

基于便携式 GC-MS 直接进样的消耗臭氧层物质 (ODS) 现场监测技术的实现及区域协同应用实践

杜立君, 李林, 谢银凤, 张耀华, 刘延锋

山东省潍坊生态环境监测中心, 山东 潍坊 261000

摘要:结合《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》履约需求及《消耗臭氧层物质管理条例》(2023年修订)有关要求,优化了便携式气相色谱-质谱仪(GC-MS)进样方式,即拆除顶空模块、适配采样接口并加装200 μ L定量环,采用直接进样方式进行检测。改进后仪器重18 kg(减重28%),可单人便携操作。硬质聚氨酯泡沫、组合聚醚样品检测结果显示:直接进样法与顶空法的定性匹配率为100%;相比顶空法,直接进样法总离子流色谱图(TIC)峰面积更优,单样品分析耗时从30 min缩至12 min(效率提升60%)。溴甲烷检测结果显示,基于改进后仪器的直接进样法与传统方法的定性匹配率为100%,新方法填补了国内现场监测技术空白。在山东-河北跨区域监测实践中,该技术体系使案件响应时间缩短了50%,数据互认率达100%,助力了对331家涉消耗臭氧层物质(ODS)企业的检查及对3起案件的查处,提高了ODS筛查效率,为跨区域协同执法提供了可复制范式。

关键词:便携式GC-MS;消耗臭氧层物质(ODS);直接进样;溴甲烷;区域协同

中图分类号: X830.2 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2025)S1-0087-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.11

The Implementation of On-Site Ozone-Depleting Substances Monitoring Technology via Portable GC-MS Direct Sample Injection and Its Regional Collaborative Application Practice

DU Lijun, LI Lin, XIE Yinfeng, ZHANG Yaohua, LIU Yanfeng

Weifang Ecological Environment Monitoring Center of Shandong Province, Weifang 261000, China

Abstract: In response to the compliance requirements of the *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer* and the relevant stipulations of the *Regulations on the Management of Ozone-Depleting Substances (2023 Revision)*, the injection method of portable GC-MS was optimized. This involved removing the headspace module, adapting the sampling interfaces, and adding a 200 μ L quantitative loop to enable direct injection for detection. The improved instrument weighs 18 kg (a 28% reduction in weight) and can be operated portably by a single-person. Tests results on rigid polyurethane foam and polyol blend samples showed a 100% qualitative match rate between the direct injection method and the headspace method. Compared to the headspace method, the direct injection method produced superior total ion chromatogram (TIC) peak areas and reduced the shortens single-sample analysis time from 30 min to 12 min (a 60% increase in efficiency). For methyl bromide monitoring, results indicated a 100% qualitative match rate between the direct injection method using the modified instrument and traditional methods, filling the domestic gap in on-site monitoring. In Shandong-Hebei cross-regional practice, this technical system reduced case response time by 50% and achieved a 100% data mutual recognition rate. It facilitated inspections of 331 ODS-related enterprises and the investigation of 3 related cases, thereby improving ODS screening efficiency and providing a replicable model for cross-regional collaborative law enforcement.

Keywords: portable GC-MS; ozone-depleting substances (ODS); direct injection; methyl bromide; regional collaboration

消耗臭氧层物质(ODS)是诱发并加剧臭氧层空洞问题的关键污染物,短期内难以完全消除,且会严重危害人类健康与生态环境^[1-6]。国际层面,《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》及其修正案明确要求缔约方逐步淘汰氯氟烃(CFCs)、氢氯氟烃(HCFCs)等ODS,并建立常态化监测体

系^[7]。国内层面,我国作为发展中国家,于2023年修订了《消耗臭氧层物质管理条例》,进一步强化了定性筛查、定量监管执法流程,要求生态环境部门提升ODS现场快速响应能力^[8],并且由于ODS污染与违法使用常涉及跨区域流动,条例对跨区域监测数据互通、执法协同提出了更高要

收稿日期: 2025-10-05; 修订日期: 2025-10-29

第一作者简介: 杜立君(1990-),女,山东烟台人,本科,高级工程师。

通讯作者: 刘延锋

求^[9]。我国对 CFC-11 已实施全面淘汰;对 HCFC-141b 则分行业逐步限制和禁止使用,并将在 2030 年实现除维修和特殊用途以外的完全淘汰^[9];对溴甲烷使用也实施严格管控,于 2019 年全面禁止了农业使用,仅保留检疫熏蒸豁免用途^[10]。尽管管控体系不断完善,但目前仍存在 ODS 违法使用情况。

