DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260115004
引用格式: 董柳青, 周琛媛, 陈凯逸, 等. 热裂解-气相色谱-质谱法测定包装饮用水中 6 种微塑料含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 258–264.
Dong Liuqing, Zhou Chenyuan, Chen Kaiyi, et al. Determination of 6 kinds of microplastics in packaged drinking water by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 258–264. (in Chinese with English abstract).

热裂解-气相色谱-质谱法测定包装饮用水中 6 种微塑料含量

董柳青[1], 周琛媛[2], 陈凯逸[3], 王 悦[3], 黄志强[1], 张倩瑶[1], 楚秉泉[3*]

(1. 桐庐县检验检测中心, 杭州 311500; 2. 浙江经贸职业技术学院, 杭州 310018;
3. 浙江科技大学生物与化学工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 目的 建立热裂解-气相色谱-质谱法定性定量测定包装饮用水中 6 种微塑料(microplastics, MPs)的方法。**方法** 以硅藻土为稀释剂, 采用冷冻研磨技术制备 6 种 MPs 固体标准物质, 并基于热裂解-气相色谱-质谱法确定各 MPs 对应的特征裂解产物离子, 以此作为 MPs 的定性和定量依据; 最后将所建立的方法用于市售包装饮用水中 MPs 的测定。**结果** 成功筛选 6 种 MPs 的特征裂解产物离子, 据此建立的定量标准曲线均呈现良好线性关系, 检出限为 0.10~1.10 μg/L, 加标回收率为 65.2%~89.5%, 相对标准偏差小于 10%; 在 8 种市售包装饮用水中检出聚苯乙烯、聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)和聚氯乙烯, 其中 PET 含量最高。**结论** 本研究建立的热裂解-气相色谱-质谱法前处理简便高效, 具有灵敏度高、重复性好的特点, 适用于包装饮用水中 MPs 的定量检测。

关键词: 热裂解-气相色谱-质谱法; 包装饮用水; 微塑料; 特征裂解产物; 定性定量分析
中图分类号: TS207.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)13–0258–07

Determination of 6 kinds of microplastics in packaged drinking water by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry

DONG Liu-Qing[1], ZHOU Chen-Yuan[2], CHEN Kai-Yi[3], WANG Yue[3], HUANG Zhi-Qiang[1], ZHANG Qian-Yao[1], CHU Bing-Quan[3*]

(1. *Inspection and Testing Center of Tonglu*, *Tonglu* 311500, *China*; 2. *Zhejiang Institute of Economics and Trade*, *Hangzhou* 310018, *China*; 3. *School of Biological and Chemical Engineering*, *Zhejiang University of Science and Technology*, *Hangzhou* 310023, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a qualitative and quantitative analytical method for determination of 6 kinds of microplastics (MPs) in packaged drinking water by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. **Methods**

收稿日期: 2026-01-15
基金项目: 浙江省市场监督管理局科技计划项目(QN2025031); 浙江经贸职业技术学院 2025 年省属高校基本科研业务费项目(25YQ08)
第一作者: 董柳青(1991—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品检验检测。E-mail: dlq0925@126.com
***通信作者:** 楚秉泉(1986—), 男, 副教授, 主要研究方向为功能性食品、食品营养等研究。E-mail: bqchu@zust. edu. cn

Diatomaceous earth was used as a diluent, and cryogenic grinding technology was applied to prepare 6 kinds of solid MPs standard substances. Characteristic pyrolysis product ions corresponding to each MPs were identified using pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry, serving as the basis for qualitative and quantitative analysis. The established method was subsequently applied to determine MPs in commercially available packaged drinking water. **Results** Characteristic pyrolysis product ions for the 6 kinds of MPs were successfully identified. The constructed quantitative calibration curves all exhibited good linearity, the limits of detection were 0.10–1.10 μg/L, the spiked recovery rates were 65.2%–89.5% and the relative standard deviation was less than 10%. Polystyrene, polyethylene, polyethylene terephthalate (PET), and polyvinyl chloride were detected in 8 kinds of commercially available packaged drinking water samples, with polyethylene terephthalate being the most abundant. **Conclusion** The pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry pretreatment method established in this study is simple and efficient, featuring high sensitivity and good repeatability. It is suitable for the quantitative detection of MPs in packaged drinking water

KEY WORDS: pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry; packaged drinking water; microplastic; characteristic pyrolysis products; qualitative and quantitative analysis

