

◆ 专论:农药应用风险控制(特约稿) ◆

## 农产品中农药残留与膳食风险研究进展

贾蕙榕,张斌斌,潘兴鲁,吴小虎,徐 军,董丰收\*,郑永权

(中国农业科学院植物保护研究所,植物病虫害综合治理全国重点实验室,北京 100193)

**摘要:**农药残留及其风险问题备受公众关注。本文从农药残留定义、膳食暴露评估、检测技术和标准体系建设等角度综述了我国农药残留和膳食风险的基本现状。通过对主要粮食作物、果蔬、加工产品和香辛料中农药残留进行监测,得出目前我国主要农产品中农药残留及膳食风险较低,但果蔬中仍存在少数农药残留超标现象的结论。针对我国农药残留国家标准及存在问题,提出了加强标准体系建设、完善风险评估技术和扩大监测范围等相关建议。

**关键词:**农药残留;膳食暴露评估;农产品;最大残留限量;检测技术

**中图分类号:**TQ 450.2<sup>+</sup>6 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2024.06.001

### Research progress on pesticide residues in agricultural products and dietary risks

JIA Huirong, ZHANG Binbin, PAN Xinglu, WU Xiaohu, XU Jun, DONG Fengshou\*, ZHENG Yongquan

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The issue of pesticide residues and their associated risks has garnered significant public attention. This article provided a comprehensive overview of the current status of pesticide residues and dietary risks in China. It covered the definition of pesticide residues, dietary exposure assessments, detection technologies, and the development of standard systems. Additionally, the article discussed monitoring levels of pesticide residues in major grain crops, fruits, vegetables, processed products, and spices. The findings indicated that pesticide residues and dietary risks in major agricultural products in China were generally low, although occasional cases of excessive pesticide residues in fruits and vegetables persist. Furthermore, the article examined the national standards for pesticide residues in China, identifying existing issues and proposing relevant suggestions, such as enhancing the construction of standard systems, improving risk assessment techniques, and expanding the monitoring scope.

**Key words:** pesticide residue; dietary exposure assessment; agricultural product; maximum residue limit; detection technology

农药是现代农业生产的重要投入品,在实现粮食稳产增产中发挥了巨大作用。据联合国粮农组织(FAO)统计数据,使用农药平均每年可挽回30%~40%的粮食损失,但同时农药的不合理使用会造成农药残留超标和环境污染等问题。

农药残留是影响农产品安全的关键因素之一。农药施用的过程中,不可避免地导致农作物中产生农药残留,并会发生降解和代谢反应,产生相应的

代谢物,而农产品安全主要与农药残留的类别和含量密切相关。因此,明确农产品中农药残留与膳食风险研究进展,对指导农药安全使用和保障人类生命健康具有重要意义。

围绕农药残留和膳食风险关注点,本文重点阐述了农药残留定义和膳食暴露评估方法、残留检测技术、限量标准体系等方面内容,对标准体系建设、风险评估技术完善等提出建议,以期为我国农产品

收稿日期:2024-06-24

作者简介:贾蕙榕(2001—),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为农药残留与环境毒理学。E-mail: JHR0399@163.com

通信作者:董丰收(1974—),男,河南焦作人,博士,研究员,长期从事农药风险评估及控制研究。E-mail: dongfengshou@caas.cn

中农药残留监管及膳食风险评估工作提供指导,保障人民群众的膳食摄入安全。

## 1 基本概念

### 1.1 农药残留定义

不同农药的残留物在种类和数量上可能表现出显著的差异性,即使是同一种农药,在不同作物中也可能存在不同的残留代谢物。因此,为了规范农药残留的风险,需要对每种农药制定统一的农药残留物定义。2009年,经济合作与发展组织(OECD)颁布了《农药残留物定义导则》,明确规定了农药残留物的定义,即农药管理机构对用于可食用或可饲用作物上的农药,在进行膳食摄入风险评估和制定最大残留限量时所明确的残留化合物<sup>[1-2]</sup>。该导则得到了OECD国家的普遍认可,并已成为FAO/WHO(世界卫生组织)农药残留专家联席会议(JMPR)关于农药残留物定义的权威指导性文件。

JMPR根据农药在动植物体内代谢特性的差异,将农药残留定义分为植物源产品残留定义和动物源产品残留定义。又基于不同的应用目的,残留定义分为进行农药风险评估的残留定义和农产品市场监管的残留定义。农药JMPR评估报告中均明确提到以上农药残留定义<sup>[3]</sup>。由于我国在2017年之前未强制要求申请产品登记时提交农药在动植物体内的代谢数据,导致目前我国可用于制定农药残留物定义的基础数据较少,因此,在进行风险评估时主要参照JMPR推荐的相关残留物定义。我国颁布的《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)中的术语——“残留物”即为农药残留物定义,且为用于农产品市场监管的残留定义。定义为由于使用农药而在食品、农产品和动物饲料中需要关注的特定物质,包括被认为具有毒理学意义的农药衍生物,如农药转化物、代谢物、反应产物及杂质等<sup>[4]</sup>。

### 1.2 农药膳食风险评估

风险评估是指在给定条件下,系统地运用科学技术手段,科学评价农药对人类健康和生态环境造成负面影响的可能性及其严重程度。其主要包括危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述4个部分。农药膳食风险评估是农药风险评估的重要组成部分,主要是对可能摄入的农药风险因素进行定性或定量评价<sup>[5]</sup>。通过收集目标人群的食物消费量和食物中农药残留数据,计算膳食暴露量的估计值,实现风险表征<sup>[6]</sup>。根据化合物毒性和摄入量的差别,

膳食暴露分为急性膳食暴露和慢性膳食暴露。前者是指24 h以内的暴露,一般仅考虑一种农产品中该农药残留量的最大值,代表该农药对相应人群的急性暴露量;后者是指每天暴露并持续终生,一般采用该种农药在所有涉及食物中的农药残留试验中值(STMR)加以表征<sup>[7]</sup>。农产品是人体膳食消费的主要对象,因此,农药膳食风险评估常用农产品中农药残留风险评估来描述,并通过制定农产品中最大残留限量标准的方式来进行风险控制。

农产品中农药残留风险评估的主要内容和程序包含以下3个部分:(1)农药毒理学评估。明确农药的毒性特征,综合毒代动力学和毒理学评价结果以确定毒理学参考值或健康指导值,即每日允许摄入量(ADD)和急性参考剂量(ARfD),以将此作为人体终身和/或单次允许摄入农药的安全阈值。(2)残留化学评估。对农产品和环境中的农药及其代谢物的残留行为进行评估,数据主要来源于农药登记残留试验和残留监测数据。既可采用残留中值、最大值进行简单的点评估,也可进行基于分布的概率评估。(3)膳食摄入评估。根据居民膳食消费结构,结合残留化学评估推荐的残留试验中值、最高残留值(HR)或已制定的最大残留限量(MRL),对长期膳食摄入或短期膳食摄入进行估算,并将估算结果与推荐的ADI或ARfD进行比较。当长期摄入量小于ADI和/或短期摄入量小于ARfD时,认为风险可以接受<sup>[8]</sup>。

农药膳食风险评估与农药最大残留限量标准密不可分,前者为后者的制定提供了科学依据,后者为前者提供有效风险管控。膳食评估过程中得到的毒理学数据、农药残留数据和膳食消费统计数据的不确定度决定了农产品中农药残留风险评估的数据存在一定的范围不确定度,所以在进行膳食暴露评估时,保证评估数据的数量是满足质量要求的基础,通过制定科学的MRL标准,可以更好地实现食品安全。

## 2 常用农药残留检测方法研究进展

农药残留检测方法是农药残留风险识别的基础,农药残留检测的程序包括样品采集、前处理和样品检测。本文主要对固相萃取和QuEChERS 2种典型前处理技术进行介绍,检测技术重点介绍经典仪器检测技术和快速检测技术,并探讨相关问题。

### 2.1 农药残留检测常用的前处理方法

农产品中包含众多复杂基质成分,如糖类、有机酸、色素和脂类等,在样品前处理过程中,这些成

分会污染仪器,干扰农药残留检测结果的准确性。因此,开发具备高选择性、快速且高效的前处理方法尤为关键,其为提升农产品农药残留检测的准确性和确保仪器的长期稳定运行提供了保障。固相萃取(solid-phase extraction, SPE)技术和QuEChERS(quick, easy, cheap, effective, rugged, safe)技术是当前农产品中农药残留检测前处理的主要技术手段。

