

**主编按:** 农药不但在防治病虫害,保障农产品数量安全中发挥了重要作用,同时也可有效降低生物毒素的产生,保障农产品质量安全。2024年9月,中国农业科学院植物保护研究所、欧亚食品安全可持续合作网(SELAMAT)、中国植物保护学会农药残留与环境安全专业委员会等在北京联合举办了“农药残留与生物毒素国际研讨会”,本期收集了其中的4个主旨报告编辑出版,以飨读者。

◆ 专论:农药残留与生物毒素(特约稿) ◆

## 农药膳食风险评估模型应用现状与挑战

刘姝甜<sup>1,2</sup>, 张 斌<sup>2</sup>, 罗媛媛<sup>3</sup>, 吴曼妮<sup>1</sup>, 李 薇<sup>1</sup>, 李贤宾<sup>3\*</sup>, 陈增龙<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101; 2. 天津农学院园艺园林学院, 天津 300384; 3. 农业农村部农药检定所, 北京 100125)

**摘要:** 本文聚焦国内农药膳食风险评估模型, 探讨模型应用过程中的关键技术与方法, 包括数据采集、暴露评估、风险表征以及模型验证等; 阐明现阶段农药膳食风险评估模型面临的科学问题与挑战, 涉及评估模型适用性、膳食数据更迭、农药作用机制分类、评估情形多样性、模型验证与不确定性分析等; 并基于此对农药膳食风险评估模型应用前景进行展望, 强调了评估参数数据库构建、评估软件多元化开发等的重要性。这对完善农药膳食风险评估体系, 提高风险评估的科学性和准确性意义重大。

**关键词:** 农药残留; 膳食风险; 评估模型; 应用进展

中图分类号: TQ 450.2<sup>+</sup>6 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-5284.2025.01.001

### Application status and challenges of pesticide dietary risk assessment model

LIU Shutian<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, LUO Yuanyuan<sup>3</sup>, WU Manni<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LI Xianbin<sup>3\*</sup>, CHEN Zenglong<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Horticulture and Landscape, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Institute for the Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

**Abstract:** The article focused on the domestic pesticide dietary risk assessment model, and discussed the key technologies and methods in the application process of the model, including data collection, exposure assessment, risk characterization and model validation. The scientific problems and challenges facing the current pesticide dietary risk assessment model were described, regarding dietary data, pesticide toxicity mechanism, population diversity, model validation and uncertainty analysis. Moreover, the prospect of pesticide dietary risk assessment model was also prospected, and the importance of establishing assessment parameter database and developing diversified assessment software was emphasized in the review. It is of great significance to improve the pesticide dietary risk assessment system and improve the scientificity and accuracy of risk assessment.

**Key words:** pesticide residue; dietary risk; assessment model; application progress

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472594); 中国科学院动物研究所自主部署项目(2023IOZ010)