当前,我国 ODS 测定以实验室方法为主^[11-14],主要采用的现场监测标准为《硬质聚氨酯泡沫和组合聚醚中 CFC-12、HCFC-22、CFC-11 和 HCFC-141b 等消耗臭氧层物质的测定 便携式顶空/气相色谱-质谱法》(HJ 1058—2019)。HJ 1058—2019 采用顶空预处理-气相色谱-质谱(GC-MS)联用技术,可测定硬质聚氨酯泡沫与组合聚醚中的 4 种关键 ODS^[15]。但在现场实际应用中,该方法仍需进行多方面优化:一是硬质聚氨酯泡沫采样需通过切割、剥离获取实体样本,且需在不同部位采集至少 3 个包装单元(每单元 2 份样品),会在一定程度上破坏墙体结构稳固性,造成安全隐患;二是顶空进样模块为独立组件,与便携式 GC-MS 主机组合后的体积、质量偏大,户外作业时需 2~3 人协作搬运,特别是在山区监测点或园区狭窄通道等场景中,设备运输与布设难度显著增加,现场监测灵活性有待提高;三是溴甲烷监测当前依赖的是《环境空气 65 种挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759—2023),需进行实验室分析,分析周期超过 24 h,存在响应滞后问题,无法支撑即时开展现场防护决策及违法使用排查^[16];四是跨区域监测协同性不足,存在重复监测问题,影响执法效率。

从研究及应用现状来看,国际上,美国环保署(EPA) Method 8260C 将直接进样法纳入挥发性有机物现场监测推荐方法^[17];国内研究虽涉及硬质聚氨酯泡沫和组合聚醚中 ODS 的便携式 GC-MS 顶空测定方法优化^[18],但在便携设备直接进样改造领域仍属空白,且针对多基质(硬质聚氨酯泡沫、组合聚醚)监测、溴甲烷监测、区域协同应用这三方面的综合验证案例均较为缺乏。

1 材料与方法

1.1 研究内容

本研究通过法规论证—仪器改造—性能验证—区域应用的技术路径,拟实现四大目标:一

是从法规、技术上明确直接进样改造的合法合规性,规避执法风险;二是提升仪器便携性与分析效率,优化现场监测技术;三是拓展溴甲烷现场监测能力,填补国内现场监测技术空白;四是验证改进后方法的现场适用性,同时提供区域协同应用成功案例。

1.2 仪器改造

仪器设备:便携式顶空/GC-MS 仪(瑞士 INFICON, HAPSITE ER, 质量分析器为四极杆)。

顶空模块拆除与接口适配:拆除原有前处理顶空进样模块(质量为 7 kg),采用 316 不锈钢接头将采样探头直接与进样口连接,适配现场直接取样需求。

按照 HJ 1058—2019 进行色谱系统、柱温程序与定量环加装设定。

色谱系统:DB-WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm×1.0 μm)。

柱温程序:初始温度为 50 ℃,保持 3 min,以 25 ℃/min 速率升至 180 ℃,保持 3 min^[15]。

定量环加装:安装 200 μL 定量环,传输线温度为 60 ℃,载气为高纯氮气(纯度大于 99.999%)。

1.3 样品采集与处理

ODS 样品:按照 HJ 1058—2019 进行样品采集,在常温避光密封条件下运输和保存,10 d 内检测完毕^[15]。选取所采集样品中的 9 个(山东潍坊,2 个硬质聚氨酯泡沫成品、4 个组合聚醚样品;山东青岛,2 个硬质聚氨酯泡沫成品;河北廊坊,1 个硬质聚氨酯泡沫成品)进行方法研究。

溴甲烷样品:开展溴甲烷现场监测,对部分地块进行常规监测,对存在溴甲烷气瓶遗留的 2 块农田地块实施重点监测。在药剂投放区采用棋盘式布点法,在下风向及侧风向区域布设采样点位,在上风向区域布设背景对照点位。布点时避开灌溉沟渠及道路干扰,共布设 20 个点位。

