

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241219003

引用格式: 杨兴玉, 扎永, 洛桑卓嘎, 等. 西藏市售蔬菜的农药残留检测及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 266–274.

YANG XY, ZHA Y, LUO SZG, *et al.* Pesticide residue testing and dietary exposure risk assessment of vegetables sold in Tibet [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 266–274. (in Chinese with English abstract).

西藏市售蔬菜的农药残留检测及膳食 暴露风险评估

杨兴玉, 扎永, 洛桑卓嘎, 斯郎拉珍*

(西藏自治区疾病预防控制中心, 传染病预防控制重点实验室, 拉萨 850000)

摘要: **目的** 了解西藏市售蔬菜中农药残留污染水平。**方法** 2024 年 8 月从西藏自治区 5 个市随机采集 50 份蔬菜样品(茄子、芹菜、油麦菜、黄瓜、青花菜), 通过液相色谱-串联质谱法检测 43 种农药的残留情况, 并进行膳食暴露风险评估。**结果** 50 份蔬菜样品中农药检出率为 6.05%, 共检出 14 种农药, 检出率最高为烯酰吗啉; 50 份蔬菜样品中农药超标率为 0.326%, 共检出 3 种超标农药, 超标率最高为阿维菌素。5 个市均有农药残留检出, 除那曲市外均有超标现象。5 种蔬菜所检出农药的慢性摄入风险值分别为: 茄子(0.001~0.023 mg/kg)、芹菜(0.006~3.665 mg/kg)、油麦菜(0.001~0.697 mg/kg)、黄瓜(0.001~0.188 mg/kg)、青花菜(0.002~0.463 mg/kg)。**结论** 西藏市售的 50 份蔬菜中仍能检出不同水平的农药残留, 但其残留水平较低; 5 种蔬菜的慢性摄入风险值均远小于 100%, 居民通过膳食途径摄入蔬菜中农药残留的健康风险在可接受范围内。

关键词: 蔬菜; 农药残留; 膳食摄入; 慢性摄入风险评估

Pesticide residue testing and dietary exposure risk assessment of vegetables sold in Tibet

YANG Xing-Yu, ZHA Yong, LUO Sang-Zhuo-Ga, SI Lang-La-Zhen*

(Key Laboratory of Infectious Disease Prevention and Control of the Center for Disease Control and Prevention of the Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

ABSTRACT: **Objective** To understand the pollution level of pesticide residues in vegetables sold in Tibet. **Methods** In August 2024, 50 vegetable samples (eggplant, celery, lettuce, cucumber, broccoli) were randomly collected from 5 cities in the Tibet Autonomous Region. The 43 kinds of pesticide residues were detected by liquid chromatography-tandem mass spectrometry, and a risk assessment dietary exposure was conducted. **Results** The detection rate of pesticides in 50 vegetable samples was 6.05%, with a total of 14 kinds of pesticides detected, with the highest detection rate being enoxymorpholine. The pesticide exceedance rate in 50 vegetable samples was 0.326%, and a total of 3 kinds of exceedance pesticides were detected, with the highest exceedance rate being

收稿日期: 2024-12-19

第一作者: 杨兴玉(2000—), 女, 检验师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: yangxingyuchn@163.com

*通信作者: 斯郎拉珍(1994—), 女, 检验师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 305994735@qq.com

ivermectin. Pesticide residues had been detected in 5 cities, with the exception of Naqu City, the other 4 cities had exceeded the standard. The chronic ingestion risk values of pesticides detected in 5 kinds of vegetables were: Eggplant (0.001–0.023 mg/kg), celery (0.006–3.665 mg/kg), lettuce (0.001–0.697 mg/kg), cucumber (0.001–0.188 mg/kg) and broccoli (0.002–0.463 mg/kg). **Conclusion** Different levels of pesticide residues can still be detected in 50 vegetables sold in Tibet, but the residue level is low; the chronic intake risk values of 5 kinds of vegetables are all far below 100%, and the health risks of residents ingesting pesticide residues in vegetables through dietary pathways are within an acceptable range.

KEY WORDS: vegetables; pesticide residue; dietary intake; risk assessment of chronic ingestion

