

基于质子转移反应质谱快速分析纺织品中挥发性有机物

李丹丹¹, 何智豪², 李成林³, 江小琴², 段忆翔^{2,3}, 赵忠俊^{2,3}

(1. 四川省纤维检验局, 四川 成都 610100; 2. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610044;

3. 成都艾立本科技有限公司, 四川 成都 610930)

摘要: 纺织品中挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)残留超标会对人体健康构成威胁, VOCs 检测是纺织品质量控制的重要一环。在分析大量纺织品样品时, 现有标准及规范的检测方法存在分析速度较慢的问题。本研究提出了一种基于质子转移反应质谱(proton transfer reaction-mass spectrometry, PTR-MS)技术的纺织品 VOCs 快速筛查方法, 以克服传统检测技术预处理复杂、时间成本高和检测通量低等局限。通过设计专用采样装置并构建 PTR-MS 分析系统, 实现了无需样品预处理的纺织品中 VOCs 快速在线检测。结果表明, 该方法对纺织品中甲醛、苯系物等典型有害物质的检出限可达 0.01~0.50 mg/kg, 单个样本检测时间可缩短至 1 min 以内。该技术显著提升了纺织品中 VOCs 检测通量与效率, 为大批量样品的快速筛查提供了可靠方案。

关键词: 纺织品; 挥发性有机物(VOCs); 质子转移反应质谱(PTR-MS); 高通量检测; 快速分析

中图分类号: O657.63 文献标志码: A 文章编号: 1004-2997(2026)03-0495-10

DOI: 10.7538/zpxb.2025.0140

CSTR: 32365.14.zpxb.2025.0140

Rapid Screening of Volatile Organic Compounds in Textiles by High-Resolution Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry

LI Dan-dan¹, HE Zhi-hao², LI Cheng-lin³, JIANG Xiao-qin², DUAN Yi-xiang^{2,3}, ZHAO Zhong-jun^{2,3}

(1. Sichuan Province Fiber Inspection Bureau, Chengdu 610100, China; 2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610044, China; 3. ALIBEN SCIENCE & TECHNOLOGY CO., LTD., Chengdu 610930, China)

Abstract: The excessive residual concentrations of volatile organic compounds (VOCs) in textiles pose a significant threat to human health, making their detection a critical aspect of textile quality control. Conventional detection methods, as stipulated in existing standard protocols, often involve complex sample pretreatment procedures, are time-consuming, and offer low throughput, rendering them inadequate for the rapid and large-scale screening required in modern manufacturing and regulatory oversight. To address these limitations, a novel rapid screening method based on proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS) was developed in this study. The core work focused on the design and integration of a dedicated sampling device into a PTR-MS analysis system. This specialized sampling apparatus was engineered to facilitate the direct and efficient transfer of VOCs emitted from textile samples into the PTR-MS ion source. The PTR-MS system allows for the

sensitive and selective detection of a wide range of VOCs without significant fragmentation. Crucially, the entire methodology operates without the need for sample pre-treatment steps such as extraction or concentration, which are typical bottlenecks in traditional techniques (e.g., GC-MS). Furthermore, key operational parameters, including system cleaning time, carrier gas flow rate, effective sampling area, and sample heating temperature, were systematically optimized to ensure stable, efficient, and reproducible analysis. Experimental validation demonstrated the outstanding performance of the proposed method. It achieved detection limits as low as 0.01 to 0.50 mg/kg for typical harmful VOCs in textiles, including formaldehyde and benzene homologues (e.g., benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes). The method exhibited excellent linearity over the relevant concentration ranges. Notably, the quantitative analysis of formaldehyde in textiles yielded a relative error of only 6.20%, which highlights its accuracy even under rapid analysis conditions. The most significant result is the marked reduction of analysis time, with the complete spectral analysis of VOCs from a single textile sample accomplished in less than 1 min. This represents a substantial improvement over conventional methods, which can take from several minutes to hours per sample. By eliminating pre-treatment and reducing analysis time to under 1 min per sample, this PTR-MS-based method significantly enhances detection throughput and operational efficiency. It provides a reliable and practical solution for the rapid, large-scale screening of VOCs in textiles, a capability that is increasingly demanded by quality control laboratories, regulatory bodies, and textile enterprises managing extensive supply chains. The method's ability to perform rapid, full-spectrum screening also opens new avenues for non-targeted analysis and the discovery of unexpected or emerging VOC contaminants in textile products. Despite its promising advantages, it is important to acknowledge the current limitations of this study. The primary limitation is that validation was performed under controlled laboratory conditions using a limited set of textile samples. The method's performance and robustness in real-world, large-scale batch screening scenarios have not yet been empirically demonstrated.

Key words: textile; volatile organic compounds (VOCs); proton transfer reaction mass spectrometry (PTR-MS); high throughput detection; rapid screening

纺织品是日常生活的必需品,也是与人体皮肤直接接触的基本消费品^[1]。纺织品原料种植过程中施加的各种农药化肥,以及后期加工染制过程中使用的染料^[2]、氧化剂、催化剂、阻燃剂、增白荧光剂及树脂整理剂等多种有机化合物^[3]会残留在纺织品中,并在日常使用中以挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)的形式释放^[4]。人体长时间接触甲醛^[5-6]、芳香烃化合物^[7]以及某些有机溶剂^[8]等有毒有害有机物含量超标的纺织品,会危害身体健康,甚至诱发癌症^[9]。因此,确保纺织品中VOCs残留符合标准是其质量控制的重要环节。