1.4 指标验证

法规契合与技术合规性:明确直接进样法在 ODS 执法监测中的合法合规性。

定性一致性:以顶空法(HJ 1058—2019 推荐方法)为基准,采用 NIST 谱库匹配度≥90%为判定标准,计算直接进样法的定性匹配率(匹配样品数/总样品数×100%)。

分析灵敏度:通过总离子流色谱图(TIC)对比直接进样法与顶空法的灵敏度,TIC 峰强度直

接反映进入质谱离子源的目标物总量。

分析效率:记录单样品从准备、进样、分析到冷却的全流程耗时,计算时间节省率[(顶空法耗时-直接进样法耗时)/顶空法耗时 $\times 100\%$]。

环境适应性:比较直接进样法与顶空法在硬质聚氨酯泡沫及组合聚醚采样过程中的差异。

溴甲烷现场监测应用拓展:聚焦地块污染排查布设监测点,采用直接进样法进行定性监测,明确测定结果与溴甲烷特征图谱的匹配度。

区域协同应用:通过实际工作展示区域协同应用效果。

2 结果与分析

2.1 法规契合与技术合规性

依据《消耗臭氧层物质管理条例》(2023年修订)的有关规定,生态环境主管部门查处 ODS 违

法案件时,应当以定量监测结果为依据,定性筛查结果不得作为处罚依据^[8]。ODS 定量监测主要是采用《组合聚醚中 HCFC-22、CFC-11 和 HCFC-141b 等消耗臭氧层物质的测定 顶空/气相色谱-质谱法》(HJ 1057—2019),而直接进样法仅用于前期筛查且不作为执法依据,这进一步确保了监测与执法流程的合规性,同时有效规避了潜在风险。

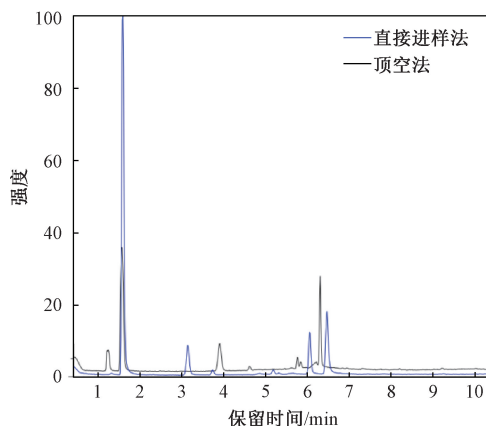
同时,该方法的技术路线与现行法规的有关要求高度契合:采用 200 μL 定量环,仅优化进样头结构,未改变 GC-MS 的核心原理,符合 HJ 1058—2019 的技术参数要求^[15]。

2.2 定性一致性

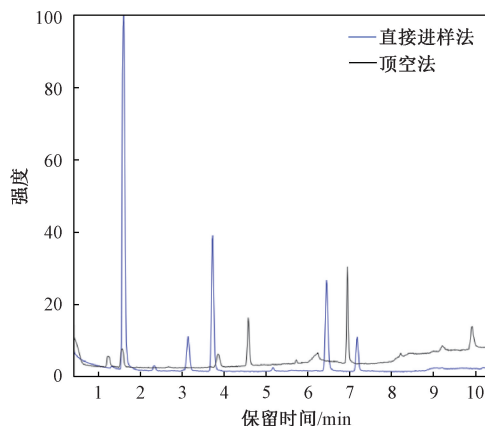
9 个 ODS 实际样品(涵盖硬质聚氨酯泡沫、组合聚醚两类基质)的定性一致性结果详见表 1,顶空法与直接进样法对两类基质实际样品的检测比对谱图见图 1。

表 1 顶空法与直接进样法的定性一致性比对
Table 1 Comparative analysis of the qualitative consistency between the headspace method and the direct injection method

样品号	物质	基质类型	检测结果		匹配率/%
			顶空法	直接进样法	
1	CFC-11	组合聚醚	检出	检出	100
2	CFC-11	组合聚醚	检出	检出	100
3	HCFC-141b	组合聚醚	检出	检出	100
4	HCFC-141b	组合聚醚	检出	检出	100
5	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	检出	检出	100
6	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	检出	检出	100
7	HCFC-141b	硬质聚氨酯泡沫	检出	检出	100
8	HCFC-141b	硬质聚氨酯泡沫	检出	检出	100
9	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	检出	检出	100



