DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250506003
引用格式: 贾惠言, 付岩, 凌淑萍, 等. 15%虫螨腈·氯虫苯甲酰胺悬浮剂在苹果中的残留消解动态及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 202–210.
JIA HY, FU Y, LING SP, *et al*. Dissipation dynamics and dietary exposure risk assessment of 15% chlorfenapyr · chlorantraniliprole suspension concentrate residues in *Malus domestica* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 202–210. (in Chinese with English abstract).

15%虫螨腈·氯虫苯甲酰胺悬浮剂在苹果中的残留消解动态及膳食暴露风险评估

贾惠言[1], 付 岩[1,2], 凌淑萍[1,2], 张 亮[1,2], 王全胜[1,2], 吕 燕[1,2], 吴银良[1,2*]
(1. 宁波市农业科学研究院, 宁波 315040; 2. 宁波市特色农产品质量安全检测与控制重点实验室, 宁波 315040)

摘 要: 目的 对 15%虫螨腈·氯虫苯甲酰胺悬浮剂在苹果上的残留规律及消解动态进行研究, 对其膳食风险进行评估。**方法** 采用 QuEChERS 方法对样品进行前处理, 乙腈提取后, 加盐包净化, 定容过滤后通过超高效液相色谱-串联质谱法进行检测。**结果** 采样间隔 21 d 时, 苹果中虫螨腈总量与氯虫苯甲酰胺的残留中值分别为 0.042 mg/kg 和 0.040 mg/kg, 最高残留浓度分别为 0.37 mg/kg 和 0.26 mg/kg。施药后 7 d, 虫螨腈的消解率为 23.5%~86.7%, 氯虫苯甲酰胺的消解率为 21.8%~61.7%; 施药后 28 d, 虫螨腈的消解率达 49.4%~88.9%, 氯虫苯甲酰胺的消解率达 45.5%~83.3%。氯虫苯甲酰胺的半衰期为 4.6~31.9 d, 虫螨腈的半衰期分别为 2.8~27.8 d。对长期膳食风险而言, 苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺的风险商介于 0.0016%~1.0000%, 远低于 100%; 对于短期膳食风险而言, 苹果中虫螨腈的风险商介于 21.46%~67.90%, 氯虫苯甲酰胺无急性参考剂量, 因此无法计算其急性风险商; 苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺的限量标准均低于最大残留量估计值。**结论** 按照推荐剂量和推荐安全间隔期, 虫螨腈和氯虫苯甲酰胺在苹果中残留量均低于最大残留限量, 对消费者膳食风险均可接受。但需要密切关注虫螨腈对 2~13 岁儿童的短期膳食风险, 警惕在短期内大量摄入引起的高暴露风险。

关键词: 虫螨腈; 氯虫苯甲酰胺; 农药残留; 消解动态; 膳食暴露风险评估

Dissipation dynamics and dietary exposure risk assessment of 15% chlorfenapyr · chlorantraniliprole suspension concentrate residues in *Malus domestica*

JIA Hui-Yan[1], FU Yan[1,2], LING Shu-Ping[1,2], ZHANG Liang[1,2], WANG Quan-Sheng[1,2], LV Yan[1,2], WU Yin-Liang[1,2*]
(1. *Ningbo Academy of Agricultural Sciences*, *Ningbo* 315040, *China*; 2. *Ningbo Key Laboratory of Testing and Control for Characteristic Agro-product Quality and Safety*, *Ningbo* 315040, *China*)

ABSTRACT: Objective To study the residue pattern and dissipation dynamics of 15% chlorfenapyr · chlorantraniliprole

收稿日期: 2025-05-06
基金项目: 宁波市重大科技攻关项目(2025Z102)
第一作者: 贾惠言(1990—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: jhynku@163.com
***通信作者:** 吴银良(1975—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: wupaddyfield@sina.com

suspension concentrate on *Malus domestica* and assess its dietary risk. **Methods** The samples were pretreated by QuEChERS method, extracted with acetonitrile, purified by salt-out, and then filtered to a certain volume. The detection was carried out by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. **Results** At a sampling interval of 21 d, the median residues of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica* were 0.042 mg/kg and 0.040 mg/kg, respectively, with the highest residue concentrations being 0.37 mg/kg and 0.26 mg/kg. The 7 d after application, the dissipation rates of chlorfenapyr and chlorantraniliprole were 23.5% to 86.7% and 21.8% to 61.7%, respectively; 28 d after application, the dissipation rates of chlorfenapyr and chlorantraniliprole were 49.4% to 88.9% and 45.5% to 83.3%, respectively. The half-lives of chlorantraniliprole and chlorfenapyr were 4.6 d to 31.9 d and 2.8 d to 27.8 d, respectively. For long-term dietary risk, the risk quotients of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica* were between 0.0016% and 1.0%, far below 100%; for short-term dietary risk, the risk quotient of chlorfenapyr in *Malus domestica* was between 21.46% and 67.90%, while chlorantraniliprole had no acute reference dose, thus its acute risk quotient could not be calculated. The maximum residue limits of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica* were both lower than the estimated maximum residue levels. **Conclusion** According to the recommended dosage and the recommended pre-harvest interval, the residues of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica* are both below the maximum residue limits, and the dietary risks to consumers are acceptable. However, it is necessary to closely monitor the short-term dietary risk of chlorfenapyr to children aged 2 to 13, and be vigilant against the high exposure risk caused by large intake in a short period.

KEY WORDS: chlorfenapyr; chlorantraniliprole; pesticide residues; dissipation dynamics; dietary exposure risk assessment

0　引　言

根据国家统计局的数据, 2023 年中国苹果产量达 4960.17 万 t, 占全国水果总产量的 15.1%[1]。苹果在成熟过程中容易遭受小食心虫危害[2–4], 目前我国已登记的防治小食心虫的农药有 415 种, 其中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺为目前生产上大力推广应用的低毒农药, 两种农药苹果树上已登记的均为单剂产品。虫螨腈(图 1a)是新型杀虫剂, 通过干扰线粒体膜内外质子平衡, 影响昆虫体内的能量代谢, 最终导致害虫体细胞衰竭而死亡[5–6], 对已产生抗药性的昆虫效果较好。溴代吡咯腈(图 1b)是虫螨腈的代谢产物, 其毒性为母体的 10 倍[7], 对水生生物斑马鱼、海胆等具有较高的胚胎毒性, 易导致畸形[8]。氯虫苯甲酰胺(图 1c)是一种二酰胺类杀虫剂, 于 2008 年在中国进行登记, 对鳞翅目害虫高效, 对天敌影响较小[9–10]。欧盟制定了苹果中氯虫苯甲酰胺和虫螨腈的限量, 分别为 0.4 mg/kg 和 0.01 mg/kg; GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》规定氯虫苯甲酰胺在苹果上的临时限量为 2 mg/kg, 虫螨腈在苹果上的限量标准为 1 mg/kg。目前, 虫螨腈在芥菜、芦笋和青菜上的残留与膳食风险评估已有报道, 虫螨腈母体的检测方法一般为气相色谱-质谱法, 代谢物溴代吡咯腈的检测方法一般为高效液相色谱-串联质谱法[11–13]; 氯虫苯甲酰胺在苹果、桃和山楂上的残留与膳食风险评估也已有报道, 检测方法均为高效液相色谱-串联质谱法[14–16]。尽管上述研究对单一农药的残留进行了分析, 但虫螨腈与氯虫苯甲酰胺复配使用时的消解动态及累积风险尚未明确, 尤其是缺乏对儿童等敏感人群的急性暴露风险评估。

