DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251027002
引用格式: 李存仙, 韦国清, 张霞, 等. 液相色谱-串联质谱法检测杨梅中农药残留基质效应研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 150–156.
LI CX, WEI GQ, ZHANG X, *et al*. Study on matrix effects of pesticide residue detection in *Myrica rubra* by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 150–156. (in Chinese with English abstract).

液相色谱-串联质谱法检测杨梅中农药残留基质效应研究

李存仙[1], 韦国清[1*], 张　霞[2], 毛　莉[1], 宇飞燕[1]
(1. 楚雄州疾病预防控制中心, 楚雄　675000; 2. 姚安县疾病预防控制中心, 楚雄　675300)

摘　要: 目的　研究杨梅中农药残留基质效应的影响因素和优化策略。**方法**　通过液相色谱-串联质谱法分别在不同的前处理方法、不同的农药和基质浓度(低、中、高浓度)、添加保护剂及改变液相色谱流速条件下, 对杨梅中农药残留进行检测, 分析其对基质效应的影响程度。运用方差分析比较不同检测条件的基质效应差异, 检验水准 0.05。**结果**　在国家标准方法的基础上分别添加石墨化碳黑吸附剂、替换盐析剂、酸化乙腈等优化前处理条件能有效降低或消除基质效应; 不同农药质量浓度的基质效应存在差异, 中质量浓度(50 μg/L、100 μg/L)相较于低质量浓度(5 μg/L、10 μg/L)和高质量浓度(150 μg/L、200 μg/L)表现出较弱的基质效应; 不同基质稀释倍数的基质效应存在差异, 高稀释倍数(稀释×100)无基质效应, 中稀释倍数(稀释×50、×10、×5、×2)表现为弱基质效应, 未稀释的原液表现为强基质效应; 添加分析保护剂较标准方法能明显消除基质效应; 不同液相色谱流速的基质效应存在差异, 流速 0.1 mL/min 相较于 0.3 mL/min 和 0.2 mL/min 表现出强基质效应。**结论**　采用液相色谱-串联质谱法检测杨梅等复杂基质中农药残留时, 通过优化前处理方法、选择适宜基质稀释倍数与农药检测浓度、添加分析保护剂及设定适配流速, 可有效降低或消除基质效应。

关键词: 杨梅; 液相色谱-串联质谱法; 农药残留; 基质效应

Study on matrix effects of pesticide residue detection in *Myrica rubra* by liquid chromatography-tandem mass spectrometry

LI Cun-Xian[1], WEI Guo-Qing[1*], ZHANG Xia[2], MAO Li[1], ZI Fei-Yan[1]
(1. *Chuxiong Prefecture Center for Disease Control and Prevention*, *Chuxiong* 675000, *China*;
2. *Yaoan Prefecture Center for Disease Control and Prevention*, *Chuxiong* 675300, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the influencing factors and optimization strategies for the matrix effects in pesticide residue analysis in *Myrica rubra*. **Methods**　Pesticide residues in *Myrica rubra* were detected using liquid chromatography-tandem mass spectrometry under different conditions: Various sample pretreatment methods,

收稿日期: 2025-10-27
第一作者: 李存仙(1978—), 女, 副主任技师, 主要研究方向为卫生理化检验。E-mail: 1784024931@qq.com
***通信作者:** 韦国清(1996—), 男, 检验师, 主要研究方向为卫生理化检验、流行病与卫生统计学。E-mail: 1793295683@qq.com

different pesticide and matrix concentrations (low, medium, high), the addition of analyte protectants and varying liquid chromatography flow rates. The impact of these conditions on the matrix effect was analyzed. Analysis of variance (ANOVA) was used to compare the differences in matrix effects under different detection conditions, with a significance level of α=0.05. **Results** Optimizing the pretreatment conditions based on the national standard method—specifically by adding graphitized carbon black adsorbent, replacing the salting-out agent and using acidified acetonitrile—effectively reduced or eliminated the matrix effects. The matrix effects varied with pesticide concentration, showed a weaker effect at medium concentrations (50 μg/L, 100 μg/L) compared to low (5 μg/L, 10 μg/L) and high concentrations (150 μg/L, 200 μg/L). Different matrix dilution factors also resulted in varying matrix effects: High dilution (×100) showed no matrix effect, medium dilutions (×50, ×10, ×5, ×2) exhibited a weak matrix effects, and the undiluted sample extract showed a strong matrix effects. The addition of analyte protectants significantly eliminated the matrix effects compared to the standard method. The matrix effects also differed with liquid chromatography flow rates, with a flow rate of 0.1 mL/min demonstrating a stronger matrix effect compared to 0.3 mL/min and 0.2 mL/min. **Conclusion** When detecting pesticide residues in complex matrices like *Myrica rubra* using liquid chromatography-tandem mass spectrometry, the matrix effect can be effectively reduced or eliminated by optimizing the sample pretreatment method, selecting appropriate matrix dilution factors and pesticide concentrations, adding analyte protectants and setting compatible flow rates.