(a) 硬质聚氨酯泡沫中目标物保留时间比对



(b) 组合聚醚中目标物保留时间比对

图 1 顶空法与直接进样法的目标物保留时间比对

Fig. 1 Comparison of target analyte retention times between the headspace method and the direct injection method

在相同色谱条件下,两种方法的目标物保留时间基本一致,由此可确认样品中目标物的定性结果可靠,定性匹配率达100%。这意味着两种方法对所有样品中目标 ODS 的检出结果完全一致,进一步证明直接进样法的定性准确性符合现场监测的技术要求。

2.3 分析灵敏度

9 个 ODS 实际样品(涵盖硬质聚氨酯泡沫、

组合聚醚两类基质)的分析灵敏度结果详见表 2,两种方法的 TIC 峰面积直观对比见图 2。

数据显示,直接进样法的 TIC 峰面积均显著高于顶空法。该差异清晰表明,直接进样法能使更多目标物进入质谱离子源,由此证明其分析灵敏度更优,可更精准地捕捉样品中低含量的目标物质,为微量 ODS 的现场筛查提供更可靠的技术支撑。

表 2 顶空法与直接进样法的 TIC 峰面积比对

Table 2 Comparison of TIC peak areas between the headspace method and the direct injection method

样品号	物质	基质类型	顶空法	直接进样法
1	CFC-11	组合聚醚	1.58×10^6	2.06×10^7
2	CFC-11	组合聚醚	2.99×10^6	2.53×10^7
3	HCFC-141b	组合聚醚	1.67×10^8	7.21×10^8
4	HCFC-141b	组合聚醚	8.20×10^5	4.47×10^6
5	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	7.38×10^6	2.06×10^7
6	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	6.52×10^6	1.94×10^7
7	HCFC-141b	硬质聚氨酯泡沫	9.44×10^5	5.20×10^6
8	HCFC-141b	硬质聚氨酯泡沫	5.93×10^6	3.68×10^7
9	HCFC-141b	硬质聚氨酯泡沫	5.91×10^5	4.09×10^6
9	CFC-11	硬质聚氨酯泡沫	7.24×10^6	3.05×10^7

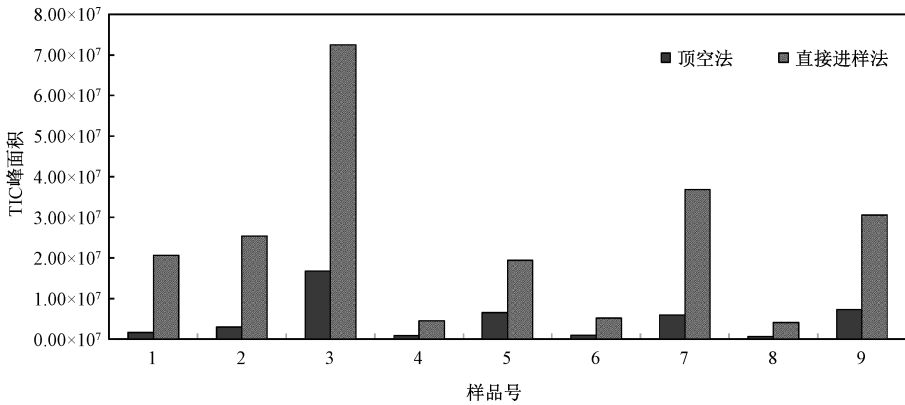


图 2 顶空法与直接进样法的 TIC 峰面积比对

Fig. 2 Comparison of TIC between the headspace method and the direct injection method

2.4 分析效率

两种方法的时间消耗对比详见表 3。其中,直接进样法单样品分析流程(含进样、分析、冷却)总耗时约 12 min,而顶空法耗时约 30 min,直接进样法比顶空法节省了约 60%

的时间。

针对某组合聚醚企业的现场实测结果进一步彰显了这一优势:采用直接进样法在 2 h 内可完成 8~9 个样品的筛查工作,采用顶空法则需 4 h 以上才能完成同等数量样品的筛查工作。

表 3 顶空法与直接进样法时间消耗对比

Table 3 Comparison of time consumption between the headspace method and the direct injection method

流程环节	顶空法耗时/min	直接进样法耗时/min	直接进样法时间节省率/%
样品采集	5	0	100
样品处理	3	0	100
顶空平衡/进样	10	1	90
仪器分析	10	10	0
进样后清洗、冷却	2	1	50
单次样品总耗时	30	12	60

