

叔丁氧羰基取代毒品前体的质谱特征研究

刘翠梅¹, 刘雪燕², 花镇东¹, 唐 皓¹, 杜 宇², 贾 薇¹

(1. 公安部禁毒情报技术中心, 毒品监测管控与禁毒关键技术公安部重点实验室, 北京 100193;

2. 中国药科大学, 江苏 南京 210009)

摘要: 叔丁氧羰基(*t*-Boc)取代毒品前体是近期较常见的一类毒品前体化合物。通过分析 *N*-叔丁氧羰基-4-(苯基氨基)哌啶(*t*-Boc-4-AP)、*N*-叔丁氧羰基-4-[(4-氟苯基)氨基]哌啶(*t*-Boc-4F-AP)、*N*-叔丁氧羰基-4-[(4-溴苯基)氨基]哌啶(*t*-Boc-4Br-AP)、*N*-叔丁氧羰基-去甲氯胺酮(*t*-Boc-norketamine)等 4 种 *t*-Boc 取代毒品前体在电子电离(EI)和电喷雾电离-碰撞诱导解离(ESI-CID)模式下的特征碎片离子, 推测其可能的裂解途径。在 EI 模式下, *t*-Boc 取代毒品前体生成叔丁基离子($C_4H_9^+$)和碎片离子 $[M-C_4H_8]^+$ 、 $[M-C_4H_9O]^+$ 、 $[M-C_5H_8O_2]^+$; 在 ESI-CID 模式下, 生成丢失 C_4H_8 的碎片离子和进一步丢失 CO_2 的碎片离子。研究 *t*-Boc 取代毒品前体质谱碎裂规律有助于推断未知化合物结构, 为鉴定该类物质提供参考。

关键词: 气相色谱-质谱(GC-MS); 超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC-QTOF MS); 毒品前体; 叔丁氧羰基(*t*-Boc); 裂解途径

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)01-0040-08

DOI: 10.7538/zpxb.2024.0028

CSTR: 32365.14.zpxb.2024.0028

Mass Fragmentation Characteristics of *t*-Boc Substituted Drug Precursors

LIU Cui-mei¹, LIU Xue-yan², HUA Zhen-dong¹, TANG Hao¹, DU Yu², JIA Wei¹

(1. Key Laboratory of Drug Monitoring and Control, Drug Intelligence and Forensic Center, Ministry of Public Security, P.R.C., Beijing 100193, China; 2. China Pharmaceutical University, Nanjing 210009, China)

Abstract: To circumvent the supervision of law, illicit manufacturers turn to produce drug related precursors. Among them, *tert*-butoxycarbonyl (*t*-Boc) substituted drug precursors are the most common type recently. The *t*-Boc moiety is a common protecting group in organic synthesis. It can prevent a chemical reaction at one specific group in a molecule, while other functional groups are transformed, and then can be easily chemically removed through a simple carbamate hydrolysis. Due to the lack of control, the readily availability from chemical suppliers, and easy conversion to an immediate, these *t*-Boc substituted precursors are attractive to illicit manufacturers. The identification of these newly emerging precursors has posed great challenges to forensic science laboratories worldwide. In this study, four types of *t*-Boc substituted drug precursors, including *tert*-butyl 4-(phenylamino)piperidine-1-carboxylate(*t*-Boc-4-AP), *tert*-butyl 4-((4-fluorophenyl)amino)piperidine-1-carboxylate (*t*-Boc-4F-AP), *tert*-butyl 4-((4-bromophenyl)amino)piperidine-1-carboxylate (*t*-Boc-4Br-AP), and *tert*-butyl (1-(2-chlorophenyl)-2-oxocyclohexyl)carbamate (*t*-Boc-norketamine), were

analyzed by using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole time of flight-mass spectrometry (UPLC-QTOF MS). After analyzing the characteristic fragment ions under electron impact (EI) mode and electrospray ionization collision-induced dissociation (ESI-CID) mode, the possible fragmentation pathways of *t*-Boc substituted drug precursors were deduced. The main product ions of *t*-Boc substituted drug precursors are *tert* butyl ion ($C_4H_9^+$), and product ions of $[M-C_4H_8]^+$, $[M-C_4H_9O]^+$, and $[M-C_5H_8O_2]^+$ under EI mode. Under ESI-CID mode, product ions are mainly formed by the loss of C_4H_8 and the further loss of CO_2 . The study of the fragmentation pathways of *t*-Boc substituted drug precursors in mass spectrometry benefits the structure elucidation of unknown compounds, and provides reference for forensic science laboratories to identify such substances.

