

配备 Hydro 惰性离子源的 Agilent Inert Plus GC/MS 系统

将 H₂ 载气应用于实际 GC-MS 分析

前言

随着氦气 (He) 的价格不断上涨，氦气市场压力不断攀升，许多实验室开始寻求更具可持续性的氦气替代品，并探索氢气 (H₂) 载气的应用。众所周知，使用氢气作为气相色谱 (GC) 的载气具有诸多优势。因为实验室不仅可以通过经济高效的方式生成氢气，而且可以实现快速色谱分析和更高的样品通量。但是，由于氢气是一种反应性气体，在质谱的电子电离 (EI) 离子源中会发生氢化和脱氯反应。这些反应导致氢气载气无法用于多种应用场景。针对 Agilent 5977B Inert Plus GC/MSD 和 Agilent 7000D/E Inert Plus 三重四极杆气质联用系统全新设计的 Extractor 离子源解决了这些与氢气相关的问题，有助于提高使用氢气载气进行 GC/MS 和 GC/MS/MS 分析时的分析性能。使用氢气载气的 Agilent Hydro 惰性离子源保持了质谱保真度，支持用户继续使用现有的基于氦气的质谱库。

从氦气到氢气的转变

以往的文献已经讨论了将 H₂ 应用于 GC/MS 分析时的考虑因素^[1]。这些考虑因素，尤其是确保实现出色分离的气相色谱参数，仍然适用于 Inert Plus 质谱系统的 Hydro 惰性离子源。虽然氦气是 GC/MS 分析的理想载气，但我们开发了可以使用氢气载气的 Hydro 惰性离子源，当氦气不可用时，氢气将是其理想的替代气体。

下面简要汇总了一些建议供参考：

- 使用氢气时，强烈建议采用不锈钢管线。如果只有铜质管线可用，应安装新的铜质管线。我们提供接头和管线的 stainless 安装工具包，部件号为 19199S
- 请务必使用气体过滤器，在使用氢气生成器时更应如此。针对氢气，建议安装安捷伦大容量通用型捕集阱（用于去除水分、氧气和烃类）（部件号 RMSH-2-SS）；针对载气，建议安装 Agilent Gas Clean 气体净化器（包含底座的套装部件号 CP17976，如果您已有底座，则可以选择载气过滤器替换装，部件号 CP17973）
- 处理敏感化合物时，应降低进样口温度，或尽可能使用多模式进样口进行冷不分流进样

- 氢气粘度低于氦气，导致进样口压力较低。建议应至少采取以下措施：
 - 改变色谱柱尺寸，或
 - 提高载气流速
- 最佳载气流速取决于泵，因为对氢气的泵送能力低于氦气
 - 最佳范围：0.5–1.0 mL/min
 - 涡轮分子泵的建议最大流速：2.0 mL/min
- 采用恒流法
- 对于运行氢气的 GC/MS/MS 系统，不使用淬灭气体（氦气）。请拆除电子压力控制模块 (EPC) 背面的氦气管道，并在所有 GC/MS/MS 方法中将淬灭气体设置为 0.00 mL/min

大多数情况下都需要进行更改，同时需要对标准操作规程 (SOP) 和方法验证进行必要的更新。

Hydro 惰性离子源

图 1 所示的 Hydro 惰性离子源是一种基于安捷伦的 Extractor 离子源设计的新型离子源。在单四极杆 (Agilent 5977B 或 5977C GC/MSD) 和三重四极杆 (Agilent 7000D 或 7000E 三重四极杆 GC/MS) 系统中，可以轻松从现有 EI Extractor 或 EI Inert Plus 离子源转换为 Hydro 惰性离子源。请勿将 Hydro 惰性离子源部件与 Extractor 离子源部件混用；否则可能会导致不理想的意外结果，在使用氢气载气时更应注意。



图 1. Agilent Hydro 惰性离子源

通常，GC/MS 系统在使用氢气载气时，应注意某些化合物类型的氢化或脱氯反应，同时确定是否需要构建内部化合物谱库，或应知晓与 NIST 或其他基于氮气的谱库的匹配得分可能不适用于基于氢气的质谱。然而，Hydro 惰性离子源对氢气具有更高的惰性，获得的质谱保留了在氮质谱中观察到的正常特征。

以下示例说明了使用 Hydro 惰性离子源分析硝基苯的主要优势。在一项采用配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源开展的实验中，使用氢气作为载气进行半挥发性有机物 (SVOC) 分析。分析的混合物 (部件号 SVM-122-1) 中包含硝基苯。众所周知，硝基化合物在高温、存在氢气以及在金属表面上容易发生氢化；而 Extractor 离子源包含了所有这些条件。硝基苯 (分子量 (MW) 123 m/z) 氢化将生成苯胺 (MW 93 m/z)。在查看使用 Extractor 离子源和氢气载气获得的总离子流色谱图 (TIC) 峰下的质谱时，观察到如图 2A 所示的质谱。93 m/z 具有非常高的丰度，而 123 m/z 丰度很低，表明硝基苯在离子源中转化为苯胺；可以证明该转化发生在离子源内，因为是在硝基苯的保留时间处查看的质谱，硝基苯与苯胺已很好地分离。

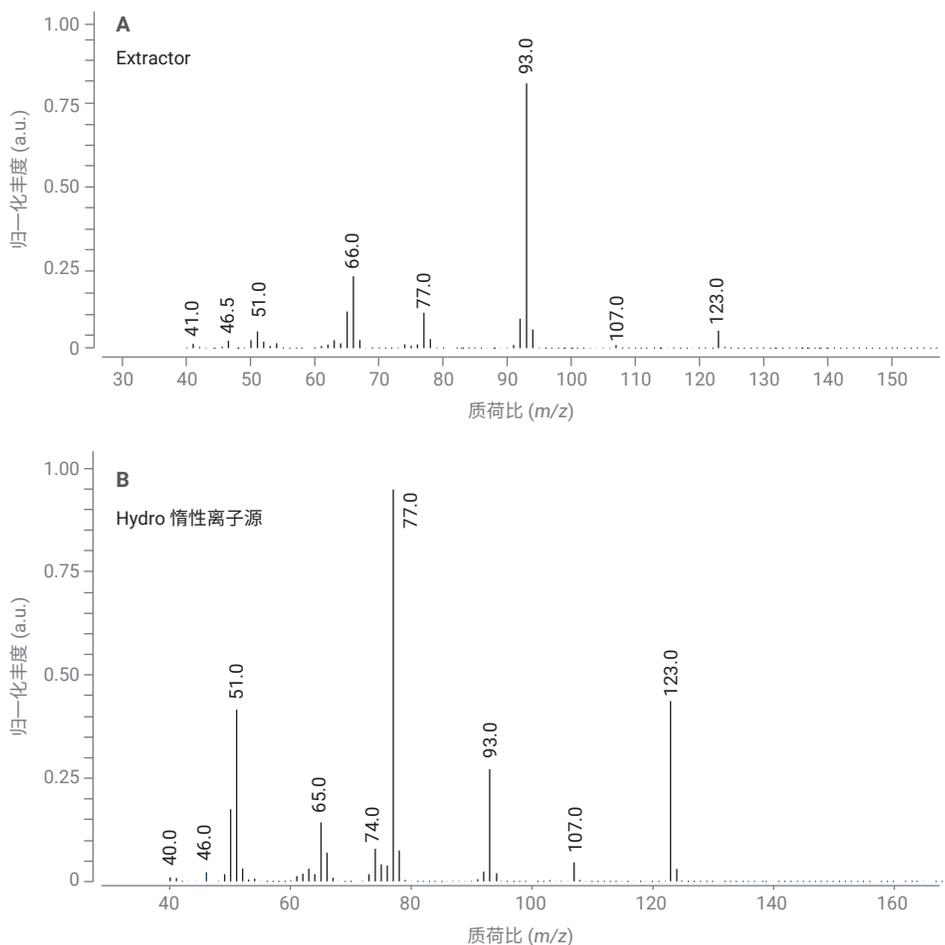


图 2. 采用氢气载气和 (A) 带有 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源以及 (B) Agilent Hydro 惰性离子源时，在硝基苯的保留时间处洗脱的峰的质谱图，A 图显示发生了氢化反应形成苯胺，93 m/z 处离子丰度较高；B 图显示与硝基苯相关的质谱有所改善

相比之下，通过 Hydro 惰性离子源 (采用 9 mm 提取透镜) 对含有硝基苯的同一混合物进行了测试，我们在质谱中观察到的 123 m/z 和 93 m/z 分布与预期一致 (图 2B)，表明硝基苯在离子源中得到保留，未转化为苯胺。在提取离子色谱图 (EICs) 中也可以看到该对比情况，

如图 3A (Extractor 离子源，硝基苯发生转化) 和图 3B (Hydro 惰性离子源，硝基苯得到保留) 所示，我们观察到使用 Hydro 惰性离子源时，123/93 比值有所提高，而 Extractor 离子源的 EIC 叠加图表明 93 m/z 显著增加且存在明显拖尾。

质谱保真度示例

硝基苯仅是使用氢气载气和 Hydro 惰性离子源实现质谱保真度的其中一个例子。如果存在氢气，其他硝基化合物也可能出现氢化问题，这些化合物包括农药、SVOC 以及其他化合物类别。如果存在氢气载气及金属或其他活性位点，氯代化合物也会发生脱氯反应；二氯二苯基三氯乙烷 (DDT) 是一种常见化合物，由于受热和存在活性位点（如金属），其会在 GC 进样口中分解，与此同时，如果存在氢气，离子源中的脱氯反应也会对其分析造成影响。采用 Extractor 离子源和一对色谱柱，首先使用氦气载气分析 DDT，然后使用氢气载气分析 DDT，以匹配通过氦气载气方法获得的保留时间。通常，使用两根 Agilent J&W HP-5ms 超高惰性气相色谱柱（15 m × 0.25 mm, 0.25 μm）进行农药分析。在使用氢气时，将色谱柱替换为两根 Agilent J&W HP-5ms 超高惰性气相色谱柱（20 m × 0.18 mm, 0.18 μm），以匹配保留时间，避免在含有数百种农药的方法中重置多个保留时间。根据氢气的分析结果，DDT 在 13.04 分钟时洗脱，而二氯二苯基二氯乙烯 (DDE) 和二氯二苯基二氯乙烷 (DDD) 的洗脱时间更早，时间分别在 12.44 分钟和 12.88 分钟。从采用氢气载气和 Extractor 离子源的结果来看，13.04 分钟时鉴定出的是 DDD 而非 DDT，如表 1 所示。采用 Hydro 惰性离子源和氢气载气时，在 13.04 分钟时准确鉴定出了 DDT，谱库匹配得分为 85（与 NIST17.L 谱库相比）。采用 Extractor 离子源（和氢气载