我国苹果产量、消费世界第一, 青少年食用苹果非常普遍, 但虫螨腈和氯虫苯甲酰胺混剂在苹果上的残留与膳食风险评估的研究鲜见报道。本研究通过 QuEChERS 结合超高效液相色谱-串联质谱法, 建立苹果中同时检测虫螨腈、溴代吡咯腈和氯虫苯甲酰胺的分析方法。基于仪器快速检测方法和苹果主产区的田间试验, 探究虫螨腈及其代谢物和氯虫苯甲酰胺在苹果上的消解动态与残留规律, 系统评估两种农药对我国不同年龄及不同性别消费者的长期膳食风险与短期膳食风险, 明确其在不同类别消费者中的膳食暴露风险差异, 为农药在苹果上的科学使用、安全性评价及消费者的合理膳食提供理论依据。

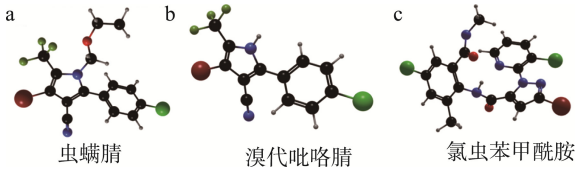


图 1　虫螨腈、溴代吡咯腈及氯虫苯甲酰胺的三维结构图
Fig.1　Three-dimensional structures of chlorfenapyr, bromopyrrole carbonitrile and chlorantraniliprole

1　材料与方法

1.1　试　剂

虫螨腈标准品(纯度 99.49%)、溴代吡咯腈标准品(纯度 98.53%)、氯虫苯甲酰胺标准品(纯度 97.63%)(德国 Dr.Ehrenstorfer 公司); 乙腈(色谱纯, 德国 Merck 公司);

QuEChERS 提取盐包(美国 Agilent 公司); 纯净水(杭州娃哈哈集团有限公司)。

1.2 仪器与设备

Xevo TQ-MS 超高效液相色谱-串联质谱仪、Acquity BEH C_{18} 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司); 3K15 高速离心机(德国 Sigma 公司); KS4000ic 恒温振荡器、GENIUS3 旋涡混合器(德国 IKA 公司); XPE205 十万分之一电子天平、PL1502E 千分之一电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.3 方 法

1.3.1 田间试验

选取山东省济南市、山东省烟台市、山西省运城市、山西省晋中市、甘肃省兰州市、甘肃省庆阳市、内蒙古自治区、宁夏回族自治区、天津市、河南省、安徽省、云南省 12 个试验点开展田间试验, 其中山西省晋中市、山东省烟台市、甘肃省兰州市和天津市 4 地同时进行消解试验。田间试验信息见表 1。试验设置处理区和空白对照小区各 1 个, 小区内含不少于 4 棵树, 小区间设置隔离带。于桃小食心虫卵孵化盛期至低龄若虫蛀果前施药一次, 施药剂量为 75 mg/kg(有效成分), 即稀释 2000 倍液(制剂), 喷雾施药 1 次。

采集整个苹果果实, 应从不少于 4 株果树上的不同部位(上、下、内、外、向阳和背阴面)采集 2 个生长正常、无病害、成熟的苹果果实独立样品, 每个苹果样品至少 2 kg 且不少于 12 个果实。样品去除果梗, 用刀将苹果果实切碎后匀浆混匀, 四分法缩分样品, 分取两份 100 g 样品。

1.3.2 室内试验

(1)样品前处理条件

称取样品 5.00 g(精确至 0.01 g), 置于 50 mL 离心管中, 充分混合后静置 30 min, 准确加入乙腈 20.0 mL, 以 350 r/ min 振荡提取 30 min, 加入一包 QuEChERS 提取盐包, 剧烈振荡 5 min, 再以 9500 r/min 离心 3 min。准确移取 0.4 mL 上清液用纯水定容至 1.0 mL, 旋涡混合器充分混匀, 用 0.22 μm 滤膜过滤后, 用超高效液相色谱-串联质谱法测定。

(2)液相条件与质谱条件

液相色谱柱采用 Acquity BEH C_{18} (2.1 mm×100 mm, 1.7 μm); 色谱流动相为乙腈(B)和纯水(C), 采用梯度淋洗: 0~1.2 min 时 40% B, 1.2~3.0 min 时 40%~90% B, 3.0~5.0 min 时 90% B, 5.0~5.1 min 时 90%~40% B, 5.1~ 7.0 min 时 40% B; 流速为 0.3 mL/min; 柱温为 35 ℃; 进样体积为 5 μL。质谱采用电喷雾离子源, 正负离子扫描, 多重反应监测模式, 见表 2; 电离电压为 3.0 kV, 雾化气流速为 1000 L/h, 锥孔气流速为 150 L/h; 雾化温度为 500 ℃, 离子源温为 150 ℃。

表 1 田间试验信息

Table 1 Information of field trials

地点	作物品种	第一次施药时间	土壤理化性质	用药量/mL	用水量/L
内蒙古呼和浩特市	黄太平	2024-07-29	栗钙土	4	8
山西省运城市	嘎啦	2024-07-05	砂质土壤	4	8
山西省晋中市	红星	2024-07-22	砂质土壤	4	8
甘肃省兰州市	红星	2024-08-23	轻壤土	3	6
甘肃省庆阳市	烟富 3 号	2024-09-17	轻壤土	3	6
宁夏银川市	红富士	2024-08-30	砂壤土/灰钙土	4	8
天津市宝坻区	国光	2024-07-06	砂土	4	8
河南省驻马店市	红星	2024-08-22	壤土	3	6
山东省济南市	鲁丽	2024-06-17	壤土	4	8
山东省烟台市	红富士	2024-09-18	沙壤土	3	6
安徽省宿州市	红富士	2024-09-20	砂土/棕壤	4	8
云南省昆明市	新世纪	2024-08-01	红壤土	3	6

