

微型离子阱质谱快速检测电子烟油中合成大麻素

何亚锦^{1,2}, 阮慧文³, 张明建¹, 赵无垠², 宋贵云³, 张 柯¹, 王 兵¹,
杨娉娉⁴, 康 健⁴, 李 斌⁵, 王 爽¹, 王卫国^{3,6}

(1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学化学学院, 河南 郑州 450001;

3. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; 4. 大连医科大学附属第一医院急诊科, 辽宁 大连 116023;

5. 云南警官学院, 云南 昆明 650223; 6. 金铠仪器(大连)股份有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 借助电子烟油进行合成大麻素相关毒品犯罪已成为一种新型犯罪形式。为了逃避监管, 犯罪分子将合成大麻素添加到电子烟油中, 制成所谓的“上头电子烟”。因此, 迫切需要发展适用于电子烟油中合成大麻素的现场快速检测方法。本研究建立了一种基于丙酮辅助光电离微型离子阱质谱的电子烟油中非法添加合成大麻素的快速检测方法。电子烟油中的复杂基质会显著降低合成大麻素的检测灵敏度, 并且基质残留会严重污染质谱仪器, 仪器恢复需要的时间长达 360 min。为此, 本研究提出了利用合成大麻素与电子烟油中组分的沸点差异进行加热处理, 以实现合成大麻素目标检测物与电子烟油基质成分预分离的解决方案。以 5F-EMB-PICA 为研究对象, 考察了预加热分离的温度和时间参数对其信号强度的影响。在最佳温度 150 °C, 最优加热时间 5 min 条件下, 可获得最佳灵敏度, 且仪器恢复时间仅需 1 min。为验证该方法的普适性, 分别考察了不同风味电子烟油中 5F-EMB-PICA、4F-ABUTINACA 和 4F-MMB-BUTINACA 等 3 种典型合成大麻素的检测结果。结果表明, 该方法可检出浓度为 5 mg/L 的 3 种合成大麻素, 灵敏度较高, 且检出浓度远低于“上头电子烟”中合成大麻素的浓度范围(0.58%~2.71%)。本方法有望为电子烟油中合成大麻素的现场检测提供重要支撑。

关键词: 合成大麻素; 电子烟油; 微型离子阱质谱; 快速检测; 预加热

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)04-0475-09

DOI: 10.7538/zpxb.2024.0196

CSTR: 32365.14.zpxb.2024.0196

Rapid Detection of Synthetic Cannabinoids in E-Cigarette Liquids Based on Miniature Ion Trap Mass Spectrometry

HE Ya-jin^{1,2}, RUAN Hui-wen³, ZHANG Ming-jian¹, ZHAO Wu-duo², SONG Gui-yun³, ZHANG Ke¹,
WANG Bing¹, YANG Suo-suo⁴, KANG Jian⁴, LI Bin⁵, WANG Shuang¹, WANG Wei-guo^{3,6}

(1. Zhengzhou Tobacco Research Institute, China National Tobacco Corporation, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China; 4. Emergency Department, The First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116023, China; 5. Yunnan Police Officer Academy, Kunming 650223, China; 6. Jin Kai Instruments (Dalian) Corporation, Dalian 116023, China)

Abstract: In recent years, the misuse of synthetic cannabinoids has garnered significant societal attention. To evade regulation, synthetic cannabinoids are often illicitly mixed into e-cigarette liquids

国家自然科学基金(22204176, 22476186); 河南省自然科学基金(222300420389); 大医一院-大连化物所医工联合创新基金(DMU-I&DICP UN202205); 大连市重点科技研发计划(2022YF12GX020)

本文共同第一作者何亚锦, 阮慧文; 通信作者王卫国, 王爽, 李斌

to create "heady e-cigarettes". The complex matrix of e-cigarette liquids poses a substantial challenge to the detection and regulation of synthetic cannabinoids, necessitating the development of methods suitable for rapid on-site detection of these substances in such products. A miniature ion trap mass spectrometer, with its high sensitivity, fast detection, and portability, is an ideal tool for detecting synthetic cannabinoids in e-cigarette liquids. In this study, a rapid detection method for synthetic cannabinoids in e-cigarette liquids was established based on acetone-assisted photoionization miniature ion trap mass spectrometry. The study revealed that the complex matrix present in e-cigarette liquids can mask the detection signals of synthetic cannabinoids, thereby significantly reducing detection sensitivity. Furthermore, matrix residues were found to cause severe contamination of the mass spectrometry instrument, resulting in an extended instrument recovery time of up to 360 min following contamination. To address this issue, a micro-heating desorption pre-separation module was proposed to achieve pre-separation of synthetic cannabinoids and e-cigarette liquid matrix components by exploiting the boiling point difference between them. Using 5F-EMB-PICA as a representative compound, the effects of temperature and heating time of the micro-heating desorption on the detection signal intensity were investigated. The optimal temperature was found to be 150 °C, and the optimal heating time was 5 min. Under these conditions, the heating pre-separation strategy successfully minimized the interference from e-cigarette matrix components, achieving optimal detection sensitivity while reducing instrument contamination. The instrument recovery time was reduced to only 1 min. To demonstrate the universality of the method, three typical synthetic cannabinoids (e.g., 5F-EMB-PICA, 4F-ABUTINACA, and 4F-MMB-BUTINACA) in different flavors of e-cigarette liquids were investigated, all of which were accurately and rapidly detected. In addition, the method exhibits high sensitivity for detecting all three synthetic cannabinoids at concentrations as low as 5 mg/L. This detection limit is significantly lower than the typical synthetic cannabinoid concentration range (0.58%-2.71%) found in "heady e-cigarettes", thereby fully covering the potential content of illicit additives in e-cigarette products. This method not only offers excellent detection performance, but also features fast response, low cost and short instrument recovery time, making it suitable for on-site identification of illicitly added synthetic cannabinoids in e-cigarette liquids. With the continuous expansion of the e-cigarette market and the growing severity of related drug crimes, this method is expected to provide important support for the on-site detection of synthetic cannabinoids in e-cigarette liquids.

