DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260227001
引用格式: 赵莹, 王玮, 乔海鸥, 等. 2022—2024 年陕西省市售蔬菜中农药残留污染调查及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 310–320.
ZHAO Y, WANG W, QIAO HO, *et al*. Investigation of pesticide residue contamination and risk assessment of commercially available vegetables in Shaanxi Province from 2022 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 310–320. (in Chinese with English abstract).

2022—2024 年陕西省市售蔬菜中农药残留污染调查及风险评估

赵 莹, 王 玮*, 乔海鸥, 尹丹阳
(陕西省疾病预防控制中心, 西安 710054)

摘 要: 目的 调查陕西省市售蔬菜中农药残留污染特征, 评估当地居民通过蔬菜摄入农药的膳食风险。**方法** 基于 2022—2024 年陕西省 10 个地市 8 大类 765 份市售蔬菜样品中 25 种农药残留的监测数据, 从不同农药种类、不同蔬菜种类、不同区域分布、农药混用情况等方面调查农药污染情况, 开展急性与慢性膳食摄入风险水平评估(dietary intake risk assessment, DIRA), 并通过食品安全指数(index of food safety, IFS)判定总体风险水平。**结果** 本次采集的蔬菜样品检出农药残留 23 种, 总体样品的检出率为 58.17%, 超标率 2.35%, 有 24 份样品检出禁限用农药, 其中乐果、氧乐果和甲拌磷检出即超标。单项指标的检出率为 0.13%~25.49%, 超标率为 0.13%~0.65%。叶菜类(74.31%)的检出率最高, 多药联用情况最严重。叶菜类(4.74%), 鳞茎类(3.51%)和茄果类(3.01%)检出超标样品。陕南地区的检出极端值较高, 关中地区贡献全省 72.22%超标案例。氧乐果的急性参考剂量百分比(percentage of acute reference dose, %ARfD)为 399.67%, 其余已评估农药的%ARfD 和每日允许摄入量百分比(percentage of acceptable daily intake, %ADI)均小于 100%。各单项农药的 IFS 均小于 1, 蔬菜总体食品安全指数(mean index of food safety, $\overline{\text{IFS}}$)小于 1。**结论** 陕西省市售蔬菜农药残留呈现检出率高、超标率低的特征, 叶菜类多药联用现象突出。除氧乐果外, 其余农药的急、慢性摄入风险水平均在可接受范围内。蔬菜的总体安全风险可控, 禁限用农药的违规使用和氧乐果的急性膳食暴露风险是影响蔬菜质量的主要因素。本研究结果可为当地优化蔬菜质量安全监管及开展居民膳食风险预警提供数据支撑。

关键词: 陕西省; 蔬菜; 农药残留; 风险评估

Investigation of pesticide residue contamination and risk assessment of commercially available vegetables in Shaanxi Province from 2022 to 2024

ZHAO Ying, WANG Wei*, QIAO Hai-Ou, YIN Dan-Yang
(*Shaanxi Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Xi'an* 710054, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the characteristics of pesticide residue contamination in commercially

收稿日期: 2026-02-27
第一作者: 赵莹(1988—), 女, 博士, 副主任技师, 主要研究方向为食品卫生检验。E-mail: yingzhao0618@163.com
***通信作者:** 王玮(1987—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品卫生检验。E-mail: 1345919982@qq.com

available vegetables in Shaanxi Province and assess the dietary risk of local residents through vegetable consumption. **Methods** Based on the monitoring data of 25 kinds of pesticide residues in 765 samples of 8 major categories of commercially available vegetables from 10 cities in Shaanxi Province from 2022 to 2024, the pesticide residue contamination was investigated from different aspects such as different pesticide varieties, different vegetable species, different regional distributions and utilization of multiple pesticides. Acute and chronic dietary intake risk assessment (DIRA) was conducted and the overall risk level was determined through the index of food safety (IFS). **Results** The 23 kinds of pesticide residues were detected in vegetable samples, with an overall detection rate of 58.17% and an exceeding rate of 2.35%. Prohibited and restricted pesticides were detected in 24 samples, among which dimethoate, omethoate and phorate were found to exceed the maximum residue limits upon detection. The detection rate of individual indicators ranged from 0.13% to 25.49% and the exceeding rates ranged from 0.13% to 0.65%. Leafy vegetables (74.31%) had the highest detection rate and the co-use of multiple pesticides was the most prominent. Exceedance samples were found in leafy vegetables (4.74%), bulb vegetables (3.51%) and fruit vegetables (3.01%). The extreme values of detection in the Shannan region were relatively high and the Guanzhong region contributed 72.22% of the exceedance cases in the province. The percentage of acute reference dose (%ARfD) of omethoate was 399.67%, while the %ARfD and percentage of acceptable daily intake (%ADI) of the other evaluated pesticides were all less than 100%. The IFS of each individual pesticide was less than 1 and the mean index of food safety ($\overline{\text{IFS}}$) of vegetables was less than 1. **Conclusion** The pesticide residues in commercially available vegetables in Shaanxi Province show a high detection rate and a low exceeding rate, and the phenomenon of multiple pesticide co-use in leafy vegetables is quite prominent. Except for omethoate, the acute and chronic dietary exposure risks of other pesticides are within acceptable limits. The overall safety risk of vegetables is controllable. The illegal use of prohibited and restricted pesticides and the acute dietary exposure risk of omethoate are the main factors affecting vegetable quality. The findings of this study may provide data support for refining local regulatory strategies and implementing dietary risk warnings for residents.

KEY WORDS: Shaanxi Province; vegetables; pesticide residues; risk assessment

0　引　言

我国蔬菜种植登记使用的化学农药品种有 720 余种, 杀虫剂约占总数的 37%, 且高毒剧毒禁限用农药仍有违规使用情况[1]。尽管农药的使用对保障商品菜的健康生长、提高产量、提升品质具有不可替代的作用, 但违规使用农药对人体健康仍然有不可忽视的影响, 尤其是高风险农药的代谢产物可通过膳食积累在人体内长期蓄积, 其毒性效应往往比母体化合物更为复杂[2]。研究表明, 蔬菜中高风险农药代谢产物的日均暴露量达 0.03 μg/kg BW, 可能增加慢性病风险[3]。开展蔬菜中农药残留的监测调查以及食品安全风险评估能够有效掌握其残留状况的区域差异并科学评价潜在风险。

近年来, 蔬菜中农药残留问题普遍存在, 杀虫剂和杀菌剂均有不同程度的检出, 超标及禁限用农药违规检出的情况时有发生[4−5], 因此, 国内开展了大量针对蔬菜中农药残留监测及风险评估的相关研究, 旨在动态掌握食品污染物的污染水平及变化趋势, 合理评估暴露危害。鉴于蔬菜农药残留常涉及多品种、多农药共存情况, 单一的评价方法各有侧重难以全面反映风险特征及具体的暴露细节, 近年研究更倾向于多种评估方法联合使用[6-7], 综合评价确保获取更全面客观的风险信息, 有助于科学精准判断农药残留经膳食摄入的健康风险。

目前针对陕西省蔬菜中农药残留风险监测的研究较为滞后: 现有成果多局限于农药残留的情况调查[8-9], 缺少特征差异的多维度系统分析; 少数涉及农药残留的暴露评估类研究多聚焦于单一种类农药或单一评估方法[10-11]。为全面、准确地了解陕西省市售蔬菜中农药残留的污染状况, 本研究借助食品安全风险监测平台, 基于 2022—2024 年陕西省 765 份市售蔬菜样品中 25 种农药残留的监测数据, 系统分析连续 3 年本省市售蔬菜中农药残留现状及风险特征, 量化分析不同农药种类、不同蔬菜品种、不同地区的残留检出和超标及多药混用的情况。为避免单一评估方法的局限性, 本研究结合城镇居民蔬菜消费量等相关数据, 构建点评估模型, 联合使用可以评价短期高剂量暴露及长期低剂量摄入风险的膳食摄入风险水平评估(dietary intake risk assessment, DIRA)法和可以宏观评价阶段性总体安全风险的食品安全指数(index of food safety, IFS)法进行蔬菜