2.5 环境适应性

直接进样法在不同基质 ODS 样品的现场监测中,展现出优异的环境适应性,能精准适配多样化场景需求,具体表现如下:

1) 硬质聚氨酯泡沫样品。现场采用直接进样法监测,无须提取实体样本,即可直接获取材料内部目标物相关特性数据。该方法既契合 HJ 1058—2019 的现场监测要求,又能避免传统采样

对墙体、围护结构完整性的破坏,在冷库等需保障结构安全的排查场景中,优势尤为突出。

2) 组合聚醚样品。针对不同规格、类型的储罐,可通过定制化接口实现原桶原位监测,无须转移样品至顶空瓶,有效解决了大型储罐传统采样操作难度大、易引发化学品泄漏的安全隐患。

直接进样法与顶空法在环境适应性上的具体差异见表 4、表 5。

表 4 顶空法与直接进样法的硬质聚氨酯泡沫环境适应性比对

Table 4 Comparison of rigid polyurethane foam environmental adaptability between the headspace method and the direct injection method

对比维度	顶空法	直接进样法
结构影响	破坏墙体、护围结构完整性	仅钻微型孔洞,可快速密封修复
企业配合度	抵触情绪强	接受度高,不影响正常运营
操作效率	30~40 min/批次	12~15 min/批次
数据代表性	依赖单一实体样本,易失真	多监测点覆盖,数据更全面
综合成本	高(含采样、修复)	低(仅设备操作及孔洞密封成本)

表 5 顶空法与直接进样法的组合聚醚环境适应性比对

Table 5 Comparison of polyol blend environmental adaptability between the headspace method and the direct injection method

对比维度	顶空法	直测法(原桶直接测量)
样品处理方式	取出样品至顶空瓶	原桶原位检测,不取出样品
ODS 组分稳定性	易挥发,可能导致结果偏低	密封体系,组分状态完全保留
操作耗时	30~40 min/批次	12~15 min/批次
安全风险	需接触化学品,存在泄漏风险	非侵入操作,风险极低

2.6 溴甲烷现场监测应用拓展

结合地块熏蒸历史、使用记录及环境风险特征,开展针对性溴甲烷专项监测工作。针对遗留在两块农田内的溴甲烷气瓶的周边区域,共精准布设 20 个监测点位,全面覆盖常规环境区域与重点关注区域。监测全程采用便携式 GC-MS 法进行溴甲烷定性分析,无须进行样品预处理,能现场快速获取监测数据。经与溴甲烷标准特征图谱比对,所有监测点位的定性结果匹配度 $\geq 90\%$,成功精准锁定溴甲烷风险区域。

2.7 区域协同监测应用

2.7.1 区域协同监测提速

构建以“监测技术支撑”为核心的协同体系,重点通过技术优化与流程改进提升监测科学性与准确性。改造前,跨区域 ODS 监测采用“地方生态环境部门取样—监测中心实验室分析—公安部门介入”的单向流程。实验室分析周期长,导致现场定性响应滞后;跨区域取样缺乏统筹,易出现样品保存偏差。以上两点影响着监测数据一致性。

改造后,依托直接进样法的技术优势,实现对 CFC-11 等 ODS 物质的现场快速定性分析。该方法基于 GC-MS 的核心原理,通过优化进样头结构

与 200 μL 定量环设计,确保目标物定性检出的稳定性符合 HJ 1058—2019 的技术参数要求。同时,建立跨区域监测数据共享机制,现场定性结果实时同步,避免重复取样带来的样品差异,保障跨区域监测数据的可比性与准确性。

通过优化监测流程,跨区域 ODS 现场定性响应时间缩短 60% 以上,从案件触发到监测数据确认的总周期由 10 d 压缩至 5 d,大幅提升了监测时效性。同时,统一的现场监测标准及数据共享模式,有效减少了取样、分析环节的人为误差,进一步强化了跨区域 ODS 监测的科学性,为后续相关工作提供了可靠的数据支撑,有效杜绝了监测滞后或数据偏差导致的信息断层问题。

2.7.2 联合执法闭环落地

2025 年,依托协同响应体系,完成了对山东潍坊 331 家涉 ODS 企业的现场检查,形成了数据统一、执法同步、查处闭环的协同成效。

1) 数据互认(监测与执法协同)。对 3 个跨区域共享样品(河北某组合聚醚生产企业样品)进行同步监测,定性结果互认率达 100%,消除了同案不同判的执法尺度差异,减轻了跨区域重复监测的负担,满足了跨区域 ODS 协同监管的要求。