对此,国内外均制定了相关法规和标准,以明确纺织品中有毒有害物质残留标准和相应的检测方法,如美国服装鞋类协会的限制物

质清单^[10]、GB/T 18885—2020生态纺织品技术要求^[11]以及GB/T 21294—2024服装理化性能的检测方法^[12]等。在这些法规中,关于VOCs的检测方法包括水萃取及部分水解作用的甲醛含量测定法^[5]、固相微萃取(SPME)-顶空采样(HS)-气相色谱-质谱(GC-MS)法^[7]等,但这些方法存在需要样品预处理、操作复杂以及时间成本高的缺点,且检测方法通用性低、通量低,不适用于大批量样本检测。

近年来,纺织品中VOCs检测受到国内外研究人员的广泛关注。Chorier等^[13]提出了一种顶空萃取结合气相色谱-质谱法,对于纺织品中常见VOCs的检出限为2.5 mg/kg;林晨等^[14]采用静态顶空-气相色谱-质谱法测定纺织品中18种VOCs,在优化的实验条件下对目标有机物的检出

限可达 0.25~0.95 mg/kg, 线性相关系数高于 0.995, 并成功应用于实际纺织品检测; Chen 等^[15]建立了基于固相微萃取-气相色谱-质谱的纺织品中 VOCs 测定方法, 在优化的实验条件下对目标有机物的检出限可达 0.005 mg/kg; 莫月香等^[16]利用吹扫捕集技术采集浓缩纺织品中挥发性物质, 再经 GC-MS 检测, 可实现多类化合物的同时检测; 胡清源等^[1]提出了基于微纳吸光材料的激光解吸电离质谱法快速筛查检测纺织品中 6 种有害物质, 可在 1 min 内完成纺织品样品的快速分析。上述方法为纺织品中 VOCs 检测提供了新手段, 但对于大规模、高通量、快速检测的需求, 目前的检测手段仍面临挑战。

质子转移反应质谱 (proton transfer reaction-mass spectrometry, PTR-MS)^[17]是一种新型高灵敏度 VOCs 在线质谱分析技术, 其灵敏度高、实时分析能力强、无需样品预处理且不受空气成分干扰^[18], 已广泛应用于生命科学、环境科学、食品科学以及刑事科学^[19-21]等领域。PTR-MS 技术通过对饱和水蒸气放电产生试剂离子 H_3O^+ ^[17], H_3O^+ 与样品 VOCs 在分子离子反应腔中发生质子转移反应生成质子化准分子离子 $[VOCH]^+$, 并经离子传输系统输送至质量分析区进行质谱分析。采用 PTR-MS 测定时, 空气中主

要成分 (氮气和氧气) 不参与质子转移反应, 因此具备较强的抗空气干扰能力。与其他 VOCs 测定方法相比, PTR-MS 技术具有在线监测、无需样品预处理以及样品检测通量高的优势^[22], 适用于痕量 VOCs 的快速检测。

本研究将基于 PTR-MS 技术快速分析纺织品中 VOCs, 通过研制适配于纺织品的检测系统, 以实现单个样品的快速检测。

1 实验部分

1.1 主要仪器与装置

1.1.1 基于 PTR-MS 的纺织品中 VOCs 快速检测前处理进样装置的设计

自主研发的纺织品中 VOCs 快速检测实验装置平台示于图 1。该平台由载气 (N_2) 瓶、质量流量计、温控箱、VOCs 采样装置和质子转移反应飞行时间质谱 (PTR-TOF MS) 仪组成。载气 N_2 从气瓶流出, 由质量流量计对其流量进行调控后进入 VOCs 采样装置。该装置配备恒温可调的比例积分微分 (PID) 温控箱, 以便对载气进行恒温加热处理, 进而提高部分饱和蒸气压较低的有机物挥发率。VOCs 采集装置包括上、下 2 个半纺锤状黄铜腔体, 分别固定在支撑平台上, 上腔体由 4 个弹簧悬浮固定在平台顶部平面, 下腔体由螺钉固定在中部平

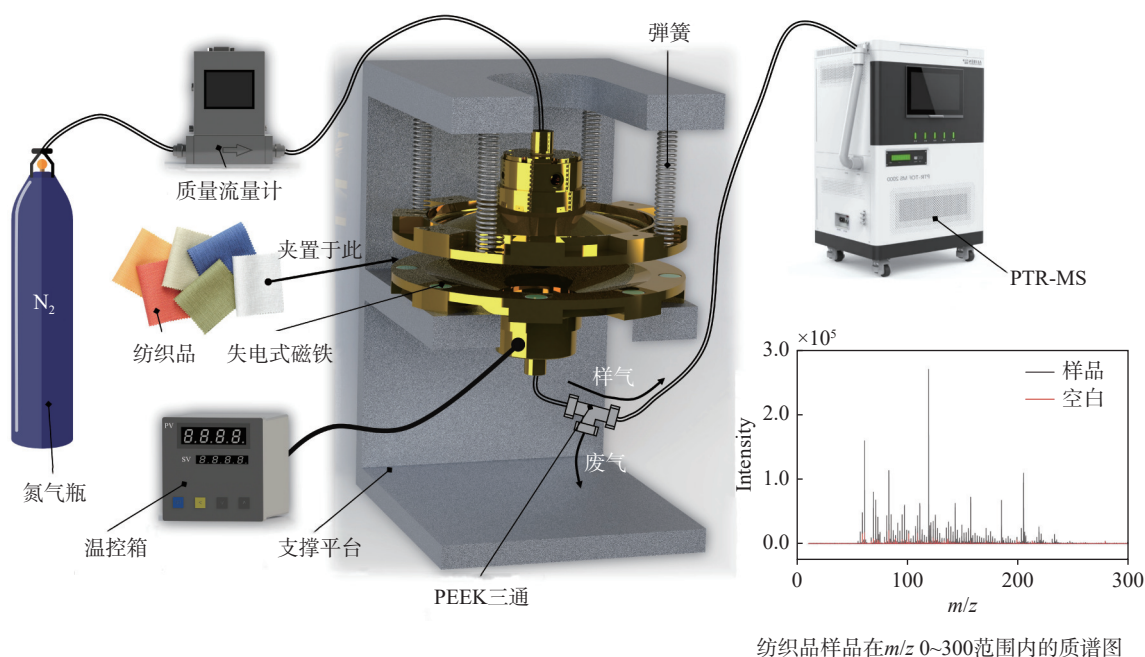


图 1 可调恒温纺织品中 VOCs 快速检测实验装置平台

Fig. 1 Schematic of the adjustable thermostatic platform for rapid detection of VOCs in textiles

