DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260213003
**引用格式**: 周树娅, 王联广, 季青梅, 等. 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆中的残留及消解动态研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 81–88.
Zhou Shuya, Wang Lianguang, Ji Qingmei, et al. Study on residue and dissipation dynamics of 22% thiamethoxam•lambda-cyhalothrin microcapsule suspension-suspension concentrate in *Glycine max* L. Merr [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 81–88. (in Chinese with English abstract).

# 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆中的残留及消解动态研究

周树娅, 王联广, 季青梅, 杨 旭, 岳 银, 伍湘竹, 卢 艳, 马 鹏*
(昭通市绿色食品发展中心, 昭通 657000)

**摘 要: 目的** 明确 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆上的残留及消解动态。**方法** 本研究参照 NY/T 788—2018《农作物中农药残留试验准则》, 开展田间试验, 采用 QuEChERS-液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, QuEChERS-LC-MS/MS)和 QuEChERS-气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, QuEChERS-GC-MS/MS)分别测定不同剂量下噻虫嗪•高效氯氟氰菊酯在菜用大豆中的残留及消解动态。**结果** 在 0.002~0.050 μg/mL、0.005~0.500 μg/mL 质量浓度范围内, 噻虫嗪、高效氯氟氰菊酯在菜用大豆基质中的质量浓度与响应值具有良好的线性关系, 相关系数均大于 0.99。添加回收试验中, 噻虫嗪的平均回收率为 79.9%~92.4%, 相对标准偏差为 0.46%~8.71%; 高效氯氟氰菊酯的平均回收率为 84.50%~97.10%, 相对标准偏差为 0.39%~9.11%。根据一级动力学方程拟合, 获得消解过程中, 噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆中半衰期均小于 15 d, 属于易降解农药。推荐剂量和 2 倍推荐剂量下, 噻虫嗪的半衰期分别为 10.7 d、4.3 d; 高效氯氟氰菊酯的半衰期分别为 3.3 d、7.3 d。噻虫嗪及推荐剂量下的高效氯氟氰菊酯的残留动态呈现先增加后降低的趋势, 施药后 5 d 达到峰值, 后逐渐消解。施药 14 d 后, 推荐剂量和 2 倍推荐剂量下, 噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的残留量均超过最大残留量(maximum residue limit, MRL)。**结论** 菜用大豆在露地生产中应严格按照推荐剂量施用 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂, 建议严格执行 16 d 及以上安全间隔期, 禁止超剂量施用。

**关键词:** 噻虫嗪; 高效氯氟氰菊酯; 菜用大豆; 农药残留; 消解动态
**中图分类号:** TS207.7; S481.8 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0081–08

**收稿日期:** 2026-02-13

**第一作者:** 周树娅(1989—), 女, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全、农药残留分析及农产品绿色生产技术研究, 农药安全高效应用。E-mail: 714963240@qq.com
***通信作者:** 马鹏(1988—), 男, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为农业环境保护、农产品质量安全、农药安全高效应用。E-mail: 1667931431@qq.com

# Study on residue and dissipation dynamics of 22% thiamethoxam•lambda-cyhalothrin microcapsule suspension-suspension concentrate in *Glycine max* L. Merr

ZHOU Shu-Ya, WANG Lian-Guang, JI Qing-Mei, YANG Xu, YUE Yin, WU Xiang-Zhu, LU Yan, MA Peng*

