

苹果中阿维菌素的残留分析与消解动态研究

孙蕊¹, 史娜¹, 刘慧君^{2*}, 陈艳³

[1. 北京市食品安全监控和风险评估中心(北京市食品检验所), 北京 100094; 2. 北京农学院食品科学与工程学院, 北京 102206; 3. 国家食品安全风险评估中心国家卫生健康委员会食品安全风险评估重点实验室, 北京 100022]

摘要: **目的** 探究 12.5%阿维·哒螨灵(0.25%阿维菌素+12.25%哒螨灵)可湿性粉剂成分之一阿维菌素在苹果和土壤中的残留及消解动态。**方法** 分别在北京、安徽、陕西 3 地种植的苹果和土壤中进行阿维菌素最终残留实验及消解动态实验。样品经乙腈提取、盐析、浓缩处理后, 采用高效液相色谱-荧光法检测阿维菌素的残留量。**结果** 该方法检出限为 0.02 ng, 定量限为 0.001 mg/kg, 在苹果和土壤中的添加回收率分别为 88.7%~94.2%和 90.5%~96.4%, 相对标准偏差分别为 3.56%~6.01%和 3.43%~7.25%。阿维菌素在苹果和土壤中的半衰期分别为 2.6~4.4 d 和 3.4~6.2 d。在推荐使用高剂量和推荐使用高剂量 1.5 倍的情况下, 施药后 7、14、21、28 d 阿维菌素在苹果上的残留量均小于 MRL 值 0.02 mg/kg。**结论** 12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉剂其之一成分阿维菌素在苹果上的安全间隔期可建议定为 7 d。

关键词: 阿维菌素; 苹果; 消解动态; 残留; 高效液相色谱法

Study on abamectin residue analysis and digestion dynamics in apples

SUN Rui¹, SHI Na¹, LIU Hui-Jun^{2*}, CHEN Yan³

[1. *Beijing Food Safety Monitoring and Risk Assessment Center (Beijing Food Inspection Institute), Beijing 100094, China;* 2. *School of Food Science and Engineering, Beijing Agricultural University, Beijing 102206, China;* 3. *Key Laboratory of Food Safety Risk Assessment, National Food Safety Risk Assessment Center, National Health Commission, Beijing 100022, China*]

ABSTRACT: Objective To investigate the residue and digestion dynamics of abamectin, one of the wettable powder components of 12.5% abamectin pyridaben (0.25% abamectin+12.25% pyridaben) in apples and soil. **Methods** The final residue and digestion dynamic experiments of abamectin were carried out in apples and soil planted in Beijing, Anhui and Shaanxi. The samples were extracted with acetonitrile, salted out and concentrated, the residual abamectin was determined by high performance liquid chromatography-fluorescence method. **Results** The limit of detection and limit of quantitative of this method were 0.02 ng and 0.001 mg/kg, respectively. The recoveries of addition in apples and soil were 88.7%–94.2% and 90.5%–96.4% respectively, and the relative standard deviations were 3.56%–6.01% and 3.43%–7.25% respectively. The half-lives of abamectin in apple and soil were 2.6–4.4 d and 3.4–6.2 d, respectively. At the recommended high dose and 1.5 times of the recommended high dose, the residual abamectin in apples at 7, 14, 21 and 28 days after application were less than the MRL value of 0.02 mg/kg. **Conclusion** The safety interval of abamectin, one of its ingredients, on apples can be recommended as 7 days.

KEY WORDS: avermectin; apples; digestion dynamics; residual; high performance liquid chromatography

*通信作者: 刘慧君, 讲师, 主要研究方向为食品质量安全检测与控制。E-mail: huijunliu78@163.com

*Corresponding author: LIU Hui-Jun, Lecturer, No. 7 Beinong Road, Changping District, Beijing 102206, China. E-mail: huijunliu78@163.com

0 引言

阿维菌素(abamectin),又名阿灭丁,是一种十六元大环内酯类化合物,由链霉菌中阿维链霉菌(*Streptomyces avermitilis*)发酵产生,属于新型抗生素类杀虫杀螨剂^[1]。阿维菌素主要通过阻断昆虫的神经传导系统从而对昆虫产生胃毒和触杀作用,使其产生麻痹现象,造成死亡^[2]。阿维菌素及其复配制剂可防治小菜蛾^[3]、叶螨^[1]、菜青虫^[4]等作物害螨、害虫,且有很高的杀灭作用。阿维菌素在环境中能被光解,在土壤中被微生物代谢分解,不能被植物根系吸收进入植物体内,因而在环境中无累积作用。其因具有广谱、灭杀效果好、不易残留和使用安全等特点,是当前农业害虫综合防治中理想的生物农药^[5]。