0　引　言

自 20 世纪中叶塑料实现大规模工业化生产以来, 其全球年产量已超 3.9 亿吨[1]。大量塑料被用于制造一次性用品, 废弃后经环境中的射线、热氧化、机械磨损等过程逐步降解[2–3]。这类直径小于 5 mm 的塑料碎片与颗粒, 被统称为微塑料(microplastics, MPs)。该术语由英国普利茅斯大学的 Thompson 等[4]于 2004 年在 Science 期刊首次提出。由于 MPs 具有较强的迁移能力, 在过去的数十年间已广泛积累于全球各类环境介质中, 甚至在南北极等偏远区域亦有检出, 其对生态系统和人类健康构成的潜在威胁日益受到关注[5–6]。

水体环境(如海洋、河流、湖泊等)是 MPs 污染的重要汇聚区[7–10]。2018 年, 世界卫生组织对饮用水中 MPs 的潜在风险进行评估, 在 9 个国家 11 个品牌的 259 瓶瓶装水样品中, 93%检出 MPs, 平均丰度达 325 个/L[11]。后续研究进一步证实该污染的普遍性, 2020 年 Kankanige 等[12]对比不同包装的瓶装水, 发现塑料瓶装水中聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)和聚乙烯(polyethylene, PE)含量显著; 2022 年, 对马来西亚 8 个品牌瓶装水的研究也报道了高含量 MPs, 其主要成分为 PET 和聚丙烯(polypropylene, PP), 推测与包装及瓶盖材质密切有关[13]。MPs 因其粒径小、难降解, 可通过摄食或吸入进入人体, 并经过循环系统迁移至不同组织和器官, 从而带来潜在的健康风险[14–16]。因此, 建立准确、高效的 MPs 检测方法是科学评估其人体暴露水平与健康影响的前提, 也是当前该领域研究的关键基础之一。

目前, MPs 的常用检测手段包括光学显微镜观察、扫描电子显微镜-能谱法、傅里叶变换红外光谱法、拉曼光谱法、示差扫描量热法、热重-示差扫描热法、热脱附气相色谱法以及热裂解-气相色谱-质谱法(pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry, Py-GC-MS)等[17–20]。其中, Py-GC-MS 因其独特优势, 已成为环境与生物样本中痕量 MPs 分析的有力工具[21]。其核心优势在于: 首先, 该方法基于质量浓度进行定量, 其结果不受 MPs 颗粒形状、颜色、尺寸分布的影响, 便于不同研究间的数据比较与风险评估[22–23]; 其次, 具有卓越的灵敏度与选择性, 能够有效应对环境样品中 MPs 浓度极低的挑战; 再者, 其强大的聚合物识别能力可通过特征裂解产物的“指纹图谱”准确区分 PET、PP、PE、聚苯乙烯(polystyrene, PS)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等多种常见聚合物[24–26]; 此外, Py-GC-MS 对样品前处理的要求相对简化, 尤其对于经过充分纯化的样品, 甚至可实现直接进样分析, 显著提升了分析通量[27]。

尽管 Py-GC-MS 技术在 MPs 分析中具有显著优势, 但其在实际应用中仍面临一系列挑战。目前, 为确保环境样品(如过滤富集物)能够均匀转移至裂解进样器, 标准操作流程普遍采用有机溶剂(如四氢呋喃、氯苯)溶解法或热压流体萃取法[28–29]。然而, 这些方法存在固有缺陷: 首先, 有机溶剂的强挥发性易导致上样前样本中 MPs 的真实浓度发生不可控的偏差, 尤其对低沸点聚合物影响显著; 其次, 溶剂可能引入杂质干扰, 甚至造成样品损失; 此外, 处理后的样本难以长期保存, 影响分析结果的稳定性与重现性。因此, 开发一种能够有效保留 MPs 原始质量信息、避免溶剂干扰且操作便捷稳定的前处理方法, 对提升 Py-GC-MS 分析的准确度与可靠性至关重要。基于此, 本研究拟采用冷冻研磨前处理方法, 结合 Py-GC-MS 技术, 建立准确、可靠的 MPs 定性定量分析方法, 并将其应用于

市售包装饮用水样品中痕量 MPs 的检测，旨在为包装饮用水中 MPs 痕量分析提供一种高效、便捷且准确的方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