中农药残留的风险评估，通过多维度的综合研判为蔬菜中农药残留管控政策的制定和完善提供更全面的实证依据，为食品安全风险管理措施的精准实施提供可靠的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

遵循监测全覆盖与统筹兼顾原则，全省陕北(延安、榆林市)，关中(西安、咸阳、渭南、铜川、宝鸡市)和陕南(安康、汉中、商洛市)3 个地区共 10 个地级市按照经纬度交叉点法结合当地地理情况选择 20 个县(区)设置 105 个常规监测点。结合本省各县(区)蔬菜的种植、分布和消费情况及人口数量等因素综合选择各地区消费量大、风险较高的蔬菜品种进行样品分配并确定各监测点的采样数量。对监测点内采样环节所涉及的主要农贸市场、蔬菜批发市场、超市、便利店进行全面调查，根据各类型场所的消费人群、数量、规模、位置等信息，选择能代表大多数人消费的场所作为采样点并制定采样计划。同一监测点，针对同一个采样环节至少确定不同规模、位置分开的两个采样点。根据定点随机采样原则，分上半年(3—4 月)、下半年(8—9 月)在各采样点内随机选择摊位档口、进货批次和陈列位置进行样品采集，为避免样本过度集中而缺乏代表性，同一采样点采集的监测样品不超过 5 份。2022—2024 年，共采集 8 类具有代表性的蔬菜样品 765 份，包括 133 份茄果类，96 份芸薹属类，95 份瓜类，16 份茎类，53 份根茎类和薯芋类，57 份鳞茎类，62 份豆类，253 份叶菜类。

1.2 检测方法和判定依据

根据《国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册》(以下简称手册)要求进行样品的前处理，其中硫丹及其代谢物(*α*-硫丹、*β*-硫丹和硫丹硫酸酯，以下简称硫丹)、毒死蜱、甲胺磷、甲拌磷及其氧类似物(甲拌磷、甲拌磷砜和甲拌磷亚砜，以下简称甲拌磷)、乐果、氧乐果、灭线磷、三唑磷、水胺硫磷、氯氟氰菊酯(所有异构体之和，以下简称氯氟氰菊酯)、乙酰甲胺磷 11 种杀虫剂的测定依据手册中《植物源性样品中农药残留量的测定标准操作程序气相色谱-质谱联用法》的方法执行，采用气相色谱-三重四极杆质谱联用仪进行检测；腐霉利、百菌清、五氯硝基苯、吡唑醚菌酯、丙环唑、多菌灵、噁霜灵、甲霜灵、腈菌唑、嘧霉胺、三唑酮、苯醚甲环唑、戊唑醇、烯酰吗啉 14 种杀菌剂的测定依据手册中《植物源性样品中农药残留量的测定标准操作程序液相色谱-质谱联用法》的方法执行，采用液相色谱-三重四极杆串联质谱仪进行检测[12]。

参照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)关于“食品中低水平污染物可信评价”的推荐性程序[13]，本研究低于检出限(limit of detection, LOD)的残留量按 LOD 计算。根据 GB 2763—2026《食品中农药最大残留限量》及《国家禁用和限用农药名录》[14]对各农药残留测定结果进行判定。对未规定限值的检测项目，检出值不做是否超标判定。1 项农药残留中有 1 份样品该项农药残留检出/超过最大残留限量值，判定为该项农药残留项次检出/项次超标。1 份样品中有任 1 项农药残留检出/超过最大残留限量值，判定为该样品农药残留样品检出/超标。项次/样品检出/超标率=项次/样品检出/超标份数/样品份数。本研究中所有统计某项农药残留的检出率/超标率均指项次检出率/超标率，其余均为样品的检出率/超标率。

1.3 质量控制

所有采集批次的样品及时进行样品处理及检测。质量控制方法包括：平行双样测定(相对标准偏差控制在 10%以内)，加标回收实验(回收率控制在 70%~130%之间)，标准样品测试($|Z|\leqslant 2$)，留样复测(绝对值差值小于平均值 20%)等。

1.4 风险评估

1.4.1 膳食摄入风险水平评估

自 WHO 提出膳食暴露评估的概念以来，作为全球农药残留风险评估的权威机构，农药残留联合专家委员会(Joint Meeting on Pesticide Residues, JMPR)明确了 DIRA 法的关键流程，并推动其在国际范围内广泛应用[15]。同时，该方法也是我国农药残留膳食摄入风险评估的主流方法，其核心逻辑在于量化急性或慢性暴露量与安全阈值的相对关系[16]。

以农药每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)为慢性暴露评估的健康指导值，各类农药的慢性膳食摄入风险水平采用每日允许摄入量百分比(percentage of acceptable daily intake, %ADI)表示，计算公式见(1)[17]。%ADI 值越小，慢性膳食摄入风险越小，当%ADI≤100%时，表示慢性膳食风险可以接受，当%ADI>100%时，表示慢性膳食风险不可接受。

$$\%\mathrm{ADI}=\frac{\left(\frac{R_i\times F_i}{\mathrm{BW}}\right)}{\mathrm{ADI}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：R_i 为居民日均蔬菜消费量，根据国家统计局最新公布的陕西省城镇居民人均蔬菜年消费量 108.9 kg[18]折算取值为 0.298 kg/d；F_i 为本次监测数据的残留量平均值，mg/kg；BW 为体重(body weight)，按人均质量 60 kg 取值；ADI 根据 GB 2763—2026《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》取值，mg/kg BW。

以急性参考剂量(acute reference dose, ARfD)为急性暴露评估的健康指导值，各类农药的急性膳食摄入风险水平采用急性参考剂量百分比(percentage of acute reference dose, %ARfD)表示，计算公式见(2)[17]。%ARfD 的值越小，急性膳食摄入风险越小，当%ARfD≤100%时，表示急性膳食风险可以接受，当%ARfD>100%时，表示急性膳食风

险不可接受。

$$\%\mathrm{ARfD}=\frac{\left(\frac{\mathrm{LP}\times\mathrm{HR}}{\mathrm{BW}}\right)}{\mathrm{ARfD}}\times100\% \quad (2)$$

式中: LP 为蔬菜的高端消费量(large portion), 参考《中国居民膳食指南》推荐的蔬菜最高推荐值取值为 0.50 kg/d[19]; HR 为最高残留量(highest residue), 取值检测数据的第 99.9 百分位数($P_{99.9}$), mg/kg; BW 同式(1); ARfD 根据 JMPR 最新的《JMPR 评估农药 ADI 和 ARfD 清单》取值[20], mg/kg BW。

1.4.2　食品安全指数评估

由国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)和 WHO 共同提出的 IFS 法, 通过污染物实际暴露量与安全摄入量之间的数量关系量化某种污染物对消费者的健康危害程度[21]。由于 IFS 具有加和性, 可用总体安全指数(mean index of food safety, $\overline{\mathrm{IFS}}$)来评估某类食品整体的风险状态, 计算公式分别见(3)和(4)[22]。IFS 或 $\overline{\mathrm{IFS}}$ 越小, 表明单项或总体农药残留的安全风险越小, 当 IFS 或 $\overline{\mathrm{IFS}}\geqslant1$ 时, 表明单项或总体农药残留对人体的健康造成了危害, 安全风险超过了可接受水平, 需要进行风险管理; 反之则表示安全风险可以接受, 造成的危害不明显。

$$\mathrm{IFS}=\frac{R_i\times F_i\times E_i\times P_i\times f}{\mathrm{SI}\times\mathrm{BW}} \quad (3)$$

$$\overline{\mathrm{IFS}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{IFS}}{n} \quad (4)$$