Key words: gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole time of flight-mass spectrometry (UPLC-QTOF MS); drug precursor; *tert*-butoxycarbonyl (*t*-Boc); fragmentation pathway

近年来,全球毒品制造、贩运、滥用问题突出,国内和国际毒情日益复杂。为规避管制措施,不法分子不断研发新的制毒工艺,开发各类新型化学品作为制毒前体。其中,叔丁氧羰基(*t*-Boc)取代毒品前体是近期较常见的一类前体化学品^[1-4],如叔丁氧羰基取代甲基苯丙胺^[1-2]、叔丁氧羰基取代3,4-亚甲二氧基甲基苯丙胺(*t*-Boc-MDMA)^[3]、*N*-叔丁氧羰基-4-(苯基氨基)哌啶(*t*-Boc-4-AP)^[4]等。*t*-Boc是有机合成中一种常见的保护基,用于防止被保护部位的官能团发生化学反应,使化学反应仅发生在其他官能团

上。化学反应结束后,可以通过简单的氨基甲酸酯水解反应消除*t*-Boc保护基^[4]。

近年来,*t*-Boc取代毒品前体流入制毒渠道问题日益突出。我国已发现多种*t*-Boc取代毒品前体,如*N*-叔丁氧羰基-4-(苯基氨基)哌啶(*t*-Boc-4-AP)、*N*-叔丁氧羰基-4-[(4-氟苯基)氨基]哌啶(*t*-Boc-4F-AP)、*N*-叔丁氧羰基-4-[(4-溴苯基)氨基]哌啶(*t*-Boc-4Br-AP)、*N*-叔丁氧羰基-去甲氯胺酮(*t*-Boc-norketamine),其结构式示于图1。2024年,我国已将*t*-Boc-4-AP列入易制毒化学品管制目录。2022年第65届联合国麻委会通过决议,将

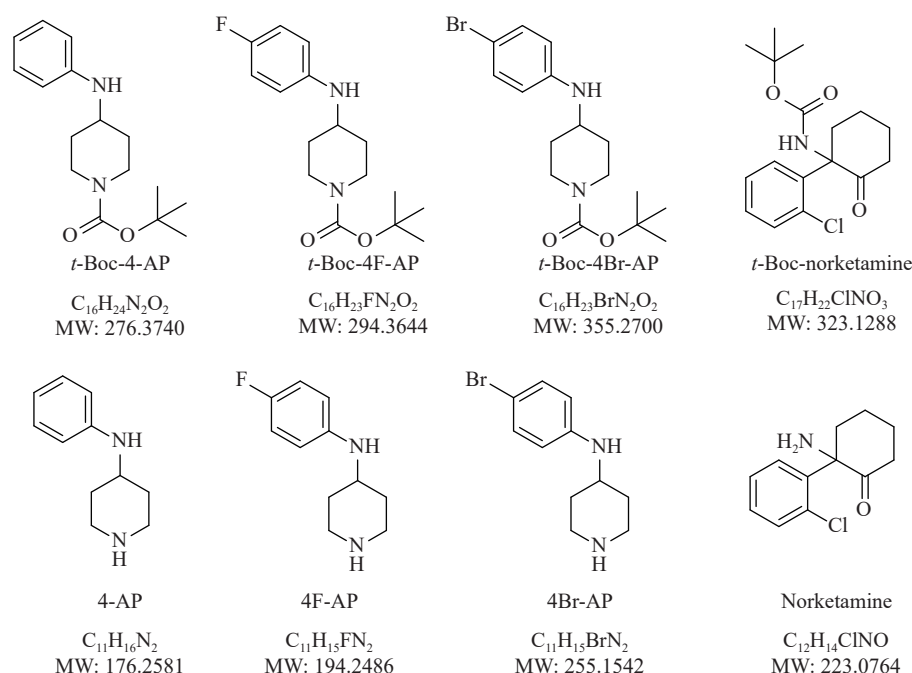


图1 4种*t*-Boc取代毒品前体及其对应毒品前体的化学结构式

Fig. 1 Chemical structures of four *t*-Boc substituted drug precursors and their respective drug precursors

t-Boc-4-AP 列入《联合国禁止非法贩运麻醉药品和精神药品公约》附表1予以管制。*t*-Boc-4-AP 可在酸性条件下水解脱去 *t*-Boc 保护基生成 4-(苯基氨基)哌啶(4-AP)^[4], 是合成芬太尼的前体; 也可与丙酰氯反应得到 *N*-叔丁氧羰基-去苯乙基芬太尼(*t*-Boc-norfentanyl)^[5], 其在酸性条件下除去保护基, 进一步与溴苯乙烷反应得到芬太尼^[5]。由此推测, *t*-Boc-4F-AP 和 *t*-Boc-4Br-AP 可以在上述相似条件下反应制得氟(溴)代芬太尼。此外, *t*-Boc-4-AP、*t*-Boc-4F-AP、*t*-Boc-4Br-AP 是重要的医药中间体, 用于合成各种药物^[6-8]。

气相色谱-质谱(GC-MS)法和液相色谱-质谱(LC-MS)法在基层法庭科学实验室的应用较为广泛^[9-10]。本研究拟采用 GC-MS 法和超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC-QTOF MS)法分析多种 *t*-Boc 取代毒品前体, 探讨其在电子电离(EI)和电喷雾离子化-碰撞诱导解离(ESI-CID)模式下的主要裂解途径, 旨为新型未知结构 *t*-Boc 取代毒品前体的结构推断提供参考。

1 实验部分

1.1 主要仪器与装置

GC MS-QP2010 气相色谱-质谱联用仪: 日本岛津公司产品, 配有 EI 源; Acquity UPLC I-Class 超高效液相色谱仪: 美国 Waters 公司产品; Triple TOF™7600 四极杆飞行时间质谱仪: 美国 AB Sciex 公司产品, 配有 ESI 源。

