

便携 VOCs 质谱仪系统设计与性能优化

陈振宇, 杨宝坤, 姜婷, 徐伟

(北京理工大学医学技术学院, 北京 100081)

摘要: 原位实时监测可挥发性有机物 (VOCs) 对环境和人体健康至关重要, 便携式质谱仪正在发展成为一种用于现场快速分析 VOCs 的新工具。本研究研制了一种基于非连续进样接口的便携式质谱仪, 并结合了亚真空等离子体电离源。该便携质谱仪配备线性离子阱质量分析器, 总质量约 4.6 kg, 尺寸 217 mm×162 mm×106 mm, 总功率不超过 150 W。进样接口选用全金属电磁阀作为大气压限流核心部件, 避免了传统夹管阀需要使用橡胶等材质软管的缺陷, 从而提升了进样装置的重复性和环境适应性。经过系统性的优化, 仪器分辨率可达 0.2 u (半峰宽), 苯的分析灵敏度可达 343 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

关键词: 便携质谱仪; 离子阱; 非连续进样; 可挥发性有机物 (VOCs)

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2024)05-0609-07

doi: 10.7538/zpxb.2024.0003

Design and Performance Optimization of a Portable VOCs Mass Spectrometer System

CHEN Zhen-yu, YANG Bao-kun, JIANG Ting, XU Wei

(School of Medical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to their high reactivity, volatile organic compounds (VOCs) can engage in physical and chemical reactions with particulate matter in the atmosphere, leading to air pollution. Extended exposure to VOCs may result in various health concerns, including respiratory system problems, neurological effects, skin and eye irritation, and an increased risk of certain cancers. Traditional benchtop mass spectrometers possess the advantages of high sensitivity and rapid analysis capabilities, but the large size typically confines their applications to professional laboratories. To overcome this limitation, portable mass spectrometers are emerging as a new tool for *in-situ* analysis. In this study, a portable mass spectrometer based on discontinuous atmosphere pressure interface was developed, which combined with a sub-vacuum plasma ionization source. Ion trap, known for its small size and adequate performance, was adopted in this miniaturized mass spectrometer. This portable mass spectrometer features a total weight of about 4.6 kg, with the dimensions of 217 mm×162 mm×106 mm, and operates with a power consumption under 150 W. On this design, a fully metallic solenoid valve was selected as the core component to limit atmospheric pressure, eliminating the need for the rubber tubing used in traditional pinch valves. Compared to traditional

pinch valves, this solenoid valve ensures a more stable airflow during experiments. As a result, the repeatability and environmental adaptability of the portable mass spectrometer were improved. A certain delay marked as radio frequency (RF) delay was introduced between the injection and cooling periods, and the RF-delay time was optimized. Frequency scanning mode and amplitude scanning mode were tested in parallel. Despite of a trade-off in size, amplitude scanning offered improved resolution, enabling the differentiation of ions with close mass to charge ratios. After systematic optimization, satisfactory performances in mass resolution and sensitivity were achieved. The mass resolution of the mass spectrometer for dimethyl carbonate was improved to 0.2 u (FWHM), and a sensitivity of 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for naphthalene was achieved. The capability of mixed VOCs was also validated using dimethyl carbonate and trimethyl phosphate. This mass spectrometer developed in this study, characterized by its high portability and satisfactory performance, is expected to hold great potential for applications in VOCs analysis.

Key words: portable mass spectrometer; ion trap; discontinuous sampling; volatile organic compounds (VOCs)

可挥发性有机物(VOCs)对环境和人类健康的影响是多方面的: VOCs具有高反应性,能够与大气中的颗粒物发生物理和化学反应,会对臭氧层产生破坏并参与光化学烟雾的形成,以及作为强效温室气体对气候变化产生影响^[1-3];长期处于高浓度 VOCs 环境中,人体可能会遭遇多种健康问题,包括呼吸系统和神经系统的疾病,并且可能增加患癌风险。

质谱仪因卓越的痕量物质分析能力,广泛应用于化学和生物技术领域^[4-6]。然而,传统质谱仪体积庞大、功耗较高、需要特殊的真空系统,且往往要求对样品进行预处理,限制了其现场快检等应用。相比之下,微型质谱仪具备体积小、功耗低的优势,且通常不需要样品前处理,方便现场快速分析样品。虽然这些便携式设备体积缩小,但仍能保持高灵敏度和高准确度的分析能力^[7-9],尤其适用于空间探索、国土安全以及环境监测等领域。