阿维菌素分子量大,极难气化,其检测方法主要集中在液相色谱-串联质谱法^[6-8]、液相色谱-荧光法^[9-10]、液相色谱-紫外法^[11]、免疫亲和液相色谱法和酶联免疫法^[13-14]。液相色谱法是目前国内外使用最广泛、最常用的药物残留检测方法^[15]。液相色谱-串联质谱法灵敏度较高,检出限低,做多残留检测优势明显,但仪器造价昂贵,检测成本较高。液相色谱-紫外法灵敏度较低,易受杂志干扰。免疫亲和色谱技术与传统的免疫分析法相比,该技术具有操作简单、分析快速、精密度高且可以实现自动分析等优点,但是采用该方法时需要选择合适的抗体固定方式且实验成本较高。液相色谱-荧光法检测器选择性强,基质干扰较小,灵敏度高,在阿维菌素的残留检测中应用较多。

施用农药在使人类获益的同时也对生态环境及人类健康产生负面影响。随着生活水平的不断提高,人们对食品中的农药残留提出了更高的要求^[16]。农药施用后的消解过程取决于当地的气候条件、土壤环境类型、农作物种类及农药本身特性等多种因素^[17]。了解这些农药的消解动态规律及安全间隔期(pre-harvest interval, PHI)对保障农产品质量和保护生态环境具有重要意义^[18]。关于阿维菌素在黄瓜^[7]、火龙果^[19]、柑橘^[20]中的残留分析与消解动态研究已有报道,但对苹果中的残留量分析和消解动态鲜有报道。本研究采用高效液相色谱-荧光法(high performance liquid chromatography -fluorescence detection, HPLC-FLD),建立阿维菌素的高灵敏度检测方法,并应用该方法研究阿维菌素在苹果和土壤中的降解规律及最终残留量,为该药在苹果上的田间施用提供指导。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

KQ-500DE1100 高效液相色谱仪(安捷伦科技有限公司); SHB III循环式多用真空泵(郑州长城科贸有限公司); HY-5 回旋振荡器(江苏金坛仪器厂); N-1100V 旋转蒸发仪(日本 EYELA 公司); BS210S 型电子天平(德国赛多利斯)。

阿维菌素标准品(纯度 96.8%, 德国 Dr. Ehrenstorfer 公

司); 乙腈、甲醇、正己烷(色谱纯, Thermo Fisher 公司); 氯化钠、N,N-二甲基甲酰胺、N-甲基咪唑(分析纯, 国药化学试剂公司); 三氟乙酸酐(分析纯, 北京化学试剂公司); 12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉剂(山东信邦生物化学有限公司); 供试苹果品种为中农9号(安徽)、红富士(北京)、藤牧1号(陕西)。

1.2 实验方法

本实验设计参照 NY/T 788—2018《农药残留试验准则》^[21]进行,分别在北京、安徽、陕西进行最终残留实验及消解动态实验。实验设空白对照区、低剂量实验区、高剂量实验区、消解动态实验区。每个小区面积均为2棵树,每个处理重复3次。小区设保护行,小区按照用药量由低到高的顺序排列,以避免交叉污染,且对照区与处理区设置有效的隔离带。

1.2.1 施药方法和样品采集

用背负式喷雾器对苹果植株进行喷雾,确保覆盖全株;施药前对器具彻底清洗,施药均匀一致,严格控制施药量。在苹果树植株的各个部位(上、下、内、外、向阳和背阴面)采集,果实密集的部位相对多采。采样量12个个体以上且不少于2kg。

土壤动态消解实验采集0~10cm土层,最终残留实验采集0~15cm,每小区设5~10个采样点,采样量不少于1kg。

样品用不易破损且不含分析干扰物的塑料包装袋包装,并写好标签,于冰箱内冷冻(-20℃)保存。

1.2.2 气候条件、土壤类型

本实验在北京、安徽、陕西3地进行,北京市大兴区属温暖带半湿润季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干燥,年平均气温12℃,年降水量630mm,60%~70%集中在7、8月份,年蒸发量1500mm,年平均风速2.4m/s。实验用土壤性质为壤土,pH为7.12,有机质含量为3.22%。