Key words: synthetic cannabinoids; e-cigarette liquids; miniature ion trap mass spectrometry; rapid detection; preheating

合成大麻素(synthetic cannabinoids, SCs)是一类人工合成的化学物质,其不依赖大麻的种植,成本更低,获取容易,且能产生更强烈的兴奋、致幻等效果,目前已成为新精神活性物质中涵盖物质种类最多、滥用最严重的家族^[1-2]。SCs在全球范围内迅速传播,严重威胁社会稳定和人体健康^[3-4]。为了加强管制,国家禁毒办于2021年7月1日起对合成大麻素类物质进行整类列管^[5]。电子烟又称为电子雾化器,作为一种传统烟草的

替代品,通过加热雾化器中的电子烟油产生气溶胶或蒸汽,供用户吸食^[6]。SCs常被不法分子添加到电子烟油中,包装成“上头电子烟”等进行销售以逃避监管,对吸食者造成严重身心健康危害^[7]。非法添加的合成大麻素含量范围通常在0.58%~2.71%^[8]。然而,由于电子烟油中含有大量粘性、易残留的甘油、丙二醇、烟碱等物质,给SCs的现场快速检测带来了巨大挑战。

目前,常见的电子烟油中合成大麻素的检测

方法主要以实验室离线分析为主,包括气相色谱-质谱法^[9-10]、液相色谱-质谱法^[11-12]、核磁共振法^[13-14]。其中,色谱-质谱联用法分离效果好、准确度高且检出限低,但样品前处理过程复杂、检测周期长,通常至少需要 30 min,且需专业人员操作,难以满足现场检测的要求;核磁共振法无需复杂的样品前处理,但检测结果受环境温度影响较大。为了缩短检测时间,简化分析过程,提高涉毒案件的侦办效率,研究人员开发了多种分析技术来实现复杂基质中毒品的现场快速检测,如离子迁移谱^[15]、拉曼光谱^[16]、荧光光谱^[17]、电化学发光传感器^[18]等。然而,电子烟油高含量且复杂的基质组分会对 SCs 成分的采集和检测造成干扰,产生基质效应,使检测更加困难,误报问题严重。因此,亟需开发一种适用于电子烟油中合成大麻素的现场快速检测方法。

微型质谱是目前现场检测领域的研究热点。离子阱质谱(ion trap mass spectrometry, ITMS)因其结构简单、工作气压低、检测速度快,已被广泛用于毒品稽查和爆炸物检测等现场快速检测领域^[19]。李海洋团队^[20]发展了一种热解吸-丙酮辅助光电离微型离子阱质谱仪(TD-AAPI-ITMS),成功实现了 27 种常见毒品的快速高灵敏检测,检出限达 ng 量级。为提高热解吸效率,该团队^[21]还研制了一种卤素灯闪热同步脉冲吹扫进样离子阱质谱仪(SFTDPI-ITMS),可同时检测沸点差异达 300 ℃ 的 10 种毒品混合物,该方

法可将芬太尼类等难挥发毒品的检测灵敏度提升 50 倍至 pg 量级。马强团队^[22]将纸喷雾电离和萃取喷雾电离与微型离子阱质谱结合,实现了不同基质(如血液、尿液和粉末)中 SCs 的检测,定量限达 10 μg/L。然而,目前尚未见关于微型离子阱质谱用于电子烟油中 SCs 检测的报道。

本研究基于丙酮辅助光电离的微型离子阱质谱,开发了一种快速检测电子烟油中合成大麻素的方法。系统研究电子烟油中高粘性组分(如甘油、丙二醇、烟碱等)对检测结果的影响,并发展预加热解吸分离的快速前处理技术,以提高检测灵敏度、消除残留对仪器的污染,并初步探讨该方法在电子烟油中合成大麻素检测中的应用。