固相萃取技术是由液固萃取柱和液相色谱技术相结合发展而来,利用不同类型填料的固相萃取柱,包括吸附性或离子交换性的材料,以及多种材料组合,对样品进行分离、纯化和浓缩。利用SPE柱中不同填料,对目标物进行高选择性和特异性的吸附和洗脱。该技术不仅可以显著提高目标物的回收率,还进一步优化了分析物与杂质的分离效果,简化了样品预处理过程,操作简便、省时省力。固相萃取柱的填料主要分为三大类:(1)以硅胶为基质的材料,如 $C_{18}$ 、 $C_8$ 、SCX等;(2)以高分子聚合物为基质,包括HLB、MCX和MAX等;(3)以无机材料为基质,例如弗罗里硅土、氧化铝、石墨化炭黑等材料。SPE柱具有净化样品、减少基质效应、分馏和痕量浓缩的功能,能有效分离样品中的不同化合物,提高后续分析检测的成功率。目前,较为常见的SPE柱有沃特世公司的Sep-Pak和Oasis系列、安捷伦公司的Bond Elut系列、德国Simon公司的Alerich系列、岛津技迹的InertSep和WandaSep系列等,其中德国Simon的Alerich系列中SPE柱性价比较高。国内一些企业如博纳艾杰尔、迪马科技、月旭科技、安谱实验等生产的SPE柱也具有较好的分离效果和较高的性价比。

2003年,美国农业部Anastassiades等<sup>[9]</sup>提出一种快速样品前处理技术QuEChERS方法。借助吸附剂填料与基质中杂质的相互作用,实现杂质的吸附和去除,从而达到净化的目的。均质处理后的样本,先用乙腈提取,再使用萃取盐(硫酸镁及缓冲盐)盐析分层,基质分散萃取技术进行净化。这种方法能减少基质共提物的干扰,提高农药提取率。目前,萃取盐包与吸附剂均有商品化产品。萃取盐包主要分为3种:原始方法( $MgSO_4$  4 g、NaCl 1 g);农药残留国际标准分析方法——AOAC法( $MgSO_4$  6 g、NaOAc 1.5 g);欧洲法定标准分析方法——EN法( $MgSO_4$  4 g、NaCl 1 g、柠檬酸钠 1 g、柠檬酸氢二钠 0.5 g)。使用商品化萃取盐包可减少称量步骤并避免引入杂质,大批量样品前处理时可显著减少工作时间,但其售价较高,大多数实验室仍然选择自行配制萃取盐。QuEChERS方法中常用的吸附剂有PSA(N-丙

基乙二胺)、GCB(石墨化炭黑)、HLB、 $C_{18}$ 、硅胶等,沃特世等公司售卖的dSPE纯化管即为搭配好比例的吸附剂。QuEChERS法进一步简化了前处理的步骤,具有回收率高、可分析范围广、操作简单、有机溶剂用量少等优点,现已广泛应用于农产品中农药残留检测<sup>[10-12]</sup>。未来QuEChERS技术会向批量化、智能化、自动化、省时的研发方向发展。

## 2.2 农产品中农药残留检测方法

### 2.2.1 经典仪器检测技术

随着仪器技术的持续发展与革新,以色谱、质谱联用等为代表的高分辨率、高灵敏度检测技术成为农药残留分析的主流,其中包括气相色谱-质谱联用技术、液相色谱-质谱联用技术。而质谱又分为四极杆质谱(QMS)、三重四极杆质谱(QQQ)、离子阱质谱(ITMS)、飞行时间质谱(TOF)和轨道阱质谱(Orbitrap)等。

气相色谱-串联质谱(GC-MS/MS)法结合了气相色谱的高分离特性和质谱对未知化合物独特的鉴别能力与高灵敏度,通过气化目标物,能够同时检测多种农药,进行准确定性定量。但GC-MS/MS对样品前处理步骤要求相对较高,相对于液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)法来说,其前处理流程更为繁琐,耗时也相对较长。安捷伦、岛津、赛默飞和珀金埃尔默占据了气相色谱仪及气相色谱-质谱联用仪市场的主要份额。尤其是安捷伦,气相色谱、气相色谱-质谱产品线较全,Agilent 5977C单四极杆GC-MSD的检出限低至1 fg IDL,使用MassHunter未知物分析软件可加快化合物鉴定方法开发速度并简化和加快数据分析和审查,而Agilent 7000系列三重四极杆GC-TQ在EI模式下可实现“阿克级”检测。岛津目前在售的四极杆气相色谱-质谱联用仪有GCMS-QP2010 SE、GCMS-QP2020 NX、GCMS-QP2050,其中,GCMS-QP2050是2023年发布的最新产品,新增四极杆上的预杆,提高了灵敏度和耐用性,离子源结构也得到简化,减轻了维护负担。而三重四极杆气相色谱-质谱联用仪有GCMS-TQ8050 NX和GCMS-TQ8040 NX等2个型号。GCMS-TQ8050 NX同样可以进行“阿克级”定量分析。赛默飞的气相色谱-质谱联用仪在性能上表现出色,变色龙软件功能良好,是科研工作者强有力的分析工具。就气相色谱-质谱联用仪而言,除了单四极杆和三重四极杆GC-MS系统,还有高分辨Orbitrap和扇形磁场GC-MS系统。珀金埃尔默目前在售的气相色谱-质谱联用仪只有单四极杆GCMS 2400。相对而言,该品

牌农药残留检测用的气相色谱-质谱联用仪较少。

液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)法是用液相色谱对分析物进行分离,用质谱仪产生并检测带电离子,融合了液相色谱卓越的分离能力与质谱技术的高灵敏度、高选择性检测能力。由于其前处理步骤相对简单,目前已成为农产品中农药残留定性和定量分析最常用的方法。该方法适用于分析大分子、极性、加热不稳定、不易挥发化合物。根据欧盟非强制执行法案2002/657/EC,当质谱碎片被非全扫描技术所测量时,一系列的识别点将用于解释数据。低分辨质谱中,母离子识别点数为1,子离子识别点数为1.5,而在高分辨质谱中,母离子识别点数为2,子离子识别点数为2.5,LC-MS/MS通常会产生4个识别点<sup>[13]</sup>。液相色谱-质谱联用仪的主流品牌有赛默飞、SCIEX、沃特世、安捷伦和岛津等。SCIEX的三重四极杆技术成熟,SCIEX Triple Quad 5500+是其中一款旗舰产品,具有高灵敏度和可靠性,非常适用于农产品安全检测。赛默飞的液相色谱-质谱联用仪有TSQ plus系列三重四极杆系统、LTQ Orbitrap和Orbitrap LC-MS系统等,适用于从常规化合物鉴定到复杂混合物中痕量成分的分析。安捷伦的液相色谱-质谱联用仪具有卓越的稳定性和精确度,包含三重四极杆系统、四极杆飞行时间系统、高通量系统、单四极杆系统和飞行时间系统5个品类,新型的6495D Triple Quad LC/MS便于进行实验室的大批量样品分析研究,检出限可达到 $10^{-9}$  mg/L,同时可提供亚毫秒级驻留时间下的高精度结果。沃特世在液相色谱方面的技术领先,其中一款主流型号是Xevo TQ-XS,其设计集成了多种技术创新,如StepWave XS离子引导技术和UniSpray创新电离技术,能够扩大分析物的范围,提高信号,从而简化实验流程并提高效率。其余型号,如岛津的LCMS-8060NX、LCMS-9050,珀金埃尔默的QSight三重四极杆液相色谱-质谱联用仪等在市场上也占有一席之地。

四极杆质谱是质谱中应用最广泛且最具代表性的质谱仪,优势在于操作快速简单、重现性较好、扫描速度快、成本低,同时也存在分辨率低、质量分析范围窄、定性能力较差、易出现假阳性等缺点。质谱技术发展早期,LC-MS和GC-MS在农药残留检测中发挥了一定作用<sup>[14-15]</sup>,在选择离子监测模式下具有较好的特异性和灵敏度。3组四极杆串联则组成了三重四极杆质谱,目前已成为我国农药残留检测领域相关国家标准中采纳最为广泛的质谱技术。相比于单四极杆,三重四极杆质谱能快速扫描母离

