

草莓中氟啶虫胺脒及其代谢物降解规律及风险评估

王贵民^{1,2}, 王欣然², 刘庆菊², 韩平^{2*}, 谭辉华^{1*}

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所, 北京 100097)

摘要: **目的** 探究草莓生长过程中氟啶虫胺脒及其代谢物的残留降解变化规律以及膳食暴露风险。**方法** 利用超高效液相色谱-串联质谱法建立了草莓中氟啶虫胺脒及其代谢物的高灵敏度快速测定方法; 通过田间试验, 明确氟啶虫胺脒在草莓中的残留消解规律, 并进行膳食风险评估。**结果** 在正离子多反应监测模式下, 氟啶虫胺脒及其代谢物基质和溶液匹配标准曲线在 0.1~100.0 ng/mL 的浓度范围内线性关系良好, 最低检出限为 0.01 μg/kg, 最低定量限为 0.02 μg/kg, 不同添加浓度下回收率范围在 88.16%~104.14%, 相对标准偏差小于等于 9.18%, 符合痕量检测的要求; 田间试验结果表明氟啶虫胺脒在草莓中经过代谢会产生 X11719474 和 X11721061 2 种代谢产物, 且消解规律符合一级动力学方程, 半衰期为 14.75 d; 膳食风险评估结果表明, 氟啶虫胺脒在草莓中膳食暴露风险较低。**结论** 以 10 g/亩剂量在温室草莓上使用 50%氟啶虫胺脒水分散粒剂, 氟啶虫胺脒及其代谢物 X11719474 和 X11721061 无显著膳食暴露风险。**关键词:** 氟啶虫胺脒; 代谢物; 消解动态; 超高效液相色谱-串联质谱法; 草莓

Degradation and risk assessment of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry

WANG Gui-Min^{1,2}, WANG Xin-Ran², LIU Qing-Ju², HAN Ping^{2*}, TAN Hui-Hua^{1*}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. China Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Institute of Quality Standard and Testing Technology, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Objective To explore the residual degradation dynamics and risks of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry. **Methods** A highly sensitive and rapid method for the determination of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry was established by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. The field experiment was conducted to clarify the residual digestion rule of sulfoxaflor in strawberry and evaluated the dietary risk. **Results** The calibration curves of sulfoxaflor and its metabolites in matrix and solution matching exhibited a good linear response in the range of 0.1–100.0 ng/mL, the lowest limit of detection was 0.01 μg/kg, and the lowest

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX201910)

Fund: Supported by the Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Science and Technology Innovation Capacity Building Project (KJCX201910)

*通信作者: 韩平, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: hanp@brcast.org.cn

谭辉华, 教授, 主要研究方向为农药残留与环境毒理、有害生物综合防治研究。E-mail: tanhh@gxu.edu.cn

*Corresponding author: HAN Ping, Associate Professor, China Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Institute of Quality Standard and Testing Technology, 11 Shuguang Garden Middle Road, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: hanp@brcast.org.cn

TAN Hui-Hua, Professor, College of Agriculture, Guangxi University, No.100, East University Road, Nanning 530004, China. E-mail: tanhh@gxu.edu.cn

limit of quantification was 0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The recovery was within the range of 88.16%–104.14% at different concentrations, and the relative standard deviation was less than or equal to 9.18%, which met the requirements of trace detection. The field trial results showed that after metabolism, sulfoxaflor could produce X11719474 and X11721061 metabolites, and the digestion rule conformed to the first-order kinetic equation, with the half-life of 14.75 d. The results of dietary risk assessment indicated that the dietary exposure risk of sulfoxaflor in strawberry was low. **Conclusion** Using 50% sulfoxaflor water dispersible granules on strawberry in greenhouse at a dose of 10 g/mu, sulfoxaflor and its metabolites X11719474 and X11721061 have no significant dietary exposure risk.