式中: R_i, F_i, BW 同式(1); E_i 为蔬菜的可食用部分因子, P_i 为蔬菜的加工处理因子, 取值为 1; f 为农药安全摄入量的校正因子, 均取值为 1; SI 为农药的安全摄入值(safe intake), 取值为 ADI, mg/kg BW; n 为评价农药数量。

1.5　数据处理

所有监测数据采用 Microsoft Office Excel 2021 进行整理汇总和统计指标描述。其中, 农药残留量的分布特征采用百分位数法描述, P_{50} 表示第 50 百分位数(中位数), 反映残留量分布的集中趋势, P_{90}、P_{95}、$P_{97.5}$、P_{99} 及 $P_{99.9}$ 分别表示第 90、95、97.5、99 及 99.9 百分位数, 用于描述残留量分布的高端离散程度和极端值水平。风险评估中涉及的汇总及公式计算以及表格绘制均在 Excel 2021 中完成。

2　结果与分析

2.1　不同种类农药残留的检出及超标情况

2022—2024 年, 监测全省 765 份市售蔬菜样品中农药残留共 25 项, 完成检测项目 22710 项次, 项次检出率为 4.92%, 项次超标率为 0.079%, 除甲胺磷和乙酰甲胺磷无检出, 其余 23 种农药均有不同程度的检出(表 1)。杀虫剂中毒死蜱(1.57%)和氯氟氰菊酯(4.44%)的检出率较高, 其余 9 种杀虫剂的检出率均小于 1%。检出率大于 5%的杀菌剂有嘧霉胺(5.49%)<甲霜灵(7.22%), 大于 10%的杀菌剂有丙环唑(10.20%)<多菌灵(10.63%)<戊唑醇(12.81%)<腐霉利(14.25%)<吡唑醚菌酯(18.95%)<苯醚甲环唑(21.26%)<烯酰吗啉(25.49%), 杀菌剂的检出率普遍高于杀虫剂。上述检出率较高项目的均值在 0.006~0.115 mg/kg, 残留分布的中位数在 0.001~0.010 mg/kg, P_{99} 在 0.018~1.487 mg/kg 之间。烯酰吗啉和丙环唑的 $P_{99.9}$ 分别高达 12.640 和 15.437 mg/kg, 表明存在极端高残留的情况, 仍需结合具体蔬菜种类中规定的限量值进行是否超标的判定。

25 种农药中有 7 种农药存在超标情况, 超标率均未超过 1%, 超标项目分别为乐果(0.13%)=百菌清(0.13%)<氯氟氰菊酯(0.26%)=腈菌唑(0.26%)<氧乐果(0.39%)<甲拌磷(0.52%)<毒死蜱(0.65%)。甲胺磷、甲拌磷、硫丹、水胺硫磷、灭线磷已被全面禁止销售和使用, 乙酰甲胺磷、乐果、氧乐果、毒死蜱和三唑磷也被限制在蔬菜上使用[14]。尽管上述农药已被严格管控, 但本次监测的蔬菜样品中除甲胺磷和乙酰甲胺磷外均有残留检出。禁限用农药检出共计 25 项次, 涉及样品 24 份, 毒死蜱的检出率和超标率均为最高, 乐果、氧乐果和甲拌磷呈现“检出即超标”的特征。

2.2　不同种类蔬菜农药残留检出及超标情况

本次监测的 8 个种类市售蔬菜均有不同程度的农药残留检出, 765 份样品农药残留的总体检出率为 58.17%, 超标率为 2.35%, 具体结果见表 2 及表 3。检出率由高到低的排序为: 叶菜类>豆类>茄果类>瓜类>鳞茎类>芸薹属类>根茎类和薯芋类>茎类, 超标率的排序为: 叶菜类>鳞茎类>茄果类。

叶菜类的残留问题最为突出, 其检出率高达 74.31%, 超标率为 4.74%, 均值为 0.042 mg/kg, $P_{99.9}$ 高达 4.219 mg/kg, 达到均值的 100 倍, 极端值主要来自芹菜、菠菜、香菜、油麦菜等品种的腐霉利、丙环唑、烯酰吗啉、百菌清等农药的高水平残留。禁用农药甲拌磷的超标数量最多, 超限值 13~20 倍。残留量最高的为 1 份芹菜中百菌清检出 40.800 mg/kg, 超限值 8 倍。除高倍数超标的样品, 叶菜类还存在未超限值或未规定限值但有高残留检出的情况。

鳞茎类蔬菜的总体检出率达 49.12%, 超标率达 3.51%, 超标项目均为毒死蜱。腐霉利有较多检出, 在鳞茎类的检出率接近 22%, 且部分样品检出极端残留值。例如关中地区 2022 年和 2024 年各有一份韭菜样品检出腐霉利为 2.510 mg/kg 和 2.160 mg/kg, 虽然未超出 2026 版新国标规定限值(5.0 mg/kg), 但仍超出鳞茎类蔬菜整体的极端残留水平($P_{99.9}$ 为 1.990 mg/kg)。

茄果类蔬菜整体检出率为 61.65%, 超标率 3.01%, 虽低于叶菜类, 但其残留分布呈现两极分化: 均值较低, 为 0.010 mg/kg, 极端值 $P_{99.9}$ 达 0.390 mg/kg, 接近均值的 40 倍, 且存在禁用限用农药检出(三唑磷)和超标(毒死蜱、氧乐果、甲拌磷)的现象, 表明少数样品存在高风险残留。典型案例为 2 份番茄中检出氧乐果超出国标限值 54 倍和 46 倍。

表 1 不同种类农药残留的检出及超标情况

Table 1 Detection and over-limit situation of different kinds of pesticide residues

检测项目	样品份数	均值/(mg/kg)	P_{50}/(mg/kg)	P_{90}/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)	$P_{97.5}$/(mg/kg)	P_{99}/(mg/kg)	$P_{99.9}$/(mg/kg)	检出份数	检出率/%	超标份数	超标率/%
硫丹*	765	0.011	0.010	0.010	0.030	0.030	0.030	0.032	1	0.13	0	0
毒死蜱*	765	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.018	0.095	12	1.57	5	0.65
甲胺磷*	765	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0	0
甲拌磷*	765	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.174	4	0.52	4	0.52
乐果*	765	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.024	1	0.13	1	0.13
氧乐果*	765	0.014	0.010	0.015	0.018	0.020	0.020	0.959	3	0.39	3	0.39
灭线磷*	765	0.010	0.010	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	1	0.13	0	0
三唑磷*	765	0.012	0.010	0.030	0.030	0.030	0.030	0.032	2	0.26	0	0
水胺硫磷*	765	0.012	0.010	0.024	0.030	0.030	0.030	0.030	1	0.13	0	0
氯氟氰菊酯*	765	0.018	0.010	0.010	0.015	0.049	0.231	1.191	34	4.44	2	0.26
乙酰甲胺磷*	765	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0	0
腐霉利	765	0.051	0.010	0.042	0.119	0.239	0.778	4.866	109	14.25	0	0
百菌清	765	0.167	0.006	0.010	0.120	0.915	2.478	22.999	25	3.27	1	0.13
五氯硝基苯	765	0.008	0.006	0.010	0.010	0.010	0.010	0.035	8	1.05	0	0
吡唑醚菌酯	765	0.022	0.001	0.028	0.086	0.206	0.317	1.288	145	18.95	0	0
丙环唑	765	0.079	0.001	0.010	0.079	0.345	0.705	15.437	78	10.20	0	0
多菌灵	762	0.024	0.001	0.010	0.032	0.071	0.459	1.905	81	10.63	0	0
噁霜灵	762	0.008	0.001	0.010	0.010	0.010	0.010	0.630	15	1.97	0	0
甲霜灵	762	0.006	0.001	0.010	0.010	0.017	0.037	0.237	55	7.22	0	0
腈菌唑	765	0.005	0.001	0.010	0.010	0.010	0.010	0.186	12	1.57	2	0.26
嘧霉胺	765	0.010	0.001	0.010	0.010	0.020	0.123	0.767	42	5.49	0	0
三唑酮[a]	762	0.005	0.001	0.010	0.010	0.010	0.010	0.164	6	0.79	0	0
苯醚甲环唑	762	0.033	0.001	0.050	0.150	0.380	0.763	0.947	162	21.26	0	0
戊唑醇	765	0.022	0.001	0.010	0.055	0.144	0.365	1.976	98	12.81	0	0
烯酰吗啉	765	0.115	0.002	0.071	0.472	0.961	1.487	12.640	195	25.49	0	0

