DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260601006
引用格式: 陈贤驰, 黄景初, 陈悦铭, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定茶叶及茶制品中合成甜味剂[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 41–48.
Chen Xianchi, Huang Jingchu, Chen Yueming, et al. Simultaneous determination of synthetic sweeteners in tea and tea products by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 41–48. (in Chinese with English abstract).

超高效液相色谱-串联质谱法同时测定茶叶及茶制品中合成甜味剂

陈贤驰, 黄景初, 陈悦铭, 周庆琼, 曾豪威*
(广州市食品检验所, 广州 511400)

摘 要: 目的 建立 QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定茶叶及茶制品中 6 种合成甜味剂的分析方法。**方法** 样品经乙腈-水(8:2, *V*:*V*)提取, 无水硫酸镁和无水乙酸钠盐析脱水, 结合十八烷基硅烷吸附剂和 N-丙基乙二胺吸附剂分散固相萃取净化。以水-乙腈为流动相进行梯度洗脱, 进样流速 0.2 mL/min, 进样量 5 μL, Waters ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm)分离, 在电喷雾负离子多反应监测模式下测定, 外标法定量。**结果** 6 种合成甜味剂在 2~1000 μg/kg 质量浓度范围内线性关系良好(r>0.99), 检出限为 5~25 μg/kg, 定量限为 15~75 μg/kg。在 100、500、2500 μg/kg 3 个加标水平下, 平均回收率为 88.34%~103.21%, 相对标准偏差为 0.56%~7.63%。**结论** 该方法操作简便、快速、灵敏度高、准确可靠, 适用于茶叶及茶制品中多种合成甜味剂的同时快速检测。

关键词: 茶叶; 茶制品; 合成甜味剂; 超高效液相色谱-串联质谱法
中图分类号: TS202.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0041–08

Simultaneous determination of synthetic sweeteners in tea and tea products by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

CHEN Xian-Chi, HUANG Jing-Chu, CHEN Yue-Ming, ZHOU Qing-Qiong, ZENG Hao-Wei*
(*Guangzhou Institute for Food Inspection*, *Guangzhou* 511400, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for simultaneous determination of 6 kinds of synthetic sweeteners in tea and tea products by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. **Methods** Samples were extracted with acetonitrile-water (8:2, *V*:*V*), salted out with anhydrous magnesium sulfate and sodium acetate, and purified via dispersive solid-phase extraction using octadecylsilane adsorbent and N-propylethylenediamine adsorbent sorbents. Chromatographic separation was performed on a Waters ACQUITY UPLC HSS T3 column (100 mm

收稿日期: 2026-06-01
基金项目: 广州市市场监督管理局科技项目(2023KJ39, 2024KJ43)
第一作者: 陈贤驰(1991—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 561537935@qq.com
***通信作者:** 曾豪威(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量安全。E-mail: 445076602@qq.com

×2.1 mm, 1.8 μm) using gradient elution with a water-acetonitrile mobile phase at a flow rate of 0.2 mL/min and an injection volume of 5 μL. The analytes were detected in electrospray negative-ion multiple reaction monitoring mode and quantified by external standard method. **Results** The linear relationship of the 6 kinds of synthetic sweeteners was good within the mass concentration range of 2–1000 μg/kg (r>0.99). The limits of detection were 5–25 μg/kg and the limits of quantitation were 15–75 μg/kg. The average recoveries at 100, 500, 2500 μg/kg spiked levels ranged from 88.34%–103.21%, with relative standard deviations of 0.56%–7.63%. **Conclusion** The proposed method is simple, rapid, sensitive, accurate and reliable, making it well suited for the simultaneous rapid detection of various synthetic sweeteners in tea and tea products.

KEY WORDS: tea; tea products; synthetic sweeteners; ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

0 引 言

茶是我国传统饮品，富含茶多酚、氨基酸等活性成分，具有多种健康功效。茶制品(包括调味茶和代用茶)是指以茶叶为原料，配以可食用物质或食品用香料等制成的调味茶类，以及选用可食用植物的叶、花、果(实)、根茎等为原料加工制作、采用类似茶叶冲泡方式供人们饮用的产品[1–2]。甜味剂作为食品添加剂，可以改善食品口感与风味，在食品领域中应用广泛[3–4]。根据 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》，茶叶及茶制品仅允许使用甜菊糖苷等天然甜味剂，合成甜味剂不在允许使用范围内。然而，部分商家为改善产品口感、降低成本或提高市场价值，在茶叶及茶制品中非法添加人工合成甜味剂[5]。研究显示，超量摄入合成甜味剂易导致体重增加、代谢紊乱等健康问题[6–11]，还可能引起过敏反应、认知障碍甚至潜在的致癌风险等[12–16]。因此，建立茶叶及茶制品中多种合成甜味剂的高效检测方法，对于保障食品安全和消费者健康具有重要意义。