KEY WORDS: sulfoxaflor; metabolites; degradation dynamics; ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry; strawberry

0 引言

草莓是世界上消费量最大的浆果之一,其富含氨基酸、维生素以及多酚等多种营养元素,对人体生长发育有很好的促进作用,尤其对老人、儿童大有裨益^[1-2],其中的多酚类物质,还可以起到消炎与抑制癌肿生长的作用^[3-4]。

根据《中国草莓行业发展趋势分析与投资前景研究报告》数据,2021年我国草莓产量达368.25万t,栽培面积达到14万公顷,是世界上最大的草莓生产国,占比全球草莓总产量三分之一以上^[5]。但在我国草莓生产过程中化学农药使用较为普遍,班思凡等^[6]在全国多地开展的设施栽培草莓中农药残留检测中全部120个草莓样品均存在农药残留检出;岳宁等^[7]在2020年北京市草莓农药残留筛查工作中共检出44种农药残留,最大农药残留浓度高达9.87 mg/kg,检出在草莓上未登记使用农药占比61.4%,其中氟啶虫胺腈检出率为22.7%,最大残留量为4.98 mg/kg。在GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留量》中,氟啶虫胺腈的最大残留限量(maximum residue limit, MRL)为0.5 mg/kg。氟啶虫胺腈作为一种新型烟碱类杀虫剂,对刺吸类害虫有显著防治效果^[8-10],但目前氟啶虫胺腈在草莓上尚未登记使用,有研究表明绿叶蔬菜及土壤中的氟啶虫胺腈残留会威胁蚯蚓和蜜蜂等有益生物种群生态^[11-14]。根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)在2011年发布的报告^[15],氟啶虫胺腈在植物及土壤中主要的2种代谢产物分别是X11719474和X11721061。但目前氟啶虫胺腈在草莓中的代谢规律及代谢产物尚不清晰,严重影响草莓中氟啶虫胺腈及其代谢物的监控,不利于草莓农药残留标准的制订,影响草莓质量安全。

基于此,本研究以北京市昌平区大棚栽培草莓为研究对象,建立草莓中氟啶虫胺腈及其代谢产物定量分析方法,通过在大棚草莓上喷施氟啶虫胺腈后按不同时间间隔采摘,分析草莓中氟啶虫胺腈及其代谢物的残留量,明确草莓中氟啶虫胺腈及其代谢产物的降解规律,并进行急性、慢性膳食风险评估,为指导农药科学使用提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

氟啶虫胺腈标准品(1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 坛墨质检科技股份有限公司); 氟啶虫胺腈代谢物 X11719474 标准品(纯度97.26%)、氟啶虫胺腈代谢物 X11721061 标准品(纯度>95%)(罗恩试剂公司); 50%氟啶虫胺腈水分散粒剂(科迪华农业科技有限责任公司); 乙腈(色谱纯, 美国赛默飞公司); 无水硫酸镁(分析纯, 西亚化学科技有限公司); 氯化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); N-丙基乙二胺(N-propylenediamine, PSA, 50 μm , 美国 Agilent 公司); 0.22 μm 聚丙烯滤膜(天津市科亿隆实验设备有限公司)。

Blixer 3 乳化搅拌机(法国 ROBOT-COUCPE 公司); ME104E 电子天平[精度 0.1 mg, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; SK-1 涡旋混合器(江苏金坛公司); 3-30K 台式高速冷冻离心机(德国 SIGMA 公司); HZQ-C 空气浴振荡器(哈尔滨市东联电子技术开发有限公司); ACQUITY UPLC[®]BEH C₁₈ 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)、TQ-S 超高效液相色谱三重四极杆串联质谱仪(美国沃特世公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 氟啶虫胺腈及其代谢物测定

(1) 标准溶液配制

准确吸取一定量 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 氟啶虫胺腈标准物质,用乙腈逐级稀释至 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准储备液;准确称取氟啶虫胺腈代谢物 X11719474、X11721061 标准品,分别用乙腈稀释成质量浓度为 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准储备液。各量取一定体积的氟啶虫胺腈及其 2 种代谢物的标准储备溶液,用乙腈稀释为 0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的混标作为标准工作溶液,于-20℃下保存。

(2) 样品前处理

称取 5 g 草莓样品置于 50 mL 塑料离心管中,加入 10 mL 乙腈,振荡涡旋 30 s 后于 200 r/min 摇床振荡 30 min,再加入 NaCl 1 g, MgSO₄ 4 g, 涡旋振荡 30 s, 以 8000 r/min 离心 3 min。取离心后上清液 1 mL 加入 PSA 50 mg, MgSO₄ 150 mg,

涡旋振荡 30 s, 以 10000 r/min 离心 5 min 后移取上清液过 0.22 μm 滤膜。将滤液与水 1:1 (V:V) 混合后待液相色谱串联质谱仪检测。

