

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240530002

酶抑制法检测蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类 农药的准确性评价

伍聪¹, 申红桃¹, 江培淳¹, 邓琳娜¹, 彭贵¹, 张世伟^{1,2}, 林长虹^{1*}

[1. 深圳市计量质量检测研究院食品快检与核查事业部, 深圳 518131;

2. 国家市场监督管理总局技术创新中心(智能光电传感), 深圳 518131]

摘要: **目的** 评价酶抑制法在检测蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留中的准确性。**方法** 采用酶抑制法与实验参比方法对从农贸市场等地购买的蔬菜样品进行检测, 共评价了23种适用酶抑制法的有机磷和氨基甲酸酯类农药。**结果** 酶抑制法和实验参比方法检测结果平均符合率为77%, 鳞茎类和茄果类蔬菜结果符合率较高。以23种农药为评价项目时阳性结果符合率为64%, 扩大至30项农药后, 总体结果符合率提高至88%, 农药检出率高达95%; Kappa检验结果表明扩大农药评价项目范围后, 两种方法检测结果一致性程度由中等水平变为较强水平; 部分蔬菜因农药最大残留标准及评价体系滞后出现无法判断情况; 试剂盒质量差、酶抑制法特异性不高、快速检测取样不均匀等导致结果符合率低。**结论** 酶抑制法在蔬菜农药残留快速检测中有一定应用价值, 但准确性受多种因素影响, 未来的研究应着重于提高酶抑制法的特异性和准确性, 建立更为科学的方法评价体系, 为加强食用农产品安全监管提供支持。

关键词: 快速检测方法; 酶抑制法; 农药残留; 准确性评价

Accuracy evaluation of enzyme inhibition method for determination of organophosphate and carbamate pesticides in vegetables

WU Cong¹, SHEN Hong-Tao¹, JIANG Pei-Chun¹, DENG Lin-Na¹, PENG Gui¹,
ZHANG Shi-Wei^{1,2}, LIN Chang-Hong^{1*}

(1. Rapid Food Testing and Examination Division, Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection, Shenzhen 518131, China; 2. Technology Innovation Center of Intelligent Opto-Electronic Sensing, State Administration for Market Regulation, Shenzhen 518131, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the accuracy of the enzyme inhibition method in detecting residues of organophosphate and carbamate pesticides in vegetables. **Methods** The enzyme inhibition method and the experimental reference method were used to test vegetable samples purchased from farmers' markets and other places, evaluating a total of 23 kinds of organophosphate and carbamate pesticides applicable to the enzyme inhibition method. **Results** The average consistency rate between the enzyme inhibition method and the experimental reference method was 77%, higher consistency rates for bulb vegetables and solanaceous fruit

基金项目: 深圳市科技计划项目(KCXFZ20230731092859013)

Fund: Supported by the Shenzhen Science and Technology Plan Project (KCXFZ20230731092859013)

*通信作者: 林长虹, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量安全控制与标准化。E-mail: 249562473@qq.com

*Corresponding author: LIN Chang-Hong, Master, Senior Engineer, Rapid Food Testing and Examination Division, Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection, No.114, Minkang Road, Minzhi District, Shenzhen 518131, China. E-mail: 249562473@qq.com

vegetables. When 23 kinds of pesticides were used as evaluation items, the positive result concordance rate was 64%. After expanding to 30 pesticide items, the overall result concordance rate increased to 88%, and the pesticide detection rate was as high as 95%. The Kappa test results indicated that after expanding the range of pesticide evaluation items, the consistency between the two methods' detection results changed from a moderate level to a higher level. Some vegetables showed undeterminable situations due to the lag in pesticide maximum residue standards and evaluation systems; poor quality of test kits, low specificity of the enzyme inhibition method, and uneven sampling in rapid testing contributed to the low concordance rate. **Conclusion** The enzyme inhibition method has certain application value in the rapid detection of pesticide residues in vegetables, but its accuracy is influenced by various factors. Future research shall focus on improving the specificity and accuracy of the enzyme inhibition method, establishing a more scientific method evaluation system, and providing support for strengthening the safety supervision of edible agricultural products.

