

# 基于微阵列芯片与智能视觉的农药多残留检测研究及应用

王源上<sup>1</sup>, 颜滕滕<sup>1</sup>, 王剑青<sup>2</sup>, 赵爱军<sup>2</sup>, 雷旭琴<sup>2</sup>, 刘磊<sup>2</sup>, 滕晶<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>山东省农业科学院农产品质量安全与标准研究所, 山东 济南

<sup>2</sup>山东美正生物科技有限公司, 山东 日照

收稿日期: 2026年4月24日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

目的: 为解决传统检测在农药残留多重检测中集成度低、操作繁琐、判读主观等问题, 本研究旨在开发一种基于高通量微阵列免疫分析与智能识别系统的16种农药残留同步检测方法。方法: 基于免疫侧向层析原理, 以非接触式点样仪将百草枯等16种农药抗原固定于硝酸纤维素膜, 制得微阵列芯片; 用胶体金或胶体碳标记特异性抗体, 将芯片与微孔试剂组装为检测卡, 结合微阵列读数仪, 并基于机器视觉优化定量算法对豇豆等农产品样本中的16种农药残留进行检测分析。结果: 该智能识别系统的图像采集重复性良好, 各检测点灰度值的批内变异系数 < 1.59%, 边缘定位精度达亚像素级。在最优条件下, 16种农药在三种基质中的检出限范围为0.003~6 mg/kg, 加标回收实验显示假阳性率与假阴性率均为0%, 且与结构类似物无交叉反应, 特异性强, 整个检测流程仅需13 min。结论: 本研究建立的高通量微阵列生物芯片检测系统, 突破了传统方法在多残留检测中的通量限制, 为农产品中农药多残留的现场快速筛查提供了高效、精准的解决方案。

## 关键词

微阵列生物芯片, 免疫分析, 智能识别, 多残留检测, 农产品质量安全

## Research and Application of Pesticide Multi-Residue Detection Based on Microarray Chip and Intelligent Vision

Yuanshang Wang<sup>1</sup>, Mengmeng Yan<sup>1</sup>, Jianqing Wang<sup>2</sup>, Aijun Zhao<sup>2</sup>, Xuqin Lei<sup>2</sup>, Lei Liu<sup>2</sup>, Jing Teng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-Products, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan Shandong

\*通讯作者。

文章引用: 王源上, 颜滕滕, 王剑青, 赵爱军, 雷旭琴, 刘磊, 滕晶. 基于微阵列芯片与智能视觉的农药多残留检测研究及应用[J]. 农业科学, 2026, 16(5): 822-833. DOI: 10.12677/hjas.2026.165101

<sup>2</sup>Shandong Meizheng Biotechnology Co., Ltd., Rizhao Shandong

Received: April 24, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

**Aims:** In order to solve the problems of low integration, cumbersome operation and subjective interpretation of traditional detection in multiple detection of pesticide residues, this study aims to develop a simultaneous detection method of 16 kinds of pesticide residues based on high-throughput microarray immunoassay and intelligent recognition system. **Methods:** Based on the principle of immune lateral chromatography, 16 kinds of pesticide antigens, such as paraquat, were fixed on nitrocellulose membrane by non-contact spotter, and the microarray chip was prepared; the specific antibodies were labeled with colloidal gold or colloidal carbon, and the chip and microporous reagent were assembled into a detection card. Combined with the microarray reader, 16 kinds of pesticide residues in agricultural products, such as cowpea, were detected and analyzed based on the machine vision optimization quantitative algorithm. **Results:** The image acquisition of this intelligent recognition system exhibited good repeatability, with intra-batch coefficient of variation (CV) for grayscale values at each detection point < 1.59%. The edge positioning accuracy reached sub-pixel level. Under optimal conditions, the detection limits for 16 pesticides in three matrices ranged from 0.003 to 6 mg/kg. The recovery test showed that the false positive rate and false negative rate were both 0%, and there was no cross reaction with structural analogues, with strong specificity. The whole detection process took only 13 minutes. **Conclusion:** The high-throughput microarray biochip detection system established in this study breaks through the flux limitation of traditional methods in multi-residue detection, and provides an efficient and accurate solution for the *on-site* rapid screening of pesticide residues in agricultural products.