(3) 色谱条件

色谱柱 ACQUITY UPLC[®] BEH C₁₈ (100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)。流动相为 0.1% 甲酸水、5 mmol 乙酸铵溶液(流动相 A)和 0.1% 甲酸、5 mmol 乙酸铵、10% 水乙腈(流动相 B), 流速为 0.3 mL/min, 梯度洗脱, 具体参数见表 1, 柱温为 40°C, 进样体积为 5 μL 。

(4) 质谱条件

采用多反应监测模式(magnetic resonance microscopy, MRM), 电离方式为电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI),

正离子模式。相关气体条件为: 干燥气(N₂)流速: 150 L/h, 干燥气温度: 400°C; 雾化气压力: 30 psi; 离子喷雾电压: 3500 V; 监测离子对、碰撞能量参见表 2。

表 1 流动相及梯度洗脱条件
Table 1 Mobile phase and gradient elution conditions

步骤	时间 /min	流速 / (mL/min)	流动相 A/%	流动相 B/%
1	0.0	0.3	95	5
2	2.5	0.3	10	90
3	2.6	0.3	5	95
4	5.9	0.3	5	95
5	6.0	0.3	95	5

表 2 氟啶虫胺胍及其代谢物的保留时间、定量离子对、定性离子对信息

Table 2 Retention time, quantitative ion pair and qualitative ion pair information of sulfoxaflor and its metabolites

样品名称	保留时间/min	定量离子对	定性离子对	源内碎裂电压/V	碰撞气能量/V
氟啶虫胺胍	2.47	278.1>174.1	278.1>154.1	15	7; 28
X11719474	2.20	296>174	296>154	15	7; 28
X11721061	2.48	192>172	192>130	18	16; 19

1.2.2 田间试验方法

(1) 施药方法

试验于 2022 年 3 月在北京市昌平区草莓种植温室进行。鉴于氟啶虫胺胍在草莓上并无登记, 施药量为中国农药信息网登记数据中西瓜上双倍推荐剂量即 10 g/亩(5 g a.i./亩)^[16], 设 3 个小区, 每小区面积为 1.76 m²。施药时将 30 g 50% 氟啶虫胺胍水分散粒剂溶解于 3 L 水中, 取出 25 mL, 加水稀释至 1.5 L, 均匀喷施在 3 小区草莓上, 每小区 0.5 L, 施药一次。间隔 2 行保护行设 3 小区空白对照, 每小区均匀喷施清水 0.5 L, 喷施一次。

(2) 样品采集

草莓样品采集方法参考 NY/T 788—2018《农药残留试验准则》; 于施药后 2 h、1 d、3 d、5 d、7 d、10 d、14 d、21 d 采样, 于每个试验小区内 10 个以上的采样点随机采集生长正常、无病害、已着药的草莓果实。共 3 次重复, 每个重复不少于 500 g。采样后用研磨机搅匀, 装盒标记, 于 -20°C 冰柜中储存。

1.2.3 膳食暴露风险评估

分别以慢性膳食摄入风险(%ADI)和急性膳食摄入风险(%ARfD)为指标, 进行草莓中农药残留慢性和急性膳食摄入风险评估。通过公式(1)计算农药的慢性膳食摄入风险, 通过公式(2)和(3)计算农药的急性膳食摄入风险。

$$\%ADI = \frac{STMR \times 0.0457}{bw \times ADI} \times 100 \quad (1)$$

公式(1)中, STMR 为农药残留中值(supervised trials median residue, mg/kg); 0.0457 为居民日均草莓消费量(kg); bw 为人体平均体重(kg), 计为 60 kg; ADI 为农药每日允许摄入

量[allowable daily intake, mg/(kg·bw)], 氟啶虫胺胍的 ADI 为 0.05 mg/(kg·bw), 数据来源于 FAO、GB 2763—2021、世界卫生组织(World Health Organization, WHO)和农药残留专家联席会议(Joint Meeting on Pesticide Residues, JMPR)^[17]。

$$IESTI = \frac{LP \times HR}{bw} \quad (2)$$

$$\%ARfD = \frac{IESTI}{ARfD} \times 100 \quad (3)$$

公式(2)和公式(3)中, IESTI 为国际短期摄入估计值(international short-term intake, mg/kg); LP 为中国居民草莓消费的大份餐(kg), 按 0.44218 kg 计; HR 为农药残留最大值(highest residual, mg/kg); ARfD 为急性参考剂量[acute reference dose, mg/(kg·bw)], 根据 JMPR 相关规定, 氟啶虫胺胍 ARfD 值为 0.3 mg/(kg·bw)。