在微型化质谱仪设计中,进样系统和真空系统对仪器体积的缩减最为关键。质谱仪依靠真空泵维持内部真空环境,这对离子从大气压到质量分析器的高效传输起着决定性作用。进样系统是连接大气与真空的枢纽,常见的进样系统包括膜进样^[10-12]、连续大气压接口(CAPI)及非连续大气压接口(DAPI)^[13-14]。2015年,徐伟课题组^[15]研发了具有CAPI的微型质谱仪,实现了连续离子采样和高效检测。由于毛细管的离子扩散效应^[16-17],CAPI对低质量离子的传输效率较

低,导致小分子VOCs的检测灵敏度降低。此外,CAPI通常需要多级腔体来维持质量分析器的工作气压,不利于仪器体积的进一步缩小。DAPI通过控制电磁阀的开启和关闭,使空气中的中性分子或离子能够以脉冲模式被引入;同时,随时间变化的气压条件可以提高离子的传输效率,解决了质谱仪真空系统小型化问题。离子阱作为一种小型化质量分析器,可以与DAPI很好地结合,在优化的气压下进行稳定的质量扫描^[18-20]。

微型质谱仪通过结合多种电离技术能够从复杂基质中高效地提取和电离VOCs分子,具有广阔的应用前景。高真空电子电离(EI)源检测小分子VOCs的灵敏度较高,且离子传输过程不存在毛细管出口处超音速膨胀效应引起的极端扩散现象,但由于对真空度要求高,很难与微型化系统结合。流式辉光放电技术最初由McLucky等^[21]开发,具有结构简单、离子化效率高等优点,已成功应用于大气中痕量有机化合物的分析。辉光放电离子化技术与微型质谱仪相结合,实现了对各种挥发性有机物的高灵敏定性定量分析,拓宽了其在便携式设备中的应用范围^[15,22]。

本研究拟研制一种基于DAPI的便携质谱仪,并设计完整的分析时序。进样阀门采用全金属电磁阀,与传统夹管阀相比具有更好的重复性、稳定性和耐温特性。通过测试不同类型射频驱动电路对仪器分辨率等性能的影响,并优化射频延迟时间等参数,以实现较好的分析性能。

1 仪器设计

便携式质谱仪的内部示意图示于图 1a, 工作时序示于图 1b。在进样阶段, 电磁阀开启, VOCs 分子进入离子源并被电离, 产生的离子随后进入双曲面线性离子阱(LIT)(6 mm×6 mm×40 mm)中并被捕获。在质量分析阶段, 离子在辅助交流电压的作用下从 LIT 中释放并到达电子倍增器。非连续大气压接口和亚真空等离子体电离源的结合在保持各个阶段真空度的同时,