1 实验部分

本文使用大连化学物理研究所研发的微型离子阱质谱仪(体积 32 cm×32 cm×24 cm,质量 13 kg,功率≤200 W),详细结构见参考文献^[20]。微型离子阱质谱仪的结构简图示于图 1a,包括热解吸电离腔,真空紫外灯,由 2 段金属毛细管、1 根硅胶管和 1 个夹管阀组成的非连续大气压进样接口(discontinuous atmospheric pressure inlet, DAPI),以及矩形离子阱质量分析器。载气流速 300 mL/min,丙酮浓度 5 mg/L。微型离子阱质谱仪在正离子检测模式下工作,检测流程为:样品在热解吸电离腔受热汽化形成气态分子,热解吸温度设定为 180 ℃;净化空气将丙酮蒸汽载带引

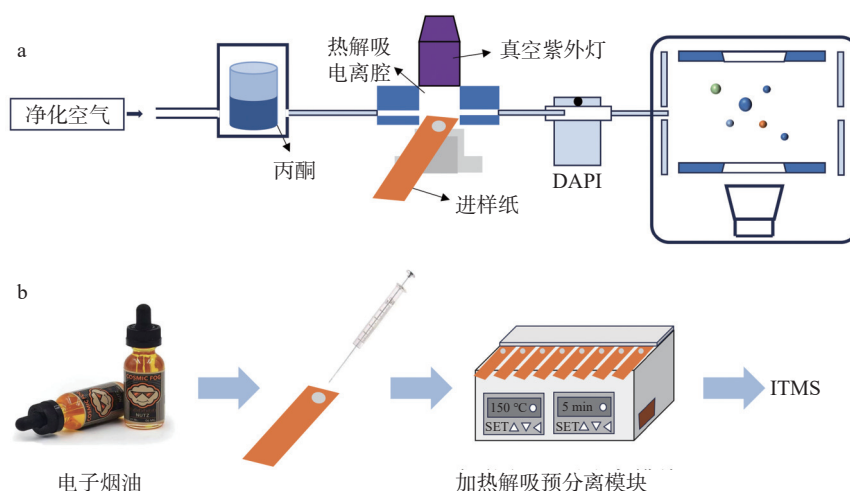


图1 离子阱质谱的原理图(a)以及电子烟油中合成大麻素的检测流程(b)

Fig. 1 Schematic diagram of the ion trap mass spectrometer (a) and detection process of synthetic cannabinoids in e-cigarette liquids (b)

入热解吸电离腔;真空紫外灯发射能量为 10.0 和 10.6 eV 的光子将丙酮电离形成丙酮离子,丙酮离子与中性丙酮分子结合形成丙酮二聚体作为试剂离子,样品分子与试剂离子发生分子离子反应得到样品的分子离子峰。夹管阀开启后,离子在负压作用下进入离子阱中被分析、检测。

本研究发展了一种电子烟油样品预分离流程,具体示于图 1b。利用加热解吸预分离模块对载有样品的进样纸进行预加热处理,基于电子烟油基质成分和 SCs 的沸点差异来实现预分离。该模块可以实现从室温到 200 °C 的调控,温度偏差小于 ± 1 °C。输入电压为 24 V,功率小于 120 W。离子阱质谱的检测时间为秒级,而前处理时间为分钟级。为了提升效率,在预分离模块上设计了多个加热孔位,可以同时实现多个样本的加热处理。

合成大麻素 5F-EMB-PICA、4F-MMB-BUTINACA、4F-ABUTINACA 标准品: 10 mg/L

(甲醇溶剂),北京芬格尔安科技有限责任公司产品;电子烟油:依据电子烟强制性国家标准^[6]配制,且仅用于本课题研究;甲醇:分析纯,天津市科密欧化学有限公司产品;丙酮:分析纯,西陇科学股份有限公司产品。

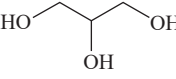
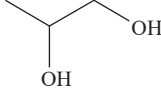
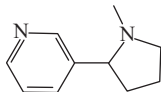
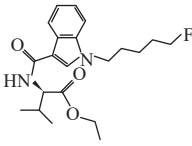
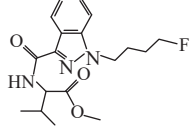
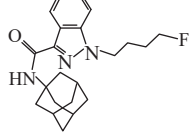
2 结果与讨论

2.1 电子烟油对合成大麻素标准品检测的影响

电子烟油的主要成分为甘油、丙二醇、烟碱,为改善品质、防止变质,其中还含有少量的雾化物添加剂,这些添加剂会影响合成大麻素的电离检测,且易残留污染仪器,其主要成分和理化性质列于表 1。首先,本研究考察了电子烟油的加入对合成大麻素标准品检测结果的影响。在丙酮辅助光电离源中,以丙酮二聚体离子作为反应试剂离子, m/z 117 为反应试剂离子峰 (reactant ion peak, RIP),其优势是利用试剂离子适中的质子亲和能力,在实现合成大麻素电离的

表 1 电子烟油中主要成分和合成大麻素的理化性质

Table 1 Properties of main components in e-cigarette liquids and synthetic cannabinoids