子和产物离子,非常适合目标化合物的定量分析,具有高度特异性,但无法分析非靶标化合物<sup>[16]</sup>。目前,各主流厂家的三重四极杆质谱仪各有优势,可根据实验室应用选择最合适的品牌。相对于三重四极杆质谱,离子阱质谱成本更低,体积小巧,是最易于实现小型化的质谱仪<sup>[17]</sup>;且具有多级串级能力,适合于分子结构方面的定性研究,能够提供分子局部的结构信息,分辨率高于四极杆质谱。但离子阱在离子阱内易发生离子-分子反应,在定性时易将相对分子质量由M误认为M+1,且其定量能力较差,易出现质量偏移,缺乏母离子扫描和中性丢失等特征基团筛选功能,腔体容易脏,需要定期清理和维护。虽然目前市场上已出现了四极杆式离子阱,可改善定性误判现象,但无法做到完全消除。赛默飞的LTQ系列和布鲁克的amaZon speed系列均具有良好的稳定性和灵敏度。

飞行时间质谱和轨道阱质谱是农药残留检测中常用的高分辨质谱,为了提高筛查的可靠性和准确性,高分辨质谱常与四极杆质谱串联使用。飞行时间质谱的质量分析范围较宽,单个样品的测量速度快,分辨率高,这一能力使其能有效分辨分子质量极其接近的农药分子,进而规避由分子质量相近的基质杂质带来的干扰问题,被广泛应用于非靶向的高通量定性筛查和定量分析<sup>[18-19]</sup>。但当涉及复杂基质时,飞行时间质谱的灵敏度较低,且仪器售价高,精密度高,需要认真维护。布鲁克是飞行时间质谱仪的先驱之一,其QTOF系列享有一定声誉。轨道阱质谱则具有高分辨率、高精度的特点,还具有较广的质量范围和动态范围,并且克服了飞行时间质谱尺寸大、维护与操作复杂的缺点,但该技术仍需进一步提高其分析速度等参数<sup>[20]</sup>。赛默飞则是轨道阱技术的先驱,其Q Exactive、Orbitrap Fusion和Orbitrap ID-X具有高分辨率、高灵敏度的优点,且具有强大的数据分析能力。

### 2.2.2 快速检测技术

尽管经典仪器检测方法具有良好的准确度和精密度,但受限于高昂的仪器设备成本、繁琐的样品前处理步骤以及较长的检测周期,难以适应现场即时分析检测的需求。农药残留快速检测技术的发展成为经典仪器检测技术的补充。近年来,农药残留快速检测方法主要为基于电化学、光学分析、生物技术的快速检测方法和一些创新技术的检测方法。本部分重点介绍基于生物技术的快速检测技术,主要集中于生物免疫技术,并对农药残留快速检测

技术现存问题进行探讨。

基于生物技术的快速检测方法在农产品的农药残留检测中应用十分广泛,主要包括酶抑制法和免疫分析技术。酶抑制法只可检测有机磷和氨基甲酸酯类农药,可能会存在漏检,造成假阴性问题。而免疫分析技术具有较高的灵敏度、简便的操作过程和相对较低的成本,近年来在农药残留分析方面发展迅速。目前,可用于多组分、高通量检测的免疫分析技术正处于持续研发与广泛应用阶段,可实现化合物定性定量分析<sup>[21]</sup>。免疫层析(IC)技术作为免疫分析技术的重要组成部分,凭借其较强的实用性和广泛的应用范围,现已成为农产品中各类有毒有害物质现场快速可视化检测的主要技术。

免疫层析技术是一种结合了免疫技术与层析技术的快速检测技术。利用抗原与抗体的特异性,以待测物为流动相,反应后标记物在显色带积累并产生颜色变化,依据显色情况可对目标物进行定性定量分析<sup>[21]</sup>。目前市场上主流的免疫层析产品是基于胶体金技术的试纸条。氯金酸在还原剂作用下被还原成具有不同粒径的金颗粒,最终形成的稳定悬浮液即为胶体金。由于局域表面等离子体共振特性,胶体金颗粒在聚集后会产生颜色变化<sup>[22]</sup>。研究结果显示,粒径在15 nm以上的胶体金肉眼观察结果较为理想<sup>[23]</sup>。Xu等<sup>[24]</sup>通过建立间接竞争酶联免疫吸附(ic-ELISA)和胶体金免疫层析技术(GICA)实现了对茶叶样品中噻嗪酮残留的有效检测。王震宇等<sup>[25]</sup>开发了吡虫啉、噻虫嗪、啉虫脒、克百威、多菌灵、吡唑醚菌酯、异菌脲、啞霉胺等8种农药残留检测的胶体金免疫层析试纸条,该试纸对目标农药的检出限满足GB 2763—2021中规定的草莓上对应农药的最大残留限量要求。Wang等<sup>[26]</sup>通过竞争性酶联免疫吸附法筛选出5种可识别除草醚(NIT)和甲羧除草醚(BIF)的单克隆抗体,并基于制备的抗体开发了胶体金侧流免疫层析试纸条,可满足水果样品中BIF和NIT的定性定量分析。Wang等<sup>[27]</sup>基于胶体金免疫层析技术制备了苯醚甲环唑试纸条,可特异性检测柑橘中的苯醚甲环唑,试纸条与其他常见三唑类农药无交叉反应,视觉检出限为0.2 mg/kg,定量范围为0.06~0.6 mg/kg。金洪伟等<sup>[28]</sup>制备了毒死蜱胶体金试纸条并优化了前处理方法,实现了香蕉、韭菜和小白菜等果蔬产品中毒死蜱残留的现场快速检测。王静教授团队开发了一款基于免疫层析试纸条和移动终端的食品安全智能识别系统,可用于茶叶、豇豆、韭菜、芹菜、茄子、辣椒、黄瓜、橙、橘、柑等多

种农产品中农药残留的快速检测,该检测系统能在5 min内实现农药残留定性或半定量分析。随着材料技术的持续发展,以纳米荧光材料作为标记物的免疫层析技术得到了广泛开发和应用。如Xu等<sup>[29]</sup>设计了一种基于时间分辨荧光免疫层析试纸条(TRFIS)的便携式多通道检测仪,可用于芹菜、花椰菜和小甘蓝中啉虫脒残留的现场检测,在不同蔬菜基质中的检出限为0.056~0.074 mg/kg。Chen等<sup>[30]</sup>开发了特异性识别啉氧菌酯的单克隆抗体,并基于该抗体开发了时间分辨荧光微球试纸条,用于现场检测蔬菜中啉氧菌酯残留,检测结果与超高效液相色谱-串联质谱具有高度一致性。Wu等<sup>[31]</sup>开发了基于量子点微珠的免疫层析技术,可快速定量大米中的三唑磷残留。目前,我国已开发了种类丰富的农药残留快速检测产品,本文重点列举了部分产品(表1)。

虽然近年来我国在农产品安全领域的投入增加,农药残留快速检测技术不断发展,但其仍然面临一系列挑战。(1)检测技术的灵敏度。免疫层析试纸条的准确性和灵敏度达不到准确定量的要求,大部分试纸条只能用于半定量或定性检测。为了能够检测出农产品上低浓度的农药残留,需要开发灵敏度更高的抗体。当前也有关于适配体试纸条的研究报道,但由于特异性适配体的设计和制备过程复杂,现阶段只开发出识别少数农药的适配体,尚未出现基于适配体的商业化现场快速检测产品。(2)农产品中多残留筛查和分析。对于结构相似的农药,抗体与待测物的结构类似物之间往往存在较高的交叉反应,难以针对同一类农药进行多残留分析。免疫分析法、酶传感器等通常只适用于检测一种或一类农药,无法测定样品中未知的农药残留,难以实现广谱筛查。(3)检测方法的准确性和可靠性。农产品基质的复杂性对抗原抗体反应体系及信号检测构成了显著挑战,这对快检技术的开发提出了高要求,需进一步对检测技术进行调控和优化。(4)快速和高通量筛选。为了满足大量农产品样品快速检测的需求,需要开发快速、高通量的农残检测技术。基于微流控的快速检测技术可以集成实验室中使用的分析方法,缩短分析时间,实现高通量的样品检测。(5)快速检测技术的商业化和产业化。目前只有基于酶抑制法的农残速测卡、速测仪及基于胶体金免疫层析技术的试纸条等商品化较为成熟,其余高灵敏度和高通量的新型方法大多仍停留在实验室研究层面,优越的功能和经济成本难以兼顾,离产业化还有一定距离。

