

陈铭学研究员主持“稻米质量安全与品质评价”特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.005

王寅, 王会来, 林晓燕, 等. 稻米质量安全风险评估和预警技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 35-42.

WANG Y, WANG H L, LIN X Y, et al. Advances in risk assessment and early warning techniques of rice quality and safety[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 35-42.

稻米质量安全风险评估和 预警技术研究进展

王寅¹, 王会来¹, 林晓燕^{2,3}, 关美艳^{2,3}, 陈铭学^{2,3}, 曹珍珍^{2,3}✉

(1. 丽水市莲都区农业农村局, 浙江 丽水 323007;

2. 中国水稻研究所 农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心, 浙江 杭州 310006;

3. 农业农村部稻米产品质量安全风险评估实验室(杭州), 浙江 杭州 310014)

摘要: 稻米质量安全是国家粮食安全和社会稳定的重要基础。近年来, 稻米重金属、农药残留和真菌毒素污染等问题发生, 影响了我国稻米产业健康发展, 也引发消费者对稻米质量安全状况的关注和担忧。开展稻米质量安全风险评估和预警技术研究, 不仅可为政府制定稻米质量安全标准、技术法规提供重要依据, 而且能及时发现和预防稻米质量安全风险, 是目前稻米质量安全控制的重要发展方向。本文分析了影响我国稻米质量安全的主要危害因素和可能来源, 包括重金属、农药残留和真菌毒素等, 并针对国内外农产品质量安全风险评估和安全预警体系, 梳理了我国稻米质量安全风险评估技术, 包括危害识别、危害特征描述、暴露评估、风险特征描述等, 总结了收获前、收获后和全程预警方法, 以期为稻米质量安全科学监管和污染控制提供参考。

关键词: 稻米; 质量安全; 污染物; 风险评估; 蒙特卡罗模拟; 预警技术

中图分类号: TS201.4; S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2023)06-0035-08

网络首发时间: 2023-11-06 10:38:05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231103.1533.012>

Advances in Risk Assessment and Early Warning Techniques of Rice Quality and Safety

WANG Yin¹, WANG Hui-lai¹, LIN Xiao-yan^{2,3}, GUAN Mei-yan^{2,3},
CHEN Ming-xue^{2,3}, CAO Zhen-zhen^{2,3}✉

(1. Liandu District Agriculture and Rural Bureau, Lishui, Zhejiang 323007, China;

2. Rice Product Quality Supervision and Inspection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs China National Rice Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310006, China;

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2023C02014); 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP20210103); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CPSIBRF-CNRRI-202303); 国家水稻产业技术体系(CARS-01)

Supported by: the "Pioneer" and "Leading Goose" Research and Development Program of Zhejiang Province (No.2023C02014); the National Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Major Project (No. GJFP20210103); Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. CPSIBRF-CNRRI-202303); the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-01)

作者简介: 王寅, 男, 1986年出生, 硕士, 农艺师, 研究方向为农业技术推广。E-mail: 280148983@qq.com

通讯作者: 曹珍珍, 女, 1987年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为稻米质量安全与风险评估。E-mail: happycaozhen520@163.com

3. Laboratory of Risk Assessment for Rice Products (Hangzhou), Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: Rice quality and safety is important for achieving national food security and social stability. Rice has been contaminated with heavy metals, pesticide residues, and fungal toxins, which has affected the healthy development of China's rice industry and raised public concerns about the quality and safety of rice. Studies on risk assessment and early warning techniques for rice quality and safety can not only contribute to formulating rice-related policies, regulations and standards, but also can timely identify and prevent the potential risks, which have become an important field in rice quality and safety control. In this article, the main hazards including heavy metals, pesticide residues, and fungal toxins in rice and their possible sources were analyzed. Moreover, rice risk assessment techniques including hazard identification, hazard characterization, exposure assessment and risk characterization, as well as rice early warning technologies including pre-harvest warning, post-harvest warning and whole course warning were summarized, aiming to provide reference for scientific supervision and effective control of hazards in rice.