作者简介: 刘姝甜, 女, 硕士。研究方向: 农药风险评估模型。E-mail: stianliu@126.com

通信作者: 陈增龙, 男, 副研究员, 博士。研究方向: 农药残留与风险评估。E-mail: chenmenglong@ioz.ac.cn

共同通信作者: 李贤宾, 男, 研究员, 博士。研究方向: 农药残留与标准管理。E-mail: lixianbin@agri.gov.cn

农药残留问题在全球食品安全重大关注中扮演着重要角色,膳食风险评估是量化其潜在健康风险的科学方法。其主要原则包括以下4点:一是科学性,基于可靠科学数据并遵循科学评估方法和模型;二是透明性,评估过程公开透明且鼓励数据和信息共享;三是保守性,采用保守假设和参数,并考虑最坏情况;四是整体性,考虑整个食物链中农药的传递和变化<sup>[1]</sup>。首先,通过综合上述原则进行膳食风险评估,以准确衡量人体因食物中农药残留面临的风险阈值,为制定国家标准、监管政策及膳食指南提供依据。其次,通过对农药残留进行科学的膳食风险评估,能够准确衡量人体通过膳食途径摄入农药的风险量级<sup>[2]</sup>。这不仅有助于制定农药的规范使用标准和监管政策,还能让公众了解食物中农药残留的风险情况,从而做出更加健康的饮食选择<sup>[3-4]</sup>。此外,膳食风险评估也为农业生产提供了科学依据,促使农业生产者采用更加规范和安全的农业生产方式,推动农业的可持续发展。因此,深入研究农药残留膳食风险评估具有极其重要的现实意义和社会价值<sup>[5-6]</sup>。目前,我国农药残留膳食风险评估采用确定性模型,聚焦在慢性风险方面,仍面临着诸多挑战,例如,模型适用的局限性、评估参数陈旧以及残留物定义不完善等。本文结合国内模型研究与技术应用等关键要素,对我国确定性、概率性以及累积性膳食风险评估模型体系实际状况进行剖析,前瞻性地展望农药残留在膳食风险评估领域的发展趋势,这对保障食品安全和公众健康具有深远的研究意义。

1 农药膳食风险评估模型

1.1 确定性评估模型

确定性评估模型又称点评估模型,是国内外农药膳食风险评估的主流模型<sup>[7-8]</sup>。它通过选取固定的

统计学参数(如残留浓度、膳食消费量、体质量等)与毒理学参考值(如每日允许摄入量、急性参考剂量等)来进行风险评估<sup>[9]</sup>。其具有简单直观、经济实用、高度保守等特点,通过提供估计边界实现风险初筛,被国内外农药监管机构广泛采纳。

在国际层面,不同国家和地区基于其独特的农业生产模式、饮食习惯、农药管理政策等,确定性评估模型存在一定差异,膳食数据涵盖丰富的农产品种类和多元饮食文化融合情况,而对于农药残留数据,会综合考虑国际农药贸易中涉及的各类农药在进口和本土农产品上的残留情况<sup>[10-14]</sup>。从国内情况来看,根据我国膳食结构将食物种类划分米及其制品、面及其制品等19个类别,而对于农药残留数据,重点关注国内登记农药在主产区农作物上的残留水平,通过规范残留试验获取<sup>[15]</sup>。模型计算过程中,选择具有代表性的残留数值(HR最高残留/STMR残留中值),以此确定最大可能的风险水平,为国内食品安全标准制定和监管提供相对保守且安全的依据<sup>[16-17]</sup>。

模型的选择是确保农药膳食评估结果科学合理的基础。表1详述了确定性评估中的急性、慢性评估模型,并根据不同的适用范围进行分类。

将短期摄入量计算公式分为两类(IESTI国际估计短期摄入量、TMSTI理论最大短期摄入量),将日摄入量分为三类(IEDI国际估计日摄入量、TMDI理论最大日摄入量、NEDI国家估算每日摄入量),在实际应用中需要根据实际情况灵活把握评估公式的选择。若风险评估结果小于1,表示膳食风险在可接受范围内;反之,则可能存在不可接受的膳食风险,需要进一步关注和采取措施。由于不同地区、性别、年龄人群的饮食习惯和食物摄入量差异较大,需调查了解不同人群对相应食品的消费量数据,结合食品样本中农药残留实际水平进行评估。

表 1 确定性风险评估模型

点评估	方法	公式	适用范围
急性膳食 风险评估	国际估计短期 摄入量 IESTI	$IESTI = \frac{LP_{person} \times (HR-P)}{bw}$	适用于混合样本残留数据以体现该产品在一顿饭食用过程中的消耗残留状况。①单位质量低于25 g的经加工的农产品或原始农产品;②肉类、蛋类、肝脏等可食动物源性食品;③采收后谷物、油菜籽的用药情况
		$IESTI = \frac{[UE \times (HR-P) \times v] + (LP_{person} - UE) \times (HR-P)}{bw}$	(a) 适用于混合样本残留数据无法反映该产品一顿饭的消耗残留水平,例如苹果、甘蓝等蔬菜和水果,其整个单位重量大于 25 g。①初级产品的单位可食部分质量(UE)小于大份额消费量,用a式计算,例如桃、李等水果;②反之用b式计算,例如西瓜、大白菜等
		$IESTI = \frac{LP_{person} \times (HR-P) \times v}{bw}$	
	理论最大短期 摄入量 TMSTI	$IESTI = \frac{LP_{person} \times (STMR-P) \times v}{bw}$	适用于经过工业加工的散装或混合农产品和未经加工的散装或混合农产品
		$TMSTI = \frac{LP \times MRL \times v}{bw} \quad RQ = \frac{\text{急性(慢性)摄入量}}{ARfD(ADD)} \times 100$	适用于基于风险最大化的方法,指定农药MRL标准时的急性风险评估。根据 TMSTI 计算 RQ