面。上下腔体的接触面均嵌入式设置了8个失电式电磁铁(上下腔体的电磁铁磁化方向相反,通电磁吸,失电消磁)。测试纺织品时,首先断开电磁铁电源,上腔体在弹簧作用下抬升,此时将样品平铺于上下腔体之间;然后打开电磁铁电源,上下腔体在磁力吸附下闭合,依靠强磁力吸合形成密闭环境,避免VOCs挥发扩散到环境中而影响检测灵敏度,同时可防止环境中干扰组分对分析结果产生偏差。采集装置的黄铜腔体直径固定,在装置吸合的密闭环境内, N_2 渗透穿过纺织品样品的面积是一致的,由腔体直径决定。因此,每次采样具备较高的一致性。

恒温纺织品VOCs采样装置原理示于图2。采样装置整体利用 N_2 作为载气, N_2 流量由质量流量计调控,然后由聚醚醚酮(PEEK)管从上腔体引入装置,经加热通道均匀加热至预设温度后到达纺织品样品表面。在气流的作用下, N_2 会向下渗透穿过纺织品样品,该过程中的热量传播会使纺织品中VOCs残留随着载气 N_2 进一步挥发,得到载气和VOCs的混合样品气体。由于样品气体流量与进样流量的匹配问题,在质谱仪进样口设置PEEK三通释放多余的样品气体,部分样品气体经采样通道进入后续质子转移反应飞行时间质谱仪进行分析。 N_2 并不参与质子转移反应,不会对分析产生干扰。

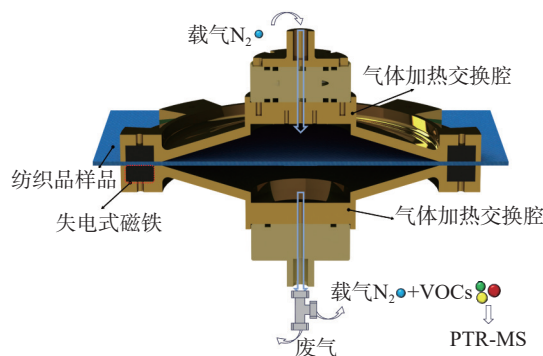


图2 可调恒温纺织品VOCs采样装置结构原理示意图

Fig. 2 Schematic of the structure and working principle of the textile VOCs sampling device

1.1.2 质子转移反应飞行时间质谱仪 实验采用团队前期自主研制的PTR-MS仪器^[23],主要由PTR离子源、四极杆离子传输器、飞行时间质量分析器、真空系统以及电源系统构成,示于图

3。在分析过程中,以饱和水蒸气为试剂气体,将其通入空心阴极放电区进行放电,产生高强度水合质子 H_3O^+ ,携带纺织品中VOCs的样品气体通过毛细管,经压力控制器恒压引入分子离子反应室。向反应室施加恒定的梯度直流电压以保证一定的 E/N 值(E 表示电场强度, N 表示分子数密度),质子亲和势大于水的VOCs在反应室内与 H_3O^+ 发生质子转移反应被电离为 $[VOC+H]^+$ 准分子离子。 $[VOC+H]^+$ 通过限流孔进入基于碰撞聚焦原理的四极杆离子传输器,离子与缓冲气体不断碰撞冷却形成较窄的低能离子束,然后经离子透镜组进一步动能整形准直后进入飞行时间质量分析器分析,具体的仪器参数列于表1。

1.1.3 试剂与样品 按GB/T 24281—2009^[7]中方法制备空白纺织品测试样品。取固定面积的样品,在沸水中煮沸30 min后,于120℃烘箱内干燥20 min;取出冷却至室温后,置于甲醇溶液中

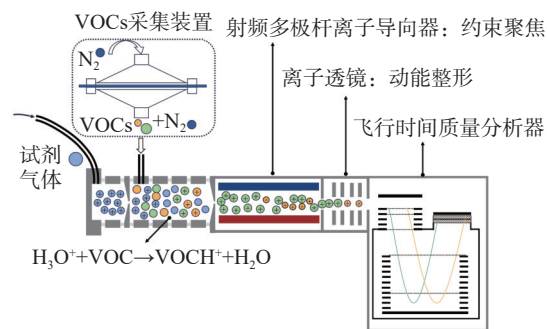


图3 质子转移反应飞行时间质谱仪结构示意图
Fig. 3 Schematic of the proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer

表1 PTR-TOF MS 仪器参数
Table 1 Parameters of PTR-TOF MS

参数 Parameter	数值 Value
进样流量/(mL/min)	200
H_2O 流量/(mL/min)	4
进样口温度/℃	70
离子源气压/Pa	270
漂移管电压/V	800
离子源电流/mA	3
传输杆电压/V	120
传输杆频率/MHz	2
离子源电流/mA	3
积分时间/s	45

超声萃取 30 min; 取出在空气中晾干后, 再次在 120 °C 烘箱内干燥 20 min, 冷却至室温, 制得空白样品。

氮气标准气体(纯度 >99.999%): 四川润泰特种气体有限公司产品。

1, 4-二异丙基苯、1, 2-二乙氧基乙烷、邻苯二甲酸二异丁酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二丙酯标准物质: 上海阿拉丁生化科技股份有限公司产品; 乙二醇甲醚、三乙二醇二甲醚、*N*-甲基吡咯烷酮、乙二醇乙醚醋酸酯、乙二醇乙醚、苯乙炔、正辛基苯、4-乙烯环己烯、甲醛、乙醛、苯、甲苯、乙苯标准物质: 上海安谱瑞世标准技术服务公司产品。所有样品纯度均高于 97%。