名称 Name	分子式 Formula ^a	结构式 Structural formula ^b	相对分子质量 Relative molecular mass	沸点 Boiling point ^b /°C	粘度 Viscosity ^a / Pa·s (25 °C)	质量百分比 Mass percentage/%
甘油	C ₃ H ₈ O ₃		92	290	1.49	50
丙二醇	C ₃ H ₈ O ₂		76	184	0.06	40
烟碱	C ₁₀ H ₁₄ N		162	244	—	2
雾化物添加剂	—	—	—	—	—	8
5F-EMB-PICA	C ₂₁ H ₂₉ FN ₂ O ₃		376	562	—	—
4F-MMB-BUTINACA	C ₁₈ H ₂₄ FN ₃ O ₃		349	—	—	—
4F-ABUTINACA	C ₂₂ H ₂₈ FN ₃ O		369	576	—	—

注: a表示数据来源于NIST Chemistry Web Book; b表示数据来源于ChemSpider

同时,避免电离低质子亲和能力化合物,示于图2a。10 mg/L 5F-EMB-PICA 标准品的质谱图示于图2b, m/z 377 是母体分子加氢的离子峰。电子烟

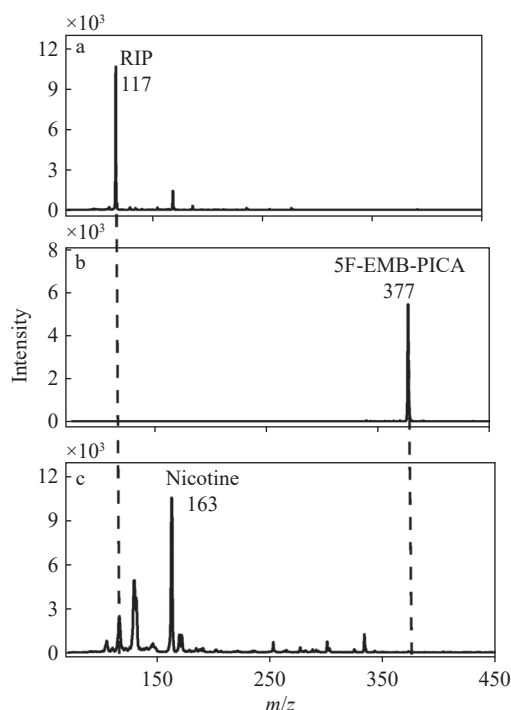


图2 丙酮作为反应试剂离子(a), 10 mg/L 5F-EMB-PICA 标准样品(b)和含 5F-EMB-PICA 电子烟油样品(c)的质谱图

Fig. 2 Mass spectra of acetone as a reagent ion (a), 10 mg/L 5F-EMB-PICA standard sample (b), e-cigarette liquids sample containing 5F-EMB-PICA (c)

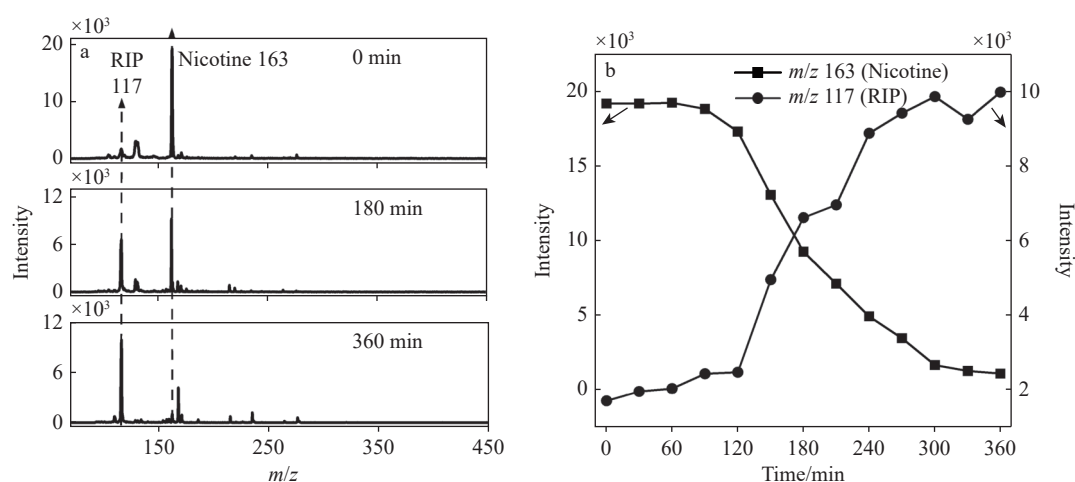


图3 进样纸取出后不同时间点的质谱图(a), 烟碱离子 m/z 163 与反应试剂离子 m/z 117 的信号强度随时间的变化曲线(b)

Fig. 3 Mass spectra at different time points after the sampling slide is removed (a), variation curves of signal intensity for nicotine ion (m/z 163) and reagent ion (m/z 117) over time (b)