## Keywords

Microarray Biochip, Immunoassay, Intelligent Identification, Multi-Residue Detection, Quality and Safety of Agricultural Products

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

农药在保障农产品产量、防治病虫害方面发挥着不可替代的作用。然而，随着农药使用量的增加及复配制剂的普及，农产品中常出现多种农药共存的现象，形成复合污染。据统计，全球每年因农药中毒死亡人数超过 350 万，果蔬等农产品中的农药残留问题已成为全球性的食品安全威胁，现有的单一农药残留检测系统难以满足在实际样本中同步筛查多种农药残留的需求。因此，建立同步筛查果蔬等农产品中多种农药残留的快速检测方法，对于保障食品质量和公众健康具有重要意义。

目前，农药残留的主流分析手段主要依赖仪器方法，例如：液相色谱(LC) [1]、气相色谱(GC) [2]、液相色谱 - 质谱联用(LC-MS) [3]和气相色谱 - 质谱联用(GC-MS) [4]等传统检测方法，这些方法具有灵敏度高、准确性好、可同时检测多种农药的优点，是实验室确证的金标准方法。但存在设备昂贵、前处理复杂、检测周期长、需要专业人员操作等局限，难以满足现场快速筛查和大规模样本初筛的需求；基于抗

原抗体特异性结合的免疫分析技术,如酶联免疫吸附测定法(ELISA)和免疫层析试纸条,具有操作简单、检测快速、成本低廉的优势,广泛应用于现场筛查[5][6]。胶体金免疫层析试纸条凭借操作简单、可视化的优势,成为基层监管和快速筛查的首选方法[7]。然而,传统的胶体金免疫层析技术多为单通道检测,一次只能检测一种目标物,且依赖肉眼判读,存在主观性强、通量低、无法同时检测多种农药的局限性[8]。为解决多残留检测的瓶颈问题,研究者尝试将多种抗体集成于单一试纸条上,开发了多通道免疫层析技术。例如,通过并列设置多条检测线,可同时检测 3~5 种目标物。但受限于硝酸纤维素膜的宽度和检测线间距,检测通量难以进一步提升,且不同检测线间可能存在交叉干扰。因此,当前亟需开发可靠、高通量、智能化、现场适用性强的快速检测体系,对检测果蔬等农产品中的农药危害因子和保障食品安全至关重要。

生物芯片(Biochip)又称微阵列技术(Bioarray),通过在固相载体上高密度固定多种识别分子(如抗原、抗体、核酸探针),实现对多个靶标的同时、快速、准确检测[9]-[11]。该技术具有高通量、微型化、样品消耗少、可并行分析等优点,已在基因表达分析、疾病诊断、药物筛选等领域得到广泛应用[12]-[14]。近年来,研究者尝试将生物芯片技术引入食品安全检测领域,开发了针对真菌毒素、抗生素、农兽药残留等的检测方法[15]-[18]。基于此,本研究针对目前农药多残留快速检测中存在的通量低、操作繁琐、判读主观等问题,将微阵列芯片技术与智能图像识别系统相结合,开发了一种基于竞争免疫抑制原理的高通量检测方法。通过优化抗原固定工艺和抗体标记策略,研制出可同时检测百草枯等 16 种农药残留的微阵列芯片检测卡,并配套自主研发的 MSR100 微阵列读数仪,实现“自动采集-信号分析-结果判定”的一体化智能检测。以豇豆、芹菜、苹果为代表性基质,对该方法的灵敏度、准确性和特异性进行系统评价,并与现有生物芯片检测方法进行对比分析,旨在为农产品中农药多残留的现场快速筛查提供一种高效、可靠的解决方案。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 材料与试剂

百草枯、啶虫脒、吡虫啉、百菌清、噻虫嗪、噻虫啉、啞菌酯、三唑磷、氟虫腈、戊唑醇、灭蝇胺、克百威、3-羟基克百威、二甲戊灵、甲基异柳磷、水胺硫磷标准品(德国 Dr.Ehrenstorfer 公司),相应的农药单克隆抗体和抗原(北京美正生物科技有限公司);硝酸纤维素(NC)膜(赛多利斯莱珀思(上海)贸易有限公司);玻璃纤维样品垫 8965、吸水纸 JW0311、芯片胶板 JW0212 (上海金标生物科技有限公司);曙红溶液(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);氯化钠(NaCl)、氯化镁(MgCl<sub>2</sub>)、氯化钾(KCl)、碳酸钾(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)、磷酸氢二钠(Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)、磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)、碳酸氢钠(NaHCO<sub>3</sub>)、无水硫酸镁(MgSO<sub>4</sub>)、碳酸钠(NaCO<sub>3</sub>) (北京化学试剂有限公司);牛血清白蛋白、明胶(苏州依科赛生物科技股份有限公司);甘油(国药集团化学试剂有限公司);赢创德固赛碳黑 SPECIAL BLACK 4 (SB4)碳粉(上海凯茵化工有限公司)。

### 2.2. 仪器与设备

sciFLEXARRAYER S3 点样仪(德国 Scienion 公司); Sorvall Legend Micro 21R Centrifuge 离心机(美国 Thermofisher 公司); LC-MUC-30 超声清洗机(上海力辰仪器科技有限公司); LC-85L 真空泵(上海力辰仪器科技有限公司); ZQ200 微电脑自动斩切机(上海金标生物科技有限公司); MSR100 微阵列读数仪(北京美正生物科技有限公司); 多功能涡旋振荡仪(美国 Scientific Industries 公司); 恒温烘箱(上海精宏实验设备有限公司)。