(续表 1)

点评估	方法	公式	适用范围
慢性膳食 风险评估	国际估计日摄入量 IEDI	$IEDI = \frac{\sum (STMR_i \times F_i)}{bw}$	适用于 JMPR 利用 STMR 或 STMR-P <sub>i</sub> 与食物消费数据库中 F <sub>i</sub> 计算 IEDI, 相加得到长期膳食摄入量进行膳食暴露风险评估
	理论最大日摄入量 TMDI	$TMDI = \frac{\sum (MRL_i \times F_i)}{bw}$	适用于 TMDI 是最坏情况的可能摄入估计, 基于所有产品含最大残留限量 MRL 水平残留且校正相关残留损失, 利用 MRL 和 F <sub>i</sub> 计算 97.5 位点消费者摄入估计
	国家估算每日摄入量 NEDI	$NEDI = \frac{\sum [STMR_i \text{ (或 STMR-P)} \times F_i]}{bw}$	适用于利用所有产品消费量乘以该产品的农药残留量, 残留水平需考虑去除非食用部分和烹饪过程的变化

注: LP<sub>resid</sub>指食物的大份餐(g/d);HR指基于规范田间残留试验得到的复杂样品可食部分最高残留量(mg/kg);HR-P为加工农产品的最高残留量(mg/kg);Uc为单个食品质量,以可食部分计(g);v指变异因子(variability factor);bw指体重(kg);MRL指最大残留限量(mg/kg);RQ为膳食暴露风险值;STMR<sub>i</sub>为第i级农产品的规范试验残留中值(mg/kg);STMR-P<sub>i</sub>指第i级加工食用农产品的规范试验残留中值(mg/kg);F<sub>i</sub>(food intake)为不同人群对第i级农产品的膳食消费量(g/d)。

当前我国农药登记管理主要采用确定性评估模型来量化农药长期膳食风险,亟需完善急性膳食风险模型。国内和国际间在评估模型上存在一定的差异,体现了各国在保障居民食品安全和适应国际贸易磋商方面的不同考量,为进一步完善农药残留膳食风险评估体系提供了全面的视角。近年来也有一些研究学者通过目标风险系数(THQ)<sup>[18]</sup>、食品安全指数法(IFS)<sup>[19]</sup>以及急、慢性风险商(HQ<sub>a</sub>/HQ<sub>c</sub>)<sup>[20]</sup>等方法来直接评估农药残留的膳食风险。其评估的本质逻辑均是点评估,核心为通过估计风险点值比较人体实际摄入的农药量与健康指导值(HBGV)的关系,从而判断农药残留对人体健康的潜在风险量级。

1.2 概率性评估模型

数学概率论的不断发展,贝叶斯(Bayesian)理论等的不断涌现,为构建概率性模型提供了理论基础。概率性评估模型是一种依据概率理论构建的评估方法,通过综合考虑农药残留水平差异、不同人群膳食结构、食物消费量以及个体对农药的敏感性等多种不确定因素,并对大数据进行统计分析模拟运算,更为精准地量化农药残留的膳食风险,进而弥补确定性模型在处理复杂不确定性情况时的局限性<sup>[21]</sup>。该模型具有信息丰富、灵敏度高等特点,并且该评估结果通过数据分布提供风险阈值。

