DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260109004
引用格式: 陈升凡, 李倩倩, 李备, 等. 2019—2024 年海南省芹菜农药残留膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 17–24.
Chen Shengfan, Li Qianqian, Li Bei, et al. Dietary risk assessment of pesticide residues in *Apium graveolens* of Hainan Province from 2019 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 17–24. (in Chinese with English abstract).

2019—2024 年海南省芹菜农药残留膳食风险评估

陈升凡[1,2], 李倩倩[1], 李 备[3*], 李建勋[1*]

[1. 中国农业科学院农产品加工与营养健康研究院(沧州), 沧州 061000; 2. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457; 3. 海南省检验检测研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(热带果蔬质量与安全), 海口 570314]

摘 要: 目的 评估海南省芹菜中农药残留对消费者的健康风险。**方法** 2019—2024 年采集海南省的 162 批次芹菜样品, 采用 QuEChERS 方法结合高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)和气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS), 对芹菜样品中 38 种农药残留进行测定; 应用点评估方法研究单一农药对成人和儿童的慢性和急性膳食风险评估的健康风险; 进一步研究了农药的累积毒性效应。**结果** 共检出 21 种农药, 农药残留检出率为 87.0%, 单个样品最多检出农药 14 种。单一农药对成人和儿童的慢性与急性膳食风险均小于 1, 对成人和儿童无风险。内分泌干扰类农药、皮肤刺激类农药、生殖毒性和神经毒性类农药对成人和儿童的累积风险计算值也均小于 1, 安全风险可忽略。**结论** 随着海南省大力推广农产品质量安全追溯体系和绿色防控技术, 引导农户遵循良好用药规范, 海南芹菜等农产品的农药残留风险得到了有效控制, 农产品质量安全得以保障。

关键词: 芹菜; 农药残留; 毒性效应; 膳食风险评估
中图分类号: TS255.7 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0017–08

Dietary risk assessment of pesticide residues in *Apium graveolens* of Hainan Province from 2019 to 2024

CHEN Sheng-Fan[1,2], LI Qian-Qian[1], LI Bei[3*], LI Jian-Xun[1*]

[1. *Institute of Agricultural Product Processing and Nutritional Health* (*Cangzhou*), *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Cangzhou* 061000, *China*; 2. *College of Biotechnology*, *Tianjin University of Science and Technology*, *Tianjin* 300457, *China*; 3. *Hainan Academy of Inspection and Testing*, *Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety*, *State Administration for Market Regulation*, *Haikou* 570314, *China*]

ABSTRACT: Objective To assess the health risks to consumers from pesticide residues in *Apium graveolens* in Hainan Province. **Methods** A total of 162 batches of *Apium graveolens* samples were obtained in Hainan Province

收稿日期: 2026-01-09
基金项目: 河北省自然科学基金项目(C2024110018)
第一作者: 陈升凡(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: chenshengfan2024@163.com
***通信作者:** 李备(1975—), 男, 博士, 主任药师, 主要研究方向为食药安全与人类健康。E-mail: cq _ libei@163.com
李建勋(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: lijianxun@caas.cn

during the period from 2019 to 2024, and the QuEChERS extraction method combined with high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) and gas chromatography-tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) were employed for determining the residues of 38 kinds of pesticides in *Apium graveolens* samples. The point assessment method was used to study the chronic and acute dietary risk assessment of a single pesticide for adults and children in terms of health risks; further research was conducted on the cumulative toxic effects of the pesticide. **Results** A total of 21 pesticides were detected with a detection rate of 87.0%. A maximum of 14 kinds of pesticides were detected in one sample. The chronic and acute dietary risks of single pesticides were less than 1 for both adults and children, and it posed no risk to either adults or children. The cumulative risk values of endocrine-disrupting pesticides, skin-irritating pesticides, reproductive toxic and neurotoxic pesticides for both adults and children were all less than 1, and the safety risk could be ignored. **Conclusion** With Hainan Province vigorously promoting the traceability system for agricultural product quality and safety and green control technologies, and guiding farmers to follow good agricultural practices for pesticide use, the risk of pesticide residues in Hainan's agricultural products such as *Apium graveolens* has been effectively controlled, ensuring the quality and safety of the products.

KEY WORDS: *Apium graveolens*; pesticide residues; toxic effects; dietary risk assessment

0 引 言

芹菜是一种低热量蔬菜, 富含纤维素、维生素 C、叶酸等[1–2], 对人体的消化道和心血管具有益处[3–5], 因此深受消费者的喜爱。芹菜在种植过程中常受软腐病、斑点病、灰霉病等病害侵入[6–7], 农户通过喷施农药来保证芹菜的质量和产量。然而喷施农药可能会出现滥用、乱用、不遵守安全间隔期、使用高毒禁用农药等行为[8], 甚至使用大量多种农药对芹菜进行灌根的施药方式防治病虫害[9], 导致芹菜中农药残留物累积、食用风险过高等问题。芹菜自身结构使得其更容易吸附农药, 其农药多残留现象普遍, 残留量较高[10]。许多国家和组织都制定了农药残留限量标准, 以保证食品安全。中国规定了最大残留限量(maximum residue level, MRL), 以规范食品中超过 400 种农药的 MRL 值[11], MRL 值是指食品和农产品中合法允许的农药残留的最高水平(以 mg/kg 表示)[12–13], 以监测食品中农药 MRL 的遵守情况。然而食品中仍经常检测到农药残留, 甚至是禁用农药。孙江等[14]于 2010—2012 年期间共抽检 213 个芹菜样本调查分析, 研究发现农药毒死蜱、甲拌磷和多菌灵引起芹菜超标的比例较高, 其中农药毒死蜱造成芹菜农药残留超标的比例最高, 占超标样本的 50.0%。本研究结合近年来农业农村部发布的豇豆禁用、限用及重点监控农药名单, 以及这些农药在常规监测与监督抽查中持续检出并超标的情况, 最终确定了 38 种目标农药。

