DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251112003
引用格式: 詹千缘, 陈镇, 王琴, 等. 孝感市桃果实的 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂残留消解及膳食摄入风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 261–268.
ZHAN QY, CHEN Z, WANG Q, *et al*. Residue dissipation and dietary intake risk assessment of 4 kinds of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L. fruits from Xiaogan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 261–268. (in Chinese with English abstract).

孝感市桃果实的 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂残留消解及膳食摄入风险评估

詹千缘[1], 陈　镇[1], 王　琴[2], 何　倩[1], 高圆圆[1], 严仕伦[1], 杨玉春[1], 王艳树[1*]
(1. 孝感市农业科学院, 孝感　432000; 2. 孝感市公共检验检测中心, 孝感　432000)

摘　要: 目的　了解拟除虫菊酯类杀虫剂在孝感市桃果中的残留及消解规律, 评估其膳食摄入风险。**方法**　桃果样品经匀浆处理后, 以乙腈为提取溶剂提取目标化合物, 提取液经 N-丙基乙二胺与弗罗里硅土联合净化后, 采用 RTX-5 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)进行色谱分离, 电子捕获检测器检测, 采用外标法进行定量分析, 测定不同稀释倍数处理下施药后 0~23 d 果实中的残留水平。**结果**　方法学验证结果表明, 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在 0.01~1.00 mg/kg 浓度范围内线性关系良好(r^2≥0.9942), 平均回收率为 78.85%~97.62%, 相对标准偏差为 2.12%~6.85%, 最低检出限和定量限分别为 0.001 mg/kg 和 0.003 mg/kg, 表明该检测方法具有良好的灵敏度和准确性。田间试验结果显示, 4 种杀虫剂在桃果实中的残留量均随时间延长下降, 符合一阶动力学消解规律, 半衰期为 2.60~12.95 d。随施药浓度增加, 初始残留量升高; 施药后 5 d 残留降至初始值的 20%~40%, 16~23 d 时多数处理的残留已低于 0.50 mg/kg, 符合食品安全采收间隔要求。膳食风险评估结果表明, 4 种农药在不同稀释倍数下的全国估算日摄入量均远低于每日允许摄入量, 风险商为 0.002~0.103(均<1)。**结论**　在常规施药浓度及采收间隔条件下, 对消费者健康风险较低, 基于消解动力学数据, 建议消解较快的甲氰菊酯与高效氯氟氰菊酯, 采收间隔期建议不低于 16 d; 对于持效性强的高效氯氰菊酯与溴氰菊酯, 建议间隔期延长至 23 d。本研究为孝感市桃果安全用药及拟除虫菊酯类杀虫剂科学施用与管理提供了重要科学依据。

关键词: 拟除虫菊酯; 桃; 农药残留; 膳食风险评估; 消解规律

Residue dissipation and dietary intake risk assessment of 4 kinds of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L. fruits from Xiaogan City

ZHAN Qian-Yuan[1], CHEN Zhen[1], WANG Qin[2], HE Qian[1], GAO Yuan-Yuan[1], YAN Shi-Lun[1], YANG Yu-Chun[1], WANG Yan-Shu[1*]
(1. *Xiaogan Academy of Agricultural Sciences*, *Xiaogan* 432000, *China*;
2. *Xiaogan Public Inspection and Detection Center*, *Xiaogan* 432000, *China)*

收稿日期: 2025-11-12
第一作者: 詹千缘(2000—), 女, 初级农艺师, 主要研究方向为植物保护农药学。E-mail: 1459735597@qq.com
***通信作者:** 王艳树(1981—), 男, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: 271228076@qq.com

ABSTRACT: Objective To understand the residues and dissipation dynamics of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L. fruits from the Xiaogan City and assess their dietary intake risk. **Methods** *Prunus persica* L. fruit samples were homogenized, and the target compounds were extracted using acetonitrile as the extraction solvent. The extracts were purified using a combination of primary secondary amine and Florisil. Chromatographic separation was performed on an RTX-5 capillary column (30 m×0.25 mm, 0.25 μm), and detection was carried out using an electron capture detector. Quantification was achieved by the external standard method to determine the residue levels in fruits at 0–23 days after application under different dilution treatments. **Results** Method validation results showed that the 4 kinds of pyrethroid insecticides exhibited good linearity within the concentration range of 0.01–1.00 mg/kg ($r^2 \geqslant$ 0.9942). The average recoveries ranged from 78.85% to 97.62%, with relative standard deviations between 2.12% and 6.85%. The limits of detection and limits of quantitation were 0.001 mg/kg and 0.003 mg/kg, respectively, indicating that the method possesses satisfactory sensitivity and accuracy. Field trial results demonstrated that the residue levels of the 4 kinds of insecticides in peach fruits decreased significantly over time, following first-order kinetic dissipation patterns, with half-lives ranging from 2.60 to 12.95 days. The initial residue concentration increased significantly with higher application concentrations. Residues decreased to 20%–40% of the initial values by day 5 after application, and most treatments showed residue levels below 0.50 mg/kg at 16–23 days, meeting the pre-harvest interval requirements for food safety. Dietary risk assessment indicated that the national estimated daily intakes of the 4 kinds of pesticides under different dilution treatments were substantially lower than their corresponding acceptable daily intakes. The risk quotients ranged from 0.002 to 0.103 (all<1). **Conclusion** Under regular application concentrations and harvest interval conditions, the health risk to consumers is relatively low. Based on the dissipation kinetic data, it is recommended that for the rapidly degrading fenpropathrin and lambda-cyhalothrin, the pre-harvest interval should be no less than 16 days; for the more persistent beta-cypermethrin and deltamethrin, the interval should be extended to 23 days. This study provides important scientific evidence for the safe application of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L. orchards in the Xiaogan City and offers technical support for their scientific use and management.