2) 执法同步(环保与公安联动)。通过直接进样法精准识别 CFC-11 禁用物质,向生态环境管理部门实时反馈 3 家组合聚醚企业违规线索。经生态环境管理部门现场核查、实验室定量分析确认违法事实后,立即与公安部门对接案件移送流程,实现线索发现、违法认定、立案查处无缝衔接。目前,3 家涉案企业已全部由公安机关立案查处。

3 讨论

3.1 与同类研究的技术参数对比

本研究以“直接进样法改造+多场景适用+区

域协同”为核心,与国内 ODS 监测相关优化研究^[18]等同类研究相比,在技术路径、监测效能及应用范围上存在显著突破,具体对比见表 6。

3.2 现场监测场景的创新突破

3.2.1 优化传统技术的现场适配性

同类研究^[18]虽实现顶空优化,但未解决设备笨重、采样破坏问题,采样仍需切割泡沫(破坏墙体)。本研究通过拆除顶空模块(质量从 25 kg 降至 18 kg)实现“单人背负作业”,且泡沫采样仅需钻小孔(不破坏墙体),在冷库、狭窄车间(如 0.5 m 宽通道)等场景中可“即到即测”,现场适用性显著提升。

表 6 本研究同类 ODS 监测研究的关键参数对比

Table 6 Comparison of key parameters between this study and similar ODS monitoring studies

对比维度	本研究	同类研究(优化研究) ^[18]	差异要点(本研究创新点)
技术核心	便携式 GC-MS 直接进样改造(拆顶空)	顶空法参数优化(未改造进样方式)	1. 拆除顶空模块(减重 28%),适配现场单人作业; 2. 覆盖硬质泡沫、组合聚醚、溴甲烷多基质
分析效率	单样 12 min(节省 60%)	单样 25~28 min(顶空优化后)	省去顶空平衡步骤,效率更高
溴甲烷监测能力	现场 12 min 定性(匹配度 ≥90%)	未涉及溴甲烷现场监测	填补国内溴甲烷现场快速定性技术空白(传统实验室法需 24 h ^[16])
环境适应性	无破坏采样(无需切割泡沫)	仍需切割泡沫采样(破坏结构)	解决采样破坏引发企业抵触的痛点,企业接受度 ≥90%
区域协同功能	数据实时共享(互认率 100%)	无区域协同设计	构建管理闭环,缩短案件响应时间

3.2.2 填补溴甲烷现场监测的技术空白

国内外同类研究均未涉及溴甲烷现场快速监测。传统方法依赖 HJ 759—2023 实验室分析(周期>24 h^[16]),无法满足应急排查需求。本研究通过直接进样法实现 12 min 内溴甲烷定性(匹配度 ≥90%),可快速锁定风险区域,为溴甲烷违法排查提供即时技术支持。

3.3 跨区域协同的机制创新

传统跨区域 ODS 监测存在流程断层问题,需经属地取样、实验室分析再反馈至执法环节,且重复取样还会导致数据偏差。对此,本研究构建“双协同”机制予以针对性解决。技术上,统一直接进样法参数,实现跨区域样品定性互认率 100%。数据上,将现场检测结果实时上传共享,避免重复监测。最终,形成“数据统一、执法同步、查处闭环”的协同成效,不仅压缩了实验分析周期,还有效解决了同案不同判和响应滞后的问题。

4 结论与启示

4.1 结论

本研究结合《关于消耗臭氧层物质的蒙特利

尔议定书》履约需求及《消耗臭氧层物质管理条例》(2023 年修订)有关要求,以 HJ 1058—2019 为技术基准,优化便携式顶空/GC-MS 仪(瑞士 INFICON, HAPSITE ER)进样方式,完成了样品验证及区域协同监测应用效能评估。