市售包装饮用水，购于本地超市，水源地为杭州千岛湖、吉林长白山、苏州虎丘山、苏州洞庭山和城市自来水。

热裂解样品管(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)；石英玻璃纤维膜(直径 47 mm，孔径 0.3 μm，秦皇岛宝蓝科技有限公司)；PP(熔融指数 12 g/10 min)、聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA, MW~35000)、PE(熔融指数 12 g/10 min)、PS(通用型 II)、PVC (*K*-value 72~71)、硅藻土(通量煅烧型)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；PET(熔点 250~255 ℃，上海麦克林生化科技股份有限公司)；六氟异丙醇[色谱纯，西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司]；丙酮[色谱纯，西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司]；超纯水采用 milliopore 纯水仪实验室自制。

1.2 仪器与设备

CDS6150 全自动热裂解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)；QP2020 NX 单四极杆型气相色谱质谱联用仪(日本岛津公司)；XP205 电子天平[精度 0.00001 g，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]；LN-1 液氮研磨仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)；Agilent HP-5ms 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm，美国 Agilent 公司)；砂芯抽滤装置(海宁市德滤新材料科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 标准物质配制

(1)制备条件优化

采用单因素试验设计，考察液氮冷冻时间、研磨时间、研磨次数及研磨功率对标准物质稳定性的影响。分别设定液氮冷冻时间为 3、4、5、6 min，研磨时间为 30、40、50、60 s，研磨次数为 4、6、8、10 次，研磨功率为 45、55、65、75 Hz。将按各条件制备的标准物质准确称取 2 mg，重复进样 7 次，计算峰面积的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)，以评估各参数对标准物质均匀性和稳定性的影响。

(2)标准物质制备

分别精确称取 1 mg 的 PP、PMMA、PE、PS、PVC、PET 标准品，置于 5 mL 金属研磨罐中。加入 0.15 g 硅藻土作为分散剂，并放入直径 9.6 mm 的金属研磨球，旋紧罐盖。将研磨罐置于液氮中冷冻 5 min 后，转移至研磨仪，在 65 Hz 功率下研磨 40 s，该研磨过程重复进行 8 次。最终制得 MPs 在硅藻土中均匀分散的标准物质，其中 MPs 质量比为 6667 μg/g。

(3)制备方法可靠性评价

为评价本研究的标准物质制备方法的可靠性，将其与基于丙酮、六氟异丙醇(超声加热辅助溶解)配制的标准溶液进行对比。三类标准样品分别经 Py-GC-MS 重复测定 7 次，计算 RSD。

1.3.2 仪器分析条件

热裂解条件：热裂解温度 700 ℃，裂解时间 60 s；接口温度 300 ℃；阀箱温度 300 ℃；传输线温度 320 ℃。

色谱条件：色谱柱为 Agilent HP-5ms (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)分流比 50:1；载气为高纯氦气，恒定流速 1.0 mL/min。柱温箱升温程序为：初始温度 40 ℃保持 2 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 30 ℃/min 升至 280 ℃并保持 5 min，最后以 40 ℃/min 升至 300 ℃，保持 5 min。

质谱条件：离子源为电子轰击电离；离子源温度 250 ℃；接口温度 320 ℃；进样口温度 320 ℃；溶剂延迟 0.5 min；采集模式为选择离子监测。

1.3.3 饮用水样品中 MPs 的富集与前处理

取 10 L 包装饮用水样品，采用 2 L 砂芯过滤装置，配以孔径 0.3 μm 的石英纤维滤膜(直径 47 mm)进行过滤，富集其中的 MPs，过滤速率控制在 0.2 L/min 左右。将载有 MPs 的滤膜置于 105 ℃烘箱中干燥 1 h，随后转移至金属研磨罐中，同 MPs 标品的配制方法(1.3.1)进行研磨粉碎。准确称取 2 mg 研磨后粉末，置于热裂解样品管，采用 Py-GC-MS 进行分析。

1.4 质量控制

为降低环境及器具背景中 MPs 的干扰，所有实验容器在使用前均使用超纯水超声清洗 3 次。硅藻土与裂解管在马弗炉中 800 ℃灼烧 1 h 以去除有机残留。同时，设置石英玻璃纤维膜为空白对照。

1.5 数据处理

采用岛津再解析分析软件(GCMSsolution 4.45)进行数据采集与初步处理。所得数据进一步使用 Origin pro 2026、WPS Office 2026 软件等对进行统计分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 标准物质制备条件的优化

由表 1 可知，当液氮冷冻时间为 5 min、研磨时间为 40 s、研磨次数为 8 次、研磨功率为 65 Hz 时，RSDs 均小于 2%，趋于稳定。此过程完全在低温、无溶剂的物理状态下进行，该固体标准物质在装填至热裂解管前无需挥发有机溶剂，简化了前处理步骤，彻底规避了由溶剂挥发带来的浓度偏差和交叉污染风险。