2 结果与讨论

2.1 实验参数特性

2.1.1 清洗时间与载气流速 在实验过程中, 环境中不可避免的存在干扰组分, 这些干扰组分在更换纺织品样品时会进入分析系统, 导致误检。此外, 上一次样品的检测残留也会导致分析结果出现偏差。因此, 系统在装载新样品后, 需要增加气体清洗流程以确保测试结果不会受到样品间的交叉干扰及环境干扰。

气体清洗时间与载气流速直接决定了纺织品快速筛查的速度与灵敏度。增大载气流速有助于快速清除死体积带来的干扰物, 但对样品的稀释作用会降低检测系统的分析灵敏度。因

此, 应从污染物响应复位时间以及采集灵敏度综合考虑清洗时间, 以降低背景干扰。

本实验分别将 2 种 0.1 μL 纯液态标准样品(三甲苯与 1,4-二异丙基苯)添加至 4.50 g 空白样品中, 通过更换样品过程和测试不同载气流速方式优化响应复位时间以及采集灵敏度。为提高数据的时间分辨率, 观察不同清洗流速下的信号变化情况, 将质谱数据采集频率设置为 1 s, 实验结果示于图 4。以背景信号干扰强度下降至 0.005(归一化强度)为基准, 在载气流速为 1 000 mL/min 时, 仅需清洗时间 16 s, 示于图 4a。相同条件下, 改变流速分别为 750、500、250 mL/min 时, 清洗时间分别为 26、45、80 s。结果表明, 载气流速越快, 越能缩短清洗时间。然而, 过高的载气流速会使目标物质的测试灵敏度显著降低, 示于图 4b。随着载气流速从 250 mL/min 上升到 1 000 mL/min, 三甲苯(m/z 121)和 1,4-二异丙基苯(m/z 163)的信号强度分别从 1.86×10^6 、 4.44×10^6 下降至 1.87×10^5 、 3.83×10^5 。

综上所述, 为兼顾分析速度与目标组分信号强度, 选择载气流速 500 mL/min, 清洗时间 45 s。在该条件下采集到的数据, 环境及交叉干扰低于 0.005, 且能呈现合理的信号强度。

2.1.2 纺织品采样面积 采样面积关系到定量分析和信号强度。采样分析面积越大, 相同条件下纺织品挥发出来的 VOCs 数量越多。为降低样品使用量, 减小装置体积, 本研究设计了 100、

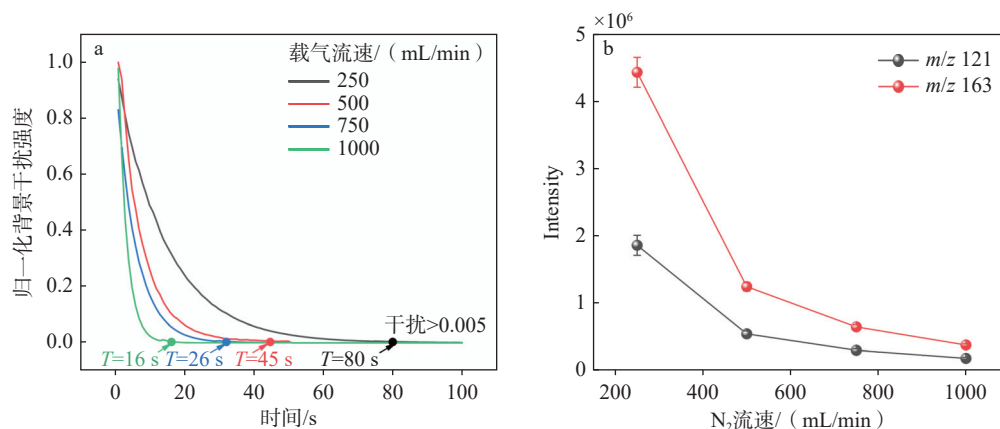


图 4 归一化背景干扰强度(a)和 2 种目标组分的响应强度随载气流速的变化曲线(b)

Fig. 4 Curves of background interference intensity (a) and target component response intensity versus carrier gas flow rate (b)

60 mm 直径采样装置, 并对其性能。以三甲苯 (m/z 121) 和 1,4-二异丙基苯 (m/z 163) 的信号响应强度为基准, 在载气流速 500 mL/min、清洗时间 45 s 条件下优化采样面积, 结果示于图 5。可见, 当采样装置直径为 60 mm 时, 三甲苯和 1,4-二异丙基苯的响应强度分别为 1.80×10^5 、 4.20×10^5 ; 当直径为 100 mm 时, 响应强度分别为 8.00×10^5 、 2.00×10^6 。为保证分析性能, 选择装置的采样直径为 100 mm。

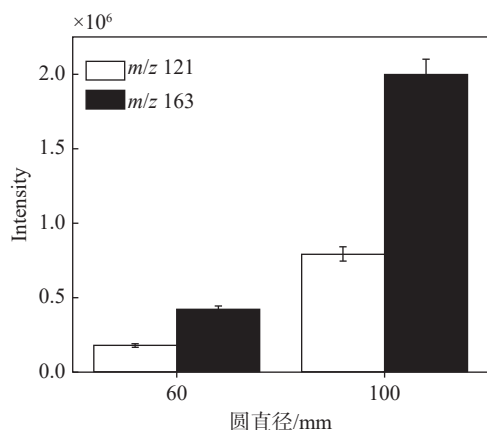


图 5 目标组分响应强度随采样面积的变化趋势
Fig. 5 Variation of target component response intensity with sampling area