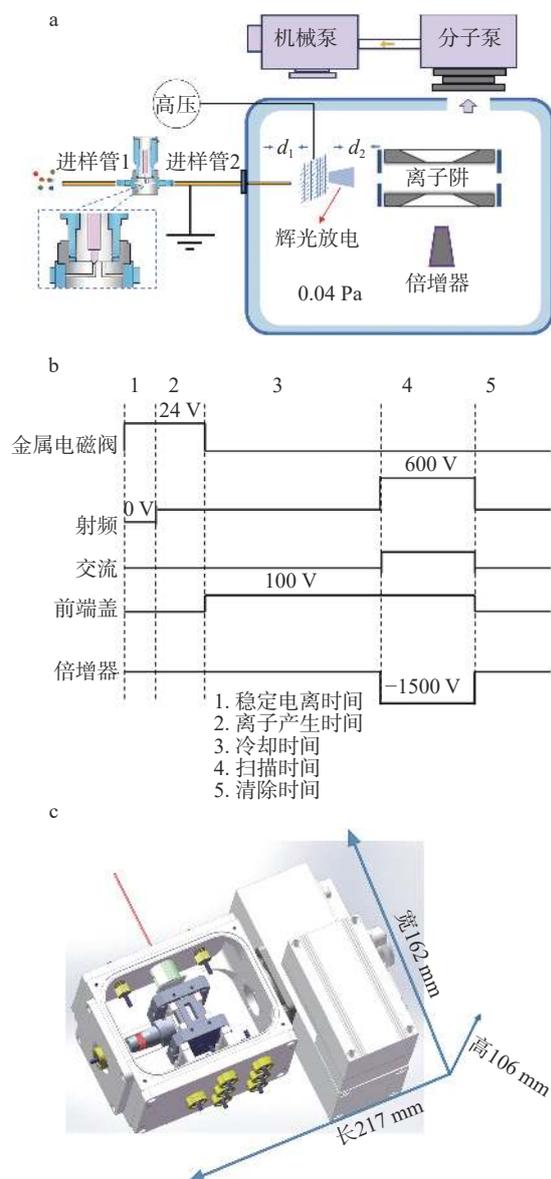


图 1 便携式质谱仪的内部示意图(a), 工作周期时序图(b)和仪器外观示意图(c)

Fig. 1 Internal diagram (a), time sequence diagram of the working cycle (b) and schematic depiction (c) of the portable mass spectrometer

实现了高效的离子电离和传输。仪器总体质量 4.6 kg, 尺寸 217 mm×162 mm×106 mm, 示于图 1c。

1.1 真空系统和进样系统

真空腔体的尺寸为 104 mm×104 mm×62 mm, 腔体内的低气压由联合真空系统维持, 真空泵组合选择 PM 25210 隔膜泵(德国 KNF 公司产品)和 FFK 110 分子泵(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所产品)。在单级真空腔体系统中, 分子泵的一端连接隔膜泵, 另一端连接真空腔体。首先, 通过启动隔膜泵将气压维持在约 466 Pa, 接着开启分子泵, 进一步将基础气压降至 0.04 Pa。在此进样系统中, 金属毛细进样管 1 (长度 5 cm, 内径 0.25 mm, 外径 1 mm) 负责将样品分子从大气传输至 Series 9 金属阀(美国 Parker 公司产品), 通过控制金属阀开关来控制气体的进入; 进样管 2 (长度 8 cm, 内径 0.75 mm, 外径 1 mm) 连接金属阀与真空腔体, 以完成样品分子的高效传输。在进样管 2 出口($d_1=0.5$ mm)处放置一网状金属片, 并在金属片上施加 550 V 直流电压。金属阀开启 4 ms 后, 气压升高, 网状金属片附近产生辉光放电并电离样品分子。放电过程与 DAPI 时序同步, 简化了进样系统, 使其更适合便携质谱仪的使用需求。被电离的样品分子在电场和气流的作用下向质量分析器移动($d_2=4$ mm), 最终在电控系统的作用下依次到达检测器, 产生质谱信号。

1.2 质量分析器和离子检测器

微型质谱仪用场半径 6 mm, 长度 40 mm 的线性离子阱作为质量分析器。对于分子质量较小的复杂样品 VOCs 来说, 与 4 mm 离子阱相比^[23], 场半径较大的离子阱可以获得更低的质量范围下限, 能够更精准地操控离子, 提高样品的质量分辨率。离子阱的驱动方式采用电压幅度扫描和正弦波频率扫描。在电压幅度扫描模式中, 射频信号的频率不变, 幅度从低到高变化; 正弦波频率扫描技术使用幅度不变、频率变化的正弦波驱动离子阱, 在四极和偶极激发信号的共同作用下, 离子从叠加的激发场中获得能量而快速弹射出离子阱。相比传统的电压扫描, 离子阱驱动技术可以减小功耗、提高仪器的灵敏度和分辨率, 使其更加适应高压条件^[24]。离子检测器使用电子倍增器(EM, model 2312, Detech., USA),

