-GC-MS对6种微塑料的LOD、LOQ分别为 $0.12\sim 0.35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.40\sim 1.17\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，能够实现样品中痕量微塑料的精准定量；而 μ -FTIR以颗粒数量为检测计量依据，对应的LOD、LOQ分别为 $2.3\sim 4.5\text{ items}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $7.7\sim 15.0\text{ items}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

g^{-1} , 整体检测阈值更高、灵敏度更低。二者性能差异的核心源于检测原理: $\mu\text{-FTIR}$ 依靠微塑料颗粒形貌与特征红外光谱实现定性识别, 对超细、微量颗粒的识别辨识度不足, 易受样品细微形态干扰; Py-GC-MS 基于聚合物高温热裂解后的特征产物进行定量分析, 抗基质干扰能力强, 从分子层面实现检测, 精度与灵敏度大幅提升^[9,17,20]。

表 1 两种方法的检出限与定量下限对比

Table 1 Comparison of detection limits and quantification limits of two detection methods

Polymer type	$\mu\text{-FTIR}$		Py-GC-MS	
	LOD/(items· g^{-1})	LOQ/(items· g^{-1})	LOD/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	P LOQ/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
PE	2.3	7.7	0.12	0.40
PP	2.5	8.3	0.15	0.50
PET	3.1	10.3	0.21	0.70
SBR	3.5	11.7	0.25	0.83
PVC	4.2	14.0	0.32	1.07
PC	4.5	15.0	0.35	1.17

两种方法对不同类型微塑料的检测趋势高度统一。其中, 分子结构简单的 PE、PP 聚烯烃类微塑料的 LOD、LOQ 最低, 检测灵敏度最优; 随着聚合物分子结构复杂度提升, PET、SBR、PVC、PC 的检测阈值依次升高, PC 微塑料的检测灵敏度最差。该规律与聚合物理化结构特性密切相关: PE、PP 仅含碳氢单键结构, 分子结构简单, 热裂解产物单一、红外光谱特征辨识度高, 不易产生干扰, 检测稳定性好; 而 PVC、PC 等聚合物含氯、氧等杂原子, 分子链结构复杂, 热裂解产物种类繁多, 易产生基质叠加干扰, 同时光谱特征易重叠, 最终导致检测灵敏度显著下降。

2.1.2 回收率与精密度差异机理 回收率与 RSD 是评价检测方法准确性与重复性的重要指标^[13]。两种方法对不同聚合物微塑料的加标回收率与 RSD 对比结果见表 2。实验共设置 3 个加标水平, 每个加标水平平行检测 6 次, 总检测次数为 18 次; 表中回收率为 3 种加标水平下的平均回收率。

表 2 两种方法的加标回收率与精密度对比 ($n=6$)Table 2 Comparison of spiked recoveries and precision between two methods ($n=6$)

Polymer type	$\mu\text{-FTIR}$		Py-GC-MS	
	Mean recovery/%	RSD/%	Mean recovery/%	RSD/%
PE	82.6±4.2	6.2	92.5±3.1	3.3
PP	85.3±4.5	7.1	108±4.2	3.9
PET	75.5±3.8	10	86.3±4.0	5.6
SBR	76.8±4.0	8.7	87.6±2.9	2.8
PVC	74.2±3.7	12	81.4±3.5	4.7
PC	72.3±6.0	11	82.5±4.9	3.8

由表 2 可知, $\mu\text{-FTIR}$ 的平均回收率为 (72.3±3.8)%~(85.3±4.5)%, RSD 为 6.2%~12%; Py-GC-MS 的平均回收率为 (76.3±4.0)%~(108±4.2)%, RSD 为 2.8%~5.6%, 检测稳定性与精准性更优。从机理层面分析, $\mu\text{-FTIR}$ 检测依赖人工显微观测与颗粒计数, 小粒径微塑料易漏检, 基质杂质易引发谱图误判, 人为观测误差与物理漏检是其数据偏差、精密度偏低的核心原因。而 Py-GC-MS 通过高温热裂解将微塑料聚合物转化为特征小分子产物, 依托仪器自动化完成定性定量分析, 彻底规避颗粒形貌干扰与人为主观误差, 检测重复性与稳定性更优^[12,16]。 Py-GC-MS 对 PP 的回收率略高于 100%, 主要源于裂解产物存在轻微基质重叠干扰, 但整体偏差处于可控范围, 可通过优化色谱分离条件进一步校正。