Key words: rice; quality and safety; hazards; risk assessment; Monte Carlo simulation; early warning techniques

我国是稻米生产大国，也是稻米消费大国，稻谷播种面积和产量常年位居世界前列。2022 年全国稻谷播种面积约 4.4 亿亩，占全国粮食播种面积的 24.9%，居世界第二位；稻谷产量约 2.1 亿 t，占粮食总产量的 30.4%，居世界第一^[1]。稻米不仅是我国最主要的口粮，还是出口创汇的重要产品，为保障居民生活质量和健康水平做出了巨大贡献，对提高我国和区域性经济地位发挥着重要作用。

然而，稻米产业的快速发展也存在一些问题。一方面是工业“三废”和城市生活垃圾对农业生产环境的污染，导致稻米重金属超标事件时有发生。另一方面是肥料、农药等的广泛推广和应用，在促进稻米产量大幅度增长的同时，也带来了稻米质量安全隐患。稻米质量安全问题已成为制约稻米产业健康可持续发展和参与全球贸易的主要瓶颈。

1 影响稻米质量安全的危害因素及来源

1.1 重金属

近年来，随着我国城市化进程加快，矿产资源开发、金属加工冶炼、化工生产、污水灌溉以及不合理的化肥农药施用等因素导致重金属在农田土壤中不断富集。重金属作为土壤环境中一种具有潜在危害的污染物，具有易积累、难挥发、毒性大和隐蔽性强等特点，不仅会影响农作物的

生长发育，更重要的是通过食物链进入人体和动物体内，危害人畜健康。根据 2014 年中国环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国农田土壤重金属污染形势较为严峻，主要污染物为镉，其次是铬、铅、铜、汞、砷^[2]。相比其他作物，水稻蓄积镉的能力较强，尤其是南方地区酸性土壤背景和以籼稻为主的种植结构，加剧了稻米镉污染风险^[3-4]。因此，稻米重金属污染已经成为影响稻米质量安全的主要因素之一。

稻米产品中重金属主要来源于以下几个方面：一是高本底值的自然环境，空气、水和土壤中某些重金属含量较高；二是人类活动如重金属矿的开采和冶炼以及工业“三废”排放，造成重金属在大气、灌溉水和土壤中富集；三是不合理地施用含有重金属的农药和化肥（如磷肥），增加土壤中重金属含量；四是酸雨带来的土壤酸化，导致土壤中重金属的移动性和生物有效性增强，促进重金属在水稻中积累^[5]。

1.2 农药残留

由于受耕作制度、品种变更和气候变化等因素影响，我国水稻病虫害呈偏重发生态势。根据 2023 年全国农作物重大病虫害发生趋势预报，水稻病虫害全国发生面积 10.1 亿亩次，比 2022 年和 2017—2021 年均值分别增加 25.1% 和 8.9%^[6]。

目前对水稻病虫害的主要防治手段还是喷施农药。60—70 年代我国主要是用六六六、滴滴涕等农药防治病虫害, 由于这些农药的剧毒性以及残留时间过长对环境造成不良影响, 近年来我国明令禁止使用这些剧毒农药。现在主要使用的农药为毒死蜱、乐果、呋喃丹、稻瘟灵、乙草胺、多效唑等高效低毒农药。近年来, 随着水稻标准化生产程度的提高及农药的合理使用, 鲜少发生因稻米农药残留导致的国内稻米安全消费事件。

稻米产品中农药残留主要来源于两方面: 一是生产过程中防治病虫害用药直接污染, 水稻种植过程中农药通常直接喷洒于水稻叶片或根、茎表面, 某些内吸性农药施用后通过叶片或根、茎吸收进入植株内部, 通过代谢过程转运到水稻的籽粒等可食部位, 形成稻米产品农药残留。一旦农药进入籽粒中, 由于缺乏氧气、光照, 种子生理代谢弱, 农药一般难于降解, 农药残留期很长, 不能用安全间隔期进行评价; 二是粮食仓储过程中治虫用药, 正常的仓储用药是熏蒸性的、挥发能力强的农药, 如磷化铝, 使用后通过排风, 一般不会产生农药残留。但如果采用克百威等剧毒农药进行熏蒸, 就会有较大的危害^[7]。

