DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251226004
引用格式: 黄聪灵, 陈炎, 黄健祥, 等. 热带水果快速检测产品评价与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 175–185.
HUANG CL, CHEN Y, HUANG JX, *et al*. Evaluation and analysis of rapid detection products for tropical fruit [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 175–185. (in Chinese with English abstract).

热带水果快速检测产品评价与分析

黄聪灵[1,2,3], 陈　炎[1,2,3], 黄健祥[1,2,3], 肖泽苗[1,2,3], 王　刚[1,2,3],
万　凯[1,2,3,4], 唐雪妹[1,2,3*]

(1. 广东省农业科学院农业质量标准与监测技术研究所, 广州　510640; 2. 广东省农产品质量安全风险评估重点实验室, 广州　510640; 3. 农业农村部农产品质量安全检测与评价重点实验室, 广州　510640; 4. 广东农科监测科技有限公司, 广州　510640)

摘　要: 目的　对热带水果快速检测产品进行评价与分析。**方法**　以代表性的热带水果(荔枝、香蕉、芒果)为研究对象, 选取市面主流的针对常见风险因子的胶体金快速检测产品, 运用实验室加标盲样评价和实际样品验证两种方法进行质量评价和验证。主要考察产品的假阳性率、假阴性率、产品类型、品牌差异等方面。**结果**　98 个快速检测产品参与加标盲样评价, 符合率 46.9%; 26 个产品参与实际样品验证, 符合率 42.3%; 16 个不同批号的同一产品参与两种方法验证, 有 9 个结果一致, 占比 56.3%。总体来看单卡符合率大于多联卡, 假阴性率超过 5%是导致热带水果快速检测产品不准确的主要原因, 并表现出较大的品牌差异。**结论**　热带水果快速检测产品整体符合率较低, 需加大研发力度, 提升产品质量, 完善产品评价体系。本研究可为热带水果质量安全快速检测技术的优化、标准制定及科学应用提供数据支持和理论参考。

关键词: 热带水果; 农药残留; 快速检测; 质量评价

Evaluation and analysis of rapid detection products for tropical fruit

HUANG Cong-Ling[1,2,3], CHEN Yan[1,2,3], HUANG Jian-Xiang[1,2,3], XIAO Ze-Miao[1,2,3], WANG Gang[1,2,3], WAN Kai[1,2,3,4], TANG Xue-Mei[1,2,3*]

(1. *Institute of Quality Standard and Monitoring Technology for Agro-products*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*; 2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products*, *Guangzhou* 510640, *China*; 3. *Key Laboratory of Testing and Evaluation for Agro-product Safety and Quality*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Guangzhou* 510640, *China*; 4. *Guangdong Agricultural Monitoring Technology Co*., *Ltd*., *Guangzhou* 510640, *China*)

ABSTRACT: Objective　To evaluate and analyze the rapid detection products for tropical fruit. **Methods**　The representative tropical fruits (litchi, banana, mango) were selected as the research objects, and the mainstream colloidal gold rapid detection products for common risk factors were selected. The quality of the products was

收稿日期: 2025-12-26
基金项目: 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(农产品质量安全共性关键技术)(2024CXTD18); 广东省科学技术协会青年科技人才培育计划项目(SKXRC2025509)

第一作者: 黄聪灵(1990—), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为农产品质量安全检测。E-mail: huangcongling@gdaas.cn
***通信作者:** 唐雪妹(1991—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测与评价。E-mail: tangxuemei@gdaas.cn

evaluated and verified by 2 kinds of methods: Laboratory standard blind sample evaluation and actual sample verification. It mainly investigated the false positive rate, false negative rate, product type, brand difference and so on. **Results** A total of 98 rapid detection products participated in the blind sample evaluation with additional standards, with a matching rate of 46.9%; 26 products participated in the actual sample verification, with a matching rate of 42.3%. Among the 16 different batch numbers of the same product that participated in the verification by 2 kinds of methods, 9 results were consistent, accounting for 56.3%. Overall, the matching rate of single-card was higher than that of multi-card, and the false negative rate exceeding 5% was the main reason for the inaccuracy of tropical fruit rapid testing products, which also showed significant brand differences. **Conclusion** The total matching rate of rapid detection products for tropical fruits is relatively low. It is necessary to increase research and development efforts, improve product quality and perfect the product evaluation system. This paper can provide data support and theoretical reference for the optimization, standard formulation and scientific application of rapid testing technology for the quality and safety of tropical fruit.

KEY WORDS: tropical fruit; pesticide residues; rapid detection; quality evaluation

0 引 言

热带水果以其独特的风味、丰富的营养和经济价值，在全球农产品贸易与消费市场中占据着日益重要的地位[1]。以荔枝、芒果、香蕉、火龙果等为代表的产业，不仅是许多热带、亚热带地区农业经济的支柱，也极大地丰富了消费者的膳食选择[2–5]。然而，其产业蓬勃发展背后，质量安全问题始终是制约行业健康可持续发展与影响消费者信心的关键因素。热带和亚热带地区高温高湿的气候特点，为热带水果病虫害的发生提供了便利的气候条件，香蕉枯萎病[6]、荔枝蒂蛀虫[7]、芒果细菌性黑斑病[8]等病虫害发生普遍[9]。为达到防控病虫害的目的，热区种植户不得不加大化学农药使用量或者频次[10–11]，据统计，热区作物农药使用量是全国的 2.0~3.8 倍[12]。此外，热带水果普遍具有采后生理活动旺盛、易腐易损、货架期短的特点，为维持商品品质、延长流通时间，在种植环节的农药使用及采后处理阶段的化学杀菌剂应用难以避免[13]。若管控不当，可能导致农药残留[10]、真菌毒素以及添加剂[14]超标等风险，对人体健康构成潜在威胁。2021—2022 年各省(市、区)市场监督管理部门农药残留监测发现，热带和亚热带水果类超标率高达 31.50%[15]。由于热带水果农药残留例行监测合格率偏低，2024 年农业农村部将香蕉、荔枝、芒果等热带水果列为重点治理品种，在全国主要生产省份开展攻坚整治。

目前，传统基于实验室的色谱、质谱等检测方法虽精准可靠，但存在周期长、成本高、依赖大型仪器和专业操作人员等局限，难以满足产业链各环节，特别是产地源头、批发市场、口岸通关等场景下对风险因子进行实时、现场、高通量筛查的迫切需求[16]。在此背景下，快速检测技术因其简便、快速、成本相对较低且适用于现场筛查的优势，成为了保障热带水果从“田间到餐桌”全过程质量安全的重要技术支撑[17–18]。在众多快速检测技术中，酶抑制法和基于特异性抗原-抗体反应的胶体金免疫层析技术是目前在产业中应用最普遍、最成熟的两个方法。由于酶抑制法只能检测有机磷和氨基甲酸酯类农药，无法覆盖实际生产中高风险的常规农药，会存在用的不检、检的不用的问题[19]。更重要的是，酶抑制法的标准方法的适用基质范围是蔬菜，对于热带水果不适用。因此，热带水果的快速检测技术主要依赖免疫胶体金技术。该技术以其操作直观(通常表现为试纸条形式)、结果判读简单、无需复杂仪器、检测时间短(通常在 10~15 min 内完成)、灵敏度高(香蕉、芒果中克百威检出限可达 0.29 ng/g[20])等特点，在水果等的农药残留的现场初筛中得到了广泛应用[21]，并且初步实现了多种农药残留的现场快速检测[22]。