注: *表示该检测项目为杀虫剂, 无此标注的检测项目均为杀菌剂, ND 表示未检出。a 表示表中三唑酮的统计值为母体检测结果, 不包含代谢物三唑醇, 不代表实际总残留水平。

表 2 不同种类蔬菜农药残留检出及超标情况

Table 2 Detection and over-limit situation of pesticide residues in different kinds of vegetables

蔬菜种类	样品份数	均值/(mg/kg)	P_{50}/(mg/kg)	P_{90}/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)	$P_{97.5}$/(mg/kg)	P_{99}/(mg/kg)	$P_{99.9}$/(mg/kg)	检出份数	检出率/%	超标份数	超标率/%
茎类	16	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.027	0.149	4	25.00	0	0
根茎类和薯芋类	53	0.008	0.010	0.010	0.010	0.015	0.030	0.044	16	30.19	0	0
芸薹属类	96	0.010	0.010	0.010	0.015	0.024	0.030	0.886	33	34.38	0	0
鳞茎类	57	0.014	0.010	0.010	0.015	0.030	0.069	1.990	28	49.12	2	3.51
瓜类	95	0.009	0.010	0.010	0.015	0.030	0.050	0.226	51	53.68	0	0
茄果类	133	0.010	0.010	0.010	0.020	0.030	0.071	0.390	82	61.65	4	3.01
豆类	62	0.013	0.010	0.010	0.020	0.041	0.129	0.648	43	69.35	0	0
叶菜类	253	0.042	0.010	0.010	0.030	0.175	0.608	4.219	188	74.31	12	4.74

豆类蔬菜的检出率高达 69.35%, 未检出任何超标样品, 其均值(0.013 mg/kg)较低, 虽然极端值较高($P_{99.9}$ 为 0.648 mg/kg), 但主要检出杀菌剂及低毒性的菊酯类杀虫剂, 有机磷类高毒性杀虫剂均无检出, 唯一超出极端值的

样品为 1 份豇豆中的多菌灵(1.670 mg/kg)。

剩余 4 类蔬菜的农药残留检出状况较好，瓜类(53.68%)>芸薹属类(34.38%)>根茎类和薯芋类(30.19%)>茎类(25.00%), 均未检出超标样品。黄瓜、苦瓜为代表的瓜类, 农药残留以中低毒性的杀菌剂(如甲霜灵、苯醚甲环唑等)为主, 检出率虽较高, 但残留值普遍低于 0.050 mg/kg (P_{99}), 远低于国标限值。芸薹属类的残留量检出均值处于 0.010 mg/kg, 极端值来自于菜薹中烯酰吗啉的检出。根茎类和薯芋类以及茎类蔬菜的检出率最低且未出现超标样品, 极端值主要来自于山药和茎用莴苣中多菌灵和戊唑醇的检出。

2.3　不同地区农药残留检出和超标情况

不同地区的蔬菜中农药残留检出和超标的分布情况见表 4。陕南地区农药残留总体检出率最高, 为 59.31%, 检出平均值最高, 为 0.026 mg/kg; 超标率为 1.96%, 超标样品数量较少, 但有高倍超标情况。关中地区 5 个地级市农药残留检出率为 58.44%, 检出平均值较低, 极端值较高, 超标率为 3.18%, 是本次监测中农药残留超标相对集中的区域, 占全省超标案例的 72.22%, 且连续 3 年检出禁用限用的高危农药, 尤其是氧乐果残留量的超标情况严重, 达限值数十倍。高危农药污染呈现明显聚集性, 毒死蜱在关中地区的叶菜类、茄果类和鳞茎类蔬菜中均出现超标情况(表 3)。陕北地区 2 个地级市农药残留检出情况较好, 检出率为 55.92%, 检出极端值较低, 超标率为 0.66%, 仅 1 份样品超标。

2.4　农药混用情况

各类蔬菜均出现不同程度的农药混用情况，普遍为混用 2 种农药(表 5)。叶菜类、茄果类、豆类蔬菜的混用现象较为突出, 混用样品占总样品量的 54.55%、41.35%、46.77%, 混用农药种类最多达 9 种, 极端多药混用(≥5 种)的样品主要为香菜、芹菜、番茄、豇豆等。相比之下, 瓜类, 鳞茎类, 芸薹属类蔬菜的农药混用程度不高, 农药混用样品占比为 32.63%、21.05%、18.75%, 最多混用农药 5~6 种, 极端混用样品主要为黄瓜、韭菜、菜薹等。根茎类和薯芋类, 茎类的农药使用频次较低, 混用程度低, 最多同时检出 2 种农药残留, 占比分别为 7.55%和 18.75%。

2.5　农药残留膳食摄入风险

对蔬菜中检出的农药残留进行膳食摄入风险评估(表 6), 水胺硫磷、五氯硝基苯、多菌灵、噁霜灵和嘧霉胺因不必要制定或未制定 ARfD 数据不予评价。灭线磷、甲霜灵、腈菌唑、毒死蜱的%ARfD 小于 1%; 乐果、硫丹、吡唑醚

表 3　不同种类蔬菜农药残留具体超标情况

Table 3　Specific exceedances situations of pesticide residues in different kinds of vegetables

采样地区	蔬菜种类	蔬菜名称	采样年份	超标农药	检测值/(mg/kg)	最大残留限量值/(mg/kg)
关中	茄果类	辣椒	2024	毒死蜱	0.182	0.02
关中	茄果类	番茄	2022	甲拌磷	0.162	0.01
关中	茄果类	番茄	2023	氧乐果	1.070	0.02
关中	茄果类	番茄	2023	氧乐果	0.925	0.02
关中	鳞茎类	韭菜	2024	毒死蜱	0.028	0.02
关中	鳞茎类	韭菜	2024	毒死蜱	0.068	0.02
陕南	叶菜类	芹菜	2023	百菌清	40.800	5.00
关中	叶菜类	叶用莴苣	2022	甲拌磷	0.175	0.01
关中	叶菜类	香菜	2022	腈菌唑	0.104	0.05
关中	叶菜类	芹菜	2023	氯氟氰菊酯	0.574	0.50
关中	叶菜类	油麦菜	2023	氧乐果	0.790	0.02
陕南	叶菜类	菠菜	2024	毒死蜱	0.027	0.02
陕南	叶菜类	香菜	2022	甲拌磷	0.204	0.01
陕南	叶菜类	芹菜	2023	氯氟氰菊酯	0.830	0.50
关中	叶菜类	芹菜	2022	甲拌磷	0.128	0.01
关中	叶菜类	油麦菜	2024	毒死蜱	0.028	0.02
关中	叶菜类	香菜	2022	乐果	0.071	0.01
陕北	叶菜类	芹菜	2022	腈菌唑	0.451	0.05

表 4　不同地区蔬菜农药残留检出及超标情况

Table 4　Detection levels and exceeding rates of pesticide residues in vegetables from different regions

地区	样品份数	均值/(mg/kg)	P_{50}/(mg/kg)	P_{90}/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)	$P_{97.5}$/(mg/kg)	P_{99}/(mg/kg)	$P_{99.9}$/(mg/kg)	检出份数	检出率/%	超标份数	超标率/%
陕南	204	0.026	0.010	0.010	0.018	0.030	0.193	1.481	121	59.31	4	1.96
关中	409	0.019	0.009	0.010	0.015	0.040	0.230	2.188	239	58.44	13	3.18
陕北	152	0.024	0.010	0.015	0.030	0.030	0.160	1.386	85	55.92	1	0.66