1.3 数据处理

采用 Waters MassLynx V4.1 进行质谱定量数据分析, 采用 Microsoft Excel 2016 软件进行分析, 同时绘制线性范围工作曲线等。

2 结果与分析

2.1 氟啶虫胺胍及其代谢物测定方法学考察

将氟啶虫胺胍及其代谢物分别用草莓空白样品基质稀释成不同的浓度, 分别进样, 进行线性回归, 得到其线性范围并计算相关系数; 以 3 倍信噪比(S/N=3)计算得该方法检出限(limits of detection, LODs), 以 10 倍信噪比

($S/N=10$) 计算得该方法定量限 (limits of quantitation, LOQs)。氟啶虫胺胍及其代谢物与基质分离效果良好, 色谱图见图 1。如表 3 所示, 以进样浓度为 X 轴, 以峰面积为 Y 轴绘制线性回归方程, 研究结果表明氟啶虫胺胍及其代谢物在 0.1~100.0 ng/mL 的浓度范围内线性关系良好, r^2 大于 0.994, 检出限为 0.01~0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 定量限为 0.02~0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 达到了痕量检测的要求。氟啶虫胺胍及其代谢物的基质效应 (matrix effect, ME) 按公式 (4) 计算。

$$ME/\% = \left(\frac{S_m}{S_s} - 1 \right) \times 100 \quad (4)$$

式 (4) 中 S_m 表示基质标准曲线斜率; S_s 表示溶剂标准曲线斜率。当 $ME < 0$ 时, 表现为基质抑制效应; 当 $ME > 0$ 时, 表现为基质增强效应, 其中 $|ME| \leq 20\%$ 时为弱基质效应, $20\% < |ME| \leq 50\%$ 时为中等基质效应, $|ME| > 50\%$ 则为强基质

效应。经计算氟啶虫胺胍基质效应为 13.03%, 代谢物 X11719474 基质效应为 -0.03%, 代谢物 X11721061 基质效应为 0.17%, 因此以上 3 种物质在草莓基质中均为弱基质效应。故在定量检测中采用溶剂标准曲线。

2.2 回收率和精密度测定

在草莓空白样品中进行回收率及精密度测定试验, 根据氟啶虫胺胍及其代谢物的定量限与 GB 2763—2021 中规定的草莓中氟啶虫胺胍的临时最大残留限量, 分别以 0.01、0.10、1.00 mg/kg 作为添加浓度进行加标回收试验, 每个添加浓度进行 5 次平行试验。加标回收试验结果如表 4 所示, 不同添加浓度下氟啶虫胺胍及其代谢物的回收率为 88.16%~104.14%, 相对标准偏差 (relative standard deviations, RSDs) 为 1.99%~9.18%, 符合农药残留测定的要求。