目前，甜味剂检测方法主要采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)[17–20]、气相色谱法(gas chromatography, GC)[21–22]、气相色谱-串联质谱法(gas chromatography tandem-mass spectrometry, GC-MS/MS)[23]和液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography tandem-mass spectrometry, LC-MS/MS)[24–29]，HPLC 受限于灵敏度，且多数合成甜味剂无紫外吸收或吸收较弱，检测效果不佳。GC 及 GC-MS/MS 适合挥发性化合物的检测，而甜味剂沸点较高。现行国家标准如 GB 22255—2014《食品安全国家标准 食品中三氯蔗糖(蔗糖素)的测定》、GB 5009.247—2016《食品安全国家标准 食品中纽甜的测定》、GB 5009.263—2016《食品安全国家标准 食品中阿斯巴甜和阿力甜的测定》等，均局限于单一甜味剂的测定，需分别进行前处理并采用不同设备检测，效率低下。因此，为准确监测茶叶及茶制品中多种合成甜味剂使用情况，建立一种灵敏、准确、多组分同时检测的分析方法至关重要。LC-MS/MS 凭借其高分离效率、高灵敏度和多残留同时分析能力，成为当前主流的检测技术[30–32]。但茶叶及茶制品基质复杂，富含多酚、色素、咖啡因等成分，易产生基质效应，影响检测结果准确性和灵敏度。现有方法多采用固相萃取(solid-phase extraction, SPE)净化[33–34]，操作烦琐、耗时长。QuEChERS 具有快速、简便、高效、成本低等优点，在茶叶农药残留及食品添加剂检测中已有应用[35–37]。但在茶叶及茶制品中多种合成甜味剂的同时检测方面，鲜见系统研究报道。因此，本研究基于 QuEChERS 前处理技术，建立超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)同时测定茶叶及茶制品中 6 种合成甜味剂的分析方法，以期为茶叶及茶制品质量安全监管提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶叶(绿茶、红茶、黑茶、乌龙茶、白茶、黄茶)及茶制品(调味茶、代用茶)，购自电商平台、线下商店及农贸市场。

甲醇、乙腈、甲酸铵(色谱纯，美国 Thermo Fisher Scientific 公司)；糖精钠(质量浓度 1000 mg/L，中国计量科学研究院)；甜蜜素(质量浓度 10 mg/mL，北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司)；安赛蜜、阿斯巴甜、阿力甜、纽甜(质量浓度 1000 mg/L)、N-丙基乙二胺吸附剂(ethylenediamine-N-propyl, PSA)、十八烷基硅烷吸附剂(octadecylsilane adsorbent, C_{18})、石墨化炭黑(graphitized carbon black, GCB)(粒径 40~60 μm)、甲酸(质谱纯)、无水硫酸镁($MgSO_4$，纯度≥98.0%)(上海安谱实验科技股份有限公司)；无水乙酸钠(NaOAc，分析纯)(广州化学试剂厂)。

1.2 仪器与设备

XEVO TQ-XS 超高效液相色谱-串联质谱仪、ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)、ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm)(美国 Waters 公司)；Tube MILL control 研磨机[艾卡(广州)公

司]; MS204TS/02 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司); Milli-Q 超纯水仪(美国 Millipore 公司); MS3 control 涡旋混匀器(德国 Ika 公司); Allegra X-30R 高速冷冻离心机(美国 Beckman Coulter 公司); 2600TH 超声波清洗机(上海安谱科学仪器有限公司); 0.22 μm 有机滤膜(天津津腾实验公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　溶液配制

吸取适量各标准储备液, 用体积分数为 50%甲醇水稀释成 10 μg/mL 的混合标准中间溶液, 再吸取一定量的混合标准中间溶液, 用水配制成 2、5、10、20、50、100、200、500、1000 μg/L 混合标准系列工作溶液。

1.3.2　样品前处理

称取粉碎后的茶叶及茶制品样品 2.0 g(精确至 0.01 g)于 50 mL 离心管中, 加入乙腈-水(8:2, *V*:*V*), 涡旋混合 1 min, 超声提取 15 min。加入 4 g $MgSO_4$ 和 1 g NaOAc, 立即涡旋混匀 1 min, 以 8000 r/min 离心 5 min。取 2 mL 上清液于预先装有 C_{18} 和 PSA 各 50 mg 的 15 mL 离心管中, 涡旋混合 1 min, 以 8000 r/min 离心 5 min。取上清液过 0.22 μm 有机滤膜, 供 UPLC-MS/MS 测定。

1.3.3　仪器条件

(1)色谱条件

色谱柱: Waters ACQUITY UPLC HSS T3 (100 mm ×2.1 mm, 1.8 μm); 柱温: 40 ℃; 流速: 0.2 mL/min; 进样量: 5 μL。流动相: A 为水溶液, B 为乙腈; 梯度洗脱程序: 0~2.5 min, 10% B; 2.5~6.5 min, 10%~95% B; 6.5~9.5 min, 95% B; 9.5~9.6 min, 95%~10% B; 9.6~11.5 min, 10% B。

(2)质谱条件

离子源: 电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI), 负离子模式(ESI-); 多反应监测(multi-reaction monitoring, MRM)。扫描范围 *m*/*z* 为 50~1000; 离子源温度 150 ℃; 毛细管电压 2.0 kV; 脱溶剂气温度 350 ℃; 脱溶剂气流量 650 L/h; 锥孔气流量 150 L/h。6 种物质的特征离子、去簇电压和碰撞能量等参数见表 1。