表 5 不同种类蔬菜的农药混用情况[*n* (%)]

Table 5 Simultaneous detection of pesticide residues in different kinds of vegetables [*n* (%)]

蔬菜种类	未检出	同时检出农药种类数								
		1 种	2 种	3 种	4 种	5 种	6 种	7 种	8 种	9 种
茎类	12 (75.00)	1 (6.25)	3 (18.75)	/	/	/	/	/	/	/
根茎类和薯芋类	37 (69.81)	12 (22.64)	4 (7.55)	/	/	/	/	/	/	/
芸薹属类	63 (65.63)	15 (15.63)	12 (12.50)	3 (3.13)	2 (2.08)	/	1 (1.04)	/	/	/
鳞茎类	29 (50.88)	16 (28.07)	5 (8.77)	4 (7.02)	1 (1.75)	0	2 (3.51)	/	/	/
瓜类	44 (46.32)	20 (21.05)	15 (15.79)	12 (12.63)	3 (3.16)	1 (1.05)	/	/	/	/
茄果类	51 (38.35)	27 (20.30)	21 (15.79)	19 (14.29)	7 (5.26)	3 (2.26)	3 (2.26)	1 (0.75)	1 (0.75)	/
豆类	19 (30.65)	14 (22.58)	12 (19.35)	5 (8.06)	8 (12.90)	3 (4.84)	1 (1.61)	/	/	/
叶菜类	65 (25.69)	50 (19.76)	41 (16.21)	40 (15.81)	22 (8.70)	23 (9.09)	6 (2.37)	4 (1.58)	1 (0.40)	1 (0.40)

注: *n* 为样品份数; %为占该类蔬菜样品总数的比例; /表示无对应样品。

表 6 蔬菜中各类农药残留膳食摄入风险评估

Table 6 Risk assessment of dietary intake of pesticide residues in vegetables

农药残留	慢性膳食摄入风险			急性膳食摄入风险			食品安全指数	
	F_i /(mg/kg)	ADI /(mg/kg BW)	%ADI	HR/ (mg/kg)	ARfD/ (mg/kg BW)	%ARfD	IFS	$\overline{\text{IFS}}$
硫丹	0.011	0.0060	0.89	0.032	0.020	1.33	0.0089	
毒死蜱	0.009	0.0100	0.46	0.095	0.100	0.79	0.0046	
甲胺磷	/	0.0040	/	/	0.010	/	/	
甲拌磷	0.010	0.0007	6.90	0.174	0.003	48.44	0.0690	
乐果	0.009	0.0020	2.17	0.024	0.020	1.02	0.0217	
氧乐果	0.014	0.0003	23.12	0.959	0.002	399.67	0.2312	
灭线磷	0.010	0.0004	12.11	0.015	0.050	0.25	0.1211	
三唑磷	0.012	0.0010	6.11	0.032	0.001	26.87	0.0611	
水胺硫磷	0.012	0.0030	1.91	0.030	/	/	0.0191	
氯氟氰菊酯	0.017	0.0200	0.43	1.191	0.020	49.63	0.0043	
乙酰甲胺磷	/	0.0300	/	/	0.100	/	/	
腐霉利	0.051	0.1000	0.25	4.866	0.100	40.55	0.0025	
百菌清	0.167	0.0200	4.14	22.999	0.600	31.94	0.0414	0.0274
五氯硝基苯	0.008	0.0100	0.37	0.035	/	/	0.0037	
吡唑醚菌酯	0.022	0.0300	0.37	1.288	0.700	1.53	0.0037	
丙环唑	0.079	0.0700	0.56	15.437	0.300	42.88	0.0056	
多菌灵	0.024	0.0300	0.40	1.905	/	/	0.0040	
噁霜灵	0.008	0.0100	0.38	0.630	/	/	0.0038	
甲霜灵	0.006	0.0800	0.04	0.237	0.500	0.40	0.0004	
腈菌唑	0.005	0.0300	0.08	0.186	0.300	0.52	0.0008	
嘧霉胺	0.011	0.2000	0.03	0.767	/	/	0.0003	
三唑酮	0.005	0.0300	0.08	0.164	0.080	1.70	0.0008	
苯醚甲环唑	0.033	0.0100	1.62	0.947	0.300	2.63	0.0162	
戊唑醇	0.022	0.0300	0.37	1.976	0.300	5.49	0.0037	
烯酰吗啉	0.115	0.2000	0.29	12.640	0.600	17.56	0.0029	

注: /表示缺少相关数据。

菌酯、三唑酮、苯醚甲环唑、戊唑醇的%ARfD 在 1%~10%之间; 烯酰吗啉、三唑磷、百菌清、腐霉利、丙环唑、甲拌磷、氯氟氰菊酯的%ARfD 在 10%~50%之间。上述农药残留的%ARfD 均小于 100%, 即急性膳食摄入风险可以接受。氧乐果的%ARfD 为 399.67%, 有不可接受的急性摄入风险。

检出的各项农药残留的%ADI 均小于 100%, 表明监测蔬菜的农药残留慢性膳食摄入风险很低, 是可以接受的。其中%ADI 小于 1%的农药残留占比为 65.22%, 在1~10%之间的占比为 26.09%。灭线磷(12.11%)和氧乐果(23.12%)的%ADI 较高, 但仍然远小于 100%, 因此可认为二者长期残留对人体健康的慢性影响仍在可接受范围内。

2.6　食品安全指数评价

使用 IFS 模型评价监测蔬菜的整体安全性(表 6), 各单项农药残留的 IFS 范围在 0.0003~0.2312, 整体样品的 $\overline{\text{IFS}}$ 为 0.0274, 远低于安全阈值 1, 表明蔬菜中各农药残留的安全性处于较低风险水平且整体农药残留的安全风险在可接受范围内。灭线磷和氧乐果的 IFS 大于 0.1, 结合膳食摄入风险评估数据, 即单项农药风险越高, 对整体风险贡献越显著。

3　结论与讨论

3.1　残留特征与成因分析

本研究基于 2022—2024 年陕西省市售蔬菜中农药残留的监测数据, 通过对单项农药残留的污染特征、蔬菜种类差异、地区差异、农药混用情况及暴露风险等方面分析评价, 较系统地反映了陕西省市售蔬菜中的农药残留污染特征。结果表明, 本次监测样品中农药残留污染状况相对较好, 表现出“检出率高(58.17%)、超标率低(2.35%)”的复合特征, 且多数检出为低水平残留分布, 杀菌剂的检出频次比杀虫剂频繁。需注意的是仍存在禁用限用农药的检出与超标, 主要为甲拌磷、乐果、氧乐果、毒死蜱等高毒有机磷类杀虫剂, 超标率虽未超过 1%, 但乐果、氧乐果和甲拌磷表现出“检出即超标”的特征, 且常伴随高倍数超标。这类农药神经毒性极强, 基于毒理数据和危害评价制定的最大残留限量值远低于低毒农药。低限值的本质是对高风险农药的严格管控, 最大限度降低健康风险。同时, 这类农药的内吸性强, 吸收渗透后易在可食部积累, 且滞留时间长, 降解速度慢, 安全间隔期长, 即使表面喷施未超量, 可食部残留仍可能因积累远超限值, 故易呈现“检出即超标”的直观现象。其背后可能的诱因是生产端违规使用与监管欠缺等因素共同作用下的残留风险放大: 农户为追求高防效违规使用禁用农药、超范围超量使用限用农药或未过安全间隔期便急于采收; 基层执法力量薄弱, 对小农户、流动商贩的监管覆盖不足, 违规行为难被发现和处罚。

