

风险评估

基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估无锡市市售蔬菜
农药残留风险特征

王锦铭, 刘萍, 王小娜, 诸芸, 高敏国

(无锡市疾病预防控制中心(南京医科大学附属无锡疾病预防控制中心), 江苏 无锡 214023)

摘要:目的 探讨无锡市市售蔬菜农药残留特征,并评估居民膳食暴露风险。方法 2021年4月~2023年8月在无锡市7个监测县(区)随机抽取市售蔬菜样品127份,采用气相色谱-质谱联用法、液相色谱-质谱联用法等检测51种农药残留量,依据GB 2763—2021判定超标情况,并通过食品安全指数法、危害物风险系数 R 进行风险评估。结果 蔬菜中农药残留总检出率为76.38%(97/127),总超标率为6.30%(8/127)。检出25种农药,且有禁限用农药检出。检出率最高的是烯酰吗啉(29.13%, 37/127),超标率最高的是毒死蜱(3.94%, 5/127)。7类蔬菜中均检出农药残留,鲜豆类检出率最高,鳞茎类超标率最高,分别为100.00%(3/3)和40.00%(4/10)。食品安全指数法评估结果表明,无锡市市售蔬菜总体膳食暴露风险安全可接受,但恶霜灵和二硫代氨基甲酸酯 $IFS_{max}>1$,存在不可接受的风险;危害物风险系数 R 结果表明,毒死蜱呈高风险,乐果、氯氟氰菊酯、噻虫嗪呈中风险。综合可知,无锡市市售蔬菜农药残留风险呈现整体可控、特定农药污染突出的特征。结论 无锡市市售蔬菜总体膳食暴露风险安全可接受,但也存在禁限用农药非法使用、农药多残留等风险。建议相关部门针对性管控风险隐患,继续做好蔬菜质量安全工作。

关键词:蔬菜; 农药残留; 食品安全指数法; 危害物风险系数

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2025)05-0454-09

DOI: 10.13590/j.cjfh.2025.05.007

Characteristics and risk assessment of pesticide residues in commercially available vegetables in
Wuxi City based on the index of food safety method and hazard risk coefficient model

WANG Jinming, LIU Ping, WANG Xiaona, ZHU Yun, GAO Minguo

(The Affiliated Wuxi Center for Disease Control and Prevention of Nanjing Medical University, Wuxi
Center for Disease Control and Prevention, Jiangsu Wuxi 214023, China)

Abstract: **Objective** To explore the characteristics of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi City, and evaluate the dietary exposure risks of residents. **Methods** One hundred and twenty seven commercially available vegetable samples were randomly selected from 7 monitoring counties (districts) in Wuxi City from 2021 to 2023, and the 51 kinds of pesticide residues were detected using gas chromatography-tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) and other methods. The exceeded levels were analyzed based on GB 2763—2021. The risk assessment of pesticide residues was evaluated using the index of food safety method and hazard risk coefficient model. **Results** The total detection rate of pesticide residues in vegetables was 76.38% (97/127), with a total excess rate of 6.30% (8/127). The 25 kinds of pesticides were detected, including some prohibited and restricted pesticides. The highest detection rate was dimethomorph (29.13%, 37/127) and the highest excess rate was chlorpyrifos (3.94%, 5/127). Pesticide residues were detected in all 7 categories of vegetables. The highest detection rate was fresh beans, and the highest excess rate was bulbs, at 100.00% (3/3) and 40.00% (4/10), respectively. The results of the food safety index method indicated that the overall dietary exposure risk of commercially available vegetables in Wuxi City was within acceptable range, but the IFS_{max} values of oxadixyl and dithiocarbamates were greater than 1, and there were unacceptable risk. Moreover, the application of chlorpyrifos was considered to be of high

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 无锡市卫生健康委医学重点学科项目(LCZX2021006)

作者简介: 王锦铭 女 主管医师 研究方向为学生营养与食品安全 E-mail: 1337117656@qq.com

通信作者: 高敏国 男 主任医师 研究方向为营养与食品卫生 E-mail: gaominguo@qq.com

risk based on the hazard risk coefficient method, while the applications of dimethoate, cyhalothrin and thiamethoxam were considered to be of medium risk. Based on a synthesis of the two methods, the risk of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi City was characterized by overall controllability and prominent pollution of specific pesticides. **Conclusion** The overall dietary exposure risks of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi City was safe and acceptable, but the risks of illegal use of prohibited and restricted pesticides and multiple pesticide residues were still existed. It is suggested that relevant departments should target and control the potential risks and continue to pay attention to the quality and safety of vegetables.

Key words: Vegetables; pesticide residues; food safety index; hazard risk coefficient

蔬菜是我国种植业中仅次于粮食的第二大农作物,其生产量和消费量在我国农产品中均排第一^[1]。蔬菜具有维持人体正常生理功能的作用,可提供维生素和矿物质等多种营养物质,在居民膳食结构中占重要比重^[2-3]。由于蔬菜生长周期较短,种植世代重叠、容易发生多种病虫害,农户在种植过程中施药频繁,易发生非法或违规使用农药的问题,农药残留已然成为影响蔬菜质量安全最关键的问题之一^[4-6]。虽然近年来高效、低毒、低残留的农药新品种不断推出,但不规范使用农药造成的农药残留仍可能通过膳食摄入在人体内聚积,造成癌症、神经损伤、呼吸道疾病、心血管疾病等潜在危害^[7-8],因而蔬菜农药残留对人体造成的健康风险不可忽视。为切实解决禁限用药物违法使用、常规农兽药残留超标等问题,农业农村部等七部门于2021年印发了《食用农产品“治违禁 控药残 促提升”三年行动方案》^[9](以下简称“三年行动方案”),同年发布了GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(以下简称GB 2763—2021),旨在准确判断农产品农药残留量超标情况,降低农药残留对人体健康的潜在威胁。基于此,为进一步了解三年行动方案下蔬菜的治理效果,依据GB 2763—2021全面监测蔬菜农药残留情况,系统评估其对人体健康的安全风险十分必要。