## 2.3. 实验方法

### 2.3.1. 缓冲液配制

- (1) 洗涤缓冲液(PBST): 含量为 0.05%吐温 Tween20 的 PBS 溶液。
- (2) 抗体稀释液: 含量为 0.1%明胶的 PBST。
- (3) 封闭液: 含量为 0.2%明胶的 CBS。
- (4) 显色 A 液: 柠檬酸 9.33 g,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  36.8 g, 超声溶解后加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.18 mL, 加水定容至 1000 mL, 4℃贮存备用。
- (5) 显色 B 液(TMB 溶液): TMB 600 mg 加乙二醇低温超声至溶解后定容至 500 mL, 4℃贮存备用。
- (6) 终止液: 2 mol/L 硫酸(98%浓硫酸 11.1 mL + 88.9 mL 蒸馏水)。
- (7) 包被液 A: 含 0.2%甘油、1% BSA 的 PBS 溶液。
- (8) 包被液 B: 含 0.5%甘油、1% BSA 的 PBS 溶液。

### 2.3.2. 微阵列芯片制备

#### (1) 抗原包被液配制

将待测农药包被液按照 200  $\mu\text{L}$  加入 0.5  $\mu\text{L}$  曙红溶液混匀, 之后用 220 nm 滤器过滤后备用。按照表 1 根据农药种类将 A、B 包被液分装到 1.5 mL 干净的尖底离心管中, 按照使用浓度配制 16 种农药抗原液, 混匀后超声 20 min, 超声完成后配平用高速离心机 12,000 r/min 离心 20 min, 抗原液 4℃备用。

**Table 1.** Antigen information used by each item of chip products

**表 1.** 芯片产品各项目所使用的抗原信息

序号	包被液	抗原名称	抗原浓度	使用浓度
1	A	羊抗鼠 IgG	7 mg/mL	0.60 mg/mL
2	B	羊抗兔 IgG	23 mg/mL	1.00 mg/mL
3	B	百草枯-Ag	17.4 mg/mL	1.50 mg/mL
4	B	ATP-BSA	6.1 mg/mL	0.01 mg/mL
5	B	百菌清-Ag	11.1 mg/mL	1.20 mg/mL
6	B	噻虫嗪-Ag	10 mg/mL	1.20 mg/mL
7	B	啮菌酯-Ag	10 mg/mL	0.15 mg/mL
8	B	三唑磷-Ag	10 mg/mL	0.07 mg/mL
9	B	氟虫腈-Ag	5.9 mg/mL	0.09 mg/mL
10	B	戊唑醇-ag	10 mg/mL	0.13 mg/mL
11	B	MEL-BSA-1	10 mg/mL	0.60 mg/mL
12	B	3-羟基克百威-Ag	10 mg/mL	0.40 mg/mL
13	B	二甲戊灵-OVA 抗原	6.6 mg/mL	0.40 mg/mL
14	B	甲基异柳磷抗原	10 mg/mL	0.16 mg/mL

## (2) 点样与芯片制备

将硝酸纤维素膜粘贴于芯片胶板指定区域, 确保平整无褶皱。使用 sciFLEXARRAYER S3 高精度点样仪, 将配制好的抗原液按预设阵列模式点样于 NC 膜上。点样板示意图如图 1 所示。点样参数设置为: 点样体积 12 nL/点, 点间距 X 方向 1250  $\mu\text{m}$ 、Y 方向 450  $\mu\text{m}$ , 形成 18 列  $\times$  10 行的点阵布局。点样环境湿度控制在  $55\% \pm 5\%$ , 温度  $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。点样完成后, 将芯片置于  $37^\circ\text{C}$  恒温烘箱干燥过夜, 使抗原牢固固定于膜上。



Figure 1. Schematic diagram of point template

图 1. 点样板示意图

## (3) 样品垫处理

将聚乙二醇单油醚于  $60^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$  水浴中溶解, 并配制 0.5% S17 消泡剂水溶液备用。取 5 张 8965 玻璃纤维膜样品垫叠放于自封袋中, 加入适量 0.5% S17 消泡剂溶液, 反复倒换使其充分浸润, 放置 30 min, 放置期间每 10 min 翻动一次。随后将玻纤膜单层平铺于纱网上,  $37^\circ\text{C}$  烘干过夜。烘干后将玻纤膜叠放于含干燥剂的自封袋中, 放入干燥剂, 双层密封, 常温保存。

## (4) 芯片组装与裁切

将干燥后的芯片板两端离型膜揭去, 依次粘贴处理后的样品垫(宽度 3.5 cm)和吸水纸(宽度 2.2 cm), 用压辊压实。使用自动斩切机将组装好的大板裁切成 4.5 mm 宽的检测条, 装入专用卡壳中, 压紧确保结构牢固, 密封保存备用。