严清娜等[23]的研究发现, 重庆市售蔬菜样品中农药残留总检出率为 60.70%, 超标率为 2.31%, 叶菜类的检出率最高 (84.29%), 检出两种及以上农药残留的占比为 42.20%, 禁用农药甲拌磷的超标率为 0.58%。杨琪等[24]调查了贵州省市售蔬菜的农药残留特征, 总检出率为 60.67%, 总超标率为 3.33%, 并发现禁用农药克百威、甲拌磷、毒死蜱、涕灭威和氧乐果超标的现象, 且毒死蜱的超标率最高, 达 1.17%。赖宣丞等[25]的研究发现海南省市售蔬菜中农药残留的检出率达 73.8%, 豆类和叶菜类最高同时检出6~9 种农药。孟繁磊等[26]对长春市售蔬菜农药残留污染特征的研究发现总检出率为 48.01%, 总超标率为 4.55%, 检出频率前三位的农药残留为腐霉利、啶虫脒、多菌灵, 超标样品主要集中在叶菜、茄果和豆类蔬菜中。胡宁恩等[27]对温州市售果蔬中农药残留的情况调查表明, 蔬菜总体农药残留检出率为 69.83%, 超标率为 5.52%, 豆类的检出率高达 90.00%, 杀菌剂的检出率高于其他农药残留种类。与上述其他省份的相关调查相比, 陕西省市售蔬菜中农药残留污染情况处于中等水平, 与重庆市相关研究结果较为接近。各地区间不同种类蔬菜的污染分布特征相似, 叶菜和豆类为检出率较高的品种, 且多存在多药混用情况, 各地区均发现禁限用农药的检出和超标现象, 主要为甲拌磷、毒死蜱和乐果。

本次监测结果显示, 农药残留污染呈现一定的种类与地域特异性, 这是由蔬菜的生长特性、农药使用情况、田间管理、地域分布等因素的差异共同决定的。例如: 叶菜类蔬菜的叶片表面积大、吸附性强, 又因其生长周期短, 推测是检出率和极端残留值均居首位的重要原因。此外, 对于病虫害频发的叶菜品种(香菜、菠菜、芹菜、油麦菜等), 部分农户存在“预防性用药”习惯, 且倾向于多农药联用提高防治效率, 如杀菌剂、杀虫剂和叶面肥联用, 这在一定程度上易加剧农药残留的富集, 增加混用频率与种类。上述推论提示叶菜类蔬菜是监管的重点, 建议针对性的扩大抽样地区及数量, 监测评估风险。鳞茎类蔬菜中腐霉利的极端残留情况较为突出, 腐霉利作为一种内吸性杀菌剂被广泛应用于灰霉病的防治, 在土壤中消解率达到 90%以上需 42 d, 安全间隔期较长[28]。另鳞茎类蔬菜的维管束系统对其有主动吸收能力, 易通过灌溉水迁移富集[29], 由此产生的潜在健康风险仍需要持续关注, 尤其是长期低剂量摄入对甲状腺功能和生殖系统的慢性影响[30]。茄果类蔬菜中的农药残留检出情况总体可控但仍存在禁用限用农药的检出和超标隐患。这些情况可能与本省特定的种植模式相关, 关中平原规模化的温室种植区因普遍存在连作障碍, 在此类种植条件下, 农户倾向于超剂量、多种类使用化学农药, 且偏好速效型杀虫剂, 这或是毒死蜱、氧乐果等高风险农药持续检出的可能原因[31-32]。豆类蔬菜表现出独特的“高检出、零超标”特征, 整体的残留污染状况优于我国南方地区[4]。本次监测中, 豆类蔬菜农药残留的检出主要集中在豇豆中的杀菌剂, 推测分析与豆科植物的共生固氮作用可以有效减少一部分化学氮肥和杀虫剂等农药的施用有关[33]。其余几类蔬菜的农药残留检出情况较好, 无超标样品, 联合用药程度低。推测原因有: 这些蔬菜的生理结构具有天然屏障的安全性优势, 生长周期长, 表皮蜡质层厚, 能够有效阻隔农药向内部迁移; 可食部与农药喷洒接触少

且消散比例高，混合残留比例小等[34]。

地域分布上，陕南地区的检出极端值高，超标样品数量少，或与气候和种植模式的复合因素相关。该地区蔬菜露地种植比例高，湿润气候易加剧病虫害发生频率，进而影响农户的施药行为；同时，高温环境下的加速降解效应叠加充足降水量的冲刷作用，可能共同降低蔬菜表面农药残留的附着量[35]。关中地区的超标率高，可能与该地区设施蔬菜种植普遍，复种指数高、施药频次密集的种植模式密切相关[36-37]。叶菜类因采收间隔期不足，可能进一步加剧农药残留的累积风险。同时，监管覆盖的相对不足也可能成为禁限用农药违规使用案例中贡献率最高的原因之一。

本次监测显示，陕西省市售蔬菜样品中还普遍存在多种农药同时检出的情况，除茎类、根茎类和薯芋类，其他品种均存在同时检出 3 种及以上农药残留的情况，叶菜类、茄果类和豆类易受病虫复合侵染，多药联用的情况最为明显。各类蔬菜农药混用差异除了与作物特性、病虫害压力相关，还与农户的种植管理方式密切关联，例如：部分种植者为提高防效，将触杀性杀虫剂(如氯氟氰菊酯)与内吸性杀菌剂(如苯醚甲环唑)混合使用，由此可能引发多药残留风险。多种农药混用可能增加残留的复杂性和毒性的协同效应，在一定程度上增加人体健康风险，造成低含量水平下高风险的情形。

3.2 膳食暴露风险分析

农药残留限值并不等同于健康安全阈值，参考剂量才是健康风险的安全限量，是判断残留暴露量是否可能对人体健康产生危害的核心依据。本次风险评估中，5 种农药残留未进行急性膳食摄入风险评估。其中，五氯硝基苯、嘧霉胺因急性毒性较低，经 JMPR 评估认为无需制定 ARfD；噁霜灵、多菌灵和水胺硫磷因缺乏确定的急性毒理学数据而暂未设定 ARfD。然而，上述农药的%ADI 均远小于 100%，其慢性膳食摄入风险均处于可接受水平。需要注意的是，水胺硫磷属于高毒限用的有机磷类杀虫剂，本次监测中虽仅有 1 份检出且未超标，风险可控，但其违规使用问题仍需持续关注。多菌灵作为苯并咪唑类杀菌剂，在肝脏中的累积量大、代谢慢、易发生肝脏毒性，以往的研究结果建议多菌灵的安全间隔期为 35 d[38]。本次监测中虽无超标样品，但检出率较高(10.63%)，后续需重点关注施药后的安全间隔期。甲拌磷、三唑磷的%ARfD 较高，作为高毒有机磷类农药，其残留稳定性强，短期暴露风险突出，与复配农药的叠加效应可能放大风险，需对二者的违规使用进行监管。本次评估中氧乐果的%ARfD 和%ADI 均为所评估项目中最高，尤其是%ARfD 超过阈值近 4 倍，提示存在急性膳食摄入风险。结合不同种类蔬菜中农药残留的检出和超标情况分析，氧乐果具有较高风险特性且在茄果和叶菜类蔬菜中需要优先管控。同为禁限用农药的乐果、硫丹、灭线磷的情况较好，本次监测中检出率较低，膳食摄入风险均可接受，IFS 也低于氧乐果。虽然毒死蜱的超标率最高，但本研究得到的膳食摄入风险可忽略不计，即实际摄入累积量仍远低于引发神经毒性的临界值。