油中合成大麻素的检测结果示于图2c, 未检出 5F-EMB-PICA 离子峰, 强度最高的峰为烟碱母体分子加氢的离子峰 m/z 163, 且谱图中无甘油和丙二醇母体分子加氢的离子峰。烟碱作为有机生物碱类化合物, 其质子亲和能力远高于醇类、酮类化合物, 电子烟油基质中高浓度的烟碱分子优先与反应试剂离子发生电离反应生成分子离子峰。5F-EMB-PICA 的质子亲和能力较低且浓度较低, 在与烟碱的竞争中处于不利地位, 不能有效电离, 导致图2c中未观察到 5F-EMB-PICA 的特征峰。甘油和丙二醇的浓度较高, 但其质子亲和能力比丙酮低, 在以丙酮二聚体离子作为反应试剂离子, 且强质子亲和能力烟碱存在的情况下, 不能被有效电离。因此, 在图2c中未观察到甘油和丙二醇母体分子加氢的离子峰。

烟碱是一种油性液体, 易残留, 会污染仪器, 进而影响质谱仪的正常工作。为此, 本研究考察了进样纸取出后不同时间点的质谱图, 示于图3a。烟碱离子 m/z 163 和反应试剂离子 m/z 117 的信号强度随时间的变化趋势示于图3b。取出进样纸后 60 min 内, m/z 163 离子信号强度仍趋于饱和, 且 m/z 117 离子信号很低, 表明烟碱残留严重; 180 min 后, 烟碱信号出现明显下降; 360 min 后, 烟碱信号较微弱, 反应试剂离子恢复到进样前的强度。这表明烟碱残留严重, 仪器完全恢复需要长达 360 min。因此, 需要对电子烟油进行前处理。

2.2 预加热去除电子烟油对合成大麻素检测的影响

通过分析比对电子烟油和合成大麻素的性质,发现电子烟油中主要成分的沸点范围为184~290℃,而合成大麻素5F-EMB-PICA的沸点高达562℃,列于表1。基于此,提出了加热预处理的解决方案,即选择合适的预加热温度和加热时间,以实现电子烟油成分的汽化,有望消除电子烟油基质的干扰,从而提高目标化合物的检测灵敏度。具体来看,检测流程示于图1b。首先,用微量进样针滴加1 μL电子烟油和1 μL 10 mg/L 5F-EMB-PICA标准品于进样纸上,获得电子烟油中5 mg/L合成大麻素混合溶液;然后,将进样纸置于多通道微型加热解吸预分离模块上加热特定时间,进行溶剂和低沸点成分的挥发;最后,将载有样品的进样纸插入离子阱质谱的热解吸电离腔,启动质谱扫描和检测。

2.2.1 预加热条件优化 预加热的温度和时间不仅影响电子烟油基质的去除效果和总分析时间,还可能导致合成大麻素的损失,进而降低检测灵敏度。因此,本研究采用控制单一变量法对预加热条件进行优化。将2 μL含5 mg/L合成大麻素的电子烟油在不同温度下加热5 min后,检测5F-EMB-PICA信号强度,以此优化预加热温度;另外,在固定150℃预加热温度下优化预加热时间,结果示于图4。

当预加热温度从100℃升至180℃时,5F-EMB-PICA的信号强度呈先增大后减小的趋势,

并在150℃达到最大。其原因可能是随着预加热温度升高,电子烟油中烟碱等组分逐渐汽化、含量降低,对5F-EMB-PICA的干扰逐渐减小,从而提高了5F-EMB-PICA特征离子 m/z 377的信号强度。然而,当温度过高时,不仅电子烟油中的物质会挥发,合成大麻素也会因达到沸点而损失,从而导致信号强度下降。类似地,随着预加热时间的增加,电子烟油的挥发量增大,使烟碱等物质与5F-EMB-PICA的电离竞争减少,检测信号增强。但进一步延长预加热时间,样品中的合成大麻素也会挥发,从而导致信号强度下降。因此,选择150℃预加热5 min作为最佳测试条件。

2.2.2 不同烟油中合成大麻素的检测 在最优预加热条件下,检测不同风味电子烟油中3种常见合成大麻素。含2 μL 5 mg/L 5F-EMB-PICA的老冰棍儿味电子烟油检测结果示于图5a,存在 m/z 377离子峰。为进一步验证该谱峰并非来自于电子烟油中的杂质,检测了不含合成大麻素的老冰棍儿味电子烟油,结果示于图5b,未检测到 m/z 377谱峰,证明图5a中 m/z 377来自于5F-EMB-PICA。为验证该方法的通用性和可靠性,检测了蓝莓味电子烟油中5 mg/L 4F-MMB-BUTINACA和芒果味电子烟油中5 mg/L 4F-ABUTINACA,结果分别示于图5c、5e。经预加热处理后,电子烟油基质中可检测到4F-MMB-BUTINACA和4F-ABUTINACA,其产物离子分别为 m/z 350和370,均为母体分子加氢