胶体金快速检测产品的逐步商业化，为产业监管与企业自检提供了有力工具。然而，当前热带水果质量安全快速检测技术的应用与研究仍面临若干挑战与问题。首先，热带水果基质复杂多样(如高糖、高色素、高酸度)，可能对胶体金试剂的层析效率、抗体结合活性产生基质干扰，影响检测结果的准确性与稳定性[23]。其次，市售胶体金快速检测产品质量参差不齐，其灵敏度、特异性、批间稳定性以及对实际样本的检测符合率(与国家标准法对比)缺乏公开、系统的第三方评价数据，导致使用者在产品选择和应用信心上存在困惑[24]。因此，系统评价现有胶体金快速检测产品在典型热带水果基质中的应用效果，明确其技术性能边界与实际应用价值，对于规范快速检测产品市场、指导产业用户科学选择与应用、提升热带水果质量安全风险防控的时效性与精准性具有重要的现实意义。本研究拟以几种具有代表性的热带水果(如荔枝、香蕉、芒果等)为研究对象，选取市面主流的针对常见风险因子的胶体金快速检测产品，通过系统的实验设计，综合评价其灵敏度、特异性、基质适应性、准确度及操作便捷性等关键性能指标，

分析其在真实应用场景下的优势与局限性, 以期为热带水果质量安全快速检测技术的优化、标准制定及科学应用提供数据支持和理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

16 种农药标准溶液(质量浓度为 500 μg/mL 或 1000 μg/mL, 纯度≥99.5%, 中国农业农村部环境保护科研监测所); 快速检测试剂盒来自广东、北京、江苏、湖北、山东、福建、四川的 21 家主流生产厂家, 为避免评价结果对快速检测产品生产企业的影响, 本研究将参评企业分别编码为 A~U。

乙腈、甲醇、乙酸乙酯(色谱纯, 德国 Merck 公司); 甲酸、甲酸铵(纯度≥99.0%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); NaCl、无水 $MgSO_4$(分析纯, 广州化学试剂厂); 乙二胺-N-丙基硅烷化硅胶(primary secondary amine, PSA, 40~60 μm)、石墨化炭黑(graphitized carbon black, GCB, 40~120 μm)(天津博纳艾杰尔科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

LCMS-8040 液相色谱-串联质谱联用仪、GCMS-TQ8040 气相色谱-串联质谱联用仪(日本岛津仪器有限公司); EM204 电子天平(精度 0.01 g, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　加标盲样评价

(1)加标样品制备

荔枝、香蕉、芒果基质空白样品采购自有机商城, 匀浆后称取 10 g 样品, 依次加入 20 mL 乙腈, 1 g NaCl 和 4 g 无水 $MgSO_4$ 振荡离心后, 取上清液 8 mL, 用 PSA+GCB+无水 $MgSO_4$ 振荡去除杂质得到净化液, 过 0.22 μm 有机滤膜得待测液 1, 取 4 mL 净化液氮吹至近干后用 2 mL 乙酸乙酯复溶, 得待测液 2。待测液 1 参考 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》检测方法进行定量检测; 待测液 2 参考 GB 23200.113—2018《食品安全国家标准 植物源性食品中 208 种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱-质谱联用法》。目标物为未检出样品视为后续验证用空白样品。

胶体金快速检测产品的检出限为该农药最大残留限量(maximum residue limits, MRL), 目标物为禁用农药时, 盲样包括空白样品、检出限的 1 倍浓度水平, 每水平 40~50 个平行, 合计 90 个样品; 目标物为常规农药时, 盲样包括空白样品、检出限的 0.5 倍和 1 倍浓度水平, 其中 0.5 倍浓度水平 20 个平行, 空白样品和 1 倍浓度水平各 30~40 个平行, 3 个浓度水平合计 90 个样品。

盲样制备完成后, 参照产品说明书进行快速检测, 以 A 企业产品荔枝中苯醚甲环唑胶体金快速检测卡为例, 称取 2 g 样品, 加入 3 mL 提取液振荡提取 2 min 后, 静置 2 min(必要时需离心), 按照上清液+提取液为 100 μL+150 μL 比例进行稀释, 取 100 μL 稀释液微孔孵育 3 min 后, 将反应液全部转移至检测卡的加样孔中, 反应 5~8 min 后进行结果判读。

(2)加标盲样评价指标

本次加标盲样评价共有 98 个快速检测产品参评, 均为商品化试剂盒, 重点关注热带水果中经常检出的高风险农药因子, 包含荔枝中氯氟氰菊酯、除虫脲、苯醚甲环唑等 7 种农药[1], 芒果中戊唑醇、噻虫胺、苯醚甲环唑、吡唑醚菌酯等 6 种农药[25], 香蕉中吡虫啉、噻虫嗪等 7 种农药[15]。针对这些高风险因子, 选取市场上主流品牌产品进行评价, 具体参数和品牌分布详见表 1。

本次评价主要考察产品的假阳性率、假阴性率、检出限与国家标准的符合性等因素。计算见公式(1)~(2):

$$pf^{-}/\%=100B/(A+B)\% \quad (1)$$

$$pf^{+}/\%=100C/(C+D)\% \quad (2)$$

式中: pf^{-} 为假阴性率; pf^{+} 为假阳性率; A 为阳性样品中快速检测结果为阳性的个数; B 为阳性样品中快速检测结果为阴性的个数; C 为阴性样品中快速检测结果为阳性的个数; D 为阴性样品中快速检测结果为阴性的个数。

若评价产品假阳性率小于等于 15%且同时满足假阴性率小于等于 5%, 则为质量符合要求, 否则为不符合。多联卡中有一项参数不符合, 即视为该产品质量不符合。

1.3.2　真实样品验证评价

样品来源: 实际样品均购买于农贸市场。阴性样品指经 1.3.1(1)的方法定量检测后目标农药残留低于 MRL 或未检出的真实样品, 阳性样品指经定量检测后目标农药残留超过 MRL 的真实或模拟阳性样品。

实际样品的快速检测方法参照产品说明书进行操作。该方法不同于加标盲样的评价程序, 真实样品的阴性和阳性的数量及比例无法预先设定, 且阳性样品中目标物的含量在较宽的范围内, 不是单一的浓度水平。为了更好地比对和验证产品, 采用验证符合率作为评价指标[24], 计算见公式(3)~(4):