1) 实现法规契合度与技术合规性双重落地。定性筛查结果仅用于前期筛查环节,不涉及处罚判定,符合《消耗臭氧层物质管理条例》(2023 年修订)的有关规定,法规契合度高。原顶空进样模块作为前处理单元,核心作用是将待测物质转化为气体,使其成为适配 GC-MS 仪的进样状态。因后续监测物质为易挥发、基体简单的样品,可无需顶空模块。此外,拆除顶空模块后,原管路、线缆等接口可直接适配现有系统,未改变 GC-MS 核心原理,符合 HJ 1058—2019 技术参数要求,不会对 ODS 监测的准确性与合规性造成影响。综上,改进后仪器从方法定位到设备调整均形成完整的合规闭环。

2) 提升了现场监测实用性。仪器质量从 25 kg 降至 18 kg(降幅 28%),实现单人可背负连续作业 2 h,摆脱传统设备需 2~3 人搬运的困境,

能更好地适配狭窄空间作业(如河北某组合聚醚生产企业车间通道宽度为 0.5 m),解决传统顶空设备进不去、测不了的问题,实现疑点区域“即到即测”,消除空间制约对执法效率的影响。直接进样法省去顶空平衡步骤,将取样-定性周期从 30 min 压缩至 12 min,进一步提高现场监测效率。针对硬质聚氨酯泡沫样品监测,无须过度切割、剥离,即可在材料不同部位进行定性监测,既保障墙体结构稳固性、降低安全风险,又打消企业顾虑,同时确保定性结果准确,实现“安全、高效”监测。

3)能够适配多元监测需求。改进后仪器可通过直接进样法开展溴甲烷现场定性监测,在 12 min 内完成溴甲烷谱图匹配,较传统超过 24 h 的监测方法,周期显著缩短,实现目标物质快速判定。该监测方式可灵活应用于应急筛查、日常风险监测,解决响应慢、应急难的问题,填补国内溴甲烷现场监测领域的技术空白,为污染防治与违法排查提供即时技术支撑。

4)构建 ODS 跨区域协同应用体系。依托直接进样法进行现场定性监测,使案件总响应时间缩短 50%,跨区域样品数据互认率达 100%,避免了跨区域重复监测,保证了跨区域 ODS 监管标准的一致性。这一体系加速了案件线索锁定,可显著提升违法案件查处的协同效率,缩短跨区域执法响应周期,为 ODS 跨区域协同监管提供可复制的流程范式。

4.2 启示

1)强化多组分协同监测。结合《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》履约要求,以及 2025 年我国氢氟碳化物(HFCs,为 ODS 替代物)配额管理现状^[9,19-20],基于 HJ 1058—2019 中的有关参数,优化分段升温程序,调整质谱 SIM 离子组,从而实现多种物质基线分离,进一步满足 ODS 管控+替代物追溯需求。

2)加强物联网功能集成。在便携仪中嵌入 4G/5G 模块,实时上传监测数据(含点位坐标、特征峰匹配度)至跨区域平台,设置自动核验规则(如匹配度 $\geq 90\%$ 触发预警),省去人工录入环节,将线索响应从小时级压缩至分钟级,防范违法企业转移证据。

3)开发多基质定量方法。针对硬质聚氨酯泡沫、组合聚醚,制备系列标准样品,绘制基质匹配校准曲线;集成内置标准品自动校正模块,控制

误差,实现一次采样同步完成定性定量,为执法提供依据。

4)统一现场监测标准。聚焦溴甲烷现场监测效能提升,从技术优化与标准构建双维度发力,对接国家生态环境标准体系,建立统一的现场监测标准,明确采样流程、仪器参数校准要求及数据核验阈值,规范操作环节,为基层执法提供标准化技术支撑,助力精准打击溴甲烷违法使用行为。

5)构建区域一体化管理体系。构建“现场筛查-精准定量-数据共享-联合执法”体系,明确责任分工,强化技术推广并同步开展培训,统一跨区域执法标准。

参考文献(References):