KEY WORDS: *Myrica rubra*; liquid chromatography-tandem mass spectrometry; pesticide residues; matrix effects

0　引　言

杨梅是中国西南地区的特色水果, 因其高食用和药用价值, 备受青睐。但其栽培中易受果蝇、白腐病等病虫害侵袭, 严重影响品质和产量。农药的合理使用是保障杨梅安全生产的关键措施。然而, 农药残留超标导致的食品安全问题日益突出, 尤其是杨梅集中上市时存在急性摄入风险。因此, 建立精准的农药残留检测技术对食品安全监管至关重要[1–3]。

液相色谱-串联质谱技术具高灵敏度、多残留同步检测的能力, 是当下农药残留检测的主流方法[4–5]。但基质复杂, 富含有机酸、色素和糖类的样品, 在液相色谱-串联质谱法分析中易引发显著的基质效应(matrix effect, ME), 即共流出物干扰目标物的离子化效率, 导致检测信号增强或抑制, 影响定量准确性[6–10]。研究表明, 含有磷酸基(–P=O)、羟基(–OH)、氨基(–NH_2)等极性基团的农药在复杂基质中更易产生 ME[11–12]。当前研究多集中于谷物、叶菜等基质, 对高色素、高有机酸类果蔬杨梅的 ME 机制缺乏系统探讨。

目前常用来降低或消除 ME 的方法有标准添加法、同位素内标法、基质净化法[13–18]、基质匹配标准溶液法[19–23]、使用分析保护剂[24–26]等, 但针对杨梅等特殊基质的适配性仍需优化。本研究采用液相色谱-串联质谱法, 以杨梅为对象, 系统评估前处理方法、农药浓度、基质稀释度、分析保护剂及色谱条件对 ME 的影响, 并针对性优化关键参数, 旨在明确杨梅中农药残留 ME 的作用规律与优化策略, 最终建立适用于杨梅等复杂基质的农药残留检测方案, 为精准风险评估提供依据。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

1.1.1　样品来源

本研究所用样品(杨梅)来源于楚雄州本地市场, 验证为空白样品。

1.1.2　试剂与仪器

16 种农药(灭蝇胺、涕灭威、涕灭威砜、涕灭威亚砜、残杀威、哒螨灵、乙螨唑、炔螨特、苯醚甲环唑、烯酰吗啉、嘧霉胺、三唑酮、丙环唑、戊唑醇、吗菌灵、甲霜灵)混合标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL, 货号 S179935, 天津阿尔塔科技有限公司); 乙腈(货号 F23N5N202)、甲醇(货号 F2405M201)(色谱纯, 美国 Thermo Fisher Scientitc International 股份有限公司); QuEChERS 提取盐包(货号 5982-0650)、净化管(货号: 5982-5021)(美国 Agilent Technologies 股份有限公司); 氯化钠(分析纯, 货号 20220107, 国药集团化学试剂有限公司); 甲酸(色谱纯, 货号 220906)、*D*-山梨醇(纯度 97%, 货号 WXBD7574V)(德国 Sigma-Aldrich Chemie 股份有限公司); *L*-谷氨酸单钠(纯度 99%, 货号 P2831265)、3-乙氧基-1,2-丙二醇(纯度 98%, 货号 P3211845)(上海泰坦科技有限公司); 试验用水为超纯水。

Qsight 210 液相色谱-串联三重四极杆质谱仪(美国 PerkinElmer U.S.有限责任公司); AccucorrTMaQ 色谱柱(150 mm × 2.1 mm, 2.6 μm, 美国赛默飞世尔科技公司)。