KEY WORDS: pyrethroids; *Prunus persica* L.; pesticide residues; dietary risk assessment; dissipation dynamics

0 引 言

桃(*Prunus persica* L.)属于蔷薇科李属桃亚属的核果类植物，是全球广泛栽培和最常食用的水果之一，也是我国重要的经济作物[1–3]。桃原产于我国，距今已有约 4000 多年的栽培历史，其种植面积和产量均居世界首位[4]。成熟果实不仅质地柔软、汁液丰富，且富含多种营养成分，同时具有特殊的芳香风味，在国内外市场上广受欢迎[5–8]。

孝感市是我国重要桃产区之一，当地桃树品种资源丰富，目前已培育和引种“砂子”“鄂桃 2 号”“曙光”“中油 4 号”等约 60 个品种。孝感桃以果实大、肉厚、皮薄、色泽美丽、味甜著称，糖度可达 10%~12%，多次获得省级及国家级品牌认证，如“孝感早蜜桃”获评湖北省十大名果和国家地理标志产品，“七仙红”系列桃被授予“湖北名桃”称号[9–11]。丰富的品种资源和良好的市场声誉，使孝感成为开展桃树农药残留与安全性研究的理想区域。桃树在 6—9 月进入果实膨大和成熟采收期，此时气温高，虫害发生频繁，尤其是桃蛀螟、桃小食心虫、蚜虫等害虫对果实危害严重，常导致桃果虫孔、提早脱落或品质下降[12–15]。为保障桃果产量和品质，化学农药成为桃生产过程中虫害防治的重要手段[16–19]。截至 2025 年 9 月，中国农药信息网在桃上登记的农药制剂产品信息 534 条，其中包括 37 种植物生长调节剂、271 种杀虫剂和 226 种杀菌剂[20]。这表明桃树病虫害防控中对农药的依赖程度较高，其中杀虫剂占比最大，是保障桃园产量和品质的核心投入。

拟除虫菊酯类农药因具有高效、广谱、低毒等特点，在桃树生产上应用广泛，如甲氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、高效氯氰菊酯、溴氰菊酯等[21]，该类农药主要通过作用于昆虫神经系统钠离子通道导致虫体麻痹死亡[22–23]。然而，桃果实表面残留的拟除虫菊酯可能对消费者健康及生态环境带来潜在风险尤其对水生生物和蜜蜂等非靶标生物敏感[24]。柳璇等[25]研究表明，氟啶虫酰胺和联苯菊酯在桃上的半衰期分别为 2.5~5.6 d、1.6~6.7 d，属易消解农药。史梦竹等[26]研究显示，在番木瓜上使用 25 g/L 高效氯氟氰菊酯乳油，不会对我国不同年龄段消费者的健康产生不可

接受的风险。

目前, 拟除虫菊酯类农药残留检测常采用气相色谱法(gas chromatography, GC)或气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)等技术[26–30]。其中, 气相色谱-电子捕获检测器(gas chromatography-electron capture detector, GC-ECD)具有选择性高、灵敏度强、重现性好等优点, 是检测此类农药残留的常用手段[31–32]。本研究针对孝感桃树上常用拟除虫菊酯类农药, 开展田间残留水平测定、消解动力学分析及膳食风险评价评估, 以期为桃果安全生产和科学用药提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与药剂

正己烷(色谱纯)、乙腈(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); 无水乙酸乙酯(分析纯, 阿拉丁试剂上海有限公司); N-丙基乙二胺(N-propyl ethylenediamine, PSA)、分散固相萃取(dispersive solid-phase extraction, d-SPE 吸附剂)(美国 Sigma-Aldrich 公司); 无水硫酸镁(分析纯, 美国 Merck 公司); 弗罗里硅土(美国 Supelco 公司); 25 g/L 溴氰菊酯乳油(中国农药登记号 PD20080883, 拜耳作物科学有限公司); 20%甲氰菊酯乳油(中国农药登记号 PD20070497, 浙江省东阳市金鑫化学工业有限公司); 4.5%高效氯氰菊酯乳油(中国农药登记证号 PD20050184, 河北中保绿农作物科技有限公司); 5%高效氯氟氰菊酯微乳剂(中国农药登记号 PD20132398, 山东申达作物科技有限公司)。