0 引言

农药是在农作物种植的各个阶段以及收获后储存期间施用的化学物质^[1], 其在农业上的广泛使用具有双面性。一方面, 农药可以减少田间杂草和害虫的侵害, 从而改善粮食作物的质量和提高粮食作物的产量^[2–3]; 另一方面, 农药具有一定的毒性, 不仅会对生态系统造成持久的污染, 还会对人体健康产生多种负面影响^[4–5], 如皮肤病、胃肠道、呼吸系统、生殖、内分泌、儿童发育、神经系统和致癌作用等^[6–7]。农药可以通过胃肠摄入、口鼻吸入和皮肤接触等多种方式进入人体^[8], 但人们最关心的暴露方式还是摄入受农药污染的食物。有研究表明, 通过饮食接触农药的量被认为比其他接触途径(例如空气和饮用水)高出 5 个数量级^[9–10]。家庭中常用简单清洗和剥落方式来处理这些食物, 但有研究证实仅仅通过这种方式并不能消除农药残留物^[11]。此外, 部分种类的蔬菜食用习惯是新鲜或半加工的形式, 所以与其他植物来源的粮食作物相比, 这些蔬菜中的化学物质含量可能较高^[12]。蔬菜中农药残留的现象时有发生, 并且其残留水平各不相同^[13–14]。我国对不同蔬菜中不同农药的残留限量值规定不全面, 需要进一步研究。

因此, 本研究以西藏 5 个市的 5 种蔬菜为调查对象, 选取蔬菜中 43 种常用的高风险农药为监测项目, 通过液相色谱-串联质谱法分析蔬菜样品中农药残留的种类和含量, 并进行膳食暴露风险评估, 为当地蔬菜食品的质量安全监管工作提供科学数据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 样品来源

从西藏自治区拉萨市、日喀则市、山南市、林芝市、那曲市 5 个不同市随机采集蔬菜样品, 选择农贸市场和商店两种采样地点类型采样。总共采集蔬菜样品 50 份, 包括茄子 10 份、芹菜 10 份、油麦菜 10 份、黄瓜 10 份、青花菜 10 份。

1.2 试剂

乙腈、甲醇(色谱纯)、氯化钠(优级纯)(成都市科隆化学有限公司); 甲酸[色谱纯, 赛默飞世尔科技(中国)有限

公司]; 甲酸铵(色谱纯, 上海安谱试验科技股份有限公司); 硫酸镁(优级纯, 山东西亚化学有限公司); 柠檬酸钠、柠檬酸氢二钠(优级纯, 天津市光复精细化工研究所); 乙二胺-N-丙基硅烷化硅胶(ethylenediamine-N-propylsilane silica gel, PSA)(美国安捷伦科技有限公司); 陶瓷均质子 [2 cm(长)×1 cm(外径), 潍坊聚凯电子科技有限公司]; 氧乐果等 43 种单一农药标准品(质量浓度 1000 µg/mL, 国家标准物质中心)。

1.3 仪器

6420-1290 液相色谱三重四极杆质谱联用仪(美国安捷伦科技有限公司); BT124S 电子天平(感量 0.1 mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司); AE240S 电子天平(感量 0.01 mg, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司); 3K15 离心机(德国 SIGMA 公司); 3205 食品加工捣碎机(德国德龙博朗家电有限公司); MX-S 可调式混匀仪(北京大龙兴创仪器); Thermo FisherTM Accucore aQ (150 mm×2.1 mm, 2.6 µm) 色谱柱(美国赛默飞世尔科技公司); 微孔滤膜(有机相)(13 mm×0.22 µm)(上海安谱试验科技股份有限公司)。

1.4 方法

1.4.1 样品制备与前处理

(1)样品的制备及保存

蔬菜的取样部位按 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》附录 A 执行, 取样量按照 GB 23200.12—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》执行。对于个体较小的样品, 取样后全部处理; 对于个体较大的基本均匀样品, 可在对称轴或对称面上分割或切成小块后处理; 对于细长、扁平或组分含量在各部分有差异的样品, 可在不同部位切取小片或截成小段后处理; 取后的样品将其切碎, 充分混匀, 用四分法取样或直接放入组织捣碎机中捣碎成匀浆, 放入聚乙烯瓶中。将样品保存于-18℃冷冻保存。

(2)蔬菜样品的前处理

称取 10 g 试样(精确至 0.01 g)于 50 mL 塑料离心管中, 加入 10 mL 乙腈振荡 1 min, 然后加入 4 g 硫酸镁、1 g 氯

化钠、1 g 柠檬酸钠、0.5 g 柠檬酸氢二钠及 1 颗陶瓷均质子, 盖上离心管盖, 剧烈振荡 1 min 后 4200 r/min 离心 5 min。吸取一定量上清液至内含除水剂和净化材料的塑料离心管中(每 mL 提取液使用 150 mg 无水硫酸镁、25 mg PSA), 涡旋混匀 1 min。4200 r/min 离心 5 min, 吸取上清液 0.5 mL 加入 0.5 mL 去离子水, 混匀后过 0.22 μm 微孔滤膜, 用于测定。

