

· 论 著 ·

污水中甲基苯丙胺干扰物 *N*-甲基-2-苯基丙胺的结构解析张婷婷¹, 黄钰¹, 张学军², 陈捷¹, 花镇东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. 江西省公安厅禁毒总队, 江西 南昌 330038

摘要: 目的 解析污水样品中影响甲基苯丙胺分析结果的干扰物的化学结构。方法 综合利用 GC-MS、液相色谱-四极杆飞行时间质谱(liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry, LC-QTOF-MS)对影响甲基苯丙胺分析结果的干扰物的质谱特征进行分析, 推测其可能的结构, 再使用液相色谱-三重四极杆质谱(liquid chromatography-triple quadrupole-mass spectrometry, LC-TQ-MS)进行对照品确证。结果 使用 LC-QTOF-MS 在电喷雾离子源正离子(positive electrospray ionization, ESI⁺)模式下分析, 干扰物 MS¹ 质谱的准分子离子质荷比与甲基苯丙胺完全一致, 说明干扰物可能为甲基苯丙胺的同分异构体。不同碰撞能量(15 V、30 V 和 45 V)下得到的 MS² 质谱图也与甲基苯丙胺高度相似, 推测干扰物中含有甲氨基和苄基。进一步使用 GC-MS 在电子轰击(electron impact, EI)电离模式下分析, 干扰物质谱基峰的质荷比为 44。经对照品添加分析, 最终确认干扰物为 *N*-甲基-2-苯基丙胺。结论 *N*-甲基-2-苯基丙胺的化学结构与甲基苯丙胺相似, 在使用 LC-TQ-MS 对污水中痕量甲基苯丙胺进行检测时易产生干扰, 实际分析中可借助色谱的保留时间进行区分。

关键词: 法医学; 毒物分析; 甲基苯丙胺; 污水分析; 质谱; 干扰物; *N*-甲基-2-苯基丙胺

中图分类号: DF795.1 文献标志码: A doi: 10.12116/j.issn.1004-5619.2022.320102

文章编号: 1004-5619(2022)06-0726-07

Structure Analysis of the Interfering Substance *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine of Methamphetamine in WastewaterZHANG Ting-ting¹, HUANG Yu¹, ZHANG Xue-jun², CHEN Jie¹, HUA Zhen-dong¹

1. Key Laboratory of Drug Monitoring and Control, Drug Intelligence and Forensic Center, Ministry of Public Security, Beijing 100193, China; 2. Anti-drug Corps of Jiangxi Provincial Public Security Department, Nanchang 330038, China

Abstract: **Objective** To analyze the chemical structure of the interfering substance that affects the result of methamphetamine analysis in wastewater. **Methods** A combination of GC-MS and liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry (LC-QTOF-MS) was used to analyze the mass spectrum characteristics of the interfering substance that affects the result of methamphetamine analysis and to infer its possible structure. Liquid chromatography-triple quadrupole-mass spectrometry (LC-TQ-MS) was used to confirm the control material. **Results** Using LC-QTOF-MS in positive electrospray ionization (ESI⁺) mode, the mass-to-charge ratio (m/z) of quasi-molecular ion in the MS¹ mass spectrometry of interfering substance was identical to that of methamphetamine, indicating that the interfering substance was probably an isomer of methamphetamine. The MS² mass spectra obtained at three collision energies of 15 V, 30 V and 45 V were highly similar to methamphetamine, suggesting that the interfering substance contained methylamino and benzyl groups. Further analysis using GC-MS in electron impact (EI) ionization mode showed that the base peak in the mass spectrum of the interfering substance was at m/z 44. The interfering substance was confirmed to be *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine by compared with the standard reference. **Conclusion** The chemical structure of *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine is highly similar to methamphetamine, which is easy to cause interference for the detection of trace amounts of methamphetamine in wastewater using LC-TQ-MS. Therefore, in the actual analysis, the chromatographic retention time can be used to distinguish between *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine and methamphetamine.

Keywords: forensic medicine; toxicological analysis; methamphetamine; wastewater analysis; mass spectrometry; interfering substance; *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine (phenpromethamine)

基金项目: 公安部技术研究计划项目(2019JSYJB06)

作者简介: 张婷婷(1981—), 女, 满族, 硕士, 副研究员, 主要从事毒品分析研究; E-mail: 42241536@qq.com

通信作者: 花镇东, 男, 博士, 副研究员, 主要从事毒品分析研究; E-mail: 28008085@qq.com

引用格式: 张婷婷, 黄钰, 张学军, 等. 污水中甲基苯丙胺干扰物 *N*-甲基-2-苯基丙胺的结构解析[J]. 法医学杂志, 2022, 38(6): 726-732.**To cite:** ZHANG T T, HUANG Y, ZHANG X J, et al. Structure analysis of the interfering substance *N*-methyl-2-phenylpropan-1-amine of methamphetamine in wastewater[J]. *Faxixue Zazhi*, 2022, 38(6): 726-732.