国际上概率模型在农药残留膳食风险评估中的应用研究较为广泛,主要包括MCRA、贝叶斯和重抽样(Bootstrap)这3种评估方式<sup>[17, 22-23]</sup>。MCRA是通过对食物消费量和农药残留量的概率分布进行随机抽样,经过大量重复计算来构建膳食暴露量的概率分布,给出更具代表性的参数及其不确定性<sup>[23]</sup>。贝叶斯核心在于巧妙地融合先验知识和新数据,以此来更新人们对某一事件的认知。因此,该方法可结合旧数据和新的农药残留监测、膳食调查结果,更准

确估计残留量和摄入量,进而整合信息计算后验概率,全面评估农药残留膳食风险,助力决策<sup>[24-25]</sup>。此外,重抽样在这一领域也有着不可忽视的作用。重抽样原理是从原始样本中有放回地抽取多个子样本,该技术可以用于确定膳食暴露量估计值的置信区间<sup>[26]</sup>。

我国现阶段农药管理尚未采用概率性评估模型,但MCRA和重抽样在农药膳食风险评估研究中已有相关报道<sup>[27]</sup>。比如,在使用蒙特卡罗模型时,考虑到风险最大化原则,尽可能涵盖不处于平均消费水平的消费者,通常情况下选择9/99.9百分位值的95%置信区间下限作为暴露风险评估的依据<sup>[21]</sup>。蒙特卡罗方法可以用于贝叶斯推断中的后验概率抽样,并且可以先利用重抽样技术对有限的监测数据进行扩充,得到多个类似的数据集,然后在每个数据集上应用蒙特卡罗模型来考虑参数的不确定性,从而更全面地评估风险。也可以将重抽样技术得到的多个数据集分别应用贝叶斯方法进行分析,观察后验概率的变化情况,从而判断贝叶斯模型对数据变化的敏感性,验证模型的可靠性。在未来的农药残留膳食风险评估研究中,应进一步结合国内典型的农业生产、饮食消费等情况,持续优化模型参数和算法,提高风险评估的适用性和准确性。

1.3 累积性评估模型

累积性评估模型是对多种化合物通过物理、化学、生物以及生理等多种污染因子,经过聚集性暴露的健康风险进行评估的一种方法。由于当前农产品呈现农药多残留的复杂状况,农药暴露途径不仅包括膳食,还可通过接触、吸入等进入人体,这种多残留情形与多暴露途径的相互交织,构成了复杂的多维风险体系。累积性风险评估通过综合考量多维度风险因子,反映真实的风险水平。



美国EPA早在1986年便已开始了多农药对人体健康风险评估方法的研究,并在2007年出版了《多种化学品人类健康累积性风险评估概念方法和数据来源》<sup>[28]</sup>。因此,在开展农药残留膳食风险评估时,对多种农药联合作用模式的确认不可或缺,这是提升评估准确性和有效性的关键所在<sup>[29-36]</sup>。例如,Jardim等<sup>[37]</sup>从数据库中查找相关急性累积暴露量数据,随后将每种食物的急性暴露量相加,得出每日急性累积暴露量后,采用重抽样方式得到共同作用组(CAG)的急性累积暴露分布,最后使用MCRA模拟分析该农药的累计暴露量。

我国农药累积性膳食风险评估主要采用相对效能因子法(RPF)和危害指数法(HD)<sup>[38-43]</sup>。在进行短期累积膳食风险评估时,首先要采集农药急性参考剂量等毒理学资料以及膳食情况、农药残留监测数据。其次,按照化合物的特性对农药进行分组,明确其作用模式与效应关系,并挑选指示化合物,计算相对效能因子。最后,在此基础上计算急性暴露量、总急性暴露量和总急性累积当量浓度,与急性参考剂量对比进而量化风险。长期累积膳食风险评估的步骤和急性膳食风险评估大体相似,区别在于要将总慢性暴露量和每日允许摄入量进行比较。在实际评估过程中,还要根据农药自身的特点来选择合适的方法,例如危害指数法(HD)、毒性分离点指数法(PODD)、联合暴露阈值法(MOE)、参考点指数法(RfPD)、累积风险指数法(CRD)、相互反应指数法(HIINT)、毒性效应因子法(TEF)、相加法(Pm)等。