表 2 虫螨腈、溴代吡咯腈及其氯虫苯甲酰胺质谱参数

Table 2 Mass spectrometry parameters of chlorfenapyr, bromopyrrole carbonitrile and chlorantraniliprole

化合物	保留时间/min	母离子(m/z)	子离子(m/z)	锥孔电压/V	碰撞电压/V	扫描方式
虫螨腈	4.64	484.22	81.0*	30	33	负离子
			131.0	30	38	
溴代吡咯腈	3.40	349.0	81.0*	30	33	负离子
			131.0	30	38	
氯虫苯甲酰胺	2.78	349.0	286.13*	2	8	正离子
			453.14	2	4	

注:*表示定量离子。母体虫螨腈会发生源内裂解, 因此采用共同基团法检测虫螨腈及其代谢物, 两者出峰时间不同, 但母离子和子离子一致。

1.3.3　计算、统计与分析

残留量计算方法见公式(1)。

$$W=\rho\times\frac{V_1\times V_3\times A_1}{m\times V_2\times A} \quad (1)$$

式中: ρ 为标样质量浓度, mg/L; V_1 为样品前处理提取体积, mL; V_2 为定容时上清液的分取体积(0.4 mL); V_3 为定容体积(1 mL); m 为样品称样量, g; A_1 为样品峰面积; A 为标样峰面积。

虫螨腈及其代谢物、氯虫苯甲酰胺的基质效应(matrix effect, ME)的计算见公式(2)[17]。

$$\mathrm{ME}/\%=(\frac{S_\mathrm{m}}{S_\mathrm{s}}-1)\times 100\% \quad (2)$$

式中: S_m 和 S_s 分别为基质标准曲线斜率和纯溶剂标准曲线斜率。ME 直接影响定量的准确性, 当 ME>0 时表明存在基质增强效应, ME<0 时表明存在基质抑制效应, |ME|>20%时表明存在明显的基质效应, 需采用基质匹配外标法进行准确定量。

虫螨腈和氯虫苯甲酰胺对消费者的长期膳食风险(long-term dietary risk quotient, $\mathrm{RQ_{LT}}$)计算通过公式(3)和(4)进行评价。

$$\mathrm{NEDI}=\frac{\mathrm{STMR}\times F_i}{\mathrm{bw}} \quad (3)$$

$$\mathrm{RQ_{LT}}/\%=\frac{\mathrm{NEDI}}{\mathrm{ADI}}\times 100\% \quad (4)$$

式中: NEDI 为国家估算每日摄入量(national estimated daily intake), mg/d; STMR 为在特定作物上进行规范试验得到的残留中值(supervised trials median residue), mg/kg; F_i 为特定人群的食品消费因子; bw 为不同阶段、性别与地区人群体质量(body weight), kg; $\mathrm{RQ_{LT}}$ 为长期膳食风险商, 值越小, 风险越小[18]; ADI 为每日允许摄入量(acceptable daily intake), mg/kg bw; 根据 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》规定, 虫螨腈的 ADI 为 0.03 mg/kg bw, 氯虫苯甲酰胺的 ADI 为 2 mg/kg bw。由于虫螨腈和氯虫苯甲酰胺在已登记作物上的 STMR 值未知, 若选取最大残留限量值代入计算, 或将超过风险范围, 失去风险评估的意义[19]。因此, 本研究只计算两种农药在苹果上 NEDI 的贡献率。

虫螨腈和氯虫苯甲酰胺对消费者的短期膳食风险(short-term dietary risk quotient, $\mathrm{RQ_{ST}}$)计算通过公式(5)和(6)进行评价。

$$\mathrm{NESTI}=\frac{\mathrm{Ue}\times\mathrm{HR}\times v+(\mathrm{LP}-\mathrm{Ue})\times\mathrm{HR}}{\mathrm{bw}} \quad (5)$$

$$\mathrm{RQ_{ST}}/\%=\frac{\mathrm{NESTI}}{\mathrm{ADfD}}\times 100\% \quad (6)$$

式中: NESTI 是国家估算短期膳食摄入量(national estimated short-term intake), mg/d; Ue 为苹果单果重, 数值取 0.225 kg; v 为苹果个体之间变异因子, 数值取 3; LP 是大餐份膳食消费量(large portion), kg; HR 是农药残留试验的最高残留量(highest residue), mg/kg; ARfD 为急性参考剂量(acute reference dose), mg/kg bw, 虫螨腈的 ARfD 为 0.03 mg/kg bw, 未查询到氯虫苯甲酰胺的急性参考剂量; $\mathrm{RQ_{ST}}$ 为短期膳食风险商, 值越小, 风险越小[20]。

根据理论最大日摄入量不应大于每日允许摄入量的原则, 短期膳食安全界限(safety margin, SM)的计算见公式(7), 最大残留限量估计值计算公式见公式(8)。

$$\mathrm{SM}=\frac{\mathrm{ARfD}\times\mathrm{bw}}{\mathrm{Ue}\times v+\mathrm{LP}-\mathrm{Ue}} \quad (7)$$

$$\mathrm{eMRL}=\frac{\mathrm{ADI}\times\mathrm{bw}}{\mathrm{LP}} \quad (8)$$

式中: eMRL 为最大残留限量估计值(estimate maximum residue limit), mg/kg。

农药残留联席会议在 2018 年的报告中指出, 代谢物溴代吡咯腈的生物毒性是虫螨腈母体的 10 倍, 因此确定虫螨腈膳食风险评估的残留物定义为虫螨腈与溴代吡咯腈的 10 倍之和[21]。

1.4　数据处理

数据采用 DPS V9.01 进行显著性差异分析, $P<0.05$ 表明对比组数据间差异显著。数据采用 Origin 2021 作图。实验至少重复 3 次测定。

2　结果与分析

2.1　分析方法有效性

2.1.1　标准曲线与基质效应

按 1.3.2 中前处理步骤对空白样品进行提取, 作为基质空白稀释液, 空白基质稀释标准品后进样得到标准曲线(曲线方程及相关系数见表 3)。苹果基质中 3 种农药标准品在 0.0005~0.1000 mg/L 范围内线性良好, 峰面积与质量浓度成线性正比, 相关系数 r 为 0.9979~0.9999。苹果中氯虫苯甲酰胺和虫螨腈及其代谢物典型色谱图见图 2。苹果中虫螨腈和溴代吡咯腈存在基质增强效应, 均为 19.2%; 苹果中氯虫苯甲酰胺存在基质抑制效应, 为–6.1%。

