DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251027007
引用格式: 郭晓雷, 陈仁熙, 夏进, 等. 气相色谱法测定水果和蔬菜中仲丁胺残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 288–295.
GUO XL, CHEN RX, XIA J, *et al*. Determination of sec-butylamine residues in fruits and vegetables by gas chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 288–295. (in Chinese with English abstract).

气相色谱法测定水果和蔬菜中仲丁胺残留量

郭晓雷, 陈仁熙, 夏　进, 黄小倩, 王方芳, 罗忆媚, 张秀芹*

(华测检测认证集团股份有限公司, 深圳　518101)

摘　要: 目的　建立气相色谱法测定水果和蔬菜中仲丁胺残留量的方法。**方法**　将样品在酸性溶液中摇匀, 压盖后, 60 ℃加热 40 min, 样品中的仲丁胺在密闭容器内的酸性溶液中会扩散至气相中, 用顶空气相色谱法测定上层气相中仲丁胺含量, 外标法定量。**结果**　仲丁胺在 0.1~2.0 mg/L 范围内, 线性关系良好, 相关系数(r^2)大于 0.99, 检出限为 0.05 mg/kg, 定量限为 0.1 mg/kg。回收率的范围为 84.1%~91.8%, 精密度小于 15%。**结论**　该方法操作简单, 分析速度快, 灵敏度高, 重复性好, 结果准确, 可以用于水果和蔬菜中仲丁胺残留量的测定。

关键词: 仲丁胺; 气相色谱法; 水果; 蔬菜

Determination of sec-butylamine residues in fruits and vegetables by gas chromatography

GUO Xiao-Lei, CHEN Ren-Xi, XIA Jin, HUANG Xiao-Qian, WANG Fang-Fang, LUO Yi-Mei, ZHANG Xiu-Qin*

(*Centre Testing International Group Co*., *Ltd*, *Shenzhen* 518101, *China*)

ABSTRACT: Objective　To establish a method for the determination of sec-butylamine residues in fruits and vegetables by gas chromatographic. **Methods**　The sample was shaken in acidic solution, capped and heated at 60 ℃ for 40 min. The sec-butylamine in the sample would diffuse into the gas phase in the closed container's acidic solution. The content of sec-butylamine in the upper gas phase was determined by gas chromatography, and quantified by external standard method. **Results**　Sec-butylamine showed good linearity in the range of 0.1–2.0 mg/L, and the correlation coefficient (r^2) was over 0.99. The limit of detection and limit of quantitation were 0.05 mg/kg and 0.1 mg/kg, respectively. Recoveries ranged from 84.1% to 91.8% with relative standard deviations less than 15%. **Conclusion**　This method is simple to operate, has a fast analysis speed, high sensitivity, good repeatability and accurate results. It can be used for the determination of isobutylamine residues in fruits and vegetables.

KEY WORDS: sec-butylamine; gas chromatography; fruits; vegetables

收稿日期: 2025-10-27
第一作者: 郭晓雷(1979—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为食品及食用农产品质量安全检测。E-mail: guoxiaolei@cti-cert.com
***通信作者:** 张秀芹(1974—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品及食用农产品质量安全检测。E-mail: zhangqiuqin@cti-cert.com

0　引　言

仲丁胺是一种中等毒性的保护性杀菌剂, 因其具有广谱抗真菌活性而被广泛作为果蔬贮运保鲜剂[1−4], 在苹果、梨、马铃薯及辣椒等农产品贮运中, 通过浸渍或熏蒸来抑制真菌生长[5−10]。研究表明, 仲丁胺易在果蔬表面残留[11−14], 对人类健康构成潜在威胁[15−18]。

仲丁胺的危害以急性刺激和慢性器官损伤为主, 长期低剂量接触仲丁胺, 可对神经系统、肝肾功能及血液系统造成危害。目前国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)未将仲丁胺列为明确致癌物, 但部分结构相似的胺类化合物(如联苯胺、β-萘胺、4-氨基联苯、2-萘胺)具有致癌性[19]。动物实验显示, 高剂量仲丁胺可能增加某些器官(如肝脏、肾脏)的肿瘤发生率, 但对人体的致癌性尚无直接证据, 需谨慎对待[20]。日本规定水果中仲丁胺残留量限值为 0.1 mg/kg[21], 我国尚未制定仲丁胺的最大残留限量(maximum residue limit, MRL)[22−23]。