1.4.2 标准溶液制备

(1)农药标准储备液

标准储备溶液(1000 μg/mL): 购买的有证标准储备溶液 43 种单一农药标准品。

(2)农药标准中间液

溶液 1: 移取 0.4 mL 的各储备液于 4 mL 的样品瓶中, 用乙腈稀释至 4 mL, 摇匀, 配成 10.0 μg/mL 的溶液 1, 临用时配制。

溶液 2: 移取 0.1 mL 的溶液 1 于 1 mL 的样品瓶中, 用乙腈稀释至 1 mL, 摇匀, 配成 1.0 μg/mL 的溶液 2, 临用时配制。

(3)基质混合标准工作溶液

基质空白溶液是按 1.4.1 进行前处理后, 待用^[15]。按表 1 配制标准曲线溶液。

表 1 标准曲线溶液配制表
Table 1 Table of standard curve configuration

标准号	S1	S2	S3	S4	S5	S6
质量浓度 (μg/L)	5	10	20	50	100	200
溶液 2 (1.0 μg/mL)/μL	5	10	20	50	0	0
溶液 1 (10.0 μg/mL)/μL	0	0	0	0	10	20
乙腈/μL	45	40	30	0	40	30
基质空白溶液 /μL	950	950	950	950	950	950

1.4.3 液相色谱-串联质谱法检测

(1)检测依据

按照 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》方法检测。

(2)液相色谱条件

色谱柱: Thermo Fisher™ Accucore aQ (150 mm×2.1 mm, 2.6 μm)色谱柱; 流动相: A 相为水:甲醇=98:2 (V:V)(含 5 mmol 甲酸铵和 0.1%甲酸), B 相为甲醇:水=98:2 (V:V)(含 5 mmol 甲酸铵和 0.1%甲酸)。流动相梯度条件见表 2; 流速: 0.3 mL/min; 柱温: 35 °C; 进样量: 5 μL。

(3)质谱条件

离子源: 电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI)(+/-); 毛细管正电压 4000 V; 干燥气温度: 180 °C; 干

燥气流速: 16 L/min; 雾化器压力: 35 psi; 扫描类型: 质谱多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM), 离子对如表 3 所示。

表 2 流动相及其梯度条件
Table 2 Mobile phase and gradient conditions

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	100	0
4.0	80	20
5.5	60	40
10.5	0	100
12.9	0	100
15.0	100	0
20.0	100	0

1.4.4 蔬菜膳食农药残留摄入风险评估

《中国居民膳食指南(2022)》推荐每人每天摄入蔬菜 300~500 g^[16], 本研究采用 500 g 作为评估参数。成人体重按 60 kg 计^[17], 用公式(1)^[18]估算国家每日摄入量。

$$NEDI = \frac{C \times F}{b_w} \tag{1}$$

式中: NEDI 为国家估算每日摄入量(national estimated daily intake), mg/(kg·d); C 为规范实验农药的平均残留量, mg/kg, 若样品未检出则按定量限参与计算; F 为农产品的摄入量, kg/d; b_w 为消费者平均体重, kg。农药的慢性摄入风险用%ADI 表示, 用式(2)^[18]计算。

$$\%ADI = \frac{NEDI}{ADI} \times 100 \tag{2}$$

式中: %ADI 为慢性摄入风险; ADI 为每日允许摄入量, mg/(kg·d), 当%ADI>100%时, 表示慢性膳食摄入风险在不可接受范围; 当%ADI≤100%时, 表示慢性摄入风险在可接受范围, %ADI 越低表明风险越低^[19]。

1.5 数据处理

液相色谱-质谱联用仪测得的 43 组标准工作曲线的线性方程及结果数据通过安捷伦 MassHunter Workstation 工作站分析得到。NEDI 及%ADI 根据公式(1)和(2)采用 WPS Office Excel (12.1.0.19302)软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 线性回归方程、相关系数、检出限和定量限

将 43 种农药残留用基质空白配制标准系列, 以质量浓度(X, μg/L)作为横坐标, 以峰面积(Y)作为纵坐标进行线性拟合。分别以 3 倍信噪比所对应的质量浓度计算检出限, 以 10 倍信噪比所对应的质量浓度计算定量限。43 种农药残留标准曲线在 5~200 μg/L 范围内线性关系良好, 相关系数(r^2)>0.990, 检出限范围为 0.001~0.003 mg/kg, 定量限范围为 0.002~0.010 mg/kg, 满足检测要求, 详见表 4。