1.2 主要材料与试剂

t-Boc-4-AP、*t*-Boc-4F-AP、*t*-Boc-4Br-AP、*t*-Boc-norketamine、4-AP、4-[(4-氟苯基)氨基]哌啶(4F-AP)、4-[(4-溴苯基)氨基]哌啶(4Br-AP)样品: 由国家毒品实验室提供; 去甲氯胺酮(norketamine)对照品: 美国 Cerilant 公司产品; 甲醇、乙腈、甲酸: 均为色谱纯, 德国 Merck 公司产品; 超纯水: 由美国 Millipore 公司生产的 Advantage A10 超纯水系统制得。

1.3 实验条件

1.3.1 样品制备 配制 1.0 g/L 目标物甲醇溶液, 进行 GC-MS 分析; 再用 0.1% 甲酸水溶液稀释至 1 mg/L *t*-Boc-norketamine 或 0.1 mg/L *t*-Boc-4-AP、*t*-Boc-4F-AP、*t*-Boc-4Br-AP, 进行 UPLC-QTOF MS 分析。

1.3.2 GC-MS 条件 Agilent DB-5 MS 石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 升温程序: 140 °C 保持 3 min, 以 10 °C/min 升至 320 °C; 载气(He)流速 1 mL/min; 进样口温度 280 °C; 进样量 1 μL; 分流比 40 : 1。EI 电离模式: 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 °C, 接口温度 250 °C, 全扫描模式(Full scan MS), 质量扫描范围 *m/z* 35~500。

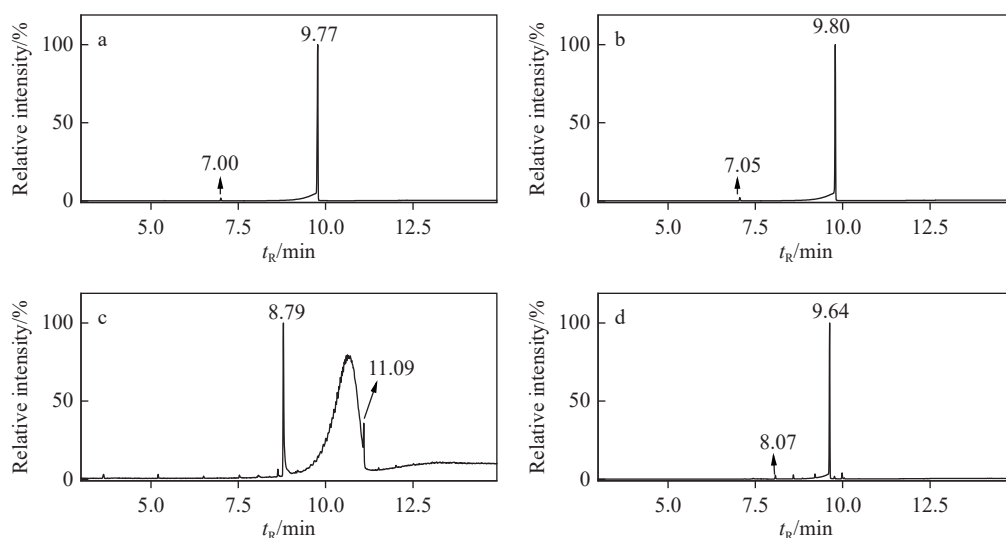
1.3.3 UPLC-QTOF MS 条件 Phenomenex Kinetex Biphenyl 色谱柱(100 mm×3.0 mm, 2.6 μm); 柱温 40 °C; 流动相: A 为 0.05% 甲酸水溶液, B 为 0.05% 甲酸乙腈溶液; 梯度洗脱程序: 0~20.0 min(0%~100%B), 20.0~22.0 min(100%B), 22.0~22.1 min(0%B), 22.1~25.0 min(0%B); 流速 0.8 mL/min; 进样量 5 μL。ESI⁺电离模式: 喷雾电压 5 000 V, 喷雾温度 500 °C, 雾化气压强 379.2 kPa, 脱溶剂气压强 379.2 kPa, 气帘气压强 241.3 kPa; 全扫描模式: 去簇电压 50 V, 碰撞能量 10 V, 质量扫描范围 *m/z* 30~500; 子离子扫描模式(product ion scan): 去簇电压 50 V, 碰撞诱导解离(CID)能量(35±15) V, 质量扫描范围 *m/z* 30~500。

2 结果与分析

2.1 *t*-Boc 取代毒品前体的 EI 裂解谱图特征

采用 GC-MS 分析 4 种 *t*-Boc 取代毒品前体样品, 其总离子流色谱图和 EI 质谱图分别示于图 2、3。EI 模式下, *t*-Boc 取代毒品前体可能的裂解途径示于图 4。由图 3a、3c 可见, *t*-Boc-4-AP 和 *t*-Boc-4F-AP 的 EI 质谱信息高度相似, 均存在 A~J 10 种特征碎片离子, 且叔丁基离子(C₄H₉⁺, 碎片离子 I)的强度最高, 为基峰。*t*-Boc-4-AP 和 *t*-Boc-4F-AP 的分子离子通过麦氏重排丢失异丁烯(C₄H₈)生成碎片离子 A, 或失去叔丁氧基自由基(C₄H₉O•)形成碎片离子 B, 或经麦氏重排后失去异丁烯(C₄H₈)和二氧化碳(CO₂)生成碎片离子 C; 碎片离子 C 先经电子转移, 再失去乙胺(C₂H₅NH₂)生成碎片离子 D, 或先经电子转移后在哌啶环发生断裂形成碎片离子 E。