近年来,农药累积性膳食风险评估新技术不断涌现,如混合物评估因子(MAF, mixture assessment factor)、有害结局路径的纳入(AOP, adverse outcome pathway)、对累积风险主要驱动因素优先排序,以及毒代动力学相互作用等新方法<sup>[44-50]</sup>。MAF是为解决混合物带来的潜在风险,出于监管目的而提议使用的一个概念,可考量多种农药的相互作用。AOP网络是通过关联分子起始事件、关键事件和不良结局,助力理解农药的毒性作用模式。优先考虑累积风险则是突出主要驱动因素这一策略,可针对性地评估和管理风险。毒代动力学相互作用这一方法建议考虑农药的识别与优先级排序,并依据毒代动力学相互作用把农药划分成共同作用组,进而深入地了解这些农药之间的相互作用以及这些物质可能导致的非累加毒性效应。持续优化现有的评估模型,将概率性评估模型与确定性评估模型加以联合,是我国农药残留累积性膳食风险评估研究的方向,

可为制定合理的多农药应用风险管理措施提供科学依据。

## 2 当前挑战

当前农药膳食风险评估仍面临着诸多严峻挑战。(1)我国农药风险评估体系尚不完善。基于1餐或1 d内的短期膳食风险评估亟待开展,与此相应,需要构建急性暴露风险评估模型,加强对儿童、育龄妇女等易感人群的暴露风险关注。(2)我国膳食数据陈旧,膳食分类亟待更新。目前仍采用2002年中国居民营养与健康状况调查数据,同时需考虑地域饮食差异、食物季节性变化、人群个体差异等多种因素对风险评估结果的影响。(3)农药毒性机制分类解析成为累积性膳食风险的重难点。不同农药危害特性涵盖了从急性到慢性、从生殖发育到内分泌干扰、从单一母体到多代谢物等多个维度,特别是新农药,直接影响农药有效评估与风险规避。(4)农药膳食风险评估模型需适用于多样性的暴露情形。涉及膳食人群分类、年龄分级、不同地域、不同性别、不同暴露途径,以及食品加工环节等的风险评估参数尚需精细化。(5)模型验证与不确定性分析。通过验证核查模型逻辑和算法,确保风险评估结果符合实际,能够准确、可靠地应用于实际问题的解决,同时还需要评价膳食人群、农药含量等参数对风险评估结果的影响程度。

## 3 未来展望

通过梳理国内外农药膳食风险评估模型的研究动态,阐明了我国风险评估现状及面临的挑战,并对风险评估模型的应用前景进行展望。首先,数据库是管理风险评估参数的关键基础设施,对于确保评估结果的一致性、完整性和准确性至关重要,应加强构建农药数据库、膳食数据库、人群数据库以及桥梁数据库等,为风险评估精准化发展提供坚实的数据支撑。其次,评估软件的多元化研发能极大提升风险评估效率,应针对不同的农业生产场景、农药使用情形以及风险评估需求,开发能够智能化匹配实际情形的模型软件,例如复杂的种植模式和多样化的农药施用组合等。最后,模型验证应与AI人工智能技术充分融合,着重解决不确定性、变异性等科学问题,通过集成学习方法、贝叶斯推断等技术来降低模型的不确定性,持续优化数据采集策略,使用数据增强技术来衍生样本,以减小变异性对模型的影响。

总之,我国农药膳食风险评估模型发展与挑战并存,未来需持续探索先进风险评估方法,加快模型参数更迭与分类,强化数据库和软件开发,健全农药风险评估体系建设,以满足现代农药信息化发展与膳食健康国家需求。