我国现有行业标准 NY/T 946—2006《蒜薹、青椒、柑橘、葡萄中仲丁胺残留量测定》采用可见分光光度法测定, 其检出限偏高(0.672 mg/kg), 无法满足低残留检测需求, 易造成漏检; 其次操作烦琐, 需经过蒸馏提取、薄层色谱分离等多个步骤, 操作耗时, 且步骤中易出现组分损失, 影响检测准确性; 同时适用范围狭窄, 仅针对蒜薹、青椒、柑橘、葡萄 4 种果蔬, 无法覆盖各类常见果蔬样品, 普适性极差。SN/T 5598—2024《出口蔬菜和水果中异丁胺、异丙胺、仲丁胺、正丙胺、正戊胺、2-甲基丁胺和正己胺残留量的测定 气相色谱-质谱法》, 该方法灵敏度较分光光度法有显著提升, 0.003 mg/kg 的检出限可满足低残留检测要求, 但存在衍生条件严苛。仲丁胺为挥发性胺类, 直接检测稳定性差, 该方法需通过衍生反应改善检测性能, 但衍生过程对温度、试剂用量、反应时间的控制要求极高, 微小偏差即会导致衍生不完全或杂质增多, 影响检测结果; 此外, 衍生步骤的增加进一步复杂化操作流程, 延长检测周期, 且衍生试剂的使用增加了检测成本, 同时可能引入污染, 难以实现批量样品的高效检测。顶空进样可直接利用仲丁胺的挥发性, 使样品中的仲丁胺在密闭顶空瓶内达到气液平衡后, 仅抽取气相部分进样检测, 无需对样品进行复杂的蒸馏提取、固相萃取或衍生处理, 从源头简化操作流程, 减少组分损失与人为误差, 同时避免衍生试剂带来的成本增加与污染风险; 结合气相色谱法高灵敏度、高分离度的特点, 形成优势互补的检测体系, 既解决现有方法检出限高、操作复杂、普适性差等核心问题, 又为果蔬中挥发性胺类残留检测提供了一种高效、低成本、广适用的新方法。目前鲜少见顶空气相色谱法测定水果和蔬菜中仲丁胺残留量的报道。所以本研究针对现有方法检出限偏高、操作烦琐、衍生依赖、普适性差等核心问题, 以“简化操作、提升灵敏度、增强普适性、降低检测成本”为核心目标, 结合仲丁胺易挥发的物理特性, 采用顶空进样方式替代传统的蒸馏提取、固相萃取或衍生处理[24−28], 搭配气相色谱法建立果蔬中仲丁胺残留的检测方法[29−34], 拟为仲丁胺残留监管及暴露风险评估提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　样品来源

水果和蔬菜样品均为随机购买的市售产品。

1.2　仪器与试剂

Agilent 7890 气相色谱仪[配有氮磷检测器(nitrogen-phosphorus detector, NPD), 美国 Agilent 公司]; PLOT-Q 色谱柱(30 m×320 μm, 10 μm, 上海安谱实验科技有限公司); METTER BSA4202S 电子天平(感量 0.01 g)、METTER XSR205DU 电子天平(感量 0.00001 g, 梅特勒-托利多有限公司); HH-4 数显恒温水浴锅(普天仪器制造有限公司); Aglient G1888 自动顶空进样器、Aglient A-Line 20 mm 便携式手持压盖器(美国安捷伦科技有限公司); 20 mL 顶空进样瓶(带钳口铝制瓶盖和聚四氟乙烯硅橡胶垫片, 浙江哈迈有限公司); UPR-11-15TNP 优普系列超纯水机(四川优普超纯科技有限公司)。

仲丁胺(纯度 98.8%, 北京曼哈格生制公司); 丙酮(色谱纯)、乙酸(优级纯)(国药集团化学试剂有限公司); 一级水和二级水(实验室自制); 氢氧化钠(分析纯, 北京东方事博精细化工有限公司); 屈臣氏蒸馏水(市售)。

1.3　实验方法

1.3.1　标准溶液的配制

仲丁胺的标准储备溶液(1000 mg/L): 准确称取 10 mg(精确至 0.01 mg)标准品, 用丙酮溶解并定容至 10 mL, –18 ℃避光保存。

标准中间液: 准确移取标准储备液 1 mL, 加入 10 mL 的容量瓶中, 用丙酮稀释至刻度, 配制成 100 mg/L 的质量浓度, –18 ℃避光保存。

标准工作溶液: 量取 5 mL 蒸馏水于 5 个 20 mL 顶空进样瓶中, 分别滴加 600 μL 乙酸, 再迅速加入 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 μg 的仲丁胺标准溶液, 现用现配。

1.3.2　前处理方法

样品制备: 样品取样部位按照 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》规定执行。对于个体较小的样品, 取样后全部处理; 对于个体较大的基本均匀样品, 可在对称轴或对称面上分割或切成小块后处理; 对于细长、扁平或组分含量在各部分有差异的样品, 可在不同部位切取小片或截成小段后处理; 取后的样品将其切碎, 充分混匀, 用四分法取样或直接放入组织捣碎机中捣碎成匀浆。取 500 g 匀浆的样品, 装入洁净容器内密封, 注

明标记。

称取 5 g(精确至 0.01 g)样品于 20 mL 顶空进样瓶中，滴加 600 μL 乙酸，并加入 5 mL 蒸馏水，摇匀使样品浸润在蒸馏水中，然后用便携式手持压盖器密封瓶盖，待测试。

1.3.3 仪器条件

顶空进样条件：加热箱温度(平衡温度)：60 ℃；环路温度：70 ℃；传输线温度：80 ℃；样品瓶平衡时间：40 min；气相色谱仪循环时间：16 min；加压时间：0.2 min；环路充装时间：0.2 min；注射时间：1.5 min；摇动：high。

1.4 气相色谱进样条件

聚苯乙烯-二乙烯基苯毛细管柱 PLOT-Q (30 m×320 μm，10 μm)；柱升温程序：70 ℃保持 0.5 min，以 20 ℃/min 升至 150 ℃保持 5 min，以 50 ℃/min 升至 270 ℃保持 1 min；载气：氮气，纯度不低于 99.999%，流速 2.5 mL/min；进样口温度：125 ℃；进样方式：不分流进样，1.6 min 后打开分流阀和隔垫吹扫阀；检测器温度：330 ℃；氢气流速：3 mL/min；空气流速：60 mL/min；尾吹流速：9 mL/min。