农药的使用虽然确保了作物的健康和生产力, 但是农药的分子靶标通常在害虫和非靶标物种(包括人类)之间共享[15], 人类通过食用作物摄入农药后, 这些化合物在体内积累, 这不仅会造成头晕、头痛、恶心等急性影响, 还会造成内分泌干扰效应、生殖毒性、神经毒性以及皮肤刺激等危害[16–19], 严重影响人体健康。因此, 研究不同毒性效应的农药在芹菜中的残留行为对降低农药在成人和儿童中的暴露风险具有重要意义。

海南省位于中国热带地区, 气候温暖潮湿, 蔬菜水果易遭受病虫侵害, 而农民通常施用大量农药来保护作物, 导致海南蔬菜农药残留问题严重[20–21]。目前, 针对海南地区销售的芹菜农药残留风险评估还鲜见报道, 通过对芹菜中农药残留水平的评价和对公众健康的潜在风险评估, 以保证芹菜的安全性是非常必要的。本研究旨在探明芹菜农药残留的种类和含量, 进一步分别评估成人和儿童食用芹菜的安全性, 以期为芹菜安全生产与质量安全提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

38 种农药标准品(纯度≥98%, 天津阿尔塔科技有限公司, 表 1); 甲醇、乙腈、甲酸(色谱纯, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 氯化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 柠檬酸钠二水合物、柠檬酸二钠盐倍半水合物、无水硫酸镁(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 石墨化碳黑(graphitized carbon black, GCB)[岛津(上海)实验器材有限公司]; 乙二胺-N-丙基(primary-secondary amine, PSA)(天津博纳艾杰尔科技有限公司)。

2019 年 6 月—2024 年 12 月从海南省的消费市场随机采集 162 批次的芹菜样品, 采样地点主要为海南省海口市、三亚市、琼海市、东方市、五指山市和万宁市共 6 市的大型批发市场、农贸市场和蔬菜连锁店, 样品在冷藏条件下运至实验室于 4 ℃冷藏保存待测。

1.2 试剂与仪器

Agilent 1290-6470 高效液相色谱-串联质谱仪(high

performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)、Agilent 7890B-7693 气相色谱 - 串联质谱仪(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)、HP-5 MS 石英毛细管色谱柱(0.32 mm×30 m, 0.25 μm)(美国 Agilent 公司); TTL-DC III 氮吹仪(北京同泰联科技发展有限公司); MilliQ Synergy 超纯水系统(美国 Millipore 公司); VX-III 多管涡旋振荡器(北京踏锦科技有限公司); HQ-60-IV 涡旋混合器(北方同正科技有限公司); BSA 124S 电子天平(精度 0.0001 g, 德国 Sartorius 有限公司); H1850 台式高速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司); 0.22 μm 滤膜(天津博纳艾杰尔科技有限公司); ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱(1.7 μm×2.1 mm×50 mm, 美国 Waters 公司)。

表 1　芹菜中检测的 38 种农药及其类别

Table 1　The 38 kinds of pesticides detected in *Apium graveolens* and their categories

类别	农药
杀虫剂	吡虫啉、啶虫脒、灭蝇胺、噻虫嗪、呋虫胺、马拉硫磷、噻虫胺、吡丙醚、N-去甲基啶虫脒、毒死蜱、丙溴灵、茚虫威
杀菌剂	苯醚甲环唑、吡唑醚菌酯、丙环唑、多菌灵、噁霜灵、氟吡菌胺、氟吡菌酰胺、咪鲜胺、嘧菌环胺、嘧菌酯、霜霉威、戊唑醇、烯酰吗啉、烯唑醇、啶氧菌酯、甲霜灵、嘧霉胺、氟吗啉、腈苯唑、啶酰菌胺、氟硅唑、氟酰胺
除螨剂、除草剂和生长调节剂	矮壮素、哒满灵、扑草净、丁草胺

1.3　农药残留检测

1.3.1　样品前处理

样品前处理参照 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》对芹菜中 38 种农药残留进行分析。称取 10.0 g(精确至 0.01 g)均质化样品匀浆于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 乙腈, 剧烈振荡 1 min, 加入 4 g 无水硫酸镁、1 g 氯化钠、1 g 柠檬酸钠二水合物、0.5 g 柠檬酸二钠盐倍半水合物, 剧烈振荡 1 min, 然后 4200 r/min 离心 5 min。量取 6 mL 上清液至 15 mL 净化管(包括 900 mg 无水硫酸镁、150 mg PSA、15 mg GCB), 涡旋混匀 1 min, 4200 r/min 离心 5 min。量取 1 mL 上清液通过 0.22 μm 尼龙过滤膜过滤, 备用于 HPLC-MS/MS 分析, 量取 2 mL 上清液, 乙酸乙酯氮吹, 采用 0.22 μm 尼龙过滤膜过滤, 备用于 GC-MS/MS 分析。

1.3.2　检测方法

对芹菜中杀虫剂、杀菌剂、除螨剂、除草剂和生长调节剂共 38 种农药使用 HPLC-MS/MS 和 GC-MS/MS 进行检测。依据 GB 2763—2021《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》规定的 MRL 值, 对芹菜中检出农药残留值进行判定分析。