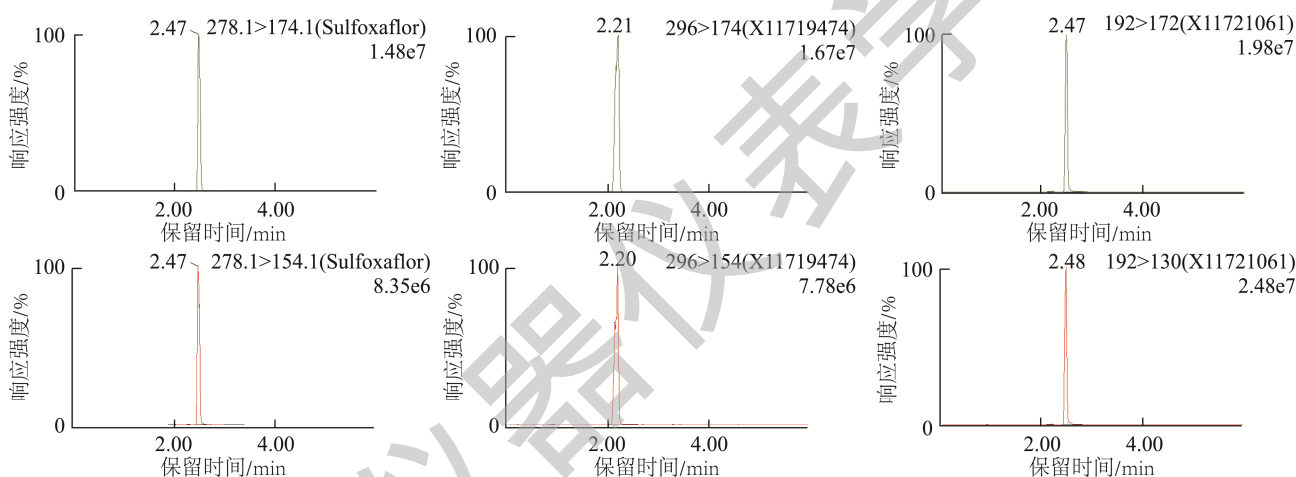


图 1 草莓基质中氟啶虫胺胍及其代谢物的特征离子色谱图 (50 ng/mL)

Fig.1 Characteristic ion chromatograms of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry substrate (50 ng/mL)

表 3 氟啶虫胺胍及其代谢物的线性方程、决定系数 (r^2)、LODs 和 LOQs
Table 3 Linear equation, r^2 , LODs and LOQs of sulfoxaflor and its metabolites

化合物	基质	线性方程	线性范围/(ng/mL)	r^2	LODs/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	LOQs/($\mu\text{g}/\text{kg}$)
氟啶虫胺胍	草莓	$Y=15974.8X+361.148$	0.1~100.0	0.9945	0.02	0.05
	溶剂	$Y=14133.3X+1032.93$		0.9992		
X11719474	草莓	$Y=29544.7X+2297.15$	0.1~100.0	0.9970	0.01	0.02
	溶剂	$Y=29554.3X+2340.59$		0.9970		
X11721061	草莓	$Y=20939.3X-1007.31$	0.1~100.0	0.9987	0.02	0.05
	溶剂	$Y=20903.6X-1007.07$		0.9987		

表 4 氟啶虫胺胍及其代谢物的回收率和 RSDs ($n=5$)
Table 4 Recoveries and RSDs of sulfoxaflor and its metabolites ($n=5$)

化合物名称	0.01 mg/kg		0.10 mg/kg		1.00 mg/kg	
	回收率/%	RSDs/%	回收率/%	RSDs/%	回收率/%	RSDs/%
氟啶虫胺胍	102.32	7.63	101.76	3.57	102.99	1.99
X11719474	101.76	8.53	97.94	7.64	104.14	9.18
X11721061	88.16	4.26	91.96	2.46	102.96	3.16

2.3 草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物的消解动态

分别对施药后不同时间的草莓果实样品进行取样测定,测定结果如表 5 所示。在施药后草莓果实中检测到氟啶虫胺胍及其代谢物 X11719474 和 X11721061, 2 h 后残留量分别为 97.131、0.837、0.059 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。表明氟啶虫胺胍在草莓中存在 X11719474 和 X11721061 两种代谢物,且代谢物 X11719474 残留量较高, X11721061 残留量较低。这与 HYUNG 等^[18]关于氟啶虫胺胍及其代谢物 X11719474 和 X11721061 在大米中的残留消解规律类似。

根据氟啶虫胺胍及其代谢物 X11719474 和 X11721061 的消解动态方程,发现氟啶虫胺胍在草莓果实中的消解规律符合一级动力学方程,为 $C_t=0.068349e^{-0.047x}$, 相关系数 r^2 为 0.8004, 21 d 后消解率为 69.98%, 消解半衰期为 14.75 d; 代谢物 X11719474 消解规律同样符合一级动力学方程,为 $C_t=0.0006903e^{-0.192x}$, 相关系数 r^2 为 0.9305, 21 d 后消解率为 99.05%, 消解半衰期为 3.61 d; 代谢物 X11721061 因残留量较低,具体消解动态规律尚不明确,有待后续试验进一步确认。本研究中氟啶虫胺胍半衰期较长,可能是由于