1.4　数据处理

采用仪器配套软件 Waters Connect Hub (4.1.0.17 版)进行数据采集和处理, 采用 WPS Office 2019 (11.8.2.8593 版)进行制表; 数据均采用 6 平行。

2　结果与分析

2.1　仪器条件的选择

2.1.1　色谱条件优化结果

6 种合成甜味剂结构中均含有羟基、羧基、磺酰基等水溶性基团, 极性较强, 在反相色谱体系中保留较弱。为此, 本研究首先对比了水、0.1%甲酸水、甲醇、乙腈、5 mmol/L 甲酸铵等不同流动相组合的分离效果。当流动相 A 为水, 流动相 B 为甲醇时, 6 种合成甜味剂均可获得良好响应, 但甜蜜素的色谱峰存在明显拖尾现象; 将流动相 B 更换为乙腈后, 各目标物响应值与甲醇体系相当, 而甜蜜素的峰形显著改善, 对称性提高(图 1)。这可能由于乙腈的洗脱强度, 且与甜蜜素极性结构之间的相互作用更为匹配, 有利于改善其在色谱柱上的传质行为。因此将乙腈固定为流动相 B, 进一步将流动相 A 替换为 0.1%甲酸水或 5 mmol/L 甲酸铵后, 6 种合成甜味剂的响应均出现显著下降, 较乙腈-水体系降低 1~2 个数量级。这主要是因为合成甜味剂在电喷雾负离子模式下依赖去质子化形成$[M-H]^-$离子, 甲酸或甲酸铵的加入增加了流动相的离子强度, 反而抑制了目标物的电离效率, 导致灵敏度大幅降低。综合考虑峰形、响应强度和分离效果, 本研究最终选用乙腈-水作为流动相体系。在确定流动相组成的基础上, 本研究进一步对比了 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱与 ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱的分离性能。ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱采用三键键合 C_{18} 烷基链并配合独特的端基封尾技术, 对极性化合物具有更强的保留能力; 而 ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱虽为经典的通用型反相柱, 但对强极性化合物的保留较弱。实验结果表明, ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱对 6 种合成甜味剂的分离效果优于 ACQUITY UPLC BEH C_{18} 柱, 各目标物峰形尖锐、对称, 响应值更高(图 2)。

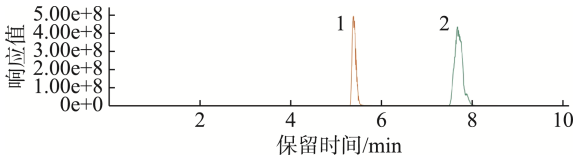
表 1　6 种合成甜味剂的 MRM 质谱参数

Table 1　MRM mass spectrometry parameters of 6 kinds of synthetic sweeteners

化合物	化学式	保留时间/min	母离子(*m*/*z*)	子离子(*m*/*z*)	去簇电压/V	碰撞能量/V
阿力甜	$C_{14}H_{25}N_3O_4S$	6.67	330.1	312.1*, 295.1	23	15, 13
阿斯巴甜	$C_{14}H_{18}N_2O_5$	6.45	293.1	261.1*, 200.0	23	17, 12
安赛蜜	$C_4H_5NO_4S$	5.21	162.0	82.0*, 78.0	71	35, 11
纽甜	$C_{20}H_{30}N_2O_5$	7.61	377.2	200.0*, 345.1	28	19, 13
糖精钠	$C_7H_4NO_3SNa$	5.40	182.0	106.0*, 42.2	28	22, 16
甜蜜素	$C_6H_{12}NNaO_3S$	5.53	178.0	80.0*, 96.1	20	28, 28

注: *为定量离子。

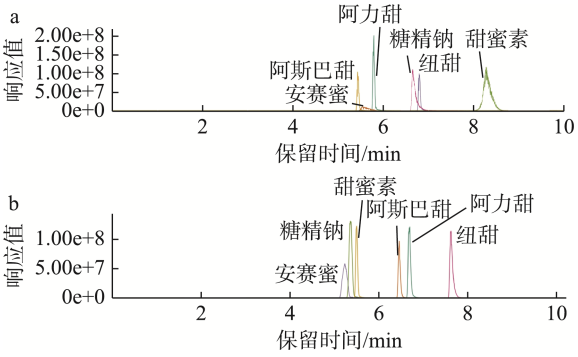
主要是因为 ACQUITY UPLC HSS T3 柱的固定相能够与甜味剂分子中的极性基团产生更强的相互作用，从而增强了目标物在色谱柱上的保留，改善了分离度。因此，本研究选择 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱作为分析柱。



注: 1. 乙腈-水体系; 2. 甲醇-水体系。

图 1 甜蜜素在不同流动相体系下的分离效果图

Fig.1 Separation effects diagram of sodium cyclamate in different mobile phase systems



注: a. ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱; b. ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱。

图 2 6 种合成甜味剂在不同色谱柱的分离效果图

Fig.2 Separation effects diagram of 6 kinds of synthetic sweeteners in different chromatographic columns