表 1 基于免疫层析技术的农药残留快速检测产品

| 公司名称            | 产品名称                     | 农药品种          | 基质       | 技术原理    |
|-----------------|--------------------------|---------------|----------|---------|
| 北京勤邦科技股份有限公司    | 吡虫啉残留快速检测试纸条             | 吡虫啉           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 啶虫脒残留快速检测试纸条             | 啶虫脒           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 腐霉利残留快速检测试纸条             | 腐霉利           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 甲霜灵残留快速检测试纸条             | 甲霜灵           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 菊酯类残留快速检测试纸条             | 菊酯类农药         | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 灭蝇胺残留快速检测试纸条             | 灭蝇胺           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 三唑醇和三唑酮残留快速检测试纸条         | 三唑醇、三唑酮       | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 三唑磷残留快速检测试纸条             | 三唑磷           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
| 广州瑞森生物科技股份有限公司  | 异丙威、啶虫脒、水胺硫磷三联快速检测卡      | 异丙威、啶虫脒、水胺硫磷  | 蔬菜       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 氟虫腈、吡唑醚菌酯、丙溴磷三联快速检测卡     | 氟虫腈、吡唑醚菌酯、丙溴磷 | 芹菜       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 异菌脲、腐霉利、啶虫脒快速检测三联卡       | 异菌脲、腐霉利、啶虫脒   | 韭菜       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 克百威、多菌灵、灭蝇胺快速检测三联卡       | 克百威、多菌灵、灭蝇胺   | 豇豆       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 苯醚甲环唑快速检测卡/试纸卡           | 苯醚甲环唑         | 蔬菜       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 灭蝇胺量子点微球荧光定量快速检测卡        | 灭蝇胺           | 蔬菜       | 荧光免疫层析  |
|                 | 吡虫啉量子点微球荧光定量快速检测卡        | 吡虫啉           | 蔬菜       | 荧光免疫层析  |
|                 | 克百威量子点微球荧光定量快速检测卡        | 克百威           | 蔬菜       | 荧光免疫层析  |
| 深圳市易瑞生物技术股份有限公司 | 联苯菊酯快速检测试纸条              | 联苯菊酯          | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 噻菌灵快速检测试纸条               | 噻菌灵           | 食用菌、水果   | 胶体金免疫层析 |
|                 | 甲氰菊酯快速检测试纸条              | 甲氰菊酯          | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 甲基对硫磷快速检测试纸条             | 甲基对硫磷         | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 百菌清快速检测试纸条               | 百菌清           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 噻菌灵快速检测试纸条               | 噻菌灵           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 水胺硫磷、有机磷二联快速检测试纸条        | 水胺硫磷、有机磷类农药   | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
| 山东美正生物科技有限公司    | 毒死蜱农残快速定量检测试纸条           | 毒死蜱           | 稻谷、小麦    | 胶体金免疫层析 |
|                 | 啶虫脒农残快速定量检测试纸条           | 啶虫脒           | 糙米、小麦    | 胶体金免疫层析 |
|                 | 多菌灵快速定量检测试纸条             | 多菌灵           | 大米、玉米、小麦 | 胶体金免疫层析 |
|                 | 吡唑醚菌酯快速检测卡MK193A1        | 吡唑醚菌酯         | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 氯吡啶快速检测卡                 | 氯吡啶           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | MK187B1 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐快速检测卡 | 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐   | 豇豆       | 胶体金免疫层析 |
|                 | MK0503A 豇豆中农药残留快速检测卡     | 克百威、水胺硫磷、三唑磷  | 豇豆       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 啉霉胺快速检测卡                 | 啉霉胺           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 烯酰吗啉快速检测卡                | 烯酰吗啉          | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 戊唑醇快速检测卡                 | 戊唑醇           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
| 杭州南开日生物技术有限公司   | 快螨特快速检测试剂盒               | 快螨特           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 蝇毒磷快速检测试剂盒               | 蝇毒磷           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 双甲脒快速检测试剂盒               | 双甲脒           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 倍硫磷快速检测试剂盒               | 倍硫磷           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 甲基异柳磷快速检测试剂盒             | 甲基异柳磷         | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 除虫脲快速检测试剂盒               | 除虫脲           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 腈菌唑快速检测试剂盒               | 腈菌唑           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 |                          |               |          |         |
| 苏州诚检生物科技有限公司    | 莠去津快速检测卡                 | 莠去津           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 烯啶虫胺快速检测卡                | 烯啶虫胺          | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 氟节胺快速检测卡                 | 氟节胺           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 多效唑快速检测卡                 | 多效唑           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 扑草净快速检测卡                 | 扑草净           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 二嗪磷快速检测卡                 | 二嗪磷           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 多杀霉素快速检测卡                | 多杀霉素          | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |
|                 | 草铵膦快速检测卡                 | 草铵膦           | 果蔬       | 胶体金免疫层析 |

(续表 1)

| 公司名称                   | 产品名称                | 农药品种         | 基质 | 技术原理      |
|------------------------|---------------------|--------------|----|-----------|
| 广州智汇生物科技<br>有限公司       | C02-克百威快速检测卡        | 克百威          | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C03-毒死蜱快速检测卡        | 毒死蜱          | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C04-异丙威快速检测卡        | 异丙威          | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C07-水胺硫磷快速检测卡       | 水胺硫磷         | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C13-百菌清-多菌灵2合1快速检测卡 | 百菌清、多菌灵      | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C14-氟虫腈-甲萘威2合1快速检测卡 | 氟虫腈、甲萘威      | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C15-吡虫啉快速检测卡        | 吡虫啉          | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
|                        | C49-啉霉胺快速检测卡        | 啉霉胺          | 果蔬 | 胶体金侧流免疫层析 |
| 广东达元绿洲食品<br>安全科技股份有限公司 | 异菌脲快速检测盒            | 异菌脲          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 噻虫嗪快速检测盒            | 噻虫嗪          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 苯醚甲环唑快速检测盒          | 苯醚甲环唑        | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 水胺硫磷快速检测盒           | 水胺硫磷         | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 联苯菊酯快速检测盒           | 联苯菊酯         | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 克百威快速检测盒            | 克百威          | 粮食 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 2,4,5-三氯苯氧乙酸快速检测盒   | 2,4,5-三氯苯氧乙酸 | 蔬菜 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 腐霉利快速检测盒            | 腐霉利          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
| 武汉上成生物科技<br>有限公司       | 腐霉利胶体金检测卡           | 腐霉利          | 蔬菜 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 毒死蜱胶体金检测卡           | 毒死蜱          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 灭蝇胺胶体金检测卡           | 灭蝇胺          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 吡虫啉胶体金检测卡           | 吡虫啉          | 蔬菜 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 克百威胶体金检测卡           | 克百威          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 毒死蜱胶体金检测卡           | 毒死蜱          | 果蔬 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 噻虫胺胶体金检测卡           | 噻虫胺          | 蔬菜 | 胶体金免疫层析   |
|                        | 啉虫脒胶体金检测卡           | 啉虫脒          | 蔬菜 | 胶体金免疫层析   |

3 我国农产品中农药残留监测现状

开展全国范围内的农产品中农药残留监测工作是各国政府保障农产品质量安全的惯例。我国从2001年起在京、津、沪、深4个城市试点启动农产品质量安全例行监测工作；2018年，农业农村部印发国家农产品质量安全例行监测(风险监测)计划，取得良好效果。本章从主要粮食作物、水果、蔬菜、加工产品、香辛料等类别简要介绍我国农产品中农药残留监测的现状。监测结果显示，粮食作物中农药残留膳食风险低，而水果和蔬菜中易发生农药残留超标现象。在大多数加工过程下，农产品中农药残留量下降，但少数加工过程(干燥、制油等)会使农药残留发生浓缩富集现象。

3.1 主要粮食作物

水稻、小麦、玉米、高粱、谷子、薯类、大豆等是中国主要粮食作物，其中又以水稻、小麦和玉米种植范围更广、面积更大、产量更多。粮食产品中的农药残留主要来源于2个方面：一是在生产过程中为了防治病虫害直接喷施的农药导致形成的直接农药残留。此外，某些具有内吸性的农药施用后可

通过作物的叶片、茎秆和根部等吸收，并进一步在作物内部经历代谢和转运，最终沉积于籽粒等部位，形成可食用部位农药残留；二是在粮食仓储过程中治虫用药。仓储用药通常采用熏蒸剂，施用后及时进行通风处理，则能最大程度避免农药残留。但如果采用某些长效杀虫剂进行熏蒸，如马拉硫磷、甲基嘧啶磷等，则会产生粮食中农药残留。Cao等<sup>[32]</sup>对2016—2020年中国三大稻谷产区17个省份采集的6 229份糙米样本中25种农药的残留水平进行分析，并评估了慢性和急性膳食暴露风险。数据显示，糙米中有机磷类、新烟碱类和三唑类农药的慢性和急性膳食暴露风险在 $7.43 \times 10^{-4} \sim 3.36 \times 10^{-2}$ 之间，尚不构成膳食风险。姜朵朵<sup>[33]</sup>选择我国三大小麦主产区、三大玉米主产区和四大水稻主产区，系统考察了多种典型农药在这三大作物土壤及对应农产品中的残留特征，并完成了膳食风险评估。经分析，小麦籽粒、玉米籽粒和糙米这3种农产品中目标农药的残留水平均低于最大残留限量，且3种农产品中农药的急性和慢性膳食摄入风险低。鉴于粮食作物的生长周期长且储存期也相对较长，大部分农药残留会在自然条件下逐渐降解，在经过后续加工