近年来,在毒品问题全球化的背景下,世界范围的毒品泛滥也对我国社会安全和公众健康构成重大威胁和严重影响,新型毒品加速变异,非法制贩和滥用形势日趋严峻,对毒品滥用进行有效的监测预警已成为禁毒工作中刻不容缓的关键问题。与传统的社会调查方法相比,污水流行病学方法监测毒品滥用具有客观、实时和简便等优点。欧洲^[1-3]、大洋洲^[4-5]、北美洲^[6-7]、亚洲^[8-9]的多个国家和地区已广泛采用污水流行病学方法监测甲基苯丙胺、苯丙胺、氯胺酮、可卡因、“摇头丸”和大麻等毒品的滥用。污水流行病学方法不仅用于计算毒品的消费量^[10],还被用于追踪毒品滥用随时间的变化情况^[11]、监测特定活动或节假日毒品滥用趋势变化^[12];不仅用于监测城市毒品滥用形势^[13],也被用于监测学校、监狱等小范围内特定人群毒品滥用情况^[14-15]。近年来,污水流行病学方法还被用于识别新精神活性物质^[16-17],逐渐发展成为监测毒品滥用的重要方法。

甲基苯丙胺是目前世界范围内滥用最严重的一种合成毒品,据国家禁毒委员会办公室统计^[18],甲基苯丙胺的吸食人数占现有吸毒人员的一半以上,因此,其是国内通过污水流行病学开展毒情监测时的重点关注品种,其消费量一般通过污水中甲基苯丙胺原体的浓度结合人口数量、排泄率、污水流量等参数进行测算^[19]。甲基苯丙胺的化学结构简单,分子量较小,易受到结构类似物的干扰,本课题组在利用液相色谱-三重四极杆质谱(liquid chromatography-triple quadrupole-mass spectrometry, LC-TQ-MS)对我国主要城市生活污水进行检测时,发现一份样品疑似含有高浓度甲基苯丙胺,故使用GC-MS和液相色谱-四极杆飞行时间质谱(liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry, LC-QTOF-MS)对其结构进行解析。

1 材料与方法

1.1 样品

400份污水样品均来自2020年国家禁毒委员会办公室开展的全国城市污水监测项目所收集的某市污水处理厂样品。

1.2 主要仪器与试剂

Triple Quad™ 6500系统、TripleTOF™ 5600+系统购自美国Sciex公司,ACQUITY UPLC系统、ACQUITY UPLC I-Class系统、Oasis® PRiME MCX 3cc固相萃取柱(60 mg)购自美国Waters公司,GCMS-QP2010 Ultra气质联用仪购自日本岛津公司,全自动固相萃取仪SPE 432购自北京普立泰科仪器有限公司,真空

离心浓缩仪CV200购自北京吉艾姆科技有限公司, Milli-Q® Advantage A10超纯水系统购自德国Merck公司。

甲基苯丙胺、甲基苯丙胺-*d*₅、*N*-甲基-2-苯基丙胺和*N*-甲基-3-苯基丙胺标准品均由公安部第三研究所提供;甲醇和乙腈均为色谱纯,购自德国Merck公司;氨水(HPLC级,含量大于25%)购自上海安谱实验科技股份有限公司。

1.3 仪器条件

1.3.1 LC-TQ-MS分析条件

色谱柱为ACQUITY UPLC BEH C₁₈色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm;美国Waters公司);流动相A为0.1%甲酸水溶液,流动相B为0.1%甲酸乙腈溶液;洗脱梯度程序:0.0~9.2 min(5%B~100%B), 9.2~11.0 min(100%B), 11.0~11.2 min(100%B~5%B), 11.2~14.0 min(5%B);流速0.4 mL/min;柱温40℃;进样量5 μL;电喷雾离子源正离子(positive electrospray ionization, ESI⁺)模式;离子源温度550℃;电喷雾电压3 000 V;雾化气压强50 psi,辅助加热气压强50 psi,帘气压强35 psi;碰撞气为氮气;采集模式为多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM),甲基苯丙胺定性离子对为150.1/119.1(碰撞能量16 eV)和150.1/91.1(碰撞能量27 eV),甲基苯丙胺-*d*₅定性离子对为155.2/121.1(碰撞能量16 eV)和155.2/92.1(碰撞能量27 eV)。

1.3.2 LC-QTOF-MS分析条件

色谱条件同1.3.1节;ESI⁺模式;离子源温度600℃;电喷雾电压5 500 V;雾化气压强50 psi,辅助加热气压强50 psi,帘气压强30 psi;碰撞气为氮气;MS¹全扫描模式采集范围为 m/z 50~1 000;MS²子离子扫描模式采集范围为 m/z 50~1 000,母离子 m/z 为150.1,碰撞能量分别设置为15 V、30 V和45 V。