2.1.2　分析方法正确度与精密度

利用添加回收试验来衡量分析方法的正确度和精密度, 在苹果空白样品中分别添加虫螨腈、溴代吡咯腈、氯虫苯甲酰胺标准溶液, 添加浓度均为 0.01、1.00 和 2.00 mg/kg, 每个浓度重复 5 次, 高浓度适当稀释后进样。按 1.3.2 中前处理步骤及仪器条件进行添加回收试验, 虫螨腈在苹果中的平均回收率为 90%~102%, 相对标准偏差为 2.1%~5.0%; 溴代吡咯腈在苹果中的平均回收率为 83%~94%, 相对标准偏差为 1.6%~7.7%; 氯虫苯甲酰胺在苹果中的平均回收率为 98%~100%, 相对标准偏差为 0.9%~2.7%。方法回收率与相对标准偏差均符合农业行业标准 NY/T 788—2018《农作物中农药残留试验准则》的要求, 虫螨腈、溴代吡咯腈、氯虫苯甲酰胺在苹果中的定量限均为 0.01 mg/kg。

表 3 纯溶剂与苹果空白基质中虫螨腈、溴代吡咯腈、氯虫苯甲酰胺的标准曲线

Table 3 Standard curves of chlorfenapyr, bromopyrrole carbonitrile and chlorantraniliprole in *Malus domestica* matrix and acetonitrile

农药名称	稀释溶液	标准曲线	相关系数	MEs/%
虫螨腈	乙腈	Y=290896.1X+418.0	0.9979	19.2
	苹果基质	Y=346789.7X+181.3	0.9999	
溴代吡咯腈	乙腈	Y=2330396.8X+2430.9	0.9995	19.2
	苹果基质	Y=2777115.7X+1375.7	0.9998	
氯虫苯甲酰胺	乙腈	Y=17788986.4X+10664.2	0.9996	–6.1
	苹果基质	Y=16711876.9X+8279.6	0.9999	

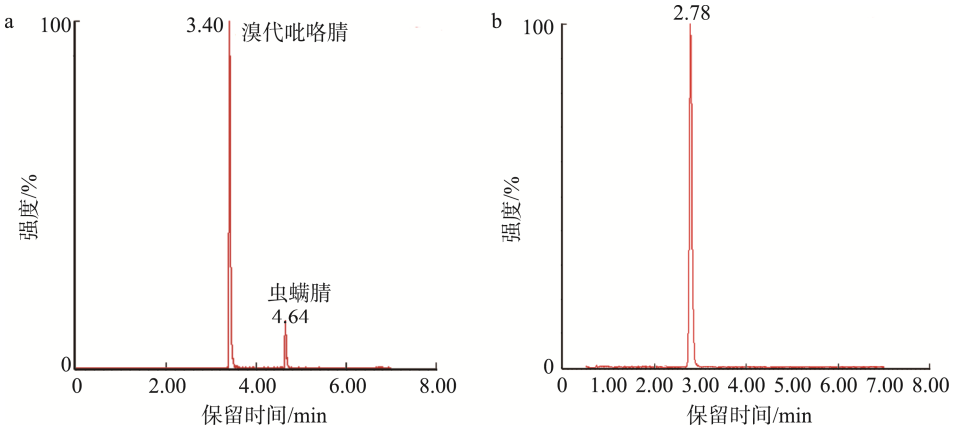


图 2 虫螨腈、溴代吡咯腈(a)、氯虫苯甲酰胺(b)的总离子色谱图

Fig.2 Total ion chromatograms of chlorfenapyr, bromopyrrole carbonitrile (a) and chlorantraniliprole (b)

2.2 农药最终残留与消解结果

2.2.1 最终残留试验结果

15%虫螨腈·氯虫苯甲酰胺悬浮剂采用喷雾法施药，有效成分 75 mg/kg，制剂 2000 倍，喷雾施药 1 次。根据 12 地残留试验的结果，采收间隔为 21 d 时，虫螨腈在苹果树上的 STMR 为 0.042 mg/kg，残留 HR 为 0.37 mg/kg；氯虫苯甲酰胺在苹果树上的 STMR 为 0.040 mg/kg，残留 HR 为 0.26 mg/kg。采收间隔为 28 d 时的数据略低于 21 d，整体上，在试验期间内，苹果中虫螨腈及氯虫苯甲酰胺的残留量均未超过我国目前规定的最大残留限量(包括临时限量)，结果见图 3。

2.2.2 消解动态结果

本研究在 4 个地点进行了消解动态试验，其中天津市宝坻区的样品无明显消解趋势，消解曲线无法拟合；甘肃省兰州市、山西省晋中市和山东省烟台市 3 个地点的消解动态符合一级反应动力学，相关系数(r)>0.94。3 地样品于施药后 7 d，虫螨腈的消解率为 23.5%~86.7%，氯虫苯甲酰胺的消解率为 21.8%~61.7%；施药后 28 d，消解率达 49.4%~88.9%(虫螨腈)和 45.5%~83.3%(氯虫苯甲酰胺)，残留量随着时间减少。氯虫苯甲酰胺的半衰期分别为 14.3、4.6 和 31.9 d，虫螨腈的半衰期分别为 13.7、2.8 和 27.8 d。消解曲线见图 4，消解方程及参数见表 4。

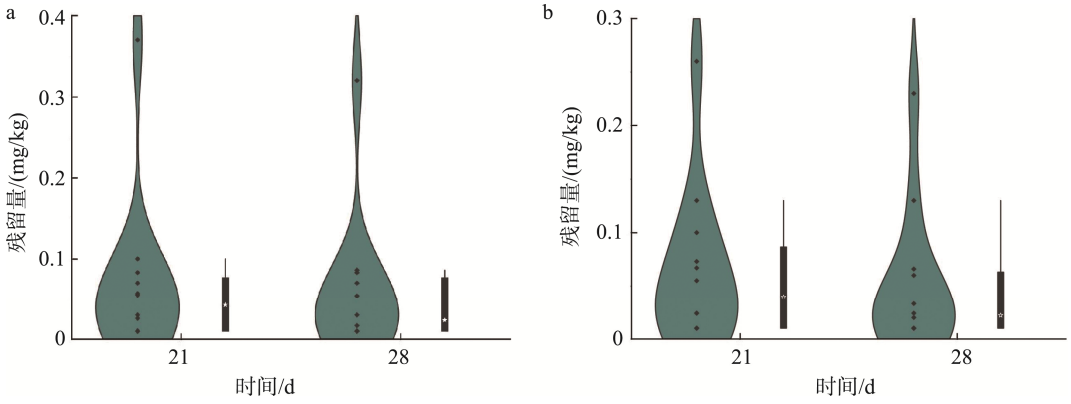


图 3 虫螨腈(a)、氯虫苯甲酰胺(b)的在苹果中的最终残留

Fig.3 Final residues of chlorfenapyr (a) and chlorantraniliprole (b) in *Malus domestica*