2.1.2 质谱条件优化结果

6 种合成甜味剂标液注入离子源，进行一级质谱全扫描，得到一级质谱图后确定其母离子，并根据母离子的响应强度选择适宜的正负离子扫描模式。结果表明，在负离子模式下 6 种合成甜味剂响应更好。然后进行二级质谱优化，优化碰撞能量，对碎片离子进行全扫描，选择响应值高、干扰较小的两个离子作为子离子，将响应值较高的质荷比 *m/z* 作为定量离子对，另一对作为定性离子对。最终确定的质谱参数如表 1 所示。

2.2 前处理条件的优化

2.2.1 提取溶剂的选择

茶叶含有色素、生物碱、茶多酚、咖啡因、氨基酸及可溶性糖等多种水溶性固有成分，而茶制品(调味茶、代用茶)基质涉及叶类、花类、果实类、根茎类等。6 种合成甜味剂易溶于水，但直接用水提取，茶叶及茶制品基质对其干扰较大，提取溶剂需兼顾目标物提取效率和杂质去除。本研究选用阴性绿茶样品进行加标回收，对比乙腈、乙腈-水(9:1、8:2、7:3、1:1, *V*:*V*, 下同)的提取效果。结果表明(图 3)，纯乙腈提取时部分极性较大的甜味剂(安赛蜜、糖精钠)回收率偏低(小于 70%)；随着水比例增加，回收率提高，但杂质共提取增多。综合看，提取溶剂采用乙腈-水(8:2、7:3、1:1)时 6 种合成甜味剂回收率均达到 85%以上，因茶叶及茶制品中含大量溶于水的杂质，提取溶剂中水比例越高，共提取杂质越多。因此最终选择乙腈-水(8:2)作为提取溶剂，满足回收率要求的情况下，同步提取的杂质对后续处理影响较小。

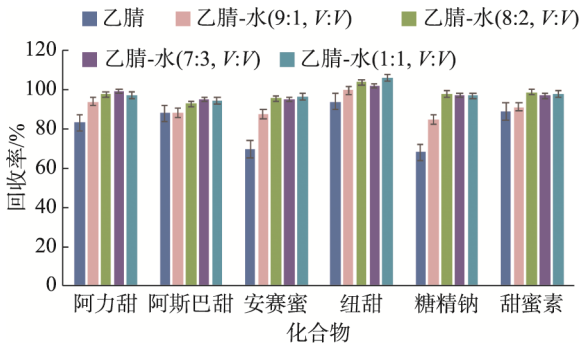


图 3 不同提取溶剂的回收率情况

Fig.3 Recovery rates of different extraction solvents

2.2.2 盐析脱水剂的选择

QuEChERS 方法中常用 $MgSO_4$ 和 NaOAc 进行盐析脱水。比较了不同用量 3 g $MgSO_4$+0.5 g NaOAc、4 g $MgSO_4$+1 g NaOAc、5 g $MgSO_4$+1.5 g NaOAc 的效果。结果表明，4 g $MgSO_4$+1 g NaOAc 时水相和有机相分离清晰，6 种合成甜味剂回收率最佳(88%~102%)。用量过低时分层不彻底，过高时放热剧烈，对热不稳定的合成甜味剂阿斯巴甜造成回收影响。因此选择 4 g $MgSO_4$+1 g NaOAc 为最佳盐析脱水剂。

2.2.3 净化吸附剂的选择

茶叶及茶制品基质组成复杂，富含多酚、色素、咖啡碱及有机酸等干扰物，在 LC-MS/MS 分析中易产生显著基质效应。本研究比较了 C_{18}、PSA、GCB 3 种净化材料单独使用以及组合使用的净化效果和对 6 种合成甜味剂回收率的影响。结果表明，单独使用 C_{18} (50 mg)时，通过疏水相互作用可有效去除色素等非极性干扰物，6 种合成甜味剂回收率在 95.0%~121.1%之间，其中安赛蜜回收率偏高(约 121%)。可能因其极性较强，在 C_{18} 上保留较弱，损失较小所致，但 C_{18} 对有机酸等极性干扰物的去除能力有限；单独使用 PSA (50 mg)时，凭借其弱阴离子交换和氢键作用，能有效吸附有机酸及部分色素，6 种甜味剂回收率在 90.1%~100.3%之间，但部分色素去除效果不及 C_{18}；单独使用 GCB (50 mg)时，虽对色素去除效果显著，但对糖精钠回收率低于 60%，这是因为 GCB 的六元环平面结构对含苯环或共轭体系的芳香族化合物(如糖精钠)存在较强的 π-π 吸附作用，导致目标物被非特异性吸附而损失，因此本

研究未选用 GCB 作为净化材料; 进一步考察 C_{18} 与 PSA 联合使用的净化效果, 结果显示, 二者联用后 6 种甜味剂的回收率在 92.9%~103.0%之间, 与单独使用相比未见明显差异, 但色素及有机酸的去除效果更为彻底, 净化后色谱基线更低、杂峰更少。因此, 本研究采取 PSA 与 C_{18} 净化材料联用, 净化效果和回收率均满足要求, 结果见图 4。