1.5 定性和定量分析

定性分析：仲丁胺标准溶液与待测试样溶液按相同色谱条件进样，记录两者保留时间，以仲丁胺标准溶液保留时间为基准，若试样中未知组分保留时间与其偏差±0.05 min，即判定该组分为仲丁胺。定量分析：建立标准曲线，外标法定量。样品溶液中仲丁胺的含量计算：从标准曲线中得出试样中仲丁胺含量，代入公式(1)，计算出仲丁胺的质量分数。

试样中仲丁胺的含量按照式(1)计算：

$$X=\frac{C}{m} \tag{1}$$

式中：X 为试样中仲丁胺的质量分数，mg/kg；C 为标准曲线上查得目标化合物的含量，μg；m 为试样的质量，g。计算结果当结果小于 1 mg/kg 时，保留两位有效数字；当结果大于 1 mg/kg 时保留 3 位有效数字。

1.6 数据处理

实验样品进行 3 个平行样品的测定，方法学验证进行 6 个平行样品的测定，实际样品检测进行双平行测定。采用 Agilent OpenLAB CDS ChemStation C.01.05[35]软件版本采集原始数据、对采集的原始数据进行分析。使用 Origin 2025 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 样品前处理条件的优化

为研究不同提取溶剂对目标峰干扰的影响，本研究采用系统性对照设计。实验设置 8 组前处理体系，每组于 20 mL 顶空进样瓶中分别加入 5 mL 不同试剂：浓度梯度氢氧化钠溶液[15,28,32]组(10%、20%、30%、40%氢氧化钠溶液)及不同实验用水组(一级水、二级水、屈臣氏蒸馏水、自制蒸馏水)。各体系均加入 600 μL 乙酸溶液，经涡旋振荡混匀后，使用便携式手持压盖器进行密封处理，随后进行气相色谱分析。经结果分析，40%氢氧化钠溶液的空白响应值比 10%、20%及 30%氢氧化钠溶液都低，杂质干扰影响较小；同时一级水、二级水及市售屈臣氏蒸馏水，响应值较高，杂质影响比较大，而自制蒸馏水空白响应值最低，杂质干扰最小。各试剂的响应值见图 1。经综合考虑，本研究选择以自制蒸馏水作为样品前处理的提取溶剂。

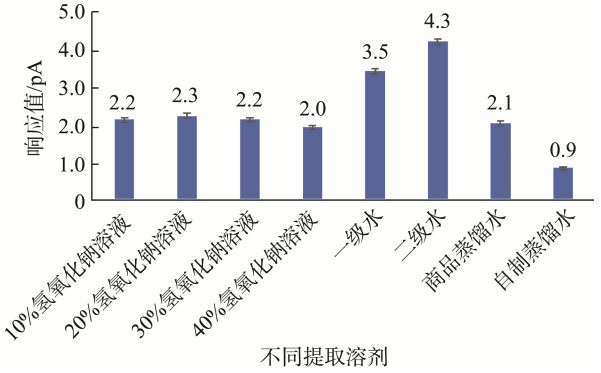


图 1 不同提取试剂下响应值的变化

Fig.1 Changes in response values at different extraction reagents

2.2 仪器条件的优化

2.2.1 检测器温度的选择

本研究考察了不同检测器温度(300、310、320、330、340 ℃)对仲丁胺响应值的影响。结果显示，随着检测器温度从 320 ℃至 330 ℃，仲丁胺的响应值呈上升趋势；当温度继续升高至 340 ℃时，响应值未进一步提升反而略有下降。其中，在 330 ℃条件下，仲丁胺的检测响应值达到最高，检测灵敏度最优。综合以上结果，本研究最终确定仪器最佳检测器温度为 330 ℃，不同温度下对应的响应值变化趋势详见图 2。

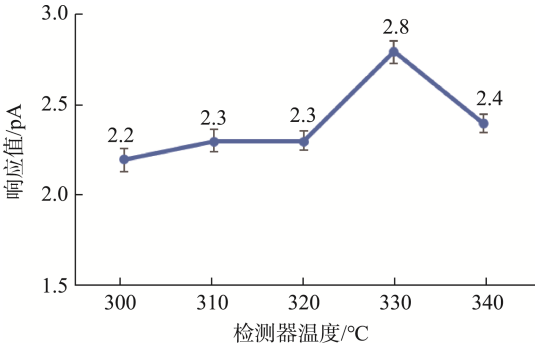


图 2 不同检测器温度下响应值的变化

Fig.2 Changes in response values at different detector temperatures

2.2.2　进样口温度的选择

本研究设置 120、125、130、135、140、145 ℃ 6 个温度梯度, 系统考察不同温度对仲丁胺响应值的影响。实验结果表明, 当温度在 125 ℃时, 仲丁胺的响应值最高, 继续调整温度时, 响应值未出现进一步提升。综合以上结果, 本研究确定仪器最佳进样口温度为 125 ℃, 各温度对应的响应值变化趋势详见图 3。