1.2　仪器设备

GC-2010 型气相色谱仪配 ECD 检测器、RTX-5 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司); DSY-VI 型氮吹仪(上海东精华苑科技公司); B-490 型旋转蒸发仪(瑞士 BUCHI 公司); QL-901 型旋涡混合器(上海浦东物理光学仪器厂); ALC-210.4 型电子天平(精度 0.01 mg, 德国 ACCULAB 公司); H1850 型离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); ULTRA-TURRAX 型分散机(广州艾卡仪器设备有限公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　田间试验

在孝感市农业科学院西河桃园基地(30.92°N, 113.92°E)开展拟除虫菊酯类杀虫剂在桃树上的田间残留与消解试验。试验药剂包括溴氰菊酯、甲氰菊酯、高效氯氰菊酯和高效氯氟氰菊酯。每种药剂设 3 个重复小区, 分别用于消解试验、残留试验及空白对照, 每个小区种植桃树 5 株。施药时, 甲氰菊酯、高效氯氟氰菊酯和溴氰菊酯乳油分别按 3000、2000、1000 倍稀释使用; 高效氯氰菊酯乳油按 1500、1000 和 500 倍稀释。采样时间设定为施药后 0、1、5、7、9、12、16 和 23 d。采样时采用对角线法, 从各小区不同方位随机采集不少于 1 kg 的成熟果实, 去核后充分匀浆粉碎备用, 并记录果核占比。

1.3.2　样品前处理

称取 5 g 桃果果肉置于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 乙腈在漩涡振荡器上振荡 2 min 静置 3 min。随后加入 1g 氯化钠再次剧烈振荡 1 min, 于 6000 r/min 离心 5 min, 使乙腈相和水相分层。

准确移取 5 mL 上层乙腈提取液, 放置事先装有无水硫酸镁(150 mg)、PSA (50 mg)、弗罗里硅土(50 mg)的 15 mL d-SEP 净化管中, 涡旋振荡 1 min, 再以 6000 r/min 离心 10 min。取 2.0 mL 上层澄清的净化液, 经 0.22 μm 有机相针头式过滤器过滤, 滤液收集于 10 mL 浓缩管中。将该滤液置于 40 °C 水浴中, 在温和氮气流下吹至近干, 加入 1.0 mL 正己烷复溶残渣, 涡旋混匀 30 s, 所得溶液转移至进样瓶, 供 GC-ECD 分析。

1.3.3　气相色谱条件

采用 RTX-5 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)进行 GC-ECD 分析。进样口温度设为 260 ℃, 采用不分流进样方式, 进样体积 1 μL。载气为高纯氮气(99.999%), 流速 1.0 mL/min。柱温程序为初始 160 ℃保持 5 min, 以每分钟 10 ℃升温至 200 ℃, 再以每分钟 10 ℃升温至 250 ℃并保持 10 min, 随后以每分钟 10 ℃升温至 280 ℃。检测器温度设为 280 ℃, ECD 电流 1.0 nA。

1.3.4　方法确认

(1)标准曲线

以经 GC-ECD 检测未检出溴氰菊酯、甲氰菊酯、高效氯氰菊酯和高效氯氟氰菊酯的桃样品作为空白基质, 配制加标样品用于方法确认。为全面评估方法的线性范围、准确性和精密度, 根据 GB 2763—2021《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》, 选择 0.01、0.05、0.10、0.50 和 1.00 mg/kg 5 个浓度, 每个浓度设 3 次重复。采用外标法绘制溶剂标准曲线和基质匹配标准曲线, 并计算决定系数(r^2)。方法的定量限(limit of quantitation, LOQ)取最低可满足准确度和精密度要求的加标浓度, 即 0.001 mg/kg。

(2)回收率和精密度

在空白桃样品中分别加入溴氰菊酯、甲氰菊酯、高效氯氰菊酯和高效氯氟氰菊酯标准溶液, 使添加后浓度分别为 0.01、0.05、0.10、0.50 和 1.00 mg/kg, 充分摇匀后静置 25 min, 每个浓度设 3 次重复。按照前处理方法分析样品, 并计算各浓度水平的回收率和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD), 用于评价方法的可靠性和精密度。

1.3.5　膳食风险评估

根据 GB 2763—202, 甲氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、高效氯氰菊酯和溴氰菊酯的每日允许摄入量(acceptable daily

intake, ADI)分别为 0.03、0.02、0.02 和 0.01 mg/kg bw, 以此作为健康指导值。

采用公式(1)~(2)计算桃中拟除虫菊酯类杀虫剂的日均膳食暴露量(national estimated daily intake, NEDI)和风险商(risk quotient, RQ):

$$NEDI=(CRL\times FI\times 100)/bw \quad (1)$$

$$RQ=NEDI/ADI \quad (2)$$

式中: NEDI, mg/kg bw; CRL 为桃中农药残留水平(pesticide residue level), mg/kg; FI 为桃的日均摄入量(food intake), 根据中国居民膳食指南(2022 版)推荐桃日均摄入量按 0.0335 kg/d 取值; bw 为消费者体重(body weight), 按我国成年人平均体重 60 kg 计算; 100 为安全系数; ADI, mg/kg bw。