### 参考文献

- [1] JIA Q, LIAO G, CHEN L, et al. Pesticide residues in animal-derived food: current state and perspectives[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 137974.
- [2] BENBROOK C. Tracking pesticide residues and risk levels in individual samples—insights and applications[J]. Environ Sci Eur, 2022, 34: 60.
- [3] 王坤, 赵倩. 农产品农药残留检测中食品安全检测技术的应用探索[J]. 食品安全导刊, 2023(11): 184-186.
- [4] HUA Y, LIU G. Food pesticide residues monitoring and health risk assessment[J]. Foods, 2024, 13(3): 474.
- [5] KWOK E S C. Toxicological priority index framework for prioritizing pesticide products into human exposure and health risk assessments[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2021, 27(8): 2080-2103.
- [6] XIAO O, LI M, CHEN J, et al. Influence of triazole pesticides on wine flavor and quality based on multidimensional analysis technology[J]. Molecules, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 25(23): 5596.
- [7] 杨志敏, 许淑琴, 张文, 等. 甘肃枸杞中农药残留水平分析及风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2019(5): 44-48.
- [8] 宋雯. 农产品膳食暴露评估模型构建及其应用[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2012.
- [9] 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.
- [10] EPA. Available EPA information on assessing exposure to pesticides in food—a user's guide[EB/OL]. [2023-03-03]. <https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2007-0780-0001/content.pdf>.
- [11] EUROPEAN COMMISSION. Working document on pesticides to be considered for inclusion in the national control programmes to ensure compliance with maximum residue levels of pesticides residues in and on food of plant and animal origin (SANCO/12745/2013)[EB/OL]. [2023-03-03]. [https://food.ec.europa.eu/system/files/2022-11/pesticides\\_mrl\\_guidelines\\_wrkdoc\\_12745.pdf](https://food.ec.europa.eu/system/files/2022-11/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_12745.pdf).
- [12] EPA. Guidance for refining anticipated residue estimates for use in acute dietary probabilistic risk assessment[EB/OL]. [2023-03-03]. <http://www.epa.gov/pesticides/trac/science/residues.pdf>.
- [13] AUSTRALIAN BUREAU of STATISTICS. Australian apparent consumption of foodstuffs, 1997-98 and 1998-99[EB/OL]. [2023-03-03]. [http://www.ausstats.abs.gov.au/ausstats/subscriber.nsf/0/3CDE7A3E9BEF68F3CA256982007E8CD6/\\$File/43060\\_1997-98%20and%201998-99.pdf](http://www.ausstats.abs.gov.au/ausstats/subscriber.nsf/0/3CDE7A3E9BEF68F3CA256982007E8CD6/$File/43060_1997-98%20and%201998-99.pdf).
- [14] EFSA. The EFSA comprehensive European food consumption database[EB/OL]. [2023-03-03]. <https://www.efsa.europa.eu/en/dataset-report/food-consumption-data>.
- [15] 金水高. 中国居民营养与健康状况调查报告之十: 2002营养与健康状况数据集[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
- [16] 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 食品中农药残留风险评估指南 [EB/OL]. (2015-10-08) [2023-03-03]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201510/t20151012\\_4860918.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201510/t20151012_4860918.htm).
- [17] FAO. Submission and evaluation of pesticide residues data for the estimation of maximum residue levels in food and feed, third edition[M]. Rome: FAO Plant Production and Protection Paper, 2018.
- [18] 林青, 梁晓涵, 王丹, 等. 百香果中农药残留及膳食摄入风险评估[J]. 中国药业, 2024, 33(3): 80-84.
- [19] 王俊玲, 何晓露, 贾斌, 等. 2022年西昌市鲜食葡萄农药残留情况及膳食摄入风险评估[J]. 实验室检测, 2023, 1(8): 45-53.
- [20] 曹小丽, 杨晓倩, 孟中华, 等. 2016—2020年济南市市售苹果中多种农药残留的污染状况及膳食暴露风险评估[J]. 预防医学论坛, 2024, 30(3): 184-190.
- [21] 柴漪达. 多种农药的残留检测及综合膳食风险评估研究[D]. 湖北荆州: 长江大学, 2023.
- [22] MENTZEL S, GRUNG M, TOLLEFSEN K E, et al. Development of a Bayesian network for probabilistic risk assessment of pesticides[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2021, 18(4): 4533: 1072-1087.
- [23] MAHDAVI V, GORDAN H, PEIVASTEHR-ROUDSARI L, et al. Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment induced by pesticide residues in commercially available ready-to-eat raisins of Iran based on Monte Carlo Simulation[J]. Environmental Research, 2022, 206: 112253.
- [24] LI Z. A Bayesian generalized log-normal model to dynamically evaluate the distribution of pesticide residues in soil associated with population health risks[J]. Environment International, 2018, 121(1): 620-634.
- [25] 王建华, 刘苗, 浦徐进. 基于贝叶斯网络的农业生产者农药施用行为风险评估[J]. 经济评论, 2016(1): 91-104.
- [26] 许彦阳, 陆雨顺, 王昕璐, 等. 基于概率分析的京津冀地区蔬菜产品中有机磷类农药急性累积暴露评估[J]. 农产品质量与安全, 2018(5): 7-12; 22.
- [27] 王莹, 刘芳汐, 林林, 等. 采用相对效能因子法对枸杞中拟除虫菊酯类农药的慢性累积暴露评估[J]. 中国药事, 2021, 35(6): 653-660.
- [28] US EPA. Concepts, methods and data sources for cumulative health risk assessment of multiple chemicals, exposures and effects: a resource document[EB/OL]. (2018-05-08) [2023-03-31]. <http://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?pdownloadid=474337>.
- [29] ZHANG X, LEI L, ZHANG H, et al. Interactions of polymeric drug carriers with DDT reduce their combined cytotoxicity[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 701-709.
- [30] WANG Y, WU S, CHEN J, et al. Single and joint toxicity assessment of four currently used pesticides to zebrafish (*Danio rerio*) using traditional and molecular endpoints[J]. Chemosphere, 2018, 192: 14-23.