2.1.3 纺织品加热温度 温度会影响纺织品中目标组分挥发性能(蒸气压), 进而影响信号强度。本研究通过恒温温控加热系统对整个采样装置进行加热, 促使纺织品中 VOCs 挥发。同时, 恒温加热可以保证实验的可重复性, 排除外界温度变化的影响。

本实验以苯乙炔 (m/z 103)、三甲苯 (m/z 121) 和 1,4-二异丙基苯 (m/z 163) 的信号强度为基准, 在载气流速 500 mL/min、清洗时间 45 s、采样圆直径 100 mm 条件下优化加热温度, 测试了 40、50、60、70、80 °C 下各物质的信号强度, 结果示于图 6。可见, 苯乙炔对温度响应敏感度较低, 且随着温度上升信号强度缓慢下降; 三甲苯和 1,4-二异丙基苯的响应强度呈先升高后下降的趋势, 峰值分别出现在 70 °C 和 60 °C 处。由于目标组分的挥发性能随着温度升高而提升, 使得初始升温时信号强度提升, 然而持续升温会导致目标组分挥发过快, 在清洗时间 45 s 条件下, 更多目标组分与清洗气体随背景干扰气体进入仪器, 但

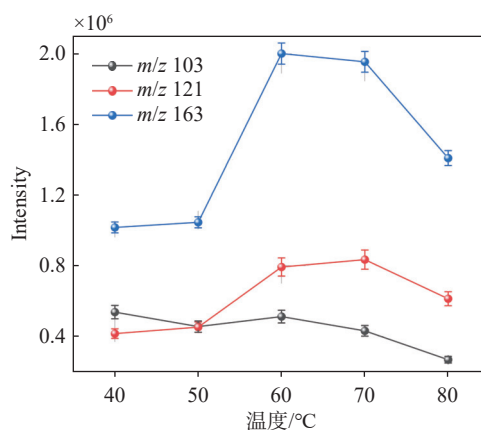


图 6 目标组分响应强度随温度的变化趋势
Fig. 6 Variation of target component response with temperature

没有记录信号。因此, 为保持合理的信号强度, 选择纺织品加热温度为 60 °C。

2.2 性能指标

2.2.1 定性特征峰以及检出限 在上述最优条件下, 将不同体积的液态标准纯样品添加至同等质量的自制空白纺织品样品中, 得到阳性样品, 并将其夹置于自研的采样装置中采样, 然后进行 PTR-TOF MS 分析。1,4-二异丙基苯、1,2-二氧基乙烷、辛苯、*N*-甲基吡咯烷酮、乙二醇乙醚、苯乙炔标准样品的质谱图示于图 7。这 6 种代表性物质均得到 $[M+1]^+$ 准分子离子峰, 可用于定性分析, 符合 PTR-TOF MS 的电离特性。对 6 种样品进行特征峰测试, 以信噪比 (S/N)=3 确定检出限, 其结果列于表 2。GB/T 2912.1—2009 中规定甲醛的检出限为 20 mg/kg, 而本研究方法的检出限为 0.054 mg/kg, 远低于标准要求。

2.2.2 定量分析 将 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 μ L 标准样品(甲醛与甲苯)添加到 4.50 g 自制的空白纺织品样品中, 制备得到不同浓度的加标基质样品。在上述最优条件下进行检测, 以标准样品质量为横坐标, 对应峰强度为纵坐标, 绘制标准曲线, 示于图 8。可见, 甲醛与甲苯在 0~200 mg/kg 浓度范围内均呈现良好的线性关系, 线性相关系数 (R^2) 均大于 0.99。

为验证该方法的定量准确性, 选择 30 mg/kg 纺织品甲醛质控样品(由四川省纤维检验局提供)进行测试, 采用上述甲醛标准曲线进行定量分析。结果表明, 本方法测得的甲醛响应强度