2.1.3 粒径适配性差异及关键局限 空气降尘中微塑料的粒径跨度较大, 不同粒径微塑料的环境行为与健康风险存在显著差异, 因此检测方法对不同粒径微塑料的检出能力至关重要。两种方法对不同粒径区间 PE 的检出率与回收率对比结果见表 3。

表 3 不同粒径区间两种方法的检出率与回收率对比

Table 3 Comparison of detection rate and recoveries between two methods in different particle size intervals

Particle size range	$\mu\text{-FTIR}$		Py-GC-MS	
	Detection rate/%	Recovery/%	Detection rate/%	Recovery/%
<20 μm	18.6	72.5	91.2	89.6
20~50 μm	45.2	81.3	90.8	90.2
50~200 μm	89.5	88.6	92.5	91.3
>200 μm	92.3	90.1	91.7	90.5

不同粒径梯度加标实验结果表明,两种方法的粒径适配性存在本质差异(表3)。 μ -FTIR检测性能与微塑料颗粒粒径呈显著正相关,对粒径 $> 50 \mu\text{m}$ 的大粒径微塑料的检出率可达88%以上,回收率稳定,可实现精准识别;但对粒径 $< 20 \mu\text{m}$ 的超微塑料的检出率仅18.6%,存在明显检测盲区。核心原因在于超微塑料的红外特征信号微弱,易与无机基质杂质特征峰混淆,且颗粒易被滤膜吸附,难以有效识别与统计。与之相比,Py-GC-MS完全突破颗粒粒径与形貌限制,全粒径微塑料的检出率稳定在90%以上,对环境风险更高、常规方法难以识别的超微塑料具备优异的检测能力^[12-13, 16],可完整还原空气降尘微塑料的真实污染水平,这是其相较于 μ -FTIR最核心的技术优势。

2.1.4 基质干扰抗性与定性机制差异 空气降尘基质复杂,含有大量腐殖质、石英粉尘、炭黑等杂质,这些杂质对微塑料检测造成干扰^[3]。在无基质干扰下,两种方法均保持较高的定性准确率, μ -FTIR为91.3%,Py-GC-MS为98.5%;但随着基质干扰增强, μ -FTIR的准确率显著下降,添加腐殖质后降至74.2%(下降17.1%),添加石英粉尘后降至68.5%,添加炭黑后进一步降至65.1%(表4)。两种方法的抗基质干扰能力差异源于检测原理的本质区别。 μ -FTIR依托红外指纹图谱实现聚合物定性,复杂基质的杂质红外特征峰易与微塑料特征峰重叠,造成谱图匹配失真^[3, 21],标准样品状态下其综合定性准确率为91.3%,多类基质叠加干扰后准确率降至65.1%,对PVC等弱特征聚合物的识别误差尤为突出。而Py-GC-MS可通过预处理有效去除基质干扰杂质,仅保留微塑料特异性裂解产物用于检测分析^[22-23],各类复杂基质干扰下其定性准确率仍稳定在94%以上,抗干扰优势显著。但该方法存在固有短板,无法精准区分PE、PP等分子结构相似、裂解产物相近的聚合物,而 μ -FTIR可通过红外光谱细微特征差异实现相似聚合物的精准甄别,形成良好的技术互补。

表4 不同基质干扰下两种方法的定性准确率对比

Table 4 Comparison of qualitative accuracy between two methods under different matrix interferences

Detection method	Polymer type	Qualitative accuracy/%						
		PE	PP	PET	SBR	PVC	PC	Comprehensive accuracy/%
μ -FTIR	Standard sample	91.3	88.7	82.6	78.9	75.4	80.2	91.3
	Humus added	78.5	75.3	69.8	66.2	62.7	67.5	74.2
	Quartz dust added	72.8	70.1	65.5	62.3	59.9	63.8	68.5
	Carbon black added	69.5	67.2	62.1	59.7	57.3	60.9	65.1
Py-GC-MS	Standard sample	99.2	98.5	97.8	96.7	97.1	90.3	98.5
	Humus added	97.5	96.8	95.9	94.8	95.2	88.6	96.2
	Quartz dust added	97.1	96.3	95.4	94.3	94.7	88.1	95.7
	Carbon black added	96.8	95.9	95.1	94.0	94.2	87.5	94.9