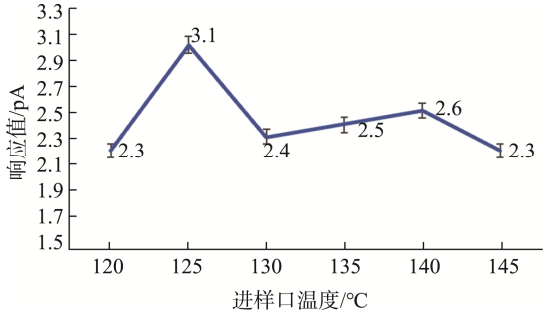


图 3　不同进样口温度下响应值的变化

Fig.3　Changes in response values at different injection port temperatures

2.2.3　尾吹流量的选择

在 2.2.1 和 2.2.2 确定的条件下, 为优化尾吹流量, 本研究考察了 8、9、10、11、12 mL/min 不同流速对检测性能的影响。响应值如图 4 所示, 随着尾吹流量的变化, 检测器响应值呈现先升高后降低的趋势, 并在 9 mL/min 时达到最高, 检测灵敏度最优。因此, 本研究确定 9 mL/min 为最佳尾吹气流量, 后续研究均在此条件下进行。

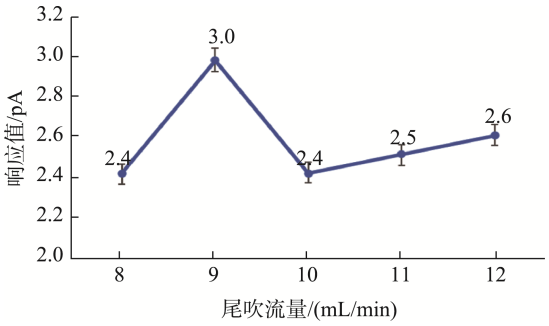


图 4　不同尾吹流量下响应值的变化

Fig.4　Changes in response values at different tail blow flow

2.2.4　平衡温度的研究

本研究系统性考察了平衡温度(50、60、70、80 °C)对顶空富集效率的影响。色谱分析结果表明, 60 °C 为最优条件, 此时目标物的峰面积响应最高(图 5), 检测灵敏度最优。50 °C 时分子挥发不足, 富集效率低; 70~80 °C 时水汽干扰加剧、目标物易降解, 响应下降, 据此, 将平衡温度确定为 60 °C。

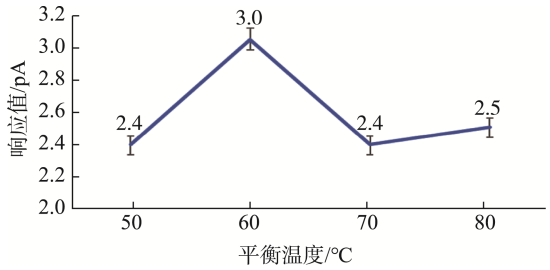


图 5　不同平衡温度下响应值的变化

Fig.5　Changes in response values at different equilibrium temperatures

2.2.5　平衡时间的选择

在 2.2.1~2.2.4 确定后, 本研究对比不同平衡时间(10、20、30、40 min)对顶空富集效率影响, 延长平衡时间至 40 min 可获得最高的响应值(图 6), 且在该条件下未观测到杂峰, 峰形对称性良好。因此确定平衡时间为 40 min, 后续实验均在此条件下进行。

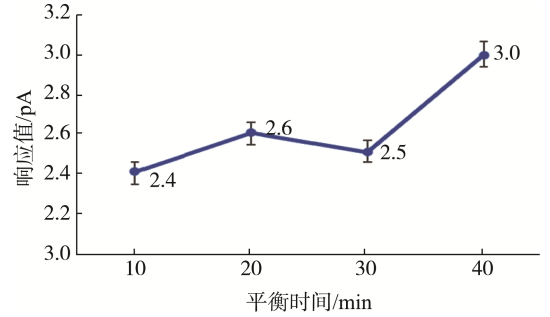


图 6　不同平衡时间下响应值的变化

Fig.6　Changes in response values at different equilibrium times

2.2.6　仪器参数适用性验证

本研究采用已确定的最佳色谱条件, 对 0.5 μg 仲丁胺标准溶液行分析, 以验证优化后仪器参数的适用性。结果如图 7 所示, 在该参数设置下, 仲丁胺色谱峰形对称尖锐, 保留时间稳定, 基线平稳, 且无明显干扰峰。以上结果表明, 所设定的仪器参数能够为目标组分提供良好的色谱分离行为与检测响应, 证实该参数组合合理、可靠, 可用于后续分析。而优化前对 0.5 μg 仲丁胺标准溶液进行分析, 结果如图 8 所示, 目标峰未出现, 同时出现了杂峰。

2.3　检出限和定量限

为评估所建方法的灵敏度, 依据 GB 5009.295—2023《食品安全国家标准 化学分析方法验证通则》, 本研究选取大白菜和苹果阴性样品, 添加系列梯度浓度的仲丁胺标准溶液, 并按 1.3 分析方法进行测定。以信噪比 3≤*S*/*N*<10 时, 浓度为方法检出限; *S*/*N*≥10 时, 浓度为方法定量限, 作为评价指标。结果(表 1)显示, 在添加量为 0.05 mg/kg 时, *S*/*N* 大于 3 但未达到定量要求 10; 当添加量提高至 0.1 mg/kg