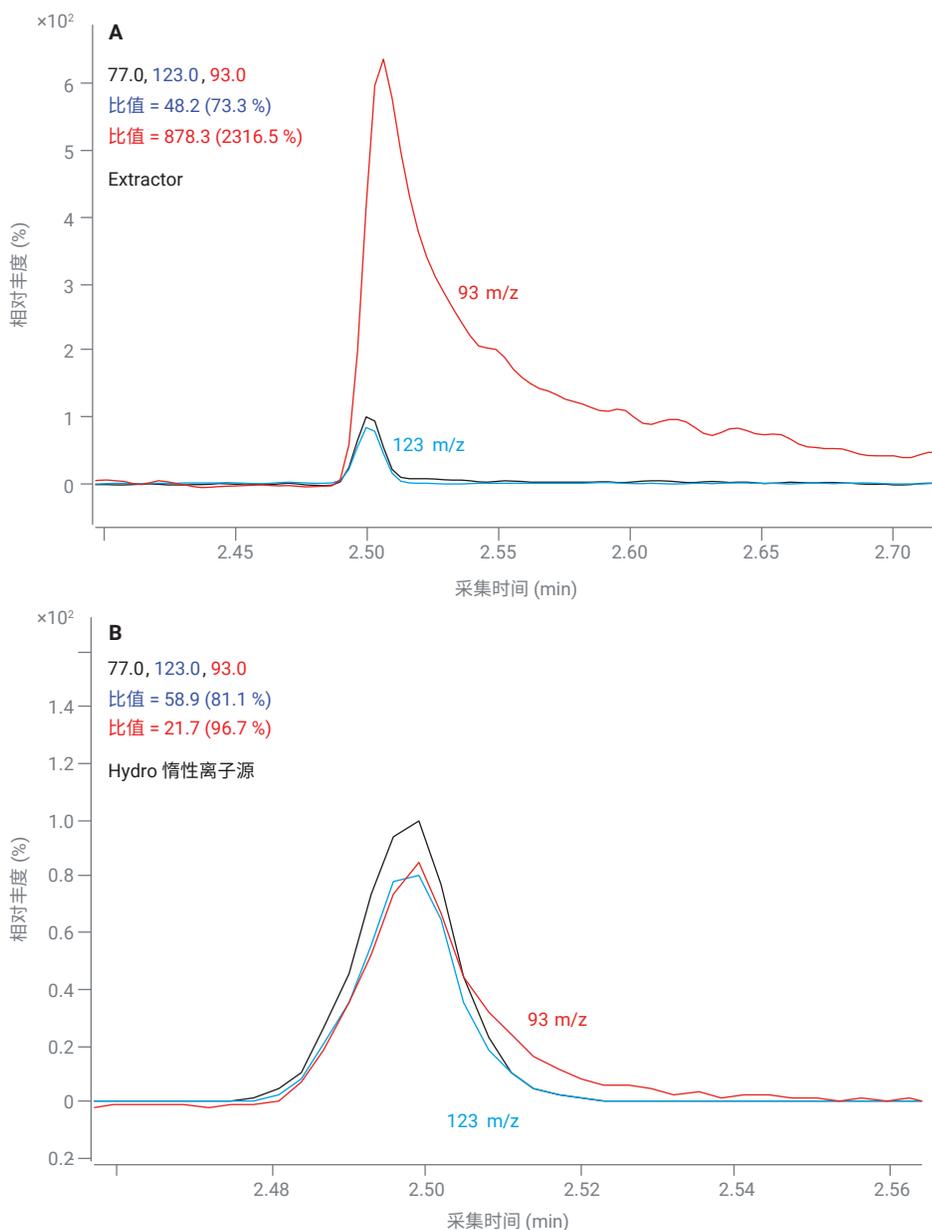


图 3. 采用氢气载气和 (A) 带有 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源以及 (B) Agilent Hydro 惰性离子源获得的硝基苯的 EICs；A 图显示发生了氢化反应形成苯胺，93 m/z 离子丰度较高；B 图显示 123 m/z 与 93 m/z 比值提高

表 1. 使用氢气载气鉴别 DDT 和 DDT 分解产物时，Extractor 离子源和 Agilent Hydro 惰性离子源的对比情况

使用氢气载气的离子源	保留时间 (min)	鉴定的化合物	谱库匹配得分
Extractor	13.04	DDD	79
Hydro 惰性离子源	13.04	DDT	85

气) 时, 在多次运行中 13.04 分钟时的鉴定结果都出现错误, 表明 DDT 在离子源中脱氯变成 DDD。在 Hydro 惰性离子源和 Extractor 离子源系统中, DDE 和 DDD 也在各自的保留时间 (12.44 和 12.88 分钟) 被鉴定出, 表明进样口中也有小于 10% 的 DDT 发生分解。进样口分解并非本测试的重点关注问题; 优化进样参数和衬管可以减少 DDT 分解, 降低进样口温度或采用多模式进样口进行冷不分流进样, 也可以减少 DDT 分解。

有关氯化化合物的另一个示例是七氯。实验设计与硝基苯相同, 在使用氢气载气的 GC/MS 单四极杆仪器中安装带有 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源, 这是使用氦气进行农药分析时, 推荐使用的提取透镜。将含有七氯的农药混合物 (部件号 PSM-105-A) 稀释至 10 ng/ μ L, 并添加一组氘代多环芳烃 (PAH) 作为内标。七氯的解卷积质谱图如图 4A 所示, 并与七氯的 NIST17 谱库谱图从头至尾进行了比较。丰度最高的离子应为 272、274、270、100 和 65 m/z, 但根据图 4A 和图 5A, 235 和 237 m/z 附近的离子丰度显著增加, 使它们跻身丰度最高的前五个离子, 而 272 和 274 m/z 则被抑制。在丰度最高的前五个 EICs 中, 仅发现了 272 m/z, 而 165 m/z 的丰度也较高 (本应该几乎没有任何强度)。此外, 五个 EICs 中的其中两个 (即 66 和 272 m/z) 的峰顶点与其他三个不同。这种高丰度区域从 272 m/z 变成 235 m/z 区域、最高

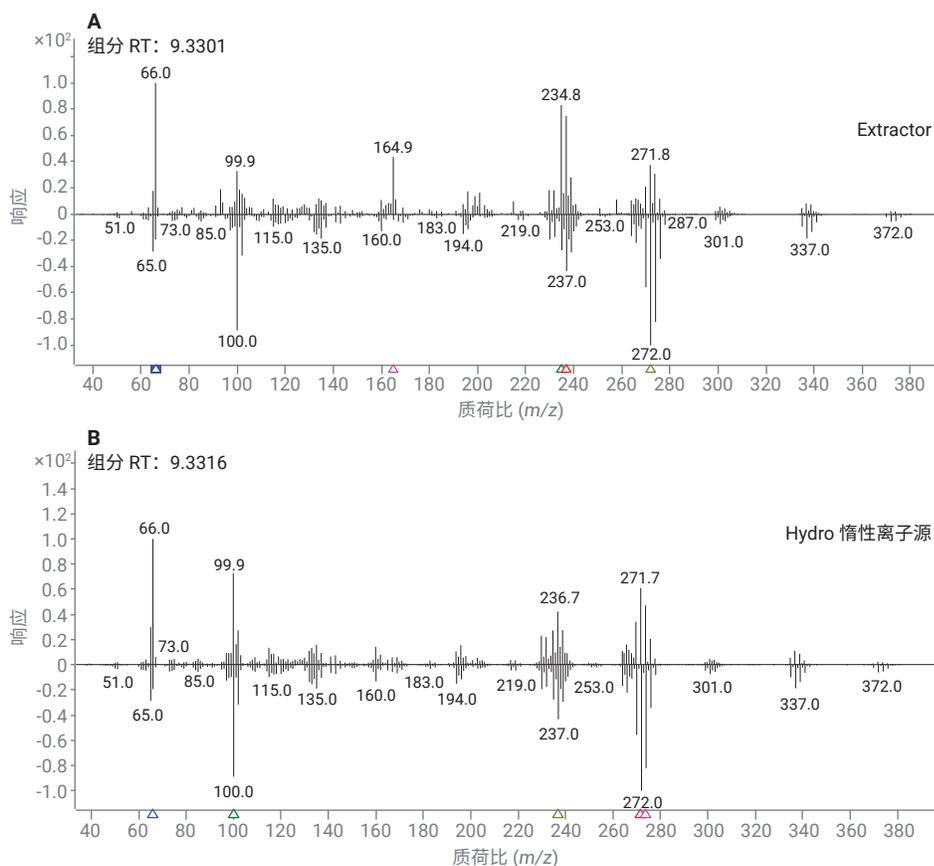


图 4. 采用氢气载气和 (A) 配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源以及 (B) 配备 9 mm 提取透镜的 Agilent Hydro 惰性离子源, 将获得的七氯的解卷积质谱图 (上) 与 NIST17.L 谱库谱图 (下) 进行从头到尾的比较

丰度离子的变化以及不匹配的峰顶点表明离子源中发生了脱氯反应。相比之下，图 4B 显示了使用氢气载气和 Hydro 惰性离子源（带有 9 mm 提取透镜）获得的提取质谱图，图 5B 显示了丰度最高的前五个 EICs。图 4B 中，272 m/z 区域高于 237 m/z 区域，而且 100 m/z 非常明显，与下方进行从头到尾比较的参比谱库谱图非常相似，表明氯原子得到保留。此外，Hydro 惰性离子源结果的前五个 EICs 的峰顶点一致，包括三个预期离子：272、274 和 100 m/z；离子 237 和 270 m/z 的丰度非常接近，但 237 m/z 稍高一点，超过 270 m/z，成为丰度最高的前五个 EIC 之一。

谱库匹配得分示例

使用 Hydro 惰性离子源可防止化合物在存在氢气的情况下发生分解、氢化和脱氯，因此使用氢气采集的质谱库可用于使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气的情况。我们完成了多项实验，用于评估在使用氦气或氢气载气以及 Extractor 离子源和 Hydro 惰性离子源（配备各自的 9 mm 提取透镜）时，大型通用谱库（如 NIST 谱库）的使用情况，具体实验如下：Extractor 离子源搭配氦气载气；Extractor 离子源搭配氢气载气；Hydro 惰性离子源搭配氦气载气。使用浓度为 10 ng/μL 的六种氘代 PAH 生成 SVOCs、农药和香料化合物混合物，并在 Agilent 8890 GC 与 5977 Inert Plus 单四极杆质谱仪联用系统上，通过扫描模式开展上述三个离子源实验。将数据加载至 Agilent MassHunter 未知物分析软件，使用 NIST17.L 谱库应用解卷积方法来评估谱库匹配得分 (LMS)。表 2 列出了采用