安徽省宿州市萧县属暖温带季风性大陆气候,四季分明,光照充足,雨热同季,年平均气温13.6℃。夏季平均气温为26.1℃,冬季寒冷干燥,1月份平均气温为0.4~1.9℃。年平均降雨量707.1mm。夏季降水量最大,冬季降水量最小,仅占年降水量的4%。实验地土壤性质为壤土,pH为8.01,有机质含量为2.80%。

陕西杨凌示范区属暖温带季风半湿润气候区,四季分明,光照充足,雨量适中,雨热同期,年均气温12.9℃,年降水量635.1~663.9mm。实验地土壤性质为粘土,pH为7.2,有机质含量为2.0%。

1.2.3 消解动态实验

施药剂量为推荐使用高剂量的1.5倍125mg/kg(含阿维菌素2.5mg/kg)。于施药后0(2h)、1、3、5、7、10、14、21、30、45、60d取苹果样品,3次重复。

另划出30m²无植被、杂物的平整土地上按施药量125mg/kg(含阿维菌素2.5mg/kg),每亩兑水量60公斤,均匀喷雾于地表上,用药1次,于施药后当天0(2h)、1、3、

5、7、10、14、21、30、45、60 d 取土壤样品,3次重复。

1.2.4 最终残留实验

设2个施药剂量,分别为推荐使用高剂量 83.3 mg/kg 和 1.5 倍高剂量 125 mg/kg。每个剂量设2次和3次施药处理,每个处理3次重复,每次施药间隔7 d。采集与最后一次施药间隔7、14、21、28 d 苹果及土壤样品。

1.2.5 样品制备

将苹果果柄去除后,用不锈钢刀具沿纵向切成均匀4瓣,取对角的2瓣,切成1 cm 以下的碎块,在不锈钢盆中充分混匀,用4分法缩分样品,分取150 g 的样品2份,分别装入封口样品容器中,贴好标签。将采集到土壤样本碾碎后过筛,收集于搪瓷盆或其他适宜容器中,充分混匀,用四分法分取200~300 g 样品2份,分别装入封口样品容器中,贴好标签。缩分后的苹果样品与土壤样品于-20 °C 冰箱保存。

1.2.6 样品前处理

苹果:称取20.0 g 苹果样品于100 mL 三角瓶中,加40 mL 乙腈,高速匀浆1 min 后超声提取30 min。用滤纸过滤至含5.0 g NaCl 的100 mL 具塞刻度量筒中,剧烈振荡,静置分层,取上层乙腈20 mL 于100 mL 圆底烧瓶中,经无水硫酸钠脱水后,旋蒸至近干后吹干,加1 mL 乙腈,从中取出0.5 mL 至10 mL 经硅烷化处理的具塞刻度试管中,待衍生化。

土壤:称取20.0 g 土壤于100 mL 三角瓶中,加40 mL 乙腈,超声提取30 min。用滤纸过滤至含2.0 g NaCl 的100 mL 具塞刻度量筒中,剧烈振荡,静置分层,取上层乙腈20 mL 于100 mL 圆底烧瓶中,旋蒸至近干后吹干,加1 mL 乙腈,从中取出0.5 mL 至10 mL 经硅烷化处理的具塞刻度试管中,待衍生化。

在避光、室温环境条件下,在装有0.5 mL 乙腈溶解的待衍生化样品或标样的试管中,先后分别加入0.3 mL 乙腈,0.1 mL N-甲基咪唑,0.1 mL 三氟乙酸酐,反应30 min 后,试管中再加1 mL 无水甲醇摇匀,反应60 min 后,过0.45 μm 滤膜,供HPLC-FLD测定。

1.2.7 仪器方法

色谱条件:Agilent C₁₈ 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm),柱温:40 °C,流动相为乙腈-水(95:5,V:V),流速:1.0 mL/min,等度洗脱,进样体积20 μL,检测器激发波长:365 nm,发射波长:475 nm。