(1)气相色谱-串联质谱法

采用 HP-5 MS 石英毛细管色谱柱; 升温程序: 40 ℃保持 1 min, 然后以 30 ℃/min 升温至 130 ℃, 再以 5 ℃/min 升温至 250 ℃, 最后以 10 ℃/min 升温至 300 ℃, 保持 5 min; 进样口温度: 290 ℃; 载气: 氦气(纯度大于 99.999%); 流速为 1.2 mL/min; 不分流进样; 进样体积为 1 μL; 电子轰击离子源(electron ionization source, EI); 离子源温度: 230 ℃; 传输线温度: 280 ℃; 溶剂延迟: 3 min。

(2)高效液相色谱-串联质谱法

采用 ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱; 柱温: 35 ℃, 进样体积: 5 μL; 流动相: 0.1%甲酸-水溶液(A)和乙腈(B)组成; 流动相梯度洗脱程序为: 0~3 min, 1%~30% B; 3~6 min, 30~40% B; 6~9 min, 40% B; 9~15 min, 40%~60% B; 15~19 min, 60~99% B; 19~23 min, 99% B; 25 min, 1% B; 流速: 0.3 mL/min。

电喷雾离子源(electrospray ionization source, ESI); 检测模式: 多重反应监测模式(multiple reaction monitoring, MRM); 离子源温度: 280 ℃; 电喷雾电压: 5.0 kV; 雾化器压力: 30 psi; 干燥气流速: 12 L/min; 鞘气温度: 350 ℃; 鞘气流速: 10 L/min。

1.4　膳食暴露风险评估

1.4.1　慢性膳食风险评估

每种农药的估计每日摄入量[estimated daily intake, EDI, (mg/kg bw)]使用公式(1)计算, 每种农药的慢性风险商(chronic hazard quotients, HQ_c)采用公式(2)计算:

$$EDI = \frac{STMR \times F}{bw} \tag{1}$$

$$HQ_c = \frac{EDI}{ADI} \tag{2}$$

式中: STMR 为规范残留试验中值(supervised trials median residue), mg/kg; F 为该样品的日消费量, kg/d, 芹菜属于深色蔬菜, 在我国深色蔬菜的每日消费量为 0.0915 kg[22]; bw 为一般人群体重(body weight), 根据世界卫生组织(2020 年)的建议[23], 消费者的体重分为两个组别: 成人平均体重为 53.23 kg, 1~6 岁儿童平均体重为 16.14 kg; ADI 为每日允许摄入量(acceptable daily intake), mg/kg bw, 数据来源于 GB 2763—2021。根据农药残留风险评估原则, 当 HQ_c<1 时, 健康风险被认为可接受; HQ_c≥1, 健康风险被认为不可接受, HQ_c 越高, 慢性暴露的风险越大。

1.4.2　急性膳食风险评估

为了确定急性膳食摄入的风险, 根据粮农组织/世卫组织农药残留联合会议(Joint Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization Meeting of Pesticide Residues, JMPR)的建议, 使用了短期摄入量[estimated short-term daily intake, ESTI, (mg/kg bw)]方法进行评估, 针对不同的情况, 不同的可食用部分的大小和单位重量(g)的差异, 使用公式(3)~(6)计算 ESTI。农药急性风险商(acute hazard quotients, HQ_a)采用公

式(7)计算。急性参考剂量[(acute reference dose, ARfD), mg/kg bw]数据来源于 JMPR[24]。

当可食部分计的产品单个质量(unit weight of the edible portions, Ue)<25 g:

$$ESTI=\frac{LP\times HR}{bw} \quad (3)$$

当 25 g≤Ue<LP:

$$ESTI=\frac{Ue\times HR\times v+(LP-Ue)}{bw} \quad (4)$$

当 Ue≥LP:

$$ESTI=\frac{LP\times HR\times v}{bw} \quad (5)$$

对于散装或混合的未加工农业商品或加工商品:

$$ESTI=\frac{LP\times STMR}{bw} \quad (6)$$

$$HQ_a=\frac{ESTI}{ARfD} \quad (7)$$

式中: HR 为每种农药的最高残留量(highest residue), mg/kg; Ue, kg; v 为变异因子(variability factor), 表示一批产品中不同个体或同一个体中不同部位的残留变异; LP 为大份餐(large portion), kg, 是某类食品一餐的最大消费量。芹菜 Ue 为 861.1 g, 我国居民消费芹菜大份餐 LP 为 180.3 g, 由于 Ue>LP, 故采用公式(5)计算急性膳食风险, v 取 3。

1.4.3 累积风险评估

随着联合暴露风险评估的兴起, 多篇文献针对相同机制的农药推荐了评估分组的方法[25–27]。欧洲食品安全局开发了一种累积评估方法, 称为危害指数(hazard index, HI), 采用公式(8)计算。HI<1 表示累积效应可以忽略, 而 HI≥1 表示农药的累积效应可能影响消费者健康。本研究根据不同农药的毒性效应类型以及对生物体的不良影响与危害对芹菜中的农药残留进行分组, 具有多种效应的农药同时分入对应暴露评估组中, 分为内分泌干扰效应类、皮肤刺激类、生殖毒性类、神经毒性类 4 类。

$$HI=\sum HQ \quad (8)$$

1.5 数据处理

依据 Office Excel 2016 进行数据分析统计, 采用 Origin 8.5 制图软件进行作图, 实验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 芹菜中农药残留检出情况