后,残留会进一步去除和降解,所以粮食上农药残留的膳食风险较低。

3.2 水果和蔬菜

根据国家市场监督管理总局的市场监测数据,2023年的食品安全监督抽检不合格项目中,农产品抽检不合格率为3.53%<sup>[34]</sup>;在2024年第一季度检测中,农产品质量安全问题仍然突出,不合格率为3.84%<sup>[35]</sup>。

据报道,海南热带果蔬中存在较高的农药残留水平,其中,常见的农药残留包括有机磷类、氨基甲酸酯类、三唑类等<sup>[36-38]</sup>。Zhang等<sup>[39]</sup>对2018年11月至2021年6月海南省不同种植区的豇豆样品中35种农药残留进行检测。研究发现,30.1%的样品中农药残留量超过了最大残留限量,其中12种是禁用农药。此外,段云等<sup>[40]</sup>对我国芒果主产区和消费城市1 056份全果样品进行检测和膳食摄入风险评估发现,13种杀菌剂中有醚菌酯、丙环唑等7种农药超范围使用,但其长期和短期膳食摄入风险均在可接受范围内。沈斯文等<sup>[41]</sup>对2017—2022年采集的500份上海市地产芹菜样品中82种农药残留进行检测和慢性膳食暴露风险评估。调查发现有82.8%的检出农药未在芹菜上登记,但芹菜中农药残留的慢性摄入风险处于可接受水平。黄文源等<sup>[42]</sup>在湖南、湖北等13个地区进行田间试验,研究了啉虫脒和吡丙醚在柑橘中的残留情况,并进行了膳食风险评估。结果显示,柑橘中2种农药的最终残留量均低于最大残留限量标准,对不同年龄段人群的急性和慢性膳食暴露风险均处于可接受水平。曾静等<sup>[43]</sup>基于文献报道和市场监督管理部门发布的检测结果,对2021—2022年果蔬中的农药残留超标情况进行了系统梳理和分析。按照农药残留超标率从高到低排序,蔬菜顺序为:豆类>鳞茎类>根茎类和薯芋类>叶菜类>瓜类>茄果类;水果顺序为:热带和亚热带水果>柑橘类>浆果和其他小型水果>核果类>仁果类。本文参考了新疆维吾尔自治区、黑龙江省、内蒙古自治区、天津市、山东省、山西省、河南省、江苏省、浙江省、上海市、四川省、广西壮族自治区等12个省(市、区)市场监督管理局公布的监测数据,总结了2023—2024年各类水果、蔬菜中农药残留超标情况(表2、表3)<sup>[44-55]</sup>。监测数据显示,果蔬中残留超标农药种类主要为有机磷类和拟除虫菊酯类,氨基甲酸酯类超标农药主要品种为克百威,新烟碱类农药吡虫啉、啉虫脒、噻虫嗪、噻虫胺等残留超标情况较为明显。果蔬中农药残留主要是由于超范围使用或未按照规定间隔期使用农药。尽管某些农药,如甲

胺磷、乙酰甲胺磷、乐果、毒死蜱、三唑磷等已被禁止在果蔬上使用,但其检出频率依然很高。

水果和蔬菜主要以鲜食为主,农药残留降解时间短,国家对水果和蔬菜上使用的农药管理较严,严格规定了农药的使用技术和安全间隔期。通常按照农药标签规范施用农药是不会发生农药残留超标情况和膳食风险。但由于我国农业生产经营分散,部分小农户缺乏对农药安全间隔期重要性的认识,不规范施用农药是导致农药残留超标的主要原因。

表 2 2023—2024 年市场监督抽检蔬菜中  
残留超标的农药品种<sup>[44-55]</sup>

| 蔬菜<br>种类 | 蔬菜<br>名称 | 残留超标农药品种                                                                        |
|----------|----------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 鳞茎类      | 葱        | 噻虫嗪、水胺硫磷、戊唑醇、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                                      |
|          | 韭菜       | 腐霉利、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、毒死蜱、二甲戊灵、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、克百威、氧乐果、多菌灵、甲拌磷、乙酰甲胺磷                  |
| 叶菜类      | 芹菜       | 甲拌磷、腈菌唑、毒死蜱、辛硫磷、噻虫胺、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、克百威、氧乐果、氟虫腈、辛硫磷、腈菌唑、阿维菌素                      |
|          | 菠菜       | 氟虫腈、甲拌磷、毒死蜱、阿维菌素                                                                |
|          | 上海青      | 毒死蜱、吡虫啉、啉虫脒、水胺硫磷、氧乐果                                                            |
|          | 油麦菜      | 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、阿维菌素、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、啉虫脒、毒死蜱、克百威、腈菌唑                                  |
|          | 普通白菜     | 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、毒死蜱、啉虫脒、氟虫腈、吡虫啉、氧乐果、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                   |
|          | 生姜       | 噻虫胺、噻虫嗪、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                             |
| 根茎类和薯芋类  | 山药       | 咪鲜胺、咪鲜胺锰盐                                                                       |
|          | 胡萝卜      | 甲拌磷、毒死蜱、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                                           |
|          | 白萝卜      | 甲拌磷、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                                               |
|          | 马铃薯      | 甲拌磷、克百威                                                                         |
| 豆类       | 菜豆       | 氧乐果、克百威、噻虫胺、噻虫嗪、毒死蜱、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、灭蝇胺、倍硫磷、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、水胺硫磷、啉虫脒、甲基异柳磷            |
|          | 豇豆       | 噻虫嗪、灭蝇胺、倍硫磷、阿维菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、氧乐果、噻虫胺、克百威、甲胺磷、乙酰甲胺磷、水胺硫磷、三唑磷、甲基异柳磷、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯 |
| 瓜类       | 黄瓜       | 阿维菌素、腐霉利、敌敌畏、乙螨唑、毒死蜱                                                            |
| 茄果类      | 辣椒       | 噻虫胺、噻虫嗪、氧乐果、克百威、联苯菊酯、倍硫磷、毒死蜱、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、乐果、啉虫脒、甲胺磷、乙酰甲胺磷、氟虫腈、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯     |
|          | 茄子       | 克百威、氟虫腈、噻虫胺、噻虫嗪、氧乐果、水胺硫磷                                                        |
|          | 番茄       | 毒死蜱                                                                             |

表 3 2023—2024 年市场监督抽检水果中  
残留超标的农药品种<sup>[44-55]</sup>

| 水果种类          | 水果名称 | 残留超标农药品种                                                    |
|---------------|------|-------------------------------------------------------------|
| 浆果和其他<br>小型水果 | 草莓   | 烯酰吗啉                                                        |
|               | 猕猴桃  | 氯吡脞                                                         |
| 仁果类           | 梨    | 氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、克百威、<br>敌敌畏、乙螨唑                               |
|               | 苹果   | 敌敌畏                                                         |
|               | 橙    | 联苯菊酯、苯醚甲环唑                                                  |
| 柑橘类           | 沃柑   | 苯醚甲环唑、丙溴磷、联苯菊酯、三唑<br>磷、克百威                                  |
|               | 橘    | 联苯菊酯、丙溴磷、氯氟氰菊酯、高效氯<br>氟氰菊酯、苯醚甲环唑、水胺硫磷、2,4-<br>滴、2,4-滴钠盐、毒死蜱 |
| 核果类           | 桃    | 氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯                                               |
| 热带和亚热<br>带水果  | 香蕉   | 噻虫嗪、噻虫胺、吡虫啉、腈苯唑、联苯<br>菊酯、吡唑醚菌酯                              |
|               | 芒果   | 吡唑醚菌酯、噻虫胺、戊唑醇、乙酰甲胺<br>磷、腈苯唑、吡虫啉                             |
|               | 荔枝   | 吡唑醚菌酯、氰霜唑、甲氨基阿维菌素<br>苯甲酸盐                                   |
| 瓜果类           | 甜瓜   | 乙酰甲胺磷                                                       |