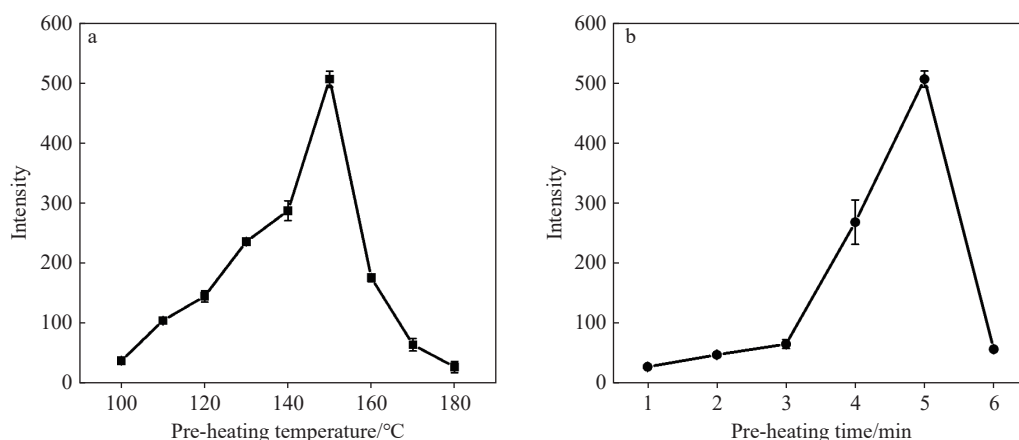


图4 5 mg/L 5F-EMB-PICA 信号强度随预加热温度(a)和预加热时间(b)的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of 5 mg/L 5F-EMB-PICA signal intensity with pre-heating temperature (a) and pre-heating time (b)

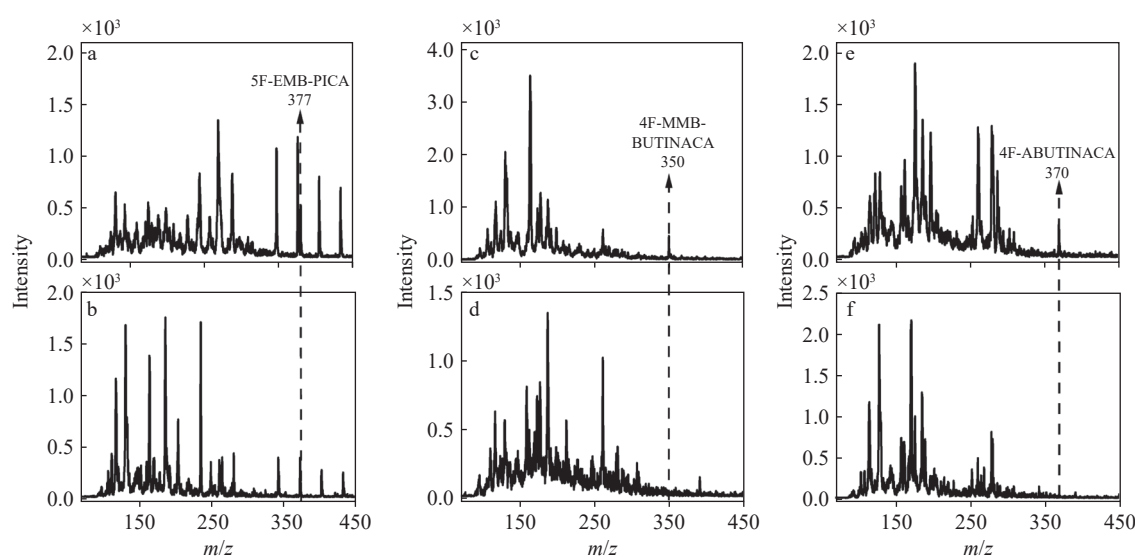


图5 经预加热处理后,含5 mg/L 5F-EMB-PICA的老冰棍儿味电子烟油(a)、4F-MMB-BUTINACA的蓝莓味电子烟油(c)、4F-ABUTINACA的芒果味电子烟油(e)与不含合成大麻素的老冰棍儿味电子烟油(b)、蓝莓味电子烟油(d)、芒果味电子烟油(f)的质谱图

Fig. 5 Mass spectra of e-cigarette liquids after pre-heating treatment containing 5 mg/L 5F-EMB-PICA in the old ice stick flavor (a), 4F-MMB-BUTINACA in the blueberry flavor (c), 4F-ABUTINACA in the mango flavor (e), and e-cigarette liquids without synthetic cannabinoids in the old ice stick flavor (b), blueberry flavor (d), and mango flavor (f)

离子。对比不含合成大麻素的蓝莓味(图5d)、芒果味(图5f)电子烟油的质谱图,可以排除杂质的干扰,确认图5c和图5e中 m/z 350和370分别为4F-MMB-BUTINACA和4F-ABUTINACA。这表明,预加热方法对不同风味的电子烟油基质具有普适性,能够有效提高电子烟油中合成大麻素的检测灵敏度。

为了更直观地分析预加热处理后样品在热解吸电离腔内的残留情况,对比了检测完成并取出进样纸后不同时刻的谱图。取出进样纸后,立即检测和1 min后检测的结果示于图6。可见,立即检测的谱图中能够明显观察到 m/z 163烟碱分子离子峰,信号强度约为1 800;此时,反应试剂离子的强度约为6 000。在1 min后检测的谱图中, m/z 163峰几乎消失,而RIP峰强度显著增加,恢复至检测前的约13 000。这一结果表明,通过预加热处理后,进样纸上电子烟油中原有的高粘度成分(如甘油、丙二醇和烟碱)已充分挥发。1 min后,RIP强度恢复至检测前水平,可以进行下一个样品的检测。预加热处理可有效消除电子烟油对检测灵敏度的不利影响;同时,克服电子烟油残留导致的仪器恢复时间长的问题,