进一步将本研究制得的标准物质与传统基于丙酮、六氟异丙醇(超声加热辅助溶解)配制的标准溶液稳定性进行对比。检测结果表明，相比于溶剂法制得的标准品，以硅藻土为稀释剂制备的 MPs 标准物质具备良好的均匀性和稳定性(RSDs<2%)(表 2)，可长期保存。

表 1　不同制备参数标准物质的稳定性(%, *n*=7)

Table 1　Stability of standard materials with different preparation parameters (%, *n*=7)

参数		PP	PS	PE	PET	PVC	PMMA
液氮冷冻时间/min	3	4.95	4.71	6.02	8.08	5.12	6.19
	4	3.94	3.05	5.14	4.25	3.84	3.57
	5	1.83	1.04	1.54	1.28	1.18	1.21
	6	1.20	1.12	1.77	1.35	1.21	0.99
研磨时间/s	30	3.64	3.02	5.12	7.84	3.21	3.35
	40	1.05	1.11	1.64	1.31	1.18	1.02
	50	1.15	1.32	1.03	1.91	1.44	1.09
	60	1.07	1.52	1.74	1.71	1.54	1.65
研磨次数/次	4	9.25	6.14	9.87	10.01	4.52	5.65
	6	6.66	4.57	5.59	4.98	3.30	2.87
	8	1.23	1.21	1.75	1.13	1.18	0.99
	10	1.53	0.98	1.78	1.66	1.17	1.03
研磨功率/Hz	45	7.12	6.42	12.54	14.10	9.21	8.97
	55	5.98	4.25	5.12	5.99	4.24	3.97
	65	1.15	1.08	1.74	1.19	1.09	0.95
	75	1.11	1.28	1.34	1.14	1.25	1.08

注: 稳定性结果以 RSD 表示, 表 2 同。

表 2　不同方式制备标准物质的稳定性(%, *n*=7)

Table 2　Stability of standard materials prepared by different methods (%, *n*=7)

制备方式	PP	PS	PE	PET	PVC	PMMA
冷冻研磨 (稀释剂: 硅藻土; 质量比: 6667 μg/g)	1.25	1.01	1.84	1.20	1.08	0.95
丙酮 (质量浓度: 1000 μg/mL)	8.84	10.27	16.14	13.25	14.54	17.98
六氟异丙醇 (质量浓度: 1000 μg/mL)	5.25	4.73	5.14	4.77	3.91	5.79

2.2　标准物质的制备

在采用 Py-GC-MS 进行 MPs 定量分析时, 标准物质的制备是关键步骤之一, 亦面临一定挑战。目前, MPs 标准物质的制备主要有两种途径: (1)通过精密称量, 但常规实验室天平的精度往往难以满足痕量分析要求; (2)借助有机试剂进行溶解后配制, 然而目前尚无一种通用溶剂可同时溶解所有类型 MPs[30]。为解决上述问题, 本研究选用热稳定性强的硅藻土作为稀释剂, 结合冷冻研磨技术, 将 PP、PS、PE、PET、PVC 及 PMMA 6 种 MPs 与硅藻土充分混合均匀, 制备出 MPs 质量分数为 6667 μg/g 的固体标准物质, 且证明该方法较溶剂法制备的标准品稳定性更好。

2.3　特征裂解产物的识别与选取

为确定 PP、PS、PE、PET、PVC 和 PMMA 6 种 MPs 标准品的特征裂解产物, 首先在 GC-MS 全扫描模式下对各标准品进行分析, 质量扫描范围设为 35~600 amu。通过对比岛津国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)质谱数据库, 对所得裂解产物进行鉴定, 并依据其质谱响应与特异性筛选出主要特征峰。在此基础上, 选取丰度最高的特征离子作为定量离子, 丰度次高的离子作为定性离子, 以确保定量的准确性与定性的可靠性。表 3 列出了 6 种 MPs 标准品特征裂解产物的保留时间、对应化合物名称、定量离子及定性离子, 其提取离子色谱图见图 1。

2.4　热裂解温度的优化

为确定最佳热裂解温度, 准确称取 2.0 mg 的 MPs 标准物质(质量分数为 6667 μg/g)置于裂解管中, 分别设在 400、500、600、700 和 800 ℃下裂解 60 s, 热裂解温度优化中除热裂解温度外, 其余仪器条件均参照 1.3.2 设定, 重复 7 次。通过 Py-GC-MS 测定 6 种 MPs 特征离子的响应值, 结果如图 2 所示。结果表明, 随着裂解温度升高, 各 MPs 的响应值总体呈上升趋势, 并在 700 ℃时达到最高。综合考虑裂解效率与响应稳定性, 本研究最终选定 700 ℃为后续实验的热裂解温度。