KEY WORDS: rapid detection method; enzyme inhibition method; pesticide residues; accuracy evaluation

0 引言

在当前食品安全问题日益受到重视的背景下,蔬菜作为日常饮食中不可或缺的组成部分,其农药残留问题尤为引人关注。有机磷和氨基甲酸酯类农药因其广泛的使用和潜在的健康风险,成为蔬菜残留监控的重点^[1-3]。传统的检测方法虽然在准确性上具有优势,但往往耗时较长,成本较高,难以满足快速检测的需求,特别是在现场检测和大规模筛查方面^[4-6]。因此,发展快速、经济、有效的农药残留检测技术显得尤为迫切^[7]。

蔬菜农药残留的快速检测方法包括酶抑制法^[8]、胶体金免疫层析法^[9]、生物传感器法^[10]、近红外光谱法等^[11-12]。常见的农药包括有机磷及氨基甲酸酯类、拟除虫菊酯类、有机氯等,其中有机磷及氨基甲酸酯类占比较大,酶抑制法适用于有机磷和氨基甲酸酯类农药,成为了农药残留快速检测的主要手段^[12-15]。在一定条件下,有机磷和氨基甲酸酯类药物对胆碱酯酶正常功能具有抑制作用,其抑制率与药物的浓度相关,正常情况下,酶催化神经传导代谢产物(乙酰胆碱)水解,其水解产物与显色剂反应,产生黄色物质,通过分光光度计测量波长 412 nm 处的吸光度,通过抑制率可以判断出样品中是否有高剂量有机磷或氨基甲酸酯类农药的存在^[8]。

酶抑制法检测快速、检测成本低廉、操作简单、检测仪器体积较小,便于携带,因此酶抑制法被广泛应用于基层农产品质量安全日常监管和生产经营主体的自控自检中,甚至进一步被应用在餐饮服务食品安全保障活动中^[16-19]。但酶抑制法也存在一定的局限性,易受干扰出现假阳性、检出限高、灵敏度低、检测农药种类有限等局限性^[20-21],可能会出现农药残留漏检和误检的情况。市场监督管理总局发布的 KJ 201710《蔬菜中敌百虫、丙溴磷、灭多威、克百威、敌敌畏残留的快速检测》中提示了葱、蒜、萝卜、

韭菜、芹菜、香菜、茭白、蘑菇及番茄等蔬菜,含有对酶有影响的植物次生物质,容易产生假阳性。研究表明,辣椒中的辣椒碱^[22]、蒜薹和洋葱等中的含硫化合物^[23]、番茄、茄子等茄科植物中的番茄碱、龙葵碱等生物碱糖苷物质^[24]、莴苣类蔬菜中倍半萜类成分^[25]对乙酰胆碱酯酶有一定的抑制作用,容易引起酶抑制结果假阳性。刘楚卉^[26]使用加标盲样测试的方式对南平市农药残留丙溴磷快速检测情况进行评价,结果发现灵敏度指标、假阴性率指标性能无法达到 KJ 201710 的要求。罗俊霞等^[27]研究表明,使用酶抑制法在不同时间对同一样品进行检测,重现性也较差。周颖雪等^[28]使用气相色谱-质谱法对 15 批酶抑制法阳性样品进行验证,得到 3 批假阳性结果假阳性率为 16.7%。目前酶抑制法的准确性评价主要集中在检出限、灵敏度、特异性、假阳性率等参数的评价上,缺乏快速检测结果与实验室参比方法检测结果的大量数据比对。

鉴于此,本研究参考国市监食检规〔2023〕1 号文《食品快速检测结果验证规范》,对某一时期快速检测工作中产生的蔬菜酶抑制法快速检测结果,采用实验室参比方法进行结果验证,为酶抑制法检测蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药的准确性评价提供重要的数据支持和方法优化方向。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材 料

蔬菜样品采自深圳市农贸市场、超市和便利店等,共 300 批次,包括叶菜类、豆类、芸薹属类、瓜类、茄果类、鳞茎类蔬菜,批次占比分别为 55%、26%、12%、4%、2%、1%。

1.1.2 试 剂

农药残留混合标准溶液(100 μg/mL,阿尔塔科技有限

公司); 乙腈、甲醇(色谱纯, 德国 Merck 公司); QuEChERS 净化管(深圳逗点生物技术有限公司); 氯化钠、乙酸铵(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 某品牌有机磷和氨基甲酸酯类农药残留快速检测试剂。