### 2.3.3. 标记抗体制备

#### (1) 胶体金制备

采用柠檬酸钠还原法制备胶体金。所有玻璃器皿经王水浸泡过夜, 超纯水冲洗干净后烘干备用。取 100 mL 0.01% 氯金酸溶液加热至沸腾, 迅速加入 2.5 mL 1% 柠檬酸钠溶液, 继续煮沸至溶液呈透明的酒红色, 保持沸腾 10 min 后停止加热, 冷却至室温,  $4^\circ\text{C}$  避光保存备用。紫外-可见分光光度计扫描显示, 制备的胶体金最大吸收峰在 520 nm, 粒径约 20 nm。

#### (2) 胶体碳制备

称取 120 mg SB4 碳粉, 加入 30 mL 超纯水, 冰浴条件下超声破碎(输出功率 75%, 超声 3 s, 间隔 3 s, 总时间 45 min)。将制备的胶体碳溶液稀释至 0.2 mg/mL, 7500 r/min 离心 15 min, 取上清液备用。

#### (3) 抗体标记与冻干

根据不同抗体的特性优化标记条件: 将各农药特异性抗体分别与胶体金或胶体碳溶液混合, 调节 pH 至 8.0~9.0, 室温反应 30 min, 加入 10% BSA 至终浓度 1% 进行封闭。标记完成后,  $4^\circ\text{C}$ 、12000 r/min 离心 30 min, 弃上清, 沉淀用抗体稀释液复溶。优化后的标记抗体溶液按每孔 100  $\mu\text{L}$  分装至微孔板中,  $-50^\circ\text{C}$  冷冻干燥 24 h, 密封保存备用。

### 2.3.4. 样品前处理

将待测农产品样品(豇豆、芹菜、苹果)匀浆后, 准确称取 1.0 g 于 7 mL 离心管中, 加入 3 mL 含 1% 吐温 Tween20 的 PBS 提取液, 剧烈振荡 5 min, 4000 r/min 离心 5 min, 取上清液作为待测液备用。

### 2.3.5. 检测步骤

取 100  $\mu\text{L}$  待测液加入含有冻干标记抗体的微孔中,反复吸打 5 次使试剂充分混匀,室温孵育 3 min。将微孔中全部液体转移至检测卡加样孔中,室温反应 10 min。撕去检测卡视窗覆膜,立即放入 MSR100 微阵列读数仪中,自动读取并记录各检测点的灰度值。以质控点(羊抗鼠 IgG)的灰度值为内参,计算各检测点与质控点的灰度比值(T/C 值),作为结果判定的依据。

### 2.3.6. 结果判读

根据读数仪的输出结果进行定性分析,当检测样本浓度低于检测限时,即反应结果呈阴性;当待检物浓度处于检测限附近时,即反应结果呈疑似阳性;当检测样本浓度高于检测限时,即反应阳性。

### 2.3.7. 方法学评价

#### (1) 灵敏度与准确性

分别向豇豆、芹菜、苹果空白基质中添加 16 种农药标准溶液,配制 0.5 倍、1 倍、1.5 倍预设检测限浓度的加标样本,每个浓度设置 3 个平行,重复测定 3 次。根据检测结果确定各农药的实际检出限,并计算假阳性率和假阴性率。

#### (2) 特异性评价

以豇豆为代表性基质,添加二甲戊灵至 3 mg/kg,用所建立的方法进行检测,同时检测其他 15 种农药的交叉反应情况,每个样本重复 10 次,评价方法的特异性。

#### (3) 仪器重复性验证

使用 MSR100 微阵列读数仪,分别对同一批次制备的阴性芯片和阳性芯片(二甲戊灵, 3 mg/kg)进行检测,每台仪器连续读取 10 次,计算各检测点灰度值的变异系数,评价仪器系统的重复性和稳定性。

## 2.4. 数据处理

本研究中的实验结果均以平均值  $\pm$  标准差(Mean  $\pm$  SD)表示,变异系数(CV) = 标准差/均值  $\times$  100%。图表采用 Origin 2021 软件绘制。