(*Zhaotong Green Food Development Center*, *Zhaotong* 657000, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To clarify the residue and dissipation dynamics of 22% thiamethoxam•lambda-cyhalothrin microcapsule suspension-suspension concentrate in *Glycine max* L. Merr. **Methods** This paper conducted field trials in accordance with the reference to the NY/T 788—2018 *Guidelines for the testing of pesticide residues in agricultural crops*, and the residues and dissipation dynamics of in *Glycine max* L. Merr at different application doses by means of QuEChERS-liquid chromatography-tandem mass spectrometry (QuEChERS-LC-MS/MS) and QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry (QuEChERS-GC-MS/MS). **Results** Within the mass concentration ranges of 0.002–0.050 μg/mL and 0.005–0.500 μg/mL, thiamethoxam and lambda-cyhalothrin exhibited an excllent linear relationship between mass concentration and response values in *Glycine max* L. Merr matrices, and the correlation coefficients exceeded 0.99. In the recovery experiment, the average recovery rate for thiamethoxam was 79.9%–92.4% with the relative standard deviations 0.46%–8.71%, while that for lambda-cyhalothrin was 84.50%–97.10% with the relative standard deviations 0.39%–9.11%. According to the first-order kinetic equation fitting, the half-lives of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin in *Glycine max* L. Merr during the degradation process were both less than 15 d, classifying them as readily degradable pesticides. At the recommended dosage and 2 times the recommended dosage, the half-lives of thiamethoxam were 10.7 d and 4.3 d, respectively; while for lambda-cyhalothrin, the half-lives were 3.3 d and 7.3 d, respectively. The residue dynamics of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin at the recommended dosage showed an initial increase followed by a decrease, reaching peak levels 5 d after application before gradually degrading. After 14 days of application, at the recommended dose and 2 times the recommended dose, the residues of both thiamethoxam and lambda-cyhalothrin exceeded the maximum residue limit (MRL), posing a risk of pesticide overlimit. **Conclusion** In open-field *Glycine max* L. Merr production, 22% thiamethoxam•lambda-cyhalothrin microcapsule suspension-suspension concentrate should be strictly applied at the recommended dosage. It is advised to rigorously implement a safety interval of over 16 d or more and prohibit excessive dosage application.

**KEY WORDS:** thiamethoxam; lambda-cyhalothrin; *Glycine max* L. Merr; pesticide residues; degradation dynamics

## 0 引 言

菜用大豆(*Glycine max* L. Merr)为豆科(Leguminosae)大豆属一年生草本植物, 俗称毛豆, 作为云贵、长江流域广泛种植的鲜食豆类蔬菜, 成熟干燥后兼具粮食、粮油和饲料的功能, 在居民的饮食健康和对经济的影响中占据重要比例。据联合国粮食及农业组织(Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO)统计, 2024 年全国大豆产量为 2065 万吨, 我国大豆产量严重不足, 需从国外大量进口, 2024 年进口量 1.05 亿吨, 占全国粮食进口量 66.7%[1]。因此, 提高大豆单产, 增加大豆的种植面积, 是解决大豆供需矛盾的主要途径之一。随着人民群众对大豆需求的增加, 保持大豆的增产稳产, 对确保我国粮食安全具有重要的现实意义。大豆在生长过程中易受到大豆根腐病、黄叶病、锈病、大豆造桥虫、大豆蚜虫等病虫害的侵扰[2–3], 造成的直接损失达 15%~30%[4], 对大豆的产量和品质造成严重威胁[5–6]。为有效控制大豆病虫害, 化学防治是主要措施之一[7–8]。噻虫嗪又名快胜、阿克泰(结构如图 1A 所示), 是由诺华公司 1991 年开发的高效、低毒、杀虫谱广的第 2 代新烟碱类杀虫剂, 以胃毒、触杀和内吸的方式达到控制虫害的作用[9–10], 普遍用于控制芥菜[11]、马铃薯[12]、芹菜[13]、苹果[14]、芦笋[15]等作物病虫害。GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》规定噻虫嗪在菜用大豆上的最大残留量(maximum residue limit, MRL)为 0.01 mg/kg。

高效氯氟氰菊酯又名三氟氯氰菊酯、功夫菊酯(结构

如图 1B 所示)[16]。因其具有见效快、对光稳定性好、低残留的优点, 兼具触杀和胃毒活性, 无内吸作用, 能有效地防治粮油作物、棉花、果树和蔬菜上的多种害虫[17–19]。GB 2763—2021《食品安全国家标准　食品中农药最大残留限量》规定高效氯氟氰菊酯在大豆上的MRL为0.02 mg/kg。但如不合理施用, 不仅会促使害虫产生抗药性, 增加防控难度, 还将威胁蜜蜂等非靶标生物安全, 对生态环境产生负面影响[20–24], 也危害水生无脊椎动物种群及人类健康[25–26]。