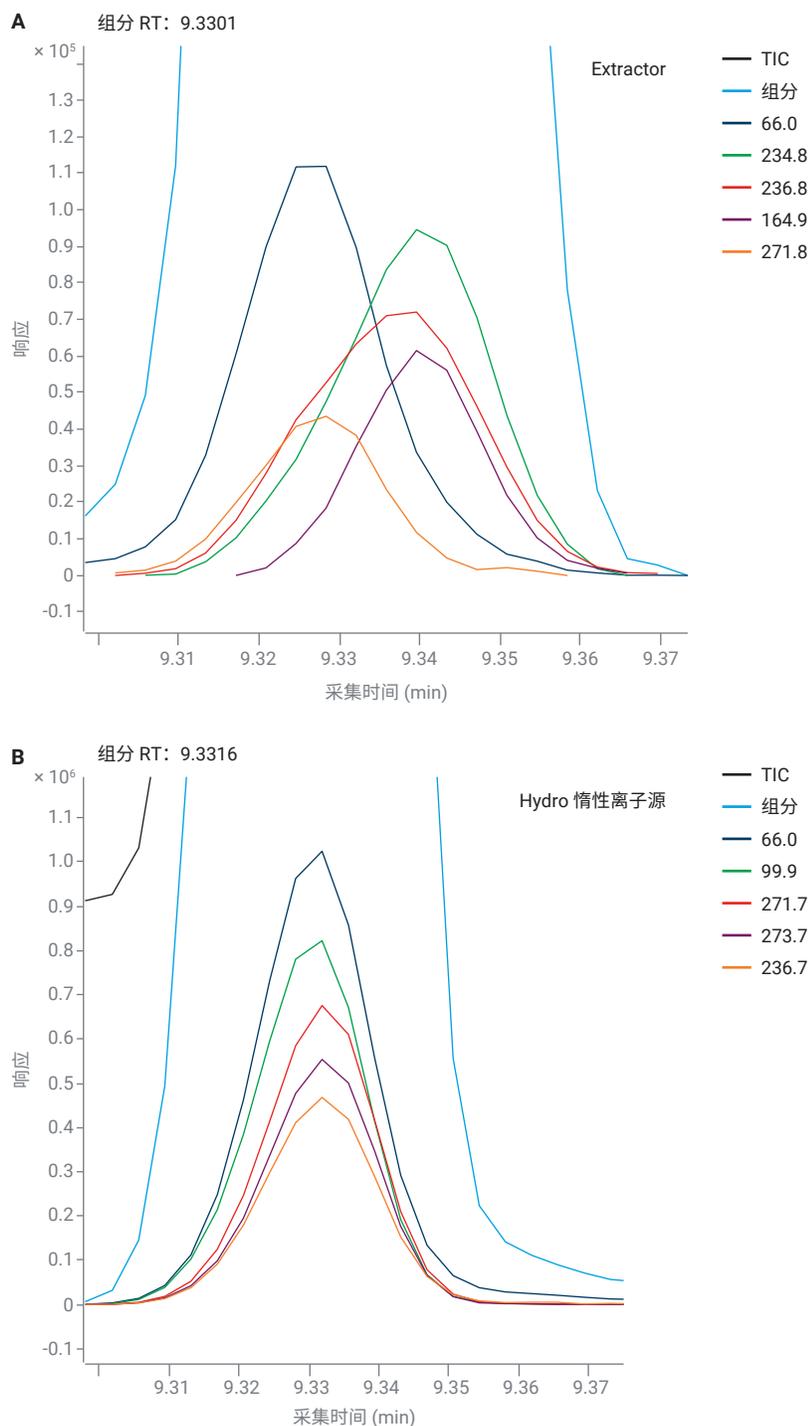


图 5. 采用氢气载气和 (A) 配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源以及 (B) 配备 9 mm 提取透镜的 Agilent Hydro 惰性离子源时，七氯的丰度最高的前五个离子的 EICs

氦气载气和 Extractor 离子源获得的 LMS 值，将其作为基线值，与采用氢气载气和 Extractor 离子源（中间列）或氢气载气和 Hydro 惰性离子源（右列）获得的结果进行比较。采用 Hydro 惰性离子源获得的所有 LMS 值均在氦气实验 LMS 值的五个百分点以内，并且采用氢气载气的 Hydro 惰性离子源实验的某些 LMS 更高，与 NIST 谱库更匹配，例如 4-硝基苯酚和联苯胺。Hydro 惰性离子源实验获得的 LMS 值中，有十五个在氦气实验数据的两个百分点以内；有五个比氦气实验的 LMS 值高出至少三个百分点，例如葵子麝香和联苯胺。采用氢气载气的 Hydro 惰性离子源实验可保持高 LMS 值，表明在离子源中官能团得到保留，实现了质谱保真度。但是，与采用氢气载气的 Hydro 惰性离子源实验相比，在采用氢气载气的 Extractor 离子源实验中，有 10 种化合物的 LMS 值低出至少五个百分点。Extractor 离子源实验中的某些 LMS 值低至 70，如联苯胺和苯并(b)荧蒽，这表明在采用氢气载气时，Extractor 离子源中发生了氯化或其他转化。如预期一样，氯化化合物和硝基化合物均受到了氢气载气和 Extractor 离子源的影响，谱库匹配得分较低，包括硝基苯 (80.9 LMS)、4-硝基苯酚 (83.1 LMS)、五氯苯酚 (85.4 LMS)、杀螟硫磷 (88.3 LMS) 和麝香酮 (89.8 LMS)。虽然这些得分仍然相对较高，但随着浓度下降，鉴定的难度提升，离子源中化合物的转化问题会更加棘手。综上所述，采用氢气载气的 Agilent Hydro 惰性离子源保持了质谱保真度，使用户可以继续利用现有的基于氦气的质谱库。

表 2. 使用氦气载气和 Extractor 离子源、氢气载气和 Extractor 离子源以及氢气载气和 Agilent Hydro 惰性离子源时，SVOCs、农药和香料化合物混合物的 LMS 比较

分析物	Extractor 离子源 +氦气 LMS	Extractor 离子源 +氢气 LMS	Hydro 惰性离子源 +氦气 LMS
苯胺	98.6	92.3	97.7
1,4-二氯苯-d ₄	96.7	94.7	97.5
硝基苯	95.7	80.9	94.3
苯甲酸	93.3	87.7	97.2
萘-d ₈	96.9	93.9	97.6
蒎-d ₁₀	98.3	97.3	97.8
2,4-二硝基苯酚	95.6	90.6	94.8
4-硝基苯酚	89.5	83.1	94.8
4,6-二硝基-2-甲基苯酚	94.3	93.6	95.7
五氯苯酚	90.7	85.4	89.1
4-氨基联苯	96.9	95.8	97.9
菲-d ₁₀	97.7	93.3	97.2
葵子麝香	86.6	86.3	89.5
杀螟硫磷	95.6	88.3	97.0
麝香酮	95.8	89.8	98.2
联苯胺	92.6	70.1	97.5
3,3'-二氯联苯胺	97.3	89.8	95.3
蒎-d ₁₂	96.0	84.8	93.5
苯并[b]荧蒽	97.8	70.1	98.4
苯并[k]荧蒽	97.8	96.8	98.4
蒎-d ₁₂	94.4	79.4	93.1

降低离子源清洁需求

使用氢气载气的优势之一在于，可以降低 EI 离子源的清洁需求。在使用 Agilent Jet Clean 智氢洁离子源时已经观察到这一点，因为该离子源会在分析期间或分析结束后引入少量氢气^[2]。使用 Hydro 惰性离子源时，也观察到了离子源清洁需求减少。为了考察离子源使用寿命，使用复杂的土壤基质和美国国家环境保护局 (EPA) 方法 8270 目标分析物和质量控制标准完成了一组实验，以评估何时需要对 GC 或 MS 进行维护。一组实验使用氢气载气和 Extractor 离子源（配有 9 mm 提取透镜）；另一组实验则使用氦气载气和

Hydro 惰性离子源（配有 9 mm (Hydro 惰性离子源) 提取透镜)。对于使用氦气的 GC/MS 系统，在平均 365 次基质进样（总进样次数 581 次）后，需要对离子源进行清洁。对于 Hydro 惰性离子源，在完成 5200 次基质进样后，无法再达到可接受标准。在对 Hydro 惰性离子源的提取透镜和推斥极进行更换并重新调整后，系统性能恢复至可接受标准。此时，如果发现 Hydro 惰性离子源的提取透镜和推斥极脏污，且通过 GC 维护无法恢复方法标准，则建议予以更换。由于陶瓷绝缘体可能会随时间变脏，因此也可能需要同时更换提取透镜绝缘体（部件号 G3870-20445）。

灵敏度

根据应用情况，氢气载气的引入会影响灵敏度，在使用现有 MS 离子源（如 Extractor 离子源）时更是如此。由于氢气相互作用导致背景增加，用户往往会发现信噪比 (S/N) 降低，同时校准的线性范围可能变窄或检测限 (LOD) 可能升高。针对所选择的应用，我们发现，与使用 Extractor 离子源相比，使用 Hydro 惰性离子源时，化合物的信噪比或丰度升高。例如，使用 Agilent 7697A 顶空进样器、8890 GC 和

5977 Inert Plus GC/MSD 检测水样中的挥发性有机化合物 (VOCs)，比较采用氢气载气的 Extractor 离子源以及 Hydro 惰性离子源的灵敏度和信噪比。对于两种示例化合物（三溴甲烷和四氯化碳），丰度和信噪比均升高，如图 6 所示。在相同的分析中，使用 Hydro 惰性离子源时，1,4-二氧六环的丰度更高，但其信噪比与使用 Extractor 离子源时相当（图 7）。并非每种化合物、基质或分析都会呈现出相同的或改进的结果。在将多台仪器转为使用氢气之前，应在有限的的能力范围内进行各项测试。

为了考察使用氢气载气的 Hydro 惰性离子源的灵敏度，购买了 10 fg/ μ L 的八氟萘 (OFN, 部件号 5190-0585) 开展 GC/MS/MS 灵敏度测试。对于串联四极杆 GC/MS/MS 系统，最大允许仪器检测限 (IDL) 为 4 fg, 4.0 fg 及以下均视为合格。Hydro 惰性离子源安装于 8890 GC 和 7000E 三重四极杆 GC/MS 系统，使用氢气作为载气，完成了 12 次 OFN 进样，获取了四组数据，用于评估该离子源使用氢气时的 IDL。四个 IDL 值分别为 2.1、4.0、2.0 和 3.5 fg, 平均 IDL 为 2.9 fg, 均符合标准。