## 3. 结果与分析

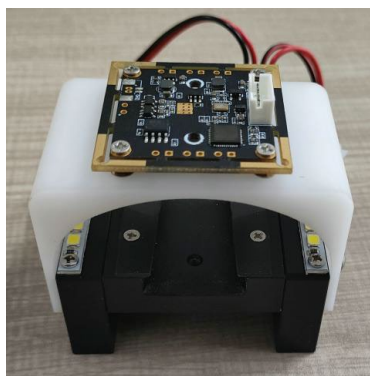
### 3.1. 微阵列芯片点样精度与图像定位性能评估

微阵列芯片的点样质量是确保多重检测准确性的基础。本研究采用 sciFLEXARRAYER S3 高精度非接触式点样仪,将 16 种农药抗原及质控抗体固定于硝酸纤维素膜上,形成 18 列  $\times$  10 行的点阵布局,点间距设置为 X 方向 1250  $\mu\text{m}$ 、Y 方向 450  $\mu\text{m}$ 。为评估点样的重复性和精度,对连续制备的 10 张芯片进行显微镜成像分析,测量各项目的实际位置与理论位置的偏差。结果显示,所有检测点的单列项目点最大偏移量均在  $\pm 0.32$  mm 范围内,符合预设的质控标准( $\leq \pm 0.32$  mm)。通过计算 10 张芯片上同一位置点的坐标变异系数, X 方向和 Y 方向的 CV 值分别为 0.87%和 1.12%,表明点样系统具有良好的定位重复性。实验所采用的 MSR100 微阵列读数仪采用微秒级连续取像叠加技术,可有效降低图像采集过程中的数据变异。系统的边缘定位算法可达亚像素级精度,通过对 10 张不同芯片的定位误差分析,测得系统对点阵的边缘定位误差小于 0.5 个像素,确保了在不同芯片、不同批次检测中,对同一检测点位的识别区域高度一致,显著降低了由位置偏移引入的检测误差。

### 3.2. 图像采集系统性能验证

MSR100 微阵列读数仪采用高分辨率工业相机,搭配 6500 K LED 恒流光源及漫反射光室构建图像采集系统(图 2),可有效抑制环境光干扰,精准捕捉抗原-抗体反应的显色信号。以抗原-抗体-胶体金/胶

体碳复合物为检测信号，通过各项目点与质控点的灰度比值(T/C 值)进行结果判定。



**Figure 2.** Microarray chip image acquisition module  
**图 2.** 微阵列芯片图像采集模块

### 3.3. 灵敏度和准确性评估

为评估的灵敏度和准确性，将购自于市场的新鲜豇豆、芹菜和苹果样品进行预处理后，分别添加不同浓度的百草枯、啶虫脒等 16 种农药标准溶液，使其浓度分别为 0.5 倍检测限、1 倍检测限和 1.5 倍检测限，每个浓度重复 2 次，用微阵列生物芯片进行检测，用于进行假阳性、检测限和假阴性验证实验，具体加标分组情况如表 2 所示，根据实验结果确定假阳性、检测限和假阴性。由表 2 可知，16 种农药在豇豆、芹菜、苹果中的检出限范围为 0.003~6 mg/kg，假阳性与假阴性率均为 0%，结果准确可靠，说明本方法可以实现对豇豆等农产品样本中的百草枯啶虫脒等 16 种农药的同步筛查分析检测。

**Table 2.** Experimental results of detection limit (n = 3)

**表 2.** 检测限实验结果(n = 3)

添加药物名称	验证实验	添加浓度(mg/kg)	检测结果		
			豇豆	芹菜	苹果
百草枯	检测限	0.003	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.0015	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.0045	3/3	3/3	3/3
啶虫脒	检测限	3	3/3	3/3	3/3
	假阳性	1.5	0/3	0/3	0/3
	假阴性	4.5	3/3	3/3	3/3
吡虫啉	检测限	6	3/3	3/3	3/3
	假阳性	3	0/3	0/3	0/3
	假阴性	9	3/3	3/3	3/3
百菌清	检测限	0.6	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.3	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.9	3/3	3/3	3/3

续表

噻虫嗪	检测限	0.6	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.3	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.9	3/3	3/3	3/3
噻虫啉	检测限	3	3/3	3/3	3/3
	假阳性	1.5	0/3	0/3	0/3
	假阴性	4.5	3/3	3/3	3/3
啮菌酯	检测限	0.12	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.06	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.18	3/3	3/3	3/3
三唑磷	检测限	0.6	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.3	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.9	3/3	3/3	3/3
氟虫腈	检测限	0.21	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.105	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.315	3/3	3/3	3/3
戊唑醇	检测限	0.06	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.03	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.09	3/3	3/3	3/3
灭蝇胺	检测限	0.6	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.3	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.9	3/3	3/3	3/3
克百威	检测限	0.006	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.003	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.009	3/3	3/3	3/3
3-羟基克百威	检测限	0.021	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.0105	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.0315	3/3	3/3	3/3
二甲戊灵	检测限	3	3/3	3/3	3/3
	假阳性	1.5	0/3	0/3	0/3
	假阴性	4.5	3/3	3/3	3/3
甲基异柳磷	检测限	0.3	3/3	3/3	3/3
	假阳性	0.15	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.45	3/3	3/3	3/3

续表

	检测限	0.3	3/3	3/3	3/3
水胺硫磷	假阳性	0.15	0/3	0/3	0/3
	假阴性	0.45	3/3	3/3	3/3

### 3.4. 特异性评价

在最优的检测条件下,选取豇豆样品,向豇豆样品中添加二甲戊灵农药至浓度为 3 mg/kg,并用该方法进行检测,进行 10 次平行实验,对该芯片的特异性进行验证。二甲戊灵农药在芯片上的对应位置显示阳性,对微阵列芯片上其他农药点位均不发生干扰,结果均显示为阴性,说明本方法对百草枯、啮虫脒等 16 种农药具有较好的特异性。