现有研究中常用膳食暴露风险评估法^[10-11]、危害物风险系数法(Hazard risk coefficient model, R)^[12-13]、风险排序法^[14]等方法评估蔬菜农药残留的单一暴露风险。近年来,越来越多的研究聚焦蔬菜农药残留联合暴露风险评估,采用食品安全指数(Index of food safety, IFS)法^[15]、累积风险评估法^[16]等方法评价多农药残留的整体暴露风险。考虑到单一评估方法可能遗漏潜在风险,不同评估方法联用且进行多维度的综合分析更有利于全面掌握食品风险信息^[17-19]。IFS法基于污染物残留水平和居民膳食暴露量,聚焦于不同剂量暴露对人群健康的潜在威胁,其核心在于量化膳食暴露风险^[19];而危害物风险系数法通过整合超标率、施检频率和敏感因子,

识别农药污染特征的潜在危害程度,旨在对市场流通中农药的违规使用实现快速响应^[18]。风险评估方法的多样性用以满足监管需求的复杂性。IFS和 R 联用进行评估获得更全面的蔬菜农药残留风险信息已在多项研究中得到验证^[17-21]。因此,本研究通过气相色谱-质谱联用法、液相色谱-质谱联用法等检测127份无锡市市售蔬菜农药残留状态,依据GB 2763—2021进行判定,运用IFS和 R 进行风险评估分析,以全面了解无锡市蔬菜农药残留的安全情况,及时发现蔬菜农药残留风险特征,为监督部门指导农药规范使用、保障蔬菜质量安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2021年4月至2023年8月的每年第二、三季度在无锡市7个监测县(区)的超市、便利店、农贸市场及零售摊点等流通环节随机采集产自无锡市的时令蔬菜127份,品种包括叶菜类、甘蓝类和芸薹类、块根和块茎类、鳞茎类、茄果类、瓜菜类、鲜豆类7大类,每份采集约1.5 kg,可食部分切碎后充分混匀,用四分法取样后捣碎成匀浆,放入聚乙烯瓶中,将处理好的样品保存于-18℃待测。

1.2 方法

1.2.1 检验方法与评价依据

监测农药种类包括杀虫剂、杀菌剂2大类51项指标,其中氨基甲酸酯类6种、拟除虫菊酯类2种、有机磷类11种、有机氯类3种、新烟碱类12种、其他类2种和杀菌剂15种,见表1。样品依据GB 23200.113—2018《食品安全国家标准 植物源性食品中208种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱-质谱联用法》、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 液相色谱-质谱联用法》、NY/T 761—2008《蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定》、NY/T 1725—2009《蔬菜中灭蝇胺残留量的测定 高效液相色谱法》及相

关文献^[22]要求进行前处理和检测,所有样品进行平行双样测定,重复样品的相对标准偏差均<10%,方法回收率范围是80%~120%。依据GB 2763—2021及《禁限用农药名录》^[23]对检测结果进行评价。

表1 无锡市市售蔬菜51种农药残留监测项目

Table 1 Monitoring of 51 pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi

农药种类	按化学结构分类	监测数量	农药名称
杀虫剂	氨基甲酸酯类	6	克百威 [*] 、3-羟基克百威、涕灭威 [*] 、涕灭威砒、涕灭威亚砒、残杀威
	拟除虫菊酯类	2	氟氯氰菊酯、氯氟氰菊酯
	有机磷类	11	氧乐果 [*] 、甲拌磷 [*] 、甲拌磷砒、甲拌磷亚砒、毒死蜱 [*] 、水胺硫磷 [*] 、三唑磷 [*] 、灭线磷 [*] 、乙酰甲胺磷 [*] 、甲胺磷 [*] 、乐果 [*]
	有机氯类	3	α-硫丹 [*] 、β-硫丹 [*] 、硫丹硫酸酯
	新烟碱类	12	吡虫啉、啉虫脒、噻虫啉、噻虫嗪、噻虫胺、呋虫胺、烯啶虫胺、氯噻啉、啉虫啉、环氧虫啉、氟啶虫
	其他类	2	胺腈、氟吡呋喃酮
杀菌剂		15	阿维菌素、灭蝇胺 百菌清、吡唑醚菌酯、丙环唑、多菌灵、苯醚甲环唑、腐霉利、甲霜灵、腈菌唑、啉霉胺、三唑酮、五氯硝基苯、戊唑醇、烯酰吗啉、恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯

注:截至2024年10月,^{*}为禁止使用的农药,[#]为禁止在蔬菜上使用的农药

1.2.2 评估方法

IFS法^[19]通过污染物残留水平和居民膳食暴露量计算来量化反映食品安全程度,利用加和性可综合评估蔬菜农药残留对人体健康的整体风险。本研究采用单一IFS和总体IFS均值($\overline{IFS}$)评价蔬菜中单一农药残留和总体农药残留对居民健康的危害程度。当IFS或 $\overline{IFS} \leq 1$ 时,表明蔬菜农药残留的风险安全可接受;当IFS或 $\overline{IFS} > 1$ 时,表明蔬菜农药残留的风险不可接受。