162 批次芹菜样品, 农药残留检出率为 87.0%, 共检出 21 种 691 频次的农药, 平均每批次芹菜中检出农药 4.3 种。芹菜中检出 21 种农药, 包括中等毒性农药 3 种, 低毒农药 18 种, 具体信息见表 2。芹菜中农药单一残留检出率为 12.3%, 多残留检出率为 74.7%, 芹菜单个样品最多检出农药 14 种, 表明芹菜中的农药多残留问题较为普遍。芹菜中农药检出率最高的是吡唑醚菌酯, 检出率达 63.2%, 其次是灭蝇胺、霜霉威和苯醚甲环唑, 其检出率分别为 51.1%、42.4%和 41.5%。吡唑醚菌酯和苯醚甲环唑主要用于防治芹菜斑枯病、菌核病、锈病等真菌病害, 而灭蝇胺主要用于防治芹菜中害虫[28], 三者均为生产中常用农药, 与其在芹菜病害防治中的广泛使用相吻合。Qin 等[29]研究发现 78.57%芹菜样品中存在农药残留, 检出的农药包括苯醚甲环唑、多菌灵、甲霜灵、嘧霉胺、烯酰吗啉、腐霉利、丙环唑、戊唑醇和咪鲜胺, 这与本研究检出的农药中 6 种农药相同。芹菜中检出的 21 种农药中毒死蜱、噻虫胺和噻虫嗪 3 种农药超标, 超标率分别为 3.7%、1.9%和 0.6%, 其中毒死蜱属于国家明令禁止在蔬菜上使用的农药, 说明违规使用禁用农药的问题依然存在。Hu 等[30]以吉林省 4 个地区的 230 份芹菜样品为研究对象, 结果表明有机磷农药在芹菜中的检出率最高达 4.4%, 在芹菜中的超标率为 1.7%。Zhang 等[31]研究分析了 2018—2020 年浙江省 164 份芹菜样品, 其中有 5 种有机磷农药检出, 18.9%芹菜样品中检出有机磷农药。与国内其他地区研究相比, 本研究中芹菜农药检出率高于 Qin 等[29]及 Zhang 等[31]的报道, 可能与海南省的气候条件、种植模式及用药习惯差异有关。但本研究中马拉硫磷等有机磷农药的检出提示, 即使为低毒农药, 其潜在的人体健康风险仍不可忽视。

2.2 芹菜中农药残留膳食风险评估

对 162 批次芹菜中 38 种农药进行检测, 共检出 21 种农药, 对 21 种农药进行慢性膳食风险评估, 由于农药噁霜灵和嘧菌酯的急性参考剂量值目前未在 JMPR 数据库记录, 因此对除噁霜灵和嘧菌酯外的 19 种农药进行急性膳食风险评估。未检出农药样品按照 1/2 定量限计算。

2.2.1 慢性膳食风险评估结果

根据公式(2)计算芹菜中 21 种检出农药的慢性膳食风险值, 结果见图 1 和表 3, 对成人来说, 芹菜中检出 21 种农药的慢性膳食风险值 HQ_c 范围为 1.51×10^{-4}~4.69×10^{-2}, 儿童的慢性膳食风险值范围为 4.99×10^{-4}~1.55×10^{-1}。由图 2 看出, 成人和儿童的慢性风险值排在前 3 位的农药分别为毒死蜱、咪鲜胺和苯醚甲环唑, 成人的风险值分别为 4.69×10^{-2}、2.17×10^{-2} 和 1.97×10^{-2}; 儿童的慢性风险值分别为 1.55×10^{-1}、7.17×10^{-2} 和 6.50×10^{-2}, 21 种农药的慢性膳食值 HQ_c 均小于 1, 表明芹菜中检出的 21 种农药的单一慢性摄入风险处于可接受水平。

2.2.2 急性膳食风险评估结果

19 种农药的急性膳食风险根据公式(7)评估, 结果见表 3 和图 1, 对于成人来说, 芹菜中检出农药的急性膳食风险值 HQ_a 范围为 8.47×10^{-4}~2.48×10^{-1}, 对儿童来说, 检出农药的急性膳食风险值 HQ_a 范围为 2.79×10^{-3}~8.19×10^{-1}。由图 2B 可以看出, 成人和儿童的急性风险值排在前 3 位的分别为灭蝇胺、苯醚甲环唑和多菌灵, 风险值分别为 2.48×10^{-1}、9.76×10^{-2} 和 9.67×10^{-2}, 儿童的急性风险值分别

为 8.19×10^{-1}、3.22×10^{-1} 和 3.19×10^{-1}, 19 种农药的急性风险值 HQ_a 均小于 1, 表明 19 种农药单一急性摄入风险可被忽略。

2.2.3　毒性效应累积风险评估

对各组农药进行累积膳食风险评估, 结果见表 4, 内分泌干扰类农药、皮肤刺激类农药、生殖毒性和神经毒性类农药对成人和儿童的累积风险 HI_c 范围分别为 2.71×10^{-2}~9.61×10^{-2} 和 8.94×10^{-2}~3.17×10^{-1}, 均小于 1, 表明芹菜中这 4 类农药残留对成人和儿童慢性累积风险可以忽略。

表 2　芹菜中各农药检出水平及超标率

Table 2　Detection levels and exceedance rates of various pesticides in *Apium graveolens*