1.2 方 法

1.2.1 标准溶液的配制

根据需要准确吸取一定量的 16 种农药混合标准液于 100 mL 容量瓶中，用甲醇稀释得到不同质量浓度的混合标准工作液。

1.2.2 不同前处理条件的优化

以 GB 23200.121—2021《食品安全国家标准 植物源性食品中 331 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱-质谱联用法》为参考，设置 A、B、C、D 4 种前处理条件，考察其对 ME 的影响：条件 A：按 GB 23200.121—2021 方法操作。准确称取 10.00 g 杨梅汁于 50 mL 离心管中，加入 10 mL 乙腈，涡旋振荡 1 min；随后加入 QuEChERS 提取盐包(含 4 g 无水硫酸镁、1 g 氯化钠、1 g 柠檬酸钠、0.5 g 柠檬酸氢二钠)及一颗陶瓷均质子，剧烈振荡 1 min，4200 r/min 离心 5 min。取 1200 μL 上清液至含 150 mg 无水硫酸镁和 25 mg N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA)吸附剂的净化管中，涡旋混匀 1 min (2500 r/min)，4200 r/min 离心 5 min；取 800 μL 上清液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后供液相色谱-串联质谱仪分析；条件 B：除将 QuEChERS 提取盐包替换为 3 g 氯化钠外，其余步骤同条件 A；条件 C：在条件 A 的净化步骤中额外添加 7.5 mg 石墨化碳黑(graphitized carbon black, GCB)，用于吸附样品中的色素；条件 D：在条件 A 的提取步骤中，将乙腈替换为含 0.1%甲酸的乙腈溶液，其余步骤不变。

1.2.3 不同农药质量浓度对基质效应的影响

参照 GB 23200.121—2021 中水果样品的处理方法，在杨梅汁样品中分别添加低(5 μg/L、10 μg/L)、中(50 μg/L、100 μg/L)、高(150 μg/L、200 μg/L) 3 个质量浓度梯度的标准溶液进行加标检测。同时设置相应浓度的纯溶剂(甲醇)加标样品作为对照，用于 ME 的计算。

1.2.4 不同基质稀释倍数对基质效应的影响

取经 GB 23200.121—2021 方法处理后的样品基质溶液，依次用甲醇稀释为 100、50、10、5 和 2 倍稀释的基质溶液，再加入相应标准溶液进行检测。同步测定对应浓度的溶剂加标样品，作为计算 ME 的参照。

1.2.5 分析保护剂的使用

配制分析保护剂溶液：将称取 10 g *D*-山梨醇(50 mg/mL)、10 g *L*-谷氨酸单钠和 10 g 3-乙氧基-1,2-丙二醇溶于 100 mL 乙腈/水(1:1，*V*:*V*)混合溶液中。在按 GB 23200.121—2021 方法处理得到的待测液中，每 1 mL 提取液加入 10 μL 上述分析保护剂后进行检测，未添加保护剂的样品响应值作为计算 ME 的参照。

1.2.6 不同液相色谱流速的影响

在其他仪器条件参照 GB 23200.121—2021 的前提下，分别设定液相色谱流速为 0.3、0.2 和 0.1 mL/min，对样品进行检测，比较不同流速对 ME 的影响。

1.2.7 基质效应的评价

ME 按照公式(1)计算：

$$ME/\%=A/B\times100\% \quad (1)$$

式中：ME 为基质效应，*A* 为基质加标样品中目标物的响应；*B* 为纯溶剂加标样品中目标物的响应。

根据 ME 值判断 ME 程度：ME=1.0 表示无 ME；ME<1.0 为基质抑制效应；ME>1.0 为基质增强效应。当 0.8≤ME≤1.2 为弱 ME，0.5<ME<0.8 或 1.2<ME<1.5 为中等 ME，ME≤0.5 或 ME≥1.5 为强 ME[6]。

1.3 数据处理

采用 Excel 97-2003 软件整理数据，各组 ME 结果以平均值±标准偏差表示。使用单因素方差分析比较不同实验条件下的 ME 差异，设定检验水准 α=0.05。

2 结果与分析

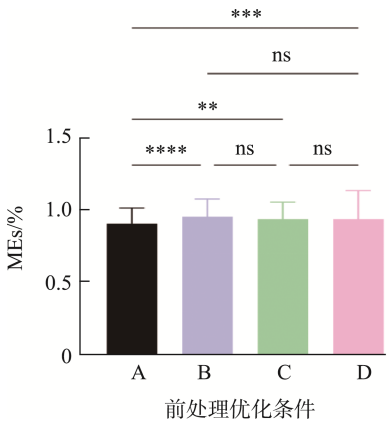
2.1 不同前处理优化条件比较

对 A、B、C、D 4 种前处理条件的杨梅汁检测结果进行统计学分析，发现优化条件 B、C、D 与 A 的 ME 存在显著差异(P<0.05)，有统计学意义，详见表 1、图 1。分别添加石墨化碳黑吸附剂、替换盐析剂、酸化乙腈等优化条件，其响应值与标准方法相比，表现为较弱的 MEs，与徐艺芮等[10]、

表 1 4 种前处理优化条件 MEs 结果

Table 1 Results of MEs under 4 kinds of pretreatment optimization conditions

组别	样本量/个	MEs	
		平均值	相对标准偏差
条件 A	225	0.930	0.111
条件 B	225	0.981	0.123
条件 C	225	0.966	0.117
条件 D	225	0.962	0.198