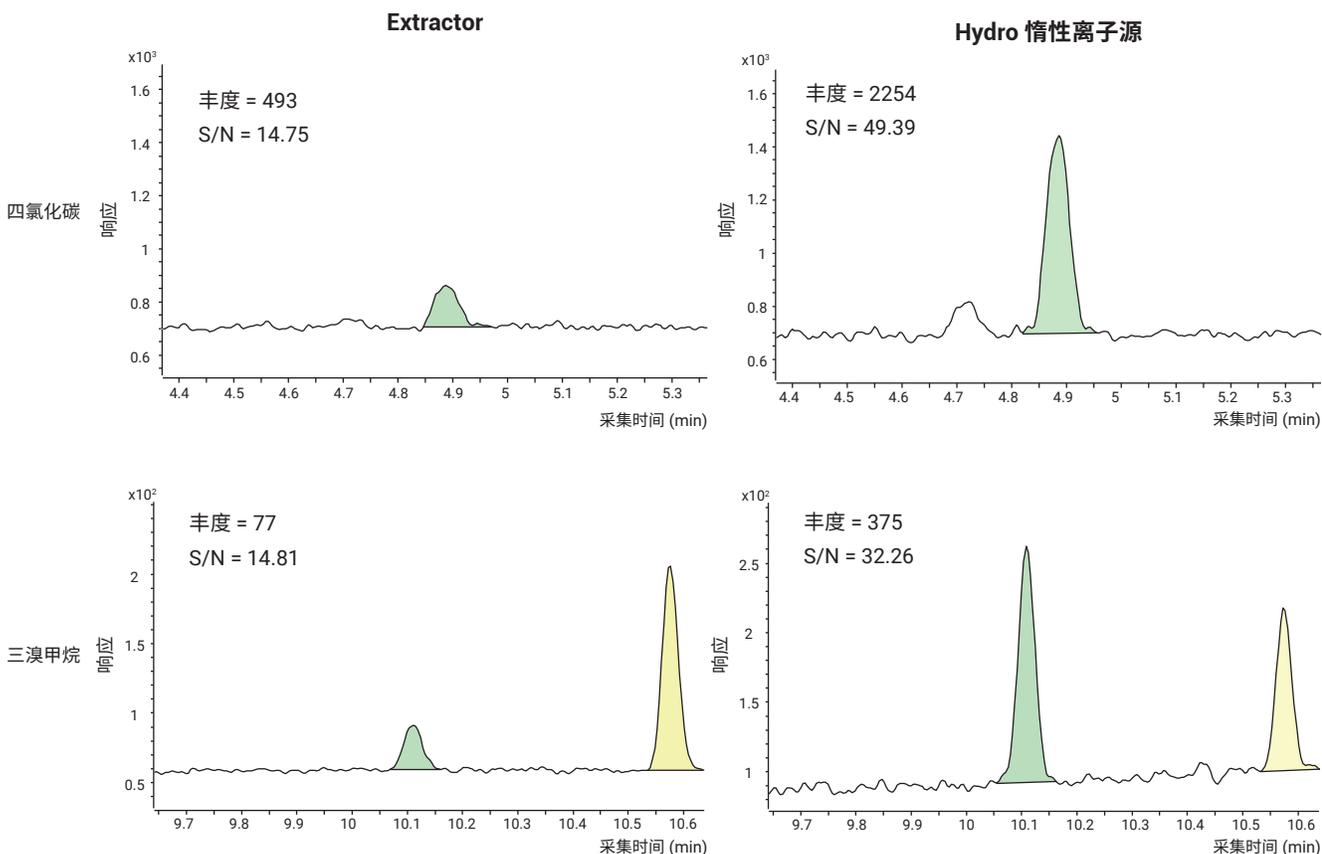


图 6. 使用氢气载气时，Agilent Hydro 惰性离子源和 Extractor 离子源的四氯化碳和三溴甲烷的 EIC 比较，重点关注丰度和信噪比

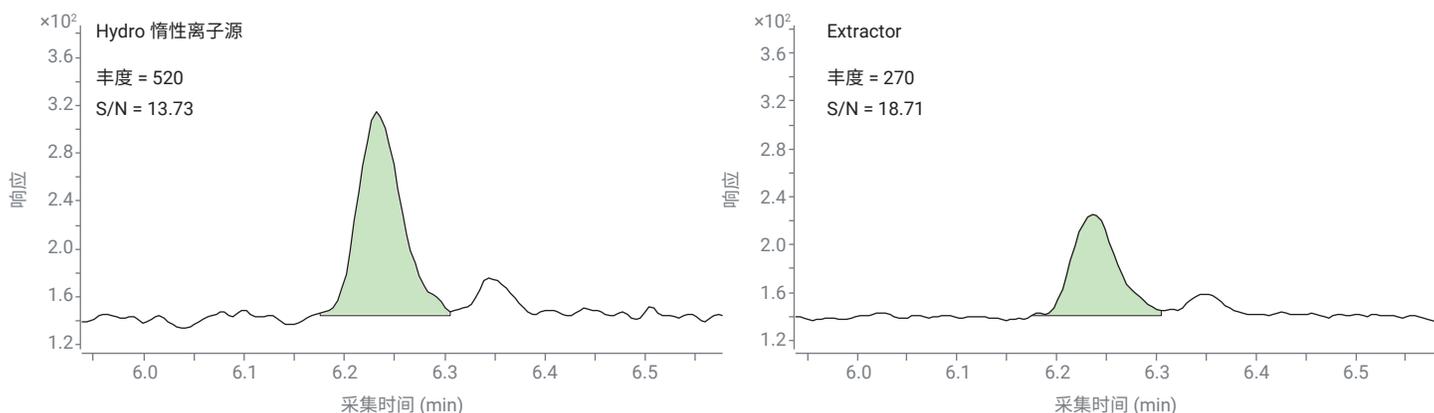


图 7. 使用氢气载气时，Agilent Hydro 惰性离子源和 Extractor 离子源的 1,4-二氧六环的 EIC 比较，重点关注丰度和信噪比

测试应用

选择一组应用来评估使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行的 GC/MS 和 GC/MS/MS 分析。以下各节重点介绍了使用氢气载气和 Hydro 惰性离子源进行 SVOC 分析、农药分析、PAHs 分析和其他分析的结果。根据测试，表 3 汇总比

较了使用氢气载气时，Hydro 惰性离子源 Inert Plus 系统和常规 Inert Plus 系统的性能。如果质谱中离子片段分布发生变化，并且由于分解、氢化或脱氯导致化合物鉴定错误，则结果被认定为“不可接受”。对于一些应用（如烃类和 PAH 分析），“常规”GC/MS 系统和 Hydro 惰性

离子源系统（均采用各自的 9 mm 提取透镜）在质谱保真度方面结果相当，这些应用被认定为“中性”应用。若 Hydro 惰性离子源（使用氢气载气）能够保持质谱保真度，并且在以氦气谱库作为参比谱库的情况下，可以正确鉴定化合物，则该应用被认定产生了“不同”结果。

表 3. 测试的化合物类别（包括示例化合物）以及使用氢气载气时，典型 Inert Plus 离子源和 Agilent Hydro 惰性离子源的分析性能

化合物类别	示例化合物	氢气载气 + 常规 GC/MS 离子源	氢气载气 + Hydro 惰性离子源
硝基化合物	硝基苯、杀螟硫磷、乙烯氟灵	不可接受	不同
高度氯化化合物	DDT、异狄氏剂、七氯、BHC 化合物、五氯苯酚	不可接受	不同
PAH	苯并(b)荧蒽、苯并[g,h,i]花、荧蒽	中性	中性
烷烃 > C ₂₄	二十四烷 (C ₂₄)、三十八烷 (C ₃₈)	中性	中性
农药	溴氰菊酯、氟虫腈、氯菊酯、克菌丹	不可接受	不同
香精/香料化合物	麝香酮、葵子麝香、芳樟醇	不可接受	不同
VOC	1,4-二氧六环、三氯甲烷、溴二氯甲烷	中性	不同

- 若发现质谱失真或化合物鉴定错误，则认定为“不可接受”
- 当使用氢气载气时，若常规 GC/MS 系统和 Hydro 惰性离子源的结果相似，则认定为“中性”
- 当 Hydro 惰性离子源保持了质谱保真度，且以氦气谱库作为参比谱库的情况下，正确鉴定出化合物，则认定为“不同”

烃类

可以使用从正癸烷 (C₁₀) 到正三十八烷 (C₃₈) 的烃类分子量标准品来评估 GC/MS 系统的冷凝点和活性, 它们会导致高分子量化合物的峰形变差且出现明显拖尾 (> 2.0), 在使用氢气载气时更是如此。具体而言, 为了比较现有 Extractor 离子源与 Hydro 惰性离子源, 查看了每个直链烃类峰的拖尾因子, 旨在验证使用 Hydro 惰性离子源时峰形未变差。图 8A 是使用 Hydro 惰性离子源时烃类的 TIC, 图 8B 是使用现有 Extractor 离子源时烃类的 TIC。通过比较 TIC 可以发现, 从 C₂₂ (拖尾因子 1.27) 开始, 使用氢气载气的 Extractor 离子源出现明显的峰拖尾, C₂₆ 的拖尾因子增加到了 2.1, 并且拖尾因子还在继续增加, 直到 C₃₈ 达到最大值 (拖尾因子 10.2)。与此同时, Hydro 惰性离子源的 TIC 数据表明, 其峰形有所改善形, 拖尾因子在 0.6 到 0.9 之间, 而理想拖尾因子为 1.0。与现有的使用氢气载气的 Extractor 离子源相比, 使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气时峰形有所改善, 表明热稳定性更高, 同时质谱仪内活性降低。

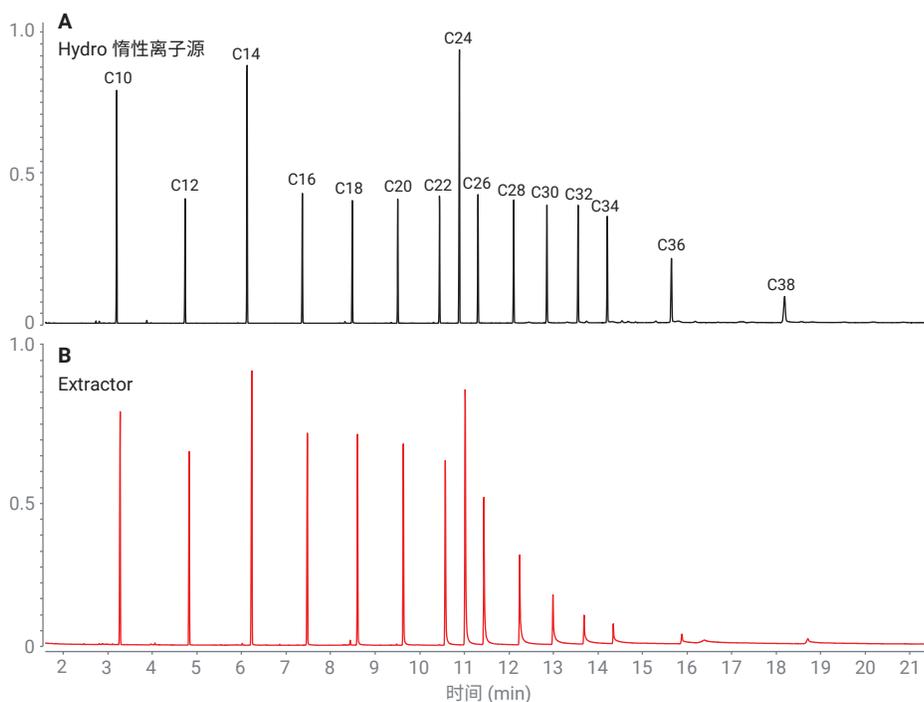


图 8. 采用氢气载气和 (A) Agilent Hydro 惰性离子源以及 (B) 现有 Extractor 离子源时, 从正癸烷 (C₁₀) 到正三十八烷 (C₃₈) 的直链烃的 TIC, 以直观地展示拖尾情况

半挥发性化合物分析: EPA 8270 和 PAHs

美国 EPA 方法 8270 (8270D 和 8270E 版) 中包含一份 200 多种化合物的列表, 固体废物、土壤、空气和水提取物中的这些化合物适合通过 GC/MS 进行分析^[3,4]。方法 8270 包含来自酸性、碱性、中性化合物和 PAHs 等多种分析物类型的 SVOCs; 由于 EPA 8270 分析物所属的化合物类别丰富多样且实验室应用范围较广, 因此, 为了了解 Hydro 惰性离子源的应用范围和限制, 对 EPA 8270 分析物进行了测试。表 2 中的筛选混合物由 EPA 方法 8270 列表中的许多半挥发性化合物组成, 显示了具有高 LMS (与氦气离子源谱库 (如 NIST) 相比) 的预期质谱碎

片离子的保留情况。此外, 图 10 比较了使用氢气载气时, 通过 Extractor 离子源 (上图) 和 Hydro 惰性离子源 (下图) 分析 68 种 SVOCs 和 PAHs 的混合物获得的结果。结果表明, 与 Extractor 离子源相比, Hydro 惰性离子源具有出色的峰形, 且峰形得到进一步改善。

EPA 8270 的一个重要组成部分是与十氟三苯基磷 (DFTPP) 的离子比相关的调谐标准。已在 GC/MS/MS 系统上对 EPA 方法 8270 进行了测试, 其中使用 Etune 调谐法作为推荐的调谐方法 (之前的应用简报中已对此进行了说明)^[5]。对于 GC/MS 单四极杆系统, 使用了 EPA 方法 8270E 和 EPA 方法 8270D 表 3 中的 DFTPP 离子比标准来测试了使用氢气载气的 Hydro 惰性离子源^[3,4]。EPA 方法 8270D 包含的