此外,操作因素也影响两种方法的定性稳定性: μ -FTIR的定性准确率受操作人员经验的影响较大,对疑似微塑料颗粒的识别存在主观误差;而Py-GC-MS采用仪器自动定性,人为干扰因素少,结果更稳定可靠。

2.1.5 老化微塑料检测耐受性差异 自然环境中微塑料长期老化会改变其表面理化性质,对光谱类检测技术产生显著的负面影响(表5)。由表5可知,老化作用对 μ -FTIR的检测性能影响显著,而对Py-GC-MS的影响较小。对于未老化微塑料, μ -FTIR的定性准确率为86.7%,Py-GC-MS为97.8%;当微塑料经UV 365 nm老化15 d后, μ -FTIR的定性准确率降至71.2%,下降了15.5%,而Py-GC-MS仅降至95.3%,下降了2.5%。这是因为老化作用导致微塑料表面分子键断裂、官能团发生改性,引发红外特征峰偏移、峰值强度衰减,大幅降低谱图与标准库的匹配度(图1),导致识别准确率下降。如图1中,2 915、2 848 cm^{-1} 为PE、PP的C—H伸缩振动特征峰,1 725 cm^{-1} 为PET的C=O羰基特征峰,1 245 cm^{-1} 为PVC的C—Cl伸缩振动特征峰,1 770 cm^{-1} 为PC的碳酸酯键特征峰。相较于标准塑料谱图,经环境老化的微塑料特征峰普遍出现小幅偏移,其中C=O特征峰偏移最为显著(偏移5~15 cm^{-1});同时老化样品的特征峰强度略有衰减,可作为判别环境源微塑料与原生塑料的重要依据。而Py-GC-MS检测依托微塑料聚合物分子骨架的特征裂解产物,老化作用仅改变微塑料的表面形貌与表层结构,对分子骨架结构影响极小,因此老化处理后其检测准确率仅下降2.5%,对自然老化的实际环境样品适配性更强,更贴合野外复杂样品检测场景。

表 5 老化作用对两种方法检测性能的影响

Table 5 Effect of aging on the detection performance of two methods

Sample type	μ -FTIR accuracy/%	Py-GC-MS accuracy/%
Unaged microplastics	86.7	97.8
UV-aged microplastics	71.2	95.3

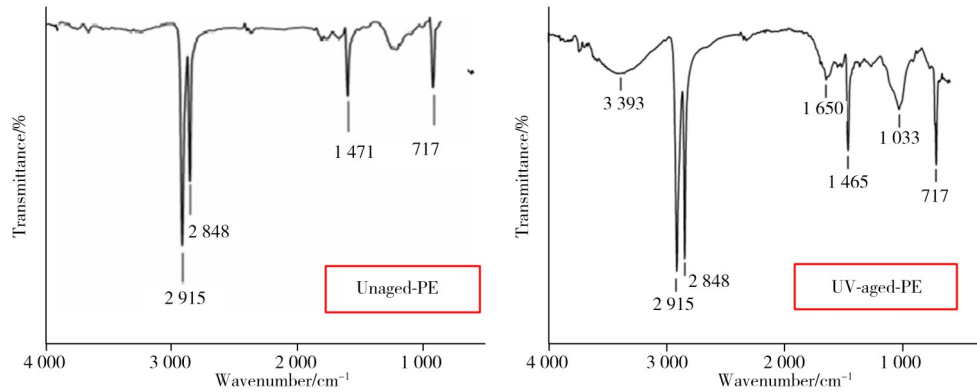


图 1 PE 老化前后的红外谱图对比

Fig. 1 Comparison of infrared spectra of PE before and after aging

2.2 实际样品检测与数据关联性分析

实际降尘样品检测结果表明, 大气微塑料污染呈现显著的空间梯度差异, 污染负荷整体表现为: 工业区 > 城市生活区 > 山林背景区, 与区域人类活动强度高度契合(表6)。其中, 工业区受工业生产、交通磨损、物料堆放等人为活动影响, 微塑料排放源多、污染负荷最高; 生活区以居民日常活动、生活垃圾降解等生活源污染为主, 污染水平居中; 山林背景区无本地污染排放, 微塑料主要源于大气远距离传输, 整体污染程度最轻^[2-3]。