1.3 真菌毒素

真菌毒素是真菌在适宜的环境条件下产生的次级代谢产物。根据联合国粮农组织 (FAO) 统计, 全球每年约有 25% 的农作物不同程度地受到真菌毒素的污染, 约 2% 的农作物因污染严重失去应用价值^[8]。真菌毒素可在水稻生长期产生, 也可因收获或储藏运输不当而形成。水稻穗期如遇高温多雨等天气, 极易诱发稻曲病、穗腐病、穗颈瘟等多种病害, 产生稻曲病菌毒素、伏马毒素、T-2 霉菌毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、玉米赤霉烯酮等多种生物毒素。此外, 稻米在收获时未完全成熟、机械磨损, 昆虫鼠害损伤等均易造成真菌毒素污染。收获后未被充分干燥或贮运过程中温度或湿度过高, 容易导致稻米发霉变质, 滋生大量真菌和真菌毒素, 造成毒素二次污染。真菌毒素不仅造成水稻产量、品质降低, 而且对人畜以及稻米质量安全存在安全隐患^[9]。目前, 真菌毒素污染已成为继重金属和农药残留污染后,

影响稻米质量安全的又一类关键风险因子。

真菌毒素的产生首先取决于菌株, 其次依赖于外界环境, 如基质、温度和湿度。真菌产毒只限于少数的产毒真菌, 同一菌种中不同的菌株产毒能力不同, 与菌株的生长状态、生长环境以及本身的遗传特征有关。真菌主要在富含碳水化合物粮谷、饲草等植物上生长产毒, 在乳、蛋等动物源基质上产毒能力较低。真菌的生长繁殖与温度和湿度有密切关系, 大多数真菌在温度为 25~30 ℃、相对湿度为 88%~95% 时, 产毒能力最强^[10]。

2 稻米质量安全风险评估技术

风险评估是指对食品、食品添加剂中生物性、化学性和物理性危害对人体健康可能造成的不良影响所进行的科学评估。风险评估是政府制定农产品质量安全标准、技术法规的重要依据, 已经成为世界各国应对农产品技术贸易壁垒、调控农产品进出口的必要手段。美国、欧盟和日本等发达国家十分重视农产品质量安全风险评估工作, 联合国粮农组织和世界卫生组织 (WHO)、欧洲食品安全局 (EFSA)、德国联邦风险评估研究所 (BfR)、美国食品药品监督管理局 (FDA) 和环境保护署 (EPA)、日本食品安全委员会等机构已从 20 世纪 80 年代末相继开展风险评估。我国颁布的《中华人民共和国农产品质量安全法》已将风险评估确定为一项最基本的法律制度。从 2012 年开始, 我国农业部依法建立国家农产品质量安全风险评估制度, 并建成了以国家农产品质量安全风险评估机构为龙头, 以农业农村部专业性和区域性农产品质量安全风险评估实验室为主体, 以各主产区农产品质量安全风险评估实验站和农产品生产基地质量安全风险评估国家观测点为基础的国家农产品质量安全风险评估体系^[11]。