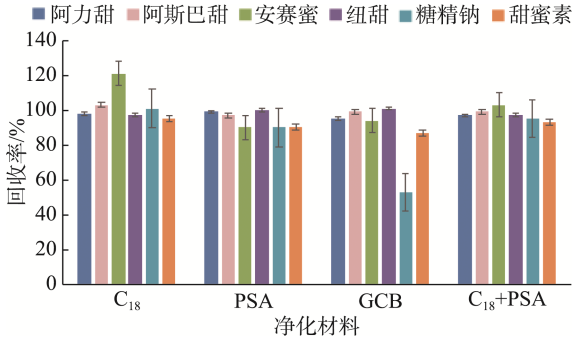


图 4　不同净化材料回收率

Fig.4　Recovery rates of different purification materials

2.2.4　基质效应分析

本研究发现提取溶剂未经净化上机, 存在不同程度的基质效应干扰, 致使被测组分回收率整体偏高。为客观评价净化效果, 本研究采用提取后加标法计算基质效应(matrix effect, ME), ME 表示为空白基质匹配标准曲线斜率与溶剂标准曲线斜率比值(ME/%=基质标曲斜率/溶剂标曲斜率×100%)。当 ME 介于 80%~120%时, ME 影响较小; 若 ME 低于 80%, 则说明存在显著的基质抑制作用; 相反, ME 超过 120%, 则意味着基质具有增强效应[38]。结果表明(表 2), 6 种合成甜味剂在茶叶(选取绿茶)、茶制品(选取调味茶)基质中的 MEs 为 86.1%~115.3%, 其中糖精钠和甜蜜素存在轻微基质增强效应(ME 约为 115%), 安赛蜜存在轻微基质抑制效应(ME 约为 86%), 但均在可接受范围内。为获得更准确的定量结果, 本研究采用基质匹配标准曲线进行校准。

表 2　6 种合成甜味剂的 MEs (%)

Table 2　MEs of 6 kinds of synthetic sweeteners (%)

基质	阿力甜	阿斯巴甜	安赛蜜	纽甜	糖精钠	甜蜜素
绿茶	95.3	104.4	91.2	97.8	115.3	114.8
调味茶	90.5	97.9	86.1	105.6	103.4	107.5

2.3　方法学验证

2.3.1　方法的线性关系、检出限和定量限

6 种合成甜味剂采用外标法定量分析, 配制系列浓度基质匹配标准工作溶液, 以目标组分峰面积为纵坐标(Y), 相应质量浓度为横坐标(X, μg/kg), 绘制标准曲线, 进行线性回归计算。以 3 倍、10 倍信噪比分别作为检出限(limit of detection, LOD)、定量限(limit of quantitation, LOQ), 表 3 结果显示, 6 种合成甜味剂组分在 2~1000 μg/kg 质量浓度范围内线性关系良好, 相关系数(r)均大于 0.99, LODs 为 5~25 μg/kg, LOQs 为 15~75 μg/kg, 灵敏度满足茶叶及茶制品中痕量合成甜味剂检测要求。

2.3.2　回收率试验

选取绿茶和调味茶为空白基质样品进行添加回收和精密度试验, 分别添加 100、500、2500 μg/kg 3 个浓度水平的混合标准溶液, 每个水平重复测定 6 次。由表 4 结果可知, 6 种合成甜味剂平均回收率范围为 88.34%~103.21%, RSDs 为 0.56%~7.63%, 说明该方法准确度和精密度良好, 可以满足茶叶及茶制品中 6 种合成甜味剂的检测需求。

表 3　6 种合成甜味剂线性范围、线性方程及 LODs、LOQs

Table 3　Linear range, linear equation, LODs and LOQs of 6 kinds of synthetic sweeteners

化合物	样品类型	线性范围/(μg/kg)	线性方程	相关系数(r)	LODs/(μg/kg)	LOQs/(μg/kg)
阿力甜	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=9.84e^5X+5.09e^6	0.9958	5	15
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=9.58e^5X+4.88e^6	0.9936	5	15
阿斯巴甜	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=1.03e^5X–3.59e^5	0.9985	10	30
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=1.49e^5X–1.13e^6	0.9938	10	30
安赛蜜	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=9.42e^4X+9.64e^6	0.9943	25	75
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=1.29e^5X+8.12e^6	0.9936	25	75
纽甜	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=3.77e^5X+2.54e^6	0.9958	5	15
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=3.81e^5X+4.87e^6	0.9914	5	15
糖精钠	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=3.86e^5X+6.62e^5	0.9976	15	45
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=4.50e^5X–2.13e^6	0.9946	15	45
甜蜜素	茶叶(绿茶)	2~1000	Y=7.63e^5X+2.60e^6	0.9964	25	75
	茶制品(调味茶)	2~1000	Y=4.66e^4X-2.97e^5	0.9973	25	75

表 4 6 种合成甜味剂的平均回收率和相对标准偏差(n=6)

Table 4 Average recoveries and relative standard deviations of 6 kinds of synthetic sweeteners (n=6)