1.2 仪器与设备

Thermo Scientific 液相色谱-质谱联用仪(配有电喷雾离子源 Electron Spray Ionization 及 TraceFinder4.12 数据处理系统)、Hypersil GOLD 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.9 μm)(美国 Thermo 公司); JYL-Y11 高速破壁调理机(九阳股份有限公司); H1850 离心机(湘仪离心机仪器有限公司); BCM2500 振荡仪(深圳逗点生物技术有限公司); Auto EVA-60 氮吹仪[睿科集团(厦门)股份有限公司]; Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司); JA12038 电子天平(精度 0.001 g, 上海越平科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

快速检测方法依据国家市场监督管理总局发布的快速检测方法 KJ 201710 中的酶抑制法(分光光度法)。

实验室参比方法为 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》。

1.4 结果判定方法

参考国市监食检规〔2023〕1号《市场监管总局关于规范食品快速检测使用的意见》制定快速检测结果与实验室参比方法检测结果符合性评价判定标准。当快速检测结果呈阳性, 对应项目的实验室检测结果大于或等于快速检测方法检出限的最大负偏离(目标物含量小于 1 mg/kg 时, 最大负偏离为 30%)时, 则判定为结果符合。当快速检测结果呈阴性时, 实验室检测结果小于快速检测方法检出限, 则判定为结果符合, 反之为不符合。符合率是两种检测方法相同结果的样本数占总样本数(去除无法判断的样本)的比例。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2007 汇总处理数据, 采用 SPSSAU 在线软件(<https://spssau.com/>)对酶抑制法和实验参比方法检测结果进行 Kappa 检验。Kappa 值用于衡量两种结果的一致性程度, Kappa<0.2 说明一致性程度较差; 0.2~0.4 之间说明一致性程度一般; 0.4~0.6 之间说明一致性程度中等; 0.6~0.8 之间说明一致性程度较强; 0.8~1.0 之间说明一致性程度很强。

2 结果与分析

2.1 23 种农药评价结果

采用酶抑制法和实验参比方法分别对 2023 年 5—11 月从农贸市场等地购买的蔬菜样品进行检测, 开展酶抑制法检测蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药的准确性评价。根据 KJ 201710、GB/T 5009.199—2003《蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留量的快速检测》和 NY/T 448—2001《蔬菜上有机磷和氨基甲酸酯类农药残毒快速检测方法》, 选择 23 种适用酶抑制法的有机磷和氨基甲酸酯类农药作为评价项目。其他农药项目的检出限参考 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》, 见表 1。酶抑制法和实验参比方法检测结果的平均符合率为 77%, 见表 2。其中, 假阳性 43 批次, 假阳性率为 36%; 假阴性 8 批次, 假阴性率为 7%。鳞茎类和茄果类蔬菜平均结果符合率较高, 瓜类、叶菜类和芸薹属类蔬菜阳性结果符合率偏低。

2.2 阳性样品中结果符合率和检出率分析

根据表 3 可知, 按照 23 种农药为评价项目进行统计, 结果符合率为 64%, 有检出的样品占总体样品的 71%。如果扩大农药项目, 将 30 项农药项目进行评价分析, 豆类、叶菜类、芸薹属类蔬菜样品的结果符合率及农药检出率大幅提升, 总体结果符合率提高至 88%, 总体农药检出率高达 95%。

表 1 农药评价项目
Table 1 Evaluation items of pesticides

| 分类 | 检测项目 | 参考标准 |
|----------|--|--------------------|
| 23 项农药 | 克百威(以克百威及 3-羟基克百威之和计)、敌百虫、丙溴磷、灭多威、敌敌畏 | KJ 201710 |
| | 对硫磷、辛硫磷、甲胺磷、马拉硫磷、乐果、氧乐果、甲基异柳磷、久效磷、甲拌磷(以甲拌磷及甲拌磷砒、甲拌磷亚砒之和计) | GB/T 5009.199—2003 |
| | 倍硫磷(以倍硫磷及倍硫磷砒、倍硫磷亚砒之和计)、杀扑磷、涕灭威(以涕灭威及涕灭威砒、涕灭威亚砒之和计)、抗蚜威、甲萘威、速灭威、残杀威、水胺硫磷、乙酰甲胺磷 | NY/T 448—2001 |
| 其他 7 项农药 | 毒死蜱、三唑磷、马拉氧磷、吡虫啉、多菌灵、啶虫脒、烯酰吗啉 | GB 2763—2021 |