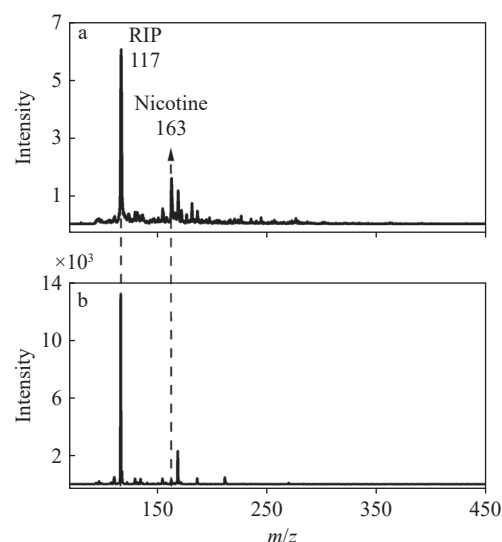


图6 预加热处理下取出进样纸后,立即检测(a)和1 min后检测(b)的质谱图

Fig. 6 Mass spectra obtained immediately (a) and after 1 min (b) following removing the sampling slide after pre-heating pretreatment

并显著提高了检测效率。然而,本研究的合成大麻素沸点高达560℃,与电子烟油中基质的沸点差异超过250℃,目前仅开展了电子烟油中高沸

点合成大麻素的研究工作。常见毒品的沸点范围为 200~600 °C, 不同沸点的毒品和检材对分离效果的影响有待进一步研究。

3 结论

针对电子烟油中合成大麻素现场快速检测的迫切需求, 本研究发展了快速、高效的电子烟油预加热前处理技术, 结合微型离子阱质谱, 建立了针对电子烟油中合成大麻素的快速高灵敏度定性检测方法。利用合成大麻素与电子烟油中组分的沸点差异, 提出了加热-预分离的策略, 通过优化预加热温度和时间参数, 有效消除了电子烟油基质效应的干扰, 避免了电子烟油中烟碱对合成大麻素离子的电离竞争, 显著提高了合成大麻素的检测灵敏度。该方法实现了电子烟油中 5 mg/L 5F-EMB-PICA、4F-ABUTINACA 和 4F-MMB-BUTINACA 的高灵敏检测。利用多通道微型加热解吸的预分离模块, 可将单样品的平均分析周期缩短至 1 min 以内。该方法可实现电子烟油中合成大麻素等毒品的痕量分析, 为毒品的现场快速稽查提供重要支撑。

参考文献:

- [1] ALVES V L, GONÇALVES J L, AGUIAR J, TEIXEIRA H M, CÂMARA J S. The synthetic cannabinoids phenomenon: from structure to toxicological properties. a review[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2020, 50(5): 359-382.
- [2] CASTANETO M S, GORELICK D A, DESROSIERS N A, HARTMAN R L, PIRARD S, HUESTIS M A. Synthetic cannabinoids: epidemiology, pharmacodynamics, and clinical implications[J]. *Drug and Alcohol Dependence*, 2014, 144: 12-41.
- [3] TAI H, SWARTZ M D, MARSDEN D, PERRY C L. The future of substance abuse now: relationships among adolescent use of vaping devices, marijuana, and synthetic cannabinoids[J]. *Substance Use & Misuse*, 2021, 56(2): 192-204.
- [4] RADOMINSKA-PANDYA A, MORAN J, FANTEGROSSI W, PRATHER P. Synthetic cannabinoids: rapidly emerging drugs of abuse[J]. *The FASEB Journal*, 2018, 31: 811.
- [5] 国家禁毒办通报整类列管合成大麻素氟胺酮等 18 种新精神活性物质我国成为全球首个整类列管合成大麻素类物质的国家[J]. 上海化工, 2021, 46(4): 70.
- [6] National Narcotics Control Commission. Announcement on the classification and control of synthetic cannabinoids, including fluoroethanone and 18 other new psychoactive substances: China becomes the first country to classify entire categories of synthetic cannabinoids[J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2021, 46(4): 70 (in Chinese).
- [7] GB 41700-2022 电子烟[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [8] HEAL D J, GOSDEN J, SMITH S L. A critical assessment of the abuse, dependence and associated safety risks of naturally occurring and synthetic cannabinoids[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2024, 15: 1 322 434.
- [9] 杜冰倩, 于建超. 新型毒品犯罪中的毒品纯度与数量认定规则[J]. 中国检察官, 2023(14): 70-72.
- [10] DU Bingqian, YU Jianchao. Rules for determining the purity and quantity of drugs in new drug crimes[J]. *The Chinese Procurators*, 2023(14): 70-72(in Chinese).
- [11] ZHOU J, ZHENG Y, XU Y, ZONG X, FAN Y, HUANG Z. Qualitative and quantitative analysis of synthetic cannabinoids in e-liquids by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2024, 206: 111 364.
- [12] 刘翠梅, 贾薇, 宋春辉, 钱振华, 花镇东, 陈月猛. 可疑电子烟油中 5 种吡啶或吡啶酰胺类合成大麻素的 GC-MS 定性和定量分析[J]. 法医学杂志, 2023, 39(5): 457-464.
- [13] LIU Cuimei, JIA Wei, SONG Chunhui, QIAN Zhenhua, HUA Zhendong, CHEN Yuemeng. Qualitative and quantitative analysis of five indoles or indazole amide synthetic cannabinoids in suspected e-cigarette oil by GC-MS[J]. *Journal of Forensic Medicine*, 2023, 39(5): 457-464(in Chinese).
- [14] HUANG Y, JIA W, CHEN Y, LIU C, LIU S, SU M, HUA Z. A comprehensive analytical strategy based on characteristic fragments to detect synthetic cannabinoid analogs in seized products and hair samples[J]. *Talanta*, 2023, 265: 124 830.
- [15] 杨哲, 蒋力维, 杨思瑶, 吴一荻, 吕建霞. 液相色谱-串联质谱法同时测定电子烟油中的 102 种合成大麻素类物质[J]. 色谱, 2024, 42(10): 943-953.
- [16] YANG Zhe, JIANG Liwei, YANG Siyao, WU Yidi, LYU Jianxia. Simultaneous determination of 102 synthetic cannabinoids in electronic cigarette oil by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2024, 42(10): 943-953(in