当 RQ≤1 时, 表示健康风险处于可接受范围, RQ 越小, 风险越低; 当 RQ>1 时, 可能对人类健康构成潜在风险。

1.4 数据处理

统计分析表明, 农药残留与时间的关系可用方程 $C_t=C_0e^{-kt}$ 描述, 其中 C_t 为时间 t 后的残留浓度, mg/kg; C_0 为初始残留浓度, mg/kg; k 为消散速率常数, d。试验数据采用 Microsoft Office Excel 2019 进行初步整理, 使用 SPSS 29.0 软件进行统计分析, 采用 GraphPad Prism 10.0 软件对数据进行可视化制图。

2 结果与分析

2.1 方法有效性评价

为验证检测方法的线性关系与基质效应, 分别建立了甲氰菊酯、高效氯氰菊酯、高效氯氟氰菊酯和溴氰菊酯的溶剂标准曲线与基质匹配标准曲线(表 1)。结果显示, 4 种杀虫剂在 0.01~1.00 mg/kg 质量浓度范围内线性关系良好, 决定系数(r^2)均大于等于 0.9942, 说明方法具有较高的线性可靠性。基质效应结果表明, 甲氰菊酯、高效氯氟氰菊酯、高效氯氰菊酯和溴氰菊酯的基质效应分别为−6.25%、−7.11%、8.33%和−12.70%, 其绝对值均低于 20%, 说明基质对信号响应的影响较小, 方法学验证结果满足农药残留分析要求。

在 0.01~1.00 mg/kg 添加水平下进行加标回收试验, 每个浓度 3 次重复。4 种药剂的平均回收率范围为 78.85%~97.62%, RSDs 为 2.12%~6.85%, 均符合农药残留检测精密度与准确度要求(RSD<10%)[16]。其中, 高效氯氟氰菊酯在 1.0 mg/kg 水平下的回收率最高(97.62%), 而溴氰菊酯在 0.01 mg/kg 水平下的回收率最低(78.85%), 但总体仍处于可接受范围。通过信噪比计算, 最低检出限(limit of detection, LOD)为 0.001 mg/kg, LOQ 为 0.003 mg/kg。结果表明, 所建立的气相色谱检测方法在低浓度范围内具有良好的线性、准确性与灵敏度, 可用于桃果中拟除虫菊酯类农药残留的定量分析。

2.2 消解试验结果

不同稀释倍数下, 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃果实中的残留量随时间呈现明显的动态变化(表 2)。施药后 0 d (1 h), 即可在桃果中检测到较高水平的农药残留, 初始残留量随杀虫剂稀释倍数的降低(浓度升高)而增加, 表明稀释倍数对果实中农药的初始残留量具有重要影响。其中, 甲氰菊酯在 1000 倍液处理下的初始残留量最高(10.300 mg/kg), 而溴氰菊酯在 3000 倍液处理下最低(0.758 mg/kg), 说明杀虫剂浓度直接决定了药剂在果实表面的初始附着量。

随时间推移, 4 种杀虫剂残留量均呈下降趋势。施药后 5 d, 残留量降至初始值的 20%~40%; 16~23 d 多数处理的残留量已接近或低于 0.50 mg/kg, 符合食品安全采收间隔的要求。在相同时间点, 不同药剂及稀释倍数处理间残留下降速率差异明显。甲氰菊酯在高倍稀释(3000 倍)下降解较快, 而高效氯氰菊酯在低倍稀释(1000 倍)处理下降解较慢, 表现出较强持效性。

根据 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃果实中的残留量随时间变化数据, 采用一级动力学方程进行拟合(表 3), 不同药剂及稀释处理的残留动态均符合一阶消解规律, 决定系数(r^2)在 0.77~0.97 之间, 说明模型拟合效果良好。不同杀虫剂及稀释倍数间的半衰期存在显著差异。

总体趋势表明, 4 种杀虫剂的消解速率依次为: 甲氰菊酯>高效氯氟氰菊酯>高效氯氰菊酯>溴氰菊酯。其中, 甲氰菊酯的半衰期为 2.60~5.23 d, 表现出较快的消解趋势。随药液浓度升高(稀释倍数降低), 其降解速率略有减缓, 其中 3000 倍稀释处理下半衰期最短(2.60 d), 而 2000 倍稀释时延长至 5.23 d, 表明在中等浓度下果面残留的持效性相对增强。高效氯氟氰菊酯的半衰期为 3.76~6.68 d, 在 3000 倍稀释时降解最快(3.76 d), 而 2000 倍稀释时半衰期最长(6.68 d), 说明其消解速率并不完全随浓度升高而单调变化,