2.4 无法判断的样品情况

在总体样本中,无法判断的样品数量占比 25%。而叶菜类蔬菜在无法判断的样品中占比 83%。将涉及无法判断的检测项目进行统计,前五名分别是烯酰吗啉、吡虫啉、多菌灵、丙溴磷、残杀威,见表 5。丙溴磷在叶菜类和芸薹属类蔬菜中,只有普通白菜、萝卜叶和结球甘蓝有最大残留限量值,而多菌灵在这两类蔬菜中仅有孢子甘蓝、结球莴笋和叶芥菜有最大残留限量值,残杀威没有对应的限量值标准,正是存在一些限量值缺乏的情况,使得样品出现无法判断的结果。

表 5 无法判断的检测项目统计表
Table 5 Statistics of testing items unable to determine

| 检测项目 | 不合格 | 合格 | 无法判断 | 检出 | 检出率/% |
|------|-----|----|------|-----|-------|
| 烯酰吗啉 | 0 | 50 | 89 | 139 | 46 |
| 吡虫啉 | 0 | 22 | 15 | 37 | 12 |
| 多菌灵 | 0 | 4 | 32 | 36 | 12 |
| 丙溴磷 | 2 | 11 | 22 | 35 | 12 |
| 残杀威 | 0 | 0 | 9 | 9 | 3 |

2.5 一致性分析

通过 Kappa 检验对酶抑制法与实验参比方法的检测结果进行一致性分析,结果见表 6。若农药评价项目为 23 项,Kappa 检验结果表明,这两种检测方法在结果上的一致性程度处于中等水平。这意味着虽然两种方法在多数情况下能够给出相似的结论,但仍存在一定程度的差异。若农药评价项目为 30 项,Kappa 检验结果表明,这两种检测方法在结果的一致性程度较强,说明扩大农药评价项目范围后,酶抑制法与实验参比方法检测结果的一致性显著提高。

2.6 评价结果原因分析

将酶抑制法检测结果与实验室参比方法检测结果进行比对,对酶抑制法结果准确性进行评价。结果显示,若农药评价项目为 23 项,平均结果符合率较低且假阳性率较高。试剂盒质量差、酶抑制法特异性不高、快速检测取样不均匀以及现行评价规则严格是导致结果符合率低的主要原因。

2.6.1 试剂盒质量

试剂盒作为快速检测的关键工具,其质量直接影响检测结果的准确性。若试剂纯度与稳定性不足,杂质可能与酶或底物发生非特异性结合,从而影响酶的活性和底物的转化;若检出限控制不准确,可能会发生漏检低浓度农药残留的现象,或者会出现假阳性结果;包装与保存条件不合理,可能会发生分解、变质或活性降低等情况,以上情况都可能导致试剂盒质量较差。因此,在选择、保存及使用酶抑制法试剂盒时,必须严格把控试剂盒的质量,确保其能够为农药残留检测提供准确可靠的结果。

2.6.2 酶抑制法特异性

酶抑制法在特异性上存在不足。研究发现,蔬菜中的叶绿素及其他次生物质可能对酶抑制法检测结果存在干扰,导致假阳性的出现。其中芸薹属类蔬菜,包括白菜、甘蓝、芥菜等含有特定的次生植物代谢物—硫代葡萄糖苷,硫代葡萄糖苷在特定条件下可以释放出具有生物活性的异硫氰酸酯,这些物质可能对胆碱酯酶具有抑制效果^[29-31]。因此,酶抑制法在实际应用中需要进一步优化以提高其特异性。

2.6.3 快速检测取样均匀性

快速检测取样不均匀也是导致假阳性率较高的原因之一。瓜类蔬菜阳性结果符合率较低,可能是由于取样不均匀导致符合率偏低。为了避免其他物质对酶抑制法检测结果产生干扰,快速检测时会采取整株浸提和表面测定的前处理方法。这在一定程度上造成取样不均匀、不具有代表性。例如,在快速检测时采取整株浸提的方式对辣椒表面的农药进行提取,而取整个辣椒进行实验室参比方法检测;只取青瓜皮进行快速检测,取整个青瓜进行实验室检测。