注：ns 表示无显著性，P>0.05；**表示差异极显著，P<0.01；***表示差异强极显著，P<0.001；****表示差异超强极显著，P<0.0001；下图同。

图 1 4 种前处理优化条件 MEs 显著性差异分析

Fig.1 Analysis of significant differences in MEs among 4 kinds of pretreatment optimization conditions

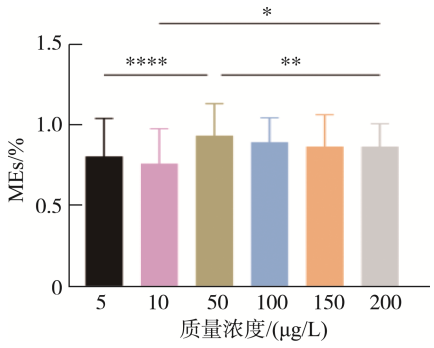
林涛等[27]研究结果部分一致, 条件 B(以氯化钠替代缓冲盐)通过简化盐析步骤, 减少了共萃取的非靶标离子干扰。条件 C(添加 GCB)的改善最为直接有效, 因其特异性吸附了杨梅汁中导致 MEs 的主要干扰物—花青素等色素。条件 D(酸化乙腈)则通过调节提取相的质子化环境, 减少了极性基质成分的共萃取。对于杨梅等复杂基质, 在标准 QuEChERS 流程中, 针对性去除色素(如添加 GCB)是克服强 ME 的最有效策略。这为同类产品的精准检测提供了明确且实用的前处理优化方向。

2.2　不同农药质量浓度比较

对添加不同浓度目标物的杨梅汁检测结果进行统计学分析, 发现不同农药质量浓度的 MEs 存在显著差异(P<0.05), 有统计学意义。农药的质量浓度可影响 MEs, 高质量浓度和低质量浓度相比中质量浓度表现 MEs 增强, 与庹见伟等[28]、刘进玺等[29]研究结果部分一致, 详见表 2、图 2。在低质量浓度区间, 农药信号强度较弱, 极易受到基质中共萃物在质谱离子化过程中的竞争性抑制影响。在高质量浓度区间, 农药本身信号饱和, 或基质中共萃的高浓度干扰物(如色素、有机酸)在净化不完全时大量进入系统, 可能引发更强的离子抑制或背景干扰。结果提示, MEs 并非与浓度呈简单线性关系, 而是存在一个干扰相对较小的“最优质量浓度窗口”。在本研究条件下, 该窗口大致位于 50~100 μg/L 的中等质量浓度范围。这一发现对实际检测工作具有明确指导意义: 在方法开发和验证过程中, 必须考察目标质量浓度范围内的 MEs 变化, 尤其应关注低质量浓度(接近定量限)下的强烈抑制作用, 并优先选择在“最优质量浓度窗口”附近进行定量校准, 或采用基质匹配标准曲线以保证低质量浓度检测的准确性。

表 2　不同农药质量浓度 MEs 统计结果
Table 2　Statistical results of MEs for different pesticide mass concentrations

组别	样本量/个	MEs	
		平均值	相对标准偏差
低质量浓度(5 μg/L、10 μg/L)	84	0.843	0.119
中质量浓度 (50 μg/L、100 μg/L)	84	0.954	0.086
高质量浓度 (150 μg/L、200 μg/L)	84	0.904	0.092



注: *表示差异显著, P<0.05。

图 2　不同农药质量浓度 MEs 显著性差异分析
Fig.2　Analysis of significant differences in MEs of different pesticide mass concentration levels

2.3　不同基质稀释倍数比较

对不同稀释倍数的杨梅汁检测结果进行统计学分析, 发现不同基质浓度的 MEs 存在显著差异(P<0.05), 有统计学意义。高稀释倍数(稀释×100)无 MEs; 中稀释倍数(稀释×50、×10、×5、×2)相较于高稀释倍数表现为弱 MEs; 未稀释的原液表现为强 MEs。随稀释倍数的增加, MEs 明显减弱, 该结论与邱世婷等[30]、刘芫汐等[31]、李丽春等[32]研究结果基本一致, 详见表 3、图 3。增加稀释倍数, 直接降低了单位体积进样液中基质共萃物的绝对浓度, 从而减少了这些干扰物在质谱离子源中与目标分析物竞争电荷或干扰离子化过程的概率, 同时, 高倍稀释使最终的基质提取液在理化性质上更接近纯溶剂标准品的溶液状态, 从而降低了因基质差异引起的离子化效率偏差。这提示样品稀释是减弱甚至消除杨梅等复杂 MEs 的直接、有效手段。当稀释倍数足够高时, MEs 可被抑制到可接受的水平。同时必须认识到, 稀释策略会等比例降低目标化合物的响应信号, 可能影响方法的检出限和定量限, 因此对稀释倍数的选择应根据实际需求。

