

热脱附-气相色谱质谱法分析空气中的痕量气态全氟烷基和多氟烷基化合物

关键词

ISQ7610单四级杆气质联用仪；TD100-xr热脱附仪；全氟烷基和多氟烷基化合物

摘要

本篇应用案例介绍了一种采样和分析方法，主要针对空气中一系列具有挑战性的痕量挥发性和半挥发性全氟烷基与多氟烷基化合物 (PFAS)。使用了赛默飞具有突出优秀性能的ISQ7610单四级杆气相色谱质谱仪(GC-MS)技术和 Markes International 的TD100-xr™ 自动热脱附 (TD) 系统，该系统无需制冷剂，完全符合相关国际标准方法。¹⁻⁵ 所用方法在测试的多种目标化合物中均展现了出色的方法性能 (线性、重复性、储存稳定性等)，即使化合物浓度为低于 ppt 级。

引言

全氟烷基和多氟烷基化合物 (PFAS) 是一类持久性有机污染物，可从多种工业和日常来源进入环境之中，包括防水涂料、消防设备和不粘炊具。PFAS 类化合物数量众多，最近的研究报告中引用了超过 6000 种涵盖不同的挥发性、极性和官能团的 PFAS 化合物。⁶

PFAS 监测当前面临的挑战包括：

- 感兴趣的化合物的数量庞大 (目前没有任何一种单一分析方法适用于所有化合物)。
- 浓度低 (通常为低于ppt或亚 ppt级)。
- 真实环境中存在的 PFAS 化合物的特性及含量尚不清楚。最后且更重要的一点是，在监管机构和研究人员的角度来看，未知 (非目标) PFAS 类物质与已被列入《斯德哥尔摩公约》的全氟辛烷磺酸 (PFOS) 和全氟辛酸 (PFOA) 的已知目标化合物具有相同的重要性。⁷



适用于 TD-GC-MS 分析的 PFAS 化合物主要分为两类：

- 极易挥发的全氟碳氢化合物 (C1~C3)，也称为强效温室气体或消耗臭氧层物质，通常需要进行全气采样 (罐、在线监测或气袋)。
- 挥发性或半挥发性 PFAS 物质，例如全氟烷基羧酸 (C4 ~C14)、含氟调聚物醇 (FTOH)、含氟调聚物丙烯酸酯 (FTAcrs) 和含氟调聚物磺酰胺 (FOSA)，可抽吸至吸附管上进行采样。

从人体健康和环境的角度来看，空气中的痕量 PFAS 令人担忧，但空气监测科学家对此并非束手无策，一项针对此问题开发的技术应运而生—现代化 TD-GC-MS 分析系统，该系统专为监测痕量有机物蒸气而设计，结合获得了最新进展的自动化 TD 技术，越来越多“顽固”化合物的分析难题将逐一得到解决。本研究的目的是评估最新的市售吸附管采样和自动 TD-GC-MS 分析技术在分析挥发性和半挥发性 PFAS 方面的性能。

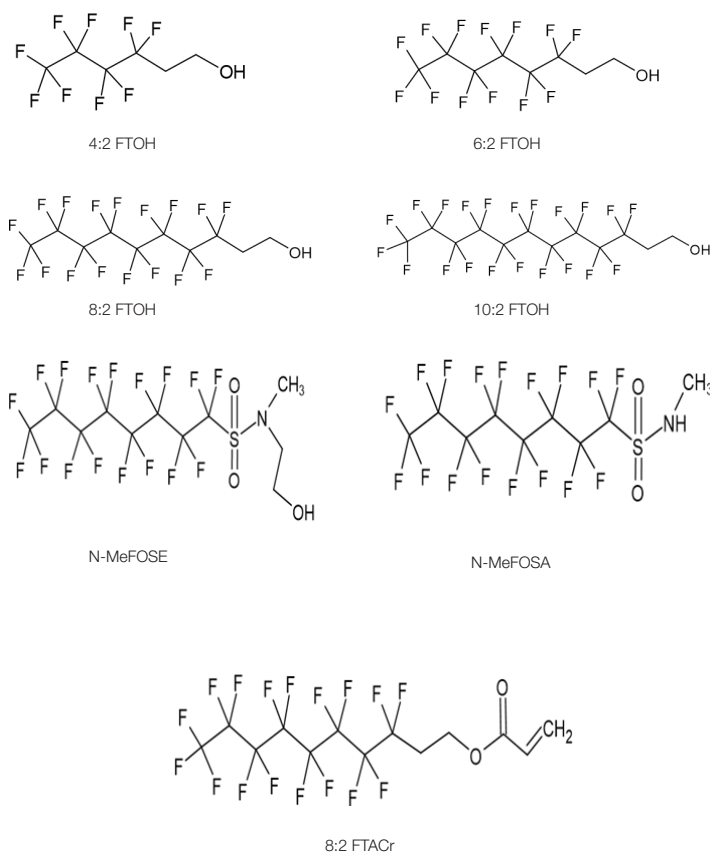


图 1: 标准品中含氟调聚物醇、丙烯酸酯和磺酰胺的分子结构。

实验

标准品

在本研究中，我们选择了 18 种标准化合物来验证该方法。这些分析物涵盖不同的化学基团，所有分析物都适用于 GC-MS 分析。其中包括 11 种全氟羧酸 (PFCA)、四种含氟调聚物醇、全氟烷烃磺酰胺和磺酰胺醇以及半挥发性氟调聚丙烯酸酯类物质 8:2 FTACr。值得注意的是，用于表征水中 PFAS 的分析系统难以鉴别某些化合物种类，例如含氟调聚物醇 (PFCA 的挥发性前体) 和链长少于 C8 的化合物。标准品中使用的化合物完整列表见表 1，结构式如图 1 所示。