农药残留估计每日摄入量(Estimated daily intake, EDI)[mg/(kg·BW)],公式:

$$EDI_i = R_i \times F \times E \times P \quad (1)$$

式中: R_i :蔬菜某种农药的残留平均值(mg/kg); F :蔬菜估计日均摄入量(kg),参考《中国居民营养与慢性病状况报告(2020)》^[24],以每人每天0.266 kg计; E :蔬菜可食部分因子,以1.0计; P :蔬菜加工处理因子,以1.0计。IFS及 $\overline{IFS}$ 公式:

$$IFS_i = (EDI_i \times f_i) / (SI_i \times BW) \quad (2)$$

$$\overline{IFS} = \left(\sum_{i=1}^n IFS_i \right) / N \quad (3)$$

式中: f_i :农药安全摄入量的校正因子,以1.0计; SI_i :农药的安全摄入量,采用每日允许摄入量(Acceptable daily intake, ADI)表示(mg/kg·BW),参考GB 2763—2021; BW :成人的平均体质量(kg),参考《中国居民营养与慢性病状况报告(2020)》,以男性(69.6 kg)和女性(59 kg)的均值64.3 kg计; N :所有蔬菜样品的总数量。

危害物风险系数 R 法^[18]综合了危害物的超标率、施检频率和其自身的敏感性等影响因素,可以直观地反映特定时间段内蔬菜农药残留的风险程度。本研究采用 R 为补充,当 $R \leq 1.5$ 时,表明蔬菜中农药残留处于低度风险;当 $1.5 < R \leq 2.5$ 时,农药残留处于中度风险;当 $R > 2.5$ 时,农药残留处于高

度风险。公式:

$$R = aP + b/F + S \quad (4)$$

式中:采用长期风险系数分析, a :权重系数以100计; P :农药残留超标率(%); b :权重系数以0.1计; F :施检频率以1.0计; S :敏感因子以1.0计。

1.2.3 统计学分析

为客观地评估膳食摄入风险,依据世界卫生组织(World health organization, WHO)的食品中化学物质风险评估原则^[25],本研究中低于检出限(Limit of detection, LOD)的样品检测值按1/2 LOD计算。检测数据通过Excel 2016软件录入分析,折线图等采用GraphPad Prism 10.1绘制。

2 结果

2.1 蔬菜中农药残留检出总体情况

共采集127份蔬菜样品,检测51项农药指标,得出检测数据5286条。总检出率为76.38%(97/127),总超标率为6.30%(8/127),表明蔬菜农药残留情况呈总体检出率较高,超标率较低。由图1可知,无锡市市售蔬菜中农药的总体检出率和超标率呈逐年下降趋势。

2.2 蔬菜中不同种类农药残留检出情况

本研究中检测36种杀虫剂、15种杀菌剂2大类共51项农药指标,检出25项,包括11种杀虫剂和14种杀菌剂,其中3项为国家禁限使用农药品种。检出高毒农药2种、中毒农药4种、低毒农药19种。

由表2可知,检出率排名前5的农药是烯酰吗啉(29.13%)、多菌灵(26.77%)、苯醚甲环唑(25.20%)、丙环唑(22.83%)、二硫代氨基甲酸酯(22.64%),可见杀菌剂是蔬菜防止病虫害常用的农药类型。14种杀菌剂检出率为1.57%~29.13%,大于25%的种类从高到低排序为:烯酰吗啉(29.13%)>多菌灵

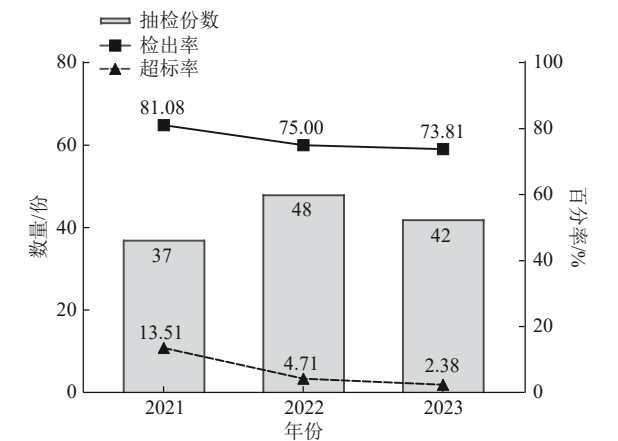


图1 2021—2023年无锡市市售蔬菜中农药残留检出情况
Figure 1 Detection characteristics of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi from 2021 to 2023

(26.77%)>苯醚甲环唑(25.20%)。11种杀虫剂检出率为0.92%~21.62%,大于10%的种类从高到低排序为:噻虫嗪(21.62%)>吡虫啉(13.51%)>噻虫胺(12.16%),均为新烟碱类杀虫剂,说明随着农药技术的不断革新,新烟碱类杀虫剂正逐渐取代有机磷类、氨基甲酸酯类等传统杀虫剂成为农户种植蔬菜最广泛使用的杀虫剂类型^[26-27]。检出超标农药4种,分别为毒死蜱(3.94%)、噻虫嗪(1.35%)、氯氟氰菊酯(0.93%)、乐果(0.92%),残留最大值是限量的1.56~4.59倍。检出禁限用农药3种,分别为涕灭威、毒死蜱、乐果,其中禁限用农药超标占全部超标农药的75.00%(6/8),表明违规使用禁限用农药的安全隐患依然突出^[28-29]。