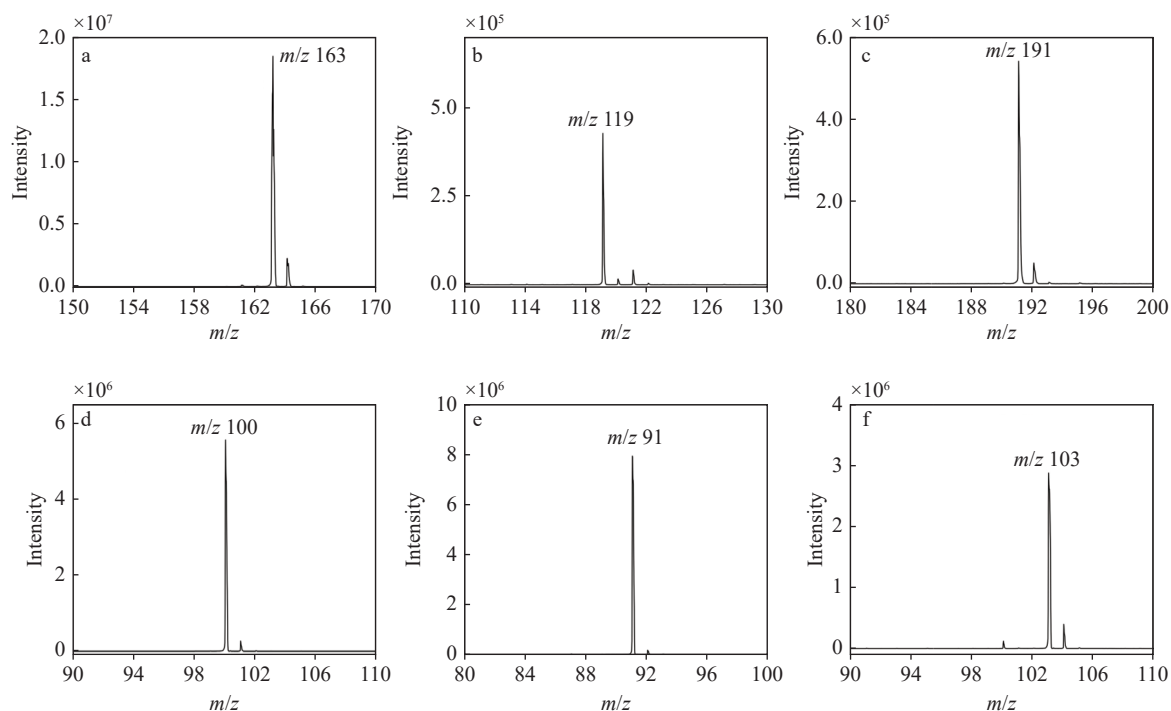


图7 1,4-二异丙基苯(a)、1,2-二氧基乙烷(b)、辛苯(c)、N-甲基吡咯烷酮(d)、乙二醇乙醚(e)、苯乙炔(f)标准样品的质谱图

Fig. 7 Mass spectra of standard samples of 1,4-diisopropylbenzene (a), 1,2-diethoxyethane (b), octylbenzene (c), N-methylpyrrolidone (d), ethylene glycol monoethyl ether (e) and phenylacetylene (f)

表2 6种挥发性有机物的特征峰以及检出限

Table 2 Characteristic peaks and detection limits of the 6 volatile organic compounds

物质名称 Compound	相对分子质量 Relative molecular mass	质荷比 m/z	检出限 LOD/(mg/kg)
1,4-二异丙基苯	162.141	163.149	0.014
1,2-二氧基乙烷	118.099	119.107	0.033
辛苯	190.172	191.180	0.029
N-甲基吡咯烷酮	99.068	100.076	0.027
乙二醇乙醚	90.068	91.076	0.031
苯乙炔	102.047	103.055	0.019

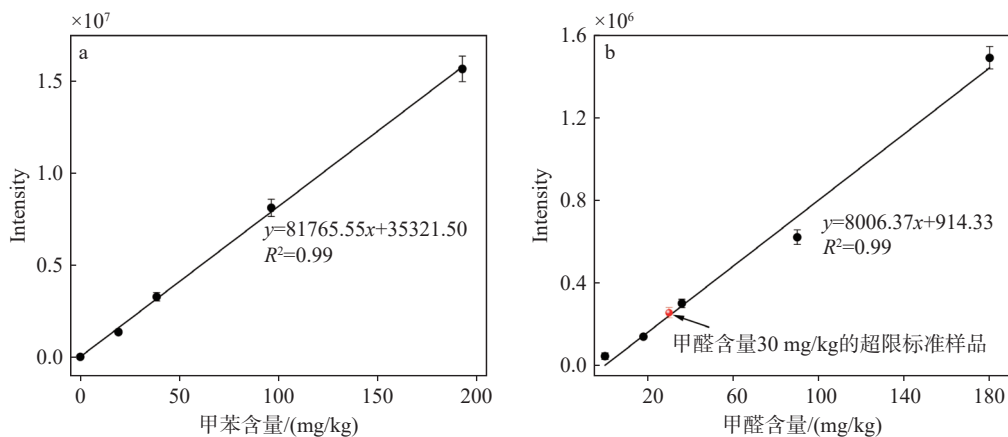


图8 纺织品中甲苯(a)、甲醛(b)的标准曲线

Fig. 8 Calibration curves of toluene (a) and formaldehyde (b) in textile samples

为 2.56×10^5 , 示于图 9。通过定量曲线计算得到甲醛含量为 31.86 mg/kg, 与标准品值的相对误差为 6.20%。该结果证明了本研究方法具有较高的定量准确性。

2.3 实际样品检测

采用本方法对购自电商平台的不同材质、不同印花以及不同颜色的纺织品进行采样分析。6 种代表性的自购样品质谱图示于图 10。这些物质的定性质谱峰在测试前已通过标准样品测试完成确认。通过解析实际样品的质谱图, 在 1 次检测中可检出处于 m/z 30~280 范围的多种 VOCs。不同布料中 VOCs 种类存在差异, 且不同物质的信号强度差异显著, 具体结果列于表 3。

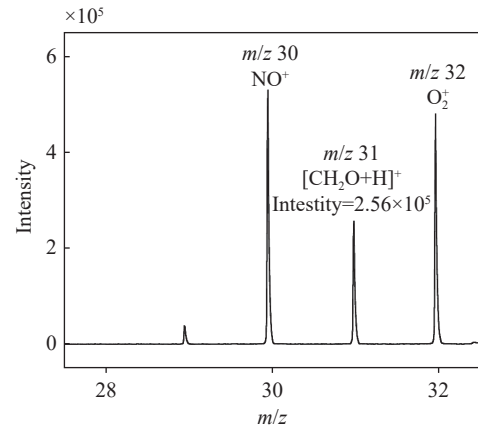


图 9 甲醛超限标准纺织样品质谱图

Fig. 9 Mass spectrum of a textile sample with formaldehyde content above the standard limit