农药残留	毒性	定量限/(mg/kg)	残留量范围/(mg/kg)	检出率/%	MRLs/(mg/kg)	超标率/%
吡唑醚菌酯	低毒	0.01	0.011~1.486	63.2	30.00	0
灭蝇胺	低毒	0.01	0.010~2.445	51.1	4.00	0
苯醚甲环唑	低毒	0.01	0.011~2.882	41.5	3.00	0
霜霉威	低毒	0.01	0.012~12.983	42.4	-	-
戊唑醇	低毒	0.01	0.012~1.967	35.4	15.00	0
烯酰吗啉	低毒	0.01	0.013~0.172	31.8	15.00	0
丙环唑	低毒	0.01	0.010~1.362	31.1	20.00	0
咪鲜胺	低毒	0.01	0.010~0.467	26.2	-	-
噻虫嗪	低毒	0.01	0.011~4.282	22.1	1.00	0.6
氟唑菌酰胺	低毒	0.01	0.012~1.528	20.7	10.00*	0
吡虫啉	中等毒	0.01	0.010~0.515	18.3	5.00	0
嘧菌酯	低毒	0.01	0.012~0.372	16.9	5.00	0
噁霜灵	低毒	0.01	0.013~0.261	10.3	-	-
氟吡菌胺	低毒	0.01	0.011~1.163	9.6	20.00*	0
多菌灵	低毒	0.02	0.022~1.637	4.2	-	-
呋虫胺	低毒	0.02	0.040~0.243	3.5	0.60	0
毒死蜱	中等毒	0.01	0.074~0.354	2.6	0.05	3.7
噻虫胺	低毒	0.02	0.022~0.078	2.4	0.04	1.9
啶虫脒	中等毒	0.02	0.021~0.076	2.8	3.00	0
腈菌唑	低毒	0.02	0.021~0.072	4.3	0.05#	0
马拉硫磷	低毒	0.02	0.241	1.3	1.00	0

注: *表示该限量值为临时限量值; #表示叶菜类蔬菜制定的最大农药残留限量值; -表示在芹菜中该农药无 MRL, 因此也未计算超标率。

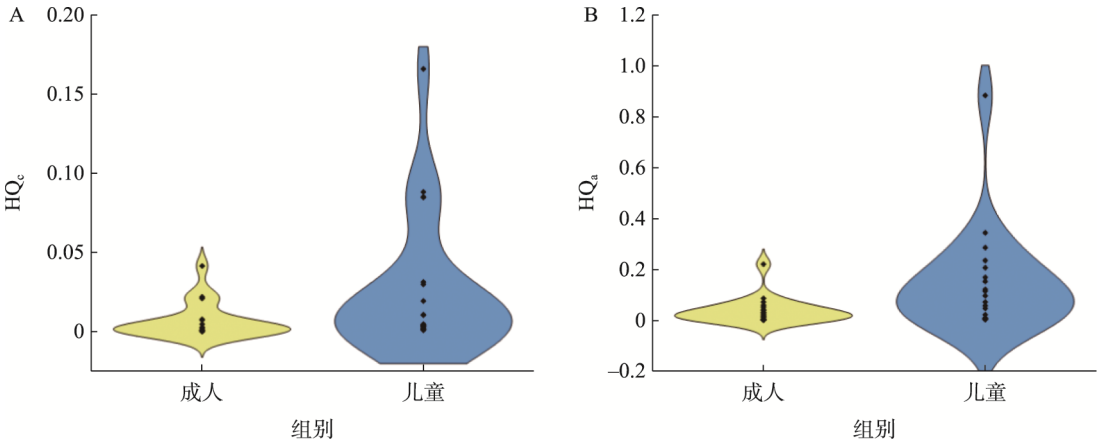


图 1　芹菜中 21 种农药对成人和儿童的风险值小提琴图

Fig.1　Violin plots of risk values of 21 kinds of pesticides in *Apium graveolens* for adults and children