时, *S/N* 均稳定在 10 以上。基于本研究结果, 最终确定本研究方法中仲丁胺的检出限为 0.05 mg/kg, 定量限为 0.10 mg/kg。

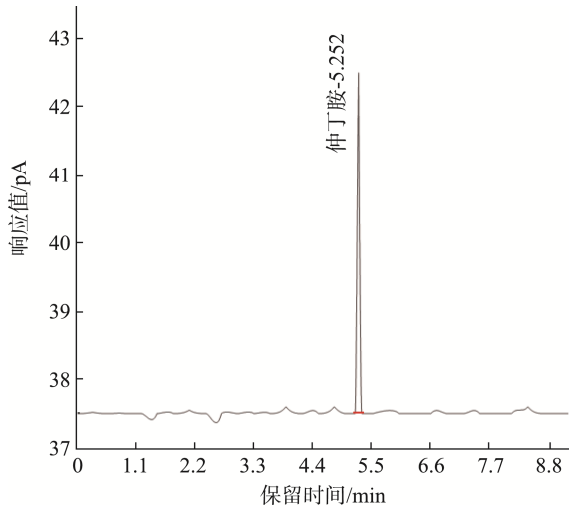


图 7 0.5 μg 仲丁胺色谱图
Fig.7 Chromatogram of 0.5 μg of sec-butylamine

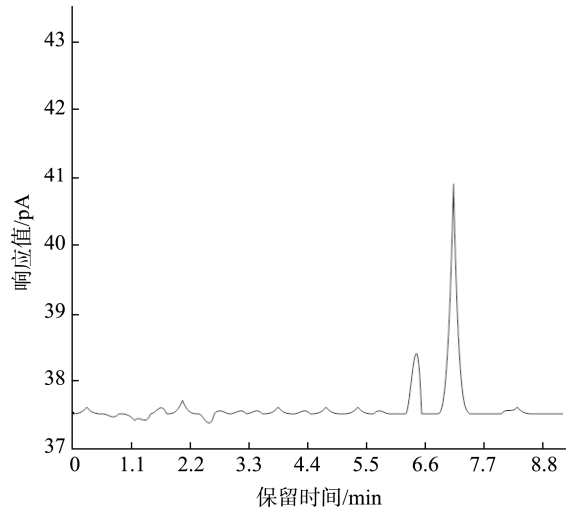


图 8 0.5 μg 仲丁胺色谱图(无目标峰)
Fig.8 Chromatogram of 0.5 μg of sec-butylamine (no target peak)

表 1 检出限和定量限的确定
Table 1 Determination of limit of detection and limit of quantitation

样品	通用名	添加量/(mg/kg)	*S/N*
大白菜	仲丁胺	0.01	/
大白菜	仲丁胺	0.05	6.5
大白菜	仲丁胺	0.10	13.2
苹果	仲丁胺	0.01	/
苹果	仲丁胺	0.05	7.4
苹果	仲丁胺	0.10	14.5

注: 信噪比用 *S/N* 表示; /表示未出峰。

2.4 线性关系

根据仲丁胺的检出限与定量限水平, 准确移取不同体积的标准中间液, 置于装有 5 mL 丙酮的顶空瓶中, 并加入 600 μL 乙酸, 配制成仲丁胺含量分别为 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 μg 的系列标准溶液。经气相色谱分析, 得到仲丁胺在 0.1~2.0 mg/L 质量浓度范围内的线性回归方程为 Y=5.07022X–0.436214, 相关系数 r^2 为 0.99988。该结果表明, 峰面积和目标物的含量呈良好的线性关系。