1.3.3 GC-MS分析条件

色谱柱为DB-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm;美国Agilent公司);柱温90℃,保持1.5 min后以10℃/min升至320℃并保持2 min;载气为氮气,流速1 mL/min;1 μL分流进样,分流比40:1;进样口温度280℃;电子轰击(electron impact, EI)离子源,离子源温度230℃,扫描范围为 m/z 35~500。

1.4 样品处理

1.4.1 直接过滤法

将污水样品混匀后用浓盐酸调节pH至1~2,玻璃纤维滤膜过滤,移取滤液50 mL于具塞离心管中,加入25 ng/mL甲基苯丙胺-*d*₅工作溶液(由甲基苯丙胺-*d*₅用甲醇配制而成)10 μL,混匀,过滤后供仪器检测。

1.4.2 固相萃取法

将污水样品混匀后用浓盐酸调节 pH 至 1~2, 玻璃纤维滤膜过滤, 移取滤液 500 mL 于具塞离心管中, 加入 25 ng/mL 甲基苯丙胺- d_5 工作溶液 100 μ L, 混匀, 转移至固相萃取柱中, 甲醇 4 mL 淋洗, 真空抽固相萃取柱至干燥后用含 5% 氨水的甲醇溶液 ($V_{\text{氨水}}:V_{\text{甲醇}}=5:95$) 4 mL 洗脱, 洗脱液使用真空离心浓缩仪于 45 $^{\circ}\text{C}$ 浓缩至近干, 加入 250 μ L 甲醇复溶, 过滤后供仪器检测。

2 结果与讨论

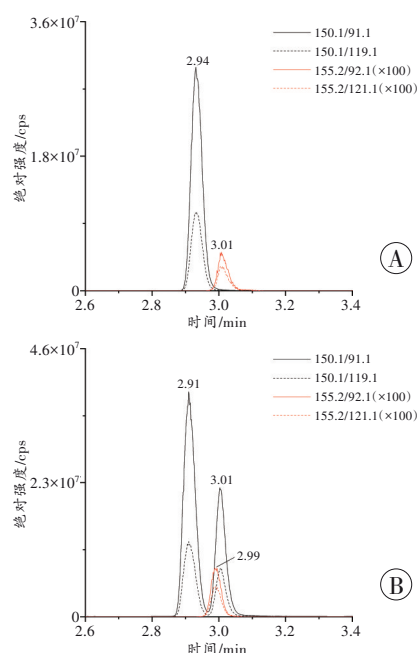
2.1 污水中甲基苯丙胺干扰物的发现

2020 年全国城市污水监测工作中, 某市收集的一份污水样品疑似含有高浓度甲基苯丙胺, 将该样品用直接过滤法进样, 使用 LC-TQ-MS 在 MRM 模式下分析得到的色谱图如图 1A 所示, 150.1/119.1 和 150.1/91.1 两个离子对通道在 2.94 min 均出现色谱峰, 与甲基苯丙胺标准品保留时间 3.01 min 的相对偏差为 -2.3%, 且 150.1/119.1 通道与 150.1/91.1 通道峰面积比为 36.0%, 与甲基苯丙胺标准品两个通道峰面积比 37.6% 的相对偏差为 -4.3%, 均符合阳性认定标准^[20], 但以甲基苯丙胺- d_5 作为内标校正得到的质量浓度为 20 027 ng/L, 远超污水中甲基苯丙胺的常见浓度范围^[9], 该情况仅有大量毒品直接倾倒入排污系统时才会出现。为进一步确认, 向该样品中添加了 10 000 ng/L 甲基苯丙胺并重新进行分析, 得到的色谱图如图 1B 所示。由图可见, 150.1/119.1 和 150.1/91.1 两个离子对通道在 2.91 min 和 3.01 min 均出现了色谱峰, 其中后者的保留时间与甲基苯丙胺标准品的保留时间相同, 校正浓度值也与甲基苯丙胺添加量一致, 说明该色谱峰为甲基苯丙胺, 而前者的保留时间与未添加甲基苯丙胺时样品中出现的色谱峰一致, 且与甲基苯丙胺的色谱峰能基线分离, 说明该物质并非甲基苯丙胺, 而是化学结构与甲基苯丙胺高度类似的干扰物, 如果未进行确认就直接按甲基苯丙胺报告, 将严重高估污水来源城市的毒情, 从而误导该地的禁毒侦查打击方向。

2.2 干扰物的 LC-QTOF-MS 分析

为确认干扰物的化学结构, 使用 LC-QTOF-MS 在与 LC-TQ-MS 相同的色谱分离条件下对添加了甲基苯丙胺的污水样品进行分析, 同时采集 MS¹ 全扫描质谱和 m/z 为 150.1 的母离子在 15 V、30 V 和 45 V 3 个碰撞能量下的碰撞诱导解离 (collision induced dissociation, CID) MS² 质谱。MS¹ 质谱显示, 干扰物与甲基苯丙胺准分子离子的质荷比一致, 说明其分子式同样为 $\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{N}$ 。MS² 质谱 (图 2) 显示, 干扰物与甲基苯丙胺在 3 个碰撞能量下得到的碎片离子质荷比及