表 1: 检测的PFAS化合物

化合物	标准品浓度
全氟烷基羧酸	
全氟丁酸	PFBA
全氟戊酸	PFPeA
全氟己酸	PFHxA
全氟庚酸	PFHpA
全氟辛酸	PFOA
全氟壬酸	PFNA
全氟癸酸	PFDA
全氟十一烷酸	PFUdA
全氟十二烷酸	PFDoA
全氟十三烷酸	PFTTrDA
全氟十四烷酸	PFTeDA

2 ng/μL

含氟调聚物醇		
2-全氟丁基乙醇	4:2 FTOH	50 ng/μL
2-全氟己基乙醇	6:2 FTOH	
2-全氟辛基乙醇	8:2 FTOH	
2-全氟癸基乙醇	10:2 FTOH	
含氟调聚物丙烯酸酯		
1H,1H,2H,2H-全氟癸基丙烯酸酯	FTACr	50 ng/μL
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇		
N-甲基全氟-1-辛烷磺酰胺	N-MeFOSA	50 ng/μL
2-(N-甲基全氟-辛烷磺酰胺)乙醇	N-MeFOSE	

确定穿透体积

本研究选择了常规的室内空气监测管 (不锈钢“材料释放”管，部件号: PN: 76473-0908)，此管适用于从 1,3-丁二烯~n-C30 范围的非目标化合物的采集。这种疏水吸附剂的组合 (Tenax® TA 与石墨化炭黑) 最大限度地减少了采集潮湿空气时水分处理的难题。采样管经老化后，一半空白管作为备用管，另一半加入 1 μL 经甲醇稀释的混合标准品 (2 ng PFCA、12.5 ng FTOH 和 16.6 ng 其他 PFAS 化合物)，但 8:2 FTACr 例外，该化合物经异辛烷稀释。按照标准方法 1-5 中的建议，使用 Calibration Solution Loading Rig™ (Markes International，部件号: PN: 76473-0602) 将标准溶液加载到样品管，并使用 100 mL/min 的 N₂ 吹扫 10 分钟。

在这些实验中，将经过老化的装填有同样吸附剂的两根样品管串联，连接处推荐使用惰性接头 (部件号: C-UNS10) 将空白管的采样端连接至加标管的排气端 (图 2)。



图 2: 穿透实验: 两根经过老化的样品管串联。

使用不同体积的 N₂ 气以 50 mL/min 的速度对每对样品管进行吹扫。根据标准方法描述，当第二根样品管上分析物水平大于等于第一根加标样品管所测水平的 5% 时，即表示发生了穿透。对不同的 PFAS 化合物类型分别进行测试，所有测量结果见 (表 2)。在 50 L 内，包括 C4 在内的全氟羧酸类物质均未穿透，而在 20 L 内，所有 PFAS 标准品均未穿透。

因此决定在后续实验中使用 20 L 吹扫气体，并在此基础上计算检测限。20 L 的体积可以保证以 14 mL/min 的流速采样 24 小时、以 28 mL/min 的流速采样 12 小时或以 42 mL/min 采样 8 小时。

表 2: 穿透实验中, 第二根管上化合物检出浓度占第一根管上加标浓度的百分比(%)

化合物	空气体积	平均穿透率 (%)
全氟烷基羧酸		
PFBA + PFPeA	50 L	2.5
PFHxA		0.0
PFHpA		2.8
PFOA		2.4
PFNA		4.9
PFDA		3.9
PFUdA		2.1
PFDoA		2.2
PFTTrDA		2.3
PFTeDA		1.5
含氟调聚物醇		
4:2 FTOH	20 L	0.0
6:2 FTOH		2.0
8:2 FTOH		2.9
10:2 FTOH		2.1
含氟调聚物丙烯酸酯		
8:2 FTAc	20 L	0.0
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇		
N-MeFOSA	20 L	0.9
N-MeFOSE		5.8

储存稳定性

如前所述, 使用 Markes 的 Calibration Solution Loading Rig 在两个“材料释放”管中加入 1 μL 混合 PFAS 标准品 (PFCA 为 2 ng/ μL , FTOH 为 12.5 ng/ μL , 其他化合物为 16.6 ng/ μL)。然后使用标准方法中推荐的长期储存管帽对其进行密封 (图 3) 并储存, 将一部分加标样品管置于室温, 另一部分加标样品管置于冷藏条件下。