施加 $-1\ 500\ \text{V}$ 电压,使其在正离子模式下工作,可以有效地加速并倍增离子撞击产生的二次电子,用于检测和放大质谱仪中产生的电流信号。

1.3 电路系统

电路系统由主控电路、射频电路和小信号放大电路组成,可以为仪器提供参数设置、离子阱驱动、信号放大和串联质谱等功能。主控电路功能由现场可编程门阵列(FPGA)实现,可以控制仪器的时序周期,示于图1b。在时序初期,主控电路提供开启电磁阀的脉冲信号,随后进入到持续 $1\ 400\ \text{ms}$ 的冷却阶段,在这一阶段,腔体气压降低和离子冷却同时进行。在气压降低到基础气压($0.04\ \text{Pa}$)后,主控电路提供离子阱所需的驱动信号和开启倍增器的脉冲信号,此时气压远小于倍增器的最大工作气压($1.33\ \text{Pa}$),所以在此阶段进行质量扫描^[13-14]。射频电路可以放大主控产生的离子阱驱动信号;小信号放大电路用于放大来自电子倍增器的电信号。由扫频电路产生的离子阱驱动信号幅值最大为 $600\ \text{V}$,频率范围 $200\sim 1\ 100\ \text{kHz}$;扫幅电路产生的离子阱驱动信号幅值最大为 $4\ 000\ \text{V}$,频率 $975\ \text{kHz}$ 。

2 结果与讨论

2.1 实验优化

2.1.1 电路优化 对于小分子VOCs的检测来说,分辨率是质谱仪更为重要的性能指标。较高的射频电压可以更有效地捕获离子,有助于提高质量分辨率。扫频电路展现了更宽的质量检测范围和更紧凑的电路系统,示于图2b,然而,其最高输出射频电压($600\ \text{V}$)远低于扫幅电路($4\ 000\ \text{V}$)。为了优化VOCs的分辨率,本研究对该非连续进样接口的便携式质谱仪的电路驱动系统进行优化,测试扫频和扫幅2种扫描模式下的VOCs质量分辨率。以碳酸二甲酯(相对分子质量91)为例,通过增加射频电压和降低扫描速率来进一步提高分辨率。经优化后,扫频模式得到的质谱图最优半峰宽为 $0.82\ \text{u}$,示于图2d;而扫幅模式得到的质谱图最优半峰宽达 $0.25\ \text{u}$,示于图2c。因此,后续实验均采用扫幅模式,扫描时间 $300\ \text{ms}$,施加的辅助交流信号电压 $1\sim 1.6\ \text{V}$,频率 $307.5\ \text{kHz}$,四极直流电压 $1\ \text{V}$ ^[25]。