1.2.8 标准溶液的配制

准确称取阿维菌素标准品0.0100 g(精确至0.0001 g)于100 mL 棕色容量瓶中,用甲醇溶解并定容,配制成100.0 mg/L 储备溶液,用聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTEE)密封带密封,-20 °C 避光贮存。再用甲醇逐级稀释,并衍生,得到浓度为0.01、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 μg/mL 标准溶液。

1.2.9 残留量计算公式

阿维菌素消解反应动力学方程按公式(1)计算,降解半衰期按公式(2)计算:

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / k \quad (2)$$

式中: $T_{1/2}$ 为降解半衰期, k 为降解速率常数, C_0 为阿维菌素的初始浓度, C_t 为 t 时刻阿维菌素的残留浓度。

2 结果与分析

2.1 色谱条件优化

液相色谱分析方法检测阿维菌素常采用荧光检测器和紫外检测器。本研究分别比较了2种峰型对称性、基线平稳度和目标物的响应。相同浓度标准溶液的色谱图对称性差异不大,基线均较平稳,目标化合物响应值应在荧光检测器上更大。相同浓度样品加标图在紫外检测器上杂峰更多,基质干扰较荧光检测器严重,故选择灵敏度高且选择性更强的液相色谱-荧光法作为检测方法。根据相关文献报道,对比了不同浓度乙腈-水(95:5,V:V)、乙腈-水(90:10,V:V)、乙腈-水(85:15,V:V)作为流动的色谱峰对称性和分离度。流动相浓度为乙腈-水(95:5,V:V)时,阿维菌素的色谱峰对称性最好、分离度最佳。

2.2 线性关系及方法的检出限、准确度和精密度

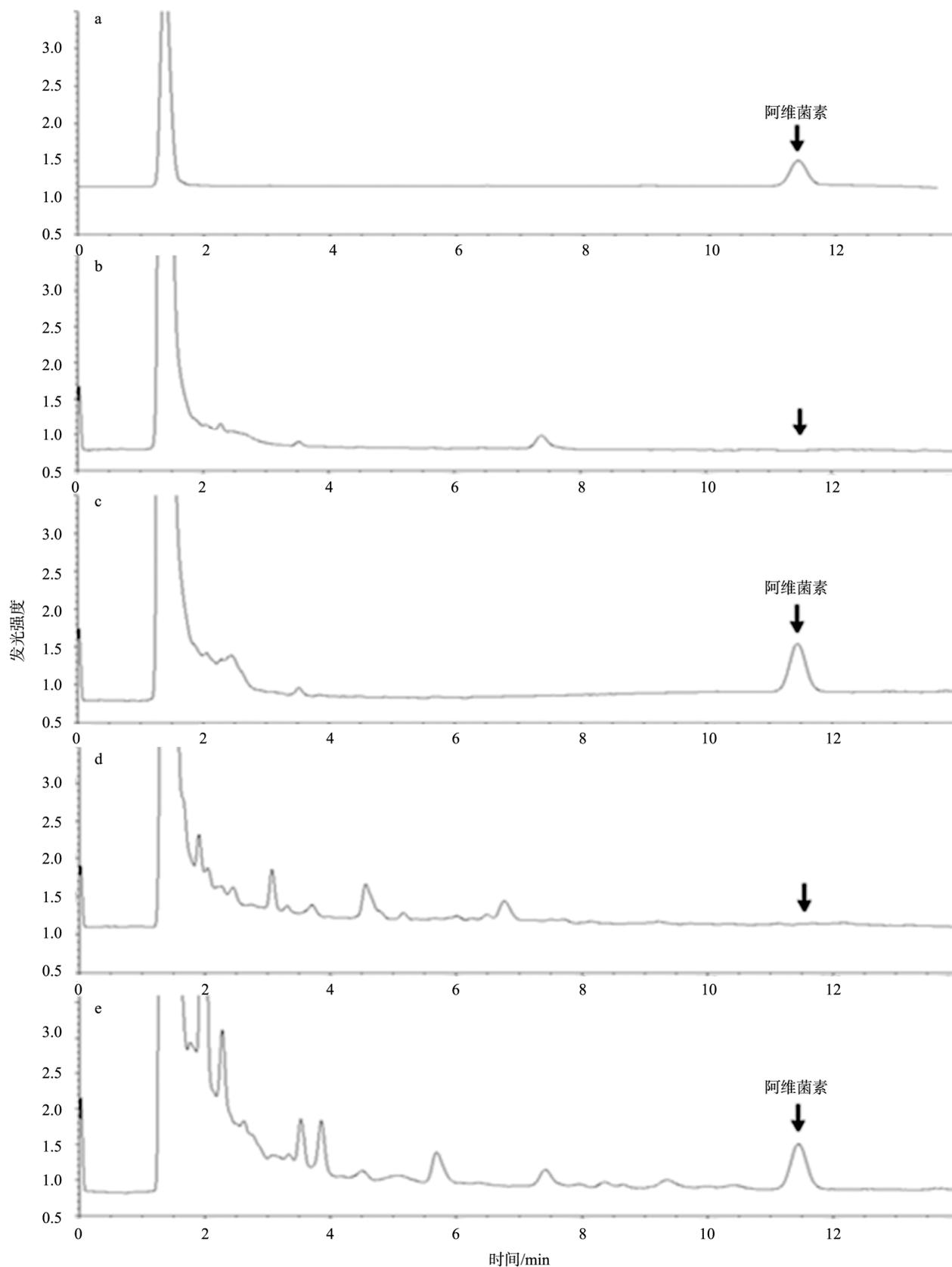
以1.2.8 配制的标准溶液溶液的浓度为横坐标,峰面积为纵坐标,绘制标准工作曲线,回归方程为: $Y=102.48X-0.5728$, $r^2=0.9991$ 。由此可知,在0.01~2.0 μg/mL 浓度范围内,溶液浓度与峰面积线性关系良好。