- [1] 金玲仁,曹方方,颜涛,等. CFCs 生产企业废水及产品成分快速检测分析[J]. 中国环境监测,2015,31(6):125-128.
JIN Lingren, CAO Fangfang, YAN Tao, et al. Rapidly Detection of CFCs in Products and It's Wastewater Produced by Illegal Companies [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(6): 125-128.
- [2] RAVISHANKARA A R, SOLOMON S, TURNIPSEED A A, et al. Atmospheric Lifetimes of Long-Lived Halogenated Species [J]. Science, 1993, 259(5 092): 194-199.
- [3] MOLINA M J, ROWLAND F S. Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalysed Destruction of Ozone[J]. Nature, 1974, 249(5 460): 810-812.
- [4] MONTZKA S A, MYERS R C, BUTLER J H, et al. Early Trends in the Global Tropospheric Abundance of Hydrochlorofluorocarbon-141b and 142b [J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21(23): 2 483-2 486.
- [5] 张良瑜,丁峰,王鸣,等. 2022 年春季南京臭氧污染特征及成因分析[J]. 中国环境监测,2024,40(2): 53-62.
ZHANG Liangyu, DING Feng, WANG Ming, et al. Analysis on the Characteristics and Causes of Ozone Pollution in Nanjing in the Spring of 2022 [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(2): 53-62.
- [6] 刘纯,周兴军,郝峰,等. 呼和浩特夏季大气挥发性有机物来源及其对臭氧生成潜势的贡献[J]. 中国环境监测,2025,41(5): 94-105.
LIU Chun, ZHOU Xingjun, HAO Feng, et al. Sources

- of Atmospheric Volatile Organic Compounds and Their Contribution to Ozone Formation Potential in Hohhot in Summer [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(5): 94-105.
- [7] 于燕,徐宏辉,姚波,等.京津冀与长三角地区氢氟碳化物本底特征[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(4): 60-70.
YU Yan, XU Honghui, YAO Bo, et al. Study on the Background Characteristics of Hydrochlor of fluorocarbons in the Beijing-Tianjin-Hebei and the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(4): 60-70.
- [8] 国务院. 消耗臭氧层物质管理条例 [Z/OL]. (2024-01-05) [2025-09-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924478.htm.
- [9] 生态环境部,国家发展改革委,工业和信息化部,等. 中国履行《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》国家方案(2025—2030年) [Z/OL]. (2025-04-09) [2025-09-01]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202504/W020250423386357398288.pdf>.
- [10] 农业部. 中华人民共和国农业部公告 第2552号 [EB/OL]. (2017-08-20) [2025-09-01]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103_6133997.htm.
- [11] 江苏省产品质量监督检验研究院,国家工程复合材料产品质量监督检验中心. 硬质聚氨酯泡沫中残留发泡剂的测定: DB32/T 1718—2011 [S]. 2011-04-20.
- [12] 江苏省产品质量监督检验研究院,国家工程复合材料产品质量监督检验中心. 聚苯乙烯泡沫中残留发泡剂的测定: DB32/T 1719—2011 [S]. 2011-03-30.
- [13] 中国轻工业联合会. 硬质聚氨酯泡沫塑料中残留发泡剂的测定: QB/T 5114—2017 [S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- [14] 生态环境部. 组合聚醚中 HCFC-22、CFC-11 和 HCFC-141b 等消耗臭氧层物质的测定 顶空/气相色谱-质谱法: HJ 1057—2019 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [15] 生态环境部. 硬质聚氨酯泡沫和组合聚醚中 CFC-12、HCFC-22、CFC-11 和 HCFC-141b 等消耗臭氧层物质的测定 便携式顶空/气相色谱-质谱法: HJ 1058—2019 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [16] 生态环境部. 环境空气 65 种挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法: HJ 759—2023 [S/OL]. (2023-02-09) [2025-09-01]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcfffz/202303/W020230314363574522182.pdf>.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency. Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS): Method 8260C [S]. (2006-08-01) [2025-09-01]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-06/documents/method_8260c_rev_3_8-1-2006.pdf.
- [18] 蒋洋,谭丽,陈焯,等. 硬质聚氨酯泡沫和组合聚醚中消耗臭氧层物质的便携式 GC-MS 测定方法 [J]. *中国环境监测*, 2020, 36(5): 153-159.
JIANG Yang, TAN Li, CHEN Ye, et al. In Situ Detection of Ozone Depleting Substances in Rigid Polyurethane Foam and Compound Polyether [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(5): 153-159.
- [19] 生态环境部. 生态环境部大气环境司有关负责人就《关于严格控制氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》答记者问 [EB/OL]. (2024-08-05) [2025-09-01]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202408/t20240805_1083390.shtml.
- [20] 生态环境部. 生态环境部大气环境司有关负责人就《关于印发 2025 年度消耗臭氧层物质和氢氟碳化物配额总量设定与分配方案的通知》答记者问 [EB/OL]. (2024-11-13) [2025-09-01]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbft/202411/t20241113_1095266.shtml.