表 3 化合物的母离子、子离子
Table 3 Mother ion and daughter ion of compounds

化合物名称	前级离子对	产物离子对	化合物名称	前级离子对	产物离子对
阿维菌素	890.5	305.1	甲拌磷亚砷	277.0	199.0
		144.9			143.0
螺螨酯	411.0	313.1	烯啶虫胺	271.1	237.0
		158.9			224.0
苯醚甲环唑	406.2	337.0			56.1
		251.0	氯噻啉	262.0	181.0
烯酰吗啉	388.3	301.1			122.0
		165.0	甲拌磷	261.0	199.0
吡啶醚菌酯	388.0	194.1			75.0
		163.0	吡虫啉	256.1	209.0
炔螨特	368.1	231.1			175.0
		175.1	噻虫啉	253.0	126.0
啶虫啉	367.2	321.2			90.1
		306.1	噻虫胺	250.2	169.1
		263.1			132.0
		137.1	3-羟基克百威	238.0	181.0
哒螨灵	365.1	309.1			163.0
		147.1	乐果	230.0	199.0
		132.1			171.0
乙螨唑	360.0	304.3			125.0
		141.1	涕灭威砷	223.0	148.0
环氧虫啉	323.2	277.0			86.0
		151.0	啉虫脒	223.0	76.0
戊唑醇	308.2	126.0			126.0
		125.0	克百威	222.0	56.0
		70.1			165.0
联苯肼酯	301.1	198.2	氧乐果	214.0	123.0
		170.1			183.0
		153.1			155.0
三唑酮	294.2	197.0	残杀威	210.0	125.0
		69.0			111.0
甲拌磷砷	293.0	171.0	涕灭威	208.1	93.0
		143.0			190.7
噻虫嗪	292.1	211.0	涕灭威亚砷	207.0	116.0
		181.0			132.1
氟吡呋喃酮	289.0	126.1	呋虫胺	203.2	105.1
		90.0			129.2
腈菌唑	289.0	125.0	啉霉胺	200.0	87.1
		70.0			183.0
吗菌灵	282.0	116.1	多菌灵	192.1	107.0
		111.1			160.1
甲霜灵	280.3	220.0	乙酰甲胺磷	183.9	132.1
		192.0			143.0
氟啶虫胺胍	278.0	174.0	灭蝇胺	167.0	125.0
		105.1			125.0
甲胺磷	142.0	125.0	氟啶胺	462.9	108.0
		94.1			415.9
					398.0

表 4 方法的线性回归方程
Table 4 Linear regression equation of the method

项目	线性回归方程
灭蝇胺	$Y=13.918X$
甲胺磷	$Y=192.034X+134.662$
氧乐果	$Y=162.014X$
甲拌磷	$Y=173.092X$
甲拌磷砒	$Y=181.908X$
甲拌磷亚砒	$Y=275.004X+732.711$
乙酰甲胺磷	$Y=131.732X$
乐果	$Y=557.187X+592.875$
克百威	$Y=389.910X+1465.508$
3-羟基克百威	$Y=356.774X+272.221$
涕灭威	$Y=42.842X$
涕灭威砒	$Y=41.127X$
涕灭威亚砒	$Y=139.560X$
残杀威	$Y=902.971X+867.651$
阿维菌素	$Y=10.811X$
吡虫啉	$Y=126.167X+164.345$
啶虫脒	$Y=387.290X+1733.038$
噻虫啉	$Y=717.065X$
噻虫嗪	$Y=240.108X$
噻虫胺	$Y=84.574X+150.158$
呋虫胺	$Y=50.021X$
烯啶虫胺	$Y=35.969X$
氯噻啉	$Y=114.675X+105.061$
啶虫啉	$Y=162.326X$
环氧虫啉	$Y=141.445X$
氟啶虫胺腈	$Y=230.875X$
氟吡呋喃酮	$Y=185.863X+1506.698$
哒螨灵	$Y=2105.349X+6886.012$
乙螨唑	$Y=1364.049X+5007.773$
螺螨酯	$Y=216.816X$
炔螨特	$Y=915.202X+3890.550$
联苯肼酯	$Y=447.215X+83.044$
氟啶胺	$Y=57.849X+225.795$
苯醚甲环唑	$Y=75.576X+362.863$
吡唑醚菌酯	$Y=830.150X+1650.797$
烯酰吗啉	$Y=466.095X$
啞霉胺	$Y=211.505X$
甲霜灵	$Y=167.618X+1373.273$
多菌灵	$Y=194.600X+241.759$
三唑酮	$Y=56.640X$
戊唑醇	$Y=472.654X$
腈菌唑	$Y=160.430X+523.273$
吗菌灵	$Y=484.084X$

2.2 质量控制

选取农药残留基质空白蔬菜样品进行方法回收率实

验, 分别添加 0.01、0.10、0.40 mg/kg 低、中、高 3 个水平浓度, 每个浓度水平做 3 次平行实验, 计算其加标回收率。结果发现, 43 种农药残留化合物回收率范围在 66%~119% 之间, 基本满足农药残留检测要求。相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)均小于 3%, 保证了检出结果的准确度及精密度。同时, 检测时也进行了平行测定, 具体方法为每做 10 份样, 则第 10 份样就做一次平行测定。最后, 规定如果初检发现超限量样品则必须进行复检测定。