表 6 不同功能区的微塑料检测数据汇总

Table 6 Summary of microplastic detection data in different functional areas

Functional areas	μ -FTIR/ (items·g ⁻¹)	Py-GC-MS/ (μ g·g ⁻¹)	Polymer dominant component order	Main poly- mer type	Polymer propor- tion/%	Polymer particle abundance (items·g ⁻¹)	Polymer mass concentration (μ g·g ⁻¹)	Correlation be- tween the two methods (R^2)
Industrial area	867.5± 92.4 ^a	87.3±11.2 ^a	PE(39%~44%)>PP	PE	44.2	383.4	38.6	0.658($P<$ 0.05)
			(23%~25%)>PET	PP	24.0	208.2	21.0	
			(12%~17%)>SBR	PET	14.5	125.8	12.7	
			(5.0%~7.8%)>PVC	SBR	7.8	67.7	6.8	
			(4.0%~5.8%)>PC	PVC	5.8	50.3	5.1	
			(4.0%~5.9%)	PC	5.9	51.2	5.2	
Urban res- idential area	412.6± 53.7 ^b	42.7±6.5 ^b	PE(40%~41%)>PP	PE	40.5	167.1	17.3	0.735($P<$ 0.05)
			(25%~26%)>PET	PP	25.1	103.6	10.7	
			(16%~17%)>SBR	PET	16.8	69.3	7.2	
			(5.0%~5.5%)>PVC	SBR	5.2	21.5	2.2	
			(4.0%~4.5%)>PC	PVC	4.2	17.3	1.8	
Back- ground zone	125.3± 18.6 ^c	12.5±2.1 ^c	PE(39%~40%)>PET	PE	39.1	49.0	4.9	0.812($P<$ 0.05)
			(12%~13%)>PP	PET	12.3	15.4	1.5	
			(10%~11%)>SBR	PP	10.0	12.5	1.3	
			(5.0%~5.2%)>PVC	SBR	5.0	6.3	0.6	
			(4.0%~4.2%)>PC	PVC	4.0	5.0	0.5	
(4.0%~4.2%)	PC	4.0	5.0	0.5				

values with different lowercase letters within the same column are significantly different ($P<0.05$); the polymer qualitative results obtained by the two methods exhibited a Pearson correlation of $R>0.95$ ($P<0.05$), with the proportional difference of each polymer being less than 3%; $n=6$

两种方法的样品污染趋势完全一致, 聚合物定性结果高度吻合(相关系数 $R>0.95$), 均识别出 PE、PP、PET 为优势组分。但两类方法的核心检测数据存在明显差异, 微塑料颗粒丰度与质量浓度仅呈中等相关性(整体 $R^2=0.724$), 数据无法直接换算。两类方法的数据偏差主要源于粒径与密度双重异质性。一是粒径异质性, $<20\ \mu\text{m}$ 超微塑料的数量占比超 60%, 是 μ -FTIR 颗粒丰度统计的主要依据, 但

此类颗粒的质量占比极低，对污染负荷贡献有限；而大粒径颗粒的数量占比低、质量贡献突出，主导Py-GC-MS质量浓度数据，造成丰度与质量数据错位。二是密度异质性，PE、PP等低密度聚合物与PET、PVC等高密度聚合物的密度差异，进一步拉大了两类检测数据的偏差。同时，区域污染复杂度越高，粒径与密度异质性越显著，两种方法的数据相关性越低，整体呈现“背景区>生活区>工业区”的梯度规律。