2.6.4 评价项目数量

评价项目少是导致结果符合率低的重要原因。将 23 种适用酶抑制法的有机磷和氨基甲酸酯类农药作为评价项目,阳性结果符合率为 64%,平均结果符合率为 77%。而在假阳性样本中,也检出了毒死蜱、三唑磷等除 23 种农药外的有机磷农药以及吡虫啉、多菌灵、啶虫脒、烯酰吗啉等其他农药。如果将所有农药纳入结果评价项目,阳性结果符合率和平均结果符合率将分别提高至 88%、84%。数据表明,增加农药评价项目可以显著提高阳性结果符合率和平均结果符合率。因此,需要对假阳性样本中检出的农药对酶抑制法的影响进行更深入的研究,以优化检测方法和评价方法,提高检测的准确性以及结果评价的科学性和适用性。

表 6 Kappa 检验结果
Table 6 Results of Kappa test

| 快速检测结果 | Kappa 值 | 标准误(假定原假设) | z 值 | P | 标准误差 | 95%置信区间 |
|------------|---------|------------|--------|-------|-------|-------------|
| 23 项农药评价项目 | 0.552 | 0.063 | 8.707 | <0.01 | 0.053 | 0.450~0.655 |
| 30 项农药评价项目 | 0.752 | 0.066 | 11.319 | <0.01 | 0.044 | 0.666~0.837 |

3 结 论

本研究通过对比酶抑制法和实验参比方法对蔬菜样品中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留的检测结果,对酶抑制法的准确性进行了评价。研究表明,酶抑制法在农药残留快速检测中具有一定的应用价值,但其准确性受到多种因素的影响,导致结果符合率偏低,假阳性率偏高。

3.1 酶抑制法准确性分析

酶抑制法的准确性受到试剂盒质量、方法特异性、取样均匀性以及评价规则等因素的影响。试剂盒的质量直接关系到检测结果的准确性,而酶抑制法在特异性上存在的不足,使得蔬菜中的叶绿素及其他次生物质可能对检测结果产生干扰。此外,快速检测取样的不均匀性和现行评价规则的严格性也是导致结果符合率低的重要原因。

3.2 评价项目扩展的必要性

扩展评价项目至 30 种农药后,平均结果符合率显著提升,Kappa 值也显示两种检测方法的一致性程度由中等水平变为较强水平,说明增加农药评价项目可以显著提高检测结果的准确性。然而,对于假阳性样本中检出的非目标农药,需要进一步研究其对酶抑制率法的影响,以优化检测方法和评价方法。

3.3 蔬菜基质特异性影响

某些蔬菜基质,如瓜类和芸薹属类蔬菜,对酶抑制法的检测结果有显著影响。这可能是由于取样不均匀或蔬菜中含有的特定次生代谢物,如硫代葡萄糖苷,对酶活性的潜在抑制作用。因此,针对不同蔬菜基质的检测方法需要进一步优化,以减少基质效应对检测结果的影响。

3.4 未来研究方向

未来的研究应着重于提高酶抑制法的特异性和准确性,包括深入研究蔬菜基质对检测结果的影响、优化取样和前处理方法、开发高质量的试剂盒。此外,建立更为科学的酶抑制法评价体系,提高结果评价的科学性和适用性,对于确保食用农产品安全具有重要意义。

综上所述,本研究为提高蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药酶抑制法检测结果的准确性和可靠性提供了重要的数据支持和方法优化方向,对于加强食用农产品安全监管和保障公众健康具有重要的实际应用价值。

参考文献

- [1] KUMAR S, KAUSHIK G, VILLARREAL-CHIU JF. Scenario of organophosphate pollution and toxicity in India: A review [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(10): 9480-9491.
- [2] AMIR A, RAZA A, QURESHI T, *et al.* Organophosphate poisoning: Demographics, severity scores and outcomes from national poisoning