表 1 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂的溶剂和基质标准曲线方程

Table 1 Solvent-based and matrix-based calibration curves equations of 4 kinds of pyrethroid insecticides

农药名称	溶剂标准曲线方程	基质标准曲线方程	决定系数(r^2)	基质效应/%
甲氰菊酯	$Y=1.12\times10^6X+4.02\times10^4$	$Y=1.05\times10^6X+4.20\times10^4$	0.9942	−6.25
高效氯氟氰菊酯	$Y=4.95\times10^6X+1.60\times10^5$	$Y=4.60\times10^6X+1.68\times10^5$	0.9970	−7.11
高效氯氰菊酯	$Y=1.20\times10^6X+3.30\times10^5$	$Y=1.30\times10^6X+3.12\times10^4$	0.9988	8.33
溴氰菊酯	$Y=1.18\times10^6X+1.89\times10^4$	$Y=1.03\times10^6X+2.03\times10^4$	0.9975	−12.70

表 2　4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在不同稀释倍数下的消解残留量

Table 2　Residue degradation of 4 kinds of pyrethroid insecticides under different dilution ratios

采样间隔时间	甲氰菊酯/(mg/kg)			高效氯氟氰菊酯/(mg/kg)			高效氯氰菊酯/(mg/kg)			溴氰菊酯/(mg/kg)		
	3000 倍	2000 倍	1000 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍	1500 倍	1000 倍	500 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍
0 (1 h)	4.870	6.360	10.300	1.110	1.720	1.980	2.420	2.770	4.100	0.758	0.890	1.360
1 d	3.420	4.750	5.510	0.895	1.310	1.210	1.940	1.920	2.520	0.614	0.481	0.722
5 d	1.340	3.170	3.120	0.361	0.953	0.929	0.947	1.810	1.720	0.275	0.553	0.487
7 d	0.761	2.030	3.530	0.197	0.621	0.717	0.510	1.200	2.190	0.153	0.342	0.592
9 d	0.723	1.330	2.080	0.208	0.392	0.549	0.548	0.651	1.280	0.181	0.209	0.379
12 d	0.852	2.050	1.560	0.286	0.803	0.450	0.937	1.470	1.060	0.295	0.472	0.259
16 d	0.446	0.749	0.869	0.157	0.293	0.268	0.599	0.745	0.699	0.270	0.390	0.169
23 d	0.190	0.438	0.737	0.085	0.222	0.300	0.210	0.591	0.724	0.112	0.234	0.143

表 3　4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃中的消解动态方程及其相关参数

Table 3　Dissipation kinetic equations and related parameters of 4 kinds of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L.

农药	稀释处理	消解动态方程	决定系数	半衰期/d
甲氰菊酯	3000 倍	$Y=4.626e^{-0.266X}$	0.9667	2.60
	2000 倍	$Y=5.935e^{-0.1325X}$	0.9507	5.23
	1000 倍	$Y=8.742e^{-0.166X}$	0.9051	4.17
高效氯氟氰菊酯	3000 倍	$Y=1.079e^{-0.1843X}$	0.9413	3.76
	2000 倍	$Y=1.576e^{-0.1037X}$	0.8787	6.68
	1000 倍	$Y=1.708e^{-0.1201X}$	0.9068	5.77
高效氯氰菊酯	1500 倍	$Y=2.246e^{-0.1336X}$	0.8576	5.18
	1000 倍	$Y=2.406e^{-0.07624X}$	0.7737	9.09
	500 倍	$Y=3.525e^{-0.1017X}$	0.8907	6.81
溴氰菊酯	3000 倍	$Y=0.6863e^{-0.1199X}$	0.8145	5.78
	2000 倍	$Y=0.6703e^{-0.05349X}$	0.8837	12.95
	1000 倍	$Y=1.130e^{-0.1261X}$	0.8682	5.49

可能与药液在果面形成的附着膜厚度及蒸发速率有关。高效氯氰菊酯的半衰期为 5.18~9.09 d, 其中低稀释倍数(1000 倍)处理时半衰期最长(9.09 d), 表明在较高浓度下药剂在果实表面持效性更强。溴氰菊酯的半衰期变化范围为 5.49~12.95 d, 其中在 2000 倍稀释时半衰期最大(12.95 d), 为 4 种药剂中降解最慢的化合物, 表明其在果面具有较高稳定性。

总体来看, 稀释倍数的变化对各药剂的消解速率均产生一定影响, 但并非严格的线性关系。部分处理中(如 2000 倍稀释)出现半衰期延长的现象, 可能与药液分布均匀性、果面蜡质层吸附性或局部微环境差异有关。结果表明, 4 种药剂在桃果实中的消解行为既受其理化性质支配, 也受施药浓度及基质环境的交互作用影响, 应在实际使用中综合考虑药剂特性与施药量, 以科学确定安全采收间隔。