- Chinese).
- [13] WU N, DANOUN S, BALAYSSAC S, MALET-MARTINO M, LAMOUREUX C, GILARD V. Synthetic cannabinoids in e-liquids: a proton and fluorine NMR analysis from a conventional spectrometer to a compact one[J]. *Forensic Science International*, 2021, 324: 110-113.
- [14] 刘翠梅, 贾薇, 宋春辉, 花镇东. 缴获电子烟油样品中75种合成大麻素的¹H qNMR定量分析研究[J]. *分析测试学报*, 2023, 42(5): 605-613.
- LIU Cuimei, JIA Wei, SONG Chunhui, HUA Zhendong. Quantification of 75 synthetic cannabinoids in seized E-liquid samples by ¹H qNMR[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2023, 42(5): 605-613(in Chinese).
- [15] METTERNICH S, ZÖRNTLEIN S, SCHÖNBERGER T, HUHN C. Ion mobility spectrometry as a fast screening tool for synthetic cannabinoids to uncover drug trafficking in jail *via* herbal mixtures, paper, food, and cosmetics[J]. *Drug Testing and Analysis*, 2019, 11(6): 833-846.
- [16] MOSTOWTT T, McCORD B. Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) as a method for the toxicological analysis of synthetic cannabinoids[J]. *Talanta*, 2017, 164: 396-402.
- [17] ANDREWS R C, MAY B, HERNÁNDEZ F J, COZIER G E, TOWNSEND P A, SUTCLIFFE O B, HAINES T S F, FREEMAN T P, SCOTT J, HUSBANDS S M, BLAGBROUGH I S, BOWMAN R W, LEWIS S E, GRAYSON M N, CRESPO-OTERO R, CARBERY D R, PUDNEY C R. Photochemical fingerprinting is a sensitive probe for the detection of synthetic cannabinoid receptor agonists; toward robust point-of-care detection[J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(2): 703-713.
- [18] AN X, JIANG D, CAO Q, WANG W, XU F, SHIIGI H, CHEN Z. Ultrasensitive electrochemiluminescence sensor for the detection of synthetic cannabinoids based on perovskite as coreaction accelerator and light-scattering effects of photonic crystals[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1 279: 341-352.
- [19] 郭项雨, 黄雪梅, 翟俊峰, 白桦, 李晓旭, 马潇潇, 马强. 原位电离小型便携式质谱的研究进展[J]. *分析化学*, 2019, 47(3): 335-346.
- GUO Xiangyu, HUANG Xuemei, ZHAI Junfeng, BAI Hua, LI Xiaoxu, MA Xiaoxiao, MA Qiang. Research advances in ambient ionization and miniature mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(3): 335-346(in Chinese).
- [20] WANG S, WANG W, LI H, XING Y, HOU K, LI H. Rapid on-site detection of illegal drugs in complex matrix by thermal desorption acetone-assisted photoionization miniature ion trap mass spectrometer[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(6): 3 845-3 851.
- [21] WANG W, WANG S, XU C, LI H, XING Y, HOU K, LI H. Rapid screening of trace volatile and nonvolatile illegal drugs by miniature ion trap mass spectrometry: synchronized flash-thermal-desorption purging and ion injection[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(15): 10 212-10 220.
- [22] MA Q, BAI H, LI W, WANG C, COOKS R G, OUYANG Z. Rapid analysis of synthetic cannabinoids using a miniature mass spectrometer with ambient ionization capability[J]. *Talanta*, 2015, 142: 190-196.

(收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2025-05-20)