化合物	添加水平/(μg/kg)	绿茶		调味茶	
		平均回收率/%	RSDs/%	平均回收率/%	RSDs/%
阿力甜	100	89.56	2.89	88.76	5.47
	500	92.13	1.23	90.15	6.91
	2500	95.78	0.78	92.44	2.73
阿斯巴甜	100	90.67	3.47	95.03	2.15
	500	98.22	2.34	100.91	4.28
	2500	101.45	3.98	97.82	3.09
安赛蜜	100	93.89	7.01	91.69	7.63
	500	97.01	6.34	89.27	5.56
	2500	99.34	4.12	94.58	3.82
纽甜	100	94.56	5.76	101.00	2.98
	500	91.23	1.99	96.37	3.66
	2500	102.78	0.56	99.26	5.88
糖精钠	100	96.78	4.67	90.98	7.24
	500	100.12	5.45	88.34	4.45
	2500	103.21	2.01	93.77	6.77
甜蜜素	100	91.99	6.89	96.15	2.98
	500	92.87	7.23	100.48	7.02
	2500	95.11	0.91	98.63	6.33

注: 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

2.4 实际样品分析

通过本方法对市售不同茶叶(绿茶、红茶、黑茶、乌龙茶、白茶、黄茶)及茶制品(调味茶、代用茶)各 5 份合计 40 份样品进行了检测, 结果发现, 茶叶样品中未检出合成甜味剂; 1 批次调味茶检出甜蜜素, 含量为 124 mg/kg; 1 批次代用茶检出阿斯巴甜, 含量为 59 mg/kg。结果表明, 市售茶制品存在违规添加合成甜味剂的现象。

3 结 论

本研究建立了基于 QuEChERs 前处理技术的 UPLC-MS/MS 同时测定茶叶及茶制品中 6 种合成甜味剂的分析方法。通过对提取溶剂、盐析脱水剂、净化材料及色谱-质谱条件的系统优化, 实现了对阿力甜、阿斯巴甜、安赛蜜、纽甜、糖精钠、甜蜜素的高效提取和灵敏检测。方法学验证表明, 方法线性良好、回收率及精密度满足定量分析要求。实际样品分析发现, 市售茶叶及茶制品中, 1 批次调味茶检出甜蜜素(124 mg/kg), 1 批次代用茶检出阿斯巴甜(59 mg/kg), 表明茶制品中存在违规添加合成甜味剂的现象, 与近年来监督抽检中茶叶及其制品不同程度检出食品添加剂违规使用情况的报道相一致。本方法与现行国家标准方法相比, 在检测通量、前处理效率和适用基质针对性方面具有明显优势, 可为茶叶及茶制品中人工合成甜味剂的日常快速筛查和定量检测提供技术支持。后续研究可在此基础上拓展目标物种类, 建立覆盖更全面的多组分同时检测方法。

参考文献

[1] 张倩倩 金勇, 黄皓, 等. 调味茶发展现状及品质研究进展[J]. 中国茶叶, 2022, 44(2): 24–29.
Zhang Qianqian, Jin Yong, Huang Hao, et al. Research progress on the development status and quality of seasoning tea [J]. Chinese Tea, 2022, 44(2): 24–29.

[2] 孙榕徽, 秦王念, 李明金, 等. 代用茶发展新茶饮的探讨[J]. 中国茶叶加工, 2024, (3): 27–30.
Sun Ronghui, Qin Wiangnian, Li Mingjin, et al. Discussion on the development of new tea with substitute tea [J]. Chinese Tea Processing, 2024, (3): 27–30.

[3] 马一艺, 马睿紫, 冯一凡. 食品甜味剂的应用和发展现状[J]. 现代食品, 2026, (3): 71–73.
Ma Yiyi, Ma Ruizi, Feng Yifan, et al. Application and development status of food sweeteners [J]. Modern Food, 2026, (3): 71–73.

[4] 吴鹏, 张成云, 朱旭丽, 等. 人工甜味剂对人体的影响及国内外标准现状探讨[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 383–391.
Wu Peng, Zhang Chengyun, Zhu Xuli, et al. Impact of artificial sweeteners on human health and current standards in China and abroad [J]. Food Science, 2024, 45(15): 383–391.

[5] 黄山市市场监督管理局通告. 休宁县五城镇程记茶干涉嫌生产超范围使用食品添加剂的食品案（二）[EB/OL]. (2024-08-16) [2026-06-10].

https: //scjg. huangshan. gov. cn/zwgk/public/6615740/11570499. html.
Circular of Huangshan Market Supervision Administration. The case of Cheng Ji tea in five towns of Xiuning County was suspected of producing food additives beyond the scope of use (Two) [EB/OL]. (2024-08-16) [2026-06-10]. https: //scjg. huangshan. gov. cn/zwgk/public/6615740/11570499. Html.

[6] 赵连伟, 徐林, 戴乾, 等. 安顺市校园周边不同品类饮料中 4 种甜味剂添加量差异及潜在风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8): 212–219.
Zhao Lianwei, Xu Lin, Dai Gan, et al. Difference and potential risk analysis of 4 kinds of sweeteners in different types of beverages around the campus of Anshun City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 212–219.

[7] Okoro F O, Markus V. Artificial sweeteners and Type 2 diabetes mellitus: a review of current developments and future research directions [J]. Journal of Diabetes and Its Complications, 2025, 39(2): 108954.