表 3　不同基质稀释倍数的 MEs 统计结果
Table 3　Statistical results of MEs at different dilution ratios

组别	样本量/个	MEs	
		均值	相对标准偏差
高稀释倍数(×100)	48	1.000	0.067
中稀释倍数 (×50、×10、×5、×2)	48	0.954	0.057
不稀释(原液)	48	0.656	0.092

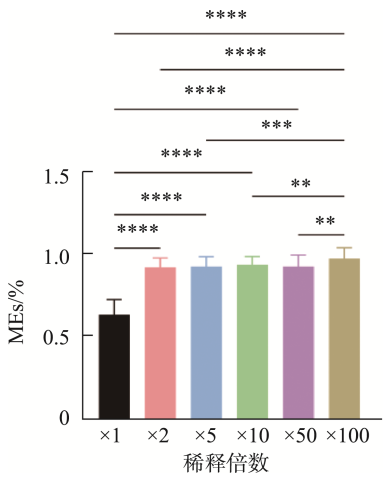


图 3　不同基质稀释倍数的 MEs 显著性差异分析
Fig.3　Analysis of significant differences in MEs at different matrix dilution ratios

2.4 分析保护剂

对添加分析保护剂的杨梅汁检测结果进行统计学分析，发现添加分析保护剂与不添加保护剂的标准方法 MEs 存在显著差异(P<0.05)，有统计学意义。与标准方法相比，分析保护剂能明显消除 ME，与罗璇等[26]、许秀丽等[25]研究一致，详见表 4、图 4。*D*-山梨醇和 3-乙氧基-1,2-丙二醇等保护剂分子在电喷雾离子源中易于质子化或形成加合离子。它们能优先与基质中共存的非挥发性盐类、表面活性剂或高极性干扰物竞争电荷或液滴表面位置，从而“屏蔽”或“饱和”了这些干扰物对目标农药离子化过程的抑制作用。*L*-谷氨酸单钠等组分可以调节液滴的表面张力、黏度和蒸发速率，改善电喷雾过程的稳定性，使目标分析物与基质共萃物之间的离子化行为差异减小，响应更趋近于纯溶剂标准品。这提示采用多组分分析保护剂是一种高效、主动的 MEs 补偿策略，但本研究仅考察了杨梅中 16 种农药分析保护剂的有效性，对于其他基质或农药是否有保护作用还需考究。

表 4 添加分析保护剂与标准方法的 MEs 统计结果
Table 4 Statistical results of MEs of adding analytical protectants and standard methods

组别	样本量/个	MEs	
		均值	相对标准偏差
标准方法	225	0.930	0.111
添加保护剂	225	1.003	0.211

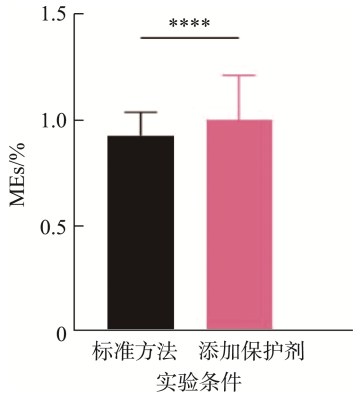


图 4 添加分析保护剂与标准方法的 MEs 显著性差异分析
Fig.4 Analysis of significant difference of MEs between adding analytical protectants and standard methods

2.5 仪器参数

对不同液相色谱流速下杨梅汁检测结果进行统计学分析，发现不同流速的 MEs 结果存在显著差异(P<0.05)，有统计学意义。研究发现，调整液相色谱流速可影响 MEs，与王丹[13]研究一致，0.1 mL/min 的流速相较于 0.3 mL/min 和 0.2 mL/min 表现出强 MEs，详见表 5、图 5。在较低流速下，电喷雾产生的初始液滴尺寸更小、比表面积更大，同时液滴中溶剂蒸发到形成气相离子的过程更为缓慢。这导致基质共萃物与目标分析物在液滴表面及内部的相互作用时间延长，增强了共萃物对目标物离子化过程的竞争性抑制。同时，过低的流速可能无法维持稳定的电喷雾，易受基质中非挥发性组分在毛细管尖端沉积的影响，导致离子化过程不稳定，进而放大基质差异带来的信号偏差。在本研究条件下，0.2~0.3 mL/min 的流速范围较 0.1 mL/min 更有利于减弱 MEs。这提示在方法开发中，流速优化应作为降低基质干扰的常规考察环节。