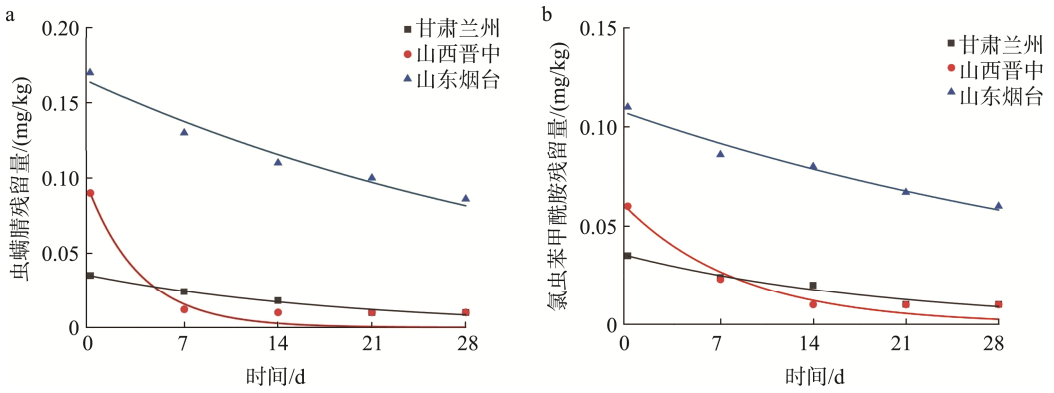


图 4　虫螨腈(a)及氯虫苯甲酰胺(b)的在苹果中的消解动态曲线

Fig.4　Dissipation dynamic curves of chlorfenapyr (a) and chlorantraniliprole (b) in *Malus domestica*

表 4　苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺的消解方程和半衰期

Table 4　Dissipation equation and half-life of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica*

农药名称	试验地点	消解动态方程	相关系数	半衰期/d
虫螨腈	甘肃兰州	C_t=0.03482e$^{-0.05067t}$	0.9831	13.7
	山西晋中	C_t=0.08965e$^{-0.2497t}$	0.9495	2.8
	山东烟台	C_t=0.16373e$^{-0.0249t}$	0.9634	27.8
氯虫苯甲酰胺	甘肃兰州	C_t=0.0349e$^{-0.04854t}$	0.9686	14.3
	山西晋中	C_t=0.05863e$^{-0.11256t}$	0.9956	4.6
	山东烟台	C_t=0.10672e$^{-0.02173t}$	0.9677	31.9

2.2.3　长期膳食摄入风险

本研究评估虫螨腈和氯虫苯甲酰胺对不同年龄段、不同性别及不同居住环境人群的长期膳食暴露风险，并对不同人群的长期膳食风险商进行差异性分析。如表 5 所示，人群体质量及苹果消费量的数据参考已有的报道[22]，按照风险最大化原则，采用采收间隔为 21 d 时虫螨腈和氯虫苯甲酰胺在苹果中的 STMR (0.042 mg/kg 和 0.040 mg/kg)计算长期膳食 NEDI 值。结果表明(表 5)，RQ_{LT} 整体上会随着年龄的增加而降低，2~6 岁儿童的长期膳食风险最高，与其他年龄段人群的 RQ_{LT} 有显著性差异(P<0.05，氯虫苯甲酰胺在城市女性儿童与青年人群中的摄入除外，有差异但不显著)，不同的居住环境中同年龄段人群的长期膳食摄入风险只有老年组存在显著差异(P<0.05)。

总体来看，苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺残留量对我国不同人群的 RQ_{LT} 均远低于 100%，最高为 1.0%，说明苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺对长期膳食风险商的贡献率很低，按农药推荐剂量(有效成分 75 mg/kg，即稀释 2000 倍液)施用，并在 21 d 安全间隔期后采收，对长期膳食来说是安全的。

2.2.4　短期膳食摄入风险

ARfD 是指短时间摄入化学物质后，对人体健康不会产生不良反应的剂量[23]。

根据农药残留联席会议(joint meeting on pesticide residues, JMPR)报告，虫螨腈的 ARfD 为 0.03 mg/kg bw，未查询到氯虫苯甲酰胺的急性参考剂量[24]。氯虫苯甲酰胺对人体的急性口服毒性较低，出现短期膳食风险的可能性较小[25]。因此，本研究只评估苹果中虫螨腈对我国不同年龄段、不同性别及不同居住环境人群的短期膳食暴露风险，并对不同人群的短期膳食风险商和安全界限进行差异性分析。根据公式(5)和公式(6)计算短期膳食风险商，根据公式(7)计算得到 SM 的数值。结果表明(表 6)，RQ_{ST} 整体上会随着年龄的增加而降低,老年会有少许升高但不明显，2~6 岁儿童的短期膳食风险最高，均超过 50%，60 岁前的 4 个年龄段各组间均有显著差异(P<0.05，城市女性成年人群的短期摄入除外)，老年组与成年组相比差异均不显著(P>0.05)。不同的居住环境中同年龄段人群的短期膳食摄入风险只有幼儿和儿童组存在显著差异(P<0.05)。

总体来说，苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺的残留量对我国不同人群的 RQ_{ST} 均低于 100%，说明我国居民短期内摄入苹果导致的膳食风险可以接受。但 2~13 岁儿童的 RQ_{ST} 远高于青年组和中老年组、SM 远低于青年组和中老年组，尤其是 2~6 岁儿童的 SM 与虫螨腈的残留最大值(0.37 mg/kg)非常接近，这可能是由于儿童的膳食摄入量与平均体重的比值偏大[26-27]，所以该类人群应列为重点关注对象。

表 5 苹果中虫螨腈和氯虫苯甲酰胺的长期膳食摄入量和风险商

Table 5 Long-term dietary intake and risk quotient of chlorfenapyr and chlorantraniliprole in *Malus domestica*