- control centre, Karachi [J]. *Cureus*, 2020, 12(5): e8371.
- [3] 林春绵, 胡晓燕, 张安平. 酶抑制法快速检测有机磷农药残留的研究进展[J]. *浙江工业大学学报*, 2009, 37(4): 386-391.
LIN CM, HU XY, ZHANG ANP. Development of enzyme inhibition for rapid detection of organophosphorus pesticide residues [J]. *J Zhejiang Univ Technol*, 2009, 37(4): 386-391.
- [4] VANDER-HOFF GR, VAN-ZOONEN P. Trace analysis of pesticides by gas chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 1999, 843(1-2): 301-322.
- [5] WANG J, DUAN HL, FAN L, *et al.* Magnetic tetraethylenepentamine modified multi-walled carbon nanotubes as matrix clean-up materials for organophosphorus pesticide residue analysis in cucumber [J]. *Food Control*, 2021, 124: 107904.
- [6] 李凌云, 许晓敏, 林桓, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法快速检测蔬菜中 248 种农药残留[J]. *色谱*, 2016, 34(9): 835-849.
LI LY, XU XM, LIN H, *et al.* Rapid detection of 248 pesticide residues in vegetables by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2016, 34(9): 835-849.
- [7] SIDHU GK, SINGH S, KMAR V, *et al.* Toxicity, monitoring and biodegradation of organophosphate pesticides: A review [J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 2019, 49(13): 1135-1187.
- [8] 陈立灿, 念树芬. 酶抑制率法检测蔬菜中农药残留[J]. *食品安全导刊*, 2024(15): 83-86.
CHEN LC, NIAN SF. Enzyme inhibition rate method for detecting pesticide residues in vegetables [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2024(15): 83-86.
- [9] 李向梅, 刘志威, 陈晓敏, 等. 食品安全免疫层析检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(15): 4939-4955.
LI XM, LIU ZW, CHEN XM, *et al.* Advances of immunochromatography assay for food safety [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(15): 4939-4955.
- [10] 向俊, 唐万里, 陈同强, 等. 检测食品中有机磷农药的酶生物传感器制备与研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(11): 98-105.
XIANG J, TANG WL, CHEN TQ, *et al.* Preparation and study of enzyme biosensors for the detection of organophosphorus pesticides in food [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(11): 98-105.
- [11] 赵婕秀, 重庆利, 陈培琴, 等. 高光谱成像技术在动物源性食品微生物污染快速检测中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 467-473.
ZHAO JX, DONG QL, CHEN PQ, *et al.* Application progress of hyperspectral imaging technology in rapid detection of microbial contamination in animal derived food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(7): 467-473.
- [12] FANG L, LIAO X, JIA B, *et al.* Recent progress in immunosensors for pesticides [J]. *Biosens Bioelectron*, 2020, 164: 112255.
- [13] BEDAIR H, RADY HA, HUSSIEN AM, *et al.* Pesticide detection in vegetable crops using enzyme inhibition methods: A comprehensive review [J]. *Food Anal Methods*, 2022(15): 1979-2000.
- [14] SHAO YL, WANG M, CAO J, *et al.* A method for the rapid determination of pesticides coupling thin-layer chromatography and enzyme inhibition principles [J]. *Food Chem*, 2023(416): 135822.
- [15] CAO J, WANG M, YU H, *et al.* An overview on the mechanisms and applications of enzyme inhibition-based methods for determination of organophosphate and carbamate pesticides [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(28): 7298-7315.
- [16] 姚晓寰. 酶抑制法快速检测蔬菜中农药残留灵敏度与准确性的研究[J].