[8] Shil A, Ladeira F L M, Walker C A, et al. The artificial sweetener neotame negatively regulates the intestinal epithelium directly through T1R3-signaling and indirectly through pathogenic changes to model gut bacteria [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1366409.

[9] 骆实, 曹国栋, 熊智强, 等. 非营养型甜味剂健康风险及作用机制研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11 [2026-05-27]. https: //doi.org/10.13995/j. cnki.11-1802/ts.045076.
Luo Shi, Cao Guodong, Xiong Zhiqiang, et al. Research progress on health risks and mechanism of non-nutritive sweeteners [J]. Food and Fermentation Industries, 1-11 [2026-05-27]. https: //doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045076.

[10] 武蔚杰, 隋文海, 陈思喆 等. 非营养型甜味剂与心脏代谢健康[J]. 中华心血管病杂志, 2026, 54(1): 112–118.
Wu Weijie, Sui Wenhai, Chen Sizhe, et al. Non-nutritive sweeteners and cardiac metabolic health [J]. Chinese Journal of Cardiology, 2026, 54(1): 112–118.

[11] 陈静, 杨军, 鞠艳敏, 等. 人工甜味剂的暴露剂量对疾病影响的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 1-22 [2026-05-27]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080156.
Chen Jing, Yang Jun, Ju Yanmin, et al. Research progress on the effect of exposure dose of artificial sweeteners on diseases [J]. Science and Technology of Food Industry, 1-22 [2026-05-27]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080156.

[12] Debras C, Chazelas E, Sellem L, et al. Artificial sweeteners and risk of dementia: a prospective cohort study [J]. Neurology, 2025, 104(6): e240–e251.

[13] Goncalves N G, Martinez-steele E, Lotufo P A, et al. Association between consumption of low and no-calorie artificial sweeteners and cognitive decline: an 8-year prospective study [J]. Neurology, 2025, 105(7): e214023.

[14] Xie Jumin, Zhu Ying, Yang Zixuan, et al. An integrative analysis reveals cancer risk associated with artificial sweeteners [J]. Journal of Translational Medicine, 2024, 22(1): 32.

[15] Kossiva L, Kakleas K, Christodouli F, et al. Chronic use of artificial sweeteners: pros and cons [J]. Nutrients, 2024, 16(18): 3162.

[16] Zhu X Y, Sylvetsky A C, Mccullough M L, et al. Association of low-calorie sweeteners with selected circulating biomarkers of intestinal permeability in the cancer prevention study-3 diet assessment substudy [J]. The Journal of Nutrition, 2025, 155(4): 1226–1235.

[17] 胡燕. 高效液相色谱法测定新式茶饮中咖啡因和甜味剂的研究进展[J]. 现代农业科技, 2025, (24): 121–123, 129.
Hu Yan. Research progress on the determination of caffeine and sweeteners in new tea drinks by high performance liquid chromatography [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025, (24): 121–123, 129.

[18] 王倩, 张静静, 许莉萍, 等. 高效液相色谱法对人工合成甜味剂检测的优化与改进研究[J]. 现代食品, 2024, 30(8): 192–194.
Wang Qian, Zhang Jingjing, Xu Liping, et al. Optimization and improvement of the detection of synthetic sweeteners by high performance liquid chromatography [J]. Modern Food, 2024, 30(8): 192–194.

[19] 梁静, 陈东洋, 曾栋, 等. 高效液相色谱法快速测定奶茶中生物碱和甜味剂[J]. 实用预防医学, 2025, 32(9): 1137–1140.
Liang Jing, Chen Dongyang, Zeng Dong, et al. Rapid determination of alkaloids and sweeteners in milk tea by high performance liquid chromatography [J]. Practical Preventive Medicine, 2025, 32(9): 1137–1140.

[20] 冷泽山, 郭洪梅, 蔡函青, 等. 高效液相色谱-电雾式检测器法同时检测食品中 8 种人工甜味剂的应用[J]. 应用化学, 2023, 40(3): 436–440.
Leng Zeshan, Guo Hongmei, Cai Hanqing, et al. Application of high performance liquid chromatography-electrospray ionization detector for simultaneous detection of 8 kinds of artificial sweeteners in Food [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2023, 40(3): 436–440.

[21] 雷竣杰. 食品甜蜜素检测中气相色谱法的应用分析[J]. 山西化工, 2026, 46(1): 84–86.
Lei Junjie. Application analysis of gas chromatography in food cyclamate detection [J]. Shanxi Chemical Industry, 2026, 46(1): 84–86.

[22] 何亚芬, 徐明生, 黄道明, 等. 气相色谱法同时检测食品中 9 种常见食品添加剂[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5684–5692.
He Yafang, Xu Mingsheng, Huang Daoming, et al. Simultaneous determination of 9 kinds of common food additives in food by gas chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(14): 5684–5692.

[23] 王佩佩, 纪晓菲, 王宗华. 气质联用技术在食品添加剂检测中的研究[J]. 食品安全导刊, 2025, (7): 190–192.
Wang Peipei, Ji Xiaofei, Wang Zonghua, et al. Study on the detection of food additives by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025, (7): 190–192.