风险评估主要包括以下 4 个方面: 危害识别、危害特征描述、暴露评估、风险特征描述等。

2.1 危害识别

危害识别是根据流行病学、动物试验、体外试验、结构-活性关系等科学数据和文献信息确定人体暴露于危害物后是否会对健康造成不良影

响、引起不良影响的可能性,以及可能处于风险之中的人群和范围,属于定性危险性评估范畴。其主要依据是来自于流行病学研究的人类资料。例如流行病学调查显示,粮食受黄曲霉毒素 B1 (AFB1)污染严重的地区,居民肝癌发病率更高,食物中黄曲霉毒素与肝细胞癌变呈正相关性。因此,1993年WHO的癌症研究机构(IARC)正式将黄曲霉毒素列为1类致癌物^[12]。对于不能获得足够的来自于流行病学研究数据的危害物,风险评估者常常利用试验动物以及体外试验的毒理学研究结果来进行危害识别描述。如2022年3月,IARC发布评价结论,将钴金属和可溶性钴盐划分为2A类致癌物,分类依据为充分的试验动物致癌证据和人体细胞上强有力的机理证据^[13]。

2.2 危害特征描述

危害特征描述是对与危害相关的不良健康作用进行定性或定量描述。可以利用动物试验、临床研究以及流行病学研究确定危害与各种不良健康作用之间的剂量-反应关系、作用机制等。如果可能,对于毒性作用有阈值的危害应建立人体安全摄入量水平。剂量-反应关系是危害特征描述的核心,一般是将毒理学试验获得的数据外推到人,计算人体的每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)、每日可耐受摄入量(tolerable daily intake, TDI)和急性参考剂量(acute reference dose, ARfD)等。对于有阈值的化学毒性物质,未观察到有害作用剂量水平(no-observed-adverse-effect level, NOAEL)通常被作为风险描述的最初或参考作用点。NOAEL值乘以从动物试验资料外推到人的安全系数等于每日允许摄入量。安全系数一般采用100,但不同评估机构有时采用不同的安全系数^[14]。对于无阈值的化学物质,比如致突变、遗传毒性致癌物而言,一般不能采用“NOAEL×安全系数”法来制定允许摄入量,因为即使在最低的摄入量时,仍然有致癌的风险存在。在此情况下,动物试验得出的基准剂量可信下限(benchmark dose lower confidence limit, BMDL)被用作风险描述的起始点。如2020年,EFSA采用镍的大鼠神经发育毒性BMDL₁₀=1.3 mg/kg.bw/d作为毒性参考点,对不同国家食品和饮用水中的镍进行了评估^[15]。

2.3 暴露评估

暴露评估是指对通过食物或其他途径可能摄入的生物、化学和物理因素进行定性和(或)定量评估。根据危害在膳食中的水平和人群膳食消费量,估算危害的膳食总摄入量,同时考虑其他非膳食进入人体的途径,估计人体总摄入量,并与安全摄入量进行比较。目前用于膳食暴露评估的模型主要有点评估模型、简单分布模型和概率评估模型3种。概率评估模型是对危害物在食品中存在概率、残留水平及相关食物的消费量进行统计模拟的一种方法。

蒙特卡罗模拟方法(Monte Carlo simulation)是常用的一种概率评估法,通过对变量的随机抽样模拟,计算暴露量的概率分布,可以克服点评估模型不能定量评估结果变异度和不确定度的缺点,得出更加科学准确的膳食暴露评估结果^[16]。近年来随着食品安全风险评估统计模型及软件的开发和应用,利用概率评估模型评估稻米中危害物的膳食暴露量的研究越来越多。Cao等^[17]以我国三大优势产区1332份稻米样品中镍污染数据为基础,采用基于Monte Carlo算法的概率模型,开展了稻米中镍膳食暴露评估。Zhang等^[18]、Hao等^[19]采用Monte Carlo数学概率模型,分别对湖南省资江流域和湘潭矿区稻米中砷、镉、铬、铜、锰、镍、铅和锌等重金属膳食暴露量进行了评估。

2.4 风险特征描述

风险描述作为评估的最后一个阶段,是对危害识别、危害描述和暴露评估三个阶段所收集信息进行综合分析,描述危害对人群健康产生不良作用的风险及其程度,同时应当定量或者定性描述和解释风险评估过程中的不确定性。