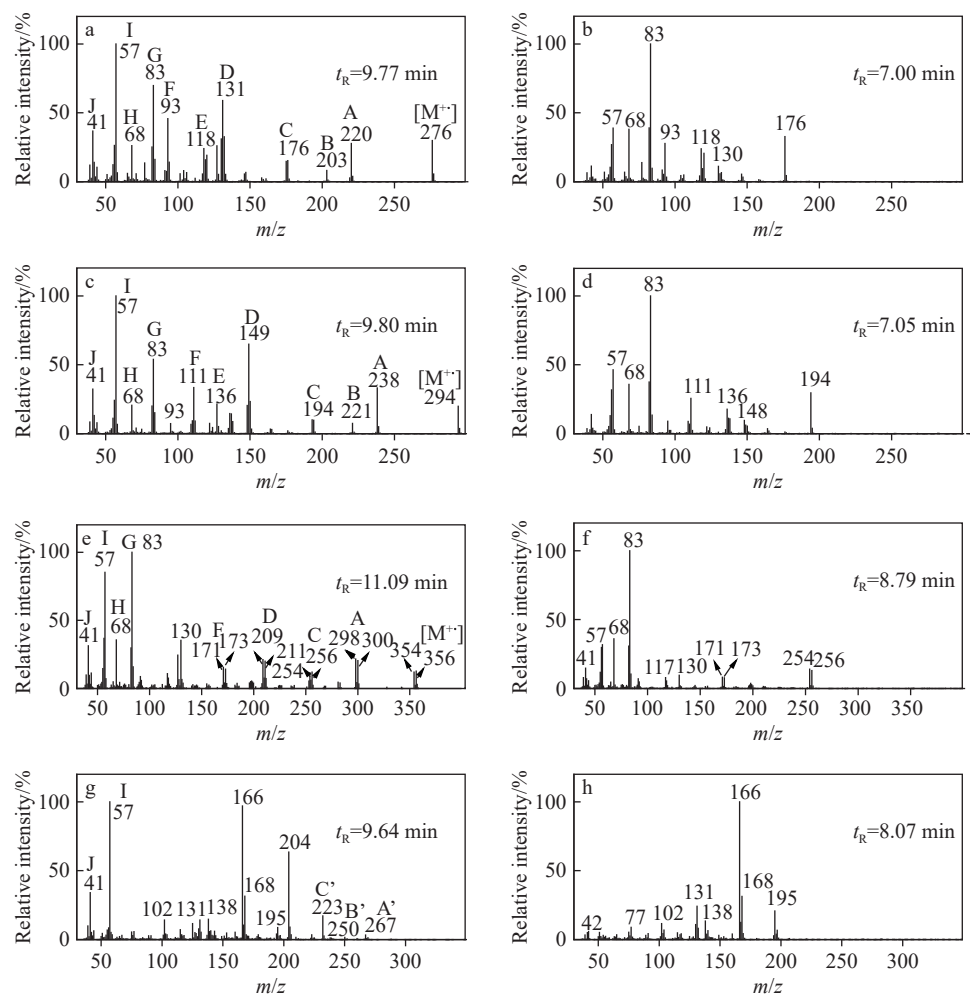
与 *t*-Boc-4-AP 和 *t*-Boc-4F-AP 相比, *t*-Boc-4Br-AP 的 EI 质谱图(图 3e)的低质量数端同样存在 *m/z* 41、57、68、83, 但高质量数端的碎片离子有较大差异, 主要存在 *m/z* 298/300(A)、*m/z* 254/256(C)、*m/z* 209/211(D)、*m/z* 171/173(F)等质量数相差为 2 且丰度比接近 1:1 的碎片离子