阳性样品不符率/%=阳性样品中假阴性个数/阳性样品总数×100%　(3)

阴性样品不符率/%=阴性样品中假阳性个数/阴性样品总数×100%　(4)

参考 1.3.1 中评价标准, 阳性样品不符率小于等于 15%且同时满足阴性样品不符率小于等于 5%为符合质量要求, 否则为不符合。

表 1 加标盲样评价快速检测产品及品牌分布

Table 1 Standard blind samples were added to evaluate the rapid detection products and brand distribution

产品适用基质	产品农药参数	产品数	产品品牌编码
荔枝	氯氟氰菊酯	8	A/F/G/H/J/K/N/O
	除虫脲	6	A/B/C/F/G/R
	水胺硫磷	5	A/B/F/I/P
	苯醚甲环唑	4	C/E/I/J
	毒死蜱	4	A/C/E/I
	吡唑醚菌酯	2	B/E
	氧乐果	2	D/F
	吡唑醚菌酯-除虫脲-氯氟氰菊酯	1	D
	吡唑醚菌醋-苯醚甲环唑-水胺硫磷	3	G/L/Q
	吡唑醚菌酯-苯醚甲环唑-除虫脲-水胺硫磷	4	H/K/N/O
芒果	噻虫胺	9	A/B/C/F/I/J/P/R/S
	戊唑醇	5	A/C/D/F/G
	咪鲜胺	4	D/E/H/M
	苯醚甲环唑	2	A/E
	吡唑醚菌酯	2	A/M
	噻菌灵	1	D
	苯醚甲环唑-噻虫胺	1	D
	吡唑醚菌酯-苯醚甲环唑-噻虫胺	2	G/L
	吡唑醚菌酯-苯醚甲环唑-噻虫胺-戊唑醇	5	H/K/N/O/Q
香蕉	噻虫嗪	8	A/B/C/F/J/L/P/S
	吡虫啉	4	A/C/E/J
	咪鲜胺	3	B/C/E
	噻菌灵	2	B/M
	抑霉唑	2	B/M
	吡虫啉-噻虫嗪-苯醚甲环唑	2	D/G
	吡虫啉-苯醚甲环唑-吡唑醚菌酯	1	L
	吡虫啉-噻虫嗪-苯醚甲环唑-吡唑醚菌酯	6	O/N/Q/H/I/K
	合计	98	/

注: /表示无此数据。

1.4 数据处理

本研究采用 Excel 2010 软件进行数据计算和作图。

2 结果与分析

2.1 加标盲样评价结果

2.1.1 快速检测产品类型比对

本次加标盲样评价共包含荔枝、香蕉、芒果的 4 种类型(单卡、二联卡、三联卡、四联卡)的 98 个快速检测产品，共有 46 个产品符合指标要求，整体符合率 46.9%(表 2)。其中单卡参评 73 个，占参评产品总数的 74.5%，单卡符合率较高，为 53.4%；二联卡只有一个产品且为符合；三联卡参评 9 个，符合率仅 11.1%；四联卡参评 15 个，占参评产品总数的 15.3%，符合率为 33.3%。总体来说，单卡符合率大于多联卡，单卡不符合的主要原因是产品假阴性问题，而多联卡中出现假阴性和假阳性问题的概率基本持平。相对于单卡，市场对多联产品提出了更为严格的要求，要实现一个样品中多个参数一次性提取和同时检测，企业较难保障各参数的准确性同时符合质量要求。

从不同基质来看，荔枝基质共评价了 39 个快速检测产品，整体符合率 46.2%。其中单卡 31 个，符合率为 48.4%；多联卡 8 个，符合率为 37.5%。香蕉基质共评价了 28 个快速检测产品，整体符合率 50.0%。其中单联卡 19 个，符合率为 63.2%；多联卡 9 个，符合率仅 22.2%。芒果基质共评价了 31 个快速检测产品，整体符合率 45.2%。其中单联卡 23 个，符合率为 52.2%；多联卡 8 个，符合率仅为 25.0%。导致产品不符合的主要原因是产品假阴性问题。

表 2　不同种类快速检测产品符合情况

Table 2　Compliance of different types of rapid detection products

快速检测卡类型	产品数	符合数	符合率/%	假阳不符合数	假阴不符合数
单卡	73	39	53.4	15	31
二联卡	1	1	100.0	0	0
三联卡	9	1	11.1	6	6
四联卡	15	5	33.3	7	8
合计	98	46	46.9	28	45

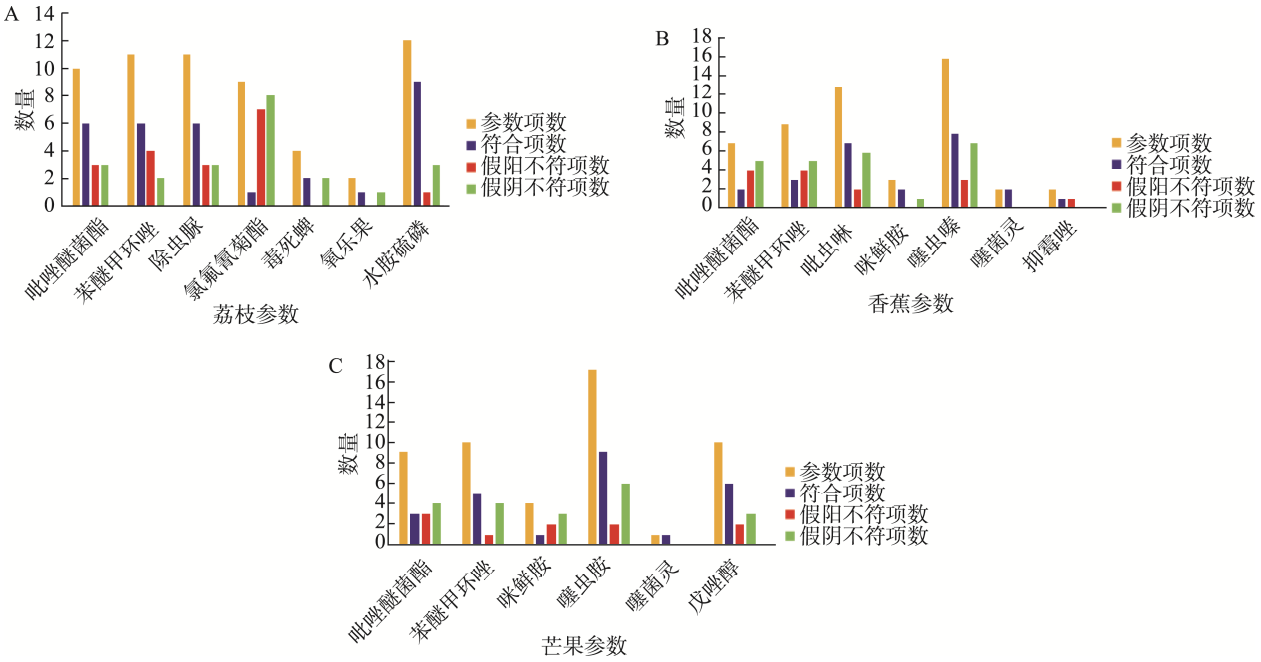
2.1.2　快速检测产品不同农药参数符合情况

评价时，多联卡假阴性指的是，该产品中有某项或者多项参数出现假阴性，因此某项参数不符合指标要求会导致整个产品不符合。为了更好地对比多联卡不同参数之间的结果差异，这里将多联卡中每个参数作为单项参数进行统计。