22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂是 12.6%噻虫嗪悬浮剂和9.4%高效氯氟氰菊酯微囊悬浮剂混配而成, 是一种新型的内吸性复配杀虫剂, 其作用速度快、持效期长、活性高, 使用寿命长, 降低农药的使用频率, 能更好的提高农药利用率[27–28]。目前, 对噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的分析方法研究主要有高效液相色谱法[29]、气相色谱法[30]、QuEChERS 结合液相色谱-串联质谱法[31–33]、气相色谱-串联质谱法[34]等。两种农药应用研究涉及枸杞[35]、甘蔗[36]、甘蓝[37]等作物, 但现有的残留研究大多围绕单一制剂、普通悬浮剂和乳油等常规剂型展开, 鲜有针对 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂复配体系开展探究, 本研究试验药剂为微囊-悬浮-悬浮复配剂型, 探究了微囊缓释结构对农药消解行为的影响。其次, 研究对象采用鲜食菜用大豆, 而非成熟油料大豆, 针对鲜食大豆食用的特点开展残留试验, 更符合现实膳食评价的需求。

鉴于此, 本研究对 22% 噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆中残留进行田间农药残留试验, 建立 QuEChERS 前处理结合液相色谱-串联质谱法, 气相色谱-串联质谱法测定菜用大豆中噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯残留并分析其残留及消解规律, 以期为 22% 噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆上的安全高效应用提供参考。

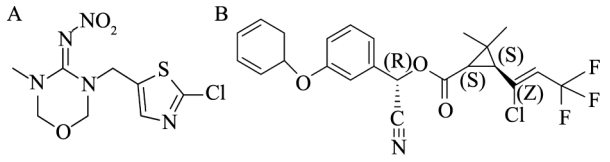



图 1　噻虫嗪(A)和高效氯氟氰菊酯(B)的结构图
Fig.1　Structures of thiamethoxam (A) and lambda-cyhalothrin (B)

## 1　材料与方法

### 1.1　材料、仪器与试剂

大豆品种为“绿领 8 号”(南京绿领种业有限公司)。

1290/6470a 液相色谱-串联质谱联用仪、$C_{18}$ 柱(2.1 mm ×100 mm, 1.8 μm)(美国 Agilent 公司); TRACE 1300/TSQ 9000 气相色谱-串联质谱联用仪、CBX-5MS 色谱柱(30 m ×0.25 mm, 0.25 μm)(美国赛默飞世尔科技公司); LT53 离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); ME204/02 电子天平(精度 0.1 mg, 梅特勒-托利多有限公司); XW-80A 旋涡振荡器(上海泸西分析仪器厂有限公司); 20 L 背负式电动喷雾器(云南驭逸营农业开发有限公司)。

22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂(噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的有效成分的质量分数分别为 12.6%和 9.4%, 在大豆上的推荐剂量为 5~9 mL/亩)(河南喜夫农生物科技有限公司); 噻虫嗪标准品(质量浓度 100.4 μg/mL)、氯氟氰菊酯、高效氯氟氰菊酯标准品(质量浓度 100.2 μg/mL)(天津阿尔塔科技有限公司); 乙腈(色谱纯, 西陇化工有限公司); 乙酸乙酯(色谱纯, 天津市风传化学试剂科技有限公司); 甲酸、甲酸铵(纯度 99%)、正己烷(色谱纯)(上海安谱实验科技股份有限公司); 甲醇[色谱纯, 默克化工（上海）技术有限公司]; QuEchERS 萃取盐包)、QuEChERS 净化管(深圳逗点生物技术有限公司)、0.22 μm 微孔滤膜(天津奥菲尔特过滤器材有限公司)。

### 1.2　田间试验

试验于 2024 年 6—10 月在昭阳区旧圃镇高级职业中学教学实践基地内进行。大豆品种为“绿领 8 号”, 试验定植后 83 d 采收。田间试验参照 NY/T 788—2018《农作物中农药残留试验准则》, 露地栽培, 试验地设每个处理面积为 300 $m^2$, 试验设 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂推荐剂量(用药量 4.5 mL, 兑水量为 20 L)、2 倍推荐剂量(用药量 9 mL, 兑水量 20 L)和清水空白对照 3 个处理, 每个处理 3 次重复, 各处理小区间设保护行。在大豆花期一周, 采用背负式电动喷雾器 20 L, 整株均匀喷雾的方式喷施 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂推荐剂量、2 倍推荐剂量及空白清水, 施药间隔 7 d, 连续施用 2 次。在最后一次施药后 2 h、3 d、5 d、7 d、14 d 采集全株样品。以五点取样法采集生长正常、无病害的大豆样品约 5 kg, 四分法缩分留样 250 g, 切碎、匀浆后储存−20 ℃样品储存柜, 待测。