## 4. 讨论

本研究中,MSR100 微阵列读数仪采用 6500 K LED 恒流光源及漫反射光室构建图像采集系统,可有效抑制环境光干扰,各检测点灰度比值的 CV 值小于 1.59%。这一结果与已报道的基于智能手机的检测系统相比,具有更好的重复性和稳定性。Liu 等人[19]开发的智能手机双模式检测装置虽实现了 20 种真菌毒素的检测,但仍需外接手持式读数器,而本系统实现了一体化检测读取操作,无需借助手持装备。Chen 等人[20]开发的彩虹乳胶微球免疫层析法结合智能手机检测装置,对三种真菌毒素检测的变异系数范围为 3.0%~8.1%;Tian 等人[21]开发的基于智能手机的荧光侧向流检测方法检测赭曲霉毒素 A,相对标准偏差为 3.9%~9.1%。分析其原因,可能是由于专用读数仪的光源和成像系统经过优化设计,避免了智能手机检测中常见的光照不均和定位偏差问题,与其他方法相比,具有更好的重复性和稳定性。解决了传统检测中“光照不均、显色不准、操作繁琐”的问题,为临床诊断、食品安全等领域的快速检测提供了技术支撑。

在检出限方面,针对农药多残留快速检测的生物芯片技术研究中,与已发表的免疫芯片、荧光免疫芯片等检测方法相比(表 3),本方法对 16 种农药的检出限为 0.003~6 mg/kg, Lan 等人[22]开发的比色免疫微阵列芯片对 7 种农药的检出限为 0.02~6.45 mg/kg。本方法在检测通量、检测限以及检测时间等方面均展现出显著优越性,检测范围更宽,可覆盖不同农药的最大残留限量标准,这得益于抗原点样工艺的优化和胶体金/胶体碳双重标记策略的合理选择。不同农药的检出限差异较大,可能与各抗体的亲和力、抗原包被浓度以及竞争抑制反应的效率有关。在特异性评价方面,本方法对 16 种农药无交叉反应,假阳性率和假阴性率均为 0%。一方面是由于所选用的单克隆抗体具有高特异性;另一方面,微阵列芯片的点阵设计使各检测点相互独立,避免了传统多通道试纸条中不同检测线间的空间干扰。

与现有检测方法相比,本方法的主要优势体现在三个方面:一是可实现高通量检测,同步分析 16 种农药,显著提升了筛查效率;二是操作简便,整个流程仅需 13 min,实现了一体化检测读取操作;三是结果易读出,可通过仪器自动判读定量,避免了肉眼观察的主观误差。但也存在一定局限性:本研究仅验证了豇豆、芹菜、苹果三种基质,对于茶叶等其他复杂基质的适用性有待进一步考察,后续可拓展检测靶标种类,推动该技术在食品安全快速检测领域的广泛应用。

从应用前景来看,本研究所建立的高通量微阵列免疫分析技术已初步实现产业化转化。项目开展期间,研究团队与北京美正生物科技有限公司建立了紧密的产学研合作关系,双方联合成立了“农产品多残留快速检测技术成果转化示范联合实验室”,专注于解决农产品质量安全检测中通量低、周期长、成本高的技术难题,为各类用户提供从产品研发、技术培训到应用支持的一条龙服务。

**Table 3.** Comparison of rapid detection methods for multiple pesticide residues using biochip technology  
**表 3.** 生物芯片技术用于农药多残留快速检测方法的比较

检测方法	农药种类	基质	检测限 (mg/kg)	检测时间 (min)	参考文献
时间分辨荧光免疫层析生物芯片	克百威、毒死蜱等 3 种农药	胡萝卜、花椰菜、苹果、梨	0.02~0.5	15	[23]
免疫芯片	毒死蜱、三唑磷等 10 种农药	苹果、黄瓜、红茶	1.49~15.72	90	[24]
荧光免疫芯片	对硫磷、毒死蜱等 6 种农药	柑橘、白菜	0.02~10	5	[25]
比色免疫微阵列芯片	三唑磷、多菌灵等 7 种农药	黄瓜、大白菜、番茄、苹果、梨	0.02~6.45	90	[22]
双通道微流控纸芯片	乙醚甲环唑、代森锰锌	黄瓜	0.18~2	5	[26]
高通量微阵列生物芯片	百草枯、啶虫脒等 16 种农药	豇豆、芹菜、苹果	0.003~6	13	本方法