图 3: 经老化的吸附管的两端均使用国际标准方法中推荐的长期储存密封管帽

经不同的存放时间后, 将吸附管取出, 一式三份进行分析 (图 4 和 5)。这些添加 PFAS 化合物的吸附管在不影响其分析结果的前提下, 在室温下可保存 7 天, 在冷藏条件下可保存 15 天, 这表明“材料释放”管在样品运输和储存中表现的稳定性, 更适用于样品量大的实验室。

PFAS 目标混合物回收率



图 4: 在室温下, 加入 PFAS 标准混合物的吸附管储存 7 天后的回收率

PFAS 目标混合物回收率

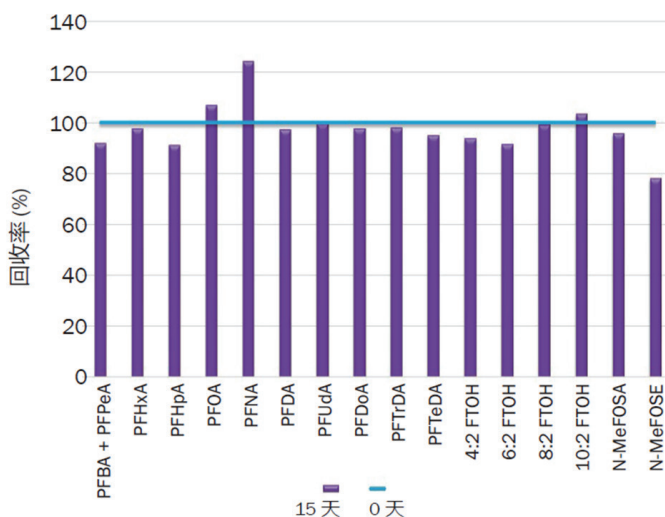


图 5: 在 5°C 下, 加入 PFAS 标准混合物的吸附管储存 15 天后的回收率

气相色谱柱选择

PFAS 类化合物的数量众多, 为了达到满意的分离效果, 选择合适的气相色谱柱十分重要; 经过大量测试, 最终我们选择了 TG-200MS 色谱柱, 因为它对于大部分化合物具有十分出色的分离度和峰形 (图 6)

仪器

Thermo Scientific™ ISQ 7610 气相色谱质谱联用仪

Markes International TD100-xr 热脱附仪

分析条件

TD

采样管：89 mm (3.5 英寸) × 6.4 mm 外径的标准不锈钢“材料释放”管，含有 Tenax TA 与石墨化炭黑吸附剂 (PN: 76473-0908)

流路温度：150°C

全自动干吹：以 50 mL/min 吹扫 2 分钟（从采样方向进行吹扫）

管脱附：在 300°C 下，以 50 mL/min 持续 12 分钟

冷阱吹扫：以 50 mL/min 吹扫 1 分钟（载气从聚焦方向吹扫）

聚焦冷阱：“材料释放”聚焦冷阱 (PN: 76473-0925)

聚焦冷阱低温：-30°C~25°C

聚焦冷阱高温：300°C (4 分钟)

冷阱加热速率：最大值

出口分流：6:1

GC

色谱柱：TG-200ms 30 m×0.25 mm×1.0 μm PN: 26084-2960

载气：氦气

柱流速：1.2 mL/min，恒流

程序升温：35°C 保持 2 分钟，以 15°C/min 升温至 325°C，保持 5 分钟

MS

离子源：300°C

传输线：325°C

扫描范围：m/z 40–650 (SIM 模式)：定量离子 – 95 (FTOH)、131 (PFCA、FTAc、N-MeFOSA)