2.3 蔬菜中农药残留检出情况分析

2.3.1 总体农药残留检出情况

本研究共采集 50 份蔬菜样品, 共检出 43 项农药残留项目, 共获取 2150 个数据。5 个市均有农药残留检出, 除那曲市外的其他 4 个市均有超标现象, 而同类蔬菜在 5 个市之间的农药残留检出情况没有明显区别。蔬菜样品按照项目检出数统计, 共检出 130 项, 总检出率为 6.05%; 共超标 7 项, 总超标率为 0.326%。共检出 14 种非禁用农药, 按照项目检出数从高到低依次排序为: 烯酰吗啉(32)>噻虫嗪(21)>苯醚甲环唑(10)=吡唑醚菌酯(10)=噻虫胺(10)>多菌灵(9)>啞霉胺(8)>吡虫啉(7)=阿维菌素(7)>戊唑醇(5)=啶虫脒(5)>甲霜灵(4)>呋虫胺(1)=螺螨酯(1)。共超标 3 种非禁用农药, 按照项目超标数从高到低依次排序为: 阿维菌素(5)>噻虫胺(1)=吡虫啉(1)。

2.3.2 不同种类蔬菜农药残留检出情况

从不同蔬菜种类来看, 每种蔬菜均有农药残留检出, 有 3 种蔬菜存在农药残留超标。按检出率从高到低依次排序为: 油麦菜(8.60%)>芹菜(8.37%)>黄瓜(6.74%)>青花菜(3.49%)>茄子(3.02%)。按超标率从高到低依次排序为: 芹菜(0.70%)>油麦菜(0.47%)=青花菜(0.47%)。结果详见表 5。

此外, 每种蔬菜均存在不同程度的农药混用情况。50 份蔬菜样中, 6 份蔬菜样未检出任何农药, 9 份蔬菜样只检出了 1 种农药, 其余 35 份蔬菜样均有农药混用情况。最多有 5 份蔬菜样同时检出 6 种农药, 分别是 2 份芹菜、2 份油麦菜、1 份黄瓜。按照不同蔬菜种类来看, 存在农药混用情况的样品个数从高到低依次排序为: 油麦菜(9)>芹菜(8)=黄瓜(8)>青花菜(7)>茄子(3)。

2.4 蔬菜中农药残留膳食风险评估

对 5 种蔬菜检出的农药进行安全性评估, 根据膳食评估公式(1)和(2)计算得到表 6, ADI 值参考 GB 2763—2021。结果显示, 5 种蔬菜所检出农药的慢性摄入风险值分别为: 茄子(0.001~0.023 mg/kg), 芹菜(0.006~3.665 mg/kg), 油麦菜(0.001~0.697 mg/kg), 黄瓜(0.001~0.188 mg/kg), 青花菜(0.002~0.463 mg/kg)。其中芹菜中的噻虫胺%ADI 值最高, 也仅为 3.665%, 而其余样品中的农药化合物%ADI 值均小于 1%。5 种蔬菜所检出农药的%ADI 值远远低于 100%, 这表明其暴露于这些农药给人体健康所带来的慢性摄入风险较低, 可以放心食用。

表 5 5 种蔬菜农药残留检出情况
Table 5 Detection of pesticide residues in 5 kinds of vegetables

样品名	检出农药项目及数量	超标农药项目及数量	平均残留值/(mg/kg)	最大残留值/(mg/kg)	项目检出数	项目超标数
茄子	吡虫啉 2	—	0.0040	0.0097	13	0
	噻虫嗪 3	—	0.0034	0.0113		
	呋虫胺 1	—	0.0135	0.0445		
	苯醚甲环唑 1	—	0.0095	0.0499		
	吡唑醚菌酯 1	—	0.0054	0.0356		
	烯酰吗啉 3	—	0.0024	0.0045		
	啉霉胺 2	—	0.0175	0.1460		
芹菜	噻虫嗪 4	—	0.0134	0.0739	36	3
	多菌灵 3	—	0.1881	1.0100		
	噻虫胺 2	噻虫胺 1	0.1759	1.7300		
	甲霜灵 1	—	0.0265	0.2470		
	啉霉胺 4	—	0.0086	0.0501		
	烯酰吗啉 8	—	0.1712	1.0700		
	戊唑醇 3	—	0.1045	0.9830		
	吡唑醚菌酯 4	—	0.4910	2.1200		
	苯醚甲环唑 4	—	0.0707	0.3290		
	阿维菌素 3	阿维菌素 2	0.0529	0.3080		
油麦菜	阿维菌素 2	阿维菌素 1	0.0136	0.0740	37	2
	吡虫啉 3	吡虫啉 1	0.3101	2.0600		
	啉虫脒 2	—	0.0380	0.2640		
	噻虫嗪 5	—	0.0073	0.0239		
	噻虫胺 4	—	0.0425	0.3580		
	螺螨酯 1	—	0.0836	0.8180		
	苯醚甲环唑 2	—	0.0629	0.5250		
	吡唑醚菌酯 3	—	0.0213	0.1820		
	烯酰吗啉 10	—	1.8989	6.6900		
	啉霉胺 1	—	0.0143	0.1160		
	多菌灵 2	—	0.0447	0.4100		
	戊唑醇 2	—	0.0312	0.2940		
	噻虫嗪 7	—	0.0417	0.3120		
黄瓜	多菌灵 2	—	0.0046	0.0097	29	0
	吡虫啉 2	—	0.0241	0.1350		
	噻虫胺 3	—	0.0090	0.0455		
	啉虫脒 1	—	0.0071	0.0526		
	甲霜灵 3	—	0.0082	0.0165		
	啉霉胺 1	—	0.0031	0.0042		
	烯酰吗啉 7	—	0.0504	0.1800		
	吡唑醚菌酯 2	—	0.0075	0.0550		
	苯醚甲环唑 1	—	0.0062	0.0172		
	噻虫嗪 2	—	0.0105	0.0467		
青花菜	噻虫胺 1	—	0.0020	0.0023	15	2
	啉虫脒 2	—	0.0055	0.0228		
	烯酰吗啉 4	—	0.0045	0.0123		
	苯醚甲环唑 2	—	0.0114	0.0391		
	阿维菌素 2	阿维菌素 2	0.0278	0.1380		
	多菌灵 2	—	0.0203	0.0863		