离子比标准比 EPA 8270E 更多，其反映了 EPA 525 标准表。表 4 汇总了 25 ng/μL 条件下，DFTPP 离子比的相对丰度、方法标准，以及相对丰度实测值是否符合标准，其中所有相对丰度实测值均符合 8270E 和 8270D 离子比标准。

当单四极杆和三重四极杆系统上的分析从氦气载气转为氢气载气时，人们最关注的是灵敏度和响应因子 (RFs) 的维持问题。表 5 列出了来自 EPA 方法 8270E 中表 4 (指导标准) 的 RFs、使用氦气载气进行 GC/MS 分析的 RFs、使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行 GC/MS 分析的 RFs 以及使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行 GC/MS/MS 分析的 RFs。所有测试系统均使用 9 mm 提取透镜，根据离子源类型进行选择 (例如，Hydro 惰性离子源使用的是 Hydro 惰性离子源 9 mm 提取透镜)。EPA 方法 8270E 中表 4 所列的 RFs 为指导标准，并非判断方法是否合格的要求，但理想情况下，RFs 应与这些指导值相当。对于采用氦气的 GC/MS 分析，有两种化合物的 RFs 低于指导标准：六氯乙烷和 N-亚硝基二正丙胺。对于采用氢气和 Hydro 惰性离子源的 GC/MS 分析，另有五种化合物的 RFs 低于指导标准，其中四种相差在 0.1 以内，例如，双(2-氯乙基)醚的 RF 指导标准为 0.7，而该方法的 RF 为 0.6。对于采用氢气和 Hydro 惰性离子源的 GC/MS/MS 分析，还有 15 种化合物的 RF 值低于采用氦气的 GC/MS 分析，但当正常校准范围为 100 pg/μL 至 100 ng/μL 时，GC/MS/MS 也有可能分析浓度水平低至 20 pg/μL 的样品。就灵敏度而言，在之前的 EPA 8270 应用中，使用氦气载气对 96 种化合物进行了 GC/MS 分析^[6]。比较使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行 GC/MS 分析时这些化合物的线性范

表 4. DFTPP 离子、来自 EPA 方法 8270D 和 8270E 的丰度标准^[3,4]，相对丰度实测值，以及相对丰度的合格情况

目标质量 (m/z)	离子丰度标准	相对丰度实测值	合格/不合格
51	*198 m/z 的 10%-80%	11.4%	合格
68	小于 69 m/z 的 2%	1.7%	合格
69	存在	27.2%	合格
70	小于 69 m/z 的 2%	1.0%	合格
127	*198 m/z 的 10%-80%	31.1%	合格
197	小于 198 m/z 的 2%	0.1%	合格
198	基峰或存在 *或大于 442 m/z 的 50%	73.7%	合格
199	198 m/z 的 5%-9%	7.4%	合格
275	基峰的 10%-60%	29.2%	合格
365	大于基峰的 1%	3.5%	合格
441	小于 443 m/z 的 150% *存在，但是小于 442 的 24%	86.4% *16.7%	合格
442	基峰或存在 *或大于 198 m/z 的 50%	100% (基峰)	合格
443	442 m/z 的 15%-24%	23.4%	合格

*表示 EPA 方法 8270D 的要求与 EPA 方法 8270E 的要求存在差异

表 5. 选定化合物的响应因子 (RFs)，来自于：EPA 方法 8270E (EPA 方法中的表 4)^[4]、使用氦气载气的 GC/MS 单四极杆分析、使用 Agilent Hydro 惰性离子源和氢气载气的 GC/MS 单四极杆分析，以及使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气的 GC/MS/MS 串联四极杆分析

化合物	EPA 方法 8270E 中的响应因子 (RF) ^[4]	RF He GC/MS	RF H ₂ Hydro 惰性离子源 GC/MS	RF H ₂ Hydro 惰性离子源 GC/MS/MS
萘	0.9	1.3	1.1	0.2
萘烯	0.9	1.9	1.4	0.1
苯乙酮	0.01	1.2	0.4	1.0
蒽	0.7	1.1	1.0	0.9
苯并(a)蒽	0.8	1.4	1.5	1.0
苯并(a)芘	0.7	1.2	0.9	0.9
苯并(b)荧蒽	0.7	1.4	1.2	1.2
苯并(g,h,i)花	0.5	1.1	1.0	1.3
苯并(k)荧蒽	0.7	1.2	1.2	1.3
双(2-氯乙氧基)甲烷	0.3	0.4	0.3	0.7
双(2-氯乙基)醚	0.7	0.8	0.6	0.5
双(2-乙基己基)邻苯二甲酸酯	0.01	0.8	0.5	0.2
4-溴联苯醚	0.1	0.3	0.2	0.2
邻苯二甲酸丁酯	0.01	0.6	0.3	0.1
4-氯苯胺	0.01	0.4	0.4	0.6
4-氯-3-甲基苯酚	0.2	0.3	0.2	0.4
2-氯萘	0.8	2.4	1.0	0.8
2-氯酚	0.8	0.8	0.7	0.5
4-氯二苯醚	0.4	0.7	0.5	0.3
蒎	0.7	1.2	1.1	0.4
二苯并(a,h)蒽	0.4	1.1	1.0	0.2
二苯并呋喃	0.8	1.7	1.5	1.4

围，只有五种化合物的线性范围缩小：六氯丁二烯、2,6-二硝基甲苯、邻苯二甲酸二乙酯、2,4-二硝基甲苯和五氯苯酚，其中，前三个的线性范围缩小一个浓度点，起始浓度为 200 pg/μL 而非 100 pg/μL，在使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行分析时，2,4-二硝基甲苯的校准范围为 0.1–75 ng/μL。在使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行 GC/MS 分析时，五氯苯酚的线性范围起始浓度为 500 pg/μL 而非 100 pg/μL。对于苯甲酸，使用 Hydro 惰性离子源和氢气载气进行分析时的校准范围为 0.8–100 ng/μL，与使用氦气时相同。氢气载气和 Hydro 惰性离子源保持了灵敏度，因为大多数测试的半挥发性化合物通常是采用氦气载气才能检测到的。

化合物	EPA 方法 8270E 中的响应因子 (RF) ^[4]	RF He GC/MS	RF H ₂ Hydro 惰性离子源 GC/MS	RF H ₂ Hydro 惰性离子源 GC/MS/MS
邻苯二甲酸二正丁酯	0.01	1.3	0.8	0.8
3,3'-二氯联苯胺	0.01	0.5	0.4	0.1
2,4-二氯苯酚	0.2	0.3	0.2	0.4
邻苯二甲酸二乙酯	0.01	1.4	1.0	0.6
邻苯二甲酸二甲酯	0.01	1.4	1.0	0.8
2,4-二甲苯酚	0.2	0.3	0.3	0.4
4,6-二硝基-2-甲基苯酚	0.01	0.2	0.1	0.01
2,4-二硝基苯酚	0.01	0.2	0.1	0.02
2,4-二硝基甲苯	0.2	0.4	0.2	0.03
2,6-二硝基甲苯	0.2	0.3	0.2	0.03
邻苯二甲酸二正辛酯	0.01	1.3	0.8	0.4
茚萘	0.6	1.2	1.2	0.4
芴	0.9	1.3	1.2	1.4
六氯苯	0.1	0.3	0.3	0.4
六氯丁二烯	0.01	0.2	0.2	0.4
六氯环戊二烯	0.05	0.3	0.1	0.03
六氯乙烷	0.3	0.2	0.1	0.14
茚并(1,2,3-cd)芘	0.5	1.2	1.2	1.0
异佛尔酮	0.4	0.6	0.4	0.3
2-甲基萘	0.4	0.7	0.7	1.7
2-甲基苯酚	0.7	0.7	0.6	0.5
4-甲基苯酚	0.6	1.0	0.3	0.7
萘	0.7	1.1	1	0.9
2-硝基苯胺	0.01	0.4	0.23	0.05
3-硝基苯胺	0.01	0.3	0.18	0.03
4-硝基苯胺	0.01	0.3	0.21	0.13
硝基苯	0.2	0.3	0.2	0.3
2-硝基苯酚	0.1	0.2	0.11	0.1
4-硝基苯酚	0.01	0.2	0.14	0.05
N-亚硝基二正丙胺	0.5	0.4	0.4	0.03
N-亚硝基二苯胺	0.01	2.05	0.9	2.3
2,2'-氧代双(1-氯丙烷)	0.01	0.45	0.54	0.03
五氯苯酚	0.05	0.18	0.1	0.1
菲	0.7	1.2	1.1	1.1
苯酚	0.8	0.9	0.7	0.3
芘	0.6	1.3	1.2	0.4
1,2,4,5-四氯苯	0.01	0.38	0.31	0.23
2,3,4,6-四氯苯酚	0.01	0.36	0.17	0.07
2,4,5-三氯苯酚	0.2	0.3	0.3	0.2
2,4,6-三氯苯酚	0.2	0.3	0.2	0.2

图 9 展示了线性范围得以保持的另一个示例，比较了采用氦气载气进行分析时（图 9A，上图）以及采用氢气载气和 Hydro 惰性离子源进行分析时（图 9B，下图），硝基苯的线性范围。二者之间的平均 RF RSD 百分比非常接近，分别为 6.33%（氦气）和 6.59%（氢气载气和 Hydro 惰性离子源）。

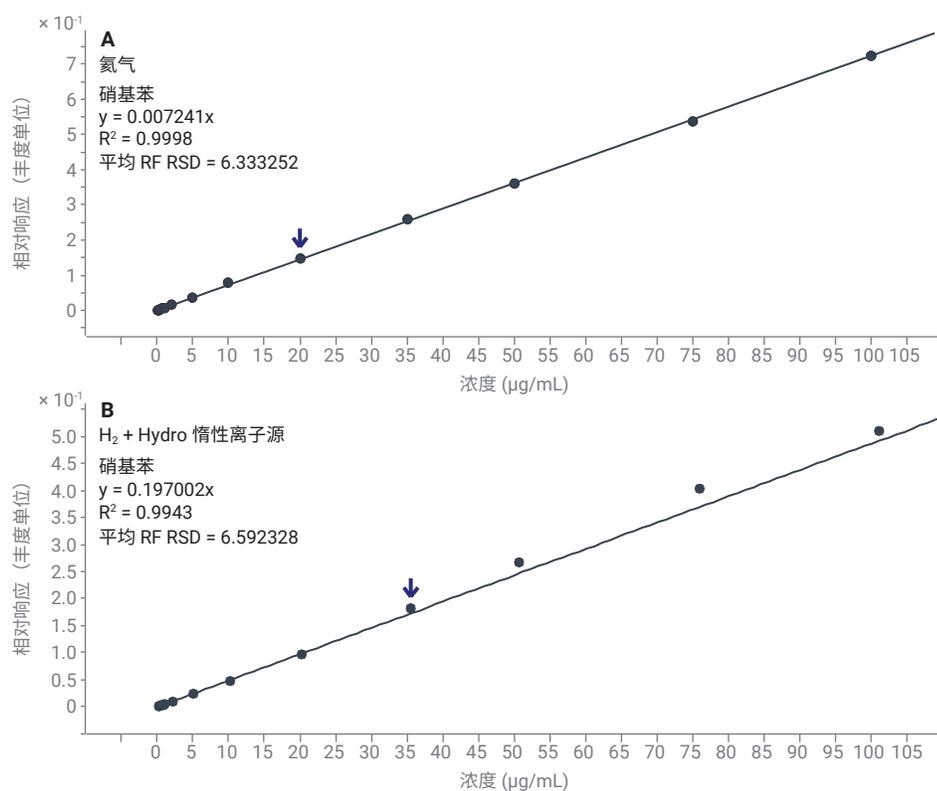


图 9. 利用 (A) 氦气以及 (B) 氢气载气和 Agilent Hydro 惰性离子源，通过 GC/MS 系统获得的硝基苯的线性范围 (0.1–100 ng/µL)