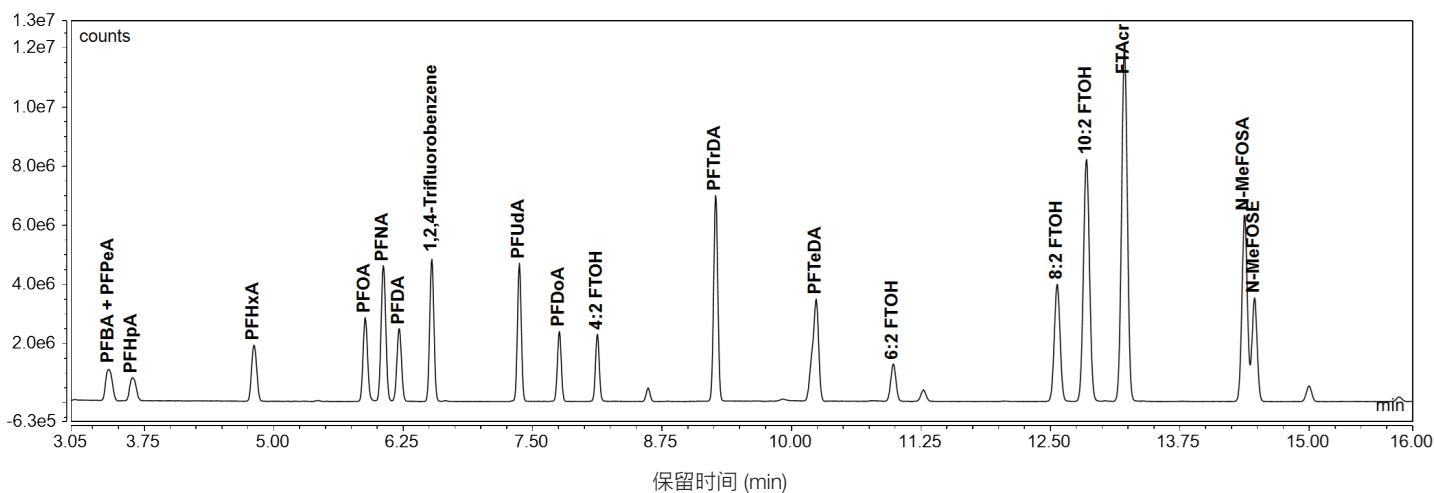


图 6：SIM 131 m/z 1 μL PFAS 标准混合物，浓度如下：各 PFAC 0.3 ng/μL、4:2 FTOH 10 ng/μL、6:2 FTOH、8:2 FTOH 和 10:2 FTOH 30 ng/μL、FTAc 4 ng/μL、N-MeFOSA 7 ng/μL 以及 N-MeFOSE 5.5 ng/μL

结果

系统和采样管空白

使用质谱仪在 SIM/Scan 模式下运行一系列空白实验，以检查系统和采样管对分析背景的影响水平。所得数据表明，目标 PFAS 化合物的浓度均在检出限以下，见图 7。