注: —表示无超标农药项目。

表 6 5 种蔬菜的膳食风险评估
Table 6 Dietary risk assessment of 5 types of vegetables

蔬菜种类	农药项目	最大残留限量 1/(mg/kg)	最大残留限量 2/(mg/kg)	%ADI
茄子	吡虫啉	1.00	—	0.003
	噻虫嗪	0.50	—	0.006
	呋虫胺	0.50	—	0.023
	苯醚甲环唑	0.60	—	0.013
	吡唑醚菌酯	0.30	—	0.015
	烯酰吗啉	2.00	—	0.001
	啉霉胺	—	1.00	0.015
芹菜	噻虫嗪	1.00	—	0.011
	多菌灵	—	2.00	0.078
	噻虫胺	0.04	—	3.665
	甲霜灵	—	1.00	0.022
	啉霉胺	—	1.00	0.007
	烯酰吗啉	15.00	—	0.010
	戊唑醇	15.00	—	0.006
	吡唑醚菌酯	30.00	—	0.014
	苯醚甲环唑	3.00	—	0.020
	阿维菌素	0.05	—	0.882
油麦菜	阿维菌素	0.05	—	0.227
	吡虫啉	1.00	—	0.258
	啉虫脒	1.50	—	0.021
	噻虫嗪	3.00	—	0.002
	噻虫胺	2.00	—	0.018
	螺螨酯	—	0.10	0.697
	苯醚甲环唑	10.00	—	0.005
	吡唑醚菌酯	20.00	—	0.001
	烯酰吗啉	40.00	—	0.040
	啉霉胺	20.00	—	0.001
	多菌灵	—	2.00	0.019
	戊唑醇	—	1.00	0.026
	噻虫嗪	—	0.20	0.174
黄瓜	多菌灵	2.00	—	0.002
	吡虫啉	1.00	—	0.020
	噻虫胺	—	0.04	0.188
	啉虫脒	1.00	—	0.006
	甲霜灵	0.50	—	0.014
	啉霉胺	2.00	—	0.001
	烯酰吗啉	5.00	—	0.008
	吡唑醚菌酯	0.50	—	0.013
	苯醚甲环唑	1.00	—	0.005
	噻虫嗪	5.00	—	0.002
青花菜	噻虫胺	0.20	—	0.008
	啉虫脒	0.10	—	0.046
	烯酰吗啉	1.00	—	0.004
	苯醚甲环唑	0.50	—	0.019
	阿维菌素	0.05	—	0.463
	多菌灵	—	2.00	0.008

注：表中最大残留限量 1 表示国家标准中规定的限量值，最大残留限量 2 表示国家标准中未有限量标准值规定部分，参考其他蔬菜而设置的合理参考值。—表示无此项。

3 结论与讨论

通过对西藏市售的 50 份蔬菜样品中 43 种农药残留的检测发现, 其整体检出率(6.05%)和超标率(0.326%)都较低, 并且检出的 14 种农药中以低毒农药为主, 并未检出到禁用农药。这与北京昌平地区蔬菜中农药残留的监测结果一致^[20]。这些农药之所以检出率普遍偏高, 可能与其具有广谱、高效、低毒等优点而被农业广泛应用有关^[21]。虽然多为一些低毒农药, 但仍需防止该类低毒农药的滥用。特别是, 新型低毒农药的广泛应用也会对检测分析方法和相关标准的制定提出新的要求^[22]。