2.1.2 射频延迟时间优化 离子源电压由外部

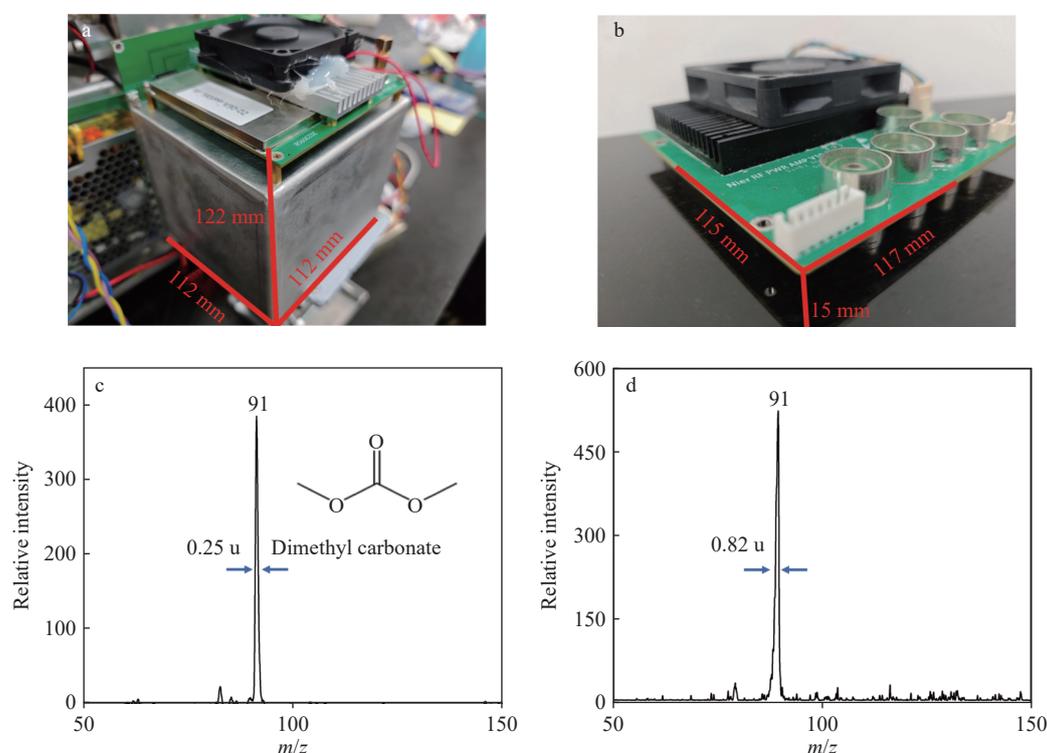


图2 扫幅电路(a)和扫频电路(b)的射频电路,碳酸二甲酯在扫幅电路(c)和扫频电路(d)质谱图的分辨率
Fig. 2 RF circuits of scan volt (a) and sweep frequency (b) circuits, and resolution of dimethyl carbonate in scan volt (c) and sweep frequency (d) mass spectra

电源持续供电,因此电离效率主要与网状金属片附近的气压有关。实验观察到,在金属电磁阀打开后立即进行质量扫描并不能得到质谱信号,这可能是由于气压变化滞后于金属电磁阀的响应时间,在金属电磁阀打开后,网状金属片附近的气压并不能立即达到放电所需的气压^[26]。为了确定仪器完整的时序周期,在冷却阶段前增加一段时序,即为射频延迟。射频延迟时间决定了电

离后的离子进入离子阱的数目。仪器单次分析时序周期与气压变化的关系示于图 3a。用苯顶空蒸气的离子强度作为参考对射频延迟时间进行优化,示于图 3b。可见,当射频延迟时间小于 6 ms 时,不能获得苯顶空蒸气的质谱信号;在 6~15 ms 之间,苯的信号强度最稳定;15 ms 后,苯的信号强度不断下降。经优化,最终选择 9 ms 作为射频延迟时间。

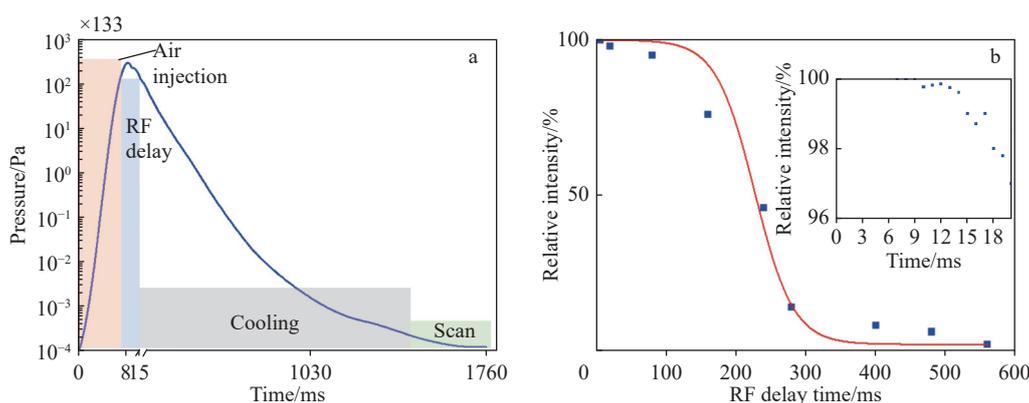


图 3 气压与时序的关系图(a),射频延迟时间的优化(b)

Fig. 3 Relationship of pressure and time (a), optimization of radio frequency delay time (b)

2.2 检测能力测试

在上述优化条件下,使用 VOCs 标准样品对仪器的检测能力进行表征。将样品瓶置于进样管 1 的正下方,自由挥发的样品分子进入质谱仪。为了减小浓度过低导致的背景峰干扰以及浓度过高导致的空间电荷效应,优化样品瓶到进样管 1 的距离为 2~3 cm。对 VOCs 标准样品和混合样品进行测试,甲苯(相对分子质量 92)顶空蒸气的质谱图示于图 4a。将 100 μ L 碳酸二甲

酯(相对分子质量 91)和 100 μ L 磷酸三甲酯(相对分子质量 140)溶于 2 mL 甲醇中,充分混合后对其顶空蒸气进行分析,得到碳酸二甲酯与磷酸三甲酯的混合物质谱图,示于图 4b。