表 3 6 种 MPs 标准品特征裂解产物的保留时间、定量离子及定性离子

Table 3 Retention times, quantitative ions and qualitative ions of characteristic pyrolysis products for 6 kinds of MPs standard substance

英文简称	特征裂解产物名称	保留时间/min	定量离子	定性离子
PP	2,4-二甲基-1-庚烯	5.853	43	55, 70
PS	萘乙烯	6.805	104	78, 103
PE	正癸烯	8.510	43	55, 70
PET	联苯	12.271	154	152, 153
PVC	萘	10.875	128	102, 127
PMMA	甲基丙烯酸甲酯	3.930	41	69, 100

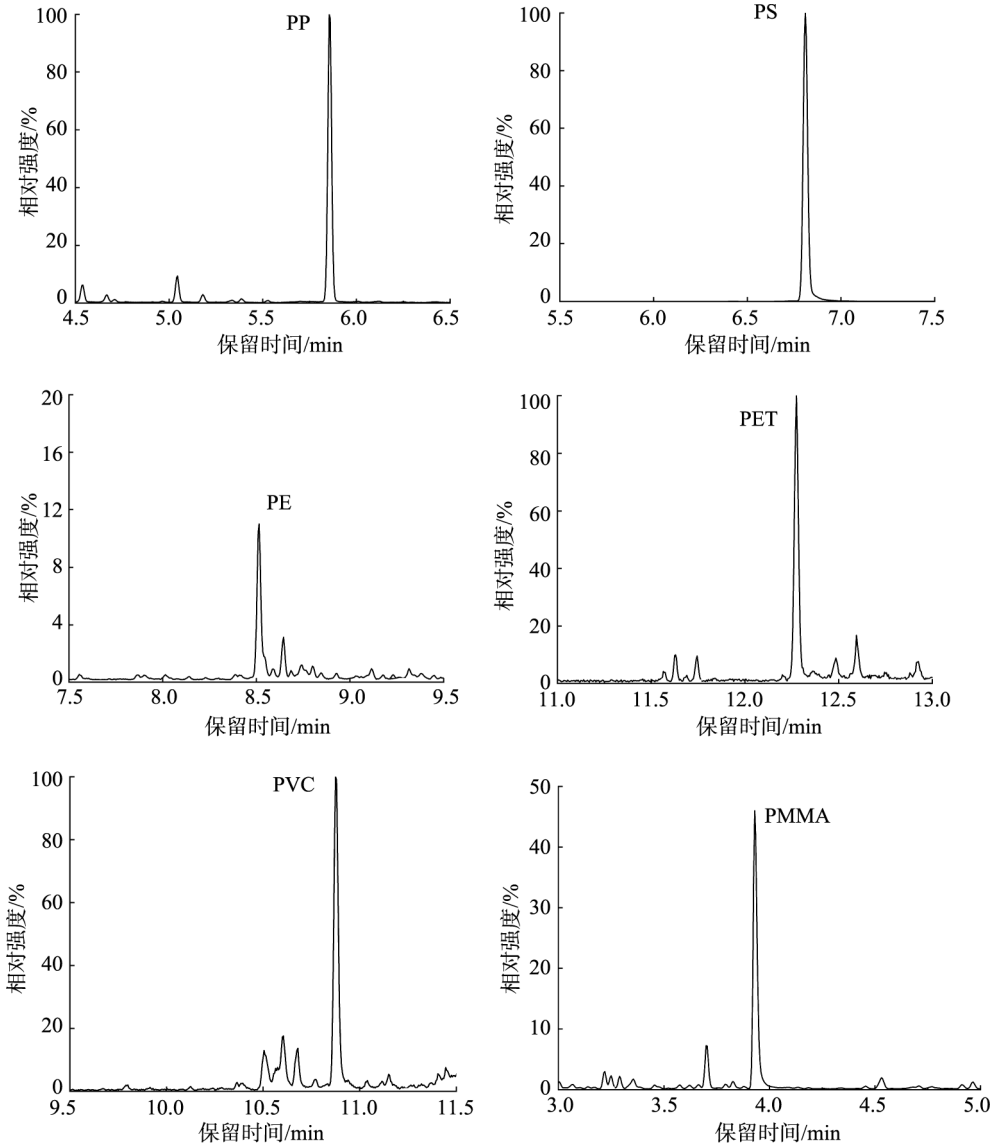


图 1 6 种 MPs 标准品特征裂解产物的提取离子色谱图

Fig.1 Extracted ion chromatograms of characteristic pyrolysis products for 6 kinds of MPs standard substance