(下转第 19 页)

340000.

- [38] 李伟, 张雪莉, 苏勤, 等. 可见近红外光谱的甘蓝叶片毒死蜱农药残留定性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 80-85.
- [39] 严晨, 蒋雪松, 沈飞, 等. 可见-近红外光谱结合机器视觉动态检测花生黄曲霉毒素B<sub>1</sub>污染[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3865-3870.
- [40] CAO B H, LI H, CAI E Z, et al. Determination of pesticides in flour by terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) with voigt function fitting and partial least squares (PLS) analysis[J]. Analytical Letters, 2021, 54(5): 830-841.
- [41] 廉飞宇, 杨静, 付麦霞, 等. 玉米中黄曲霉毒素B<sub>1</sub>的太赫兹时域光谱检测与识别[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(8): 111-116; 123.
- [42] 王东鹏, 叶诚, 张霖. 微流控芯片在食品安全检测中的应用[J]. 中国食品工业, 2021(19): 109-112.
- [43] 李雨枫, 徐婧婧, 纪晗旭. 微流控芯片在食品生物毒素检测中的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2023(26): 187-189.
- [44] CARATELLI V, FEGATELLI G, MOSCONE D, et al. A

paper-based electrochemical device for the detection of pesticides in aerosol phase inspired by nature: a flower-like origami biosensor for precision agriculture[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 205: 114119.

- [45] WANG L, ZHU F, ZHU Y, et al. Intelligent platform for simultaneous detection of multiple aminoglycosides based on a ratiometric paper-based device with digital fluorescence detector readout[J]. ACS Sensor, 2019, 4(12): 3283-3290.
- [46] HUA M Z, LI S M, ROOPESH M S, et al. Development of a microfluidic device to enrich and detect zearalenone in food using quantum dot-embedded molecularly imprinted polymers[J]. Lab on a Chip, 2024, 24(10): 2700-2711.
- [47] HUANG S Q, SONG X, WANG S Y, et al. Portable dual-mode paper chips for highly sensitive and rapid determination of aflatoxin B<sub>1</sub> via an aptamer-gated MOFs[J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140182.