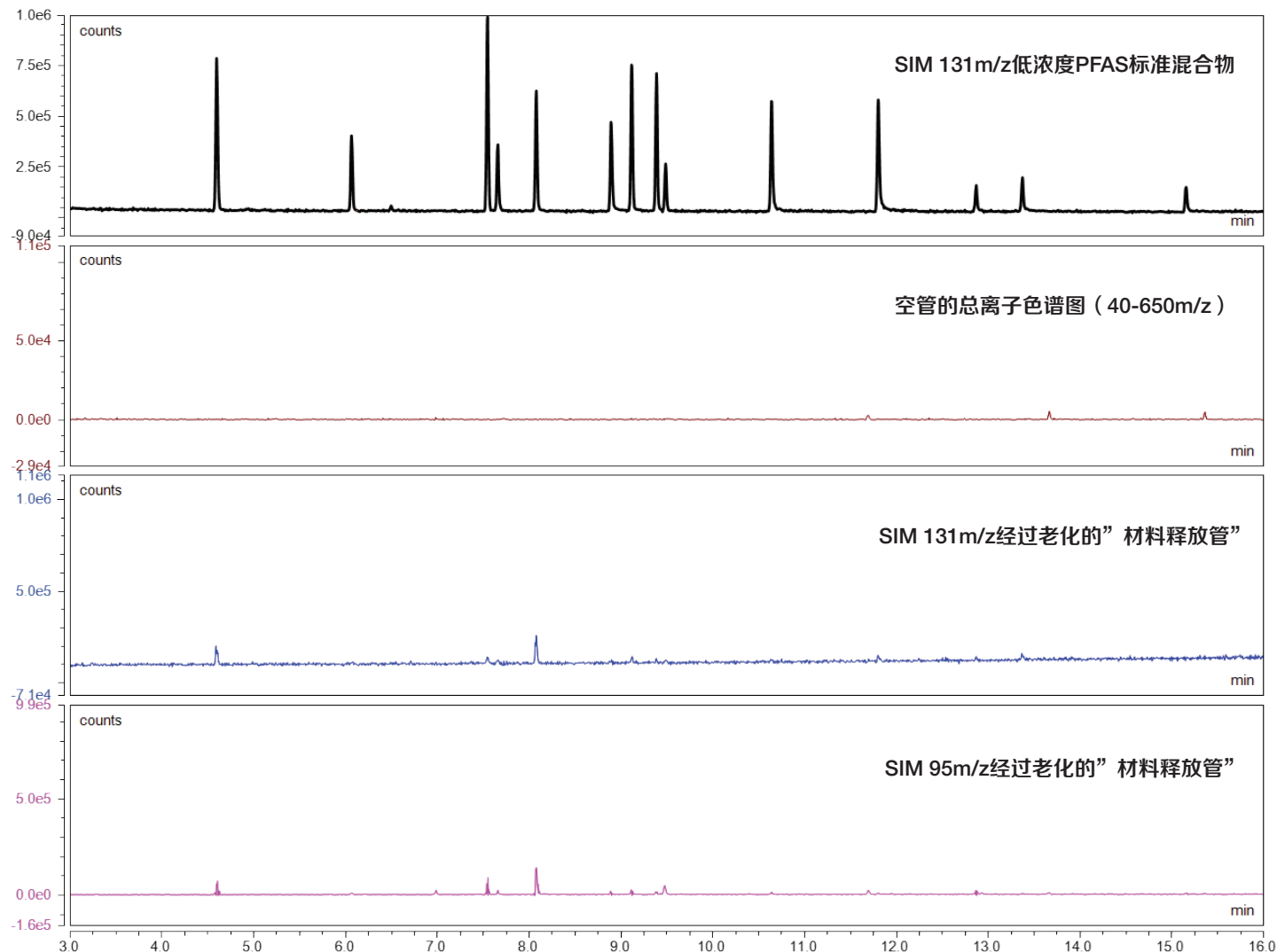


图 7：在分析条件下空管的背景与经老化的“材料释放”管在分析条件下的背景

通过定量再收集验证分析物回收率

在标准分析条件下对三根加标有 2 ng PFCA、12.5 ng FTOH 和 16.6 ng N-MeFOSA、N-MeFOSE 和 FTAc 的采样管进行脱附，并进行四次脱附和再收集实验。在这一自动化过程中，目标化合物按常规方式通过整个 TD 流路，经二阶脱附，在分析物冷阱出口解吸分流前进行定量再收集（图 8）。

因此，可以根据分流比计算原始加标管和再收集管的每种化合物的质量，而且还可以检查任何选择性损失或高温解吸时是否有新生成的化合物。该过程也是进一步对系统背景的严格测试，因为如果有背景干扰，会在整个再收集过程中不断累积。实验结果表明所有化合物均具有良好的回收率，参见图 9。此外，即使在第四次和第三次解吸再收集样品管时，也未观察到目标化合物或其他 PFAS 化合物的生成。

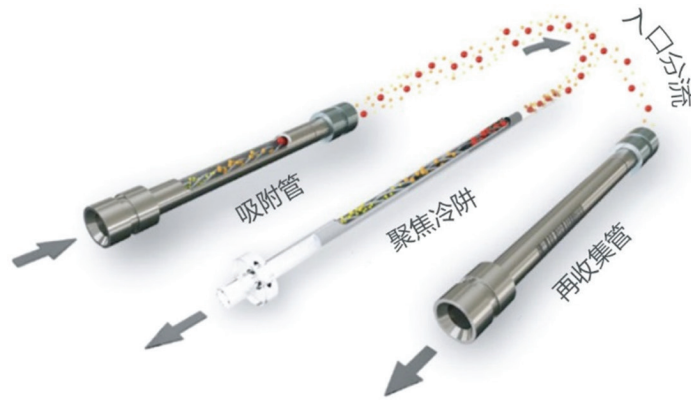


图 8：两阶段热脱附示意图

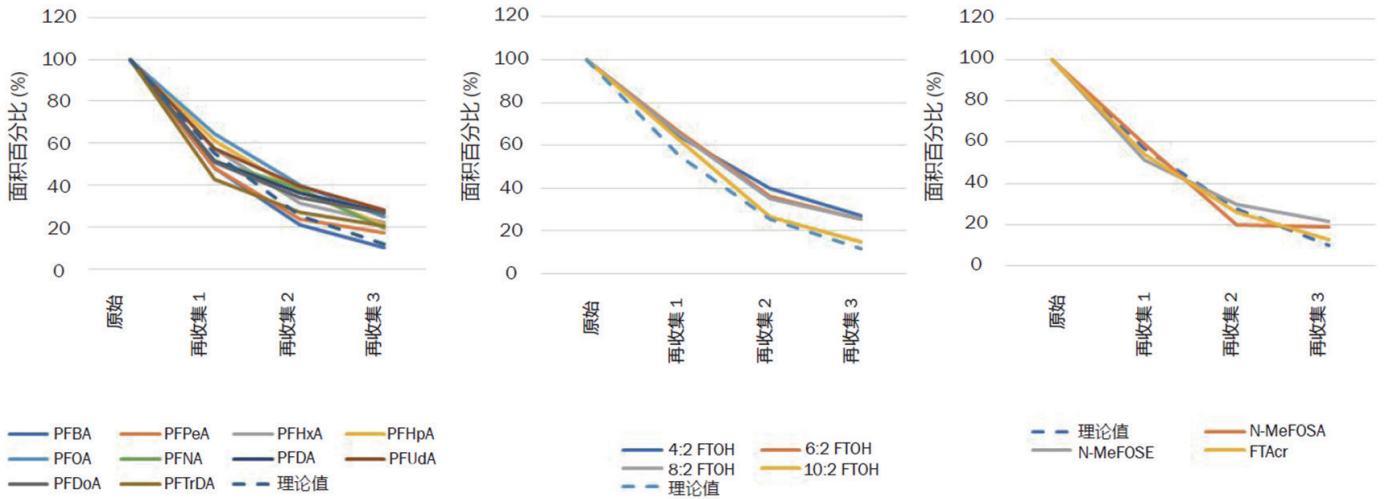


图9：指定的 PFAS 化合物的再收集结果，其中虚线表示理论上降低的响应值。每个目标化合物的曲线都具有相同的趋势，这表明任何所有目标化合物均未损失且流路中无 PFAS

线性和检出限

在经过老化的吸附管中加入相应浓度（涵盖近两个数量级）的 PFAS 标准混合物，并在之前已确定的分析条件下进行分析。每个数据点收集两次。检出限 (LOD) 通过最低浓度的标准品计算。结果（表 3）表明该方法具有出色的灵敏度和稳定性，非常适合常规和研究性 PFAS 应用。