值得注意的是，两种方法各有优势，结合使用可更全面地解析微塑料的来源特征： μ -FTIR可清晰识别各聚合物微塑料的形态特征。如图2为空气降尘的典型微塑料形貌特征图，本次形貌分析共统计360个有效微塑料颗粒样品(三类功能区各120个， $n=360$)，统计结果显示形态特征的辨识度极高，其中92.3%的PE微塑料呈不规则碎片状、89.5%的PP微塑料呈均匀颗粒状、94.1%的PET微塑料呈细长纤维状，SBR、PVC、PC无固定典型形态，多为不规则碎屑。基于大样本统计规律，明确 μ -FTIR可通过微观形貌精准区分主流聚合物类型，形态识别结论具备充足的数据支撑与代表性。Py-GC-MS虽无法识别形态，但可精准量化各聚合物的质量占比。例如，通过 μ -FTIR观测到工业区降尘中PE微塑料多为较大粒径碎片，结合Py-GC-MS检测的高质量占比，可推断其主要来源于工业塑料加工废料的直接排放；而背景区通过 μ -FTIR观测到大量PET纤维，结合Py-GC-MS检测的低质量占比，可判断其为远距离传输的纺织纤维微塑料。

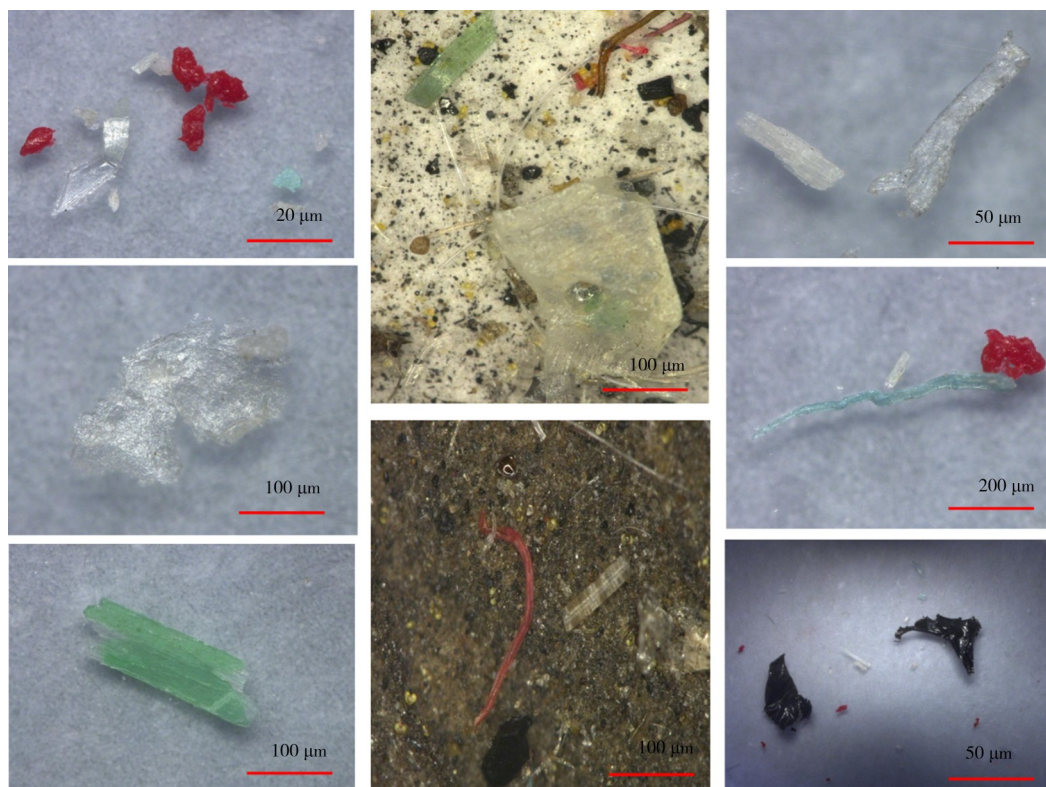


图2 空气降尘的微塑料形貌特征

Fig. 2 Morphological characteristics of microplastics in air deposited dust

2.3 两种检测方法的适用场景与标准化联用

2.3.1 单一方法精准适用场景 μ -FTIR适用于大气微塑料溯源解析、污染特征精细化研究。该方法可精准完成 $>50\ \mu\text{m}$ 大粒径微塑料的形貌观测、粒径分级统计与聚合物精准定性，依托无损检测优势完整保留样品实体，可通过颗粒形貌特征(碎片状PE、颗粒状PP、纤维状PET)有效区分工业源、生活源、大气传输源等污染类型，尤其适用于PE/PP等结构相似聚合物的精准甄别，是微塑料来源解析、迁移规律研究的核心技术手段。该方法不适用于超微塑料批量检测、复杂基质样品痕量定量及污染负荷精准核算。