表 3 芹菜的慢性和急性膳食风险评估

Table 3 Chronic and acute dietary risk assessments of *Apium graveolens*

农药	慢性膳食风险评估						急性膳食风险评估					
	$STMR_i$/(mg/kg)	ADI /(mg/kg bw)	EDI/(mg/kg bw)		HQ_c		HR /(mg/kg)	ARfD/ (mg/kg bw)	ESTI/(mg/kg bw)		HQ_a	
			成人	儿童	成人	儿童			成人	儿童	成人	儿童
吡唑醚菌酯	0.1024	0.03	1.76×10^{-4}	5.81×10^{-4}	5.87×10^{-3}	1.94×10^{-2}	1.486	0.7	1.51×10^{-2}	4.98×10^{-2}	2.16×10^{-2}	7.11×10^{-2}
灭蝇胺	0.0958	0.06	1.65×10^{-4}	5.43×10^{-4}	2.74×10^{-3}	9.05×10^{-3}	2.445	0.1	2.48×10^{-2}	8.19×10^{-2}	2.48×10^{-1}	8.19×10^{-1}
苯醚甲环唑	0.1146	0.01	1.97×10^{-4}	6.50×10^{-4}	1.97×10^{-2}	6.50×10^{-2}	2.882	0.3	2.93×10^{-2}	9.66×10^{-2}	9.76×10^{-2}	3.22×10^{-1}
霜霉威	0.0352	0.40	6.05×10^{-5}	2.00×10^{-4}	1.51×10^{-4}	4.99×10^{-4}	12.983	2.0	1.32×10^{-1}	4.35×10^{-1}	6.60×10^{-2}	2.18×10^{-1}
戊唑醇	0.3275	0.03	5.63×10^{-4}	1.86×10^{-3}	1.88×10^{-2}	6.19×10^{-2}	1.967	0.3	2.00×10^{-2}	6.59×10^{-2}	6.66×10^{-2}	2.20×10^{-1}
烯酰吗啉	0.0326	0.20	5.60×10^{-5}	1.85×10^{-4}	2.80×10^{-4}	9.24×10^{-4}	0.172	0.6	1.75×10^{-3}	5.76×10^{-3}	2.91×10^{-3}	9.61×10^{-3}
丙环唑	0.0294	0.07	5.05×10^{-5}	1.67×10^{-4}	7.22×10^{-4}	2.38×10^{-3}	1.004	0.3	1.02×10^{-2}	3.36×10^{-2}	3.40×10^{-2}	1.12×10^{-1}
咪鲜胺	0.1264	0.01	2.17×10^{-4}	7.17×10^{-4}	2.17×10^{-2}	7.17×10^{-2}	0.467	0.1	4.75×10^{-3}	1.57×10^{-2}	4.75×10^{-2}	1.57×10^{-1}
噻虫嗪	0.0157	0.08	2.70×10^{-5}	8.90×10^{-5}	3.37×10^{-4}	1.11×10^{-3}	3.160	1.0	3.21×10^{-2}	1.06×10^{-1}	3.21×10^{-2}	1.06×10^{-1}
氟唑菌酰胺	0.0847	0.02	1.46×10^{-4}	4.80×10^{-4}	7.28×10^{-3}	2.40×10^{-2}	1.268	0.3	1.29×10^{-2}	4.25×10^{-2}	4.29×10^{-2}	1.42×10^{-1}
吡虫啉	0.0260	0.06	4.47×10^{-5}	1.47×10^{-4}	7.45×10^{-4}	2.46×10^{-3}	0.515	0.4	5.23×10^{-3}	1.73×10^{-2}	1.31×10^{-2}	4.31×10^{-2}
嘧菌酯	0.0493	0.20	8.47×10^{-5}	2.79×10^{-4}	4.24×10^{-4}	1.40×10^{-3}	0.233	-	2.37×10^{-3}	7.81×10^{-3}	-	-
噁霜灵	0.0240	0.01	4.13×10^{-5}	1.36×10^{-4}	4.13×10^{-3}	1.36×10^{-2}	0.261	-	2.65×10^{-3}	8.75×10^{-3}	-	-
氟吡菌胺	0.0375	0.08	6.45×10^{-5}	2.13×10^{-4}	8.06×10^{-4}	2.66×10^{-3}	0.952	0.6	9.67×10^{-3}	3.19×10^{-2}	1.61×10^{-2}	5.32×10^{-2}
多菌灵	0.0428	0.03	7.36×10^{-5}	2.43×10^{-4}	2.45×10^{-3}	8.09×10^{-3}	0.952	0.1	9.67×10^{-3}	3.19×10^{-2}	9.67×10^{-2}	3.19×10^{-1}
呋虫胺	0.1330	0.20	2.29×10^{-4}	7.54×10^{-4}	1.14×10^{-3}	3.77×10^{-3}	0.243	1.0	2.47×10^{-3}	8.14×10^{-3}	2.47×10^{-3}	8.14×10^{-3}
毒死蜱	0.2730	0.01	4.69×10^{-4}	1.55×10^{-3}	4.69×10^{-2}	1.55×10^{-1}	0.266	0.1	2.70×10^{-3}	8.91×10^{-3}	2.70×10^{-2}	8.91×10^{-2}
噻虫胺	0.0462	0.10	7.94×10^{-5}	2.62×10^{-4}	7.94×10^{-4}	2.62×10^{-3}	0.069	0.6	7.01×10^{-4}	2.31×10^{-3}	1.17×10^{-3}	3.85×10^{-3}
啶虫脒	0.0274	0.07	4.71×10^{-5}	1.55×10^{-4}	6.73×10^{-4}	2.22×10^{-3}	0.060	0.1	6.10×10^{-4}	2.01×10^{-3}	6.10×10^{-3}	2.01×10^{-2}
腈菌唑	0.0215	0.03	3.70×10^{-5}	1.22×10^{-4}	1.23×10^{-3}	4.06×10^{-3}	0.025	0.3	2.54×10^{-4}	8.38×10^{-4}	8.47×10^{-4}	2.79×10^{-3}
马拉硫磷	0.2406	0.30	4.14×10^{-4}	1.36×10^{-3}	1.38×10^{-3}	4.55×10^{-3}	0.241	2.0	2.45×10^{-3}	8.08×10^{-3}	1.22×10^{-3}	4.04×10^{-3}

注: -表示无此项。ARfD 来自 JMPR (http: //www.fao.org/agriculture/crops/ core-themes/theme/pests/lpe/en/)。

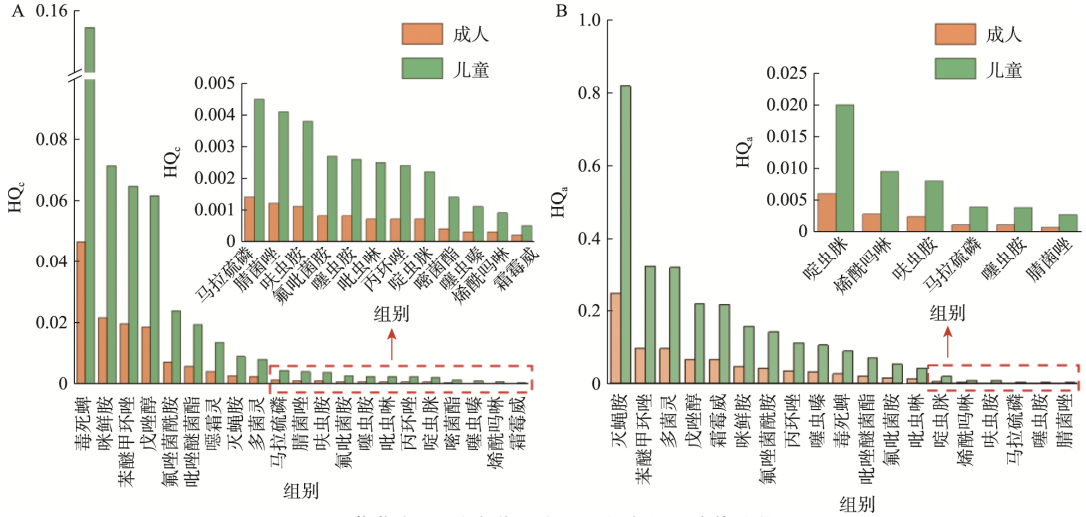


图 2 芹菜中 21 种农药对成人和儿童的风险值柱状图

Fig.2 Histogram of risk values for 21 kinds of pesticides in *Apium graveolens* for adults and children