基本信息				城市					农村				
农药	性别	人群	年龄	体质量/kg	苹果消费量/g	NEDI/(mg/d)	RQ_{LT}/%	eMRL/(mg/kg)	体质量/kg	苹果消费量/g	NEDI/(mg/d)	RQ_{LT}/%	eMRL/(mg/kg)
虫螨腈	男	幼儿	2~6	18.3	134.1	3.08E-04	1.00^{Aa}	1	16.1	99.4	2.59E-04	0.86^{Aa}	1
		儿童	7~13	35.3	147.0	1.75E-04	0.58^{Ba}	2	29.6	101.4	1.44E-04	0.48^{Ba}	1
		青年	14~17	56.2	177.1	1.32E-04	0.44^{BCa}	2	50.4	91.5	7.63E-05	0.25^{BCa}	2
		成年	18~59	65.7	118.3	7.56E-05	0.25^{Ca}	3	60.5	73.6	5.11E-05	0.17^{Ca}	3
		老年	≥60	63.7	142.6	9.40E-05	0.31^{BCa}	3	55.9	45.9	3.45E-05	0.11^{Cb}	2
	女	幼儿	2~6	17.4	126.3	3.05E-04	1.00^{Aa}	1	15.5	109.5	2.97E-04	0.99^{Aa}	1
		儿童	7~13	34.1	154.9	1.91E-04	0.64^{Ba}	1	29.4	96.6	1.38E-04	0.46^{Ba}	1
		青年	14~17	51.0	209.0	1.72E-04	0.57^{Ba}	2	47.8	108.3	9.52E-05	0.32^{BCa}	2
		成年	18~59	56.0	162.2	1.22E-04	0.41^{Ba}	2	54.0	84.0	6.53E-05	0.22^{BCa}	2
		老年	≥60	54.9	132.8	1.02E-04	0.34^{Ba}	2	48.8	42.3	3.64E-05	0.12^{Cb}	2
氯虫苯甲酰胺	男	幼儿	2~6	18.3	134.1	2.93E-04	0.0150^{Aa}	91	16.1	99.4	2.47E-04	0.0120^{Aa}	80
		儿童	7~13	35.3	147.0	1.67E-04	0.0083^{Ba}	102	29.6	101.4	1.37E-04	0.0069^{Ba}	85
		青年	14~17	56.2	177.1	1.26E-04	0.0063^{Ba}	162	50.4	91.5	7.26E-05	0.0036^{BCa}	145
		成年	18~59	65.7	118.3	7.20E-05	0.0036^{Ba}	190	60.5	73.6	4.87E-05	0.0024^{BCa}	175
		老年	≥60	63.7	142.6	8.95E-05	0.0045^{Ba}	184	55.9	45.9	3.28E-05	0.0016^{Cb}	161
	女	幼儿	2~6	17.4	126.3	2.90E-04	0.0150^{Aa}	86	15.5	109.5	2.83E-04	0.0140^{Aa}	77
		儿童	7~13	34.1	154.9	1.82E-04	0.0091^{ABa}	98	29.4	96.6	1.31E-04	0.0066^{Ba}	85
		青年	14~17	51.0	209.0	1.64E-04	0.0082^{ABa}	147	47.8	108.3	9.06E-05	0.0045^{Ba}	138
		成年	18~59	56.0	162.2	1.16E-04	0.0058^{Ca}	162	54.0	84.0	6.22E-05	0.0031^{Ba}	156
		老年	≥60	54.9	132.8	9.68E-05	0.0048^{Ca}	158	48.8	42.3	3.47E-05	0.0017^{Bb}	141

注: 相同字母表示差异不显著(P>0.05), 不同字母表示差异显著(P<0.05)。大写字母表示相同地区和性别条件下不同年龄人群的比较, 小写字母表示相同性别和相同年龄条件下不同地区人群的比较。下同。

表 6 苹果中虫螨腈的短期膳食摄入量和风险商

Table 6 Short-term dietary intake and risk quotient of chlorfenapyr in *Malus domestica*

基本信息			城市					农村				
性别	人群	年龄	体质量/kg	苹果消费量/g	NESTI/(mg/d)	RQ_{ST}/%	SM/(mg/kg)	体质量/kg	苹果消费量/g	NESTI/(mg/d)	RQ_{ST}/%	SM/(mg/kg)
男	幼儿	2~6	18.3	403.4	1.73E-02	57.52^{Ab}	0.64	16.1	403.4	1.961E-02	65.37^{Aa}	0.57
	儿童	7~13	35.3	693.1	1.20E-02	39.94^{Bb}	0.93	29.6	693.1	1.429E-02	47.63^{Ba}	0.78
	青年	14~17	56.2	693.1	7.53E-03	25.09^{Ca}	1.50	50.4	693.1	8.392E-03	27.97^{Ca}	1.30
	成年	18~59	65.7	693.1	6.44E-03	21.46^{Da}	1.70	60.5	693.1	6.991E-03	23.30^{Da}	1.60
	老年	≥60	63.7	693.1	6.64E-03	22.13^{Da}	1.70	55.9	693.1	7.566E-03	25.22^{CDa}	1.50
女	幼儿	2~6	17.4	403.4	1.82E-02	60.49^{Ab}	0.61	15.5	403.4	2.037E-02	67.90^{Aa}	0.54
	儿童	7~13	34.1	693.1	1.24E-02	41.34^{Bb}	0.89	29.4	693.1	1.439E-02	47.95^{Ba}	0.77
	青年	14~17	51.0	693.1	8.29E-03	27.64^{Ca}	1.30	47.8	693.1	8.848E-03	29.49^{Ca}	1.30
	成年	18~59	56.0	693.1	7.55E-03	25.18^{Ca}	1.50	54.0	693.1	7.832E-03	26.11^{Da}	1.40
	老年	≥60	54.9	693.1	7.70E-03	25.68^{Ca}	1.40	48.8	693.1	8.667E-03	28.89^{CDa}	1.30

3 讨　论

以往的报道表明, 一般用气相色谱-质谱法检测虫螨腈母体, 高效液相色谱-串联质谱法检测代谢物溴代吡咯腈和氯虫苯甲酰胺[11–17]。本研究建立了超高效液相色谱-串联质谱法同时快速检测苹果中虫螨腈、溴代吡咯腈和氯虫苯甲酰胺的方法, 方便快捷、简单准确, 回收率、精密度和灵敏度等参数均符合要求, 为有效监测苹果中虫螨腈及其代谢物和氯虫苯甲酰胺的微量残留提供了技术支撑。

本研究在试验期间内, 所有采样点的虫螨腈及氯虫苯甲酰胺的残留量均未超过我国目前规定的最大残留限量。山西晋中、甘肃兰州和山东烟台 3 地苹果树上施用 2 种农药的消解速率均较快, 氯虫苯甲酰胺的半衰期为 4.6~31.9 d, 虫螨腈的半衰期为 2.8~27.8 d; 天津点由于初始沉积量最高, 无法拟合消解曲线; 山东烟台点的半衰期最长, 分析可能的原因是初始沉积量次高, 且与作物品种、环境条件等因素有关; 另外, 山西晋中的消解速率最快, 原因可能是试验期间晋中的平均气温(25.3 ℃)高于烟台的平均气温(19.1 ℃)和兰州的平均气温(21.4 ℃)。总体来说, 2 种农药在苹果中的降解趋势、半衰期与已报道的多种作物结果基本一致, 均为易降解农药。据已有报道, 虫螨腈在辣椒中半衰期为 2.02~3.5 d[28], 在菜豆中和甘蓝中的半衰期分别为 3.5 d[29]和 2.2~2.6 d[30]; 氯虫苯甲酰胺在山楂中的半衰期为 19~26 d[16], 在番茄和菜薹中的半衰期分别为 1.3~10.7 d[31–32]和 2.7~4.1 d[33]。