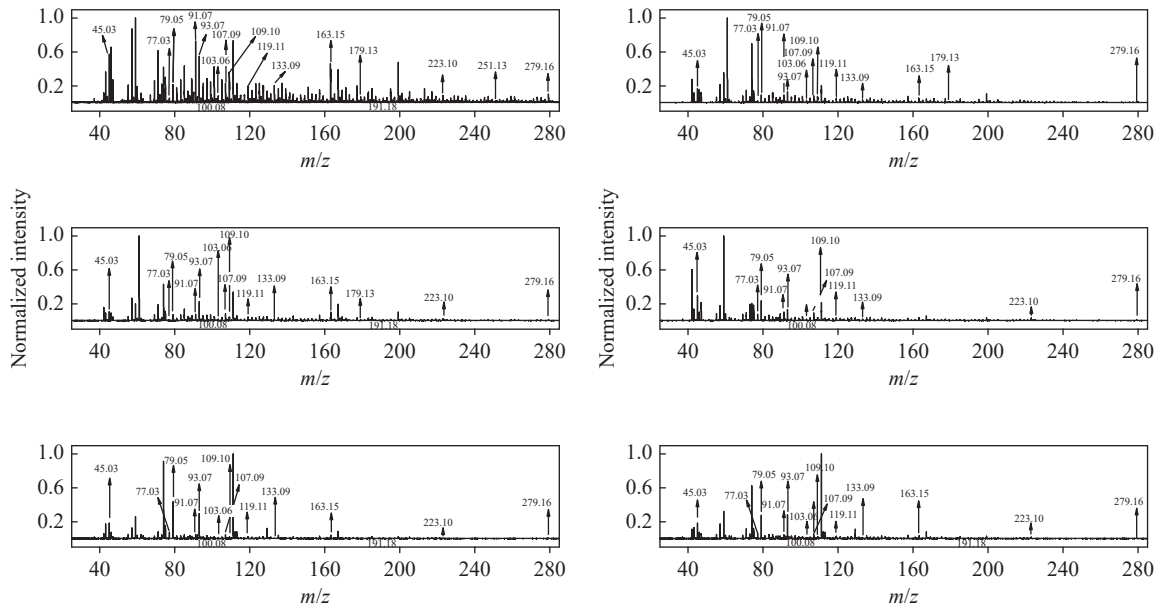


图 10 6 种实际纺织品的 PTR-TOF MS 谱图

Fig. 10 Mass spectra of 6 actual textile samples by PTR-TOF MS

表 3 PTR-TOF MS 在 6 种实际纺织品样品中检测到的挥发性有机物

Table 3 VOCs of 6 actual textile samples analyzed by PTR-TOF MS

检出物 Compound	质荷比 m/z	样品 Sample						有害性 Harmfulness
		1	2	3	4	5	6	
乙醛	45.03	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
乙二醇甲醚	77.03	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
苯	79.05	检出	—	检出	检出	检出	检出	高危害
乙二醇乙醚	91.07	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
甲苯	93.07	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
N-甲基吡咯烷酮	100.08	检出	—	检出	检出	检出	检出	高危害
苯乙炔	103.06	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
乙苯	107.09	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害

续表

检出物 Compound	质荷比 m/z	样品 Sample						有害性 Harmfulness
		1	2	3	4	5	6	
4-乙烯环己烯	109.10	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
1,2-二氧基乙烷	119.11	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
乙二醇乙醚醋酸酯	133.09	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害
1,4-二异丙基苯	163.15	检出	检出	检出	检出	检出	检出	低危害
三乙二醇二甲醚	179.13	检出	—	检出	—	—	—	低危害
正辛基苯	191.18	检出	—	检出	—	检出	检出	低危害
邻苯二甲酸二乙酯	223.10	检出	—	检出	检出	检出	检出	高危害
邻苯二甲酸二丙酯	251.13	检出	—	—	—	—	—	高危害
邻苯二甲酸二异丁酯	279.16	检出	检出	检出	检出	检出	检出	高危害

3 结论

本研究基于质子转移反应质谱技术,实现了纺织品中多种 VOCs 的同时快速检测。针对纺织品中 VOCs 的特点,设计了采样装置,通过优化清洗时间、载气流速、采样面积、加热温度等参数,得到最佳检测条件。本方法在无需样品预处理条件下,可在 1 min 内完成纺织品中 VOCs 的稳定、高效、快速分析,显著提升了纺织品样品的检测效率,解决了传统检测方法时间成本高和操作复杂的问题,有望为大批量纺织品 VOCs 筛查应用提供更准确的快速分析手段。

参考文献:

- [1] 胡清源, 马强, 欧阳证, 马潇潇. 基于吸光材料的激光解吸附离子化质谱用于纺织品快速筛查[J]. *质谱学报*, 2021, 42(4): 372-380.
HU Qingyuan, MA Qiang, OUYANG Zheng, MA Xiaoxiao. Rapid screening of textiles by antireflection laser desorption ionization mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2021, 42(4): 372-380(in Chinese).
- [2] 张艳艳, 路川, 高永刚, 王健, 罗忻, 牛增元, 王萍, 孙娜, 张国华. 液相色谱-串联质谱法测定纺织品中 15 种 *N*-亚硝胺及 *N*-亚硝基化合物[J]. *化学分析计量*, 2025, 34(9): 46-53.
ZHANG Yanyan, LU Chuan, GAO Yonggang, WANG Jian, LUO Xin, NIU Zengyuan, WANG Ping, SUN Na, ZHANG Guohua. Determination of 15 *N*-nitrosamines and *N*-nitrosatable compounds in textiles by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2025, 34(9): 46-53(in Chinese).
- [3] 张宇, 冯飞, 史晓倩. 绿色环保纺织品检测技术的现状

及趋势[J]. *西部皮革*, 2025, 47(16): 10-12.

ZHANG Yu, FENG Fei, SHI Xiaoqian. Current status and trends in green and environmentally friendly textile testing technologies[J]. *West Leather*, 2025, 47(16): 10-12 (in Chinese).