2.3　膳食风险评估结果

根据《中国居民膳食指南》推荐的桃果日均摄入量(0.0335 kg/d)和成年人平均体重(60 kg), 计算不同稀释倍数处理下 4 种拟除虫菊酯杀虫剂的 NEDI 与 RQ(表 4、表 5)。结果显示, 4 种杀虫剂的 NEDI 为 0.0001~0.0030 mg/kg bw, 低于对应的 ADI(甲氰菊酯 0.03 mg/kg bw; 高效氯氰菊酯 0.02 mg/kg bw; 高效氯氟氰菊酯 0.02 mg/kg bw; 溴氰菊酯 0.01 mg/kg bw); RQ 范围为 0.003~0.103 (<1), 表明在常规施药浓度条件下, 4 种药剂对消费者的膳食暴露风险均较低。

从时间上看, 施药初期(1 d)部分处理的 RQ 相对较高, 其中甲氰菊酯 1000 倍液处理的 RQ 最大(0.103), 但仍明显低于风险阈值(RQ=1)。随着残留浓度的下降, 4 种药剂的 NEDI 与 RQ 值整体上均呈递减趋势, 施药后 5~7 d 时降至初始水平的一半以下, 16~23 d 时多数处理的 RQ 已低于

表 4 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃中的 NEDI (mg/kg bw)
Table 4 NEDI of 4 kinds of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L. (mg/kg bw)

采样间隔时间/d	甲氰菊酯			高效氯氟氰菊酯			高效氯氰菊酯			溴氰菊酯		
	3000 倍	2000 倍	1000 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍	1500 倍	1000 倍	500 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍
1	0.0019	0.0026	0.0030	0.0011	0.0011	0.0014	0.0005	0.0007	0.0007	0.0003	0.0002	0.0004
5	0.0007	0.0017	0.0017	0.0005	0.0010	0.0009	0.0002	0.0005	0.0004	0.0002	0.0003	0.0003
7	0.0004	0.0011	0.0019	0.0002	0.0006	0.0012	0.0001	0.0004	0.0005	0.0001	0.0001	0.0003
9	0.0004	0.0007	0.0011	0.0002	0.0002	0.0007	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	0.0002
12	0.0004	0.0011	0.0008	0.0005	0.0004	0.0005	0.0001	0.0004	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002
16	0.0002	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004	0.0004	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002
23	0.0001	0.0002	0.0004	0.0001	0.0003	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

表 5 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃中的 RQ
Table 5 RQ of 4 kinds of pyrethroid insecticides in *Prunus persica* L.

采样间隔时间/d	甲氰菊酯			高效氯氟氰菊酯			高效氯氰菊酯			溴氰菊酯		
	3000 倍	2000 倍	1000 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍	1500 倍	1000 倍	500 倍	3000 倍	2000 倍	1000 倍
1	0.064	0.088	0.103	0.054	0.053	0.071	0.025	0.036	0.034	0.034	0.027	0.040
5	0.025	0.046	0.046	0.027	0.050	0.048	0.010	0.027	0.020	0.015	0.031	0.027
7	0.016	0.033	0.039	0.014	0.033	0.061	0.006	0.017	0.026	0.009	0.019	0.033
9	0.015	0.024	0.029	0.016	0.018	0.036	0.006	0.010	0.014	0.010	0.012	0.021
12	0.028	0.046	0.031	0.026	0.041	0.029	0.008	0.025	0.014	0.016	0.026	0.040
16	0.009	0.014	0.016	0.016	0.021	0.019	0.005	0.007	0.003	0.015	0.022	0.009
23	0.004	0.008	0.012	0.006	0.016	0.020	0.003	0.012	0.014	0.006	0.013	0.008

0.02, 风险水平处于可忽略范围。其中, 甲氰菊酯与高效氯氰菊酯在低倍稀释(高浓度)条件下初期风险相对较高, 而高效氯氟氰菊酯和溴氰菊酯在各稀释梯度下均维持较低的膳食风险水平。

综合残留消解规律与膳食风险评估结果可知, 在本研究条件及常规施药浓度下, 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在桃果实中的残留量均不会对消费者造成显著的膳食健康风险, 其使用安全可靠。研究结果为孝感市桃果农药安全使用、农产品质量控制及拟除虫菊酯类农药的风险管理提供了科学依据。

3 结 论

本研究采用 GC-ECD 系统分析了甲氰菊酯、高效氯氰菊酯、高效氯氟氰菊酯和溴氰菊酯在孝感市桃果实中的残留消解规律及膳食风险。结果表明, 4 种药剂的消解均符合一阶动力学模型, 半衰期为 2.60~12.95 d; 甲氰菊酯与高效氯氟氰菊酯降解较快, 高效氯氰菊酯与溴氰菊酯持效性较强。膳食风险评估显示, 其 NEDI 远低于 ADI, RQ 为 0.003~0.103 (均小于 1), 表明在合理采收间隔下, 单一农药残留的长期膳食风险可接受。但需指出, 此结论基于“单一农药-膳食暴露”模型, 实际生产中需考虑人体累积暴露及生态环境影响。