3.3 香辛料

香辛料是指一类具有芳香和辛香等典型风味的天然植物性制品,以植物花果、根茎、叶及其干制品或提取物等为原料,是调味料中最重要的组成部分<sup>[56]</sup>。目前防治香辛料作物病虫害的主要手段仍是化学农药。相比于常见的果蔬基质,香辛料基质较为复杂,其基质含油量高、色素含量大且基质干扰强,无法在前处理过程中有效地去除基质干扰,为准确确定性和定量仪器检测带来挑战。颜伟华等<sup>[57]</sup>对八角、干姜、辣椒、花椒与孜然中55种农药残留进行分析,其中17批花椒中检测出高毒农药克百威,并且辣椒、花椒和孜然中有多种农药残留检出。扈斌<sup>[58]</sup>应用自动QuEChERS法结合液相色谱-三重四极杆串联质谱对市售花椒和香叶进行农药残留筛查和定性定量检测。结果发现,市售花椒和香叶中均有农药残留,其中花椒中乙螨唑残留量最高为70.34 μg/kg。目前,我国尚未制定乙螨唑在花椒和香叶中的最大残留限量。此外,曹琦等<sup>[59]</sup>应用气相色谱-四极杆/飞行时间质谱对12份鲜辣椒和14份干辣椒样品中244种农药残留及其代谢物进行筛查。结果显示,9份鲜辣椒和3份干辣椒样品中筛查出8种农药化合物,但其残留量均未超过最大残留限量。

近年来,中国在香辛料中农药最大残留限量标准的研究制定工作上加快了步伐,但与美国、欧盟

的MRL标准数量相比仍有差距,且一些香辛料中农药残留限量高于欧盟标准,可能会导致出口遭遇贸易壁垒问题<sup>[60]</sup>。

3.4 加工产品

农产品加工是利用物理、化学和生物学手段,将初级农产品转化为多样化食品制品的一种生产活动<sup>[61]</sup>。在农产品加工过程中,农药残留会呈现出不同的变化趋势,除了一些特定的加工过程如干燥、制油等会发生农药残留浓缩富集现象,甚至发酵、热处理等过程也会促使某些农药转化成对人体更有害的代谢物,但绝大部分加工过程可以降低农产品中的农药残留量<sup>[62]</sup>。段丽芳<sup>[63]</sup>研究了在大豆、花生和油菜的油籽加工及油炸烹饪过程中7种常用农药的残留变化规律,并进行了膳食摄入风险评估。研究发现,在植物油中农药出现了明显的浓缩富集现象,在食用油加热过程中大部分农药会出现浓缩现象,随着反复油炸,农药降解现象逐渐明显。此外,利用油籽加工的理论加工因子(professing factors, PF)、文献PF资料和PF外推理论,对我国油籽中所有已登记的脂溶性农药进行了全面的膳食风险评估。评估结果显示,膳食风险超百的农药有9种,分别是咪鲜胺、吡唑醚菌酯、精喹禾灵、高效氟吡甲禾灵、百菌清、苯醚甲环唑、高效氯氟菊酯、哒嗪硫磷和氰戊菊酯。肖欧丽<sup>[64]</sup>系统研究了在枸杞种植及加工过程中5种化学农药的残留行为,发现煎煮、冲泡和酒精浸泡后残留农药对人体的急性和慢性膳食摄入风险可忽略。Meng等<sup>[65]</sup>则研究了24种农药在芝麻加工过程中的迁移情况。研究表明,35%的农药会降解,但仍有65%的农药会迁移进入加工产品中。

目前,我国《农药登记资料要求》中明确规定,申请农药登记时需要提交涉及农产品加工后农药残留试验的相关资料<sup>[66]</sup>。我国已制定了700多项加工产品中的农药MRL<sup>[4]</sup>。然而,与欧盟、美国、日本相比,我国农药登记资料的具体要求应当强化和完善,尤其是在确立加工农产品中农药MRL的制定原则、具体实施程序和技术路径等方面。此外,需细化和补充用于长期膳食摄入风险评估的膳食消费量数据,以开展更加精确和科学的膳食摄入风险评估,为公共健康提供保障。

4 膳食风险评估标准

4.1 农药残留国家标准体系建设现状

2009年,《中华人民共和国食品安全法》首次颁布施行,规定了食品安全标准是强制执行的标准,

明确了食品中农药残留限量规定及其检验方法与规程的制定单位,明确了农药残留国家标准体系建设的基本架构,为农产品安全监管提供了坚实的法律支撑和标准化指导<sup>[67]</sup>。《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763—2021)是强制性国家标准,统一规定了农产品中农药最大残留限量。2022年,《食品安全国家标准 食品中2,4-滴丁酸钠盐等112种农药最大残留限量》(GB 2763.1—2022)由国家卫生健康委员会、农业农村部、国家市场监督管理总局联合发布,这个标准是GB 2763—2021的增补版,可以配套使用。该标准基于我国农药登记相关残留试验数据,明确农药的最大残留水平,继而根据农药的毒理学数据和我国膳食消费数据进行膳食暴露风险评估<sup>[68]</sup>。根据评估结果,确定并推荐农药最大残留限量。增补版扩大了农药残留监管的覆盖面,新增了农药品种,增加了最大残留限量标准,完善了农药残留标准体系。同时,增补版对部分转化国际食品法典委员会(CAC)的食品组限量标准进行了修订,扩大了标准的适用范围,提升了标准的适用性。截至2023年,我国已发布的农药残留限量标准数达到10 379项,切实提高了我国农产品质量安全保障能力。

此外,农业农村部先后发布了一系列标准制定技术规程,包括《食品中农药残留风险评估指南》《食品中农药最大残留限量制定指南》等,建立了符合我国国情的膳食风险评估准则,使得我国农药残留膳食风险评估技术原理、程序和方法等与CAC、欧美等接轨<sup>[69]</sup>。

## 4.2 农药残留国家标准面临的挑战

我国在农药残留标准制定方面起步较晚,研究基础较为薄弱、技术数据积累较少,相较于欧盟、美国等发达国家所制定的有关标准,我国现行的农药最大残留限量标准仍具有一定的滞后性和差异性。

### 4.2.1 农药残留限量标准覆盖范围不足

尽管现有食品安全国家标准已大体涵盖了目前在我国居民日常饮食中常见的各类农产品以及登记注册的农药品种,但不同农药品种所适用的农产品种类却存在较大差异。同时,在当前的食品安全标准体系中,关于残留限量标准在加工农产品、香辛料、动物源性食品和特色小宗作物等方面缺失较为严重。这些农产品在居民的日常饮食中具有不可忽视的地位,但残留限量标准的缺失使之在质量安全监管上处于相对薄弱的地位,进而增加了膳食暴露风险。现有的标准在覆盖面和细节处理上尚不

足以满足实际需要。随着农业生产的不断发展和消费者需求的日益多样化,进一步扩大农药残留限量标准的覆盖范围势在必行。

### 4.2.2 膳食风险评估技术基础亟待完善

农药残留风险评估和限量标准的科学制定中,技术基础的优化与完善至关重要<sup>[7]</sup>。《食品中农药残留风险评估指南》和《食品中农药最大残留限量制定指南》虽为农药残留管理提供了重要指导,但其中关于动物源性食品的规定很少<sup>[70]</sup>。动物源性食品中农药残留检测抽样缺失标准化程序,监测数据积累严重不足,进而影响了对我国农药残留情况的全面理解和风险评估的准确性。此外,针对加工农产品及动物源性食品,用于长期膳食摄入风险的膳食消费数据仍需在种类覆盖、地域代表性、人群细分和时间序列上进一步细化和补充,以构建更符合实际情况的风险评估模型,开展更加精确的膳食摄入风险评估。

### 4.2.3 残留限量指标和检测方法的配套性有待提高

GB 2763.1—2022和GB 2763—2021中,由于缺少配套的农药残留检测方法,部分限量指标仍为临时限量,这对现实监管构成了挑战。针对有多重检测技术可适用的限量指标,可以推荐一系列经过验证的检测方法标准,在满足市场监管的总体要求下,检测机构根据自身实验室资源、技术水平及实际操作选择最适宜且高效的检测方法,从而提升检测的准确性和效率。然而值得注意的是,现有被推荐的部分检测方法在科学性与适用性方面仍有提升空间,以确保检测结果的准确性和可重复性。此外,检测方法之间存在检测范围和检测对象的重叠问题,以及国家和行业标准存在不一致,均要求有关机构着手整合与修订现有标准。