- [4] 刘敏华, 刘芳, 杜燕珺, 薛文良. 纺织品中挥发性有机物检测技术的研究进展[J]. *国际纺织导报*, 2015, 43(11): 62-64, 66.
LIU Minhua, LIU Fang, DU Yanjun, XUE Wenliang. Progress in detection methods of volatile organic compounds from textiles[J]. *Melliand-China*, 2015, 43(11): 62-64, 66(in Chinese).
- [5] GB/T 2912.1—2009 全国纺织品标准化技术委员会基础标准分会(SAC/TC 209/SC 1). 纺织品 甲醛的测定 第 1 部分: 游离和水解的甲醛(水萃取法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] GB/T 2912.2—2009 全国纺织品标准化技术委员会基础标准分会(SAC/TC 209/SC 1). 纺织品 甲醛的测定 第 2 部分: 释放的甲醛(蒸汽吸收法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 中华人民共和国江苏出入境检验检疫局, 国家纺织制品质量监督检验中心, 上海市纺织科学研究院. 纺织品有机挥发物的测定 气相色谱-质谱法[Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2009: 16.
- [8] BAYIL S, CICEK H, CIMENCI I G, HAZAR M. How volatile organic compounds affect free radical and antioxidant enzyme activity in textile workers[J]. *Arhiv Za Higijenu Rada i Toksikologiju*, 2008, 59(4): 283-287.
- [9] AN Y J. Toxicity of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) mixtures to sorghum bicolor and cucumis sativus[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 72(5): 1 006-1 011.
- [10] 美国发布第 13 版纺织品限制物质清单[J]. 毛纺科技,

- 2014, 42(1): 9.
- The United States released the 13th edition of the list of textile restricted substances[J]. *Wool Textile Journal*, 2014, 42(1): 9(in Chinese).
- [11] GB/T 18885—2020 全国纺织品标准化技术委员会 (SAC/TC 209). 生态纺织品技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [12] 舒桂芳, 王丹, 余丹瑶. GB/T 21294《服装理化性能的检验方法》新、旧标准对比[J]. *中国纤检*, 2024(11): 80-83. SHU Guifang, WANG Dan, YU Danyao. Comparison between new and old standards of GB/T 21294 “Testing methods of physical and chemical performance of garments”[J]. *China Fiber Inspection*, 2024(11): 80-83(in Chinese).
- [13] CHORIER E, BLANC N, CANNOT J C. Headspace GC-MS for the determination of halogenated hydrocarbons, ethers and aromatic volatiles in fabric and leather[J]. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2014, 109: 322-329.
- [14] 林晨, 郭勇彬, 王洁梅. HS-GC-MS 方法测定纺织品中 18 种挥发性有机化合物[J]. *印染助剂*, 2025, 42(3): 66-70. LIN Chen, GUO Yongbin, WANG Jiemei. Determination of 18 volatile organic compounds in textile by HS-GC-MS[J]. *Textile Auxiliaries*, 2025, 42(3): 66-70(in Chinese).
- [15] CHEN J, LIU Y, GU J. Optimization of SPME with GCMS analysis of volatile organic chemical residues in textiles[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(175/176): 559-564.
- [16] 莫月香, 杨欣卉, 黄昊来. 吹扫捕集-气相色谱-质谱联用法测定汽车内饰纺织品中挥发性有机物[J]. *中国纤检*, 2016(7): 84-87. MO Yuexiang, YANG Xinhui, HUANG Haolai. Determination of volatile organic compounds in automotive trim by purge and trap coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *China Fiber Inspection*, 2016(7): 84-87(in Chinese).
- [17] HANSEL A, JORDAN A, HOLZINGER R, PRAZELLER P, VOGEL W, LINDINGER W. Proton transfer reaction mass spectrometry: on-line trace gas analysis at the ppb level[J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1995, 149: 609-619.
- [18] de GOUW J, WARNEKE C, KARL T, EERDEKENS G, van der VEEN C, FALL R. Sensitivity and specificity of atmospheric trace gas detection by proton-transfer-reaction mass spectrometry[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2003, 223: 365-382.
- [19] XU W, ZOU X, DING Y, ZHANG Q, SONG Y, ZHANG J, YANG M, LIU Z, ZHOU Q, GE D, ZHANG Q, SONG W, HUANG C, SHEN C, CHU Y. Qualitative and quantitative rapid detection of VOCs differentially released by VAP-associated bacteria using PTR-MS and FGC-PTR-MS[J]. *Analyst*, 2024, 149(5): 1 447-1 454.
- [20] GOULD O, DRABIŃSKA N, RATCLIFFE N, de LACY COSTELLO B. Hyphenated mass spectrometry versus real-time mass spectrometry techniques for the detection of volatile compounds from the human body[J]. *Molecules*, 2021, 26(23): 7 185.
- [21] BIASIOLI F, GASPERI F, YERETZIAN C, MÄRK T D. PTR-MS monitoring of VOCs and BVOCs in food science and technology[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30(7): 968-977.
- [22] 赵忠俊, 贺飞耀, 郭星, 李雯雯, 代渐雄, 付玉, 李宏, 邓辅龙, 蒲娟, 杨燕婷, 王旭, 段忆翔. 小型高性能质子转移反应飞行时间质谱仪的研制及其在呼吸气成分分析中的应用[J]. *质谱学报*, 2021, 42(3): 285-293. ZHAO Zhongjun, HE Feiyao, GUO Xing, LI Wenwen, DAI Jianxiong, FU Yu, LI Hong, DENG Fulong, PU Juan, YANG Yanting, WANG Xu, DUAN Yixiang. Development of small sized high performance proton transfer reaction time of flight mass spectrometer (PTR-TOF MS) and its application in VOCs analysis in exhaled gas[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2021, 42(3): 285-293(in Chinese).
- [23] 赵忠俊, 岳寒露, 郭星, 邓辅龙, 何星亮, 李成林, 许云海, 杨燕婷, 段忆翔. 高分辨率质子转移反应飞行时间质谱仪的研制及其在大气 VOCs 定点连续监测中的应用[J]. *质谱学报*, 2025, 46(2): 140-148. ZHAO Zhongjun, YUE Hanlu, GUO Xing, DENG Fulong, HE Xingliang, LI Chenglin, XU Yunhai, YANG Yanting, DUAN Yixiang. Development of high-resolution proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer and its application in continuous fixed-point monitoring of atmospheric VOCs[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2025, 46(2): 140-148(in Chinese).

(收稿日期: 2025-11-03; 修回日期: 2025-12-10)