注: a. *t*-Boc-4-AP; b. *t*-Boc-4F-AP; c. *t*-Boc-4Br-AP; d. *t*-Boc-norketamine

图2 4种 *t*-Boc 取代毒品前体样品的总离子流色谱图

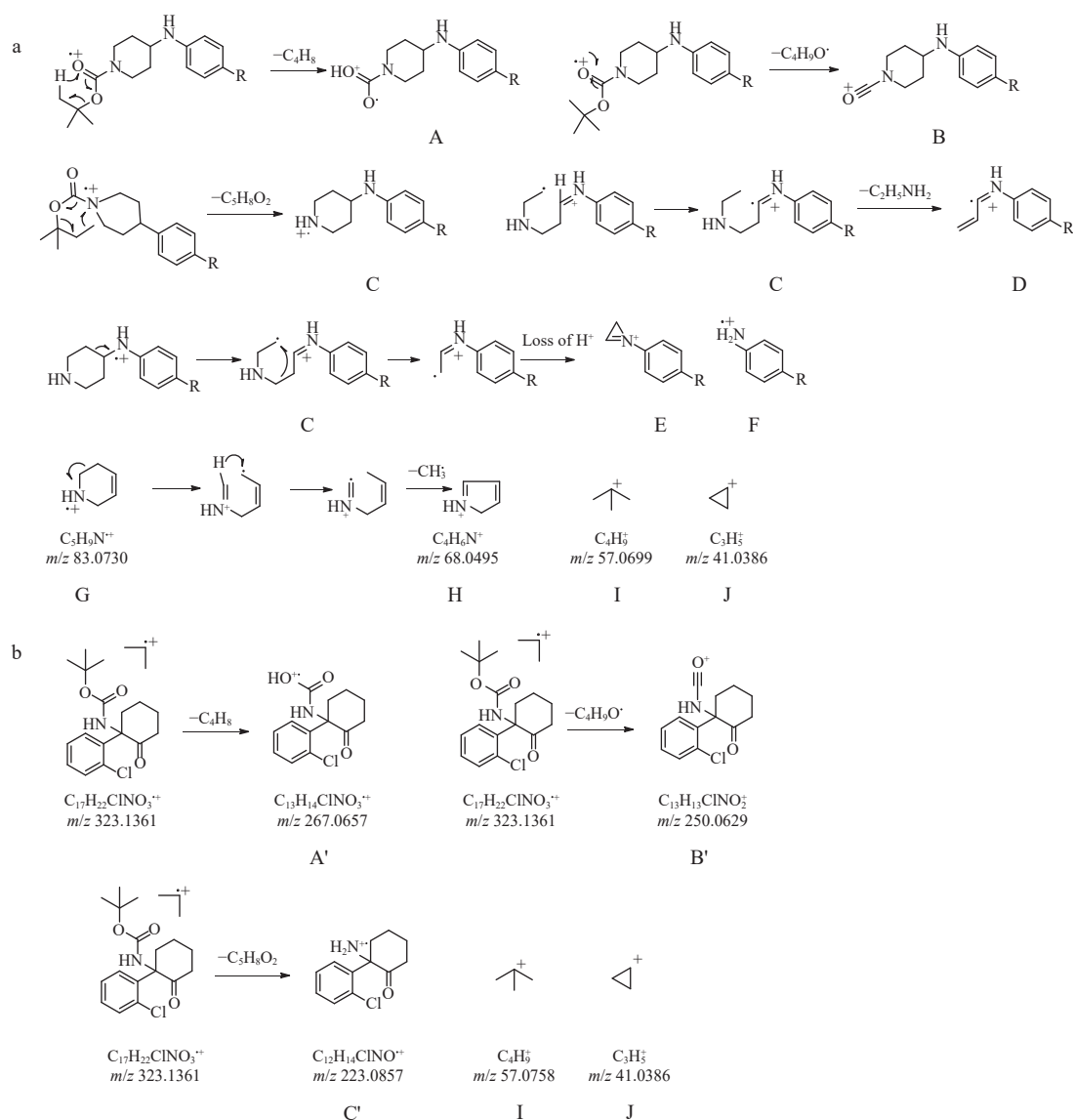
Fig. 2 Total ion chromatograms of four *t*-Boc substituted drug precursor samples



注: a. *t*-Boc-4-AP; b. 4-AP; c. *t*-Boc-4F-AP; d. 4F-AP; e. *t*-Boc-4Br-AP; f. 4Br-AP; g. *t*-Boc-norketamine; h. norketamine

图3 *t*-Boc 取代和未取代毒品前体的 EI 质谱图

Fig. 3 Mass spectra of the *t*-Boc substituted and unsubstituted drug precursors under EI mode



注: a. *t*-Boc-4-AP, *t*-Boc-4F-AP, *t*-Boc-4Br-AP; b. *t*-Boc-norketamine

图4 EI模式下,*t*-Boc取代毒品前体的可能裂解途径

Fig. 4 Proposed fragmentation pathways of *t*-Boc substituted drug precursors under EI mode

对,表明存在溴原子。其中, m/z 298、300为分子离子丢失异丁烯生成的碎片离子及其同位素离子; m/z 254、256为分子离子失去异丁烯和二氧化碳后生成的碎片离子及其同位素离子; m/z 171、173为溴代苯胺正离子自由基及其同位素离子。

在*t*-Boc-norketamine的EI质谱图中,存在其分子离子失去异丁烯生成的碎片离子 m/z 267(A'),失去叔丁氧基自由基生成的碎片离子 m/z 250(B'),失去异丁烯和二氧化碳生成的碎片离子 m/z 223(C')、 m/z 57(I)、 m/z 41(J)。

综上所述,*t*-Boc毒品前体的EI质谱图中均

存在叔丁基离子 m/z 57($C_4H_9^+$),且多数化合物存在碎片离子 $[M-C_4H_8]^+$ 、 $[M-C_4H_9O]^+$ 、 $[M-C_5H_8O_2]^+$ 。

此外,在高温条件(如进样口温度280℃)下,*t*-Boc取代毒品前体会部分脱掉*t*-Boc取代基。如,在图2a的7.00 min处检出了4-AP,示于图3b;图2b的7.05 min处检出了4F-AP,示于图3d;图2d的8.07 min处检出了norketamine,示于图3h。*t*-Boc-4Br-AP的热稳定性较差,采用GC-MS分析时,绝大多数样品会分解为4Br-AP,仅能检出少量的*t*-Boc-4Br-AP原体。在*t*-Boc-4Br-AP的TIC图(图2c)8.75~11.05 min区间内质谱图的谱库检索结果均为4Br-AP,示于图3f,仅在11.09 min