PAHs 多环芳烃作为非常稳定的一类化合物，已采用氢气载气通过 GC/MS 和 GC/MS/MS 对其进行了分析^[7]。此外，也采用 Hydro 惰性离子源对其进行了测试。如图 10 和 11 所示，在相同的方法和载气条件下，与 Extractor 离子源相比，使用氢气载气和 Hydro 惰性离子源时，峰形和分离度均有所改善。这在较晚洗脱的 PAHs 中最为明显，例如苯并(b)荧蒹、苯并(k)荧蒹和苯并(g,h,i)花（图 11）。

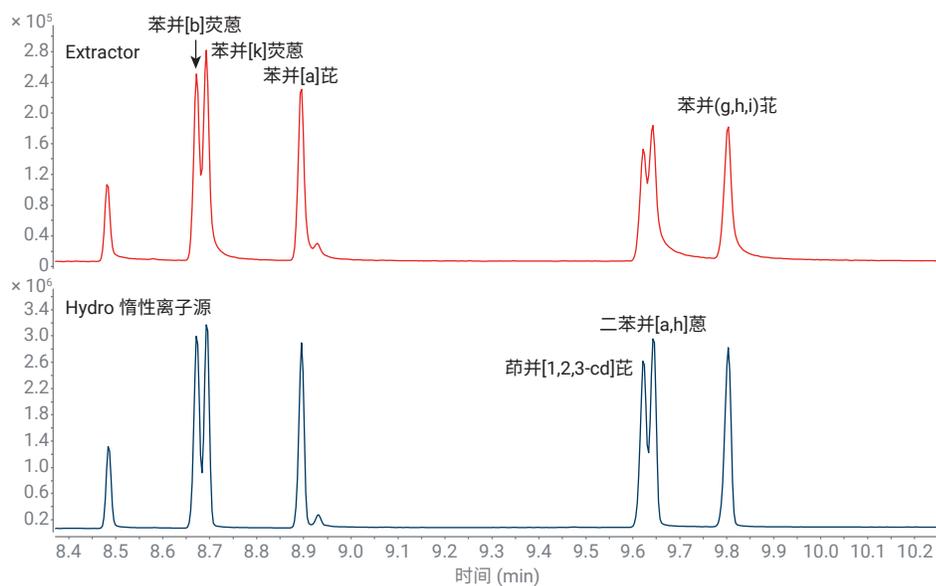


图 11. 较晚洗脱的 PAH 区域的放大图，比较在 50 ng/μL 浓度下，使用氢气载气时，Extractor 离子源和 Agilent Hydro 惰性离子源获得的这些化合物的峰形和分离度

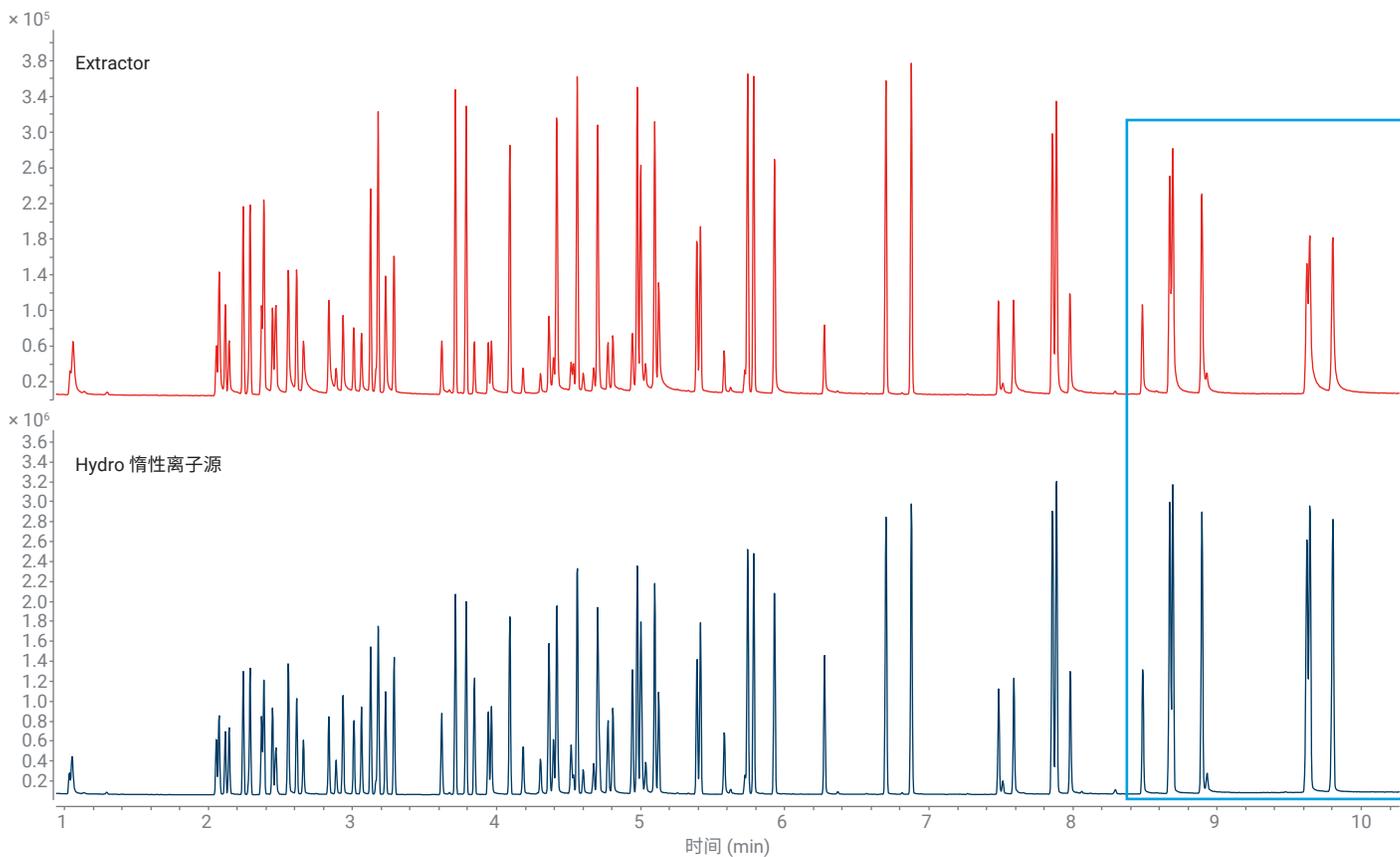


图 10. 使用氢气载气和 Extractor 离子源以及 Agilent Hydro 惰性离子源分析 EPA 方法 8270 中的 68 个目标分析物 (50 ng/μL)，比较获得的峰形和分离度

农药分析

对于农药分析，在 8890 GC 和 7000E 三重四极杆 GC/MS 中通过两根 HP-5ms 超高惰性气相色谱柱 (20 m × 0.18 mm, 0.18 μm) 配置柱中反吹，通过安捷伦吹扫 Ultimate 接头 (PUU)、氢气载气和 Hydro 惰性离子源连接。在这一色谱柱配置以及采用氢气载气的情况下，可以使用安捷伦农药与环境污染 (P&EP) 多反应监测 (MRM) 数据库的保留时间和 MRM 离子对，这些数据最初是通过 15 × 15 m (0.25 mm × 0.25 μm) HP-5ms 超高惰性气相色谱柱并使用氦气载气采集的。20 × 20 m 的设置为保留时间锁定。对多组农药标准品进行了测试，以评估农药分析中常见的各种化合物类别的质谱，如硝基化合物和高度氯化化合物。这些混标中的农药包括溴氟菊酯、乙丁烯氟灵、氟虫腈、氟氯菊酯、氯菊酯、克菌丹、对硫磷、异狄氏剂和七氯。采用氢气载气，通过带有 3 mm 提取透镜 (使用氦气进行痕量农药分析时的推荐透镜) 的 Inert Plus 离子源和带有 9 mm 提取透镜的 Hydro 惰性离子源，对农药混标进行了测试。第一轮测试使用扫描模式进行采集，以了解采用氢气载气时各种农药的碎片离子谱是否得以保持、离子丰度是否发生变化，或者在两种离子源中是否有发现新的氢化产物离子。乙丁烯氟灵含有两个硝基基团，叠加丰度最高的前五个 EIC 时，丰度最高的离子变化最为明显；图 12 比较了两种离子源的情况。根据使用氦气获取的质谱图，乙丁烯氟灵中丰度最高的五个离子分别为 55、276、316、318 和 292 m/z 。如果硝基基团在离子源中氢化，那么质谱中 269 m/z 会非常明显，而在基于氦气的参比质谱中，该离子并不明显。对于采用氢气载气和 Extractor 离子源 (Inert