表 3：TD-GC-MS 法的 LOD 和线性

化合物	LOD (ng/m ³)	LOD (ppt)	校准曲线浓度范围	r ²
全氟烷基羧酸				
PFBA + PFPeA				0.9987
PFHxA				0.9993
PFHpA				0.9992
PFOA				0.9989
PFNA	< 5	< 0.25	0.05~2 ng	0.9991
PFDA				0.9997
PFUdA				0.9991
PFDoA				0.9997
PFTTrDA				0.9983
PFTeDA				0.9975

含氟调聚物醇				
4:2 FTOH				0.9926
6:2 FTOH	< 50	< 3	0.1~12 ng	0.9981
8:2 FTOH				0.9968
10:2 FTOH				0.9976
含氟调聚物丙烯酸酯				
8:2 FTAc	< 8	< 0.35	0.05~16.6 ng	0.9998
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇				
N-MeFOSA	< 14	< 0.6	0.05~16.6 ng	0.9992
N-MeFOSE	< 26	1.5		0.9982

重复性

使用 5 份浓度相对较低的标准品平行样研究重复性：2 ng 的 PFCA、12.5 ng 的 FTOH 和 16.6 ng 的 N-MeFOSE/N-MeFOSA/FTAc。结果见表 4。所有目标分析物的 RSD≤5%。

表 4：不同浓度下目标化合物的重复性 (n=5)

化合物	管内质量	m/z	%RSD (n = 5)
全氟烷基羧酸			
PFBA + PFPeA			4.13
PFHxA			4.19
PFHpA			4.14
PFOA			3.12
PFNA			3.70
PFDA	2 ng/μL	131	3.23
PFUdA			4.35
PFDoA			3.55
PFTrDA			3.45
PFTeDA			3.73
含氟调聚物醇			
4:2 FTOH			1.79
6:2 FTOH	12.5 ng/μL	95	2.29
8:2 FTOH			2.45
10:2 FTOH			3.45
含氟调聚物丙烯酸酯			
8:2 FTAc	16.6 ng/μL	131	2.45
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇			
N-MeFOSA			1.37
N-MeFOSE	16.6 ng/μL	131	5.80

实际空气样品

为了完成这项评估，向三根经老化吸附管中加入低浓度的PFAS 标准品（表 5），然后在多层停车场内采集将 20 L 空气，将其抽入其中的两个样品管中。监测期间的环境温度为 27°C，相对湿度为 52%。以 100 mL/min 的速度进行 3 小时 20 分钟的空气样品收集。

表 5：空气采样信息 - 加标管浓度

化合物	加标管中的质量 (ng)	ppt
全氟烷基羧酸		
PFBA	0.3	1.43
PFHxA		0.97
PFHpA		0.84
PFOA		0.74
PFNA		0.66
PFDA		0.60
PFUdA		0.54
PFDoA		0.50
PFTTrDA		0.46
PFTeDA		0.43
含氟调聚物醇		
4:2 FTOH	10	38.61
6:2 FTOH	30	84.01
8:2 FTOH	30	65.90
10:2 FTOH	20	36.15
含氟调聚物丙烯酸酯		
8:2 FTAc	3.5	6.89
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇		
N-MeFOSA	7	12.81
N-MeFOSE	5.5	10.93