温室栽培环境下空气流通较少^[19-21]; 代谢物 X11719474 半衰期较氟啶虫胺胍更短,表明该代谢物较母体结构更不稳定^[22-24]; 代谢物 X11721061 残留量低可能是由于该代谢物本身结构稳定性较低或在草莓细胞中氟啶虫胺胍向该代谢物转化量较少^[25-27]。王玉洁等^[28]的研究结果表明金银花中氟啶虫胺胍的降解速度较快,半衰期为 1.81 d; 陈爱松^[29]研究了氟啶虫胺胍在温室内哈密瓜果皮、果肉和叶片中的消解动态,结果表明氟啶虫胺胍在哈密瓜果皮、果肉和叶片中的半衰期分别为 9.46、7.41、19.86 d, 与本研究结果相近。

2.4 草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物膳食风险评估

在代谢物毒性未知的情况下,代谢物的 ADI 以及 ARfD 可以近似使用母体物质的 ADI 和 ARfD 代替^[30]。由表 6 可知,氟啶虫胺胍及其代谢物的急性和慢性膳食风险均远小于 1,且代谢物 X11719474 和 X11721061 的急性和慢性膳食风险均极小,表明氟啶虫胺胍在草莓上的代谢物膳食风险较低。但目前对于代谢物 X11719474 和 X11721061 具体的毒理学数据尚未明确,其具体膳食风险存在进一步研究空间。

表 5 草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物的消解动态($n=3$)

Table 5 Degradation dynamics of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry ($n=3$)

时间	氟啶虫胺胍		X11719474		X11721061	
	残留量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	消解率/%	残留量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	消解率/%	残留量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	消解率/%
2 h	97.131	/	0.837	/	0.059	/
1 d	59.313	38.93	0.400	52.21	<0.050	/
3 d	50.239	48.28	0.244	70.89	0.059	-0.12
5 d	53.936	44.47	0.271	67.66	0.054	8.23
7 d	44.901	53.77	0.231	72.45	0.053	9.97
10 d	39.972	58.85	0.170	79.66	0.064	-9.82
14 d	32.253	66.79	0.062	92.55	<0.050	/
21 d	29.163	69.98	0.008	99.05	0.065	-11.24

注: /表示不存在。

表 6 草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物的膳食风险评估

Table 6 Dietary risk assessment of sulfoxaflor and its metabolites in strawberry

时间	氟啶虫胺胍		X11719474		X11721061	
	%ADI/%	%ARfD/%	%ADI/%	%ARfD/%	%ADI/%	%ARfD/%
2 h	0.15	0.29	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
1 d	0.09	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
3 d	0.08	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
5 d	0.08	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
7 d	0.07	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
10 d	0.06	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
14 d	0.05	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
21 d	0.04	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

3 结 论

本研究建立了草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物的快速高灵敏度测定方法,在正离子 MRM 模式下,氟啶虫胺胍及其代谢物在 0.1~100.0 ng/mL 的浓度范围内线性关系良好,最低定量限为 0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$,3 个添加浓度下的回收率为 88.16%~104.14%,相对标准偏差为 1.99%~9.18%,满足草莓中农药残留测定的要求。

本研究通过在大棚草莓上喷施氟啶虫胺胍后按不同时间间隔采摘,测定了不同施药时间后草莓中氟啶虫胺胍及其代谢物的残留量。结果表明,在草莓中氟啶虫胺胍通过细胞代谢会产生 X11719474 和 X11721061 2 种代谢物,氟啶虫胺胍的消解规律符合一级动力学方程,消解半衰期为 14.75 d。且在温室草莓上以 10 g/亩施用 50%氟啶虫胺胍水分散剂时,氟啶虫胺胍及其代谢物的急性和慢性膳食风险均远小于 1,膳食风险较低。但由于代谢物 X11719474 和 X11721061 毒理学数据尚未明确,其具体膳食风险尚有进一步研究空间。