2.5 方法学验证

2.5.1 线性范围与检出限

准确称取 MPs 标准物质(6667 μg/g) 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 mg 于裂解管中, 此时对应的 MPs 含量分别为 3.3、6.7、10.0、13.3 和 16.7 μg。采用 Py-GC-MS 进行分析, 以 MPs 含量为横坐标(X, μg), 特征离子响应值为纵坐标(Y)绘制标准曲线, 计算线性回归方程。以 3 倍信噪比(S/N=3)计算检出限, 结果见表 4。各目标物在测试范围内线性关系良好, 决定系数(r^2)均大于 0.99; 检出限为 0.10~1.10 μg/L, 定量限 0.33~3.67 μg/L, 表明该方法具备较高的灵敏度。

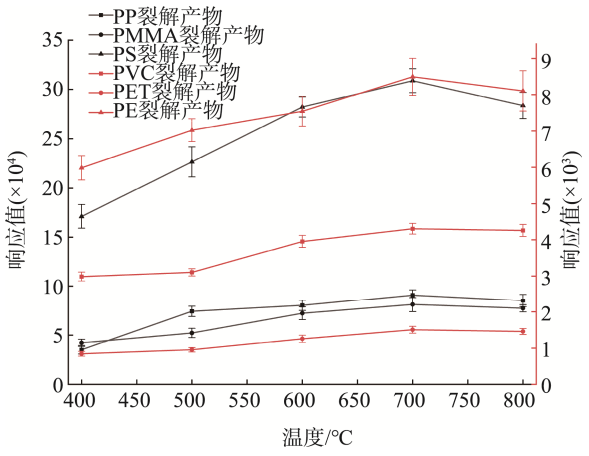


图 2　不同热解温度下 6 种 MPs 在 Py-GC-MS 测定中的响应值

Fig.2　Response values of 6 kinds of MPs in the determination of Py-GC-MS at different pyrolysis temperatures

2.5.2　精密度与加标回收率

为评估方法的准确度与重复性，对 10 L 包装饮用水样品进行 3 个浓度水平的加标实验。此次加标实验为空白饮用水中加入浓度为 6667 μg/g 的 MPs 标准物质，加标水平分别为 1.5、3.0 和 6.0 μg/L，每个水平平行测定 7 次，计算加标回收率与 RSD，结果见表 5。该方法的加标回收率为 65.2%~89.5%，各浓度水平下的 RSD 均小于 10%，说明方法具有良好的准确度与重复性，可用于实际样品中 MPs 的定量分析。

2.6　实际样品测定

采用所建立的方法对市售 8 个品牌的包装饮用水进行检测，结果如表 6 所示。所有样品中均检测出 MPs，主要包括 PS、PE、PET 和 PVC，其中 PET 的检出浓度最高，这可能与包装瓶身普遍采用 PET 材质相关[31]，提示包装材料是饮用水中 MPs 的重要来源。

表 4　6 种 MPs 的线性回归方程、检出限与定量限

Table 4　Linear regression equations, limits of detection and limits of quantitation of 6 kinds of MPs

MPs 种类	线性回归方程	r^2	检出限/(μg/L)	定量限/(μg/L)
PP	Y=15611.22X–12852.57	0.994	0.34	1.13
PS	Y=48663.39X–15638.73	0.997	0.10	0.33
PE	Y=1266.97X+44.37	0.993	0.97	3.23
PET	Y=445.18X–129.69	0.994	1.10	3.67
PVC	Y=639.04X+44.10	0.995	0.77	2.57
PMMA	Y=9865.51X+15318.89	0.997	0.51	1.70

表 5　加标回收率及精密度(n=7)

Table 5　Spiking recoveries and precisions (n=7)

MPs 种类	添加水平 1.5 μg/L		添加水平 3.0 μg/L		添加水平 6.0 μg/L	
	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSDs/%	回收率/%	RSDs/%
PP	70.8	7.5	81.1	7.2	87.3	6.1
PS	77.4	5.1	84.4	6.5	89.5	5.4
PE	68.5	8.6	71.2	8.0	81.5	7.5
PET	65.2	9.1	74.6	8.9	84.1	7.1
PVC	74.9	7.0	78.7	6.8	85.7	5.3
PMMA	74.1	7.5	80.1	7.0	86.3	6.2