两份样品并非同时收集，因此两份停车场样品的空气成分很可能略有不同，但预期差异很小。结果（图 10 和表 6）表明，所有经检测分析物的回收率≥80%。

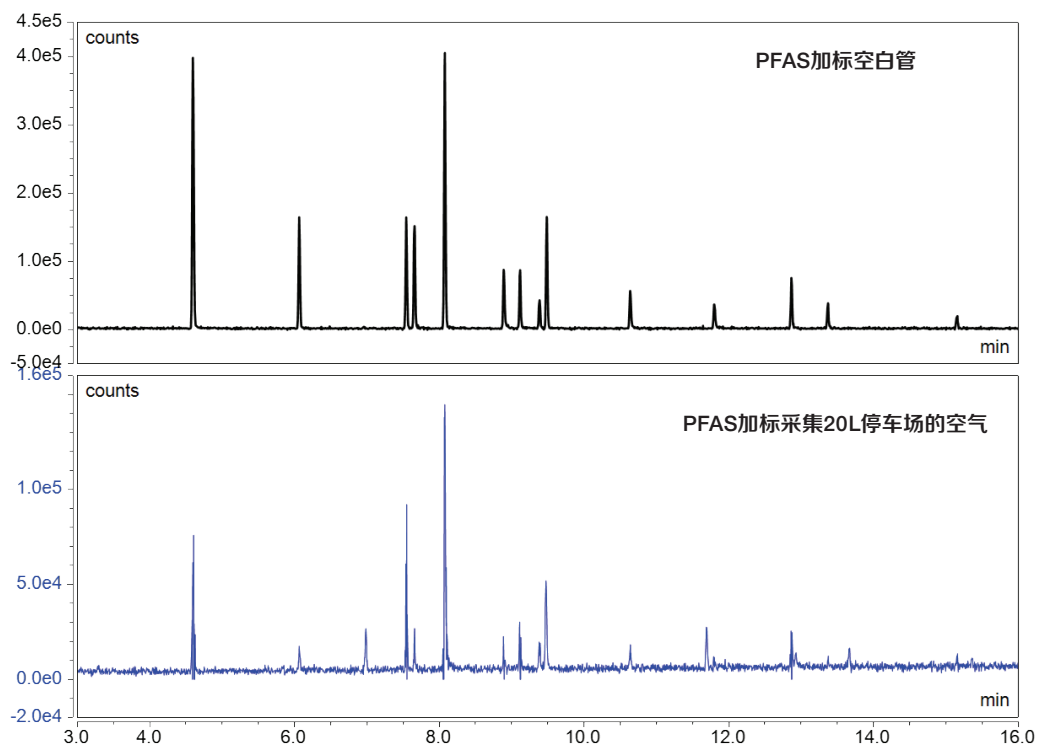


图 10：加标的非采样管与其中一个 20 L 停车场空气采样加标管的对比示例

表 6: 两根加标管采集20 L 停车场空气的平均回收率数据

化合物	平均值	%RSD
全氟烷基羧酸		
PFBA + PFPeA	81.73	2.98
PFHxA	134.16	3.78
PFHpA	109.76	6.53
PFOA	151.53	5.43
PFNA	144.02	1.26
PFDA	102.97	3.09
PFUdA	86.31	4.99
PFDoA	99.03	1.38
PFTrDA	123.45	11.04
PFTeDA	125.14	1.34
含氟调聚物醇		
4:2 FTOH	79.25	4.44
6:2 FTOH	97.59	12.32
8:2 FTOH	111.76	5.36
10:2 FTOH	117.84	1.02
含氟调聚物丙烯酸酯		
8:2 FTAc	146.20	4.80
全氟辛烷磺酰胺和全氟辛烷磺酰胺乙醇		
N-MeFOSA	73.94	12.90
N-MeFOSE	120.60	8.51

结果

分析方法的可靠性

本研究采用市售的吸附管和最新电子制冷TD 和四极杆 GC- MS分析空气中的全氟烷基和多氟烷基化合物, 结果表明, 这种方法适用于空气中痕量 PFAS 的监测, 且 Markes TD100-xr 具有卓越的分析性能。当然, 对此类具有挑战性的应用, TD-GC-MS 方法是否具有广泛的适用性还取决于多种因素, 不能仅靠分析性能下结论。其他仪器考量因素也会对分析数据的可靠性和数据质量带来重要影响。相关标准方法中已经引用了许多此类 TD 系统功能和特性, 下文将对此进行详述(所列顺序仅代表操作顺序, 而非重要性)。需要强调的是, 美国 EPA 方法 TO-17 中给出了类似列表:

(1) TD 自动进样器上吸附管的密封性(分析前后)

当样品管加载到热脱附仪上, 无论是等待脱附时, 还是脱附完成后, 均要避免管内分析物损失和实验室空气污染物侵入管中, 以保护其完整性。现已证明, Markes TD100-xr 和 ULTRA- xr™ 自动进样器上使用的 DiffLok™ 分析型管帽可以将空白管和采样管的完整性保持一周以上, 并在整个序列运行期间牢固安装在管上。在一些 TD 系统上使用 PTFE 涂层 O 形圈的密封方式, 该方式虽有便于打开管帽和从采样管上移除, 但目标物的泄漏速度也很快, 例如, 14 小时后苯损失高达 25%。⁸

(2) 在常温、无气流条件下对所有管进行预脱附泄漏测试

在 TD 自动运行序列期间, 样品管作为载气流路的一部分, 每次加载并将其密封到位时, TD 的流路都在发生变化, 在发生这种情况时, 理论上可能会发生泄漏。因此, 在每根管上样之后及分析之前, 都必须自动进行环境温度下的泄漏测试, 而且自动化 TD 技术诞生以来, 监管机构就已在标准方法中对此作出了规定。原因显而易见。在没有引入气流条件下, 如果样品管未经严格的泄漏测试而进行分析, 漏气的样品管将导致样品损失并导致结果的不可靠。如果仪器不进行自动的泄漏测试, 工作人员对采样管的泄漏情况将一无所知。

(3) 采样方向上的自动干吹扫(可选)

在填充有非疏水性吸附剂的吸附管上采集含有水分的潮湿空气/气体, 在分析前, 水汽必须选择性地从系统中去除, 防止水分进入气相色谱柱和检测器, 以最大程度地减少分析干扰并延长仪器和耗材的使用寿命。在分析前为了移除水汽, 可以利用外部装置对含水的样品管进行离线吹扫, 但在分析序列中加入自动干吹扫程序将更便于操作。请注意, 填充有吸附剂的聚焦冷阱需要选择合适的富集温度, 还可以实现在初级脱附过程中有选择性地将水吹扫出冷阱, 进而排出系统(参见第 7 点和第 8 点)。