本研究结合消解动力学数据及 GB 2763—2021 规定的最大残留限量(甲氰菊酯 5 mg/kg、高效氯氰菊酯 1 mg/kg、高效氯氟氰菊酯 0.5 mg/kg、溴氰菊酯 0.05 mg/kg)和采样间隔时间的消解残留量来看, 对消解较快的甲氰菊酯与高效氯氟氰菊酯, 建议安全采收间隔期不低于 16 d; 对持效性较强的高效氯氰菊酯与溴氰菊酯(尤其最大残留限量严格的溴氰菊酯), 建议间隔期延长至 23 d。施药时应严格按标签推荐剂量(如 1000~3000 倍液)使用, 避免采收前加量; 同时建议与作用机制不同的药剂(如新烟碱类)轮换使用, 每季不超过 2 次, 以延缓抗性、降低多重残留风险, 并注意避开花期及水源区域以保护生态。

本研究为拟除虫菊酯类农药在桃树上的科学施用提供了实验依据, 为孝感市果品安全用药、农药残留风险评估及农产品质量安全监管提供了技术支撑。

参考文献

[1] 陈昌文. 桃果实“慢溶质”软化的生理基础及育种可用基因挖掘[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.

CHEN CW. Physiological basis of “slow-melting” fruit softening and mining of breeding-available genes in peach [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.

[2] LI Z, NIE J, YAN Z, *et al*. A monitoring survey and dietary risk assessment for pesticide residues on peaches in China [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2018, 97(5): 152–162.

[3] LIU Q, ZHAN N, ZHOU D, *et al*. Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose [J]. Food Chemistry, 2018, 262(11): 226–234.

[4] 雷庆国, 刘艳, 薛红燕, 等. 四个桃品种在济宁的引种表现与栽培要点[J]. 西北园艺, 2025(4): 65–67.
LEI QG, LIU Y, XUE HY, *et al*. Introduction performance and cultivation points of four peach varieties in Jining [J]. Northwest Horticulture, 2025(4): 65–67.

[5] 李依尘. 11 个水蜜桃品种果实糖酸和芳香品质分析评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
LI YC. Analysis and evaluation of sugar-acid ratio and aroma quality of 11 honey peach cultivars [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.

[6] HAN S, CAI H, AN X, *et al*. Effect of nitric oxide on sugar metabolism in peach fruit (cv. Xiahui 6) during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018(3): 72–80.

[7] 张倩, 张晶, 白冬红, 等. 肥桃采后生理变化及贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农产品加工, 2017(23): 69–73.
ZHANG Q, ZHANG J, BAI DH, *et al*. Research progress on postharvest physiological changes and preservation technology of peach [J]. Agricultural Products Processing, 2017(23): 69–73.

[8] 梅道源, 王晨, 王忠红. 我国桃育种研究进展. 安徽农学通报, 2022, 28(2): 55–57.
MEI DY, WANG C, WANG ZH. Progress in peach breeding research in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(2): 55–57.

[9] 余露. “七仙红”鲜桃的品牌成长路[J]. 中国农民合作社, 2014(7): 26–27.
YU L. Brand development of “Qixianhong” fresh peach [J]. China Farmers’ Cooperatives, 2014(7): 26–27.

[10] 梅四新, 高爱华. 湖北桃产业提质增效发展建议[J]. 果农之友, 2025(9): 124–126.
MEI SX, GAO AIH. Suggestions on improving quality and efficiency of peach industry in Hubei [J]. Fruit Growers’ Friend, 2025(9): 124–126.

[11] 赵玉山. 湖北: 孝昌县多措并举促桃产业稳步发展[J]. 中国果业信息, 2024, 41(4): 54.
ZHAO YS. Hubei: Multiple measures promote steady development of the peach industry in Xiaochang County [J]. China Fruit News, 2024, 41(4): 54.

[12] 陈小龙, 王亚, 程金金, 等. 啶虫脒在桃上的残留消解规律与膳食风险评估[J]. 农药学学报, 2021, 23(3): 545–551.
CHEN XL, WANG Y, CHENG JJ, *et al*. Dissipation and dietary risk assessment of acetamiprid residues in peach [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2021, 23(3): 545–551.

[13] 韩健, 孙素芬, 吴邦良. 桃典型病虫害防治图说[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
HAN J, SUN SF, WU BL. Illustrated guide to control of major diseases and pests of peach [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[14] ZHANG G, WU H, JIANG L, *et al*. Effects of supplemental nutrients on ovarian development andoviposition in *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera:Crambidae) [J]. Environmental Entomology, 2023, 52(3): 446–454.