目前, 针对豇豆、芹菜、苹果等高风险农产品, 成功开发了农残多合一微阵列芯片检测卡及配套的 MSR100 微阵列读数仪, 并建立了相应的企业质量标准, 并在山东、河北等地进行了实际应用验证。检测结果灵敏度的符合率达 100%。在技术服务方面, 积极参加全国食品安全检测仪器展览会、农产品质量安全检测技术交流会等行业展会 10 余次, 推广应用新技术; 开展农产品质量安全快速检测技术培训会议, 培训基层检测人员 200 余人次, 有效提升了基层检测人员的技术水平。在人才团队建设方面, 组建了一支由 6 名专业技术人才组成的成果转化服务团队, 包括检测技术工程师、仪器维护工程师和应用技术支持人员, 为全国各地用户提供产品应用指导、仪器操作培训和售后服务。团队制作了微阵列检测芯片操作视频、MSR100 读数仪使用教程等技术培训视频, 通过微信公众号等平台推广新技术, 定期推送技术动态和应用案例, 促进了行业技术交流和产品推广应用。在产学研合作方面, 累计完成技术服务 18 项, 为 12 家农产品生产基地和检测机构提供了检测方案优化和技术支持, 帮助用户建立了质量控制体系, 实现经济效益 52 万元, 达到了预期目标。

综上所述, 该技术的推广应用将有效提升基层农产品质量安全检测能力, 降低检测成本, 缩短检测周期, 为保障农产品质量安全和推动行业技术进步提供有力的技术支撑。未来将该技术体系拓展至兽药残留、真菌毒素等其他食品安全检测领域, 为构建完善的食品安全检测体系贡献力量。

## 5. 结论

本研究成功构建了一种基于微阵列芯片与智能识别系统的高通量农药多残留检测平台, 可同步检测农产品中百草枯、啶虫脒等 16 种农药。方法验证结果显示, 检出限为 0.003~6 mg/kg, 假阳性率和假阴性率均为 0%, 与其他农药无交叉反应。检测系统重复性良好, 整个流程仅需 13 min, 为农产品中农药多残留的现场快速筛查提供了可靠的技术工具, 对提升我国农产品质量安全监管技术水平具有重要意义。

## 基金项目

山东省重点研发(重大科技创新工程)项目(2023CXGC010709), 中央引导地方科技发展资金(YDZX2024017)。

## 参考文献

- [1] Huber, C., Brack, W., Röder, S., von Bergen, M., Rolle-Kampczyk, U., Zenclussen, A.C., *et al.* (2024) Pesticide Residues and Polyphenols in Urine—A Combined LC-HRMS Screening to Reveal Intake Patterns. *Environment International*, **191**, Article ID: 108981. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108981>
- [2] Li, G., Zhang, X., Liu, T., Fan, H., Liu, H., Li, S., *et al.* (2021) Dynamic Microwave-Assisted Extraction Combined with Liquid Phase Microextraction Based on the Solidification of a Floating Drop for the Analysis of Organochlorine Pesticides in Grains Followed by GC. *Food Science and Human Wellness*, **10**, 375-382. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.029>
- [3] Chen, Y., Cai, W., Lin, Z., Ma, Y., Wu, Y., Li, D., *et al.* (2026) A Modified Quechers Method Using Single-Sorbent Combined with LC-MS/MS for Simultaneous Determination of Four Phenolic Pesticide Residues in Fruits and Vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*, **149**, Article ID: 108820. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108820>
- [4] Jia, Z., Huang, W., Zhao, K., Costas, C., Garcia-Marti, M., Simal-Gandara, J., *et al.* (2026) First Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) Method for the Detection and Quantification of 11 Trichothecenes and Zearalenone in Wheat Plant-Based Beverages. *Food Chemistry: X*, **33**, Article ID: 103449. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103449>
- [5] Su, F., Zou, M., Wu, H., Xiao, F., Sun, Y., Zhang, C., *et al.* (2022) Sensitive Detection of Hepatitis C Virus Using a Catalytic Hairpin Assembly Coupled with a Lateral Flow Immunoassay Test Strip. *Talanta*, **239**, Article ID: 123122. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123122>
- [6] Dhubbkarya, J., Yadav, P.K. and Ponnariappan, S. (2025) Development of Heavy Chain Binding Domain Based Sandwich-Elisa for Detection of Bont/a in Different Food Matrices. *Journal of Food Composition and Analysis*, **147**, Article ID: 108016. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108016>
- [7] Yang, Q., Cheng, Z., Yan, T. and Wang, G. (2026) Development of a Colloidal Gold-Based Immunochromatographic Strip Assay for Rapid Detection of Gyrovirus Homsa 1 (GyH1). *Journal of Virological Methods*, **341**, Article ID: 115320. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2025.115320>
- [8] Cheng, Y., Wu, A., Liu, L., Xu, L., Kuang, H., Xu, C., *et al.* (2024) Immunochromatographic Strip for Rapid and Sensitive Detection of Bupirimate Residues in Peach, Orange, and Carrot. *Food Chemistry*, **459**, Article ID: 140417. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140417>
- [9] Xiao, S.J., Chen, L. and Xu, N. (2009) Biochip Development. *Progress in Chemistry*, **21**, 2397-410.
- [10] Li, D., Zou, S., Huang, Z., Sun, C. and Liu, G. (2024) Isolation and Quantification of L1CAM-Positive Extracellular Vesicles on a Chip as a Potential Biomarker for Parkinson's Disease. *Journal of Extracellular Vesicles*, **13**, e12467. <https://doi.org/10.1002/jev2.12467>
- [11] Kim, E., Cai, Y., Yang, S. and Kim, H. (2025) Portable Biochip-Based qPCR for the Simultaneous Detection of *Pedio-coccus* with Novel Genetic Markers Identified via Genomic Analysis. *Food Bioscience*, **64**, Article ID: 105926. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105926>
- [12] Wang, Y., Chan, Y., Lee, E., Shi, D., Lee, C. and Diao, J. (2024) Monitoring *Escherichia coli* in Water through Real-Time Loop-Mediated Isothermal Amplification on Biochips. *Micromachines*, **15**, Article 1112. <https://doi.org/10.3390/mi15091112>
- [13] Huang, S., Chang, C., Lu, Y. and Liu, C. (2023) Microfluidic Biochip for Target Tumor Cell and Cell-Cluster Sorting. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **394**, Article ID:134369. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134369>
- [14] Liu, S., Shen, Z., Deng, L. and Liu, G. (2022) Smartphone Assisted Portable Biochip for Non-Invasive Simultaneous Monitoring of Glucose and Insulin Towards Precise Diagnosis of Prediabetes/Diabetes. *Biosensors and Bioelectronics*, **209**, Article ID:114251. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114251>
- [15] Lu, Y., He, F., Zhu, X., Tang, J., Lu, Y., Wang, J., *et al.* (2025) On-Site Tracking of Trace Aflatoxin B1 in Food Waste Composting via a Portable Colorimetric Sensing Platform with Nanozymes. *Journal of Hazardous Materials*, **493**, Article ID: 138333. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138333>
- [16] Yang, K., Yan, X., Tang, M., Li, Z. and Xu, D. (2026) Rapid Detection of Clenbuterol and Ractopamine in Pork: Sulfonate Functionalized Ion Exchangemagnetic Solid Phase Extraction Combined with Visual Protein Microarray Chip. *Talanta*, **296**, Article ID: 128459. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128459>
- [17] Tang, M., Zhou, W., Song, J., Chen, C., Zhao, Y., Zou, J., *et al.* (2025) Automatic Detection of Multi-Antibiotic Residues Simultaneously in Aquatic Products by Visual Protein Microarray Chips. *Food Chemistry*, **466**, Article ID: 142226. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142226>
- [18] 裘一婧, 贾彦博, 张佳凤, 等. 微流控芯片快速检测技术在铁皮石斛农药残留检测中的应用研究[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(15): 2131-2139.
- [19] Liu, Z., Hua, Q., Wang, J., Liang, Z., Li, J., Wu, J., *et al.* (2020) A Smartphone-Based Dual Detection Mode Device Integrated with Two Lateral Flow Immunoassays for Multiplex Mycotoxins in Cereals. *Biosensors and Bioelectronics*, **158**, Article ID: 112178. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112178>