2.5 方法精密度和准确度

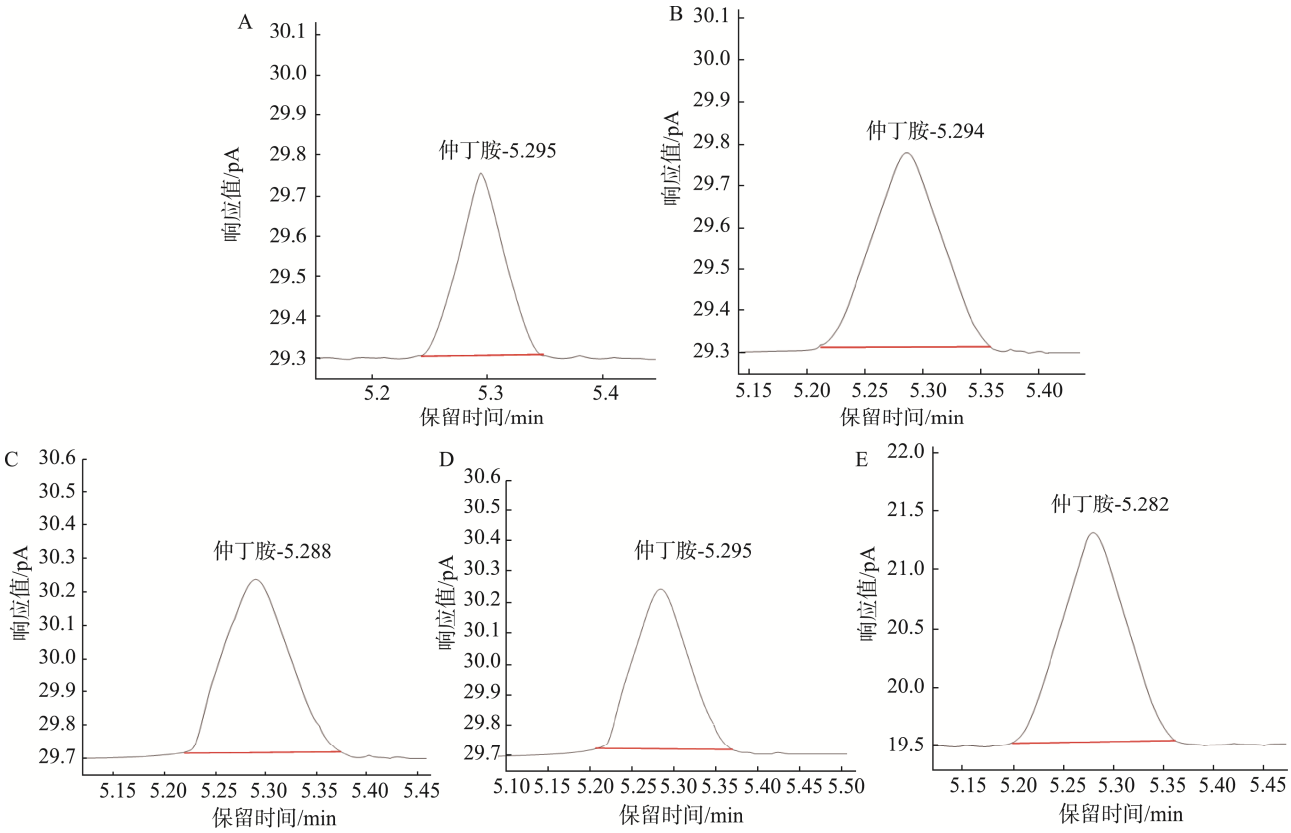
为系统评估方法的精密度与准确度, 根据 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》附录 F-回收率 F.1 的禁用物质的要求进行验证。选取番茄、青椒、荔枝、蒜薹、柑橘和葡萄 6 种代表性样品, 分别在 0.1、0.2 和 1.0 mg/kg 3 个浓度水平进行加标回收实验, 每个水平平行测定 6 次。测得的回收率及相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)见表 2, 在不同基质中, 仲丁胺的平均回收率为 84.1%~91.8%, RSDs 为 2.3%~8.0%。所有回收率结果均符合 GB/T 27404—2008 中对 0.1~1.0 mg/kg 浓度范围的定量要求(80%~110%), 同时各浓度水平的 RSDs 值均满足该标准对精密度的规定(不超过 15%)。实验结果表明, 本方法在不同果蔬基质中有较好的准确度和精密度。

表 2 不同样品中仲丁胺的回收率及 RSDs
Table 2 Recovery rates and RSDs of sec-butylamine in different samples

样品	理论浓度/(mg/kg)	平均回收率/%	RSDs/%
番茄	0.1	89.1	7.6
	0.2	84.1	6.2
	1.0	89.4	8.0
青椒	0.1	84.7	4.2
	0.2	85.6	4.3
	1.0	85.8	4.6
荔枝	0.1	86.6	4.4
	0.2	89.1	4.3
	1.0	88.1	4.5
蒜薹	0.1	88.3	3.6
	0.2	88.9	2.3
	1.0	89.4	2.8
柑橘	0.1	88.3	5.1
	0.2	91.8	3.3
	1.0	88.4	2.8
葡萄	0.1	84.7	5.0
	0.2	90.1	3.3
	1.0	85.9	4.9

2.6　样品的检测和应用

为验证本研究所建立方法在实际样品检测中的适用性，从本地市场随机抽取了 30 批次水果和蔬菜样品，按照 1.3 所述方法进行定量分析。检测结果显示，所有样品中仲丁胺含量均低于方法定量限(0.1 mg/kg)，其中 5 批次样品(包括 4 批次荔枝和 1 批次葡萄)在检出限(0.05 mg/kg)至定量限范围内检出信号，含量介于 0.05~0.10 mg/kg 之间，其余样品均未检出。上述 5 批次样品的典型色谱图见图 9。本研究结果表明，所建立的方法灵敏度高、适用性强，适用于市场流通水果和蔬菜中仲丁胺残留的快速筛查与定量分析，为相关农产品质量安全监测工作提供了可靠的分析手段。



注: A. M1 荔枝样品; B. M2 荔枝样品; C. M3 荔枝样品; D. M4 荔枝样品; E. M5 荔枝样品。

图 9　荔枝样品谱图

Fig.9　Spectrum of lychee sample

3　结　论

本研究通过优化前处理条件、仪器条件等，建立了气相色谱法测定水果和蔬菜中仲丁胺的分析方法。方法的回收率在 80%~110%之间，RSD 范围小于 15%，仲丁胺在 0.1~2.0 mg/L 范围内线性相关系数(r^2)大于 0.99，检出限为 0.05 mg/kg，定量限为 0.1 mg/kg。经实际样品验证该方法操作简单，分析速度快，灵敏度高，重复性好，结果准确，可以满足国际上现有的限量要求，可为我国创建食品安全国家标准以及食品安全监管提供技术参考。

参考文献

[1] 崔兴国. 果实贮藏保鲜技术的研究进展[J]. 农业科技与装备，2010, 189(3): 51–54.
CUI XG. Research progress in the techniques of storing fruit and maintaining freshness [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2010, 189(3): 51–54.

[2] 纪淑娟，何晓晗，冯辉. 仲丁胺的防腐作用及其残留检测方法[J]. 北方园艺，2005, 25(4): 86–87.
JI SJ, HE XH, FENG H. The preservative effect and residue detection methods of sec-butylamine [J]. Northern Horticulture, 2005, 25(4): 86–87.