2.3 灵敏度与稳定性测试

灵敏度是表征仪器性能的重要指标,本研究使用萘作为样品测试仪器的灵敏度。由于实验室不方便获得固定浓度气体样品,为此开发了一种基于顶空蒸气压技术的气体定量方法。将足

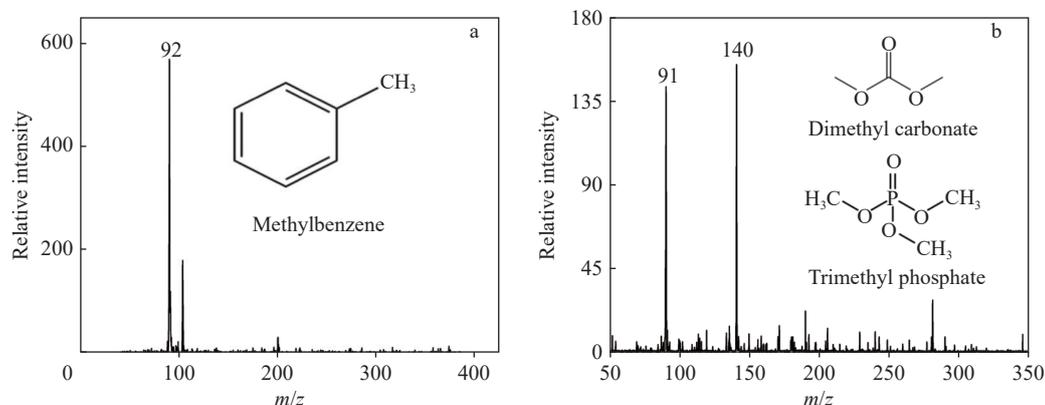


图 4 甲苯的质谱图(a),碳酸二甲酯和磷酸三甲酯的混合物质谱图(b)

Fig. 4 Mass spectra of toluene (a) and a mixture of dimethyl carbonate and trimethyl phosphate (b)

量的萘放入干净的玻璃密封瓶内, 室温静置一段时间后使样品充分挥发, 达到气态平衡或者气固平衡, 即饱和蒸气压状态。使用玻璃密封注射器从瓶内抽取一定体积的饱和蒸气, 在蠕动泵的缓慢推动下, 通过 1 根与进样管 1 完全密封的聚四氟乙烯管(长 1 m, 外径为 6.35 cm)将蒸气引入到便携式质谱中。根据 Antoine 公式, $\lg P = A - \frac{B}{T+C}$, 其中, A、B、C 均为常数, T 为温度, P 为此温度下的饱和蒸气压。萘的 A、B、C 常数分别为 6.990 52、1 453.43、215.307, 环境温度为 21.7 °C, 得出此时萘的饱和蒸气压为 963 Pa, 体积浓度 C_0 为 9.487 g/L。保持蠕动泵的速度恒定, 定义为 S_0 , 进入便携式质谱仪中的气体流量 S 为 0.12 L/h^[27]。因此,

可以通过方程 $C \approx \frac{S_0}{S} \cdot C_0$ 计算进入仪器中的分析物最终浓度, 获得不同浓度的萘蒸气后, 按照浓度由低到高进行检测。萘的线性定量曲线示于图 5b, 其最低检测限为 343 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 并且在 343~2 858 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度范围内具有较好的线性关系 ($R^2 > 0.99$)。

稳定性对需要在复杂环境下使用的仪器尤为重要。本实验选择 2-甲基咪唑(相对分子质量 82)作为样品测试仪器的稳定性, 每隔 4 h 监测 4 min, 得到 16 min 数据, 记录信号强度随扫描周期数的变化情况, 示于图 5c。结果显示, 在进样时间 4 ms 时, 离子流平稳, 信号强度波动相对标准偏差(RSD)小于 7%, 表现出较好的稳定性。