对于有阈值效应的化学物质,通常以危害特征描述步骤推导获得的健康指导值(ADI或ARfD)为参照,将暴露评估步骤获得的膳食暴露估计值(estimated dietary intake, EDI)与其进行比较,来判定健康风险。若EDI与ADI或ARfD比值小于1,认为该危害因素对人体的健康风险可以忽略;若EDI与ADI或ARfD比值大于1,认为该危害因素会对人体产生健康风险。Cao等^[20]

通过计算 EDI, 对稻米中 25 种农药进行慢性和急性膳食暴露风险评估, 得到 25 种农药的 EDI/ADI 和 EDI/ARfD 比值在 $2.29 \times 10^{-6} \sim 0.11$ 范围内, 均远低于 1, 说明稻米中的农药残留对人体没有危害。Guo 等^[21]对水稻中重金属含量进行分析, 采用 EDI 与 ADI 比值对稻米中的重金属进行暴露评估。对于既有遗传毒性又具有致癌性的化学物质, EFSA 等国际机构不对其设定健康指导值, 建议采用暴露边界值 (margin of exposure, MOE) 法进行风险特征描述, 其等于基准剂量下限与膳食暴露量的比值。黄飞飞等^[22]对苏州市大米重金属污染状况进行分析, 采用 MOE 值评估了稻米中铅和砷对人群的健康风险, 得出苏州市大米中的总砷污染对成人和儿童均不会产生健康危害, 铅污染对成人及 95% 的儿童均不会产生健康危害。

此外, 传统的食品安全风险评估和风险管理主要是基于单个化学物质, 但食品中往往同时存在多种危害化学物质, 并且部分化学物质具有相同作用机制, 这种联合暴露是否会通过剂量相加作用对人体健康产生危害, 已逐渐成为风险特征描述的研究热点。目前对于联合暴露常用的风险特征描述方法为相对效能因子法 (relative potency factor, RPF), 即在 1 组具有共同作用机制的化学物质中确定 1 个“指示化学物”, 然后将各组分与指示化学物的效能的比值作为校正因子, 对暴露量进行标化, 计算相当于指示化学物浓度的总暴露, 最后基于指示化学物的健康指导值来描述风险。Cui 等^[23-24]分别以吡虫啉和环唑醇作为指示农药, 采用 RPF 法, 对稻米中 6 个新烟碱类农药和 8 个三唑类杀菌剂累积性膳食摄入风险进行评估, 得出农药的联合暴露风险指数在 $5.00 \times 10^{-4} \sim 2.33 \times 10^{-3}$ 范围内, 均远低于 1, 对我国人群没有健康风险。

3 稻米质量安全预警技术

农产品质量安全预警是对农产品质量安全风险可能产生的危害和影响进行预先警示, 并在发生情况下能够实施有效措施。加强农产品质量安全预警对于及时发现和预防农产品质量安全风险、提高农产品质量安全监管水平具有重要的理

论和实践意义。目前, 大多发达国家及地区都建立了以预防为主农产品质量安全风险预警体系, 如 WHO/FAO 合作建立有国际食品安全当局网络 (INFOSAN)、欧盟建立有食品和饲料快速预警系统 (RASFF) 等。我国自 2001 年起, 开始实行农产品质量安全例行监测制度, 并建立了“国家农产品质量安全风险监测信息平台”, 为农产品质量安全风险因子排序和摸底排查提供了科学的数据支撑。此外, 近年来, 我国逐步建立农产品质量安全风险评估预警体系, 对粮油、蔬菜、水果等 11 大类产品 and 风险因子开展了全面的摸底排查和专项风险评估, 取得了明显成效, 基本摸清了我国重点农产品和重点产地的风险因子和影响环节, 并研究出相应的风险管理措施^[25]。