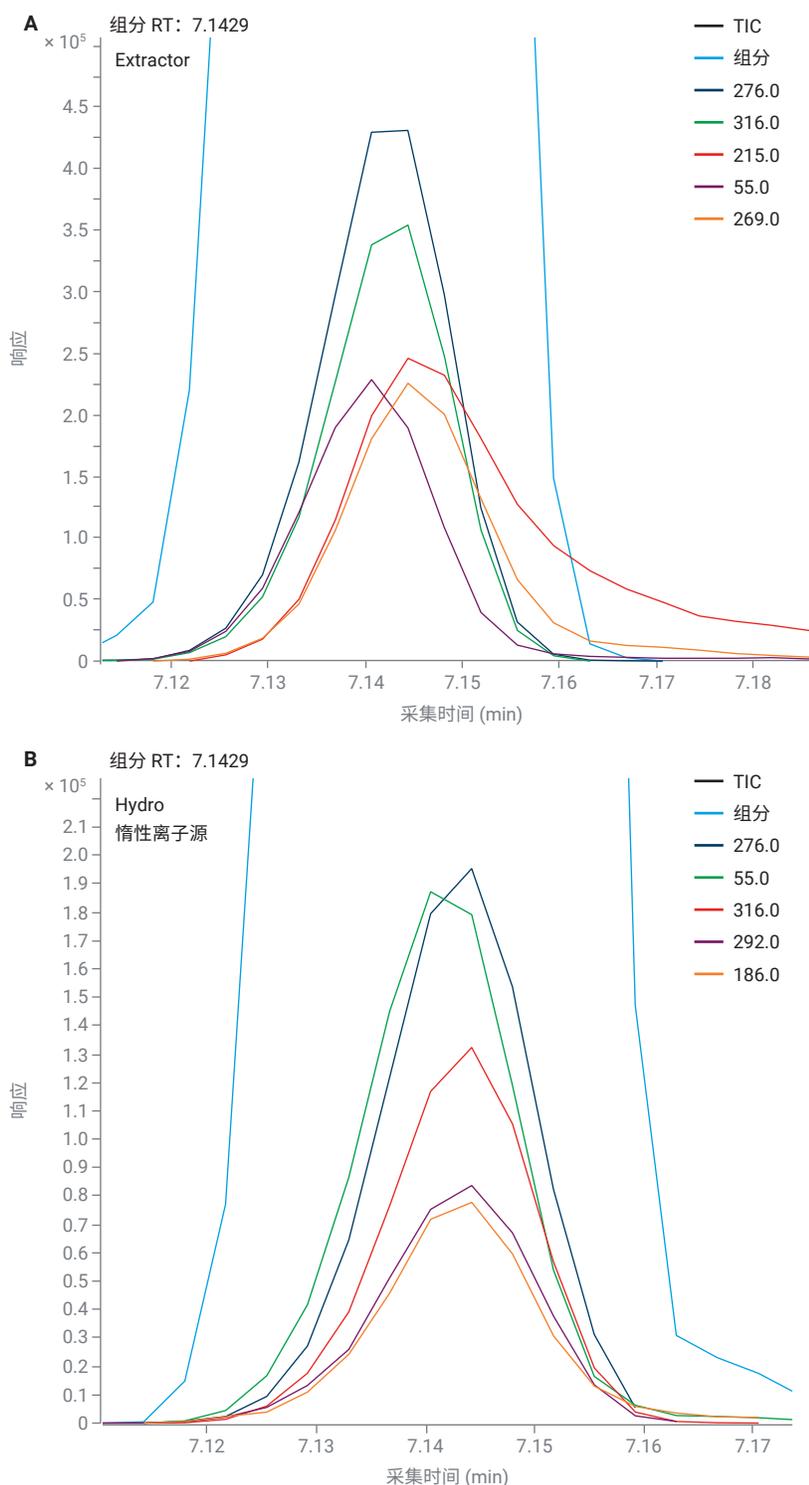


图 12. 采用氢气载气和 (A) 配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源以及 (B) 配备 9 mm 提取透镜的 Agilent Hydro 惰性离子源时，乙丁烯氟灵的丰度最高的前五个离子的 EICs

Plus) 进行的测试, 图 12A 显示了丰度最高的前五个离子, 其中包括 269 和 215 m/z , 并指示离子源中发生了氢化; 丰度最高的离子也进行了重新排列, 其中 55 m/z 降至丰度排名第四的离子, 316 m/z 的排名上升, 同时增加了 215 m/z , 而在使用氦气获得的质谱中, 215 m/z 的丰度非常低。相比之下, 图 12B 为采用 Hydro 惰性离子源开展的相同实验, 在丰度最高的前五个离子中, 并没有 269 m/z , 表明没有发生氢化。在存在氢气的情况下, 使用 Hydro 惰性离子源获得的离子丰度符合预期, 因此允许方法开发人员使用相同

的 MRM 离子对或选择离子监测 (SIM) 的离子, 且过渡至氢气载气时所需的时间更短。

使用氢气载气时, Extractor 离子源和 Hydro 惰性离子源之间出现差异的另一个例子是溴氰菊酯。溴氰菊酯是一种具有氰基 (4-苯氧基苯基) 甲基-2,2-二甲基环丙烷羧酸酯结构的农药化合物; 这类化合物在环丙烷结构之后具有不同的官能团。这些化合物在酯基的 C-O 键上也有一个裂解点, 其主要碎片离子与 209 m/z (间苯氧基苯乙腈结构) 有关。该 209 m/z 碎片通常会出现在溴氰菊酯的质谱图中, 但

丰度较低。使用 MassHunter 未知物分析软件查看扫描采集的溴氰菊酯结果, 在某些情况下, 使用 Extractor 离子源时, 在典型保留时间 18.17 分钟处, 未鉴定出溴氰菊酯。相反, 鉴定出了间苯氧基苯乙腈, 如图 13A 所示, 209 m/z 处的丰度非常高, 而 253 m/z 处无离子丰度。在其他一些使用 Extractor 离子源的运行中, 鉴定出了溴氰菊酯 (图 13B), 但 LMS 为 70 多分, 且 209 m/z 处丰度较高。在图 13C 中, 鉴定出了溴氰菊酯, 其 LMS 得分在 91 到 94 之间, 解卷积质谱图与底部的 (He) NIST 谱库谱图非常相似。

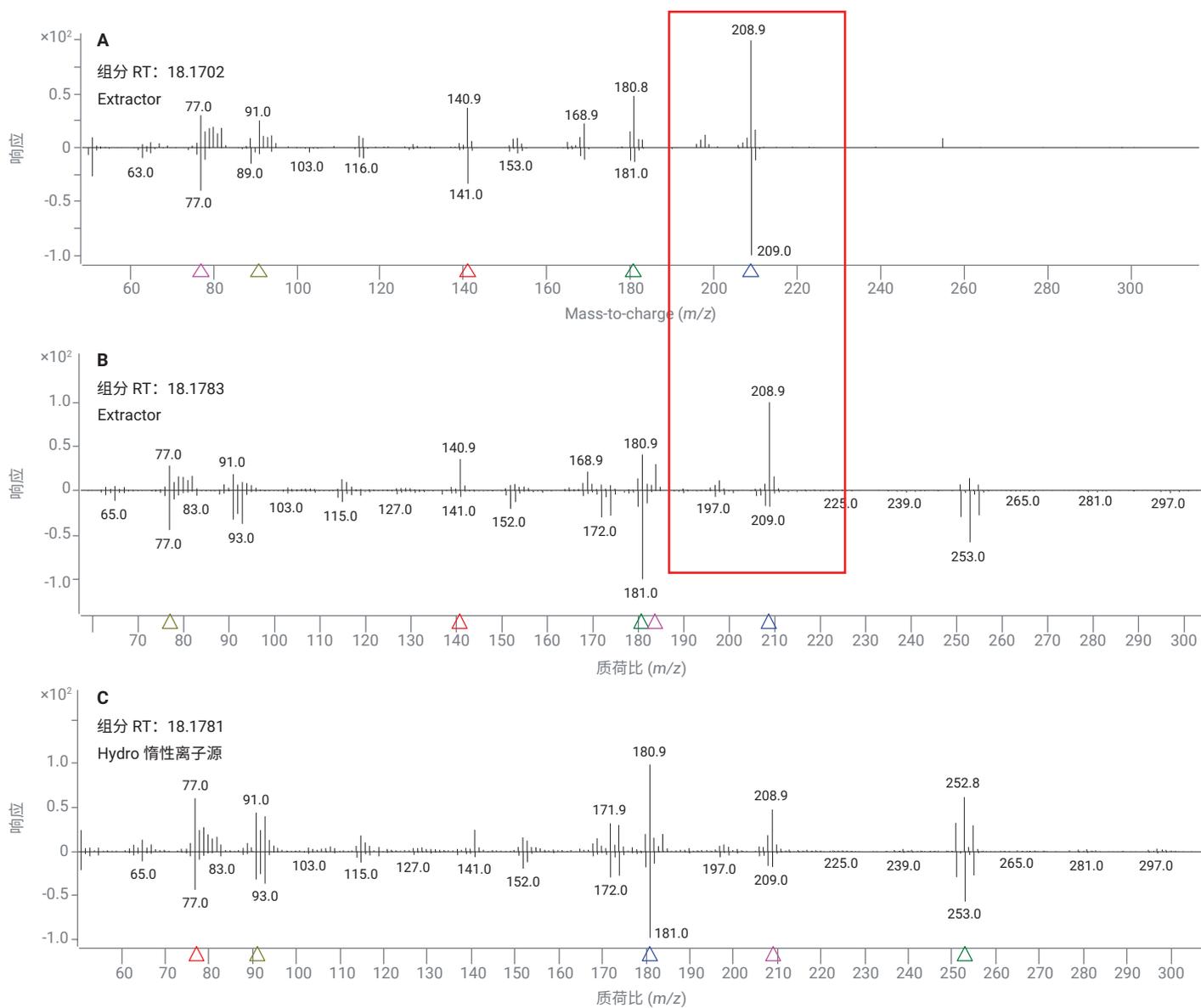


图 13. 采用氢气载气和 (A) 配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 离子源 (第 1 次运行)、(B) 配备 3 mm 提取透镜的 Extractor 惰性离子源 (第 2 次运行)、(C) 配备 9 mm 提取透镜的 Agilent Hydro 惰性离子源时, 溴氰菊酯的解卷积质谱图 (每张图的上部) 与 NIST17.L 谱库谱图 (每张图的下部) 从头到尾的比较

挥发性有机化合物 (VOCs)

对于 VOCs，建议使用 6 mm Hydro 惰性离子源提取透镜，但也可以选择 9 mm Hydro 惰性离子源提取透镜。开发了一种方法来快速鉴定并定量水样中低 $\mu\text{g/L}$ 水平的挥发性化合物。当使用氢气载气和全新 Hydro 惰性 EI 离子源时，Agilent 8697 顶空进样器、8890 GC 和 5977C GC/MSD 的组合可以实现上述功能，对水样中的许多挥发性化合物进行分析。在

当地法规允许的情况下，顶空方法通常可作为吹扫捕集进样的更为简单的替代方案。图 14 中的数据是在扫描模式下获取的，用于通过谱图确认进行广泛筛查，因为通过选定目标的 SIM 采集可以检测较低的水平。该方法鉴定出四种三卤甲烷，且丰度最高的离子符合预期，表明 Hydro 惰性离子源在存在氢气载气的情况下，能够防止发生脱卤反应。此外，表 6 列出了将解卷积谱图与 NIST 谱库对比得到的 LMS。与使用氦气获得的 NIST 谱库质谱

图相比，80 分及以上的匹配得分表明，使用氢气载气和 Hydro 惰性离子源能够非常好地保持正常的碎裂模式。

表 6. 使用氢气载气和 Agilent Hydro 惰性离子源分析特定低浓度 ($\mu\text{g/L}$) 的三卤甲烷的谱库匹配得分 (相比 NIST 氦气谱库)