[3] 张秋红，邵知杨. 不同保鲜法在水果贮存中的应用[J]. 食品安全导刊，2017(9): 129.
ZHANG QH, SHAO ZY. Application of different preservation methods in fruit storage [J]. China Food Safety Magazine, 2017(9): 129.

[4] 綦艳，李聪，王力清，等. 中国果蔬防腐保鲜剂检测技术研究进展[J]. 食品与机械，2013, 29(3): 265–272.
QI Y, LI C, WANG LQ, *et al*. Research progress on detection technology of preservatives for fruits and vegetables in China [J]. Food & Machinery, 2013, 29(3): 265–272.

[5] 杨连战, 李言, 钱海丰, 等. 植物源天然防腐剂应用及抑菌机理研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 303–308.
YANG LZ, LI Y, QIAN HF, *et al.* Research progress on application and antibacterial mechanism of natural plant preservatives [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(1): 303–308.

[6] 吕奎营, 赵秋香, 赵媛媛, 等. 天然食品防腐剂及其在食品中的应用研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 186–200.
LV KY, ZHAO QX, ZHAO YY, *et al.* Research on natural food preservatives and their application in food [J]. China Condiment, 2020, 45(4): 186–200.

[7] 周会玲, 李丽, 郭晓娜, 等. 仲丁胺对葡萄贮藏品质及生理生化指标的影响[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 180–184.
ZHOU HL, LI L, GUO XN, *et al.* Effects of sec-butylamine on storage quality and physiological-biochemical indices of grapes [J]. China Brewing, 2017, 36(11): 180–184.

[8] 李鹏霞, 王毓宁, 赵凤舞, 等. 仲丁胺熏蒸处理对冷藏梨果实品质和生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 435–440.
LI PX, WANG YN, ZHAO FW, *et al*. Effects of sec-butylamine fumigation on quality and physiological characteristics of refrigerated pear fruits [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(2): 435–440.

[9] 李娜, 张平, 朱志强, 等. 仲丁胺熏蒸对厚皮甜瓜采后贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(4): 1–4.
LI N, ZHANG P, ZHU ZQ, *et al*. Effects of sec-butylamine fumigation on postharvest storage quality of thick-skinned muskmelon [J]. Storage and Process, 2015, 15(4): 1–4.

[10] 刘欢, 李喜宏, 闫师杰, 等. 仲丁胺对蓝莓果实采后品质及抗氧化酶活性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 52–56.
LIU H, LI XH, YAN SJ, *et al*. Effects of sec-butylamine on postharvest quality and antioxidant enzyme activity of blueberry fruits [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(1): 52–56.

[11] 马瑞娟, 孙建设, 张鹏, 等. 仲丁胺对苹果采后轮纹病的抑制作用及机理[J]. 中国果树, 2018(2): 20–23, 27.
MA RJ, SUN JS, ZHANG P, *et al*. Inhibitory effect and mechanism of sec-butylamine on apple ring rot disease after harvest [J]. China Fruits, 2018(2): 20–23, 27.

[12] 王丹, 李颖畅, 孟宪军. 仲丁胺对南果梨采后生理及贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(7): 200–204.
WANG D, LI YC, MENG XJ. Effects of sec-butylamine on postharvest physiology and storage quality of nanguo pears [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(7): 200–204.

[13] 任洁, 李晓雪, 关帆, 等. 鲜食葡萄采后保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(12): 148–156.
REN J, LI XX, GUAN F, *et al*. Research progress on postharvest preservation technology of table grapes [J]. Storage and Process, 2024, 24(12): 148–156.

[14] 刘程惠, 胡文忠, 王雅玲, 等. 仲丁胺对采后香蕉果实品质及生理生化指标的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(1): 169–173.
LIU CH, HU WZ, WANG YL, *et al*. Effects of sec-butylamine on postharvest quality and physiological-biochemical indices of banana fruits [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(1): 169–173.

[15] 何晓晗, 纪淑娟. 仲丁胺在果蔬保鲜中的应用及其检测技术研究现状[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(4): 144–146.
HE XH, JI SJ. Application of sec-butylamine in fruit and vegetable preservation and its detection techniques [J]. Food Research and Development, 2004, 25(4): 144–146.

[16] 张润光, 陶永霞, 李菊红, 等. 仲丁胺对猕猴桃果实采后生理及贮藏品质的影响[J]. 北方园艺, 2015(19): 146–149.
ZHANG RG, TAO YX, LI JH, *et al*. Effects of sec-butylamine on postharvest physiology and storage quality of kiwifruit [J]. Northern Horticulture, 2015(19): 146–149.

[17] 杨玉娜, 李新岗, 黄永红, 等. 仲丁胺对冬枣采后生理及贮藏品质的影响[J]. 北方园艺, 2016(17): 146–149.
YANG YN, LI XG, HUANG YH, *et al.* Effects of sec-butylamine on postharvest physiology and storage quality of winter jujube [J]. Northern Horticulture, 2016(17): 146–149.

[18] 王雅玲, 胡文忠, 刘程惠, 等. 仲丁胺对草莓果实采后病原菌的抑制作用[J]. 食品科学, 2012, 33(17): 247–250.
WANG YL, HU WZ, LIU CH, *et al*. Inhibitory effect of sec-butylamine on postharvest pathogens of strawberry fruits [J]. Food Science, 2012, 33(17): 247–250.