国内外学者们从不同环节着手对稻米质量安全预警开展研究。针对稻米产地环境、稻米种植、稻米储藏等全产业链进行了预警分析。

3.1 收获前的预警方法

产地环境是导致稻米中重金属超标的主要因素。目前稻米重金属超标风险预警主要是基于土壤理化因子及土壤镉含量建立稻米镉含量预测模型。具体表现为采用逐步回归分析、多元混合线性回归分析、GIS 技术和机器学习等方法, 将土壤重金属含量、酸碱度和有机质等参数作为自变量, 稻米重金属含量作为因变量, 建立预测模型。再依据质量标准与/或阈值判断模型计算稻米重金属含量是否超标, 实现稻米重金属超标风险预警。唐豆豆等^[26]通过收集和整理土壤分析的数据, 以土壤理化参数和有效态重金属 (EDTA 提取态) 为变量, 建立两个研究地区水稻籽粒中重金属含量的最优经验预测方程, 实现产地环境质量长期预警。刘佳凤等^[27]和熊婕等^[28]分别通过 Cubist 多元混合线性回归和逐步回归分析, 构建了研究区土壤-稻米镉传输模型, 可较好预测稻米镉积累量, 模型的预测能力达到极显著水平。Huang 等^[29]进一步通过机器学习, 发现基于土壤铁锰氧化物结合态镉、土壤 pH、土壤可还原态锰含量和水稻灌浆成熟后期的土壤含水率, 能很好预测区域尺度稻米镉含量, 大幅度提升了稻米镉

与土壤镉以及土壤参数之间关系的确定性。

气候环境、产毒真菌种群特征是影响田间阶段稻米真菌毒素污染的主要因素。戴明华等^[30]以温度、湿度、光照强度等导致稻曲病发病的因素为预测依据,构建基于组态王软件的水稻稻曲病预测系统,可以进行稻曲病发生可能性预测,为稻米中稻曲病毒素的污染防控提供支撑。国家粮食与物资储备局科学研究院唐芳团队^[31]系统调查了中国水稻主产区 10 省份的稻谷微生物与毒素的多样性及分布,发现产黄曲霉毒素的真菌(如黄曲霉菌 *A.flavus* 和寄生曲霉 *A.parasiticus*)以及产赭曲霉毒素的真菌(黑曲霉 *A.niger*)是我国稻谷上主要的产毒真菌类群。冬季平均气温、年平均降雨量以及稻谷水分含量是影响产毒真菌多样性和分布主要因素,为稻谷的真菌毒素污染预警与精准防控提供了基础理论和数据支撑。

3.2 收获后的预警方法

稻米真菌毒素污染不仅可发生在收获前,在收获后的干燥、储藏和加工等环节中产毒真菌都可以侵染稻米进而产生毒素。已有国内外学者对不同温度和湿度条件下稻米中的菌株生长及产毒行为建立了预测模型,可通过温湿度控制降低稻米真菌毒素的污染。例如熊科等^[32]通过拟合稻米贮藏阶段不同条件下菌株生长动力学模型和毒素产毒概率模型对菌株生长及产毒行为进行有效预测,正确预测了 97.7%稻米贮藏存在污染情况,为稻米贮藏期间真菌毒素的防控提供模型支撑。

3.3 全程预警方法

我国稻米产品当前面临最重要的质量安全问题就是重金属、农药残留和真菌毒素污染,其来源途径覆盖水稻从田间到餐桌的各个环节,因此可以借鉴国外通行的质量安全控制模式,对稻米从生产、加工到储运、销售的全链条危害点进行分析,筛查出关键控制的环节或节点,从而建立我国稻米产品的质量安全生产控制规范。在粮谷作物上,除无公害食品、绿色食品、有机食品建立一套质量安全控制规范外,国家也出台一些良好农业操作规范(good agricultural practices, GAP)来指导生产。如朱平等^[33]应用国家无公害稻米质