3.3 既往研究比较

与陕西省内既往研究相比，本研究在时间维度上延续了对本省市售蔬菜农药残留污染特征的连续观测。综合 2012—2014 年全省有机磷类农药残留的情况调查[39](样品检出率 9.98%、样品超标率 0.73%)、2012—2018 年关中地区多类农药残留调查[9](样品检出率 14.11%，样品超标率 1.91%)及 2019—2021 年全省范围杀菌剂和杀虫剂的监测和风险评估[40](项次检出率为 0.22%~21.41%、项次超标率为 0.22%~1.28%，膳食摄入风险可接受)的结果来看，尽管各时期样本量、覆盖区域、检测种类、统计方式存在一些差异，但总体均呈现出“高检出、低超标”的污染特征，表明近十余年来陕西省市售蔬菜中农药残留风险特征基本保持稳定。检出率较之前研究虽有所升高，但超标率基本维持在相近水平，这可能与检测方法逐年优化、仪器灵敏度逐步提高有关。毒死蜱、甲拌磷、氧乐果等禁限用农药在每个监测时段内均有不同程度检出，提示违规使用问题具有持续性和顽固性。关中地区在上述既往研究中已被注意到农药残留问题相对突出，本研究进一步量化了该区域的超标案例的贡献程度(占全省 72.22%)，叶菜类与鳞茎类蔬菜仍是超标的主要承载品类，与既往研究中韭菜、芹菜等品种风险较高的发现相互印证。在膳食摄入风险方面，2019—2021 年的全省监测中已得出总体风险可接受的结论，本研究多数指标亦得出相同判断，但氧乐果的急性膳食摄入风险首次超出安全阈值，与既往结论形成差异。这主要与本次监测中氧乐果在茄果类和叶菜类蔬菜中检出较高的残留值有关，提示对该类高毒禁限用农药的违规使用问题需持续加强监管。总体来说，本次监测的蔬菜样品中农药残留整体的安全风险可控，但禁限用农药的较高风险仍需警惕。

3.4 监管建议

本研究分析了陕西省市售蔬菜中农药残留的重点关注品类、主要风险农药及残留相对集中区域。基于此，为提升监管效能，建议采取以下措施：(1)在政策层面，强化高毒剧毒农药的动态监测与购买溯源制度，压缩违规使用空间；(2)在技术层面，推广可替代的生物防治技术和精准施药技术，优化种植模式，降低超量用药与农药联用频次，控制残留累加效应；(3)在监测体系层面，依托地理信息系统建立风险分区预警机制，完善监测体系，加强叶菜、鳞茎、茄果等重点关注种类蔬菜中的高风险农药的专项筛查力度，并完善农药代谢物的残留检测方法。本研究结果可为陕西省优化市售蔬菜质量安全监测方案、调整重点监管品类与区域布局、指导居民膳食风险防范提供科学依据，

也能够为同类研究的开展提供数据参考。

3.5　研究局限性

(1)研究数据来自历年本省食品安全风险监测项目, 样本量和监测项目的确定优先覆盖健康危害较大、污染水平较普遍的指标, 未涵盖本省蔬菜中所有可能的消费来源和全部农药种类, 因此存在样本量不够丰富, 检测项目覆盖不全的局限, 不能全面反映农药残留风险特征的变化趋势。例如, 鉴于大多数现代除草剂的作用靶标为植物特有, 对人体的敏感性普遍较低, 毒性相对较弱, 故未覆盖该类农药残留水平的监测。另三唑酮的代谢物三唑醇未纳入监测范围, 导致其残留水平的统计和风险评估仅针对母体。这些因素可能导致总体的暴露风险被低估。(2)采用人均蔬菜总体消费量代替各具体品种的消费量, 以及结合高残留量和高消费量的点评估模型计算暴露水平等因素偏向于对评估结果的不确定性产生高估; (3)蔬菜消费量的取值与本省人群实际消费情况可能存在差异, 忽略了个体差异以及特定人群(儿童、老人、孕妇等)的分类取值, 对评估风险构成一定限制。(4)缺少相同毒性机制农药的联合暴露风险评估, 未考虑农药间协同/拮抗效应, 可能导致理论暴露量与实际暴露水平之间存在偏离。后续研究应进一步扩大样本量与消费来源覆盖面, 拓展农药监测种类并增补相关代谢物检测, 同时完善联合暴露风险评估, 以更全面评价蔬菜农药残留的膳食暴露风险。

参考文献

[1] 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 AIB, YAO Y, CHEN CJ, *et al*. Registration, residue status and safe use of pesticides in vegetables in China [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(22): 8–14.

[2] World Health Organization, Food and agriculture organization. Guidelines for the dietary risk assessment of pesticide residues [R]. Rome: FAO, 2021.

[3] 国家卫生健康委员会. 中国居民膳食农药残留暴露风险评估[R]. 北京: 国家卫生健康委员会, 2023.
State Health Commission of the PRC. Dietary risk assessment of pesticide residues in Chinese residents [R]. Beijing: State Health Commission of the PRC, 2023.

[4] 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]. 农药学学报, 2023, 25(6): 1206–1221.
ZENG J, QIAO XW. A brief analysis of pesticide residues exceeding maximum residue limits in vegetables and fruits in China [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2023, 25(6): 1206–1221.

[5] 梁靖凯, 蒲云霞. 蔬菜与水果中农药残留现状及风险评估工作进展[J]. 公共卫生与预防医学, 2022, 33(3): 123–126.
LIANG JK, PU YX. Current status of pesticide residues in vegetables and fruits and progress in risk assessment [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2022, 33(3): 123–126.

[6] 熊碧, 刘小红, 杨清清, 等. 2022—2023 年湖北省蔬菜中新烟碱类农药残留分析及慢性膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 113–119.
XIONG B, LIU XH, YANG QQ, *et al*. Analysis and chronic dietary exposure assessment of neonicotinoids pesticide residues in vegetables in Hubei Province from 2022 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 113–119.

[7] 孟军, 吴蓉, 冯云, 等. 江苏省蔬菜和食用菌中农药残留的膳食暴露风险评估[J]. 农药科学与管理, 2025, 46(3): 21–31.
MENG J, WU R, FENG Y, *et al*. Pesticide residues and dietary exposure risk assessment in vegetables and edible fungus in Jiangsu Province [J]. Pesticide Science and Administration, 2025, 46(3): 21–31.

[8] 秦国富, 何丰瑞, 张伟, 等. 2018 年陕西省 130 份市售蔬菜中 11 种农药残留调查[J]. 现代预防医学, 2020, 47(4): 604–607.
QIN GF, HE FR, ZHANG W, *et al*. Investigation on 11 fungicides residues in 130 vegetables in Shaanxi Province in 2018 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(4): 604–607.

[9] 田丽, 王玮, 胡佳薇, 等. 2012—2018 年陕西关中地区市售蔬菜中农药残留调查[J]. 卫生研究, 2019, 48(6): 953–956.
TIAN L, WANG W, HU JW, *et al*. Investigation of pesticides residues in vegetables in the central Shaanxi area, 2012—2018 [J]. Journal of Hygiene Research, 2019, 48(6): 953–956.

[10] 何丰瑞, 秦国富, 李永波, 等. 2018 年陕西省市售食用菌中 11 种杀菌剂残留量的检测及风险评估[J]. 职业与健康, 2021, 37(16): 2194–2196, 2201.
HE FR, QIN GF, LI YB, *et al*. Detection and risk assessment of 11 fungicide residues in edible fungi sold in Shaanxi Province in 2018 [J]. Occupation and Health, 2021, 37(16): 2194–2196, 2201.

[11] 郭蓉, 王玮, 田丽, 等. 陕西省主要叶菜中有机磷农药残留的膳食暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2017, 44(11): 1965–1968, 1973.
GUO R, WANG W, TIAN L, *et al*. Risk assessment of dietary exposure to organophosphates pesticides residues in staple leaf vegetables in Shaanxi Province [J]. Modern Preventive Medicine, 2017, 44(11): 1965–1968, 1973.

[12] 国家食品安全风险评估中心. 国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册[Z]. 北京: 国家食品安全风险评估中心, 2022.
National Food Safety Risk Assessment Center. National working manual on risks of food contamination and hazardous factors [Z]. Beijing: National Food Safety Risk Assessment Center, 2022.