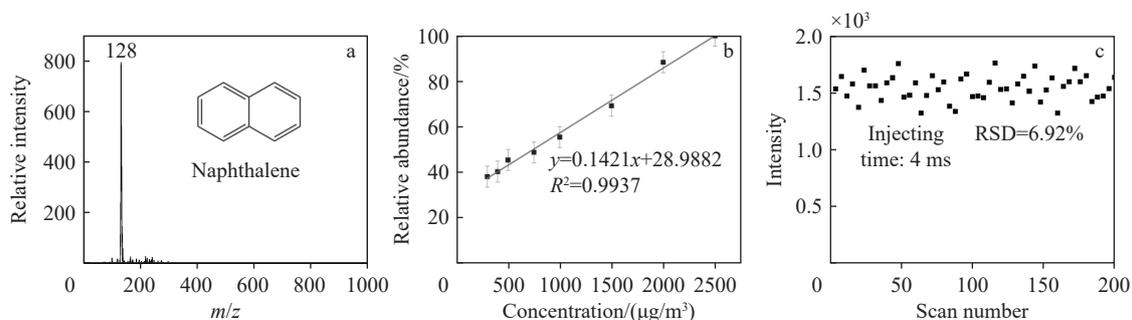


图 5 萘的质谱图(a)和线性定量曲线(b), 以及仪器的稳定性测试(c)

Fig. 5 Mass spectrum (a) and linear calibration curve (b) of naphthalene, stability testing of instrument (c)

3 结论

本研究研制了一种非连续大气压接口便携式质谱仪, 进样接口使用全金属电磁阀门, 采用亚真空等离子体电离源, 仪器总质量 4.6 kg, 尺寸 217 mm×162 mm×106 mm, 总功率不超过 150 W。通过优化扫描模式和射频延迟时间, 实现了更准确、更灵敏的 VOCs 检测。单次分析周期不超过 2 s, 在分析萘等有机化合物时, 灵敏度可达 343 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 碳酸二甲酯的分辨率可达 0.25 u。本研究为便携质谱仪进一步小型化和 VOCs 的高灵敏检测提供了技术方案, 在环境保护和空气质量监控等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHOU X, ZHOU X, WANG C, ZHOU H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: a perspective review[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137-489.
- [2] DAVID E, NICULESCU V C. Volatile organic compounds (VOCs) as environmental pollutants: occurrence and mitigation using nanomaterials[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 13 147.
- [3] 丁厚文, 许伟, 王中新, 刘周, 丁月婷, 邹雪, 王琴, 张浩, 陈治东, 沈成银, 周强. 呼吸机相关性肺炎病原菌释放 VOCs 的非靶向质谱分析[J]. *质谱学报*, 2023, 44(6): 748-761.
DING Houwen, XU Wei, WANG Zhongxin, LIU Zhou, DING Yueting, ZOU Xue, WANG Qin, ZHANG Hao, CHEN Zhidong, SHEN Chengyin, ZHOU Qiang. Analysis of VOCs released of pathogenic bacteria of ventilator associated pneumonia by non-targeted mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(6): 748-761(in Chinese).
- [4] MARKAR S R, CHIN S T, ROMANO A, WIGGINS T, ANTONOWICZ S, PARASKEVA P, ZIPRIN P, DARZI A, HANNA G B. Breath volatile organic compound profiling of colorectal cancer using selected ion flow-tube mass spectrometry[J]. *Annals of Surgery*, 2019, 269(5): 903-910.
- [5] BLAKEMAN K H, CAVANAUGH C A, GILLILAND