表 6　包装饮用水样品中 MPs 的检出情况(μg/L)

Table 6　Detection of MPs in packaged drinking water samples (μg/L)

样品编号	PP	PS	PE	PET	PVC	PMMA
1	ND	0.24	ND	ND	1.52	ND
2	ND	ND	ND	2.04	0.98	ND
3	ND	0.42	1.04	2.45	ND	ND
4	ND	0.24	1.10	3.75	2.01	ND
5	ND	ND	ND	2.31	1.24	ND
6	ND	0.31	1.24	2.14	1.55	ND
7	ND	0.18	0.99	2.98	1.37	ND
8	ND	0.16	ND	3.74	ND	ND

注: ND 为未检出(小于方法检出限)。

3　结 论

本研究基于冷冻研磨技术制备了包含 PP、PS、PE、PET、PVC 和 PMMA 6 种常见 MPs 的固体标准物质，并建立了适用于包装饮用水中 MPs 定性和定量分析的 Py-GC-MS 方法。方法学验证结果表明，该方法线性关系良

好(r^2>0.99), 检出限低(0.10~1.10 μg/L)、精密度(RSD<10%)和加标回收率(65.2%~89.5%)均符合痕量分析要求, 具备较高的灵敏度和可靠性。应用所建方法对市售 8 种包装饮用水进行检测, 结果显示 PS、PE、PET 和 PVC 均有不同程度检出, 其中 PET 含量最为突出, 推测其主要来源于 PET 材质的包装本身。本研究建立的分析方法操作简便、结果可靠, 可为包装饮用水中 MPs 的监测提供有效手段, 并为相关食品安全标准的制定与风险监管提供科学依据。

参考文献

[1] Giuseppina Z, Angeliki K, Silvia L. Microplastics: human exposure assessment through air, water, and food [J]. Environment International, 2023, 179: 108150.

[2] Roslan S N, Lee Y Y, Ibrahim S Y, *et al*. Detection of microplastics in human tissues and organs: a scoping review [J]. Journal of Global Health, 2024, 14: 04179.

[3] Yang Ling, Kang Shichang, Luo Xi, *et al*. Microplastics in drinking water: a review on methods, occurrence, sources, and potential risks assessment [J]. Environmental Pollution, 2024, 348: 123857.

[4] Thompson C R, Olsen Y, Mitchell P R, *et al*. Lost at sea: where is all the plastic [J]. Science, 2004, 304(5672): 838.

[5] He Ding, Guo Ting, Li Jining, *et al*. Optimize lettuce washing methods to reduce the risk of microplastics ingestion: the evidence from microplastics residues on the surface of lettuce leaves and in the lettuce washing wastewater [J]. The Science of The Total Environment, 2023, 868: 161726.

[6] Federico C, Lo A G, Maurizio A. A plastic world: a review of microplastic pollution in the freshwaters of the Earth's poles [J]. The Science of the total environment, 2023, 869: 161847.

[7] Pico Y, Alfarhan A, Barcelo D. Nano- and microplastic analysis: focus on their occurrence in freshwater ecosystems and remediation technologies [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2019, 113: 409–425.

[8] Mutuku J, Yanotti M, Tocock M, *et al*. The abundance of microplastics in the world's oceans: a systematic review [J]. Oceans, 2024, 5(3): 398–428.

[9] Tao Yuqiang, Liang Hanxi, Wang Shengli, *et al*. Tracing footprint and risk of microplastics and microfibers in the lakes across China [J]. Environmental Science and Technology, 2025, 59: 20031–20040.

[10] Wang Kaifeng, Chen Quanhong, Cheng Qiming, *et al*. Unveiling the microplastic migration behavior in riverine systems: hydrodynamic impacts on transport and sedimentation [J]. Journal of Hydrology, 2026, 664(PB): 134467.

[11] Mason S A, Welch V G, Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water [J]. Frontiers in Chemistry, 2018, 6: 407.

[12] Kankanige D, Babel S. Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand [J]. Science of The Total Environment, 2020, 717: 137232.

[13] Mangala S P, Izzati N A S, Lana AN. Microplastics in Malaysian bottled water brands: occurrence and potential human exposure [J]. Environmental Pollution, 2022, 315: 120494.