表 5 不同液相色谱流速 MEs 统计结果
Table 5 Statistical results of MEs at different liquid chromatography flow rates

流速/(mL/min)	样本量/个	MEs	
		均值	相对标准偏差
0.3	45	0.987	0.079
0.2	45	0.925	0.081
0.1	45	0.846	0.367

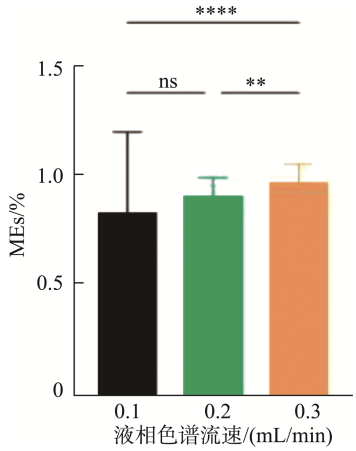


图 5 不同液相色谱流速 MEs 显著性差异分析
Fig.5 Analysis of significant differences in MEs at different liquid chromatography flow rates

3 结 论

本研究系统评估了前处理方法、农药质量浓度、基质稀释倍数、分析保护剂及色谱流速对液相色谱-串联质谱法检测杨梅中农药残留时 MEs 的影响。研究发现，前处理选择是关键，在国家标准 QuEChERS 方法基础上，添加 GCB 吸附剂是消除杨梅中色素(如花青素)所致 MEs 最直接有效的手段，而且使用酸化乙腈提取或简化盐析步骤(氯化钠替代缓冲盐)也能不同程度地减弱基质干扰。其次，要权衡好农药质量浓度与稀释策略，农药质量浓度存在“最优窗口”(本研究约为 50~100 μg/L)，此范围内 MEs 最弱，也要特别关注低质量浓度农药残留检测情形时容易出现的强 MEs 情况。基质稀释倍数越高，MEs 越弱，但需权衡其对

方法灵敏度的影响。同时, 分析保护剂与仪器参数对 MEs 有显著影响, 采用 *D*-山梨醇、*L*-谷氨酸单钠与 3-乙氧基-1,2-丙二醇组成的混合保护剂可主动补偿基质抑制效应。最后, 色谱流速不宜过低, 维持于 0.2~0.3 mL/min 有利于获得更稳定的离子化效率与更弱的 MEs。

综上, 针对杨梅等高色素、高有机酸复杂基质, 建立精准农药残留检测方案时, 建议优先采用 GCB 净化结合中等浓度校准、适当基质稀释和添加分析保护剂的策略, 并优化色谱流速, 可系统性地降低或消除 MEs, 提升定量准确性。本研究也存在一定局限性, 研究结论主要以杨梅基质提供参考, 其普适性有待在蓝莓、桑葚等类似水果中进一步验证, 同时仪器系统误差可能影响低浓度农药的 ME 评估。后续研究可结合高分辨率质谱技术, 深入揭示杨梅特征组分与农药分子的相互作用机制。

参考文献

[1] 杨金伟, 熊碧玉, 陆大智, 等. 农产品质量安全问题及食品检测技术发展现状、展望[J]. 食品安全导刊, 2024(16): 39–42.
YANG JW, XIONG BY, LU DZ, *et al*. The quality and safety of agricultural products and the development status and prospect of food detection technology [J]. China Food Safety Magazine, 2024(16): 39–42.

[2] PENG S, GUOTAO D, DANQI R, *et al*. Pesticide residues in agricultural end-products and risk assessment for consumers in North China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(11): 1392.

[3] YAN Z, NIE J, CHENG Y, *et al*. Method development, validation, and risk assessment of multiple pesticide residues of fruits in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(12): 18826–18841.

[4] HYOSUB L, YURAN C, GEONHEE J, *et al*. Comparison of recovery efficiency and matrix effect reduction in pesticide residue analysis: QuEChERS with D-SPE, SPE, and FaPEx in apples and Korean cabbage [J]. Analytical Methods: Advancing Methods and Applications, 2023, 15(30): 3709–3716.

[5] SONG W, LIU K, CHEN L, *et al*. Determination of 118 pesticide residues in urine by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(1): 52–63.

[6] 闫君, 陈婷, 张婕, 等. 农药残留检测的基质效应研究综述[J]. 食品科技, 2024, 49(6): 335–341.
YAN J, CHEN T, ZHANG J, *et al*. A Review of matrix effects in pesticide residue detection [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(6): 335–341.