虽然两种农药在苹果中的膳食评估风险商均低于 100%, 按照正常膳食量食用苹果是安全的, 但是 GB 2763—2021 标准中虫螨腈在甘蓝和茶叶上的最大残留限量比较高(10 mg/kg 和 20 mg/kg), 苹果与甘蓝、茶叶同时食用有可能存在超出 100%的长期膳食风险, 需要引起注意; 氯虫苯甲酰胺在菠菜、小白菜、小青菜、苋菜、大白菜(20 mg/kg)上的最大残留限量比较高, 但氯虫苯甲酰胺的 ADI 比较高, 同时食用也不会引起较大的长期膳食风险。

4 结　论

本研究建立了 QuEChERS 前处理结合超高效液相色谱-串联质谱法同时快速检测苹果中虫螨腈、溴代吡咯腈和氯虫苯甲酰胺的方法, 虫螨腈、溴代吡咯腈采用共同基团法进行检测, 为消除基质效应对检测结果的影响, 均采用基质标样进行校准[34]。3 种农药的平均回收率为 83%~102%, 相对标准偏差为 0.9%~7.7%, 方法的定量限均为 0.01 mg/kg。方法的正确度与精密度均符合农药残留检测要求, 标准曲线良好, 无明显 ME。

15%虫螨腈・氯虫苯甲酰胺悬浮剂防治苹果树桃小食心虫, 按推荐剂量(有效成分 75 mg/kg)稀释 2000 倍液施用, 并在施药后 21 d 和 28 d 采样, 虫螨腈的总残留量(虫螨腈与 10 倍溴代吡咯腈之和)及氯虫苯甲酰胺的残留量均未超过我国制定的最大残留限量(虫螨腈为 1 mg/kg, 氯虫苯甲酰胺临时限量为 2 mg/kg)。但虫螨腈的残留中值超过欧盟标准(0.01 mg/kg), 氯虫苯甲酰胺的残留中值及最大值均未超过欧盟标准(0.4 mg/kg), 因此作为鲜食苹果出口欧盟时应警惕其残留量水平, 出口时应对标欧盟标准, 推动我国对欧盟苹果出口贸易高质量发展[35]。消解试验结果表明, 苹果树上施用 2 种农药的消解速率(半衰期分别为氯虫苯甲酰胺 4.6~31.9 d 和虫螨腈 2.8~27.8 d)均较快。

根据长期及短期膳食风险的计算, 苹果中虫螨腈及氯虫苯甲酰胺在我国各人群中的长期与短期风险商均低于 100%, 因此按照推荐剂量施药, 在 21 d 安全间隔期后采收是安全的。但根据最大残留限量比 eMRL 略严且 MRL≤SM 的原则[36], 建议苹果上虫螨腈的最大残留限量值可以考虑降低为 0.5 mg/kg, 以降低 13 岁之前儿童的膳食风险。

参考文献

[1] 国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. (2023-12-31) [2025-03-03]. http://www.stats.gov.cn/
National Bureau of Statistics. National data [EB/OL]. (2023-12-31) [2025-03-03]. http://www.stats.gov.cn/

[2] 李长见. 三种典型农药在苹果加工贮藏中的降解与转化机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
LI CJ. Study on degradation and transformation mechanism of three typical pesticides in apple processing and storage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

[3] CLAUDE B, KATHARINA DS, FRANCESCO DS, *et al*. Pest categorisation of *Carposina sasakii* [J]. EFSA Journal, 2018, 16(12): 5516.

[4] KIM DS, LEE JH, YIEM MS. Spring emergence pattern of *Carposina sasakii* (*Lepidoptera*:*Carposinidae*) in apple orchards in Korea and its forecasting models based on degree-days [J]. Environmental Entomology, 2000, 29(6): 1188–1198.

[5] CHEN XG, ZHENG JY, TENG MM, *et al*. Bioaccumulation, metabolism and the toxic effects of chlorfenapyr in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69: 8110–8119.

[6] YANG J, LUO FJ, ZHOU L, *et al*. Residue reduction and risk evaluation of chlorfenapyr residue in tea planting, tea processing, and tea brewing [J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139613.

[7] 孙丰收. 虫螨腈及其代谢物在多种基质中残留检测方法建立及膳食风险评估[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
SUN FS. The establishment of methods for the residual determination of chlorfenapyr and its metabolites in multiple matrix and dietary risk assessment [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.

[8] CHEN XG, ZHENG JY, TENG MM, *et al*. Environmentally relevant concentrations of tralopyril affect carbohydrate metabolism and lipid metabolism of zebrafish (*Danio rerio*) by disrupting mitochondrial function [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 223: 112615.

[9] HANNIG GT, ZIEGLER M, PAULA GM. Feeding cessation effects of chlorantraniliprole, a new anthranilic diamide insecticide, in comparison with several insecticides in distinct chemical classes and mode-of-action groups [J]. Pest Management Science, 2010, 65(9): 969–974.

[10] 刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 等. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应[J]. 植物保护, 2021, 47(5): 158–163.
LIU YD, SUN LN, ZHANG HJ, *et al*. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the growth and development of *Carposina sasakii* [J]. Plant Protection, 2021, 47(5): 158–163.

[11] 孙瑞卿, 王霞, 任鹏程, 等. 虫螨腈及其代谢物溴代吡咯腈在芥菜上的残留行为与膳食风险评估[J]. 农药学学报, 2022, 24(3): 563–571.

SUN RQ, WANG X, REN PC, *et al*. Residue behavior and dietary risk assessment of chlorfenapyr andits metabolite tralopyril in mustard [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(3): 563–571.

[12] 张爱娟, 卞艳丽, 冯义志, 等. 虫螨腈和噻虫嗪在芦笋中的残留消解及膳食摄入风险评估[J]. 农药, 2021, 60(9): 654–658.
ZHANG AIJ, BIAN YL, FENG YZ, *et al*. Residue dissipation and dietary risk assessment of chlorfenapyr and thiamethoxam in *Asparagus* [J]. Agrochemicals, 2021, 60(9): 654–658.

[13] 李晓贝, 赵晓燕, 李健英, 等.阿维菌素·虫螨腈在青菜上的残留特性及其膳食摄入风险评估[J].食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4185–4190.
LI XB, ZHAO XY, LI JY, *et al*. Residue behavior and dietary intake risk assessment of abamectin and chlorfenapyr in pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(13): 4185–4190.