按照1.2.7 中实验方法上机检测,阿维菌素的保留时间为11.489 min,峰型对称性良好。根据3倍信噪比确定阿维菌素的检出限(limit of detection, LOD)为0.02 ng,根据NY/T 788—2018《农药残留试验准则》^[21]对最低残留浓度(limit of quantitation, LOQ)的定义,确定阿维菌素在苹果和土壤中的LOQ 为0.001 mg/kg,阿维菌素标准谱图及其在苹果和土壤中添加回收样品色谱图如图1所示。

阿维菌素添加浓度为0.001、0.01、0.02 mg/kg 时,苹果和土壤中的回收率分别为88.7%~94.2%和90.5%~96.4%,相对标准偏差分别为3.56%~6.01%和3.43%~7.25%(表1),添加量包含检出限和最大残留限量(maximum residue limit, MRL),且添加范围覆盖本残留实验中样品的检测浓度,添加回收率和标准偏差均符合标准要求^[21]。

表1 阿维菌素在苹果、土壤中平均回收率和相对标准偏差($n=5$)
Table 1 Average spiked recoveries and RSDs of abamectin from apple and soil($n=5$)

样品基质	添加浓度/(mg/kg)	平均回收率/%	相对标准偏差 RSD/%
苹果	0.001	94.2	5.37
	0.01	93.6	6.01
	0.02	88.7	3.56
土壤	0.001	96.4	7.25
	0.01	91.2	4.11
	0.02	90.5	3.43



注: a.标准溶液; b.苹果空白样品; c.苹果加标样品; d.土壤空白样品; e.土壤加标样品。

图1 阿维菌素标准溶液、样品色谱图

Fig.1 Chromatograms of abamectin in standard solutions and spiked samples

2.3 阿维菌素在苹果和土壤中的消解动态

对 12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉剂按照推荐使用高剂量的 1.5 倍 125 mg/kg(含阿维菌素 2.5 mg/kg)施药 1 次后进行消解动态实验,阿维菌素在苹果和土壤中的降解动力学方程拟合结果见表 2。由此可见,阿维菌素在苹果和土壤中的消解均符合一级动力学特征。在北京、安徽、陕西 3 地的降解实验中,阿维菌素在苹果中半衰期分别为 3.2、2.6、4.4 d,在土壤中的半衰期分别为 6.2、4.1、3.4 d。由此可见,阿维菌素在施药后 3~5 d,其在土壤和苹果中的消解率已近 50%,且该成分在苹果上的降解速率快于在土壤中的降解速率。