在荔枝基质中，对所选的 7 种农药参数(包括 4 种常用农药：吡唑醚菌酯、苯醚甲环唑、除虫脲、氯氟氰菊酯；以及 3 种禁用但常检出农药：毒死蜱、氧乐果、水胺硫磷)的快速检测产品性能进行了评价(图 1A)。结果显示，不同农药参数的检测符合率存在显著差异。水胺硫磷、吡唑醚菌酯、苯醚甲环唑和除虫脲的检测符合率相对较高，为 54.5%~75.0%。毒死蜱与氧乐果的符合率均为 50.0%。值得注意的是，氯氟氰菊酯的符合率仅为 11.1% (9 项检测中仅 1 项符合)，在所有参评参数中表现最差。进一步分析不符合项的类型发现，对于禁用药氧乐果、毒死蜱和水胺硫磷，不符合的主要原因是假阴性结果比例较高，这可能导致对污染样品的漏检，存在安全风险。相反，苯醚甲环唑的假阳性结果多于假阴性，可能引起不必要的误判和经济损失。其余参数的假阳性和假阴性结果比例则大致相近。

在香蕉基质中，对 7 种参数香蕉上常用且经常检出问题农药(吡唑醚菌酯、苯醚甲环唑、吡虫啉、咪鲜胺、噻虫嗪、噻菌灵和抑霉唑)的快速检测产品性能进行了评价(图 1B)。结果表明，不同农药的检测符合率差异较大。其中噻菌灵检测符合率相对较高，为 100.0%，吡虫啉、咪鲜胺、噻虫嗪和抑霉唑的检测符合率在 50.0%及以上，吡唑醚菌酯和苯醚甲环唑的符合率较低，仅为 28.6%~33.3%。除抑霉唑外，其他 6 种检测参数不符合的主要原因是假阴性问题大于假阳性。

在芒果基质中，对 6 种参数(吡唑醚菌酯、苯醚甲环唑、咪鲜胺、噻虫胺、噻菌灵和戊唑醇)的快速检测产品进行了性能评价(图 1C)，均是芒果上常用农药。其中噻菌灵仅参评 1 项且为符合，符合率在 50.0%以上的参数是噻虫胺和戊唑醇，分别是 52.9%和 60.0%。咪鲜胺和吡唑醚菌酯符合率较低，仅为 25.0%和 33.3%。除噻菌灵外，各参数在芒果基质中假阴性问题均大于假阳性。



注：多联卡中每个参数按单项参数计。

图 1　快速检测产品不同参数比对分析

Fig.1　Comparison and analysis of different parameters for rapid detection products

综上可知, 导致热带水果荔枝、香蕉、芒果中快速检测产品质量不符合的主要原因是假阴性问题。其中吡唑嘧菌酯和苯醚甲环唑是 3 种基质上的共同评价参数, 二者在不同基质上的符合率均是荔枝>芒果>香蕉。

2.1.3 快速检测产品品牌比对

本研究同时对 98 个热带水果快速检测产品进行了一般性指标审查评价。结果表明, 所有参评产品均包装完好, 内容物齐全, 个别企业还配套离心管、微孔板等相关耗材; 产品标识清晰规范, 包含有效期, 保存条件等; 说明书表达清晰完整, 明确检测的目标物和适用的食品基质类型和范围, 除部分企业氧乐果产品外, 其他参数检出限均符合国家标准限量规定。在一般性指标审查中未发现参评产品存在不规范现象, 仅个别品牌产品存在配套提取液紧缺, 无容错机会, 建议生产时, 根据产品实际需要适当多备一些提取液。然而, 不同品牌快速检测产品质量参差不齐。由表 3 可知, B 和 C 两个品牌共 16 个产品全部符合评价指标, 符合率高达 100.0%, 质量较可靠; 6 个品牌的快速检测产品符合率在 50.0%~85.7%, 不符合的产品均存在不同程度的假阳性和假阴性不符, 假阳率在 13.3%~40.4%, 假阴率在 8.0%~36.8%; 11 个品牌快速检测产品符合率低于 50.0%, 其中 N、O、R、S 这 4 个品牌产品符合率均为 0, 表现较差, 个别产品假阴率和假阳率甚至高达 100.0%。

2.1.4 快速检测产品假阳性问题分析

快速检测产品假阴性率高、灵敏度低会导致农药残留超标样品漏检, 无法发挥快速检测方法风险预警的作用。然而实际生产应用中, 往往关注的是阳性样品, 因此快速检测产品的假阳性问题也不容忽视。快速检测产品假阳性率高不但会加大复检工作量, 造成资源浪费, 影响工作效率, 甚至影响快速检测工作的公众信任度, 群众对快速检测工作存疑, 也会对基层快速检测监管执法带来一定的困扰[26]。本研究快速检测产品假阳性问题主要出现在 0.5 倍 MRL 组, 其假阳样品总数是空白组的 5.5 倍。除虫脲、抑霉唑、咪鲜胺、噻虫胺及芒果中苯醚甲环唑, 不存在空白样品假阳性。其他参数均存在不同程度的空白假阳性, 其中氯氟氰菊酯空白样品假阳性问题最为突出, 占所有假阳样品的 55.4%, 超过 0.5 倍组。吡唑醚菌酯和苯醚甲环唑在不同基质中的空白假阳性概率依次为香蕉>荔枝>芒果。造成假阳性的主要原因可能是生产过程中包被的抗体纯度不足、标记物浓度过高、硝酸纤维素膜孔径不均匀、热带水果高糖且经匀浆处理后基质干扰大(表 4)。

2.2 实际样品验证评价

以上研究均是基于实验室内空白样品添加农药标准品制备盲样进行评价获得, 是基于标准规范的质控操作, 评价结果具有一定的参考性。然而, 这种评价机制和快速检测产品的实际应用场景存在一定的差别, 比如评价时基质是匀浆处理, 实际应用中是剪碎或切碎; 评价时阳性样品为添加标准物质所得, 而实际阳性样品中的农药经吸附

表 3 不同品牌快速检测产品比对分析

Table 3 Comparison and analysis of rapid detection products from different brands