丰度比均高度一致, 证明两者的化学结构十分相似。当碰撞能量为 15 V 时, 两者的主要碎片离子为 $\text{C}_9\text{H}_{11}^+$ (m/z 119.083 8) 和 C_7H_7^+ (m/z 91.053 4)。前者与母离子 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}^+$ (m/z 150.127 0) 相比丢失 CH_3N , 考虑到 CID 模式下 C—N 键易发生断裂, 推测干扰物中存在与碳链相连的甲氨基; 后者为环庚三烯正离子, 推测干扰物中存在苄基。当碰撞能量 ≥ 30 V 时, 新出现的 C_6H_5^+ (m/z 77.038 6)、 C_3H_5^+ (m/z 65.037 8)、 C_4H_3^+ (m/z 51.022 9) 等碎片离子均为 C_7H_7^+ 进一步碎裂的产物。综合以上分析, 推测干扰物含有甲氨基和苄基且分子式为 $\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{N}$, 但满足以上条件的物质仍存在多种可能。



A: 未添加 10 000 ng/L 甲基苯丙胺; B: 添加 10 000 ng/L 甲基苯丙胺。

图 1 污水样品的 LC-TQ-MS 色谱图

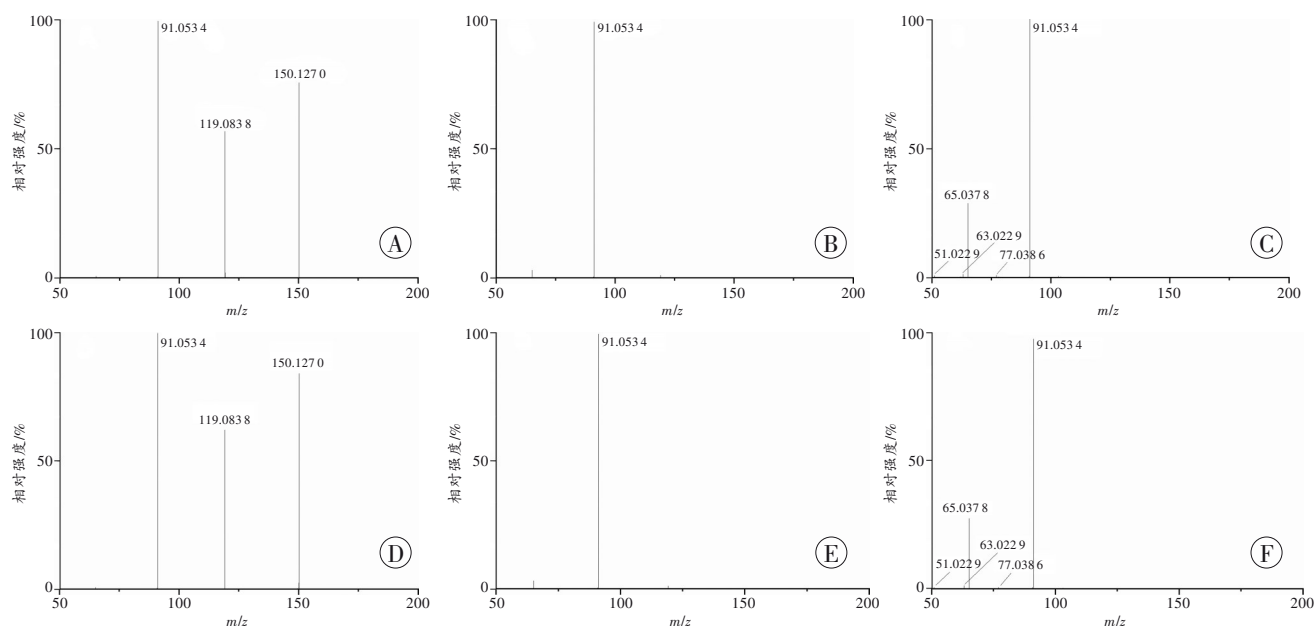
Fig. 1 LC-TQ-MS chromatograms of the wastewater sample

2.3 干扰物的 GC-MS 分析

为缩小筛选范围, 继续使用 GC-MS 对干扰物进行分析。鉴于 GC-MS 的灵敏度相对较低, 首先在强阳离子交换模式下对 500 mL 添加了甲基苯丙胺的污水样品进行固相萃取, 洗脱液吹干后加入 250 μ L 甲醇复溶, 进样分析, 但得到的总离子流图中仍未见到明显的色谱峰。根据前述 LC-QTOF-MS 分析结果, 干扰物中应含有和碳链相连的甲氨基, 该类物质在 EI 电离模式下氨基 C_α — C_β 键发生 α 断裂得到的碎片离子具有较高强度, 一般是质谱图中的基峰。由于干扰物中存在苄基, 该碎片离子仅有 m/z 44、58 和 72 3 种可能, 这 3 个质荷比的提取离子色谱图 (extracted ion chromatogram, XIC) 如图 3 所示。 m/z 72 的 XIC 图中未见明显色谱峰; m/z 58 的 XIC 图中在 5.55 min 存