[14] 蒋一帆, 宣洋, 钱佳怡, 等. 食品包装材料微塑料污染及其暴露风险研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(10): 126–133.
Jiang Yifan, Xuan Yang, Qian Jiayi, et al. Research progress on microplastics contamination and exposure risk of food packaging materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(10): 126–133.

[15] Fernando L A, Regiani C, Ribeiro G J, *et al*. Presence of airborne microplastics in human lung tissue [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 126124.

[16] Qin X, Cao M, Peng T, *et al*. Features, potential invasion pathways, and reproductive health risks of microplastics detected in human uterus [J]. Environmental Science and Technology, 2024, 58(24): 10482–10493.

[17] 徐艳, 孙逸凡, 张婷. 微塑料人体暴露及检测方法的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2024, 38(3): 237–242.
Xu Yan, Sun Yifan, Zhang Ting. Research progress on human exposure and detection methods of microplastics [J]. Journal of Toxicology, 2024, 38(3): 237–242.

[18] 王佳敏, 高峡. 微塑料检测技术进展及国内外标准现状[J]. 分析测试学报, 2025, 44(5): 936–946.
Wang Jiamin, Gao Xia. Advances in microplastic determination technologies and current status of domestic and international standards [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(5): 936–946.

[19] 赵明秋, 翟洪凯, 朱文博, 等. 微塑料检测与分析技术的研究进展[J]. 农业与技术, 2025, 45(23): 97–101.
Zhao Mingqiu, Zhai Hongkai, Zhu Wenbo, et al. Research progress on microplastic detection and analysis technology [J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(23): 97–101.

[20] 付文轩, 高旭波, 易玲, 等. 环境中微塑料检测方法的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(1): 72–82.
Fu Wenxuan, Gao Xubo, Yi Ling, *et al*. Research progress on microplastic detection methods in the environment [J]. Safety and Environmental Engineering, 2025, 32(1): 72–82.

[21] Fleurine A, Chaza C, Sebastien M, *et al*. Identification and quantification of plastic additives using pyrolysis-GC/MS: a review [J]. Science of The Total Environment, 2021, 773: 145073.

[22] Evans M S, Lynch M J. Previous successes and untapped potential of pyrolysis-GC/MS for the analysis of plastic pollution [J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2023, 415(15): 2873–2890.

[23] Pomata D, Nasa L J, Biale G, *et al*. Plastic breath: quantification of microplastics and polymer additives in airborne particles [J]. The Science of The Total Environment, 2024, 932: 173031.

[24] 贾菲菲, 赵耀, 汪福意. 质谱技术在微塑料分析领域的发展及应用[J]. 质谱学报, 2023, 44(2): 131–145.
Jia Feifei, Zhao Yao, Wang Fuyi. Development and application of mass spectrometry in microplastics analysis [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2023, 44(2): 131–145.

[25] 胡晓璇, 刘茜, 刘彦杰. 热裂解-气相色谱/质谱法测定地表水中 5 种微塑料[J]. 中国环境监测, 2025, 41(3): 182–189.
Hu Xiaoxuan, Liu Xi, Liu Yanjie. Determination of five microplastics in surface water by pyrolizer-GC-MS [J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41(3): 182–189.

[26] Faraji E, Sanz C P, Sarmah K A. A practical method for mass quantification of microplastics in soil media using pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry [J]. MethodsX, 2025, 15: 103711.

[27] Ding Ruoheng, Xie Yangxing, Xiao Tian, *et al.* Airborne microplastics from plastic manufacturing industry: concentrations and characterisation using Py-GC/MS and hyperspectral analysis [J]. Environment International, 2025, 207: 109936.

[28] Funck M, Yildirim A, Nickel C, et al. Identification of microplastics in wastewater after cascade filtration using Pyrolysis-GC-MS [J]. MethodsX, 2020, 7: 100778.

[29] Ribeiro F, Okoffo E D, O'brien J W, *et al*. Quantitative analysis of selected plastics in high-commercial-value Australian seafood by pyrolysis gas chromatography mass spectrometry [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(15): 9408–9417

[30] 陈智, 杨荞安, 张娜, 等. 热裂解-气质联用仪(PY-GC/MS)在微塑料分析中的应用[J]. 当代化工, 2024, 53(5): 1198–1207, 1232.
Chen Zhi, Yang Qiaoan, Zhang Na, *et al*. Application of pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry (PY-GC/MS) in analysis of microplastics [J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(5): 1198–1207, 1232.

[31] Maharjan K K. Microplastic pollution in bottled water: a systematic review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 22(2): 1–14.

(责任编辑: 曹岱琳 韩晓红)