	保留时间 (min)	NIST LMS
三氯甲烷	2.107	93
溴二氯甲烷	2.792	86
二溴氯甲烷	3.526	88
三溴甲烷	4.267	80

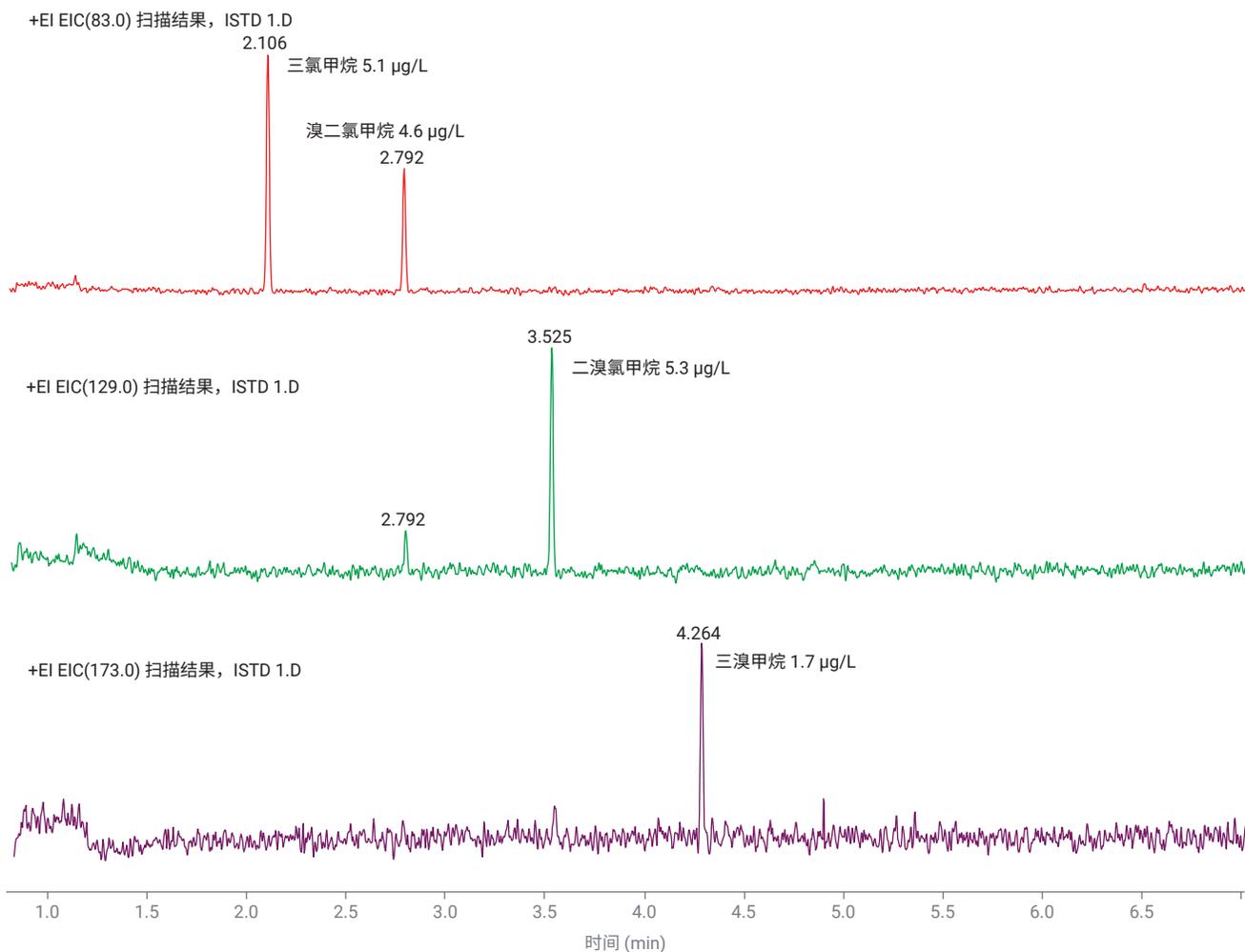


图 14. 使用氢气载气和 Agilent Hydro 惰性离子源，运行顶空 HS/GC/MS 系统时，获得的 83、129 和 173 m/z 的提取离子色谱图 (EIC) 以及四种三卤甲烷的鉴定和定量

Hydro 惰性离子源升级套件 和离子源全套组件

图 15 是组装的 Hydro 惰性离子源的部件分解图，其中 Hydro 惰性离子源的专用部件以紫色突出显示（从左至右，分别为部件 17、12、3、4、10 和 9）。此外，16 号部件“离子源加热器模块组件”专门用于 Hydro 惰性离子源，表面刻有“H₂”，表明可使用氢气载气的 Hydro 惰性离子源已安装在质谱仪中。图中的所有其他部件与 Inert Plus（或 Extractor）离子源中的相同。表 7 列出了与图 15 中各个编号相对应的部件。部件 11、13、14 和 15 插入加热器模块的前部，未在图中单独显示。

现提供用于现有 Agilent 5977A Extractor GC/MSD 和 Agilent 5977B Inert Plus GC/MSD 的 Hydro 惰性离子源全套组件（部件号 G7078-67930）和 Hydro 惰性离子源 GC/MSD 升级套件（部件号 5505-0083）。完全组装好的离子源可以直接安装到质谱仪中，而无需更换现有离子源的部件（使用 Hydro 惰性离子源 GC/MSD 升级套件时才需要）。表 8 列出的所有部件均包含在 Hydro 惰性离子源 GC/MSD 升级套件中。Hydro 惰性离子源与较早的质谱仪型号（如 Agilent 5975 系列 GC/MSD）不兼容，与不锈钢或惰性离子源也不兼容。

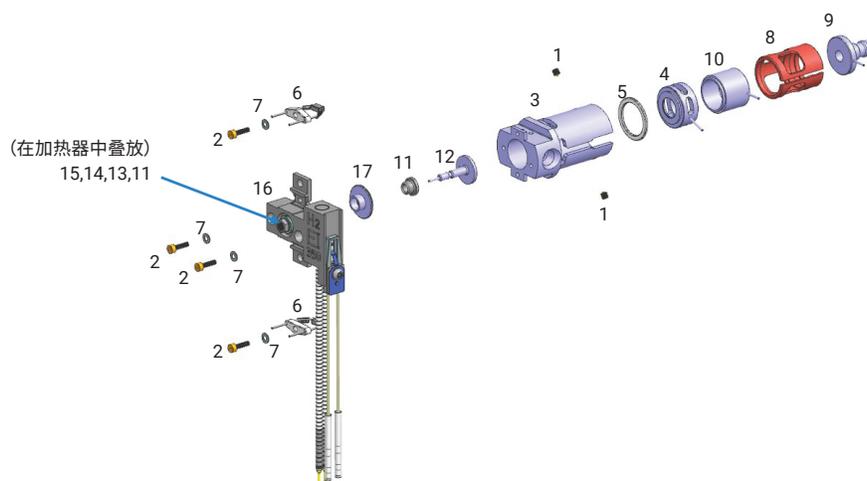


图 15. 组装好的 Agilent Hydro 惰性离子源的部件分解图

表 7. 用于 Agilent Inert Plus GC/MS 系统的完整组装的 Agilent Hydro 惰性离子源的部件列表

编号 (图 15)	部件名称	部件号
1	固定螺钉	G3870-20446
2	螺钉	G3870-20021
3	Extractor 离子源体*	G7078-20903
4	提取透镜-9 mm*	G7078-20909
5	提取透镜绝缘体	G3870-20445
6	灯丝	G7005-60061
7	弹簧垫圈 平垫圈	3050-1301 3050-0982
8	透镜绝缘体	G3870-20530
9	入口透镜*	G7078-20904
10	离子聚焦透镜*	G7078-20905
11	推斥极绝缘体	G1099-20133
12	推斥极*	G7078-20902
13	平垫圈	3050-0891
14	Belleville 弹簧垫圈	3050-1301
15	推斥极螺帽	0535-0071
16	H ₂ EI 加热器/传感器组件*	G7078-60910
17	内插件*	G7078-20901

* Hydro 惰性离子源专用部件

现提供用于现有 Agilent 7000C/D 三重四极杆 GC/MS 系统的 Hydro 惰性离子源全套组件（部件号 G7006-67930）和 Hydro 惰性离子源三重四极杆 GC/MS 升级套件（部件号 5505-0084）。表 9 列出的所有部件均包含在 Hydro 惰性离子源三重四极杆 GC/MS 升级套件中。如果用户已拥有 7000C 或 7000D Inert Plus 三重四极杆 GC/MS 系统，则可以购买 Hydro 惰性离子源三重四极杆 GC/MS 升级套件，其中包含图 15 所示的 Hydro 惰性离子源质谱仪部件，但入口透镜是专门为串联四极杆系统设计的扩展入口透镜。

如果实验室中有多种离子源，则应单独存放 Hydro 惰性离子源的部件，并与氢气加热器/传感器组件一起存放，以便轻松确认 MS 系统中是否安装了与氢气兼容的（Hydro 惰性）离子源。此外，三重四极杆与单四极杆的部件应分开存放，因为它们的入口透镜长度不同，不能互换。

表 8. Agilent Hydro 惰性离子源 GC/MSD 升级套件，用于 Agilent 5977A Extractor GC/MSD、Agilent 5977B Inert Plus GC/MSD 或 Agilent 5977C GC/MSD，提供了部件号和图 15 中的编号

编号 (图 15)	部件名称	部件号
NA	Hydro 惰性离子源 GC/MSD 升级套件	5505-0083
17	内插件*	G7078-20901
12	推斥极*	G7078-20902
3	Extractor 离子源体*	G7078-20903
9	入口透镜*	G7078-20904
10	离子聚焦透镜*	G7078-20905
4	提取透镜-9 mm*	G7078-20909
16	H ₂ EI 加热器/传感器组件*	G7078-60910
NA	线，提取透镜	G7000-60827
11	推斥极绝缘体 (x2)	G1099-20133

* Hydro 惰性离子源专用部件

表 9. Agilent Hydro 惰性离子源三重四极杆 GC/MS 升级套件，用于 Agilent 7000C/D/E 三重四极杆质谱仪，提供了部件号和图 15 中的编号

编号 (图 15)	部件名称	部件号
NA	Hydro 惰性离子源 GC/TQ 升级套件	5505-0084
17	内插件*	G7078-20901
12	推斥极*	G7078-20902
3	Extractor 离子源体*	G7078-20903
9**	入口透镜-扩展* **	G7006-60926
10	离子聚焦透镜*	G7078-20905
4	提取透镜-9 mm*	G7078-20909
16	H ₂ EI 加热器/传感器组件*	G7078-60910
NA	线，提取透镜	G7000-60827
11	推斥极绝缘体 (x2)	G1099-20133

* Hydro 惰性离子源专用部件

** Hydro 惰性离子源 MS/MS 系统的扩展入口透镜比单四极杆质谱系统的入口透镜更长

结论

Agilent Hydro 惰性离子源搭配氢气载气是氦气载气的一种更具可持续性的替代品，且有助于改善使用氢气载气进行 GC/MS 和 GC/MS/MS 分析时的分析性能。该新型离子源可以完全组装好的形式提供，也可以作为现有 GC/MS 和 GC/MS/MS 系统升级套件的一部分。就性能而言，Hydro 惰性离子源保持了质谱保真度，使用户可以继续使用现有的基于氦气的质谱库。

参考文献

1. Agilent EI GC/MS Instrument Helium to Hydrogen Carrier Gas Conversion (安捷伦 EI GC/MS 仪器载气由氦气转换为氢气的用户指南)，安捷伦科技公司用户指南，出版号 5994-2312EN，**2020**
2. Quimby, B. et al. In-Situ Conditioning in Mass Spectrometer Systems, *US Patent 8,378,293*, February 19, **2013**
3. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS); Method 8270D. *United States Environmental Protection Agency*, Revision 4, February **2007**
4. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS); Method 8270E. *United States Environmental Protection Agency*, Revision 4, June **2018**
5. Churley, M.; Quimby, B.; Andrianova, A. 采用 7000 系列三重四极杆气质联用系统在 MRM 模式下实现快速 EPA 8270 方法，安捷伦科技公司应用简报，出版号 5994-0691ZHCN，**2019**
6. Smith Henry, A. 使用安捷伦烧结砂芯衬管通过气质联用系统分析半挥发性有机化合物，安捷伦科技公司应用简报，出版号 5994-0953ZHCN，**2019**
7. Andrianova, A.; Quimby, B. Optimized PAH Analysis Using Triple Quadrupole GC/MS with Hydrogen Carrier (使用三重四极杆 GC/MS 和氢气载气优化 PAH 分析)，安捷伦科技公司应用简报，出版号 5994-2192EN，**2020**

查找当地的安捷伦客户中心：

www.agilent.com/chem/contactus-cn

免费专线：

800-820-3278，400-820-3278（手机用户）

联系我们：

LSCA-China_800@agilent.com

在线询价：

www.agilent.com/chem/erfq-cn

www.agilent.com

DE97431848

本文中的信息、说明和指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司，2022
2022 年 6 月 21 日，中国出版
5994-4889ZHCN