处检出 *t*-Boc-4Br-AP 较弱的峰。推测其原因可能是部分 *t*-Boc-4Br-AP 样品在进样口发生分解, 表现为 8.79 min 处存在 1 个尖峰; 部分 *t*-Boc-4Br-AP 样品在色谱柱分离过程中发生分解, 表现为 8.9~10.9 min 存在 1 个峰展宽较严重的峰。

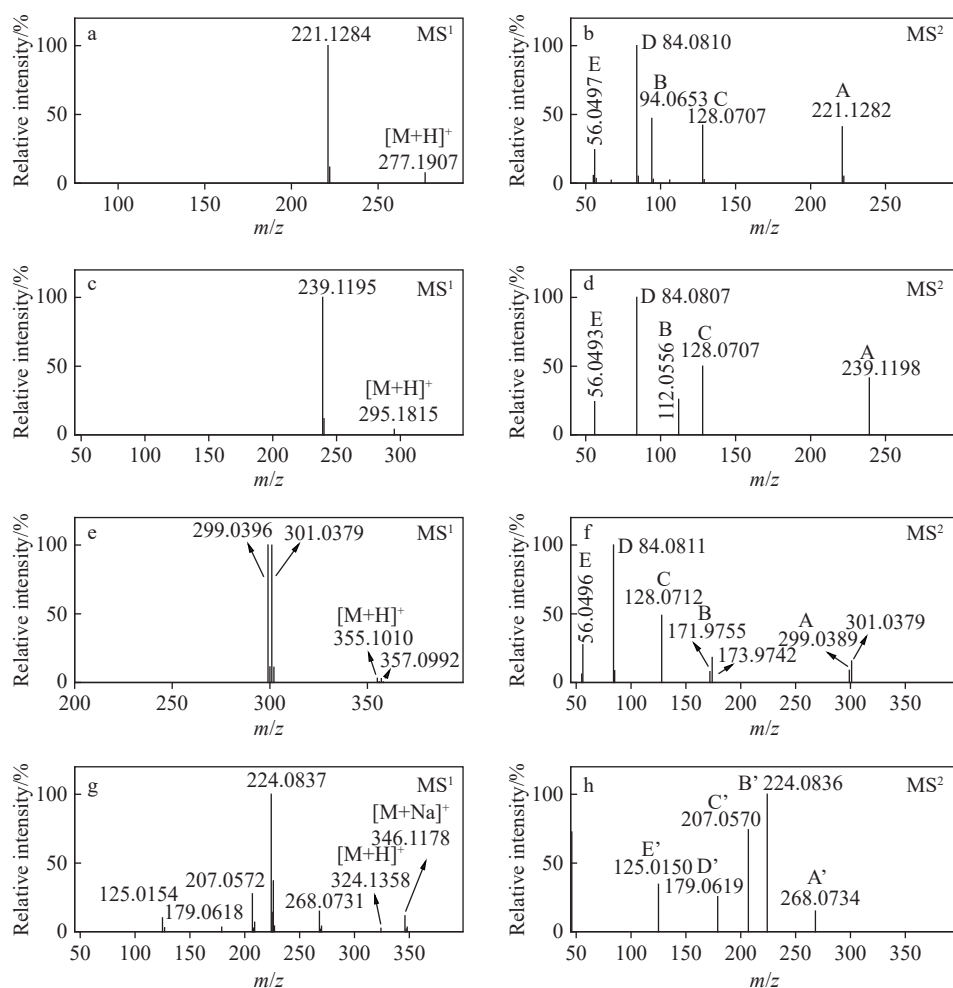
2.2 *t*-Boc 取代毒品前体的 ESI-CID 裂解谱图特征

t-Boc 取代毒品前体在 ESI-CID 模式下的裂解途径与 EI 模式有较大区别, 二者具有很好的互补性。在 ESI-CID 模式下, *t*-Boc 取代毒品前体的一级和二级质谱图示于图 5, 准分子离子和碎片离子的精确质荷比列于表 1, 各碎片离子可能的裂解途径示于图 6。 *t*-Boc 取代毒品前体会发生源内裂解, 其一级质谱图中均存在准分子离子峰丢失异丁烯而生成的碎片离子 $[M+H-C_4H_8]^+$ (A)。 *t*-Boc-4-AP、*t*-Boc-4F-AP、*t*-Boc-4Br-AP 的二级质谱图中均含有 A、B、C、D、E 等 5 种特征

碎片离子, 示于图 5b、5d、5f; 准分子离子峰丢失异丁烯生成碎片离子 A, 其在苯氨基与哌啶相连的碳氮键处发生断裂生成碎片离子 B 和 C, 碎片离子 C 依次失去 CO_2 和 C_2H_4 生成碎片离子 D 和 E, 示于图 6a。

t-Boc-norketamine 极易发生源内裂解, 产生很多碎片离子, 在其一级质谱图(图 5g)中检出了二级质谱图(图 5h)中所有的碎片离子。一级质谱图中同时存在加氢的准分子离子峰 $[M+H]^+$ 和加钠离子峰 $[M+Na]^+$ 。二级质谱图中碎片离子 m/z 268.073 4(A')、224.083 6(B')、207.057 0(C')、179.061 9(D') 和 125.015 0(E') 分别为准分子离子依次失去 C_4H_8 、 CO_2 、 NH_3 、 CO 、 C_4H_6 而产生。