- W M, RAMSEY J M. High pressure mass spectrometry of volatile organic compounds with ambient air buffer gas[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2017, 31(1): 27-32.
- [6] PULLIAM C J, PU W, SNYDER D T, XIAO W, OUYANG Z, PIELAK R M, COOKS R G. Rapid discrimination of bacteria using a miniature mass spectrometer[J]. *The Analyst*, 2016, 141(5): 1 633-1 636.
- [7] SNYDER D T, PULLIAM C J, OUYANG Z, COOKS R G. Miniature and fieldable mass spectrometers: recent advances[J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(1): 2-29.
- [8] SPARKMAN O D. Focus on field-portable and miniature mass spectrometers. Presentations from the 12th Sanibel conference on mass spectrometry[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2001, 12(6): 617-618.
- [9] 李宜凌, 贾贺园, 姜延祚, 黄迪, 李小松, 徐伟. 微型离子阱质谱仪研发与工程化[J]. *质谱学报*, 2023, 44(3): 341-347.
- LI Yiling, JIA Heyuan, JIANG Yanzuo, HUANG Di, LI Xiaosong, XU Wei. Development and engineering of miniature ion trap mass spectrometer[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(3): 341-347 (in Chinese).
- [10] GIANNOUKOS S, BRKIĆ B, TAYLOR S, FRANCE N. Monitoring of human chemical signatures using membrane inlet mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(2): 1 106-1 114.
- [11] BRKIĆ B, FRANCE N, TAYLOR S. Oil-in-water monitoring using membrane inlet mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(16): 6 230-6 236.
- [12] JANFELT C, FRANDBEN H, LAURITSEN F R. Characterization of a mini membrane inlet mass spectrometer for on-site detection of contaminants in both aqueous and liquid organic samples[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, 20(9): 1 441-1 446.
- [13] WANG X, ZHOU X, OUYANG Z. Direct analysis of nonvolatile chemical compounds on surfaces using a hand-held mass spectrometer with synchronized discharge ionization function[J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(1): 826-831.
- [14] WU J, ZHANG W, OUYANG Z. On-demand mass spectrometry analysis by miniature mass spectrometer[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(15): 6 003-6 007.
- [15] ZHAI Y, FENG Y, WEI Y, WANG Y, XU W. Development of a miniature mass spectrometer with continuous atmospheric pressure interface[J]. *The Analyst*, 2015, 140(10): 3 406-3 414.
- [16] GIMELSHEIN N, GIMELSHEIN S, LILLY T, MOSKOVETS E. Numerical modeling of ion transport in an ESI-MS system[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2014, 25(5): 820-831.
- [17] LIN B, SUNNER J. Ion transport by viscous gas flow through capillaries[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 1994, 5(10): 873-885.
- [18] OUYANG Z, COOKS R G. Miniature mass spectrometers[J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2009, 2: 187-214.
- [19] KUMANO S, SUGIYAMA M, YAMADA M, NISHIMURA K, HASEGAWA H, MOROKUMA H, INOUE H, HASHIMOTO Y. Development of a portable mass spectrometer characterized by discontinuous sample gas introduction, a low-pressure dielectric barrier discharge ionization source, and a vacuumed headspace technique[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(10): 5 033-5 039.
- [20] 黄泽建, 江游, 熊行创, 张小华, 方向. 基于叠型场线性离子阱的便携式质谱仪研制与应用[J]. *质谱学报*, 2011, 32(2): 104-107.
- HUANG Zejian, JIANG You, XIONG Xingchuang, ZHANG Xiaohua, FANG Xiang. Design and test of portable mass spectrometer based on step-like electrode linear ion trap[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2011, 32(2): 104-107(in Chinese).
- [21] GLISH G L, McLUCKEY S A, ASANO K G. Determination of daughter ion formulas by multiple stages of mass spectrometry[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 1990, 1(2): 166-173.
- [22] PU F, CHIANG S, ZHANG W, OUYANG Z. Direct sampling mass spectrometry for clinical analysis[J]. *The Analyst*, 2019, 144(4): 1 034-1 051.
- [23] ZHAI Y, XU Q, TANG Y, LIU S, LI D, XU W. Boosting the sensitivity and selectivity of a miniature mass spectrometer using a hybrid ion funnel[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(12): 7 911-7 919.
- [24] JIANG T, ZHANG H, TANG Y, ZHAI Y, XU W, XU H, ZHAO X, LI D, XU W. A "brick mass spectrometer" driven by a sinusoidal frequency scanning technique[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(10): 5 578-5 584.
- [25] DAWSON P H. Quadrupole mass analyzers: performance, design and some recent applications[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 1986, 5(1): 1-37.
- [26] WEI X, CHARIPAR N, KIRLEIS M A, YU X, OUYANG Z. Study of discontinuous atmospheric pressure interfaces for mass spectrometry instrumentation development[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(15): 6 584-6 592.
- [27] ZHAI Y, JIANG T, HUANG G, WEI Y, XU W. An aerodynamic assisted miniature mass spectrometer for enhanced volatile sample analysis[J]. *The Analyst*, 2016, 141(18): 5 404-5 411.

(收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-29)