阿维菌素因其化学结构的特殊性,在光照下易分解。前人研究表明,阿维菌素在火龙果中的半衰期为 2.76~4.20 d^[19]、在柑桔和土壤中的半衰期分别为 6.19 d 和 7.86 d^[20]。金芬等^[7]采用土壤穴施施药方式,在黄瓜中未检出,在土壤中的半衰期为 7.9~18.7 d。根据 MTECALF^[22]对农药在土壤中残留性的等级划分标准,阿维菌素属于极低残留性农药(表 3);而根据国家环保

局^[23]对农药在土壤中残留性的等级划分标准,阿维菌素属低残留性农药(表 4)。

2.4 阿维菌素在苹果和土壤中的最终残留

对 12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉剂按照推荐使用高剂量 83.3 mg/kg(含阿维菌素 1.67 mg/kg)和 1.5 倍高剂量 125 mg/kg(含阿维菌素 2.5 mg/kg)分别进行 2~3 次施药处理,每次施药间隔 7 d。阿维菌素在苹果中的最高残留量为 0.011 mg/kg,在不同施药浓度和不同施药次数下,21 d 后的残留量均低于检出限。阿维菌素在土壤中的残留最高值为 0.021 mg/kg,在不同施药浓度和不同施药次数下,28 d 后的残留量均低于检出限(表 5)。阿维菌素在土壤中的最终残留量高于相同处理条件下苹果中的残留量,这可能与光照强度、温湿度、降水量、土壤中的微生物等环境因素有关。根据 GB 2763—2019《食品安全国家标准 食品中农药残留最大残留量》^[24]规定,苹果中阿维菌素的最大残留量为 0.02 mg/kg,12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉按推荐高剂量和 1.5 倍高剂量在苹果生长过程中施用,阿维菌素在黄瓜中的最终残留符合要求。

表 2 阿维菌素在苹果和土壤中的消解动力学参数
Table 2 Dissipation kinetic equations of abamectin in apples and soil

样品	实验地点	消解方程	相关系数(r)	半衰期/d
苹果	北京	$C_t=0.0164e^{-0.2174t}$	0.9616	3.2
	安徽	$C_t=0.0138e^{-0.2694t}$	0.9943	2.6
	陕西	$C_t=0.0081e^{-0.1562t}$	0.9729	4.4
土壤	北京	$C_t=0.0335e^{-0.1114t}$	0.8798	6.2
	安徽	$C_t=0.0402e^{-0.1681t}$	0.9696	4.1
	陕西	$C_t=0.0389e^{-0.2028t}$	0.9762	3.4

表 3 农药在土壤中残留性等级划分标准
Table 3 Classification standard of pesticide residues in soil

降解半衰期	等级	级别
≤1 个月	1	极低残留
1~4 月	2	低残留
4~12 月	3	中残留
1~3 年	4	高残留
5~10 年	5	极高残留

表 4 农药在土壤中残留性等级划分标准
Table 4 Classification standard of pesticide residues in soil

降解半衰期	等级	级别
< 3 个月	1	低残留
12 月	2	中残留
> 1 年	3	高残留

表 5 阿维菌素在苹果和土壤中的最终残留
Table 5 Final residue levels of abamectin in apples and soil

阿维菌素施药量/(mg/kg)	施药次数	采样间隔/d	苹果最终残留/(mg/kg)			土壤最终残留/(mg/kg)		
			北京	安徽	陕西	北京	安徽	陕西
1.67	2	7	0.007	0.002	0.001	0.008	0.005	0.008
		14	< 0.001	< 0.001	0.001	0.007	0.003	0.001
		21	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001
	3	28	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		7	0.009	0.005	0.002	0.021	0.009	0.017
		14	0.005	< 0.001	< 0.001	0.010	0.004	0.006
		21	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001
		28	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
		7	0.005	0.004	0.002	0.011	0.007	0.011
2	14	0.003	< 0.001	0.001	0.009	0.002	0.004	
	21	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.003	< 0.001	< 0.001	
	28	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	
	7	0.011	0.003	0.004	0.016	0.010	0.014	
2.50	3	14	0.006	0.001	0.002	0.010	0.006	0.006
		21	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.006	0.002	0.001
		28	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001
		7	0.011	0.003	0.004	0.016	0.010	0.014