表 4　芹菜中不同毒性农药累积风险
Table 4　Cumulative risk of pesticides of different toxicity in *Apium graveolens*

毒性效应	农药类别	HI	
		成人	儿童
内分泌物干扰类	灭蝇胺	9.61×10^{-2}	3.17×10^{-1}
	霜霉威		
	戊唑醇		
	丙环唑		
	咪鲜胺		
	多菌灵		
	毒死蜱		
	腈菌唑		
	马拉硫磷		
皮肤刺激类	吡唑醚菌酯	2.71×10^{-2}	8.94×10^{-2}
	苯醚甲环唑		
	霜霉威		
	啶虫脒		
	烯酰吗啉		
	嘧菌酯		
生殖毒性类	吡唑醚菌酯	8.12×10^{-2}	2.68×10^{-1}
	灭蝇胺		
	吡虫啉		
	丙环唑		
	咪鲜胺		
	多菌灵		
	毒死蜱		
神经毒性类	毒死蜱	4.91×10^{-2}	1.62×10^{-1}
	噻虫胺		
	马拉硫磷		

注: 农药毒性效应来源于农药性质数据库(pesticide properties database, PPDB)数据。

3　讨论与结论

本研究构建了 HPLC-MS/MS 和 GC-MS/MS 方法对 2019—2024 年 162 份海南省芹菜样品中 38 种农药进行筛查和定性定量分析, 并基于上述结果分别进行了急性、慢性膳食风险评估和毒性效应累积风险评估, 该研究能一定程度上反映海南省芹菜的质量安全。

研究表明芹菜样品中农药残留检出率高达 87.0%, 农药单一残留检出率为 12.3%, 多残留检出率为 74.7%, 单个样品最多检出农药 14 种, 表明芹菜中农药残留呈现普遍性、多残留并存的特点。超标农药包括 3 种, 分别为噻虫嗪、噻虫胺和禁用农药毒死蜱, 提示违规用药问题仍需高度关注。采用点评估方法和危害指数评估法对芹菜中单一农药残留进行膳食风险评估, 芹菜中单一农药对成人的慢性膳食风险范围为 1.51×10^{-4}~4.69×10^{-2}, 对儿童的慢性膳食风险范围为 4.99×10^{-4}~1.55×10^{-1}; 单一农药对成人的急性膳食风险范围为 8.47×10^{-4}~2.48×10^{-1}, 对儿童的急性膳食风险范围为 2.79×10^{-3}~8.19×10^{-1}。单一农药摄入慢性膳食和急性膳食对成人和儿童风险值均小于 1, 表明单一农药对消费者安全风险可以忽略。内分泌干扰类农药、皮肤刺激类农药、生殖毒性和神经毒性类农药对成人和儿童的累积风险范围分别为 2.71×10^{-2}~9.61×10^{-2} 和 8.94×10^{-2}~3.17×10^{-1}, 安全风险可忽略。

综合评估表明, 尽管芹菜样品中农药检出率高、多残留现象普遍, 但所检农药的残留水平通过膳食摄入对成人和儿童的健康风险均处于可接受范围, 安全风险可忽略。在海南省的推动下, 通过构建质量安全追溯系统、普及绿色防控技术、引导农户规范用药等系列措施, 芹菜等农产品的农药残留得到有效管控, 质量安全水平持续提升。

参考文献

[1] Zhang Changpeng, Luo Yuqin, Jiang Jinhua, et al. Physiological and biochemical variations in celery by imidacloprid and fenpyroximate [J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4306.

[2] Guo Chunjing, Li Guang, Lin Qiujun, et al. Residual dynamics and dietary exposure risk of dimethoate and its metabolite in greenhouse celery [J]. PeerJ, 2021, 9: e10789.

[3] Zhang Changpeng, Li Yanjie, Luo Yuqin, et al. Residue and risk assessment of imidacloprid and chlorantraniliprole in open field and greenhouse celery [J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(5): 835–843.

[4] Chen Liping, Wu Changxing, Xu Mingfei, et al. Assessment of carbendazim residues and safety in celery under different cultivation conditions [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(2): 276–280.

[5] Hedayati N, Bemani Naeini M, Mohammadinejad A, et al. Beneficial effects of celery (*Apium graveolens*) on metabolic syndrome: a review of the existing evidences [J]. Phytotherapy Research, 2019, 33(12): 3040–3053.

[6] 陈武瑛, 李凯龙, 李宗云, 等. 3 种烟碱类农药在露地芹菜中的沉积、分布和消解规律[J]. 农药, 2022, 61(5): 364–369.
Chen Wuying, Li Kailong, Li Zongyun, et al. Deposition, distribution and dissipation dynamics of 3 neonicotinoid pesticides under open field celery cultivation [J]. Agrochemicals, 2022, 61(5): 364–369.