[13] World Health Organization. Second workshop on reliable evaluation of low–level contamination of food [R]. Rome: WHO, 1995.

[14] 中华人民共和国农业农村部. 禁限用农药名录[EB/OL]. (2019–11–29) [2025–08–05]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201911/t20191129_6332604.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. List of prohibited and restricted pesticides [EB/OL]. (2019–11–29) [2025–08–05]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201911/t20191129_6332604.htm

[15] World Health Organization. Food consumption and exposure assessment of chemicals [R]. Geneva: World Health Organization, 1997.

[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) [2025-08-05]. https://zzys.moa.gov.cn/tzgg/201510/t20151012_6310610.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. Announcement No. 2308 of the Ministry of Agriculture of the PRC—Guidelines for risk assessment of pesticide residues in food [EB/OL]. (2015-10-08) [2025-08-05]. https://zzys.moa.gov.cn/tzgg/201510/t20151012_6310610.htm

[17] World Health Organization. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food (ECH 240) [M]. Geneva: World Health Organization, 2009.

[18] 国家统计局. 国家数据分省年度数据[DB/OL]. [2025–09–01]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103
National Bureau of Statistics. National data by province annual data [DB/OL]. [2025–09–01]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103

[19] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.

Chinese Nutrition Society. Chinese dietary guidelines [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.

[20] World Health Organization. Inventory of evaluations performed by the joint meeting on pesticide residues [DB/OL]. [2025-09-08]. https://apps.who.int/pesticide–residues–jmpr–database/Home/Range/All

[21] Food and Agriculture Organization, World Health Organization. Application of risk analysis to food standards issues: Report of the Joint FAO/WHO expert consultation [R]. Geneva: FAO/WHO, 1995.

[22] 金征宇, 胥传来, 谢正军. 食品安全导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
JIN ZY, XU CL, XIE ZJ. Introduction to food safety [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[23] 严清娜, 喻瑾, 何佩霖, 等. 2022—2023 年重庆市售蔬菜农药残留状况及膳食摄入风险评估[J]. 卫生研究, 2025, 54(2): 310–315, 325.
YAN QN, YU J, HE PL, *et al*. Pesticide residue status and dietary risk assessment of vegetables in Chongqing from 2022 to 2023 [J]. Journal of Hygiene Research, 2025, 54(2): 310–315, 325.

[24] 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价[J]. 现代预防医学, 2023, 50(18): 3425–3430.
YANG Q, WANG YF, 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.

[25] 赖宣丞, 蔡月, 黎承, 等. 2020—2022 年海南省市售蔬菜农药残留调查及风险评估[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(9): 185–190.
LAI XC, CAI Y, LI C, *et al*. Investigation and risk assessment of pesticide residues in commercially available vegetables in Hainan Province from 2020 to 2022 [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2024, 63(9): 185–190.

[26] 孟繁磊, 谭莉, 范宏, 等. 长春市市售蔬菜农药残留污染特征及膳食风险评估[J]. 食品工业, 2024, 45(2): 312–317.
MENG FL, TAN L, FAN H, *et al*. Characteristics and dietary risk assessment of pesticide residues in vegetables sold in Changchun [J]. The Food Industry, 2024, 45(2): 312–317.

[27] 胡宁恩, 李小东, 李瑞芬, 等. 2020—2023 年浙江省温州市市售果蔬中农药残留的膳食暴露风险评估[J]. 上海预防医学, 2025, 37(1): 72–78.
HU NEN, LI XD, LI RF, *et al*. Risk assessment of dietary exposure to pesticide residues in commercially available fruits and vegetables in Wenzhou, Zhejiang Province from 2020 to 2023 [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2025, 37(1): 72–78.

[28] 马怡童, 吴迪, 张伟清, 等. 基于 2021—2023 年国家市场监管部门抽检数据的食品安全现状分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 317–326.
MA YT, WU D, ZHANG WQ, *et al*. Analysis of food safety status based on sampling inspection data from national market regulation departments from 2021 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 317–326.

[29] 张春荣, 赵月, 李倩, 等. 山东省聊城市市售韭菜、芹菜、洋葱中农药残留分析及暴露风险评估[J]. 预防医学论坛, 2023, 29(1): 28–33.
ZHANG CR, ZHAO Y, LI Q, *et al*. Analysis and exposure risk assessment of pesticide residues in leeks, celery and onions sold in Liaocheng City, Shandong Province [J]. Preventive Medicine Tribune, 2023, 29(1): 28–33.

[30] 陈玉娟, 马耀荣, 曹嘉慧, 等. 2023 年佛山市禅城区果蔬中腐霉利残留及膳食风险评估[J]. 食品安全导刊, 2024(13): 55–59.
CHEN YJ, MA YR, CAO JH, *et al*. Residues of procymidone and dietary risk assessment in fruits and vegetables of Chancheng District Foshan City, 2023 [J]. Journal of Food Safety Guide, 2024(13): 55–59.

[31] 李阳奇, 李艳, 王旭浩, 等. 茄果类蔬菜连作障碍成因与防治措施研究进展[J]. 农业科技通讯, 2025(1): 191–194.
LI YQ, LI Y, WANG XH, *et al*. Research progress on the causes and control measures of continuous cropping obstacles of solanaceous vegetables [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2025(1): 191–194.

[32] 殷振江, 周勇, 张宇, 等. 浅析温室番茄连作障碍防控技术[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(7): 109–111.
YIN ZJ, ZHOU Y, ZHANG Y, *et al*. A brief analysis of control techniques for continuous cropping obstacles in greenhouse tomatoes [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(7): 109–111.

[33] 周雨佳. 豆科绿肥接种根瘤菌在与茶树间作、草莓轮作中对作物生长及田间减肥减药效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
ZHOU YJ. Research on the effects of rhizobia inoculation of leguminous green manure on crop growth and field weight and pesticide reduction in intercropping with tea plants and strawberry rotation [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.

[34] 林芳明, 陈瑜, 李楠, 等. 2024—2025 年西宁市生鲜果蔬农药残留快速检测分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 99–105.
LIN FM, CHEN Y, LI N, *et al*. Rapid detection and analysis of pesticide residues in fresh fruits and vegetables in Xining City in 2024—2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 99–105.

[35] LI H, DANG FL, YU LMF, *et al*. Soil residues and crop accumulation of organophosphorus and pyrethroid pesticides in agricultural fields in Shaanxi, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2024, 24: 2713–2723.

[36] 史文强. 陕西省蔬菜农药应用现状、存在问题及对策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
SHI WQ. Research on current situation, problems and countermeasures of pesticide residues in Shaanxi Province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[37] 胡彬冰, 马凯, 张祖萌, 等. 不同栽培模式下蔬菜农药残留动态变化及其风险评估[J]. 绿洲农业科学与工程, 2026, 11(1): 78–82.
HU BB, MA K, ZHANG ZM, *et al*. Dynamic changes and risk assessment of pesticide residues in vegetables under different cultivation modes [J]. Oasis Agricultural Science and Engineering, 2026, 11(1): 78–82.

[38] 徐信燁, 施春雷. 多菌灵的毒性及风险评估研究进展[J]. 南方农业, 2019, 13(34): 40–44, 47.
XU XY, SHI CL. Research progress on the toxicity and risk assessment of carbendazim [J]. South China Agriculture, 2019, 13(34): 40–44, 47.

[39] 郭蓉, 王彩霞, 程国霞, 等. 2012—2014 年陕西省蔬菜中有机磷农药残留状况分析[J]. 现代预防医学, 2016, 43(20): 3692–3694, 3708.
GUO R, WANG CX, CHENG GX, *et al*. Analysis of organophosphates pesticides residues in vegetable samples in Shaanxi Province of China from 2012 to 2014 [J]. Modern Preventive Medicine, 2016, 43(20): 3692–3694, 3708.

[40] 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, 3950.
ZHAO Y, WANG W, QIAO HOU, *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, 3950.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)