3 结 论

由于施用技术不当、对农产品生产安全意识不强而引起的农药残留问题,不仅威胁人类的健康、环境的可持续发展,同时还影响我国农产品在国际市场的竞争力。对农药残留的检测和降解特性进行深入研究,从而指导农产品生长过程中安全、规范施药,是从源头解决农产品中农药残留超标问题的一项有力措施。本文建立了苹果中阿维菌素的高效液相色谱-荧光检测方法,该方法灵敏度高,经济高效,线性关系良好,方法的检出限、回收率、准确度等各项技术指标均符合农药残留检测的基本要求^[21],可有效适用于苹果和土壤中阿维菌素残留的定量分析。阿维菌素在苹果和土壤中的消解动态均符合一级动力学模型,12.5%阿维·哒螨灵可湿性粉剂按照推荐使用高剂量的 1.5 倍 125 mg/kg(含阿维菌素 2.5 mg/kg)施药 1 次,在苹果和土壤中的半衰期分别为 2.6~4.4 d 和 3.4~6.2 d。食品法典委员会(CAC)和我国农业部门均规定,阿维菌素在苹果中 MRL 值均为 0.02 mg/kg。从实验结果可以看出,在施药量为 1.67 mg/kg 与 2.50 mg/kg,施药 2~3 次,每次间隔 7 d 的施药条件下,施药后 7、14、21、28 d 苹果中的阿维菌素残留量均小于 0.02 mg/kg,故 12.5%阿维菌素·哒螨灵中的阿维菌素的安全间隔期可定为 7 d。