表2 蔬菜中不同种类农药残留检测结果

Table 2 Detection results of different kinds of pesticide residues in vegetables

农药名称	功能	毒性	残留量范围/(mg/kg)	样品总份数	检出份数	检出率/%	超标份数	超标率/%
阿维菌素	杀虫剂	高毒	ND~0.016	109	2	1.83	0	0.00
百菌清	杀菌剂	低毒	ND~0.051	127	5	3.94	0	0.00
苯醚甲环唑	杀菌剂	低毒	ND~0.265	127	32	25.20	0	0.00
吡虫啉	杀虫剂	低毒	ND~0.126	74	10	13.51	0	0.00
吡唑醚菌酯	杀菌剂	低毒	ND~0.114	127	12	9.45	0	0.00
丙环唑	杀菌剂	低毒	ND~0.175	127	29	22.83	0	0.00
啶虫脒	杀虫剂	中毒	ND~0.104	74	5	6.76	0	0.00
毒死蜱	杀虫剂	中毒	ND~0.092	127	8	6.30	5	3.94
多菌灵	杀菌剂	低毒	ND~1.920	127	34	26.77	0	0.00
恶霜灵	杀菌剂	低毒	ND~3.340	127	5	3.94	0	0.00
二硫代氨基甲酸酯	杀菌剂	低毒	ND~2.710	53	12	22.64	0	0.00
呋虫胺	杀虫剂	低毒	ND~0.188	74	4	5.41	0	0.00
腐霉利	杀菌剂	低毒	ND~0.312	127	19	14.96	0	0.00
甲霜灵	杀菌剂	低毒	ND~0.159	127	26	20.47	0	0.00
腈菌唑	杀菌剂	低毒	ND~0.043	127	2	1.57	0	0.00
乐果	杀虫剂	中毒	ND~0.016	109	1	0.92	1	0.92
氯氟氰菊酯	杀虫剂	中毒	ND~2.390	108	5	4.63	1	0.93
啉霉胺	杀菌剂	低毒	ND~2.110	127	19	14.96	0	0.00
灭蝇胺	杀虫剂	低毒	ND~0.375	109	2	1.83	0	0.00
噻虫胺	杀虫剂	低毒	ND~0.145	74	9	12.16	0	0.00
噻虫嗪	杀虫剂	低毒	ND~1.070	74	16	21.62	1	1.35
三唑酮	杀菌剂	低毒	ND~0.025	127	19	14.96	0	0.00
涕灭威	杀虫剂	高毒	ND~0.030	109	3	2.75	0	0.00
戊唑醇	杀菌剂	低毒	ND~0.351	127	25	19.69	0	0.00
烯酰吗啉	杀菌剂	低毒	ND~1.430	127	37	29.13	0	0.00

注:ND为未检出

2.3 不同种类蔬菜中农药残留检出情况

7类蔬菜样品均检出农药残留,检出率范围为50.00%~100.00%,大于80%的种类从高到低排序为:鲜豆类(100.00%)>鳞茎类(90.00%)>茄果类(88.89%)。检出最少的种类是块根和块茎类(50.00%)。鳞茎类超标率为40.00%,检出1份大葱的噻虫嗪超标,1份韭菜和2份蒜头的毒死蜱超标。叶菜类超标率为6.12%,1份大白菜的氯氟氰菊酯超标,1份油麦菜和1份菠菜的毒死蜱超标。茄果类检出1份丝瓜的乐果超标,超标率为5.26%。

见表3。

66份样品同时检出2种及以上农药残留,多残留样品检出率为51.97%(66/127),从高到低排名前3的是鲜豆类(100.00%)、茄果类(66.67%)、叶菜类(61.22%)。其中鲜豆类样品数量较少可能对检测结果的稳定性有一定影响,但仍提示鲜豆类农药残留问题不容忽视。单份样品中最多检出13种农药。11份样品检出禁止(限制)使用农药,检出率为8.66%(11/127),鳞茎类的禁限用农药检出率最高(50.00%),见图2。

表3 无锡市不同种类蔬菜中农药残留检测结果

Table 3 Detection results of f different kinds of pesticide residues in different kinds of vegetables in Wuxi

样品种类	抽样份数			样品总份数	检出份数	检出率/%	超标份数	超标率/%
	2021 年	2022 年	2023 年					
叶菜类	13	16	20	49	39	79.59	3	6.12
甘蓝类和芸薹类	6	6	6	18	12	66.67	0	0.00
块根和块茎类	3	5	2	10	5	50.00	0	0.00
鳞茎类	4	5	1	10	9	90.00	4	40.00
茄果类	3	8	7	18	16	88.89	0	0.00
瓜菜类	7	7	5	19	13	68.42	1	5.26
鲜豆类	1	1	1	3	3	100.00	0	0.00
合计	37	48	42	127	97	76.38	8	6.30

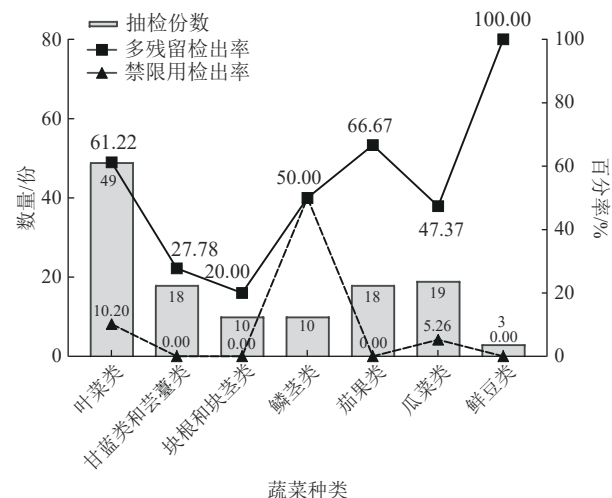


图2 无锡市不同种类蔬菜中农药多残留和禁限用农药检出情况

Figure 2 Detection characteristics of multi-pesticide residues and prohibited and restricted pesticides in different kinds of vegetables in Wuxi

2.4 风险评估

2.4.1 IFS 分析

二硫代氨基甲酸酯是一类有机硫农药的总称,检测以 CS₂ 计^[22]。依据风险最大化原则,检出浓度相近时,ADI 值越小风险值越大,参照 GB 2763—2021,本研究中取 0.003 mg/kg·BW 用以评估。由表 4 可知,蔬菜中检出的单一农药残留 IFS 均值范围为 0.000 11~0.165 87,<1;IFS_{max} 范围为 0.004~3.737,除恶霜灵(1.382)、二硫代氨基甲酸酯(3.737)外均<1,提示需加强对恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯农药的监管。结合总体安全指数 $\overline{IFS}$ 和 $\overline{IFS}_{\max}$ 为 0.008 73 和 0.262,均小于 1,结果表明,整体市售蔬菜的食品安全状况较好,农药残留总体风险处于可接受范围。