Py-GC-MS适用于环境常规监测、微塑料污染负荷核算、生态风险定量评价。依托全粒径无差别检测、抗基质干扰能力强、定量精度高、重复性好的核心优势，可有效弥补 μ -FTIR超微塑料漏检的

技术短板,精准量化各类聚合物的质量浓度,真实还原复杂基质、老化样品、痕量样品的微塑料总污染水平,适配批量样品定量检测工作。该方法无法获取颗粒形貌信息,难以支撑微塑料精细化溯源分析。

2.3.2 标准化联用实操体系 为最大化发挥两种技术的互补优势,契合大气微塑料检测标准化发展需求,本研究建立统一规范、可复用推广的联用检测流程:(1)样品标准化分流:所有样品经统一前处理、除杂富集后均等分样,分别适配两种检测方法,保障检测数据同源可比;(2) μ -FTIR 精细化定性溯源:完成颗粒形貌观测、粒径分级、聚合物精准定性,初步判定微塑料污染来源与类型;(3)Py-GC-MS 精准定量核算:补充超微塑料检测数据,精准核算各聚合物组分的污染负荷与质量浓度;(4)数据耦合双向校核:以 μ -FTIR 形貌数据支撑溯源分析,以Py-GC-MS 质量数据完成定量评价,双向校核剔除异常数据,提升检测精度;(5)标准化成果输出:根据研究需求输出溯源分析、污染特征、负荷评价等成果,实现微塑料全维度精准表征。同时,针对两种方法的固有短板提出优化方向: μ -FTIR 可依托智能图像识别算法优化小粒径颗粒识别逻辑,提升超微塑料检出率;Py-GC-MS 可优化热裂解与色谱分离条件,减少相似聚合物的裂解产物重叠干扰,提升定性识别精度。

3 结论

本研究系统阐明了 μ -FTIR 与Py-GC-MS 两种主流技术检测空气降尘微塑料的性能差异、偏差形成机理与适用边界,明确了两类方法的互补特性与不可替代性。两种检测方法性能优劣互补、各有侧重。Py-GC-MS 在定量精度、全粒径适配性、复杂基质抗干扰能力、老化样品耐受性方面优势突出,可精准核算微塑料污染负荷,适用于批量定量监测; μ -FTIR 具备无损检测、形貌可视化、相似聚合物精细定性的独特优势,是大粒径微塑料($>50 \mu\text{m}$)污染溯源的核心手段,但存在超微塑料($<20 \mu\text{m}$)检测盲区,适配场景有限。实际样品检测中,两种方法的聚合物组分识别结果高度一致(Pearson 相关性 $R>0.95$),可精准匹配区域污染特征;但受颗粒粒径分布与聚合物密度双重异质性影响,两类方法的丰度数据与质量浓度数据仅呈中等相关($R^2=0.724$),无法直接换算,数据维度相互补充、不可替代。

本研究依托两类技术的原理互补性与数据适配性,构建了标准化联用检测体系,有效突破了单一检测方法的技术局限,可实现空气降尘微塑料“形貌-组分-质量”全维度精准表征,为大气微塑料检测标准化建设、污染溯源解析及生态风险评估提供规范、可行的技术参考。

参考文献:

- [1] Dris R, Gasperi J, Rocher V, Saad M, Renault N, Tassin B. *Environ. Chem.*, **2015**, 12(5): 592.
- [2] Allen S, Allen D, Phoenix V R, Roux G L, Jiménez P D, Simonneau A, Binet S, Galop D. *Nat. Geosci.*, **2019**, 12(5): 339-344.
- [3] Klein M, Fischer E K. *Sci. Total Environ.*, **2019**, 685: 96-103.
- [4] Xu W Q, Liu Y S, Hu M, Yu H Y, Bao L J. *J. Instrum. Anal.* (徐文卿, 刘雨森, 胡敏, 于焕云, 鲍恋君. 分析测试学报), **2024**, 43(8): 1220-1226.
- [5] Shiwakoti S, Ko J Y, Gong D, Dhakal B, Lee J H, Adhikari R, Gwak Y, Park S H, Choi I J, Valérie B, Kerth S, Kang K W, Oak M H. *Environ. Int.*, **2022**, 164: 107248.
- [6] Zhao J J, Gomes D, Jin L, Mathis S P, Li X, Rouchka E C, Bodduluri H, Conklin D J, O'Toole T E. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **2022**, 232: 113239.
- [7] Luo Y M, Shi H H, Tu C, Zhou Q, Ji R, Pan X L, Xu X R, Wu C X, An L H, Sun X X, He D F, Li Y F, Ma Y N, Li L Z. *Chin. Sci. Bull.* (骆永明, 施华宏, 涂晨, 周倩, 季荣, 潘响亮, 徐向荣, 吴辰熙, 安立会, 孙晓霞, 何德富, 李艳芳, 马旖旎, 李连祯. 科学通报), **2021**, 66: 1547-1562.
- [8] Chen Q Q, Shi G T, Revell L E, Zhang J, Zuo C C, Wang D H, Ru E C L, Wu G M, Mitrano D M. *Nat. Commun.*, **2023**, 14(1): 7898.
- [9] Tang Q F, Wang J M, Li Q M, Gao X, Deng P Y, Shao P, Wei Y, Wang H Y. *China Meas. Test* (汤庆峰, 王佳敏, 李琴梅, 高峡, 邓平晔, 邵鹏, 魏炜, 王红燕. 中国测试), **2022**, 48(10): 145-151.
- [10] Wang K, Lin K D, Yuan D X. *Environ. Chem.* (王昆, 林坤德, 袁东星. 环境化学), **2017**, 36(1): 27-36.
- [11] Zhou D Q, Lü S W, Liu N, Li N. *Chin. Fish. Qual. Stand.* (周德庆, 吕世伟, 刘楠, 李娜. 中国渔业质量与标准), **2020**, 10(3): 60-68.
- [12] Cai H W, Du F N, Zhang W W, Shi H H. *Res. Environ. Sci.* (蔡慧文, 杜方旎, 张微微, 施华宏. 环境科学研究), **2021**, 34(11): 2547-2555.
- [13] Steinmetz Z, Kintzi A, Munoz K, Schaumann G E. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **2020**, 147: 104803.

- [14] Yuan L, Yan Z Y, Hao F, Wang Z Y, Yuan X Z, Yang X F, Chen T, Yan X P. *J. Instrum. Anal.* (袁珑, 严诸颖, 郝放, 王震宇, 袁宪正, 杨晓帆, 陈涛, 严秀平. 分析测试学报), **2025**, 44 (9): 1788-1800.
- [15] Tian L L, Chen Q Q, Jiang W, Wang L H, Xie H X, Kalogerakis N, Ma Y N, Ji R. *Environ. Sci.: Nano*, **2019**, 6 (9): 2907-2917.
- [16] Pico Y, Barcelo D. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **2020**, 130: 115964.
- [17] 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.
- [18] Stock F, Kochleus C, Bänsch-Baltruschat B, Brennholt N, Reifferscheid G. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2019**, 113: 84-92.
- [19] HJ 1221-2021. Ambient Air—Determination of Dustfall—Gravimetric Method. National Ecological and Environmental Standards of the People's Republic of China(环境空气 降尘的测定 重量法. 中华人民共和国国家生态环境标准).
- [20] Xue L D, Zhang L L, Yu H B, Zhu H X, Yuan M. *Environ. Monitor. China*(薛荔栋, 张霖琳, 于海斌, 朱红霞, 袁懋. 中国环境监测), **2022**, 38(5): 9-17.
- [21] Liu X D, Lu J J, He S H, Tong Y B, Liu Z L, Li W J, Xiayihazi N. *Sci. Total Environ.*, **2022**, 821: 153181.
- [22] Stubbins A, Law K L, Munoz S E, Bianchi T S, Zhu L. *Science*, **2021**, 373(6550): 51-55.
- [23] La Nasa J, Biale G, Fabbri D, Modugno F. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **2020**, 149: 104841.

(责任编辑: 丁 岩)