从不同种类蔬菜来看, 两种叶菜类蔬菜(芹菜、油菜)的农药检出率高于其他类蔬菜, 分别为 8.37%、8.60%, 这与 FARHA 等^[23]的研究结果一致, 其认为叶类蔬菜表面积很大, 其农药残留水平可能会较高。农药超标率最高的是芹菜, 这与 FANG 等^[24]的研究结果一致, 其研究发现芹菜的农药残留量比其他蔬菜高。此外, 监测结果还发现西藏市售蔬菜中还普遍存在多种农药联用的情况, 5 种蔬菜中均存在同时检出 3 种以上农药残留的情况, 且最多同时检出了 6 种农药残留。这与山东省聊城市蔬菜农药残留监测的结果一致^[25]。值得关注的是, 某些作用机制不同的农药混配混用, 能够提高防治效果^[26]。但是如果不合理混用不仅会降低防治效果, 还可能产生有严重药害的物质降低农作物品质和污染生态环境^[27-28]。

本研究在做蔬菜中检出农药的风险评估时, 居民人均摄入量采用的是中国居民膳食指南推荐的最大摄入量 500 g。使风险评估的假设条件趋向于化学物暴露量风险最大化, 在此假设下所得的评估结果%ADI 值仍均远小于 100%, 说明西藏市售的这 5 种蔬菜的膳食慢性摄入风险在可接受范围内的结论是可行的。这一评估结果也与近几年来我国其他省市居民消费蔬菜的农药残留膳食暴露风险评估情况基本一致。李传秀等^[29]报道青岛市的 680 份蔬菜样品的各类农药急性、慢性膳食暴露风险评估急性暴露评估(acute, HQ)与慢性暴露评估(chronic, HQ)均小于 1, 摄入风险在可接受范围内。TONG 等^[30]报道上海市 2018—2021 年 7028 份蔬菜样品的目标危险系数(target hazard quotient, THQ)、危险指数(hazard index, HI)均小于 1, 摄入风险在可接受范围内。SUN 等^[31]报道河北省市售蔬菜中的 HI 均小于 100%, 摄入风险在可接受范围内。需要注意的是, 国家标准中规定不同农药残留在不同种类蔬菜中的最大限量值并不全。所以, 由于部分最大限量值在国标中并未规定, 本次评估时这部分最大限量值是参考其他蔬菜而设置的合理参考值, 可能会有一定的局限性。

综上所述, 本次抽检的西藏市售 5 种蔬菜中均存在不同程度的农药残留, 但农药残留的整体水平较低, 膳食暴露风险评估的结果表明其风险在安全范围内, 这表明西藏

自治区市售的这 5 种蔬菜的质量整体安全良好。但仍有少数超标农药的检出和频繁农药混用的情况出现, 这说明公众科学用药的意识还不够。建议各有关部门继续在蔬菜生产的各环节中加强监管和进行科学指导, 对于消费者而言, 为了最大程度减少可能摄入的农药残留, 在食用蔬菜前应采取充分的清洗措施。

参考文献

- [1] BAKIRCI GT, YAMAN ADB, BAKIRCI F, *et al.* Pesticide residues in fruits and vegetables from the Aegean Region, Turkey [J]. Food Chemistry, 2014, 160: 379–392.
- [2] SELIM MT, ALMUTAR IMM, SHEHAB HI, *et al.* Risk assessment of pesticide residues by GC-MSMS and UPLC-MSMS in edible vegetables [J]. Molecules 2023, 28: 1343.
- [3] KHAZAAL S, EL-DARRA N, KOBEISSI A, *et al.* Risk assessment of pesticide residues from foods of plant origin in Lebanon [J]. Food Chemistry, 2022, 1374: 131676.
- [4] NGUYEN DGC, LE DBC, NGUYEN VH, *et al.* Assessment of pesticide use and pesticide residues in vegetables from two provinces in Central Vietnam [J]. PLoS One, 2022, 17(6): e0269789.
- [5] MIAO S, WEI Y, PAN Y, *et al.* Detection methods, migration patterns, and health effects of pesticide residues in tea [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 2945–2976.
- [6] SCORZA FA, BELTRAMIM L, BOMBARDI LM. Pesticide exposure and human health: Toxic legacy [J]. Clinics (Sao Paulo), 2023. DOI: 10.1016/j.clinsp.2023.100249
- [7] CESTONARO LV, MACEDO SMD, PITON YV, *et al.* Toxic effects of pesticides on cellular and humoral immunity: An overview [J]. Immunopharmacol Immunotoxicol, 2022, 44(6): 816–831.
- [8] LI Z, JENNINGS A. Worldwide regulations of standard values of pesticides for human health risk control: A review [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2017, 14(7): 826.
- [9] CLAEYS WL, SCHMIT JF, BRAGARD C, *et al.* Exposure of several Belgian consumer groups to pesticide residues through fresh fruit and vegetable consumption [J]. Food Control, 2011, 22: 508–516.
- [10] NA TW, RAHMAN MM, PARK JH, *et al.* Residual pattern of acequinocyl and hydroxyl acequinocyl in perilla leaf grown under greenhouse conditions using ultra performance liquid chromatography-photo diode array detector with tandem mass confirmation [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55: 657–662.
- [11] KAUR R, CHOUDHARY D, BALI S, *et al.* Chandrasekaran B. Pesticides: An alarming detrimental to health and environment [J]. Science of the Total Environment, 2024, 915: 170113.
- [12] SELIM MT, ALMUTARI MM, SHEHAB HI, *et al.* Risk assessment of pesticide residues by GC-MSMS and UPLC-MSMS in edible vegetables [J]. Molecules, 2023, 28(3): 1343.
- [13] LI H, CHANG Q, BAI R, *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.
- [14] LI C, ZHU H, LI C, *et al.* The present situation of pesticide residues in China and their removal and transformation during food processing [J].