公司编码	产品数	单卡数	符合率/%	假阳不符数 (假阳率范围/%)	假阴不符数 (假阴率范围/%)
A	10	10	20.0	2 (17.8~18.0)	8 (7.5~44.4)
B	8	8	100.0	0	0
C	8	8	100.0	0	0
D	7	4	85.7	1 (23.6)	1 (11.4)
E	7	7	57.1	2 (13.3~20.0)	3 (13.3~33.3)
F	7	7	57.1	1 (19.3)	3 (8.0~21.2)
G	6	3	16.7	2 (33.3~35.0)	5 (7.5~51.5)
H	5	2	40.0	2 (15.6~40.4)	3 (11.1~36.8)
I	5	4	40.0	1 (30.9)	3 (6.0~62.9)
J	5	5	20.0	1 (15.8)	4 (5.3~15.2)
K	4	1	50.0	1 (40.4)	2 (15.8~36.8)
L	4	1	25.0	3 (36.4~38.5)	1 (14.3)
M	4	4	50.0	1 (17.8)	1 (8.9)
N	4	1	0.0	2 (34.5~36.4)	2 (100)
O	4	1	0.0	3 (41.8~100.0)	4 (37.1~40.0)
P	3	3	66.7	0	1 (12.0)
Q	3	0	33.3	2 (20.9~23.6)	2 (20.0~31.4)
R	2	2	0.0	2 (24.0~38.5)	0
S	2	2	0.0	0	2 (21.1~23.1)

表 4　快速检测产品假阳性分析

Table 4　False positive analysis of rapid detection products

基质	参数	MRL	空白组假阳样品数	0.5 倍 MRL 组假阳样品数
荔枝	除虫脲	0.50	0	32
	氯氟氰菊酯	0.10	36	29
	苯醚甲环唑	0.50	1	48
	吡唑醚菌酯	0.10	4	33
香蕉	抑霉唑	2.00	0	9
	苯醚甲环唑	1.00	8	48
	吡唑醚菌酯	1.00	18	35
	噻虫嗪	0.02	7	26
	吡虫啉	0.05	1	20
芒果	咪鲜胺	2.00	0	16
	吡唑醚菌酯	0.05	1	46
	噻虫胺	0.04	0	40
	戊唑醇	0.05	2	27
	苯醚甲环唑	0.20	0	20
合计			78	429

渗透后可能会存在提取率的差别。为了更好地反映生产实际, 本研究随机抽取了来自 15 个品牌的 26 个常用快速检测产品, 从农贸市场抽取荔枝、香蕉、芒果样品, 按照产品说明书进行快速检测, 同时对样品进行定量检测用于验证快速检测产品实际应用的准确性。在 26 个快速检测产品中有 16 个是经加标盲样评价过的产品, 用来反映参评产品和实际流通产品之间的质量稳定性。结果如表 5 所示, 共有 11 个产品符合了验证, 验证符合率为 42.3%, 其中 3 个产品假阳性不符合, 其他均是因假阴性不符合, 这一结论和加标盲样的评价结果基本一致。

表 5　实际样品验证评价结果

Table 5　Verification and evaluation results of real samples

基质	参数	公司编码	定量阳性数	定量阴性数	阳性样品定量值范围/(mg/kg)	阳性样品不符率/%	阴性样品不符率/%	是否符合	加标盲样评价		
									是否符合	假阳性率/%	假阴性率/%
荔枝	苯醚甲环唑	A	4	8	0.54~2.40	25.0	0	否	/	/	/
		I	4	8		12.5	0	是	是	0	0
		D	4	8		0	0	是	/	/	/
		C	4	8		0	0	是	是	0	2.2
	吡唑醚菌酯	A	5	7	0.10~1.17	0	20.0	否	/	/	/
		D	5	7		0	20.0	否	是	4.0	1.0
		C	5	7		0	0	是	是	2.0	1.0
		L	5	7		0	0	是	是	0	2.9
	氯氟氰菊酯	A	4	8	0.12~1.74	0	50.0	否	否	7.0	30.3
		D	4	8		0	25.0	否	否	10.7	3.0
		C	4	8		0	75.0	否	/	/	/
	除虫脲	D	4	8	0.57~1.75	0	75.0	否	是	10.9	2.9
		C	4	8		0	100.0	否	是	0	0
		L	4	8		0	100.0	否	/	/	/
香蕉	吡虫啉	E	11	8	0.06~0.92	12.5	9.1	否	是	0	0
		Q	13	9		22.2	7.7	否	否	23.6	20.0
		T	9	8		12.5	33.3	否	/	/	/
		U	11	9		0	54.5	否	/	/	/

表 5(续)

基质	参数	公司编码	定量阳性数	定量阴性数	阳性样品定量值范围/(mg/kg)	阳性样品不符率/%	阴性样品不符率/%	是否符合	加标盲样评价		
									是否符合	假阳性率/%	假阴性率/%
	噻虫嗪	M	9	11	0.02~0.30	9.1	0	是	/	/	/
		R	9	11		18.2	0	否	/	/	/
		G	9	11		9.1	11.1	否	否	12.7	22.9
		S	9	11		9.1	0	是	否	0	23.1
芒果	吡唑醚菌酯	E	13	7	0.07~0.49	0	0	是	/	/	/
		Q	11	7		0	0	是	是	7.3	2.6
		N	13	7		14.3	0	是	否	36.4	2.9
		H	13	7		0	0	是	否	0	25.7

注: /表示未评价。

用荔枝实际样品共验证了 14 个快速检测产品(苯醚甲环唑和吡唑醚菌酯各 4 个, 氯氟氰菊酯和除虫脲各 3 个), 总体验证符合率 35.7%, 表现较好的是苯醚甲环唑相关快速检测产品, 验证符合率为 75.0%, 吡唑醚菌酯验证符合率为 50.0%, 表现较差的是氯氟氰菊酯和除虫脲快速检测产品, 验证符合率均为 0, 假阴性问题依然是导致验证不符合的主要原因; 芒果实际样品共验证了 4 个吡唑醚菌酯快速检测产品, 只有一个存在假阳性, 且假阳性小于 15%, 验证符合率达 100.0%, 表现较好; 香蕉实际样品共验证了 8 个快速检测产品(噻虫嗪和吡虫啉各 4 个), 验证符合率仅 25.0%, 其中吡虫啉快速检测产品假阴性问题较为突出, U 品牌假阴性率高达 54.5%。