(编辑: 顾林玲)

## (上接第 5 页)

- [31] WAHYUNI E A, LIN H D, LU C W, et al. The cytotoxicity and genotoxicity of single and combined fenthion and terbufos treatments in human liver cells and zebrafish embryos[J]. Science of the Total Environment, 2021, 758: 143597.
- [32] TAKAKURA N, SANDERS P, FESSARD V, et al. In vitro combined cytotoxic effects of pesticide cocktails simultaneously found in the French diet[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 52: 153-162.
- [33] TADEE A, MAHAKUNAKORN P, PORASUPHATANA S. Oxidative stress and genotoxicity of co-exposure to chlorpyrifos and aflatoxin B<sub>1</sub> in HepG2 cells[J]. Toxicology and Industrial Health, 2020, 36(5): 336-345.
- [34] SUN Y J, CAO Q J, XU M Y, et al. Individual and combined hepatocytotoxicity of DDT and cadmium in vitro[J]. Toxicology and Industrial Health, 2021, 37(5): 270-279.
- [35] OLSVIK P A, SOFTELAND L. Mixture toxicity of chlorpyrifos-methyl, pirimiphos-methyl, and nonylphenol in Atlantic salmon (*Salmo salar*) hepatocytes[J]. Toxicology Reports, 2020, 7: 547-558.
- [36] 杨桂玲, 陈晨, 王强, 等. 农药多残留联合暴露风险评估程序构建研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(3): 12-20.
- [37] JARDIM A N O, BRITO A P, VAN DONKERSGOED G, et al. Dietary cumulative acute risk assessment of organophosphorus, carbamates and pyrethroids insecticides for the Brazilian population [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 112: 108-117.
- [38] 汤晗, 吴园园, 成亚菲, 等. 浙江省芹菜中农药多残留水平及累积急性膳食摄入风险初评[J]. 农药学报, 2021, 23(5): 947-955.
- [39] 梁启富, 韦航, 方灵, 等. 福建省产区西番莲中农药残留水平及累积急性膳食摄入风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2024(2): 43-48.
- [40] 泮燕媚, 管悦. 南方三省杨梅中甜蜜素和农药残留风险监测分析 [J]. 中国南方果树, 2023, 52(4): 68-74.
- [41] 刘翠玲, 张冉, 杨桂玲, 等. 三唑类杀菌剂在蔬菜中的残留分布及对不同人群的累积性膳食摄入风险[J]. 农药学报, 2021, 23

(6): 1194-1204.

- [42] 兰丰, 刘传德, 周先学, 等. 山东省主产区苹果农药残留水平及累积急性膳食摄入风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6 (7): 2595-2602.
- [43] 张婷, 万玉萍, 段毅宏, 等. 云南省新鲜蔬菜中11种有机磷农药残留情况分析及其慢性累积暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(5): 475-480.
- [44] SOCIANU S, BOPP S K, GOVARTS E, et al. Chemical mixtures in the EU population: composition and potential risks[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (10): 6121.
- [45] LAMBERT J C. Adverse outcome pathway 'footprinting': a novel approach to the integration of 21st century toxicology information into chemical mixtures risk assessment[J]. Toxics, 2023, 11(1): 37.
- [46] TE BIESEBEEK J, SAM M, SPRONG R, et al. Potential impact of prioritisation methods on the outcome of cumulative exposure assessments of pesticides[J]. EFSA Supporting Publications, 2021, 18(4): 6559E.
- [47] DE JONG E, VAN DER VOET H, MARX-STOELTING P, et al. Roadmap for action on risk assessment of combined exposure to multiple chemicals (racemic)[J]. EFSA Supporting Publications, 2022, 19(10): 7555E.
- [48] BRAEUNING A, MARX-STOELTING P. Mixture prioritization and testing: the importance of toxicokinetics [J]. Archives of Toxicology, 2021, 95(5): 1863-1864.
- [49] BRAEUNING A, BLOCH D, KARACA M, et al. An approach for mixture testing and prioritization based on common kinetic groups [J]. Archives of Toxicology, 2022, 96(6): 1661-1671.
- [50] YANG M, WANG Y, YANG G, et al. A review of cumulative risk assessment of multiple pesticide residues in food: current status, approaches and future perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104340.

(编辑: 顾林玲)