参考文献

- [1] XU ZF, HU Y, HU J, *et al.* The interaction between abamectin and RDL in the carmine spider mite: A target site and resistant mechanism study [J]. *Pestic Biochem Phys*, 2020, 164(3): 191-195.
- [2] DIONISIO AC, RATH S. Abamectin in soils: analytical methods, kinetics, sorption and dissipation [J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 17-29.
- [3] 夏耀民, 鲁艳辉, 朱勋, 等. 华中地区小菜蛾对 9 种杀虫剂的抗药性测定[J]. *中国蔬菜*, 2013, (22): 75-80.
- [4] XIA TM, LU YH, ZHU X, *et al.* Determination of *plutellaxylostella* (L.) resistance to nine insecticides in central china [J]. *China Vegetables*, 2013, (22): 75-80.
- [4] 占建仁, 杨廷广. 1.8%阿维菌素微乳剂对菜青虫的田间防效研究[J]. *现代农业科技*, 2020, (11): 118-120.
- [5] LU JR, YANG TG. Study on the field control effect of 1.8% abamectin microemulsion on *pierisrapae* [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2020, (11): 118-120.
- [5] 王兰, 冯宏祖. 阿维菌素类杀虫剂的研究及应用前景[J]. *中国植保导刊*, 2008, 28(4): 13-15.
- [6] WANG L, FENG HZ. Research and application prospects of abamectin insecticides [J]. *China Plant Prot*, 2008, 28(4): 13-15.
- [6] 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): 4186-4190.
- [7] 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]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(13): 4186–4190.
- [7] 金芬, 王静, 魏闪闪, 等. 阿维菌素在黄瓜和土壤中的残留及其消解动态[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(18): 3684–3690.
JIN F, WANG J, WEI SS, *et al*. Degradation dynamics and residues analysis of abamectin in cucumber and soil [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(18): 3684–3690.
- [8] LI CM, JIN F, YU ZY, *et al*. Rapid determination of chlorfenvinphos in meat by dispersive solid-phase extraction and hydrophilic interaction liquid chromatography (HILIC)-electrospray tandem mass spectrometry [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(27SI): 6816–6822.
- [9] 张儒令, 安凤颖, 胡德禹, 等. 高效液相色谱法测定菜豆中阿维菌素残留量[J]. *现代农业科技*, 2020, (6): 106–108.
ZHANG RL, AN FY, HU DY, *et al*. Determination of abamectin residue in kidney bean by HPLC [J]. *Agric Sci Technol*, 2020, (6): 106–108.
- [10] 王文兰, 刘艳辉, 祖岫杰, 等. 鱼肌肉中阿维菌素和伊维菌素药物残留量测定的样品前处理[J]. *分析实验室*, 2015, 34(4): 475–479.
WANG WL, LIU YH, ZU XJ, *et al*. Sample pretreatment for the determination of abamectin and ivermectin residues in fish muscle tissues [J]. *Chin J Anal Lab*, 2015, 34(4): 475–479.
- [11] 高国文. 高效液相色谱法检测大白菜中阿维菌素残留量[J]. *农药科学与管理*, 2005, 26(11): 12–13, 29.
GAO GW. Determination of abamectin residues in Chinese cabbage by HPLC [J]. *Pestic Sci Admin*, 2005, 26(11): 12–13, 29.
- [12] 杨君宏, 何继红, 侯晓林, 等. 牛肌肉中阿维菌素类药物残留的免疫亲和色谱—高效液相色谱荧光检测方法的研究[J]. *中国畜牧兽医*, 2014(1): 251–253.
YANG JH, HE JH, HOU XL, *et al*. Study on the method of immunoaffinity chromatography-high performance liquid chromatography for the detection of abamectin residues in bovine muscle [J]. *China Anim Husb Vet Med*, 2014(1): 251–253.
- [13] 周遵武, 何方洋, 万宇平, 等. 蔬菜中阿维菌素残留酶联免疫检测方法的建立[J]. *现代农业科技*, 2015, (21): 300–302.
ZHOU ZW, HE FY, WAN YP, *et al*. Determination of abamectin residues in vegetables by enzyme-linked immunosorbent assay [J]. *Agric Sci Technol*, 2015, (21): 300–302.
- [14] 赵卫东, 郑文杰, 贺艳, 等. 酶联免疫法检测动物源性产品中阿维菌素残留[J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(4): 127–130.
ZHAO WD, ZHENG WJ, HE Y, *et al*. Enzyme-linked immunoassay for detection of abamectin residues in animal-derived products [J]. *Food Res Dev*, 2009, 30(4): 127–130.
- [15] 文豪, 周绪正, 李冰, 等. 阿维菌素类药物残留检测的研究进展[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015, (11): 57–57.
WEN H, ZHOU XZ, LI B, *et al*. Research progress on the detection of the residue of avermectins [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2015, (11): 57–57.
- [16] 孙蕊, 张海英, 李红卫, 等. 物理技术降解农产品农药残留的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(8): 118–128.
SUN R, ZHANG HY, LI HW, *et al*. A review on the degradation of pesticide residues in agricultural products by physical techniques [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2013, 28(8): 118–128.
- [17] HORVAT AJM, PETROVIC M, BABIC S, *et al*. Analysis, occurrence and fate of anthelmintics and their transformation products in the environment [J]. *Trac-Trends Anal Chem*, 2012, 31: 61–84.
- [18] 农业部农药检定所. 农药残留量实用检测方法手册(第三卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Institute for the Control of Agrochemicals. Handbook of practical testing methods for pesticide residues (volume 3) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [19] 卢琪琪, 汤铭欣, 刘禹杉, 等. 阿维菌素和高效氯氟菊酯在火龙果中的残留及消解动态[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 325–331.
LU QQ, TANG MX, LIU YS, *et al*. Residues and dissipation dynamics of abamectin and β -cypermethrin in pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit [J]. *Food Sci*, 2019, 40(24): 325–331.
- [20] 傅强, 杨仁斌, 廖海玉, 等. 阿维菌素在柑桔和土壤中的消解动态研究[J]. *分析科学学报*, 2011, 27(1): 85–88.
FU Q, YANG RB, LIAO HY, *et al*. Degradation dynamics of avermectin in citrus and soil [J]. *J Anal Sci*, 2011, 27(1): 85–88.
- [21] NY/T 788—2018 农作物中农药残留试验准则[S].
NY/T 788—2018 Guideline for the testing of pesticide residues in crops [S].
- [22] MTECALF RL. Model ecosystem approach to insecticide degradation: A critique annual review of entomology [J]. 1975, 22: 241–261.
- [23] 国家环保局. 化学农药环境安全评价试验准则[J]. *农药科学与管理*, 1990, (4): 4–9.
National Environmental Protection Agency. Test guidelines for environmental safety assessment of chemical pesticides [J]. *Pestic Sci Manage*, 1990, (4): 4–9.
- [24] GB 2763—2019 食品中农药残留最大残留限量[S].
GB 2763—2019 Maximum residue limits for pesticides in food [S].

(责任编辑: 王欣)

作者简介



孙蕊, 工程师, 主要研究方向为食品检测与分析。
E-mail: 18010289028@163.com



刘慧君, 讲师, 主要研究方向为食品安全检测与控制。
E-mail: huijunliu78@163.com