比对加标盲样评价和真实样品验证结果发现, 16 个验证产品中有 9 个结果一致, 占比 56.3%。其中 5 个快速检测产品同时符合了加标盲样评价和真实样品验证, 分别是来自 C、L 和 Q 品牌的荔枝和芒果上的苯醚甲环唑和吡唑醚菌酯产品, 表明这 5 个产品质量稳定可靠, 值得推荐; 有 4 个快速检测产品在评价和验证中均不符合, 分别是 A、D、Q 和 G 企业的荔枝和香蕉中上的氯氟氰菊酯、吡虫啉和噻虫嗪产品, 表明这 4 个产品质量不可靠, 应该规避; 来自 C、D、E 企业的吡唑醚菌酯、除虫脲和吡虫啉 4 个快速检测产品符合了加标盲样评价, 但未符合实际样品验证, 表明这几个产品质量不稳定, 需要针对批次间开展跟踪评价; 另外有 3 个产品虽然未符合加标盲样评价, 但是在实际应用中表现较好, 分别是来自 S、N、H 企业的香蕉和芒果中的噻虫嗪和吡唑醚菌酯产品, 可能是评价未符合倒逼企业积极研发提升产品质量所致。

3 讨论与结论

3.1 热带水果基质对胶体金快速检测产品的干扰效应

本研究用实验室加标盲样评价和实际样品验证两种方法, 对热带水果常用快速检测产品进行了质量评价和验证。结果表明, 热带水果快速检测产品加标盲样评价总体符合率 46.9%, 远低于其他农产品快速检测产品质量水平例如水产品中地西泮快速检测产品的准确率 79.2%~96.9%[27]。研究发现胶体金免疫层析试纸条在检测荔枝、香蕉、芒果 3 种热带水果中农药残留时, 普遍出现不同程度的假阴性与信号抑制现象, 且干扰强度呈香蕉>芒果>荔枝的明显趋势, 这一发现与免疫分析中“复杂基质效应”的广泛报道一致[28]。假阴性问题在快速检测产品质量问题中普遍存在, 比如叶雅真等[29]报道 5 个品牌腐霉利快速检测产品, 2 个不符合评价均是因假阴性引起; 王元清等[30]对 5 个品牌的 16 个产品原粮农药残留快速检测产品评价中, 4 个品牌产品均存在不同程度的假阴性问题。假阴性问题容易导致不合格样品脱离监管, 给消费者带来质量安全隐患, 值得高度重视。

不同于苹果、番茄等温带果蔬, 热带水果富含特定次生代谢产物与结构性多糖, 其干扰机制可能具有物种特异性。香蕉果肉富含多酚类物质(主要为多巴胺、儿茶酚及其衍生物), 同时多酚氧化酶活性极强, 组织破碎后数分钟内即可生成大量醌类聚合物[31], 据文献报道醌类化合物能够以共价方式修饰抗体酪氨酸残基, 因此可能导致抗体构象改变或抗原结合位点封闭[32]。芒果果肉中可溶性果胶含量高达 0.5%~1.0%(干基), 且酯化度大于 60%, 具有高黏度和强凝胶形成能力, 可能导致物理性膜阻塞与扩散受限[33]。荔枝富含柠檬酸、酒石酸等有机酸, 果肉 pH 仅为 3.8~4.2, 偏离快速检测最适范围(7.0~7.4), 降低了抗体结合效率, 降低了检测灵敏度导致假阴性出现[34], 同时荔枝果皮与果肉中存在大量花青素和多糖[35], 形成的空间位阻也会干扰抗体特异性识别从而影响检测结果准确性。

在免疫分析中, 控制基质效应较为常用的是通过制作基质匹配标准曲线进行基质效应的结果补偿; 或者采用基质净化去除杂质干扰, 保留目标物[36]; 或者通过稀释法

降低干扰物浓度, 但是此种方法会同步降低目标物浓度, 因此不适合痕量分析[37], 目前应用较多的是基质标曲匹配和稀释法。

3.2　不同类型和品牌快速检测产品性能差异分析

目前胶体金免疫层析多残留检测主要有两种形式, 一种是多线卡, 即将不同农药特异性抗体结合在同一个胶体金试纸条上, 设置多条检测线, 通过对应 T 线的显色程度判断对应农药残留量[38]。另一种则是采用多通道检测试纸条, 即将不同农药的特异性抗体分别结合在不同试纸条, 检测时互不干扰, 可实现提取液一次性提取后, 分别进行不同农药参数的稀释等的操作, 实现农药多残留快速检测[39]。本研究中评价多联产品是多通道检测卡, 结果表明, 单卡符合率显著大于多联卡。一方面是多联快速检测产品评价时只要其中一个农药参数不符合即视为该产品不符合质量要求, 因此通过率相对较低。另一方面可能是因为同一样品基质中不同农药参数的 MRL 差异较大, 比如吡唑醚菌酯和噻虫嗪在香蕉上的 MRL 分别为 1.00 mg/kg 和 0.02 mg/kg, 二者相差 50 倍, 多联卡在研发时主要通过检出限的倍数关系进行样品稀释来满足不同参数限量检测需求, 技术要求更高, 难度更大。而造成单联卡快速检测产品品牌差异大的主要原因可能主要集中在技术研发层面, 比如抗原结构设计不合理、抗体制备技术不够成熟、产品调试未充分考虑基质干扰、稀释比例控制不合理等的影响。

近年来, 热带水果中农药多残留复合污染问题日益突出, 并且农药多残留存在地域差异[15], 未体现胶体金免疫层析法“用什么, 检什么”的原则, 不同产区关注的重点农药参数不尽相同, 市场对农药多残留快速检测提出了更高的要求。为克服多线卡检测时不同农药间交叉反应、多目标物难以实现空间分离等技术壁垒方面, 抗体特异性阵列芯片技术在多残留检测方面表现出了较大的潜力, 实现了多分子智能化同时检测[40], 切实保障农产品质量安全。

3.3　热带水果快速检测产品评价现场适用性与筛查效能

本研究通过热带水果比对加标盲样评价和真实样品验证, 结果一致率为 56.3%, 结果存在差异可能首先是前者采用匀浆样品, 在实验室条件下添加农药标准品得到理想的验证结果; 后者采用对样品破坏程度较轻的剪碎方式进行真阳样品评价, 是更符合生产实际的, 样品破碎方式不同会直接干扰检测结果[22]。其次, 前者是在实验室规范条件下由专业人员操作完成, 后者则是模拟实际生产应用, 从取样到检测均模拟生产实际, 人员操作不同也会直接造成结果差异[41]。因此需结合生产实际, 规范胶体金快速检测产品标准评价过程, 加强基层快速检测人员培训以引导其规范操作, 助力快速检测工作的准确性和可靠性。因此, 现有的评价规范可以筛选出一部分质量稳定的快速检测产品, 但并不能作为衡量其质量好坏的金标准。在规范性评价的基础上, 还需要对快速检测产品进行跟踪验证, 实时追踪其质量稳定性, 才能更好服务于生产实际。