参考文献

- 宁志怨,钱小强,伊兴凯,等.氨基酸水溶肥对促进草莓产量、品质及生长特性的影响[J].浙江农业科学,2020,61(12):2565-2567.
NING ZY, QIAN XQ, YI XK, *et al.* Effect of amino acid water-soluble fertilizer on promoting yield, quality and growth characteristics of strawberry [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2020, 61(12): 2565-2567.
- MILLER MG, THANGTHAENG N, RUTLEDGE GA, *et al.* Dietary strawberry improves cognition in a randomised, double-blind, placebo-controlled trial in older adults [J]. *Brit J Nutr*, 2021, 126(2): 320.
- HUANG M, HAN Y, LI L, *et al.* Protective effects of non-extractable phenolics from strawberry against inflammation and colon cancer *in vitro* [J]. *Food Chem*, 2022, 374: 131759.1-131759.8.
- 马艳弘,李芬芳,孙纪阳,等.大孔吸附树脂纯化草莓多酚及体外抗氧化活性研究[J].江西农业学报,2019,31(5):84-90.
MA YH, LI FF, SUN JY, *et al.* Research on purification of strawberry polyphenol by macroporous resin and its antioxidant activities *in vitro* [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2019, 31(5): 84-90.
- 2011-2022 年我国草莓产量、消费量、播种面积及相关企业注册量情况统计[EB/OL]. [2022-08-31]. <http://chinabaogao.com/detail/608038.html> [2022-10-25].
Statistics of strawberry production, consumption, planting area and registration of relevant enterprises in China from 2011 to 2022 [EB/OL]. [2022-08-31]. <http://chinabaogao.com/detail/608038.html> [2022-10-25].
- 班思凡,李春梅,贺青华,等.设施栽培草莓中农药残留膳食风险评估[J].食品工业科技,2020,41(3):212-220.
BAN SF, LI CM, HE QH, *et al.* Dietary risk assessments of pesticide residues in greenhouse-grown strawberry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(3): 212-220.
- 岳宁,李晓慧,王琦,等.北京地区草莓农药残留水平分析及膳食风险评估[J].农产品质量与安全,2022,(3):24-30.
- YUE N, LI XH, WANG Q, *et al.* Analysis of pesticide residues in strawberry and dietary risk assessment in Beijing [J]. *Qual Saf Agro-prod*, 2022, (3): 24-30.
- WAZIR S, SHAD SA. Inheritance mode and metabolic mechanism of the sulfoximine insecticide sulfoxaflor resistance in *Oxycaenus hyalinipennis* (Costa) [J]. *Pest Manag Sci*, 2021, 77(9): 4201.
- 裴新国,张帅,张彦超,等.褐飞虱对氟啶虫胺胍的抗性监测与生化抗性机制[J].植物保护,2022,48(3):39-46.
PEI XG, ZHANG S, ZHANG YC, *et al.* Resistance monitoring and biochemical resistance mechanism of nilaparvata lugens to fipronil [J]. *Plant Protect*, 2022, 48(3): 39-46.
- WATSON GB, SIEBERT MW, WANG NX, *et al.* Sulfoxaflor-a sulfoximine insecticide: Review and analysis of mode of action, resistance and cross-resistance [J]. *Pestic Biochem Phys*, 2021, 178: 104924.
- LINGUADOCA A, RIZZI C, VILLA S, *et al.* Sulfoxaflor and nutritional deficiency synergistically reduce survival and fecundity in bumblebees [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 795: 148680.
- ZHANG XL, WANG XG. The toxic effects of sulfoxaflor induced in earthworms (*Eisenia fetida*) under effective concentrations [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(5): 134-147.
- GAUTHIER JR, MABURY SA. The sulfoximine insecticide sulfoxaflor and its photodegrade demonstrate acute toxicity to the nontarget invertebrate species daphnia magna [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2021, 40(8): 2156-2164.
- SIVITER H, BROWN MJ, LEADBEATER E. Sulfoxaflor exposure reduces bumblebee reproductive success [J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 109-112.
- World Health Organization. Inventory of evaluations performed by the Joint Meeting on Pesticide Residues (JMPR) [EB/OL]. [2021-10-23]. <http://apps.who.int/pesticide-residues-jmpr-database> [2022-10-11].
- 中国农药信息网[DB/OL]. <http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml> [2022-10-15].
China Pesticide Information Network [DB/OL]. <http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml> [2022-10-15].
- CREPET A, LUONG TM, BAINES J, *et al.* An international probabilistic risk assessment of acute dietary exposure to pesticide residues in relation to codex maximum residue limits for pesticides in food [J]. *Food Control*, 2021, 121: 107563.
- HYUNG SC, ABD EA, SUNG WK, *et al.* Simultaneous determination of sulfoxaflor and its metabolites, X11719474 and X11721061, in brown rice and rice straw after field application using LC-MS/MS [J]. *Int J Environ Anal Chem*, 2017, 97(2): 99-111.
- 孙彩霞,徐明飞,戴芬,等.露地和温室栽培模式下西兰花中3种农药的残留动态与风险评估[J].中国科学院大学学报,2019,36(4):552-559.
SUN CX, XU MF, DAI F, *et al.* Dissipation dynamics and risk assessment of three pesticides in broccoli under greenhouse and open field condition [J]. *J Chin Acad Sci Univ*, 2019, 36(4): 552-559.
- SONG L, ZHONG ZZ, HAN YT, *et al.* Dissipation of sixteen pesticide residues from various applications of commercial formulations on strawberry and their risk assessment under greenhouse conditions [J].