在一个色谱峰,经比对,与甲基苯丙胺的保留时间和质谱特征一致,确认为样品中添加甲基苯丙胺的谱峰; m/z 44的XIC图中在5.63 min存在一个色谱峰,保留时间与甲基苯丙胺接近,推测为干扰物的谱峰。

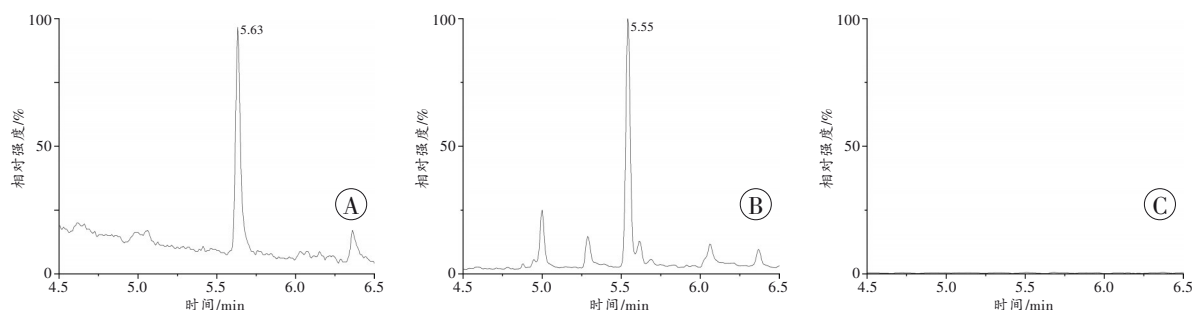
由于仅当甲氨基与仲碳相连时,甲氨基 $C_{\alpha}-C_{\beta}$ 键发生 α 断裂后才能形成 m/z 44的碎片离子,因此推测干扰物可能为 N -甲基-2-苯基丙胺或 N -甲基-3-苯基丙胺,两者的化学结构如图4所示。



A、B、C:干扰物的 MS^2 谱图;D、E、F:甲基苯丙胺的 MS^2 谱图。A、D的碰撞能量为15 V, B、E的碰撞能量为30 V, C、F的碰撞能量为45 V。

图2 干扰物与甲基苯丙胺在不同碰撞能量下的 MS^2 谱图

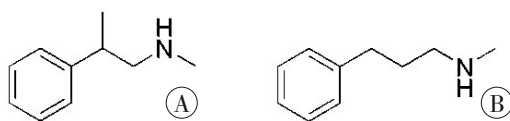
Fig. 2 MS^2 spectra of interfering substance and methamphetamine under different collision energies