[7] 李镓妤, 李安, 陈艳, 等. 露地土壤-芹菜体系噻虫嗪及其代谢产物噻虫胺残留与消长规律研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3697–3703.
Li Jiayu, Li An, Chen Yan, et al. Study on residues, growth and decline of thiamethoxam and its metabolite clothianidin in open field of soil-celery system [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3697–3703.

[8] 黄健祥, 谢书越, 唐雪妹, 等. 豇豆中灭蝇胺残留分析与膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 263–269.
Huang Jianxiang, Xie Shuyue, Tang Xuemei, et al. Analysis and dietary risk assessment of cyromazine residue in cowpea [J]. Modern Food

Science & Technology, 2023, 39(11): 263–269.

[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 Li, Wang Wei, Hu Jiawei, 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] 汤晗, 吴园园, 成亚菲, 等. 浙江省芹菜中农药多残留水平及累积急性膳食摄入风险初评[J]. 农药学学报, 2021, 23(5): 947–955.
Tang Han, Wu Yuanyuan, Cheng Yafei, et al. Pesticides residue levels and cumulative acute dietary intake risk assessment of celery in Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2021, 23(5): 947–955.

[11] Xiao Ouli, Li Minmin, Chen Deyong, et al. The dissipation, processing factors, metabolites, and risk assessment of pesticides in honeysuckle from field to table [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431: 128519.

[12] Jiang Ying, Zhuang Maoqiang, Xiao Peirui, et al. Pesticide residues and dietary risk assessment in radishes in Shandong [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(10): 4751–4760.

[13] Li Jianxun, Chen Wenhui, Deng Kailin, et al. Monitoring and dietary exposure assessment of pesticide residues in strawberry in Beijing, China [J]. Food Additives & Contaminants: Part B, 2022, 15(2): 98–105.

[14] 孙江, 温雅君, 高景红, 等. 芹菜农药残留监测结果分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 151–154.
Sun Jiang, Wen Yajun, Gao Jinghong, et al. Analysis for pesticide residue monitoring in celery [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(2): 151–154.

[15] Richardson J R, Fitsanakis V, Westerink R H S, et al. Neurotoxicity of pesticides [J]. Acta Neuropathologica, 2019, 138(3): 343–362.

[16] 王悦. 三唑类杀菌剂的健康效应及毒理机制研究[D]. 太原: 山西大学, 2023: 1–8.
Wang Yue. Research on health effect and toxicological mechanism oftriazole [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023: 1–8.

[17] Sidhu G K, Singh S, Kumar V, et al. Toxicity, monitoring and biodegradation of organophosphate pesticides: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49(13): 1135–1187.

[18] 晁桂梅. 液相色谱-质谱法测定芹菜和香蕉中 16 种农药残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 241–247.
Chao Guimei. Determination of 16 kinds of pesticide residues in celery and banana by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 241–247.

[19] 唐雪梅, 纪铖臻, 卢明瑞, 等. 热带果蔬农药残留处理方法及降解技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(19): 1–12.
Tang Xuemei, Ji Chengzhen, Lu Mingrui, et al. Research progress on treatment methods and degradation techniques of pesticide residues in tropical fruits and vegetables [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(19): 1–12.

[20] 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 Xiaohan, Lin Min, Wan Na, 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.

[21] 伍婷, 李备, 吴龙. 海南热带果蔬农药残留现状分析及对策研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 117–125.
Wu Ting, Li Bei, Wu Long. Research on current situation and countermeasures of pesticide residues in tropical fruit and vegetable in Hainan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 117–125.

[22] 李萌, 许海康, 周娟, 等. 葱、姜、萝卜和豇豆中戊唑醇残留检测及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 2018–2024.
Li Meng, Xu Haikang, Zhou Juan, et al. Residue detection and dietary risk assessment of tebuconazole residues in scallion, ginger, radish and cowpea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(6): 2018–2024.

[23] World Health Organization. Global Environment Monitoring System-Food contamination monitoring and assessment programme [Z]. FAO/WHO, 2020.

[24] World Health Organization. Inventory of evaluations performed by the Joint Meeting on Pesticide Residues [Z]. WHO, 2020.

[25] 鲍涵冰. 中国市售蔬菜水果中农药残留状况及联合暴露风险评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 41–43.
Bao Hanbing. Pesticide residues in vegetables and fruits in China and joint exposure risk assessment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022: 41–43.

[26] 杨桂玲. 农产品中农药多残留联合暴露风险评估方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017: 1–8.
Yang Guiling. Risk assessment of combined exposure to multiple pesticide residues in agricultural products [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017: 1–8.

[27] 张婉君, 范瑞祺, 黄超, 等. 有害结局路径在农药风险评估及管理中应用的探讨[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 60–69.
Zhang Wanjun, Fan Ruiqi, Huang Chao, et al. Discussion on application of adverse outcome pathway in pesticides risk assessment and management [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 60–69.

[28] 于淦军, 褚姝频, 杨荣明, 等. 芹菜病虫害防控农残风险防范技术[J]. 长江蔬菜, 2021(22): 24–25.
Yu Ganjun, Chu Shupin, Yang Rongming, et al. Techniques of pest control of celery and risk prevention of pesticide residues [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2021(22): 24–25.

[29] Qin Guofu, Chen Yan, He Fengrui, 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.

[30] Hu Di, Jiang Mengmeng, Ge Ting, et al. Pesticide residues in vegetables in four regions of Jilin Province [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1150–1157.

[31] Zhang Quan, Cao Rui, Tang Tao, et al. The integrated exposure assessment and potential risks of five organophosphorus pesticides in vegetables in Zhejiang, China (2018–2020) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 28916–28924.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)