[7] 尤明慧, 杨宁霞, 张长秋, 等. 食用菌中农药残留检测的基质效应及其补偿策略[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 16(15): 156–167.
YOU MH, YANG NX, ZHANG CQ. Matrix effects and its compensation strategy of pesticide residue detection in edible fungi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 16(15): 156–167.

[8] 谭洁, 韦卓才, 梁善范, 等. 基质效应对测定农产品中农药残留影响的研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(5): 193–196.
TAN J, WEI ZC, LIANG SF. A review of matrix effects on determination of pesticide residues in agricultural products [J]. The Food Industry, 2022, 43(5): 193–196.

[9] 陈璐, 李怀平, 王顾希, 等. GC-MS/MS 法测定 5 类茶叶中 15 种农药残留产生的基质效应研究[J]. 计量与测试技术, 2024, 50(12): 7–15.
CHEN L, LI HP, WANG GX, *et al*. Matrix effects in determination of 15 pesticide residues in five types of tea in GC-MS/MS analysis [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 50(12): 7–15.

[10] 徐艺芮, 张雪, 王淼, 等. QuEChERS-液相色谱-串联质谱法测定 4 种蔬菜中 19 种农药的基质效应研究[J]. 食品安全导刊, 2024(11): 101–105.
XU YR, ZHANG X, WANG M, *et al*. Determination of matrix effects of 19 pesticides in 4 vegetables by QuEChERS-liquid chromatographytandem mass spectrometry [J]. China Food Safety Magazine, 2024(11): 101–105.

[11] 陈韵贤, 吴春梅, 梁志刚. 30 种有机磷农药残留在 5 种蔬菜中的基质效应比较[J]. 现代农业科技, 2015(13): 146–148.
CHEN YX, WU CM, LIANG ZG. Matrix effect comparison of residues of 30 kinds of organic-phosphorous pesticides on five kinds of vegetables [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(13): 146–148.

[12] 何春慧, 邱小元, 钟雪娥, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法评价果蔬中 77 种农药的基质效应[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 182–191.
HE CH, QIU XY, ZHONG XE, *et al*. Evaluation of matrix effects of 77 kinds of pesticides in fruits and vegetables by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23): 182–191.

[13] 王丹. 基于色谱-串联质谱技术测定果树中的农药多残留[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
WANG D. Detection of pesticide residues in fruits and vegetables based on chromatography-tandem mass spectrometry [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.

[14] KEMMERICH M, RIZZETTI TM, MARTINS ML, *et al*. Optimization by central composite design of a modified QuEChERS method for extraction of pesticide multiresidue in sweet pepper and analysis by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(3): 728–739.

[15] ES R, KONSTANTINA N, MARILENA D, *et al*. Development and validation of pesticide residues determination method in fruits and vegetables through liquid and gas chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS and GC-MS/MS) employing modified QuEChERS method and a centrifugal vacuum cconcentrator [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1936.

[16] 王娇, 齐沛沛, 刘之炜, 等. 液相色谱-串联质谱法分析葡萄中农药残留的基质效应评价[J]. 浙江农业科学, 2018(3): 1750–1759.
WANG J, QI PP, LIU ZW, *et al*. Evaluation of matrix effects in pesticide residue analysis in *Vitis vinifera* by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018(3): 1750–1759.

[17] 范叶, 易泽夫, 王壮波. 蔬菜农药残留检测中基质效应影响因素分析[J]. 蔬菜, 2019(2): 60–64.
FAN Y, YI ZF, WANG ZB. Analysis of influencing factors of matrix effect in vegetable pesticide residues detection [J]. Vegetables, 2019(2): 60–64.

[18] 高娜, 孙程鹏, 许炳雯, 等. 液相色谱串联质谱法测定不同蔬菜中农药多残留的基质效应[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 310–317.
GAO N, SUN CP, XU BW, *et al*. Matrix effects in the analysis of pesticides multiresidue in vegetables by LC-MS/MS [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 310–317.

[19] 许炳雯, 葛祥武, 刘雪红, 等. 蔬菜水果中有机磷农药的基质效应分析及检测方法选择[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 8784–8792.
XU BW, GE XW, LIU XH, *et al*. Matrix effects analysis and determination method selection of organophosphrous pesticides in vegetables and fruits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(23): 8784–8792.

[20] 肖元, 张学智, 王双儿. 农产品农药残留检测基质效应探索与分析[J]. 新疆农业科技, 2025(1): 38–43.
XIAO Y, ZHANG XZ, WANG SER. Exploration and analysis of matrix effect in detection of pesticide residues in agricultural products [J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2025(1): 38–43.