2.4.2 危害物风险系数 R 分析

由图 3 可知,蔬菜中检出农药残留的风险系数 R 值为 1.1~5.04。R 值可能受超标率影响,结果显示,毒死蜱 R 值为 5.04,呈高度风险;乐果(R=2.02)、氯氟氰菊酯(R=2.03)、噻虫嗪(R=2.45)呈中度风险;其余农药 R 均<1.5,呈低度风险。综合可知,无

锡市市售蔬菜农药残留风险呈现整体可控、特定农药污染突出的特征,可重点关注恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯、毒死蜱的膳食暴露风险。

3 讨论

本研究中无锡市 2021—2023 年市售蔬菜农药残留的总检出率为 76.38%,总超标率为 6.30%,与天津市^[30](检出率为 70.54%,超标率为 6.01%)结果相近,略高于贵州省^[20](检出率为 60.67%,超标率为 3.33%),同时农药检出率及超标率呈逐年下降趋势,可见随着食品安全政策的实施和国家标准的更新,农药残留问题逐年得到改善。在检出的 25 种农药中,检出率排名前 5 的都是杀菌剂,这与天津市^[30]、贵州省^[20]、湖北省^[15]、陕西省^[31]等现有研究结果一致,究其原因大部分杀菌剂起效时间较长,为快速防治蔬菜病变,农户可能会加大用量、提高浓度、增加次数并混合使用多种杀菌剂,因此杀菌剂已成为蔬菜农药残留的重要污染源^[30]。7 大类蔬菜中发现鲜豆类、鳞茎类、茄果类农药残留检出率较高,这与近年来不同地区蔬菜农药残留情况相似^[20,31],可能是由于这三类蔬菜采摘周期较长且对多种病虫害易感,农户在其种植过程中多次施药普遍检出农药残留^[32]。建议相关部门加大这三类蔬菜的安全用药宣传培训。51.97% 的总体农药多残留现象可能是由于农户为提高杀虫效果而忽视安全间隔期,混合使用多种农药检出残留种类增多^[33]。

此外,与 2019—2021 年江苏省^[11]检测结果超标率均低于 1.50% 相比,本研究中无锡市的超标率较高,可能是因为各地区监测的采样环节、蔬菜种类、农药种类等各有不同,因此所得结果也存在不同。本研究结果显示农药残留检测中超标的农药种类仍以有机磷类为主,超标农药主要为毒死蜱、乐果等禁限用农药,说明无锡市仍需加强对这一大类杀虫剂类农药的监管力度。在检出的超标农药中,禁限用农药超标占 75.00%,其中毒死蜱超标率最高

表4 无锡市市售蔬菜中25种检出农药的食品安全指数法分析结果

Table 4 Analysis results of the index of food safety method for detection of 25 kinds of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi City

农药名称	ADI/ (mg/kg·BW)	检出平均值/ (mg/kg)	检出最大值/ (mg/kg)	EDI/ (mg/kg·BW)	EDI _{max} / (mg/kg·BW)	IFS	IFS _{max}	$\overline{IFS}$	$\overline{IFS}_{max}$
阿维菌素	0.001	0.002	0.016	0.000 469	0.004	0.007 29	0.066		
百菌清	0.02	0.001	0.051	0.000 275	0.014	0.000 21	0.011		
苯醚甲环唑	0.01	0.016	0.265	0.004 127	0.070	0.006 42	0.110		
吡虫啉	0.06	0.006	0.126	0.001 673	0.034	0.000 43	0.009		
吡唑醚菌酯	0.03	0.004	0.114	0.001 191	0.030	0.000 62	0.016		
丙环唑	0.07	0.006	0.175	0.001 702	0.047	0.000 38	0.010		
啉虫脒	0.07	0.005	0.104	0.001 382	0.028	0.000 31	0.006		
毒死蜱	0.01	0.004	0.092	0.001 017	0.024	0.001 58	0.038		
多菌灵	0.03	0.022	1.920	0.005 786	0.511	0.003 00	0.265		
恶霜灵	0.01	0.028	3.340	0.007 506	0.888	0.011 67	1.382		
二硫代氨基甲酸酯	0.003	0.120	2.710	0.031 996	0.721	0.165 87	3.737		
呋虫胺	0.20	0.005	0.188	0.001 413	0.050	0.000 11	0.004		
腐霉利	0.1	0.008	0.312	0.002 169	0.083	0.000 34	0.013	0.008 73	0.262
甲霜灵	0.08	0.003	0.159	0.000 892	0.042	0.000 17	0.008		
腈菌唑	0.03	0.002	0.043	0.000 506	0.011	0.000 26	0.006		
乐果	0.002	0.002	0.016	0.000 433	0.004	0.003 37	0.032		
氯氟氰菊酯	0.02	0.030	2.390	0.007 996	0.636	0.006 22	0.494		
啞霉胺	0.2	0.032	2.110	0.008 502	0.561	0.000 66	0.044		
灭蝇胺	0.06	0.005	0.375	0.001 422	0.100	0.000 37	0.026		
噻虫胺	0.1	0.021	0.145	0.005 483	0.039	0.000 85	0.006		
噻虫嗪	0.08	0.028	1.070	0.007 383	0.285	0.001 44	0.055		
三唑酮	0.001	0.001	0.025	0.000 237	0.007	0.003 69	0.105		
涕灭威	0.003	0.001	0.030	0.000 354	0.008	0.001 84	0.041		
戊唑醇	0.03	0.005	0.351	0.001 334	0.093	0.000 69	0.048		
烯酰吗啉	0.2	0.024	1.430	0.006 405	0.380	0.000 50	0.030		