A: m/z 44; B: m/z 58; C: m/z 72。

图3 样品的GC-MS提取离子流色谱图

Fig. 3 Extracted ion chromatograms of the sample obtained by GC-MS



A: N -甲基-2-苯基丙胺; B: N -甲基-3-苯基丙胺。

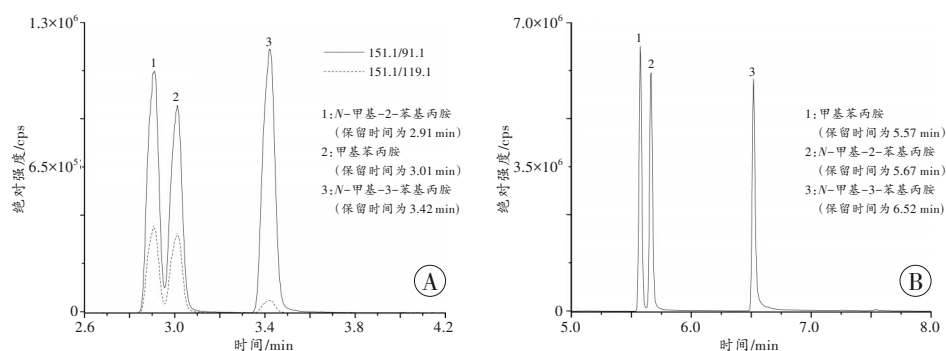
图4 两个疑似物质的化学结构

Fig. 4 Chemical structures of two suspected substances

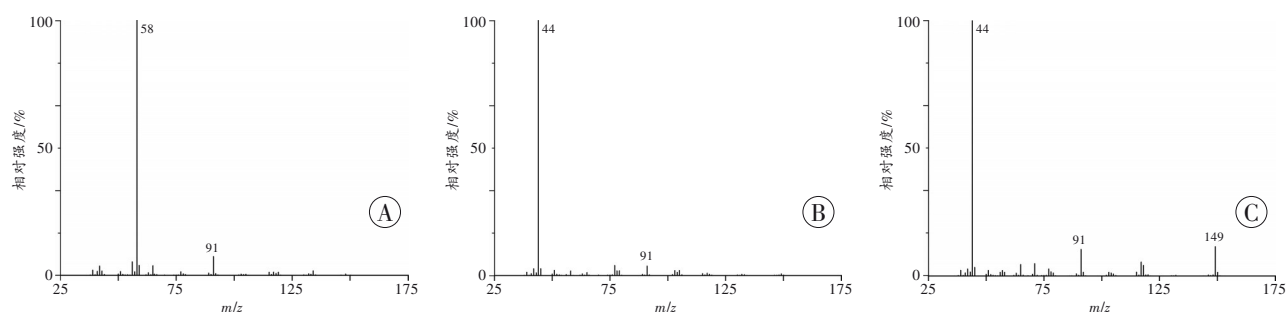
2.4 干扰物的确证

根据前述分析结果,配制质量浓度为10 ng/mL和1 mg/mL的 N -甲基-2-苯基丙胺、 N -甲基-3-苯基丙胺和甲基苯丙胺3种物质的混合标准物质溶液,分别使用LC-TQ-MS和GC-MS进行确证,结果如图5~6所示。 N -甲基-2-苯基丙胺在两种分析方法中的保留

时间和质谱特征均与干扰物一致,而 N -甲基-3-苯基丙胺在LC-TQ-MS分析中,150.1/119.1和150.1/91.1两个离子对通道峰面积比与干扰物有较大差异,且LC-TQ-MS和GC-MS分析的保留时间与干扰物的相对偏差达17.5%和15.0%。进一步在污水样品中添加 N -甲基-2-苯基丙胺后进行LC-TQ-MS分析,比较添加前后的干扰物色谱峰仅有峰面积增大,离子对峰面积比、保留时间和峰形均无变化,说明两者为同一物质,由此最终确认污水样品中出现的干扰物为 N -甲基-2-苯基丙胺。 N -甲基-2-苯基丙胺、 N -甲基-3-苯基丙胺和甲基苯丙胺在EI电离模式和ESI-CID模式下的质谱裂解途径见图7。



A:LC-TQ-MS MRM 色谱图(10 ng/mL);B:GC-MS 总离子流色谱图(1 mg/mL)。
图 5 3 种混合标准物质的 LC-TQ-MS MRM 色谱图和 GC-MS 总离子流色谱图
Fig. 5 MRM chromatogram obtained by LC-TQ-MS and total ion chromatogram obtained by GC-MS of three mixed reference materials



A: 甲基苯丙胺;B:*N*-甲基-2-苯基丙胺;C:*N*-甲基-3-苯基丙胺。
图 6 3 种混合标准物质(1 mg/mL)的 GC-MS EI 质谱图
Fig. 6 EI mass spectra of three mixed reference materials (1 mg/mL) obtained by GC-MS

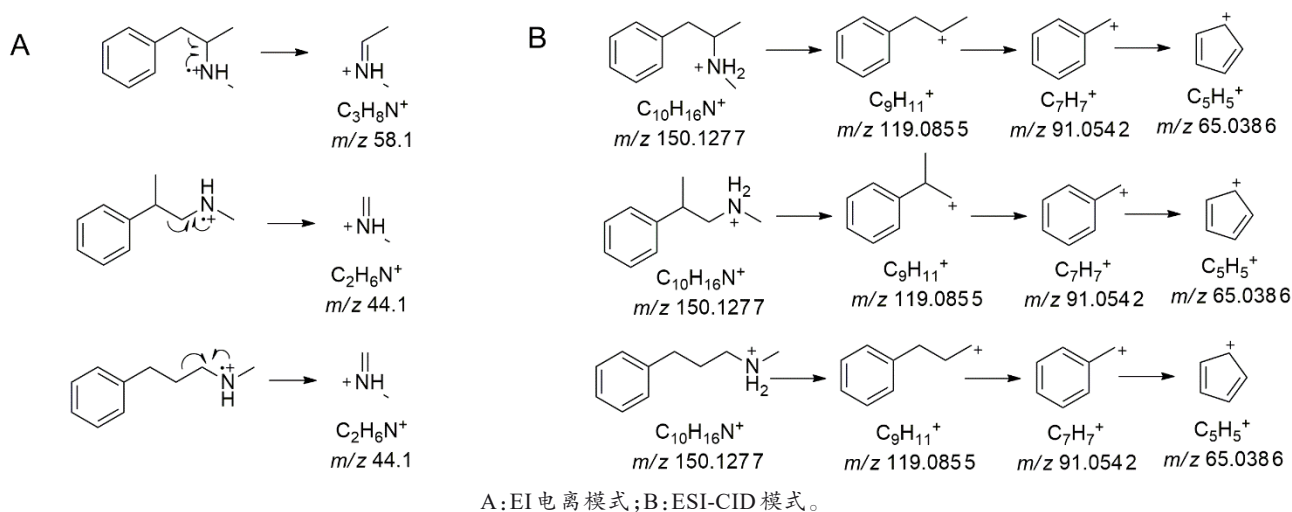


图 7 EI 电离模式和 ESI-CID 模式下 3 种混合标准物质可能的裂解途径

Fig. 7 Proposed fragmentation pathways of three mixed reference materials in EI ionization mode and ESI-CID mode