- Ecotox Environ Saf, 2020, 188: 109842.
- [21] 李清华, 张奇珍, 余曼丽, 等. 噻虫胺在黄瓜叶片中累积量与对温室白粉虱防治效果的相关性及残留消解动态[J]. 农药学学报, 2021, 23(5): 938–946.
LI QH, ZHANG QZ, YU ML, *et al.* Correlation between the accumulation amount of clothianidin in cucumber leaves and the control efficacy on greenhouse whitefly and the dynamics of residue dissipation [J]. Chin J Pestic Sci, 2021, 23(5): 938–946.
- [22] JIANG WQ, ZHAI WJ, LIU DH, *et al.* Coexisting antibiotic changes the persistence and metabolic profile of atrazine in the environment [J]. Chemosphere, 2021, 269: 129333.
- [23] 唐红霞, 黄佳庆, 孙强, 等. QuEChERS-高效液相色谱-串联质谱法检测氟吡菌胺及其代谢物和霜霉威在叶用莴苣中的残留及消解动态[J]. 农药学学报, 2021, 23(2): 388–394.
TANG HX, HUANG JQ, SUN Q, *et al.* Residue and dissipation of fluopicolide, its metabolite and propamocarb in the leaf lettuce using a modified QuEChERS method and HPLC-MS/MS [J]. Chin J Pestic Sci, 2021, 23(2): 388–394.
- [24] LIU Y, ZHAO YL, LI SH, *et al.* Multi-residue analysis, dissipation behavior, and final residues of four insecticides in supervised eggplant field [J]. Food Addit Contam A, 2022, 39(6): 1086–1099.
- [25] 张鸿超, 陈德勇, 韩莹, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定 6 种典型农药及 3 种代谢物在黄瓜中的残留消解动态[J]. 农药学学报, 2022, 24(1): 168–176.
ZHANG HC, CHEN DY, HAN Y, *et al.* Residues and dissipation dynamics of six typical pesticides and three metabolites in cucumber by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chin J Pestic Sci, 2022, 24(1): 168–176.
- [26] ZHANG JJ, YANG H. Advance in methodology and strategies to unveil metabolic mechanisms of pesticide residues in food crops [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(9): 2658–2667.
- [27] 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 and its metabolite tralopyril in mustard [J]. J Agric Food Chem, 2022, 24(3): 563–571.
- [28] 王玉洁, 薛健, 金红宇, 等. 金银花中氟啶虫胺腈的残留规律及膳食风险评估[J]. 中成药, 2017, 39(7): 1534–1536.
WANG YJ, XUE J, JIN HY, *et al.* Residue of fipronil in honeysuckle and dietary risk assessment [J]. Chin Tradit Pat Med, 2017, 39(7): 1534–1536.
- [29] 陈爱松. 吐鲁番设施蔬菜农药残留分析及氟啶虫胺腈消解动态研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
CHEN AIS. Analysis of pesticide residues in turpan protected vegetables and study on the degradation of sulfoxaflor [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
- [30] 潘莉璇, 毛连纲, 张兰, 等. 噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在土壤中的环境归趋及对非靶标生物的毒性效应研究进展[J]. 现代农药, 2022, 21(3): 20–24.
PAN LX, MAO LG, ZHANG L, *et al.* Research progress on the environmental fate of thiamethoxam and its metabolite thiamethoxam in soil and their toxic effects on non target organisms [J]. Mod Agrochem, 2022, 21(3): 20–24.

(责任编辑: 张晓寒 黄周梅)

作者简介



王贵民, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品质量与安全。

E-mail: 927687717@qq.com



韩平, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。

E-mail: hanp@brcast.org.cn



谭辉华, 教授, 主要研究方向为农药残留与环境毒理、有害生物综合防治研究。

E-mail: tanhh@gxu.edu.cn