- 
- [20] Chen, J., Luo, P., Liu, Z., He, Z., Pang, Y., Lei, H., *et al.* (2022) Rainbow Latex Microspheres Lateral Flow Immunoassay with Smartphone-Based Device for Simultaneous Detection of Three Mycotoxins in Cereals. *Analytica Chimica Acta*, **1221**, Article ID: 340138. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340138>
- [21] Tian, Y., Hu, X., Jiang, J., Tang, X., Tian, Z., Zhang, Z., *et al.* (2023) Smartphone-Based Quantitative Detection of Ochratoxin a in Wheat via a Lateral Flow Assay. *Foods*, **12**, Article 431. <https://doi.org/10.3390/foods12030431>
- [22] Lan, M., Guo, Y., Zhao, Y., Liu, Y., Gui, W. and Zhu, G. (2016) Multi-Residue Detection of Pesticides Using a Sensitive Immunoassay Based on Nanogold Enhancement. *Analytica Chimica Acta*, **938**, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.07.044>
- [23] 崔海峰, 贾芳芳, 陈立军, 等. 用于 3 种农药残留快速检测的荧光免疫芯片研发及其应用[J]. 山东畜牧兽医, 2021, 42(7): 1-5.
- [24] 赵颖, 王双节, 柳颖, 等. 毒死蜱等 10 种农药多残留快速检测芯片研究[J]. 分析化学, 2019, 47(11): 1759-1767.
- [25] 王兆芹, 汪彤, 崔海峰, 等. 对硫磷等 6 种农药残留荧光免疫检测芯片的研发及应用[J]. 食品安全导刊, 2021(16): 32-35.
- [26] Hao, G., Tian, H., Zhang, Z., Qin, X., Yang, T., Yuan, L., *et al.* (2023) A Dual-Channel and Dual-Signal Microfluidic Paper Chip for Simultaneous Rapid Detection of Difenoconazole and Mancozeb. *Microchemical Journal*, **190**, Article ID: 108674. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108674>