[15] 王荣成, 刘家魁, 朱晓颖, 等. 防治玉米田桃蛀螟幼虫杀虫剂的筛选[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(6): 42–47, 53.
WANG RC, LIU JK, ZHU XY, *et al*. Screening of insecticides for controlling *Conogethes punctiferalis* larvae in maize field [J]. Pesticide Science and Administration, 2020, 41(6): 42–47, 53.

[16] 李海飞, 聂继云, 徐国锋, 等. 桃中农药残留分析及膳食暴露评估研究[J]. 分析测试学报, 2019, 38(9): 1066–1072.
LI HF, NIE JY, XU GF, *et al*. Analysis of pesticide residues and dietary exposure assessment in peach [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(9): 1066–1072.

[17] 支贝贝. 7 种杀虫剂对桃蛀螟毒力及阿维菌素亚致死效应的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
ZHI BB. Study on toxicity of seven insecticides and sublethal effects of avermectin on *Conogethes punctiferalis* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025.

[18] ULLAH F, GÜNCAN A, ABBAS A, *et al*. Sublethal effects of neonicotinoids on insect pests [J]. Entomologia Generalis, 2024, 44(5): 1145–1160.

[19] 李凯. 高效氯氟氰菊酯对桃蛀螟的亚致死效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
LI K. Sublethal effects of lambda-cyhalothrin on *Conogethes punctiferalis* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025.

[20] 中国农药信息网. 数据中心登记信息[DB/OL]. [2025-11-02]. http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml
China Pesticide Information Net. Data center registration information [DB/OL]. [2025-11-02]. http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml

[21] 白姣洋. 钠离子通道 M918L 突变介导禾谷缢管蚜对高效氯氟氰菊酯的抗性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
BAI JY. Study on sodium channel M918L mutation-mediated resistance of *Sitobion avenae* to lambda-cyhalothrin [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.

[22] 吴文君. 农药学原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
WU WJ. Principles of pesticide science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[23] 巴特. 农拟除虫菊酯降解行为研究进展[Z]. 2005.
BA T. Research progress on pyrethroid degradation [Z]. 2005.

[24] 任晓萍. 桃生产中质量安全分析与控制技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.

REN XP. Study on quality safety analysis and control techniques in peach production [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.

[25] 柳璇, 刘传德, 鹿泽启, 等. 氟啶虫酰胺和联苯菊酯在桃上的残留行为及膳食摄入风险评估[J]. 果树学报, 2019, 36(12): 1712–1719.
LIU X, LIU CD, LU ZQ, *et al*. Residue behavior and dietary intake risk assessment of flonicamid and bifenthrin in peaches [J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(12): 1712–1719.

[26] 史梦竹, 李建宇, 方灵, 等. 高效氯氟氰菊酯在番木瓜中的残留行为及膳食风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2024(1): 9–14.
SHI MZ, LI JY, FANG L, *et al*. Residue behavior and dietary risk assessment of lambda-cyhalothrin in papayas [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2024(1): 9–14.

[27] 张少英, 夏慧. 气相色谱法测定草莓中 17 种有机氯和拟除虫菊酯类农药残留量[J]. 现代农业科技, 2024(9): 167–172.
ZHANG SY, XIA H. Determination of 17 organochlorine and pyrethroid pesticide residues in strawberries by GC [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(9): 167–172.

[28] 王瑞, 曾定玲, 林慧纯, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定植物性农产品中 24 种拟除虫菊酯类农药残留[J]. 农产品质量与安全, 2024(1): 53–57.
WANG R, ZENG DL, LIN HC, *et al*. Determination of 24 pyrethroid residues in plant-based agricultural products by UPLC-MS/MS [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2024(1): 53–57.

[29] 刘炜, 李曦, 陈敏, 等. 喹啉铜在桃中的残留行为及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 179–185.
LIU W, LI X, CHEN M, *et al*. Residual behavior and dietary risk assessment of copper quinolate in peaches [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 179–185.

[30] 何芳, 原东林, 卢永报, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法检测桃中 13 种高关注农药残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4616–4621.
HE F, YUAN DL, LU YB, *et al*. Determination of 13 high-concern pesticide residues in peaches by UPLC-MS/MS [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4616–4621.

[31] 李盛丽. 固相萃取-GC-ECD 检测沃柑中的腐霉利、五氯硝基苯和甲氰菊酯残留[J]. 轻工科技, 2020, 36(7): 125–126.
LI SL. Determination of procymidone, pentachloronitrobenzene and cypermethrin residues in tangor by SPE-GC-ECD [J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(7): 125–126.

[32] 周国威, 任红敏, 刘晋, 等. GC-ECD 法同时测定荆芥中拟除虫菊酯和有机氯类农药残留[J]. 中成药, 2020, 42(3): 675–680.
ZHOU GW, REN HM, LIU J, *et al*. Simultaneous determination of pyrethroid and organochlorine pesticide residues in Schizonepeta tenuifolia by GC-ECD [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2020, 42(3): 675–680.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)