[19] IARC, International Agency for research on cancer (IARC). Re-evaluation of some organic chemicals, hydrazine and hydrogen peroxide [R]. Lyon: IARC Press, 1999: 1315–1318.

[20] FAO/WHO. Toxicological evaluation of sec–butylamine [R]. Geneva: FAO/WHO, 1975.

[21] 吴声敢, 关文碧, 柳新菊, 等. 草莓中农药最大残留限量标准比较[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(3): 460–468.
WU SG, GUAN WB, LIU XJ, *et al.* Comparison of standards for maximum residue limits of pesticides in strawberry [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(3): 460–468.

[22] 王华丽, 张霁月, 骆鹏杰, 等. GB 2760-2011 中部分食品添加剂的技术必要性再评估研究[J]. 中国食品添加剂, 2013(4): 75–82.
WANG HL, ZHANG JY, LUO PJ, *et al*. Study on reevaluation of justification on food additives of GB 2760-2011 [J]. China Food Additives, 2013(4): 75–82.

[23] 张俭波. 《食品添加剂使用标准》(GB2760)修订主要内容介绍[J]. 饮料工业, 2014(4): 1–3.
ZHANG JB. Introduction to the main revisions of the "*Food additive use standard*" (GB 2760) [J]. Beverage Industry, 2014(4): 1–3.

[24] 王永莲, 刘刚, 周凯, 等. 超高效液相色谱串联质谱法测定白菜、青椒和葡萄中的仲丁胺[J]. 农产品质量与安全, 2018(1): 75–79.
WANG YL, LIU G, ZHOU K, *et al*. Determination of 2-aminobutane in chinese cabbage, green pepper, and grapes by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2018(1): 75–79.

[25] 周蓉, 曹赵云, 赵肖华, 等. 柱前衍生/高效液相色谱法测定果蔬中仲丁胺残留[J]. 分析测试学报, 2017, 36(6): 778–782.
ZHOU R, CAO ZY, ZHAO XH, *et al*. Determination of sec-butylamine

residues in fruits and vegetables by pre-column derivatization/high performance liquid chromatography [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, 36(6): 778–782.

[26] 陈晨, 刘佳, 赵静. 气相色谱-质谱联用法同时测定食品中仲丁胺与其他烷基胺残留[J]. 分析测试学报, 2024, 43(5): 689–695.
CHEN C, LIU J, ZHAO J. Simultaneous determination of sec-butylamine and other alkylamine residues in food by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(5): 689–695.

[27] 李娟, 张敏, 王强. 超高效液相色谱-丹磺酰氯衍生法测定果蔬中仲丁胺残留[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(10): 289–294.
LI J, ZHANG M, WANG Q. Determination of sec-butylamine residues in fruits and vegetables by ultra - high performance liquid chromatography with dansyl chloride derivatization [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(10): 289–294.

[28] 郝蔚霞. 气相色谱法测定果蔬中防腐剂仲丁胺残留量[J]. 理化检验-化学分册, 2012(1): 46–48.
HAO WX. Gc determination of residual amount of the preservative butylamine in fruits and vegetables [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2012(1): 46–48.

[29] 韩梅, 胡莉, 杨晓凤, 等. 顶空气相色谱法快速测定水果中仲丁胺的残留量[J]. 江西农业学报, 2014, 26(5): 98–100.
HAN M, HU L, YANG XF, *et al.* Rapid determination of sec-butylamine residue in fruits by headspace gas chromatography [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2014, 26(5): 98–100.

[30] 丁华, 王婧, 赵明明, 等. 超高效液相色谱-柱前衍生法测定葡萄和大白菜中防腐保鲜剂仲丁胺的残留[J]. 农村经济与科技, 2017(S1): 55–56.
DING H, WANG J, ZHAO MM, *et al.* Determination of the residual of 2-butylamine in grapes and Chinese cabbage by ultra-high-performance liquid chromatography-pre-column derivatization method [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2017(S1): 55–56.

[31] 吕军. 果蔬农药残留检测样本制备与质量控制技术研究[J]. 农产品质量与安全, 2016(6): 37–40, 46.
LV J. Research on sample preparation and quality control technology for pesticide residue detection in fruits and vegetables [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2016(6): 37–40, 46.

[32] 纪淑娟, 于兰洁, 刘玲, 等. 响应曲面法优化仲丁胺气相色谱检测的衍生条件[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 211–214.
JI SJ, YU LJ, LIU L, *et al.* Optimization of derivatization conditions for gas chromatographic determination of sec-butylamine by response surface methodology [J]. Food Science, 2012, 33(8): 211–214.

[33] 赵伟, 孙丽, 周芳. 响应曲面法优化仲丁胺分光光度检测的衍生条件[J]. 农产品质量与安全, 2025, 35(2): 45–50.
ZHAO W, SUN L, ZHOU F. Optimization of derivatization conditions for spectrophotometric determination of sec-butylamine by response surface methodology [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2025, 35(2): 45–50.

[34] 刘帅, 肖泽苗, 鄢韬, 等. 气相色谱-串联质谱法测定蔬菜、水果中百菌清残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(24): 23–28.
LIU S, XIAO ZM, YAN T, *et al*. Determination of chlorothalonil residues in vegetables and fruits by gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(24): 23–28.

(责任编辑: 冯东慧　安香玉)