[24] Nicoluci Í G, Da Silva B S, Braga P A C, et al. Nine high-intensity sweeteners in beverages in a single LC-MS/MS analysis [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2025: 1–9.

[25] 白向飞, 王思瑶, 曹丹丹, 等. 液相色谱-串联质谱法快速检测速冻调制食品中 7 种甜味剂与防腐剂含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 300–306.
Bai Xiangfei, Wang Siyao, Cao Dandan, et al. Rapid determination of 7 kinds of sweeteners and preservatives in quick-frozen prepared foods by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 300–306. .

[26] 杨光, 段虎, 刘宁, 等. UPLC-MS/MS 同时测定酱油中 6 种非营养型甜味剂的含量[J]. 中国酿造, 2025, 44(9): 237–242.
Yang Guang, Duan Hu, Liu Ning, et al. UPLC-MS/MS simultaneous

determination of 6 kinds of non-nutritive sweeteners in soy sauce by UPLC-MS/MS [J]. China Brewing, 2025, 44(9): 237–242.

[27] 龚羽婷, 郭研研, 冯竟, 等. UPLC-Q/Orbitrap-HRMS 技术筛查及测定饮料中 11 种人工和天然甜味剂[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 323–333.
Gong Yuting, Guo Yanyan, Feng Jing, et al. UPLC-Q/Orbitrap-HRMS screening and determination of 11 kinds of artificial and natural sweeteners in beverages by UPLC-Q/Orbitrap-HRMS technology [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 323–333.

[28] 刘芸, 张晓燕, 柳菡, 等. 高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法同时测定巧克力中 9 种禁限用甜味剂[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 326–334.
Liu Yun, Zhang Xiaoyan, Liu Han, et al. Simultaneous determination of 9 kinds of prohibited and restricted sweeteners in chocolate by high performance liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 326–334.

[29] 钟永生, 万承波, 朱钦, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定食用农产品(水果)中 14 种甜味剂含量[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 315–321.
Zhong Yongsheng, Wan Chengbo, Zhu Qin, et al. Simultaneous determination of 14 kinds of sweeteners in edible agricultural products (fruits) by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 315–321.

[30] Aiswarya P S, Ditto A T, Louis G, et al. Food additives and evolved methods of detection: a review [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2024, 1: 1–20.

[31] 李小佳, 杨扬, 李瑞, 等. 食品中合成甜味剂的检测方法研究进展[J]. 饮料工业, 2024, 27(3): 60–67.
Li Xiaojia, Yang Yang, Li Rui, et al. Research progress on detection methods of synthetic sweeteners in food [J]. Beverage Industry, 2024, 27(3): 60–67.

[32] 连琦, 柯小庆, 邹峰, 等. 天然甜味剂的研究与应用进展[J]. 饮料工业, 2025, 28(5): 75–79.
Lian Qi, Ke Xiaoqing, Zou Feng, et al. Research and application progress of natural sweeteners [J]. Beverage Industry, 2025, 28(5): 75–79.

[33] 陈晨, 刘亚璇, 徐小培. 串联固相萃取柱-高效液相色谱法同时测定饮料中 5 种甜味剂[J]. 现代食品, 2025, (17): 216–218, 224.
Chen Chen, Liu Yaxuan, Xu Xiaopei. Simultaneous determination of 5 kinds of sweeteners in beverages by tandem solid phase extraction column-high performance liquid chromatography [J]. Modern Food, 2025, (17): 216–218, 224.

[34] 王晓艳, 李成, 闫茜, 等. 高效液相色谱串联质谱法同时检测预制菜中 14 种甜味剂[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 291–300.
Wang Xiaoyan, Li Cheng, Yan Xi, et al. Simultaneous determination of 14 kinds of sweeteners in prepared vegetables by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 291–300.

[35] Tomar A, Sharma A, Katna S, et al. Extraction and detection of novaluron and lambda-cyhalothrin in cabbage: a modified QuEChERS approach with GC-MS/MS analysis [J]. Accreditation and Quality Assurance, 2025: 1–13.

[36] Gu Xiaoxue, Chang Hailong, Li Baotong, et al. Residue analysis method and dissipation dynamics of pyriclobenzuron in paddy fields studied by HPLC-MS using the QuEChERS method [J]. Microchemical Journal, 2025, 214: 113965.

[37] 刘超, 景赞, 宋宇航. QuEChERS 法快速测定广味香肠中 6 种甜味剂的一测多评研究[J]. 食品工业, 2025, 46(2): 284–288.
Liu Chao, Jin Zan, Song Yuhang. Rapid determination of 6 kinds of sweeteners in guangwei sausage by QuEChERS method [J]. The Food Industry, 2025, 46(2): 284–288.

[38] 宗文文, 李永霞, 郭晶晶, 等. 液相色谱-串联质谱法同时测定白酒中八种甜味剂[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(12): 150–156.
Zong Wenwen, Li Yongxia, Guo Jingjing, et al. Simultaneous determination of 8 kinds of sweeteners in liquor by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. China Food Additives, 2025, 36(12): 150–156.

(责任编辑: 范彩旭 蔡世佳)