### 4.2.4 标准跟踪评价和修订工作滞后

农药最大残留限量标准的制定,旨在通过标准的实施来指导农药的科学使用,保障消费者健康安全,维护农产品的市场流通和国际贸易。鉴于其在农业生产中的关键作用,对农药最大残留限量标准的适用性和实施效果进行跟踪评价至关重要。《食品中农药最大残留限量制定指南》虽然明确了对农药开展周期性评估和再评审,但在实际操作层面,其工作程序和方法仍有待完善。因此,在跟踪评价农药最大残留限量标准时,在农药使用情况的变化、农药毒理学数据的更新、农药残留检测方法的变化以及国际组织和发达国家标准的修订情况方面应当全面考虑,确保国家标准的科学性和前瞻性。近

期农业农村部对超过5年的农药残留标准提出标准评价的计划,为农药残留标准的科学性和适用性奠定了重要基础。

## 5 展望

2021年,农业农村部、国家发展改革委、科技部、自然资源部、生态环境部和国家林草局联合印发了《“十四·五”全国农业绿色发展规划》,规划着重指出,要建立健全农产品质量追溯体系,实施绿色优质农产品供给提升工程,要求制修订兽药残留食品安全国家标准2 500项<sup>[7]</sup>。“十四·五”期间,我国农业紧密围绕质量兴农、绿色发展的要求,加强农产品产地环境监控,为全面加强农产品质量安全监管提供更有力的技术支撑,以实现农业绿色发展与农产品质量安全的双赢目标。

在科学研究层面,相关研究者首先需进一步深入研究农药残留物定义,解决我国目前对于残留物定义,尤其是风险评估残留物定义标准不统一的问题。缺少明确的残留物定义,就无法对该农药进行合理评估。此外,我国通过每年开展国家及地方级农产品质量安全例行监测工作,积累了大量数据,而利用这些数据开展农产品中农药膳食暴露评估亟须建立具体的评估技术。关键在于构建膳食暴露风险评估模型,开发利用相关评估软件,研究并引入不确定性分析方法,并将其嵌入实际评估案例中。风险评估所得的结果及其不确定性参数上报至风险管理部门,以便决策层指导并优化其策略制定过程。同时,科研人员应加大对农产品安全快速检测技术的研究,促进“产学研”一体化系统的形成,为我国国民的农产品安全提供有效保障。另外,目前的农药残留测定通常是对可食用部分的农药总量进行测定,而没有阐述农药在农产品中的代谢、迁移和空间分布。Wang等<sup>[72]</sup>基于环境质谱成像技术研究福美双、霜霉威、吡虫啉和吡啶啉酯在新鲜香蕉中的迁移模式和空间分布,对新鲜水果中的农药残留进行了原位可视化残留行为分析,为进一步研究农药残留与膳食风险提供了新的方向和思路。

相关管理部门同样需要从完善农药残留物定义入手,优化管理制度,做到农药产品登记与农药残留限量标准制定的同步,从而为风险评估机构和农产品质量安全监管机构开展工作提供依据。此外,需定期开展基础数据调研,规范膳食风险评估程序和方法,建立起农药和兽药残留风险评估和标准制定的联动机制,以加快建立具有中国特色,全

方位、多层次的标准管理体系。为顺应行业的发展趋势并规范相应市场,适时修订和完善农药残留快速检测技术的国家标准也十分重要。目前,由于农产品质量安全的不同环节由不同部门分段监管,影响了部门之间信息传递与交流,保障中国农产品质量安全仍需各部门、各机构共同努力,相互配合。

针对局部地区存在的农药非法生产、经营不规范等问题,各地农业农村部门需加强对农药生产厂商、经营实体及电商经营者的监督审查。同时,应加大对农药合理安全使用的教育培训力度,确保使用者按照农药标签要求科学用药,并严格遵守安全间隔期,杜绝超限使用农药。检测机构则需加大农产品质量监督抽查力度,严格遵守GB 2763—2021中农药残留检测方法,并按照最新限量标准评判农产品膳食摄入风险,实现全流程的农产品质量检测工作,配合农产品产地环境质量评价方法,加快促使农产品农药残留检测体系的完善。

## 参考文献

- [1] OECD. Guidance document on overview of residue chemistry studies[R]. OECD Environment, Health and Safety Publication Series on Testing and Assessment, 2009.
- [2] OECD. Testing of chemicals: organisation for economic cooperation and development[EB/OL]. [2024-06-06]. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/oecdguidelinesforthetestingofchemicals.htm>.
- [3] WHO. Inventory of evaluation performed by the joint meeting on pesticide residues (JMPR)[EB/OL]. [2024-06-06]. <https://apps.who.int/pesticide-residues-jmpr-database>.
- [4] 国家卫生健康委员会,农业农村部,国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [5] FAO/WHO. Principles and methods for risk assessment of chemicals in food: EHC 240[S]. Switzerland, Geneva: WHO press, 2020.
- [6] 王曦, 刘子琪, 康珊珊, 等. 农药残留膳食暴露评估模型研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 269-277.
- [7] 乔雄梧. 食品中农药残留膳食暴露评估若干问题探讨[J]. 农药学报, 2020, 22(5): 727-733.
- [8] 陶传江. 我国农药风险评估技术发展与管理[J]. 农药科学与管理, 2019, 40(2): 16-19.
- [9] ANASTASSIADES M, LEHOTAY S J, TAJNBAHER D, et al. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and "dispersive solid-phase extraction" for the determination of pesticide residues in produce[J]. Journal of AOAC International, 2003, 26(2): 412-431.
- [10] 王登远, 倪永付, 于洪建. QuEChERS结合超高效液相色谱-串联质谱法测定大蒜中15种农药残留[J]. 农药, 2024, 63(6): 419-423;

- 450.
- [11] 高萌, 贺凯, 张家萌, 等. QuEChERS-UPLC-MS/MS法同时测定枸杞子中15种新烟碱类农药及代谢产物残留量[J/OL]. 分析试验室, [2024-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2017.TF.20240418.1724.004.html>.
- [12] 郎乾, 郭庆, 张利辉, 等. 吡蚜酮在马铃薯中的残留与膳食风险评估[J]. 植物保护, 2023, 49(6): 178-184.
- [13] European Communities. Commission decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results[J]. Official Journal of the European Communities, 2002, 17(8): 36.
- [14] 周韦, 刘易昆, 陈子林. 毛细管电泳-质谱联用技术及其在药物和生物分析中的应用[J]. 质谱学报, 2017, 38(4): 362-374.
- [15] SUN J, ZHAO H, WU F, et al. Molecular mechanism of mature honey formation by GC-MS- and LC-MS-based metabolomics[J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(11): 3362-3370.
- [16] WU W, LIU S, GUO T, et al. Rapid screening of 70 colorants in dyeable foods by using ultra-high-performance liquid chromatography-hybrid quadrupole-orbitrap mass spectrometry with customized accurate-mass database and mass spectral library[J]. Food Chem, 2021, 356: 129643.
- [17] 富庆, 尤晓明, 金洁. 小型化离子阱质谱仪在毒品快速采集与分析中的应用[J]. 质谱学报, 2019, 40(3): 259-267.
- [18] THURMAN E M, FERRER I, ZAVITSANOS P, et al. Analysis of isobaric pesticides in pepper with high-resolution liquid chromatography and mass spectrometry: complementary or redundant[J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(10): 2340-2347.
- [19] MEGHESAN-BREJA A, CIMPOIU C, HOSU A. Identification and quantification of some pesticide metabolites from vegetables by GC-TOF-MS and LC-MS-QQQ[J]. Studia Universitatis Babe-Bolyai Chemia, 2017, 62: 19-34.
- [20] 贺美莲, 郭常川, 石峰, 等. Orbitrap高分辨质谱技术在药物分析领域中的应用进展[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(1): 105-110.
- [21] 赵志高, 骆骄阳, 付延伟, 等. 免疫分析技术在农药残留分析中的研究进展及在中药中的应用展望[J]. 分析测试学报, 2021, 40(1): 149-158.
- [22] 谢桂芳, 赖飞, 王艺蓉, 等. 胶体金免疫层析法在食品快速检测中的应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2023(32): 181-185.
- [23] GARCIA-SANZ J A, PODACK E R. Regulation of perforin gene expression in a T cell hybrid with inducible cytolytic activity[J]. Eur J Immunol, 1993, 23(8): 1877-1883.
- [24] XU L, ABDELATY A M, CAO Z, et al. Generating monoclonal antibodies against buprofezin and developing immunoassays for its residue detection in tea samples[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(41): 14967-14978.
- [25] 王震宇, 高俊霞, 陈建波, 等. 草莓中农药多残留快速检测技术构建与应用[J]. 农产品质量与安全, 2023(4): 61-66.
- [26] WANG P, XU X, GUO L, et al. Hapten synthesis and a colloidal gold immunochromatographic strip assay to detect nitrofen and bifentoxin in fruits[J]. Analyst, 2023, 148(11): 2449-2458.
- [27] WANG R, GONG M, LIU Y, et al. Development of a highly sensitive colloidal gold semiquantitative method for the determination of difenoconazole residues in citrus[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1-20.
- [28] 金洪伟, 裴小龙, 陈发荣, 等. 胶体金免疫层析法检测果蔬中毒死蜱前处理的优化[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(9): 141-144.
- [29] XU R, XIANG Y, SHEN Z, et al. Portable multichannel detection instrument based on time-resolved fluorescence immunochromatographic test strip for on-site detecting pesticide residues in vegetables[J]. Analytica Chimica Acta, 2023, 1280: 341842.
- [30] CHEN J, CHEN L, ZHANG Y, et al. Development of a time-resolved fluorescent microsphere test strip for rapid, on-site, and sensitive detection of picoxystrobin in vegetables[J]. Foods, 2024(1): 13030423.
- [31] WU Q, WU P, DUAN H, et al. Quantum dot bead-based immunochromatographic assay for the quantitative detection of triazophos[J]. Food and Agricultural Immunology, 2019(8): 955-967.
- [32] CAO Z, ZHENG X, GUAN M, et al. Cumulative risk assessment of dietary exposure to pesticide residues in brown rice (*Oryza sativa* L.) from the three main rice-growing regions in China during 2016-2020[J/OL]. Journal of Food Quality, [2024-06-06]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/5902540>.
- [33] 姜朵朵. 典型农药在我国三种粮食产地残留特征及膳食风险评估[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [34] 国家市场监督管理总局. 市场监管总局关于2023年市场监管部门食品安全监督抽检情况的通告[EB/OL]. [2024-06-13]. [https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/spcjs/art/2024/art\\_a3bbcf9057e240d284343e782ffd63e5.html](https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/spcjs/art/2024/art_a3bbcf9057e240d284343e782ffd63e5.html).
- [35] 国家市场监督管理总局. 市场监管总局关于2024年第一季度市场监管部门食品安全监督抽检情况的通报[EB/OL]. [2024-06-13]. [https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/spcjs/art/2024/art\\_858238634d464a41b9a0264413e6da09.html](https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/spcjs/art/2024/art_858238634d464a41b9a0264413e6da09.html).
- [36] 段云, 钱程, 李建国, 等. 有机磷农药在海南菜心、苦瓜和豇豆中的残留分析及膳食风险评估[J]. 南方农业学报, 2014, 45(9): 1594-1598.
- [37] DUAN Y, GUAN N, LI P, et al. Monitoring and dietary exposure assessment of pesticide residues in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) in Hainan, China[J]. Food Control, 2016, 59: 250-255.
- [38] HIBA S, FATEN B, RAJA S, et al. Transformation pathways and toxicity assessments of two triazole pesticides elimination by gamma irradiation in aqueous solution[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 276: 119381.
- [39] ZHANG Q, MA C, DUAN Y, et al. Determination and dietary intake risk assessment of 35 pesticide residues in cowpea (*Vigna*