N-甲基-2-苯基丙胺又名苯丙甲胺, 英文名为 phenpromethamine, CAS 号为 93-88-9。该物质虽然不属于我国管制的麻醉药品或精神药品, 但已被世界反兴奋剂机构列为禁用兴奋剂, 属于刺激剂品种。据报道^[21], 该物质曾在 20 世纪 40 至 50 年代用于治疗哮喘, 目前未作为药物使用, 但近期美国研究机构发现市场上销售的一些减肥或运动膳食补充剂中含有该物质。本次在城市生活污水监测工作中发现该物质,

推测是污水来源区域内存在生产该物质或利用该物质配制其他产品的情况。

2.5 污水分析中甲基苯丙胺定性标准的探讨

LC-MS 分析是目前对污水中痕量目标物进行定性定量分析的主流方法, 国家毒品实验室既往已利用该检测方法对采自全国 367 个城市的 8 000 余份污水样品进行了分析, 其中 2020 年污水样品中甲基苯丙胺含量平均值为 12.72 ng/L, 远低于国外同期报道^[22]

的水平。本研究在污水中发现*N*-甲基-2-苯基丙胺的存在,该物质具有与甲基苯丙胺相同的分子式和类似的化学结构,色谱和质谱特征也高度相似,说明污水样品与常见的食品、药品及生物样品相比,其来源更为复杂,基质组成具有更大的不确定性,日常分析中发现异常结果时需要进行仔细确认并排除干扰,可通过色谱条件的优化改善甲基苯丙胺和干扰物的分离度。

本研究对某一批次连续检测的400份污水样品进行分析后发现,甲基苯丙胺的保留时间范围为2.98~3.18 min,同位素内标甲基苯丙胺-*d*₅的保留时间范围为2.97~3.17 min。受污水复杂基质的影响,两者的保留时间均在一定范围内波动,但由于同一样品中两者受到的影响相同,在所有样品中甲基苯丙胺的保留时间均比甲基苯丙胺-*d*₅长0.01~0.03 min。因此,可以考虑将与甲基苯丙胺-*d*₅保留时间差值≤0.03 min作为污水分析中甲基苯丙胺色谱峰的识别标准,这样既可精准排除*N*-甲基-2-苯基丙胺的干扰,也能更好地消除基质对保留时间的影响。

3 结 论

通过质谱解析和对照品确证,本研究最终确定该疑似含有高浓度甲基苯丙胺的污水样品中实际存在的物质为*N*-甲基-2-苯基丙胺,该物质为甲基苯丙胺的同分异构体,由于保留时间和质谱碎片离子均与甲基苯丙胺高度类似,在污水分析中极易对后者产生干扰,从而导致错误的毒情监测结果。本研究发现,由于污水复杂基质的影响,LC-MS分析时甲基苯丙胺的保留时间常在一定范围内波动,但与同位素内标保留时间的差值基本稳定,以此作为甲基苯丙胺色谱峰的识别标准能更有效地排除干扰,该方法可供开展污水检测的法庭科学实验室参考。

参考文献:

- [1] ZUCCATO E, CHIABRANDO C, CASTIGLIONI S, et al. Cocaine in surface waters: A new evidence-based tool to monitor community drug abuse[J]. *Environ Health*, 2005, 4: 14. doi:10.1186/1476-069X-4-14.
- [2] THOMAS K V, BIJLSMA L, CASTIGLIONI S, et al. Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis[J]. *Sci Total Environ*, 2012, 432: 432-439. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.069.
- [3] VAN NUIJS A L N, MOUGEL J F, TARCOMNICU I, et al. A one year investigation of the occurrence of illicit drugs in wastewater from Brussels, Belgium[J]. *J Environ Monit*, 2011, 13 (4): 1008-1016. doi:10.1039/c0em00686f.
- [4] IRVINE R J, KOSTAKIS C, FELGATE P D, et al. Population drug use in Australia: A wastewater analysis[J]. *Forensic Sci Int*, 2011, 210 (1/2/3): 69-73. doi:10.1016/j.forsciint.2011.01.037.
- [5] BRUNO R, EDIRISINGHE M, HALL W, et al. Association between purity of drug seizures and illicit drug loads measured in wastewater in a South East Queensland catchment over a six year period[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 635: 779-783. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.192.
- [6] SKEES A J, FOPPE K S, LOGANATHAN B, et al. Contamination profiles, mass loadings, and sewage epidemiology of neuropsychiatric and illicit drugs in wastewater and river waters from a community in the Midwestern United States[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 631/632: 1457-1464. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.060.
- [7] YARGEAU V, TAYLOR B, LI H, et al. Analysis of drugs of abuse in wastewater from two Canadian cities[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 487: 722-730. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.11.094.
- [8] KIM K Y, LAI F Y, KIM H Y, et al. The first application of wastewater-based drug epidemiology in five South Korean cities[J]. *Sci Total Environ*, 2015, 524/525: 440-446. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.04.065.
- [9] DU P, LI K, LI J, et al. Methamphetamine and ketamine use in major Chinese cities, a nationwide reconnaissance through sewage-based epidemiology[J]. *Water Res*, 2015, 84: 76-84. doi:10.1016/j.watres.2015.07.025.
- [10] LAI F Y, O'BRIEN J, BRUNO R, et al. Spatial variations in the consumption of illicit stimulant drugs across Australia: A nationwide application of wastewater-based epidemiology[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 568: 810-818. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.207.
- [11] GUSHGARI A J, VENKATESAN A K, CHEN J, et al. Long-term tracking of opioid consumption in two United States cities using wastewater-based epidemiology approach[J]. *Water Res*, 2019, 161: 171-180. doi:10.1016/j.watres.2019.06.003.
- [12] LAI F Y, BRUNO R, HALL W, et al. Profiles of illicit drug use during annual key holiday and control periods in Australia: Wastewater analysis in an urban, a semi-rural and a vacation area[J]. *Addiction*, 2013, 108 (3): 556-565. doi:10.1111/add.12006.
- [13] CRUZ-CRUZ C, YARGEAU V, VIDANA-PEREZ D, et al. Opioids, stimulants, and depressant drugs in fifteen Mexican Cities: A wastewater-based epidemiological study[J]. *Int J Drug Policy*, 2021, 88: 103027. doi:10.1016/j.drugpo.2020.103027.
- [14] GUSHGARI A J, DRIVER E M, STEELE J C, et al. Tracking narcotics consumption at a South-

- western U.S. university campus by wastewater-based epidemiology[J]. *J Hazard Mater*, 2018, 359: 437-444. doi:10.1016/j.jhazmat.2018.07.073.
- [15] VAN DYKEN E, THAI P, LAI F Y, et al. Monitoring substance use in prisons: Assessing the potential value of wastewater analysis[J]. *Sci Justice*, 2014, 54(5):338-345. doi:10.1016/j.scijus.2014.06.006.
- [16] GENT L, PAUL R. The detection of new psychoactive substances in wastewater. A comprehensive review of analytical approaches and global trends[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 776: 146028. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146028.
- [17] 原帅, 骆如欣, 向平. 城市生活污水中新精神活性物质的监测研究进展[J]. *法医学杂志*, 2021, 37(4): 470-478. doi:10.12116/j.issn.1004-5619.2021.310601.
- YUAN S, LUO R X, XIANG P. Research advances in the monitoring of new psychoactive substances in municipal wastewater[J]. *Fayixue Zazhi*, 2021, 37(4): 470-478.
- [18] 国家禁毒委员会办公室. 2021年中国毒情形势报告[EB/OL]. (2022-06-24) [2022-08-14]. <https://www.mps.gov.cn/n2255079/n6865805/n7355741/n7355780/c8553877/content.html>.
- China National Narcotic Control Committee. Drug situation in China (2021)[EB/OL]. (2022-06-24) [2022-08-14]. <https://www.mps.gov.cn/n2255079/n6865805/n7355741/n7355780/c8553877/content.html>.
- [19] GRACIA-LOR E, ZUCCATO E, CASTIGLIONI S. Refining correction factors for back-calculation of illicit drug use[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 573: 1648-1659. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.179.
- [20] European Commission. Commission Decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results; 2002/657/EC[S]. *Official Journal of the European Communities*, 2002.
- [21] COHEN P A, TRAVIS J C, VANHEE C, et al. Nine prohibited stimulants found in sports and weight loss supplements: Deterenol, phenpromethamine (Vonedrine), oxilofrine, octodrine, beta-methylphenylethylamine (BMPEA), 1,3-dimethylamylamine (1,3-DMAA), 1,4-dimethylamylamine (1,4-DMAA), 1,3-dimethylbutylamine (1,3-DMBA) and higenamine[J]. *Clin Toxicol (Phila)*, 2021, 59(11): 975-981. doi:10.1080/15563650.2021.1894333.
- [22] BISHOP N, JONES-LEPP T, MARGETTS M, et al. Wastewater-based epidemiology pilot study to examine drug use in the Western United States[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 745: 140697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140697.

(收稿日期:2022-01-25)

(本文编辑:严慧)