综上所述, *t*-Boc 取代毒品前体的 ESI-CID 质谱图中均会生成丢失 C_4H_8 的碎片离子及其进一步丢失 CO_2 的碎片离子。



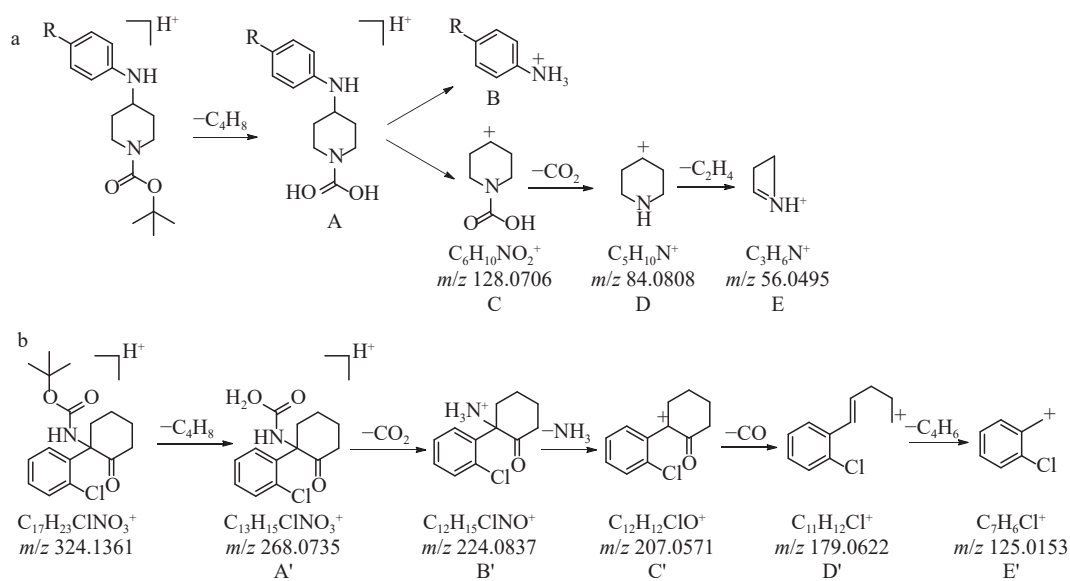
注: a, b. *t*-Boc-4-AP; c, d. *t*-Boc-4F-AP; e, f. *t*-Boc-4Br-AP; g, h. *t*-Boc-norketamine

图 5 4 种 *t*-Boc 取代毒品前体的 ESI-CID 质谱图

Fig. 5 Mass spectra of four *t*-Boc substituted drug precursors under ESI-CID mode

表1 ESI-CID 模式下,4种 *t*-Boc 取代毒品前体的主要碎片离子Table 1 Main product ions of four *t*-Boc substituted drug precursors under ESI-CID mode

化合物 Compound	保留时间 t_R/min	离子 Ion	化学式 Chemical formula	理论值 Theoretical mass (m/z)	实测值 Experimental mass (m/z)	误差 Error/ $\times 10^{-6}$
<i>t</i> -Boc-4-AP	11.06	$[\text{M}+\text{H}]^+$	$\text{C}_{16}\text{H}_{25}\text{N}_2\text{O}_2^+$	277.1911	277.1907	-1.44
		A	$\text{C}_{12}\text{H}_{17}\text{N}_2\text{O}_2^+$	221.1285	221.1282	-1.36
		B	$\text{C}_6\text{H}_8\text{N}^+$	94.0651	94.0653	2.13
		C	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{NO}_2^+$	128.0706	128.0707	0.78
		D	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}^+$	84.0808	84.0810	2.38
		E	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}^+$	56.0495	56.0497	3.57
<i>t</i> -Boc-4F-AP	11.53	$[\text{M}+\text{H}]^+$	$\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{FN}_2\text{O}_2^+$	295.1816	295.1815	-0.34
		A	$\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{FN}_2\text{O}_2^+$	239.1190	239.1198	3.35
		B	$\text{C}_6\text{H}_7\text{FN}^+$	112.0557	112.0556	-0.89
		C	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{NO}_2^+$	128.0706	128.0707	0.78
		D	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}^+$	84.0808	84.0807	-1.19
		E	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}^+$	56.0495	56.0493	-3.57
<i>t</i> -Boc-4Br-AP	14.89	$[\text{M}+\text{H}]^+$	$\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{BrN}_2\text{O}_2^+$	355.1016	355.1010	-1.69
		A	$\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{BrN}_2\text{O}_2^+$	299.0390	299.0389	-0.33
		B	$\text{C}_6\text{H}_7\text{BrN}^+$	171.9756	171.9755	-0.58
		C	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{NO}_2^+$	128.0706	128.0712	4.68
		D	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{N}^+$	84.0808	84.0811	3.57
		E	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}^+$	56.0495	56.0496	1.78
<i>t</i> -Boc-norketamine	14.42	$[\text{M}+\text{H}]^+$	$\text{C}_{17}\text{H}_{23}\text{ClNO}_3^+$	324.1361	324.1358	-0.92
		A'	$\text{C}_{13}\text{H}_{15}\text{ClNO}_3^+$	268.0735	268.0734	-0.37
		B'	$\text{C}_{12}\text{H}_{15}\text{ClNO}^+$	224.0837	224.0836	-0.45
		C'	$\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{ClO}^+$	207.0571	207.0570	-0.48
		D'	$\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}^+$	179.0622	179.0619	-1.68
		E'	$\text{C}_7\text{H}_6\text{Cl}^+$	125.0153	125.0150	-2.40