综上, 要保障热带水果流通快速检测产品的准确性和稳定性, 除了要建立科学、公正、标准、全链条的评价体系, 还要多鼓励科研院所与企业联合起来, 攻坚克难。比如探索利用荔枝果皮检测代替全果减少多糖等物质带来的基质干扰。前期研究证实荔枝上检出的大多数农药如氯氟氰菊酯、毒死蜱等仅存在于果皮上, 苯醚甲环唑、吡唑嘧菌酯、除虫脲等在果皮上检出率是果肉的 10~20 倍, 只有多菌灵、灭幼脲等在果肉和果皮中有接近的检出率, 并且多菌灵整体的残留水平非常低, 研究还证实了采摘后残留在荔枝果皮的农药不会向果肉中迁移, 因此具有一定的可行性[42]。此外, 还可以通过研发半定量快速检测产品匹配定量检测结果以提高监测准确性, 利用好新型半抗原设计和抗体技术解决技术瓶颈等问题, 让快速检测技术在农产品质量安全领域发挥作用[43]。

参考文献

[1] 赵婧, 何燕, 钱兵, 等. 热带水果中 5 种农药残留 UPLC-MS/MS 测定的基质效应研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1750–1755.
ZHAO J, HE Y, QIAN B, *et al*. Matrix effects in the determination of 5 pesticides in tropical fruits by UPLC-MS/MS [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(6): 1750–1755.

[2] 钟欣, 祖爽. 广东荔枝让“岭南佳味”香飘世界[N]. 中国食品安全报, 2025-08-09(C03).
ZHONG X, ZU S. Guangdong lychees make the “Lingnan delicacy” fragrant all over the world [N]. China Food Safety News, 2025-08-09(C03).

[3] 赵思懿, 周雨琮, 关睿, 等. 2025年茂名荔枝出口创历史新高[N]. 茂名日报, 2025-08-28(01).
ZHAO SY, ZHOU YZ, GUAN R, *et al*. The export of lychees from Maoming reached a record high in 2025 [N]. Maoming Daily, 2025-08-28(01).

[4] 王紫. 为 200 亿元的芒果产业把把脉[J]. 农家之友, 2021(10): 21–23.
WANG Z. Diagnose the 20-billion-yuan mango industry [J]. Friends of Farmers, 2021(10): 21–23.

[5] 钟慧霞, 冯建儒, 叶怡婷. 2 种常见除草剂对香蕉园土壤微生物的影响[J]. 智慧农业导刊, 2025, 5(21): 30–34.
ZHONG HX, FENG JR, YE YT. The effect of two common herbicides on soil microorganisms in banana gardens [J]. Journalof Smart Agriculture, 2025, 5(21): 30–34.

[6] 李华平, 李云锋, 聂燕芳. 香蕉枯萎病的发生及防控研究现状[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 128–136.
LI HP, LI YF, NIE YF. Research status of occurrence and control of *Fusarium wilt* of banana [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 128–136.

[7] 徐雪莲, 蒲金基, 王树昌. 热带作物主要病虫害综合防治理论与技术

研究进展[J]. 植物保护, 2025, 51(5): 380–389, 410.
XU XL, PU JJ, WANG SC. Research progress on integrated management of diseases andinsect pests on tropical crops [J]. Plant Protection, 2025, 51(5): 380–389, 410.

[8] 张贺, 漆艳香, 刘晓妹, 等. 杧果细菌性黑斑病的发生流行规律研究[J]. 中国南方果树, 2018, 47(4): 70–72.
ZHANG H, QI YX, LIU XM, *et al*. Research on the occurrence and flow patterns of bacterial black spot disease in mangoes [J]. Fruit Trees in Southern China, 2018, 47(4): 70–72.

[9] 杨萍, 刘建玲, 孙娟, 等. 热作突发事件应急管理研究[J]. 中国热带农业, 2014(1): 4–7.
YANG P, LIU JL, SUN J, *et al*. Research on emergency management of tropical crop emergencies [J]. China Tropical Agriculture, 2014(1): 4–7.

[10] LI H, CHANG QY, BAI RB, *et al*. Simultaneous determination and risk assessment of highly toxic pesticides in the market-sold vegetables and fruits in China: A 4-year investigational study [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 221: 112428.

[11] 徐淑, 池艳艳, 胡玉伟, 等. 我国荔枝病虫害防治农药登记现状及分析[J/OL]. 环境昆虫学报, 1–13. [2025-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/44.1640.Q.20250903.1124.002
XU S, CHI YY, HU YW, *et al*. Current status and analysis of pesticide registration for litchi pests and diseases control in China [J/OL]. Journal of Environmental Entomology, 1–13. [2025-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/ 44.1640.Q.20250903.1124.002

[12] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
State Statistics Bureau. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[13] 门雪. 热带水果中杀虫剂和杀菌剂筛查技术及降解规律研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
MEN X. Study on screening techniques and degradation rules of insecticides and fungicides in tropical fruits [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.

[14] 钟曼茜, 刘伟, 翟舒嘉, 等. 基于产业化的热带水果贮藏保鲜技术特征、效果及应用前景[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(2): 70–79.
ZHONG MX, LIU W, ZHAI SJ, *et al*. Characteristics, effects and application prospects of storage and preservation technology for tropical fruit based on industrialization [J]. Storage and Process, 2024, 24(2): 70–79.

[15] 曾静, 乔雄梧. 我国近年蔬菜水果中农药残留超标状况浅析[J]. 农药学学报, 2023, 25(6): 1206–1221.
ZENG J, QIAO XW. A brief analysis of pesticide residues exceeding maximum residue limits invegetables and fruits in China [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2023, 25(6): 1206–1221.

[16] XU L, EL-ATY AMA, EUN JB, *et al*. Recent advances in rapid detection techniques for pesticide residue: A review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(41): 13093–13117.

[17] LIANG Z, ABDELSHAFY AM, LUO ZS, *et al*. Occurrence, detection, and dissipation of pesticide residue in plant-derived foodstuff: A state-of-the-art review [J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132494.

[18] 李方束, 张瑞婷, 程赞, 等. 基于精准识别的农兽药残留快速检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 330–343.
LI FS, ZHANG RT, CHENG Z, *et al*. Recent advances in rapid detection technologies based on precise recognition for pesticide and veterinary drug residues [J]. Food Science, 2025, 46(6): 330–343.

[19] 易幸. 农药残留快速检测酶抑制法局限性探讨[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 10–12.
YI X. Discussion on the limitations of enzyme inhibition method for rapid detection of pesticide residues [J]. China Vegetables, 2021(2): 10–12.

[20] 孙蔚名. 农产品与水体中的克百威及其代谢物残留的免疫检测技术研究[D]. 海口: 海南大学, 2021.
SUN WM. Research on immunoassay techniques for carbofuran and the metabolite residues in agricultural products and water [D]. Haikou: Hainan University, 2021.

[21] 邓家军, 杨琳芬, 张富生, 等. 胶体金免疫层析法与酶抑制率法快速检测果蔬中农药残留比较研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(4): 191–197.
DENG JJ, YANG LF, ZHANG FS, *et al*. Studv on comparation of coloidal gold immunochromatography assay and enzyme inhibition method on the rapid detection of pesticide residues in vegetables and fruits [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(4): 191–197.