注:ADI为每日允许摄入量;EDI为农药残留估计每日摄入量;IFS为食品安全指数

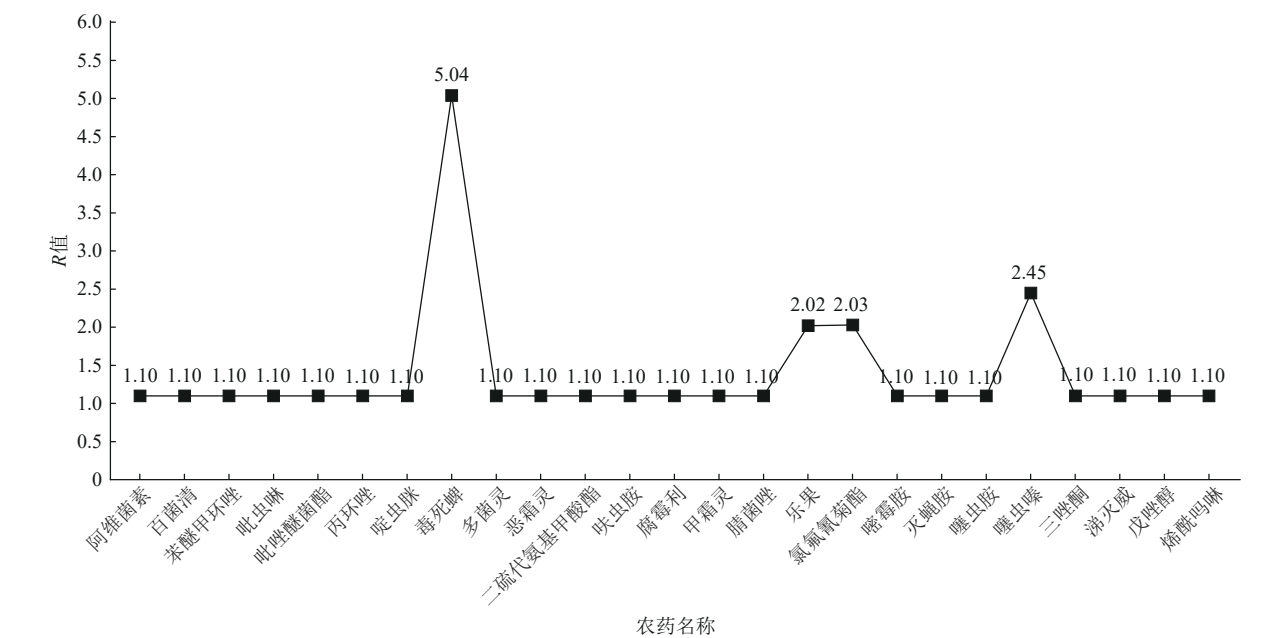


图3 无锡市市售蔬菜中25种检出农药的危害物风险系数法分析结果

Figure 3 Analysis results of hazard risk coefficient model for detection of 25 kinds of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi

(3.94%),这与江苏省^[26]数据显示超标频次最高为毒死蜱相一致。在鳞茎类、叶菜类和茄果类等不同种类蔬菜中均存在有机磷类禁限用农药超标,毒死蜱超标现象尤为突出。这说明无锡市在提升毒死蜱监管力度的同时,应进一步推广低毒农药品种的施用,如毒死蜱可以用辛硫磷、苦参碱、高效氯氟菊酯、藜芦碱等低残留风险农药替代。对不同类型蔬菜中禁限用农药检出情况进行比较,发现鳞茎类蔬菜中禁限用农药残留检出率及超标率均最高,分别为50.00%和30.00%,叶菜类蔬菜次之。这是由于

鳞茎类蔬菜生长特性导致土壤中高发虫害,实际防治中没有特效药需大量喷洒高毒农药,使得禁限用农药残留严重^[21]。而叶菜类蔬菜因为叶面表面积大、表皮上气孔数量多,为提高产量和质量而多次喷洒农药,从而导致残留超标^[28]。建议消费者在流通环节正规的农贸市场、超市等场所购买蔬菜,食用前用流水、小苏打清洗,或去皮等方式可有效减少蔬菜中农药残留。

本研究结果显示蔬菜中 $\overline{IFS}$ 和 $\overline{IFS}_{\max}$ 均 <1 ,这与现有其他研究结果一致^[12-13, 15, 19-20, 31],结果表明,蔬菜农药残留的整体膳食暴露风险相对可接受,同时提示重点关注恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯、毒死蜱的膳食暴露风险。虽然恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯并未检出超标,但恶霜灵、二硫代氨基甲酸酯 $IFS_{\max}>1$,提示相关部门可以针对恶霜灵的不规范用药现状在农户种植过程中强化培训,并把制定二硫代氨基甲酸酯总残留标准纳入未来监管计划,管控风险隐患。危害物风险系数 R 结果可知无锡市蔬菜中毒死蜱呈高风险,乐果、氯氟氰菊酯、噻虫嗪呈中风险,建议加强毒死蜱管控力度,组织开展专项检查,同时对乐果等中风险农药实施动态监测。两种方法的综合评估揭示蔬菜农药残留风险特征的多维性,IFS的低风险结果可能掩盖 R 值法中的高污染现象,而 R 值法的高风险判定需结合IFS结果确认是否需制定长期管控策略,二者结合可更全面反映农药风险的动态变化。因此,多方法联用分析更能避免单一方法风险评估的片面性,为监管者提供分层决策依据。本研究尚未开展蔬菜中共同毒理机制农药的累积膳食暴露风险评估,不同类型农药对人体健康损害毒效应的膳食暴露风险仍需进一步探讨。

综上,2021年4月—2023年8月无锡市市售蔬菜总体膳食暴露风险安全可接受,但也存在禁限用农药非法使用、农药多残留等风险,提示仍需加强调查监测高残留农药,应用多维度的风险评估方法提供科学依据。建议消费者了解并掌握合理的蔬菜清洗方法,丰富新鲜蔬菜种类,保证食物多样性;相关监管部门在监测结果分析研判的基础上,持续性、针对性地管控蔬菜农药残留风险隐患,强化农户安全用药宣传培训,加强有机磷类杀虫剂的监管力度,推广低毒农药品种的施用,继续做好蔬菜质量安全工作。

参考文献

[1] 张凤兰. 我国蔬菜种业发展成效和趋势[J]. 蔬菜, 2022(5): 1-5.