图6 ESI-CID 模式下 *t*-Boc 取代毒品前体可能的裂解途径Fig. 6 Proposed fragmentation pathways of *t*-Boc substituted drug precursors under ESI-CID mode

3 结论

本研究采用 GC-MS 和 UPLC-QTOF MS 分析了 4 种 *t*-Boc 取代毒品前体,研究了这些物质在 EI 和 ESI-CID 模式下的质谱特征,并推测各碎片离子可能的裂解途径。*t*-Boc 取代毒品前体在 EI 模式下的质谱特征是生成叔丁基离子($C_4H_9^+$)和碎片离子 $[M-C_4H_8]^+$ 、 $[M-C_4H_8O]^+$ 、 $[M-C_5H_8O_2]^+$;在 ESI-CID 模式下的质谱特征是生成丢失 C_4H_8 和进一步丢失 CO_2 的碎片离子。本研究可为毒品和新精神活性物质前体的检验鉴定和监测预警相关工作提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] SUGIE K I, KURAKAMI D, AKUTSU M, SAITO K. Rapid detection of *tert*-butoxycarbonyl-methamphetamine by direct analysis in real time time-of-flight mass-spectrometry[J]. *Forensic Toxicology*, 2018, 36(2): 261-269.
- [2] SEGAWA H, OKADA Y, YAMAMURO T, KUWAYAMA K, TSUJIKAWA K, KANAMORI T, IWATA Y T. Changes in methamphetamine impurity profiles induced by *tert*-butoxycarbonylation[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2023, 68(6): 1 913-1 922.
- [3] COLLINS M, DONNELLY C, CAMERON S, TAH-TOUH M, SALOUROS H. Identification and characterization of *N-tert*-butoxycarbonyl-MDMA: a new MDMA precursor[J]. *Drug Testing and Analysis*, 2017, 9(3): 399-404.
- [4] MAY C, DOWNEY C, POWER J D, KAVANAGH P V. An unusual detection of *tert*-butyl-4-anilinopiperidine-1-carboxylate in seizures of falsified 'Xanax' tablets and in items in a suspected heroin seizure submitted by Irish law enforcement[J]. *Drug Testing and Analysis*, 2020, 12(9): 1 387-1 392.
- [5] TOSKE S G, MITCHELL J R, MYSLINSKI J M, WALZ A J, GUTHRIE D B, GUEST E M, CORBETT C A, LOCKHART E D. Organic impurity profiling of fentanyl samples associated with recent clandestine laboratory methods[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2023, 68(5): 1 470-1 483.
- [6] PALANI A, SHAPIRO S, McBRIAR M D, CLADER J W, GREENLEE W J, SPAR B, KOWALSKI T J, FARLEY C, COOK J, van HECK M, WEIG B, O'NEILL K, GRAZIANO M, HAWES B. Biaryl ureas as potent and orally efficacious melanin concentrating hormone receptor 1 antagonists for the treatment of obesity[J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2005, 48(15): 4 746-4 749.
- [7] Y·兰伯蒂, C·吉尼科特. 4-氨基哌啶衍生物, 它们的制备方法和它们作为药物的用途: CN1688307A[P]. 2005-10-26.
- [8] CAIGER L, ZHAO H, CONSTANTIN T, DOUGLAS J J, LEONORI D. The merger of aryl radical-mediated halogen-atom transfer (XAT) and copper catalysis for the modular cross-coupling-type functionalization of alkyl iodides[J]. *ACS Catalysis*, 2023, 13(7): 4 985-4 991.
- [9] 刘翠梅, 花镇东, 黄钰, 胡文, 赵霞, 贾薇. 氯胺酮结构类似物的质谱特征研究[J]. *质谱学报*, 2023, 44(4): 508-518.
LIU Cuimei, HUA Zhendong, HUANG Yu, HU Wen, ZHAO Xia, JIA Wei. Mass fragmentation characteristics of ketamine analogues[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(4): 508-518(in Chinese).
- [10] 钱振华, 李彭, 郑琿, 刘翠梅. 芬太尼类新精神活性物质的质谱特征研究[J]. *质谱学报*, 2018, 39(5): 583-592.
QIAN Zhenhua, LI Peng, ZHENG Hui, LIU Cuimei. Mass fragmentation characteristics of fentanyl analogues[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2018, 39(5): 583-592(in Chinese).

(收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-05-09)