[21] 欧阳位麒. UPLC-MS/MS 法测定 10 种果蔬中 19 种农药残留的基质效应研究[J]. 现代农业科技, 2025(9): 138–143.
OUYANG WQ. Matrix effect of 19 pesticide residues in 10 kinds of fruits and vegetables by UPLC-MS/MS [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(9): 138–143.

[22] 李巧莲, 肖舒元, 王韵. LC-MS/MS 法测定农药残留的基质效应研究[J]. 电大理工, 2023(1): 19–23, 33.
LI QL, XIAO SY, WANG Y. Study on matrix effects of pesticide residues by LC-MS/MS method [J]. Study of Science and Engineering at RTVU, 2023(1): 19–22, 33.

[23] 周剑, 王敏, 杨梦瑞. 液相色谱质谱分析中的基质效应研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(1): 67–70.
ZHOU J, WANG M, YANG MR. Matrix effect in liquid chromatography-mass spectrometry analysis [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2018(1): 67–70.

[24] 刘燕, 张红妮, 程超, 等. QuEChERS-GC-MS/MS 法测定 6 种蔬菜中农药残留的基质效应[J]. 食品工业, 2025, 2(46): 301–305.
LIU Y, ZHANG HN, CHENG C, *et al*. Determination of matrix effect of pesticide residues in 6 vegetables by QuEChERS GC-MS/MS method [J]. The Food Industry, 2025, 2(46): 301–305.

[25] 许秀丽, 赵海香, 李礼, 等. 分析保护剂补偿基质效应-气相色谱-质谱法快速测定水果中 40 种农药残留[J]. 色谱, 2012, 30(3): 267–272.
XU XL, ZHAO HX, LI L, *et al*. Rapid determination of 40 pesticide residues in fruits using gas chromatography-mass spectrometry coupled with analyte protectants to compensate for matrix effects [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2012, 30(3): 267–272.

[26] 罗璇, 梅真, 崔梦琪, 等. 分析保护剂对韭菜中农药残留检测基质效应补偿作用的评价及应用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(17): 191–196.
LUO X, MEI Z, CUI MQ, *et al*. Evaluation and application of analyte protectants in compensating matrix effects for pesticide residue analysis in Chinese chives [J]. Food Research and Development, 2025, 46(17): 191–196.

[27] 林涛, 陈兴连, 刘兴勇, 等. QuEChERS-三重四极杆串联质谱测定柑橘中农药基质效应的方法研究[J]. 果树学报, 2021, 38(4): 613–622.
LIN T, CHEN XL, LIU XY, *et al*. A study on matrix effect of QuEChERS-triple quadrupole tandem mass spectrometry in determination of pesticides in citrus [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(4): 613–622.

[28] 庹见伟, 刘君, 周红亮, 等. 基于 UHPLC-MS/MS 法研究 12 种烟碱类农药在 10 种果蔬中的基质效应[J]. 农药, 2025, 64(3): 1–6.
TUO JW, LIU J, ZHOU HL, *et al*. Matrix effects of 12 nicotinoid pesticides in 10 types of fruits and vegetables using UHPLC-MS/MS method [J]. Agrochemicals, 2025, 64(3): 1–6.

[29] 刘进玺, 秦珊珊, 冯书惠, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定食用菌中农药多残留的基质效应[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 171–177.
LIU JX, QIN SS, FENG SH, *et al*. Matrix effects in the analysis of pesticides residues in edible fungi by HPLC-MS/MS [J]. Food Science, 2016, 37(18): 171–177.

[30] 邱世婷, 蒲凤琳, 侯雪, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定 9 种绿叶类蔬菜中 36 种农药多残留的基质效应[J]. 农药学学报, 2018, 20(5): 661–667.
QIU ST, PU FL, HOU X, *et al*. Matrix effects in the analysis of 36 pesticides residues in nine kinds of green leafy vegetables by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2018, 20(5): 661–667.

[31] 刘芫汐, 韩晶, 程韬, 等. 菊花中农药残留检测基质效应研究[J]. 中国药事, 2025, 39(6): 662–672.
LIU YX, HAN J, CHENG T, *et al*. Study on matrix effect of detection of pesticide residue in chrysanthemum [J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2025, 39(6): 662–672.

[32] 李丽春, 刘书贵, 尹怡, 等. QuEChERS结合UPLC-MS/MS测定水产品中 9 种除草剂残留及基质效应[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 258–266.
LI LC, LIU SG, YIN Y, *et al*. Determination of nine herbicide residues in aquatic products using QuEChERS combined with UPLC-MS/MS and evaluation of matrix effects [J]. Food Science, 2020, 41(18): 258–266.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)