- unguiculata* L. Walp) from Hainan province, China[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 5523.
- [40] 段云, 关妮, 马晨, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定13种甲氧基丙烯酸酯和三唑类杀菌剂在芒果中的残留及膳食摄入风险评估[J]. 农药学报, 2023, 25(1): 175-183.
- [41] 沈斯文, 童金蓉, 高猛峰, 等. 上海市地产芹菜中农药残留慢性膳食暴露风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2024(1): 15-21.
- [42] 黄文源, 张盈, 魏进, 等. 啉虫脒和吡丙醚在柑橘上的残留行为及膳食风险评估[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 384-390.
- [43] 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]. 农药学报, 2023, 25(6): 1206-1221.
- [44] 广西壮族自治区市场监督管理局. 食品安全监督抽检信息通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-27]. <http://scjdgj.gxzf.gov.cn/>.
- [45] 河南省市场监督管理局. 食品安全监督抽检情况分析通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-24]. <https://scjg.henan.gov.cn/>.
- [46] 黑龙江省市场监督管理局. 食品不合格情况的通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-25]. <http://amr.hl.gov.cn/>.
- [47] 江苏省市场监督管理局. 市场食品安全监督抽检情况通报(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-27]. <https://scjgj.jiangsu.gov.cn/>.
- [48] 内蒙古自治区市场监督管理局. 关于食品抽检情况的通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-24]. <http://amr.nmg.gov.cn/>.
- [49] 山东省市场监督管理局. 关于食品不合格情况的通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-24]. <http://amr.shandong.gov.cn/>.
- [50] 山西省市场监督管理局. 食品安全监督抽检情况的通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-24]. <https://scjgj.shanxi.gov.cn/>.
- [51] 上海市市场监督管理局. 食品安全监督抽检情况分析(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-28]. <https://scjgj.sh.gov.cn/>.
- [52] 四川省市场监督管理局. 关于食品安全监督抽检情况的通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-25]. <https://scjgj.sc.gov.cn/>.
- [53] 天津市市场监督管理委员会. 食品安全监督抽检信息(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-25]. <https://scjg.tj.gov.cn/>.
- [54] 新疆维吾尔自治区市场监督管理局. 食品安全监督抽检信息通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-25]. <https://scjgj.xinjiang.gov.cn/>.
- [55] 浙江省市场监督管理局(浙江省知识产权局). 食品安全监督抽检信息通告(2023—2024) [EB/OL]. [2024-05-27]. <http://zjamr.zj.gov.cn/>.
- [56] 彭林, 李明泽, 任文瑾, 等. 香辛料生理功能的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(2): 157-162.
- [57] 颜伟华, 龚鸿萍, 叶筱玫, 等. 5种香辛料的质量风险分析[J]. 现代食品, 2022, 28(23): 224-228.
- [58] 扈斌. 花椒及香叶中农药多残留筛查方法研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2021.
- [59] 曹琦, 张亚珍, 朱正伟, 等. 气相色谱-四极杆/飞行时间质谱筛查确证辣椒中244种农药残留及其代谢物[J]. 色谱, 2021, 39(5): 494-509.
- [60] 朱钰晓, 徐军, 李贤宾, 等. 香辛料中农药残留限量标准制定现状[J]. 农药学报, 2019, 21(1): 1-11.
- [61] 张峰祖, 朴秀英. 欧盟、美国和日本加工农产品中农药残留评估现状[J]. 植物保护, 2023, 49(2): 13-21.
- [62] 孙红霞, 李晋栋, 李雅静, 等. 加工过程对农产品中农药残留的影响研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 269-273.
- [63] 段丽芳. 7种典型农药在食用油加工过程残留变化规律及膳食风险评估[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [64] 肖欧丽. 枸杞种植及炮制加工过程中农药残留行为研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [65] MENG Z, LIU D, LI S, et al. A fast multi-residue analysis of twenty-four classes of pesticide in sesame (*Sesamum indicum* L.) and their migration into processed products[J]. Food Research International, 2023, 173: 113322.
- [66] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告 第2569号[EB/OL]. [2024-05-24]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170929\\_5832818.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201709/t20170929_5832818.htm).
- [67] 信春鹰. 中华人民共和国食品安全法释义[M]. 北京: 法律出版社, 2009.
- [68] 罗媛媛, 朴秀英, 廖先骏, 等. 2022版食品中农药最大残留限量国家标准制修订情况分析[J]. 农药科学与管理, 2023, 44(4): 1-10.
- [69] 中华人民共和国农业农村部. 我国农药残留限量标准突破1万项全面覆盖我国批准使用的农药品种和主要植物源性农产品[EB/OL]. [2024-04-27]. [http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202104/t20210401\\_6365132.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202104/t20210401_6365132.htm).
- [70] 中华人民共和国农业农村部. 中华人民共和国农业部公告第2308号[EB/OL]. [2024-05-24]. [http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg\\_1/gg/201510/t20151012\\_4860918.htm](http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/gg/201510/t20151012_4860918.htm).
- [71] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 国家林草局关于印发《“十四五”全国农业绿色发展规划》的通知[EB/OL]. [2024-05-24]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/content\\_5635867.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/content_5635867.htm).
- [72] WANG M, TIAN Q, LI H, et al. Visualization and metabolome for the migration and distribution behavior of pesticides residue in after-ripening of banana[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 446: 130665.

(编辑:顾林玲)

**欢迎订阅《现代农药》(双月刊) 定价:120元/年****编辑部电话:025-86581148 QQ:906491600 联系人:靳红华**