[22] 倪伟红, 尹丹韩, 李高天, 等. 果蔬中 15 种农药残留快速检测胶体金免疫层析多联卡的研制[J]. 食品安全导刊, 2025(21): 121–125.
NI WH, YIN DH, LI GT, *et al*. Development of a multiplex colloidal gold immunochromatographic multicard for rapid detection of 15 pesticide residues in fruits and vegetables [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(21): 121–125.

[23] 宋昕怡, 谢婉茹, 袁点. 胶体金快速检测技术在豇豆农药残留分析中的应用现状、问题及对策研究[J]. 食品安全导刊, 2025(7): 11–13.
SONG XY, XIE WR, YUAN D. Application status, problems and countermeasures of colloidal gold rapid detection technology in pesticide residue analysis of cowpea [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(7): 11–13.

[24] 刘海虹, 申超群, 蔡若纯, 等. 食品快速检测产品跟踪评价新模式探索[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4138–4144.
LIU HH, SHEN CQ, CAI RC, *et al*. Exploration of new model of tracking evaluation on food rapid inspection products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(13): 4138–4144.

[25] 伍婷, 李备, 吴龙. 海南热带果蔬农药残留现状分析及对策研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 117–125.
WU T, LI B, WU L. Research on current situation and countermeasures of pesticide residues in tropical fruit and vegetable in Hainan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 117–125.

[26] 温雅君, 王全红, 杨红菊, 等. 胶体金免疫层析法快速检测韭菜中腐霉利的质量分析与评价[J]. 农药科学与管理, 2025, 46(1): 29–33.
WEN YJ, WANG QH, YANG HJ, *et al*. Quality analysis and evaluation of colloidal gold immunochromatography for rapid determination of procymidone in leeks [J]. Pesticide Science and Administration, 2025, 46(1): 29–33.

[27] 杨静, 方芳, 沈媛, 等. 水产品中地西泮快速检测产品技术评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 102–108.
YANG J, FANG F, SHEN Y, *et al*. Technical evaluation of the rapid detection of diazepam in the aquatic products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 102–108.

[28] GHOSH S, ALKAFAAS SS, BORNMAN C, *et al*. The application of rapid test paper technology for pesticide detection in horticulture crops: A comprehensive review [J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2022, 11(1): 73.

[29] 叶雅真, 骆和东. 商品化腐霉利胶体金快速检测试剂盒的质量评价[J]. 福建分析测试, 2022, 31(3): 58–62.
YE YZ, LUO HD. Quality assessment of commercial colloidal gold kits for rapid detection of procymidone [J]. Fujian Analysis & Testing, 2022, 31(3): 58–62.

[30] 王元清, 周巧, 李莎, 等. 市售原粮农药残留快速检测产品的质量评价与分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 122–128.
WANG YQ, ZHOU Q, LI S, *et al*. Analysis and quality evaluation of commercial products for rapid detection of pesticide residues in raw grains [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(4): 122–128.

[31] 郑晓燕, 谭琳, 艾斌凌, 等. 多酚氧化酶对主要热带水果品质的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(5): 131–134.
ZHENG XY, TAN L, AI BL, *et al*. The influence of polyphenol oxidase on the quality of major tropical fruits [J]. South China Fruits, 2017, 46(5): 131–134.

[32] CHEN H, WONG HF, QIU J, *et al*. Bioorthogonal reaction of o-quinone with furan-2(3H)-one for site-selective tyrosine conjugation and construction of bispecific antibody complexes [J]. Advanced Science, 2025, 12(22): 2417260.

[33] 李娅, 帅希祥, 张明, 等. 不同酯化度的芒果皮果胶对芒果浊汁稳定性的影响及动力学研究[J/OL]. 食品工业科技, 1–22. [2026-02-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060189
LI Y, SHUAI XX, ZHANG M, *et al*. The influence and kinetic study of mango peel pectin with different esterification degrees on the stability of mango juice [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–22. [2026-02-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060189

[34] BALKRISHNA A, KUMARI A, KUMAR A, *et al*. Biosensors for detection of pesticide residue, mycotoxins and heavy metals in fruits and vegetables: A concise review [J]. Microchemical Journal, 2024, 205: 111292.

[35] 郑锦锦, 刘帅, 陈岩, 等. 岭南地区荔枝主栽品种品质评价分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(4): 128–136.
ZHENG JJ, LIU S, CHEN Y, *et al*. Quality evaluation and analysis of main cultivated litchi in lingnan region [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(4): 128–136.

[36] 杨宁霞. 果蔬基质对吡虫啉电化学检测的影响及其控制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
YANG NX. Matrix effects of the fruit and vegetable on electrochemical detection of imidacloprid and its control [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025.

[37] 崔雪妍. 韭菜中农药多残留胶体金免疫层析检测技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
CUI XY. Study on lateral flow immunoassay for multi-residue detection of pesticides in leek [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.

[38] 叶茂, 沈晓玲, 陈青舟, 等. 胶体金免疫层析法同时检测果蔬中四种农药残留[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 300–308.
YE M, SHEN XL, CHEN QZ, *et al*. Simultaneous determination of four pesticide residues in fruits and vegetables by colloidal gold immunochromatography [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 300–308.

[39] 李辉. 基于免疫层析和智能手机图像识别的农药多残留分析方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
LI H. Study on the lateral flow immunoassay for detection of pesticide multi-residues based on smartphone-based image recognition system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.

[40] 万宇平, 富成研, 崔廷婷, 等. 6 种农药多残留快速检测芯片的研制[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2841–2848.
WAN YP, FU CY, CUI TT, *et al*. Development of immunochip for multi-residue rapid detection of 6 kinds of common pesticides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(7): 2841–2848.

[41] 郭晓宇, 韦盈, 常虹, 等. 基于竞争抑制免疫层析技术检测香蕉中新烟碱类农药的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 78–86.
GUO XY, WEI Y, CHANG H, *et al*. Research on the detection of neonicotinoid pesticides in *Musa nana* Lour. based on competitive inhibition immunochromatographic technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 78–86.

[42] TANG XM, CHEN Y, HUANG CL, *et al*. Visualizing pesticide migration and dietary risk in lychee: Insights from tissue-specific residue analysis [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2026, 150: 108874.

[43] 宋安宁, 王森, 单文宠, 等. 胶体金免疫层析技术在农药残留快速检测中的研究进展[J/OL]. 农药学学报, 1–18. [2025-12-04]. https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2025.0098
SONG AN, WANG M, SHAN WC, *et al*. Research progress on the application of colloidal gold immunochromatographic technology for pesticide residue determination [J/OL]. Chinese Journal of Pesticide Science, 1–18. [2025-12-04]. https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2025.0098

(责任编辑: 蔡世佳　安香玉)