ZHANG F L. Development achievements and trends of vegetable seed industry in China [J]. Vegetables, 2022(5): 1-5.

[2] BUTURI C V, MAURO R P, FOGLIANO V, et al. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet [J]. Foods, 2021, 10(2): 223.

[3] PARK B K, KWON S H, YEOM M S, et al. Detection of pesticide residues and risk assessment from the local fruits and vegetables in Incheon, Korea [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 9613.

[4] 田耿智. 基地蔬菜水果中农药残留暴露风险和预警风险评估[J]. 中国农学通报, 2021, 37(27): 112-116.

TIAN G Z. Vegetables and fruits at the production base: assessment of pesticide residue exposure and early warning of risk [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(27): 112-116.

[5] 曹爱兵, 姚瑶, 陈长军, 等. 我国蔬菜农药的登记、残留现状及安全使用[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(22): 8-14.

CAO A B, YAO Y, CHEN C J, et al. Registration, residue status and safe use of vegetable pesticides in China [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(22): 8-14.

[6] LI H, CHANG Q Y, BAI R B, et al. Simultaneous determination and risk assessment of highly toxic pesticides in the market-sold vegetables and fruits in China: A 4-year investigational study [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 221: 112428.

[7] WAHAB S, MUZAMMIL K, NASIR N, et al. Advancement and new trends in analysis of pesticide residues in food: a comprehensive review [J]. Plants-Basel, 2022, 11(9): 1106.

[8] LIANG Z, ABDELSHAFY A M, LUO Z S, et al. Occurrence, detection, and dissipation of pesticide residue in plant-derived foodstuff: A state-of-the-art review [J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132494.

[9] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《食用农产品“治违禁 控药残 促提升”三年行动方案》的通知 [EB/OL]. (2021-11-04) [2024-06-18]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2021/202107/202111/t20211104_6381340.htm.

Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's of China. Notice of issuance of the "Three-year action plan for the treatment of prohibited and controlled pesticide residues and promotion of edible agricultural products" [EB/OL]. (2021-11-04) [2024-06-18]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2021/202107/202111/t20211104_6381340.htm.

[10] WANG R, YANG Y, DENG Y, et al. Multiresidue analysis and dietary risk assessment of pesticides in eight minor vegetables from Guizhou, China [J]. Food Chemistry, 2022, 380: 131863.

[11] 孙钰洁, 刁春友, 闫晓阳, 等. 江苏省蔬菜中农药残留超标风险状况分析及对策建议 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 205-210.

SUN Y J, DIAO C Y, YAN X Y, et al. Analysis of the risk of excessive pesticide residues in vegetables in Jiangsu province and suggestions for countermeasures [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(17): 205-210.

[12] WEI J, LIANG X H, LI J X, et al. Dietary risk assessment of pesticide residues in cowpeas from Hainan province of China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 125:

- 105769.
- [13] QIN G F, CHEN Y, HE F R, et al. Risk assessment of fungicide pesticide residues in vegetables and fruits in the mid-western region of China [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 95: 103663.
- [14] 田耿智, 白新明, 刘晓庆, 等. 农药残留风险评估在蔬菜水果和食用菌监测中的应用研究[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 402-413.
- TIAN G Z, BAI X M, LIU X Q, et al. Study on the application of a risk assessment method of pesticide residues in vegetables and fruits and edible fungus monitoring [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(2): 402-413.
- [15] 王兰兰, 黄茜, 王会霞, 等. 2022年湖北省市售蔬菜农药残留分析及风险评估[J]. *现代预防医学*, 2023, 50(18): 3420-3424.
- WANG L L, HUANG X, WANG H X, et al. Analysis and risk assessment of pesticide residues in vegetables sold in Hubei, 2022 [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50(18): 3420-3424.
- [16] ZHANG Q, YING Z T, TANG T, et al. Residual characteristics and potential integrated risk assessment of synthetic pyrethroids in leafy vegetables from Zhejiang in China-based on a 3-year investigation [J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130389.
- [17] 赵杰斌, 邓浩, 徐振林. 基于食品安全指数法的台山市蔬菜和水果农药残留风险评估[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(6): 277-283.
- ZHAO J B, DENG H, XU Z L. Risk assessment of pesticide residues in vegetables and fruits from Taishan City based on the index of food safety [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(6): 277-283.
- [18] 汪雨龙, 张科, 高凤, 等. 市售“三棵菜”农药残留特征及风险评估[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(13): 279-289.
- WANG Y L, ZHANG K, GAO F, et al. Characteristics and dietary intake risk assessment of pesticide residues in commercial three vegetables [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(13): 279-289.
- [19] 梁晓涵, 林敏, 万娜, 等. 基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估海南芹菜的农药残留风险[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 112-121.
- LIANG X H, LIN M, WAN N, et al. Risk assessment of pesticide residues in celery in Hainan based on food safety index and hazard risk coefficient method [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(1): 112-121.
- [20] 杨琪, 王娅芳, 李磊, 等. 2020—2022年贵州省市售蔬菜中农药残留特征分析及健康风险评估[J]. *现代预防医学*, 2023, 50(18): 3425-3430.
- YANG Q, WANG Y F, LI L, et al. Features and risk assessment of pesticide pollution in commercially available vegetables, Guizhou, 2020—2022 [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50(18): 3425-3430.
- [21] 马新耀, 刘娇, 李伟, 等. 基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估山西省韭菜中农药残留的风险[J]. *中国蔬菜*, 2022(7): 92-97.
- MA X Y, LIU J, LI W, et al. Risk Evaluation of pesticide residues in leeks in Shanxi province based on food safety index and hazard risk coefficient method [J]. *China Vegetables*, 2022(7): 92-97.
- [22] 田丽, 陶凌云, 胡佳薇, 等. 2018—2020年陕西省蔬菜、水果和食用菌中二硫代氨基甲酸酯类农药残留调查[J]. *卫生研究*, 2022, 51(3): 501-503.
- TIAN L, TAO L Y, HU J W, et al. Investigation of dithiocarbamate pesticide residues in vegetables, fruits, and edible fungi in Shanxi province from 2018 to 2020 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2022, 51(3): 501-503.
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 禁限用农药名录 [EB/OL]. (2019-11-29) [2024-06-18]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/201911/t20191129_6332604.htm.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. List of banned and restricted pesticides [EB/OL]. (2019-11-29) [2024-06-18]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/201911/t20191129_6332604.htm.
- [24] 国家卫生健康委疾病预防控制局. 中国居民营养与慢性病状况报告 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- Bureau Of Disease Prevention and Control of the National Health Commission. Report on the status of Chinese residents' nutrition and chronic diseases [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020.
- [25] 联合国粮农组织, 世界卫生组织. 食品中化学物风险评估原则和方法 [M]. 刘兆平, 李凤琴, 贾旭东, 译. 北京: 人民卫生出版社, 2012.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food [M]. Translated by LIU Z P, LI F Q, JIA X D. Beijing: People's Medical Publishing House, 2012.
- [26] ZHANG T, SONG S M, BAI X Y, et al. A nationwide survey of urinary concentrations of neonicotinoid insecticides in China [J]. *Environment International*, 2019, 132: 105114.
- [27] SCHMIDT T S, MILLER J L, MAHLER B J, et al. Ecological consequences of neonicotinoid mixtures in streams [J]. *Science Advances*, 2022, 8(15): eabj8182.
- [28] 商慧敏, 赵惠清, 单美娜, 等. 2015—2021年内蒙古自治区市售蔬菜中禁限用农药残留调查分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(6): 849-853.
- SHANG H M, ZHAO H Q, SHAN M N, et al. Investigation and analysis of banned and restricted pesticide residues in commercial vegetables in Inner Mongolia from 2015 to 2021 [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(6): 849-853.
- [29] 李传秀, 孙枫林, 于红卫, 等. 青岛市市售蔬菜中农残特征及膳食暴露风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2024, 36(4): 407-413.
- LI C X, SUN F L, YU H W, et al. Characteristics of pesticide residues and dietary exposure risk assessment of vegetables sold in Qingdao City [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2024, 36(4): 407-413.
- [30] 罗莎, 赵帅, 高春海, 等. 2016—2020年天津市市售蔬菜中农药残留状况及膳食暴露评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2022, 34(6): 1238-1243.
- LUO S, ZHAO S, GAO C H, et al. Present situation and dietary

- exposure assessment of pesticide residues in vegetables sold in Tianjin from 2016 to 2020[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1238-1243.
- [31] 赵莹, 王玮, 乔海鸥, 等. 2019—2021年陕西省市售蔬菜中农药残留状况调查及膳食摄入风险评估[J]. 现代预防医学, 2022, 49(21): 3913-3917.
- ZHAO Y, WANG W, QIAO H O, et al. Pesticide residues in commercially available vegetables and risk assessment of dietary intake, Shaanxi, 2019—2021[J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(21): 3913-3917.
- [32] 李读兴, 阚延荣. 2016—2020年枣庄市市售蔬菜中农药残留污染状况和膳食暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(20): 2545-2550.
- LI D X, KAN Y R. Assessment of pesticide residues pollution and dietary exposure in commercially available vegetables in Zaozhuang City from 2016 to 2020[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(20): 2545-2550.
- [33] 刘美玲. 我国蔬菜农药残留现状及预防对策[J]. 现代农业科技, 2023(12): 113-116.
- LIU M L. The current situation and prevention measures of pesticide residues in vegetables in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(12): 113-116.

(上接第411页)

- 刘爱东(国家食品安全风险评估中心)
孙长颢(哈尔滨医科大学)
李 宁(国家食品安全风险评估中心)
李 黎(中华预防医学会)
李凤琴(国家食品安全风险评估中心)
李业鹏(国家食品安全风险评估中心)
李国梁(陕西科技大学食品与生物工程学院)
李静娜(武汉市疾病预防控制中心)
杨 方(福州海关技术中心)
杨 钧(青海省卫生健康委员会卫生监督所)
杨大进(国家食品安全风险评估中心)
杨小蓉(四川省疾病预防控制中心)
杨杏芬(南方医科大学公共卫生学院)
肖 荣(首都医科大学公共卫生学院)
吴永宁(国家食品安全风险评估中心)
何更生(复旦大学公共卫生学院)
何来英(国家食品安全风险评估中心)
何洁仪(广州市疾病预防控制中心)
郭云昌(国家食品安全风险评估中心)
郭丽霞(国家食品安全风险评估中心)
唐振柱(广西壮族自治区疾病预防控制中心)
黄 薇(深圳市疾病预防控制中心)
黄锁义(右江民族医学院药学院)
常凤启(河北省疾病预防控制中心)
崔生辉(中国食品药品检定研究院)
章 宇(浙江大学生物工程与食品学院)
章荣华(浙江省疾病预防控制中心)
梁进军(湖南省疾病预防控制中心)
程树军(广州海关技术中心)
傅武胜(福建省疾病预防控制中心)
谢剑炜(军事科学院军事医学研究院)
赖卫华(南昌大学食品学院)
裴晓方(四川大学华西公共卫生学院)
廖兴广(河南省疾病预防控制中心)
熊丽蓓(上海市疾病预防控制中心)
樊永祥(国家食品安全风险评估中心)