(4) 在吸附管的采样端自动添加内标

气相内标物被广泛推荐用于 TD-GC-MS 方法，以提高分析过程的质量控制和数据置信度，并在大多数标准方法中被引用。在泄漏测试通过、样品管脱附之前，分析内标会自动引入采样管和标准品管的采样端，使用户能够发现序列运行期间，检测器漂移和标准品或样品中任何分析物的损失。请注意，采样内标（或替代标）也可以在采样前加入老化好的采样管中，以检查整个分析流程，包括样品的运输和储存。完成此操作后，将使用与采样内标不一样的化合物作为分析内标。

(5) 预吹扫空气至排气口

在分析之前，采样过程中的残留空气必须从管中清除，以防止吸附剂和/或分析物氧化。被吹扫出的空气必须被送至排气口，防止其到达气相色谱柱或质谱仪，以最大限度地减少系统背景干扰和降解。

(6) 在样品管脱附后，将样品管与样品流路隔离，防止干扰

在（管）脱附结束时，务必要将加热后的样品管与载气流路隔离，以防止任何残留的高沸点组分或从样品管洗脱的杂质干扰 GC 分析。

(7) 聚焦冷阱反向气流脱附

在二次脱附过程中，聚焦冷阱反吹进样（图9）至关重要，该操作可以在聚焦冷阱中填充一系列强度递增的吸附剂，从而扩大可同时分析的目标物的挥发范围。样品管脱附过程中，样品解吸的易挥发物组分会被冷阱中位于后部的强吸附剂保留，而高沸点的半挥发性化合物会被冷阱中位于前部的较弱吸附剂捕集，不会与强吸附剂接触。这种设计甚至可以定量保留挥发性非常高的化合物（如 C2 碳氢化合物），而无需液氮冷却（见第 8 点）。

(8) 对于现阶段诸多业务繁杂的实验室而言，不使用液态制冷剂的自动 TD 系统的优势显而易见，这一技术使采用填充有吸附剂的小型聚焦冷阱在反吹模式下进行脱附成为可能，如前文和图 9 中所述。此类型的 TD 配置还具有其他重要优势：在湿样品脱附过程中，电制冷的吸附剂冷阱不易冰堵，而且作为水汽管理的一部分，还可以在分析之前沿聚焦方向进行自动干吹扫。

同样值得注意的是，通过在 TD 样品流路中使用合适的惰性高温阀，上述所有基本功能（以及其他重要功能，例如定量 TD 样品再收集以用于重复分析）都得以实现。所选阀不得损害系统性能（无样品损失、杂质、谱宽等问题），它同时也是保证自动化 TD 可靠操作的关键组件，没有它，泄漏测试、吹扫、反吹扫和管隔离等基本功能就无法实现。

TD100 xr 及所有 Markes TD 产品系列所使用的专利高温阀专为分析型 TD 而设计，并在数千个 TD 应用实例（包括最具挑战性的应用）中证明了其卓越的可靠性和优异的性能。

结论

本研究表明，全自动无制冷剂热脱附技术适用于多种常规空气应用，无需任何调整或优化即可应用于所需的低 ppt 级和亚 ppt 级 PFAS 的监测。

这进一步证明，定量再收集和重复分析这两个功能，对于二阶热脱附验证分析物的回收率有很大帮助—并且用户可以从运行序列中审查数据，并检查系统对 PFAS 浓度的贡献（背景或化学反应）并能够发现该化合物在解吸过程中是否有损失。

在证明了常规 TD-GC-MS 方法和系统在监测痕量 PFAS 浓度的能力后，我们未来的开发工作将从以下两方面入手，重点关注方法改进方案：

- 优化吸附剂选择，从而收集更大体积的空气样品。
- 应用先进的 GC-MS 技术（三重四极杆、高分辨质谱等）配置热吸附仪，以增强检测和化合物鉴定能力。

参考资料

1. EN ISO 16017: Indoor, ambient and workplace air – Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography– Part 1: Pumped sampling.
2. US EPA TO-17: Determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes.
3. ISO 16000-6: Indoor air – Part 6: Determination of organic compounds (MVOC, VOC, SVOC) in indoor and test chamber air by active sampling on sorbent tubes, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS FID.
4. ASTM D6196: Standard practice for choosing sorbents, sampling parameters and thermal desorption analytical conditions for monitoring volatile organic chemicals in air.

5. HJ 759: Ambient air.Determination of volatile organic compounds.Collected by specially-prepared canisters and analysed by gas chromatography/mass spectrometry.

6. Stockholm convention on persistent organic pollutants.

7. S. Nakayama et al., Worldwide trends in tracing poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment, Trends in Analytical Chemistry, 2019, 121: 115410, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993618306605?via%3Dihub>.

8. P.P. Ballesta, Losses from ATD-400, The Diffusive Monitor, issue 9, November 1997.

应用规定的分析条件下进行。使用不同的操作条件或不相容的样品基质可能会影响文中所示性能。



赛默飞
官方微信

热线 800 810 5118
电话 400 650 5118
www.thermofisher.com

Thermo Fisher
S C I E N T I F I C