- 食品安全导刊, 2023(20): 113–116.
- YAO XH. Sensitivity and accuracy of enzyme inhibition method for rapid detection of pesticide residues in vegetables [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2023(20): 113–116.
- [17] 刘顺字, 郭淑贞, 林双娣, 等. 酶抑制法在农药残留快速检测过程中的应用分析[J]. *湖南农业科学*, 2017(7): 85–87, 91.
- LIU SZ, GUO SZ, LIN SD, *et al.* Application analysis of enzyme inhibition method in the rapid detection of pesticide residues [J]. *Hunan Agric Sci*, 2017(7): 85–87, 91.
- [18] 宋贞绪, 王建民, 李强. 快速检测技术在食品安全监管中的应用分析[J]. *食品安全导刊*, 2023(15): 6–8.
- SONG ZX, WANG JM, LI Q. Application and analysis of rapid detection technology in food safety supervision [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2023(15): 6–8.
- [19] 马霖, 杨坤. 食品安全监督管理中食品安全快速检测技术的应用研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(25): 28–30.
- MA L, YANG K. Research on the application of food safety rapid detection technology in food safety supervision and management [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2022(25): 28–30.
- [20] 朱玲玲, 高恒. 蔬菜中农药残留的检测方法概述[J]. *食品安全导刊*, 2024(19): 146–148.
- ZHU LL, GAO H. Overview of methods for the detection of pesticide residues in vegetables [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2024(19): 146–148.
- [21] 王斌, 曹丽芬, 周钦方, 等. 酶抑制率农药残留快检方法存在的问题及研究进展[J]. *农业工程*, 2022, 12(8): 72–77.
- WANG B, CAO LF, ZHOU QF, *et al.* Problems and research progress of enzyme inhibition rapid detection of pesticide residues [J]. *Agric Eng J*, 2022, 12(8): 72–77.
- [22] 王文, 刘瑾, 盛伟楠, 等. 采用酶抑制法检测大蒜中农药残留的改进方法[J]. *食品科学*, 2013, 34(12): 135–139.
- WANG W, LIU J, SHENG WN, *et al.* An improved enzyme inhibition method for detection of peptide residues in garlic [J]. *Food Sci*, 2013, 34(12): 135–139.
- [23] 王雯, 王丽芳, 张瑜, 等. 酶抑制法检测含硫蔬菜中农残假阳性消除[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(17): 106–112.
- WANG W, WANG LF, ZHANG Y, *et al.* Elimination of false positive of agricultural residues in sulfur-containing vegetables by enzyme inhibition method [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2023, 39(17): 106–112.
- [24] 姜晓霞, 朱艳雯, 周丽丽, 等. 番茄碱的制备及其对乙酰胆碱酯酶的抑制作用[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 14–21.
- JIANG XX, ZHU YW, ZHOU LL, *et al.* Preparation of tomatidine and its inhibitory effect on acetylcholinesterase [J]. *Food Sci*, 2022, 43(1): 14–21.
- [25] 杨开, 李精精, 董旭军, 等. 莴苣功能成分及生理活性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 329–335.
- YANG K, LI JJ, DONG XJ, *et al.* Recent advances on functional components and physiological activities of *Lactuca sativa* [J]. *Food FERM Ind*, 2022, 48(8): 329–335.
- [26] 刘楚卉. 快速检测在食用农产品检测中的应用[J]. *质量安全与检验检测*, 2021, 31(6): 44–46.
- LIU CH. Application of high-throughput sequencing technology in the study of microbial diversity of medicinal plants [J]. *Qual Saf Insp Test*, 2021, 31(6): 44–46.
- [27] 罗俊霞, 李德瑜, 袁小伟, 等. 酶抑制法测定多种有机磷和氨基甲酸酯类农药残留的试验[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(6): 883–887.
- LUO JX, LI DY, YUAN XW, *et al.* Experiment on the determination of multiple organophosphate and carbamate pesticide residues by enzyme inhibition method [J]. *Zhejiang Agric Sci*, 2015, 56(6): 883–887.
- [28] 周颖雪, 杨雅雅. 酶抑制率法与速测卡法在食品安全监管工作中的应用[J]. *现代食品*, 2019(19): 154–157.
- ZHOU YX, YANG YY. Application of enzyme inhibition rate method and quick test card method in food safety supervision [J]. *Mod Food*, 2019(19): 154–157.
- [29] TIAN Y, DENG FM, QING ZX, *et al.* Advances in understanding the structure and function of glucosinolates in *Brassicaceae* [J]. *Food Sci*, 2020, 41(1): 12.
- [30] NEUGART S, BALDERMANN S, HANSCHEN FS, *et al.* The intrinsic quality of brassicaceous vegetables: How secondary plant metabolites are affected by genetic, environmental, and agronomic factors [J]. *Sci Hortic-Amsterdam*, 2018(233): 460–478.
- [31] 田艳, 邓放明, 卿志星, 等. 十字花科植物中硫代葡萄糖苷类物质的结构与功能研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 12.
- TIAN Y, DENG FM, QING ZX, *et al.* Research progress on structure and function of glucosinolates in cruciferous plants [J]. *Food Sci*, 2020, 41(1): 12.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)

作者简介



伍聪, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品质量安全检测。

E-mail: 179822904@qq.com



林长虹, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量安全控制与标准化。

E-mail: 249562473@qq.com