- Food Chemistry, 2021, 354: 129552.
- [15] 李春霞, 邓春丽, 叶彩婷, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定柚花中 317 种农药残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 22–27.
- LI CX, DENG CL, YE CT, *et al.* Simultaneous determination of 317 kinds of pesticide residues in pomelo flowers by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry coupled with QuEChERS [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 22–27.
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家卫生部营养与食品安全司, 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京: 北京人民卫生出版社, 2022.
- National Health Commission of the People's Republic of China, Nutrition and Food Safety Department of the Ministry of Health of China, Chinese Nutrition Society. Chinese dietary guidelines for residents (2022) [M]. Beijing: Beijing People's Health Publishing House, 2022.
- [17] 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 YJ, DIAO CY, YAN XY, *et al.* Risk analysis and countermeasures of pesticide residues in vegetables in Jiangsu Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(17): 205–210.
- [18] 田毅, 田霞, 王春林, 等. 市售茶叶中农药残留现状及膳食风险评估[J]. 食品工业, 2023, 44(11): 338–342.
- TIAN Y, TIAN X, WANG CL, *et al.* Current situation of pesticide residues in tea and dietary risk assessment [J]. The Food Industry, 2023, 44(11): 338–342.
- [19] 张微微. 新疆红枣农药残留风险评估与去除措施研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- ZHANG WW. Study on risk assessment and removal measures of pesticide residues in Xinjiang jujube [D]. Alar: Tarim University, 2023.
- [20] 刘敏, 陈一苇, 车少辉, 等. 北京市昌平区本地蔬菜农药残留现状分析[J]. 北京农学院学报, 2024, 39(3): 47–51.
- LIU M, CHEN YW, CHEN SH, *et al.* Analysis of pesticide residues in local vegetables in Changping District, Beijing [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2024, 39(3): 47–51.
- [21] ZHANG X, HUANG Y, CHEN WJ, *et al.* Environmental occurrence, toxicity concerns, and biodegradation of neonicotinoid insecticides [J]. Environmental Research Letters, 2023, 218: 114953.
- [22] SANDSTROM MW, NOWELL LH, MAHLER BJ, *et al.* New-generation pesticides are prevalent in California's central coast streams [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806(4): 150683.
- [23] FARHA W, ABD EAAM, RAHMAN MM, *et al.* Analytical approach, dissipation pattern and risk assessment of pesticide residue in green leafy vegetables: A comprehensive review [J]. Biomedical Chromatography, 2018. DOI: 10.1002/bmc.4134. PMID: 29134675
- [24] FANG L, ZHANG S, CHEN Z, *et al.* Risk assessment of pesticide residues in dietary intake of celery in China [J]. Regul Toxicol Pharmacol, 2015, 73(2): 578–586.
- [25] 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.
- [26] 王标. 科学合理混用农药[J]. 湖南农业, 2021(11): 19.
- WANG B. Scientific and rational mixing of pesticides [J]. Hunan Agriculture, 2021(11): 19.
- [27] MEIDL P, LEHMANN A, BI M, *et al.* Combined application of up to ten pesticides decreases key soil processes [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(8): 11995–12004.
- [28] RYDH SJ, KREUGER J, GOEDKOOP W. Pesticide mixture toxicity to algae in agricultural streams-field observations and laboratory studies with in situ samples and reconstituted water [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 215: 112153.
- [29] 李传秀, 孙枫林, 于红卫, 等. 青岛市市售蔬菜中农药残留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 CX, SUN FL, YU HW, *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] TONG J, FENG D, WANG X, *et al.* Pesticide residue and dietary intake risk of vegetables grown in Shanghai under modern urban agriculture in 2018–2021 [J]. Heliyon, 2024, 10(5): e25505.
- [31] SUN P, DING G, REN D, *et al.* Pesticide residues in agricultural end-products and risk assessment for consumers in North China [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2023, 195(11): 1392.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)