量标准和指标可建立稻米的安全状态预警模型,用于稻米安全状态的预测预警,为建立其他食品安全状态预警模型研究提供参考。

4 结论与展望

随着国际贸易日益发达,农产品技术性贸易壁垒已经成为各国实行农业保护最主要、最有效的手段。因此,开展农产品质量安全风险评估和预警,已成为各个国家共同关注的话题。我国在危害特征描述、暴露评估和风险特征描述等研究方面跟欧美等发达国家存在一定的差距。如,对危害物的毒理学、流行病学研究得到的数据和资料有限,适合我国国情的膳食暴露评估模型较少,暴露评估模型中存在的不确定度和变异度难以量化,造成风险评估不准确等。在农产品质量安全预警方面,尽管近些年来对农产品质量安全预警的理论成果颇丰,但是在实践中难以准确实现预警效果。

此外,由于农产品质量安全的不同环节由不同部门分段监管,这种分段监管制度造成不同环节的预警信息缺乏有效传递和交流。鉴于此,需要借鉴国外先进的风险评估和预警理念,并结合我国生产实际,大力开展稻米质量安全风险评估和预警,明确影响稻米产品质量安全的已知和未知危害因子,系统开展危害因子的毒理学和流行病学研究,探明危害因子危害的主要环节和关键控制点,改进膳食暴露评估和预警模型,建立跨部门的风险信息交流平台,提升我国稻米质量安全风险评估和预警水平,为稻米质量安全科学监管提供参考。

参考文献:

- [1] 《中国统计年鉴 2022》[EB/OL]. 国家统计局, 2022 年 9 月 1 日.
“China Statistical Yearbook 2022”[EB/OL]. National Bureau of Statistics, Sep 1, 2022.
- [2] 《全国土壤污染状况调查公报 2014》[EB/OL]. 中国环境保护部和国土资源部, 2014 年 4 月 17 日.
“National Soil Pollution Survey Bulletin 2014”[EB/OL]. Ministry of Environmental Protection and Ministry of Land and Resources of China, April 17, 2014.
- [3] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and

- breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2): 301-310.
- [4] ZHOU J, ZHANG J, ZHOU L. Information interventions and health promotion behavior: evidence from China after cadmium rice events[J]. *International Food and Agribusiness Management Review*, 2022, 25(4): 571-586.
- [5] HU H, JIN Q, KAVAN P. A study of heavy metal pollution in China: Current status, pollution-control policies and countermeasures [J]. *Sustainability*, 2014, 6(9): 5820-5838.
- [6] 2023 年全国农作物重大病虫害发生趋势预报[EB/OL]. 中国农业农村部, 2023 年 1 月 9 日.
“Prediction of the occurrence trend of major crop diseases and pests in China in 2023”[EB/OL]. Ministry of Agriculture and Rural Affairs, January 9, 2023.
- [7] VERES A, WYCKHUYS K A G, KISS J, et al. An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic pesticides. Part 4: Alternatives in major cropping systems[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 29867-29899.
- [8] PARK D L, NJAPAU H, BOUTRIF E. Minimizing risks posed by mycotoxins utilizing the HACCP concept[J]. *Food Nutrition and Agriculture*, 1999: 49-54.
- [9] FERRE F S. Worldwide occurrence of mycotoxins in rice[J]. *Food Control*, 2016, 62: 291-298.
- [10] DAOU R, JOUBRANE K, MAROUN R G, et al. Mycotoxins: factors influencing production and control strategies[J]. *AIMS Agriculture and Food*, 2021, 6(1): 416-447.
- [11] 平华, 马智宏, 王纪华, 等. 农产品质量安全风险评估研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014(3): 674-680.
PING H, MA Z H, WANG J H, et al. Advances in risk assessment of agricultural product quality and safety[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2014(3): 674-680.
- [12] World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins[J]. *IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans*, 1993, 56.
- [13] KARAGAS M R, WANG A, DORMAN D C, et al. Carcinogenicity of cobalt, antimony compounds, and weapons- grade tungsten alloy[J]. *The Lancet Oncology*, 2022, 23(5): 577-578.
- [14] LU F C. A review of the acceptable daily intakes of pesticides assessed by WHO[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1995, 21(3): 352-364.
- [15] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), Update of the risk assessment of nickel in food and drinking water[J]. *EFSA Journal*, 2020, 18(11): 6268.
- [16] SLOB W. Probabilistic dietary exposure assessment taking into account variability in both amount and frequency of consumption[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44(7): 933-951.
- [17] CAO Z, MOU R, CAO Z, et al. Nickel in milled rice (*Oryza sativa* L.) from the three main rice-producing regions in China[J]. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2017, 10(1): 69-77.
- [18] ZHANG Z, ZHANG N, LI H, et al. Potential health risk assessment for inhabitants posed by heavy metals in rice in Zijiang River basin, Hunan Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 24013-24024.
- [19] HAO H, GE D, WEN Y, et al. Probabilistic health risk assessment of inorganic arsenic and some heavy metals in rice produced from a typical multi-mining county, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021: 1-14.
- [20] 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]. *Journal of Food Quality*, 2022: 5902540.
- [21] GUO B, HONG C, TONG W, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution in a soil-rice system: a case study in the Jin-Qu Basin of China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11490.
- [22] 黄飞飞, 王瑛, 张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(23).
HUANG F F, WANG Y, ZHANG N. Heavy metal pollution status of local rice and human dietary exposure risk assessment in Suzhou city[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(23).
- [23] CUI K, WU X, WEI D, et al. Health risks to dietary neonicotinoids are low for Chinese residents based on an analysis of 13 daily-consumed foods[J]. *Environment International*, 2021, 149: 106385.
- [24] CUI K, WU X, ZHANG Y, et al. Cumulative risk assessment of dietary exposure to triazole fungicides from 13 daily-consumed foods in China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117550.
- [25] 张星联, 张慧媛, 唐晓纯. 国内外农产品质量安全预警系统现状研究[J]. *农产品质量与安全*, 2012(3): 19-21.
ZHANG X L, ZHANG H Y, TANG X C. Current status for early warning systems of agricultural product quality and safety in China and abroad[J]. *Quality and Safety of Agro-products*, 2012(3): 19-21.
- [26] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018(1): 18-26.
TANG D D, YUAN X Y, WANG Y M, et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018(1): 18-26.
- [27] 刘佳凤, 田娜娜, 赵玉杰, 等. 基于 Cubist 多元混合回归的稻米富集 Cd 模型构建研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1059-1065.
LIU J F, TIAN N N, ZHAO Y J, et al. Evaluation of cadmium accumulation in rice using a Cubist multivariate mixed

- regression model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1059-1065.
- [28] 熊婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 22-28.
XIONG J, ZHU Q H, HUANG D Y, et al. Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of south China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 22-28.
- [29] HUANG B Y, LYU Q X, TANG Z X, et al. Machine learning methods to predict cadmium (Cd) concentration in rice grain and support soil management at a regional scale[J]. Fundamental Research, 2023.
- [30] 戴明华, 罗建军, 于超. 基于组态王软件的水稻稻曲病预测研究[J]. 农业研究与应用, 2018, 31(5): 15-18.
DAI M H, LUO J J, YU C. Prediction for rice false smut based on kingview[J]. Agricultural Research and Application, 2018, 31(5): 15-18.
- [31] QI Z, ZHOU X, TIAN L, et al. Distribution of mycotoxin-producing fungi across major rice production areas of China[J]. Food Control, 2022, 134: 108572.
- [32] 熊科, 裴鹏钢, 王小艺, 等. 稻米, 小麦贮藏阶段微生物生长与毒素产生预测模型研究[J]. 中国食品科学技术学会第十八届年会摘要集, 2022.
XIONG K, PEI P G, WANG X Y, et al. Prediction models of mould growth and toxin production during paddy and wheat storage[J]. Abstracts of the 18th Annual Meeting of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022.
- [33] 朱平, 罗艳, 谭红, 等. 稻米食品质量安全状态预警模型的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2010 (4): 161-164.
ZHU P, LUO Y, TAN H, et al. The study of early warning model about quality safety of rice food[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2010, 27(4): 161-164. 