[14] 朱珠, 马良宽, 王义轩. 高效液相色谱法测定苹果中溴氰虫酰胺、氯虫苯甲酰胺残留[J]. 现代食品, 2025(7): 149–152.
ZHU Z, MA LK, WANG YX. Determination of cyantraniliprole and chlorantraniliprole residue in apples by high performance liquid chromatography [J]. Modern Food, 2025(7): 149–152.

[15] 孙星, 刘川静, 杨邦保, 等. 氯虫苯甲酰胺在桃中的残留行为及膳食风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2023(1): 50–55.
SUN X, LIU CJ, YANG BB, *et al*. Residual behavior and dietary risk assessment of chlorfenapyr in peaches [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2023(1): 50–55.

[16] 付岩, 王全胜, 张亮, 等. 氯虫苯甲酰胺在山楂中的残留行为及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 4735–4741.
FU Y, WANG QS, ZHANG L, *et al*. Residue behaviours and dietary exposure risk assessment of chlorantraniliprole in hawthorn [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(12): 4735–4741.

[17] CHEN Z, DONG F, LI S, *et al*. Response surface methodology for the enantioseparation of dinotefuran and its chiral metabolite in bee products and environmental samples by supercritical fluid chromatography/tandem mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2015, 1410: 181–189.

[18] 白新明. 蔬菜农药残留对人体健康急性风险概率评估研究[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 208–212.
BAI XM. Assessment of acute human health risk of pesticide residues in vegetables [J]. Food Science, 2014, 35(5): 208–212.

[19] 乔雄梧. 食品中农药残留风险评估述评[J]. 农药学学报, 2023, 25(1): 12–22.
QIAO XW. A critical review of dietary risk assessment of pesticide residues in foods [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2023, 25(1): 12–22.

[20] 叶孟亮, 聂继云, 徐国锋, 等. 苹果中 4 种常用农药残留及其膳食暴露评估[J]. 中国农业科学, 2016, 49(7): 1289–1302.
YE ML, NIE JY, XU GF, *et al*. Residue and dietary exposure risk assessment of four pesticides in apple [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(7): 1289–1302.

[21] FAO, WHO. Pesticide residues in food 2018-report 2018-joint FAO/WHO meeting on pesticide residues [M]. Rome: FAO and WHO, 2019.

[22] 叶孟亮. 苹果常用农药残留及其膳食暴露评估研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
YE ML. Studies on residue and dietary exposure risk assessment of pesticides applied in apple [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2016.

[23] FAO. Further guidance on derivation of the acute RfD [M]. Definition of the Acute RfD, in Pesticide Residues in Food-2002. FAO Plant Production and Protection Paper, 2002.

[24] FAO, WHO. NSP-C list of pesticide evaluated by JMPR and JMPS-C [DB/OL] [2025-03-03]. https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/ theme/pests/lpe/lpe-c/en/

[25] 付岩, 王全胜, 凌淑萍, 等. 荔枝中 3 种杀虫剂的残留行为及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 66–73.
FU Y, WANG QS, LING SP, *et al*. Residues behavior and dietary risk assessment of 3 kinds of pesticides in *Litchi chinensis* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 66–73.

[26] 孙瑞卿, 乔雄梧, 秦曙. 中国食品中农药 MRL 标准对急性膳食暴露评估需求的研究[J]. 农药学学报, 2015, 17(5): 544–554.
SUN RQ, QIAO XW, QIN S. Study on acute dietary exposure assessment needs for Chinese pesticide MRLs in food [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2015, 17(5): 544–554.

[27] 刘晓鹏, 刘秋蕊, 马翠华. 气相色谱-质谱法测定辣椒中虫螨腈残留及消解动态[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 543–547.
LIU XP, LIU QR, MA CH. Determination of residues and digestion dynamics of chlorfenapyrin pepper by GC-MS [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 53(4): 543–547.

[28] 王儒, 张乐, 张欣琪, 等. 基于 QuEChERS 气相色谱串联质谱法的海南田间辣椒虫螨腈动态残留特征[J]. 热带农业科学, 2025, 45(5): 45–51.
WANG R, ZHANG L, ZHANG XQ, *et al*. Determination of the dynamic residue characteristics of chlorfenapyr in hai-nan field peppers via based on QuEChERS-GC-MS [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2025, 45(5): 45–51.

[29] BADAWY MEI, MAHMOUD MS, KHATTAB MM. Residues anddissipation kinetic of abamectin, chlorfenapyr and pyridabenacaricides in green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under fieldconditions using QuEChERS method and HPLC [J]. Journalof Environmental Science and Health. Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2020, 55(6): 517–524.

[30] CAO YS, CHEN JX, WANG YL, *et al*. HPLC/UV analysis of chlorfenapyr residues in cabbage and soil to study the dy-namics of different formulations [J]. Science of the Total Environment, 2005, 350(1/2/3): 38–46.

[31] 秦冬梅, 秦旭, 徐应明, 等. 土壤和番茄中氯虫苯甲酰胺的残留检测与消解动态研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 858–863.
QIN DM, QIN X, XU YM, *et al*. Residue determination and degradationof chlorantraniliprole in soil and tomato [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 858–863.

[32] PARAMASIVAM M. Dissipation kinetics, dietary and ecological riskassessment of chlorantraniliprole residue in/on tomato and soil using GC–MS [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(2): 604–611.

[33] 赵民娟, 王猛强, 邵华, 等. 氯虫苯甲酰胺在菜薹中的残留及消解动态研究[J]. 农产品质量与安全, 2019, 1: 35–38.
ZHAO MJ, WANG MQ, SHAO H, *et al*. Residue analysis and degradationdynamics of chlorantraniliprole in flowering stalk [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2019, 1: 35–38.

[34] LIU XG, XU J, LI YB, *et al*. Rapid residue analysis of four triazolopyrimi dine herbicides in soil, water, and wheat by ultra-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2011, 399(7): 2539–2547.

[35] 郑国富, 于敏. 我国对欧盟苹果出口贸易发展的困境与对策[J]. 对外经贸实务, 2024, 42(7): 98–104.
ZHENG GF, YU M. Predicament and strategies of China's apple export trade to the European Union [J]. Practice in Foreign Economic Relations and Trade, 2024, 42(7): 98–104.

[36] 张文, 汤佳乐, 程小梅, 等. 湖南省猕猴桃农药残留及风险评估[J].江西农业大学学报, 2021, 43(1): 42–51.
ZHANG W, TANG JL, CHENG XM, *et al*. Monitoring and evaluation of the pesticide residues in kiwifruit in Hunan Province [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 42–51.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)