### 1.3　检测方法

#### 1.3.1　样品提取净化

噻虫嗪样品提取净化: 称取 10.00 g 样品(精确至 0.01 g)于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 乙腈及 1 颗陶瓷均质子, 剧烈振荡 1 min, 加入萃取盐包, 剧烈振荡 1 min 后 4200 r/min 离心 5 min。定量吸取上清液至内含除水剂和净化材料的塑料离心管中, 涡旋混匀 2 min 后, 4200 r/min 离心 5 min, 吸取上清液过 0.22 μm 微孔滤膜, 上机测定。

高效氯氟氰菊酯样品提取净化: 称取 10 g(精确至 0.01 g)试样离心管中, 加入 10 mL 乙腈提取, 振荡 1 min 后 4200 r/min 离心 5 min。吸取 6 mL 上清液于净化管中, 涡旋混匀, 4200 r/min 离心 5 min, 准确吸取 2 mL 净化液, 40 ℃水浴氮吹至近干。加入 20 μL 内标溶液, 加入 1 mL 乙酸乙酯复溶, 过微孔滤膜, 气相色谱-串联质谱联用仪测定。

1.3.2 仪器条件

液相色谱-串联质谱仪条件: 色谱柱: $C_{18}$ 柱(2.1 mm ×100 mm, 1.8 μm); 流速: 0.3 mL/min; 柱温: 40 ℃; 离子化模式: ESI+; 电喷雾电压: 4000 V; 监测模式: 多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)模式; 离子源温度: 350 ℃; 流动相: 梯度洗脱, A: 甲酸铵-甲酸甲醇溶液; B: 甲酸铵-甲酸水溶液, 流动相洗脱条件见表 1, 其质谱参数见表 2:

**表 1 LC-MS-MS 流动相洗脱条件**
**Table 1 Mobile phase elution conditions of LC-MS-MS**

| 时间/min | 流速/(mL/min) | 流动相体积分数/% | |
|---|---|---|---|
| | | 流动相 A | 流动相 B |
| 0.0 | 0.3 | 5 | 95 |
| 0.5 | 0.3 | 5 | 95 |
| 2.5 | 0.3 | 90 | 10 |
| 3.0 | 0.3 | 95 | 5 |
| 4.5 | 0.3 | 95 | 5 |
| 5.0 | 0.3 | 5 | 95 |
| 6.0 | 0.3 | 5 | 95 |

气相色谱-串联质谱仪条件: 色谱柱: CBX-5MS (30 m ×0.25 mm, 0.25 μm); 进样体积: 1.0 μL; 进样口温度: 270 ℃; 升温方式: 90 ℃保持 1 min, 15 ℃/min 升温至 150 ℃, 10 ℃/min 升温至 240 ℃, 15 ℃/min 升温至 280 ℃, 保持 4.5 min; 载气: He; 流速: 1.0 mL/min; 离子源温度: 280 ℃; 电离方式: 电子电离(electron ionization, EI); 传输线温度: 280 ℃; 扫描方式: 选择离子监测(selected ion monitoring, SRM)。其质谱参数见表 2。

**表 2 噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的质谱参数**
**Table 2 Mass spectrum parameters of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin**

| 分析物 | 保留时间/min | 去族电压/V | 母离子(*m*/z) | 碰撞能/V | 子离子(*m*/z) | 碰撞能/V |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 噻虫嗪 | 17.739 | 100 | 292.1 | 80 | 211* | 5 |
| | | | | | 181 | 20 |
| 高效氯氟氰菊酯 | 2.312 | / | 197 | / | 161 | 5 |
| | | | | | 141* | 10 |

注: /表示仪器默认条件; *表示定量离子。

1.3.3 标准曲线的绘制

分别吸取 100 mg/L 噻虫嗪、高效氯氟氰菊酯标准溶液 1 mL 置于 10.0 mL 容量瓶中, 噻虫嗪用乙腈定容, 高效氯氟氰菊酯用正己烷定容, 分别配制成 10 mg/L 标准储备液, 密封, 于 4 ℃以下避光保存备用。用空白大豆基质分别提取液逐级稀释储备液, 噻虫嗪质量浓度为 0.002、0.005、0.010、0.020、0.050 μg/mL 5 个系列基质匹配标准溶液; 高效氯氟氰菊酯配制成质量浓度为 0.005、0.010、0.050、0.100、0.500 μg/mL 5 个系列基质匹配标准溶液。分别按 1.3.2 条件进行检测, 并建立回归方程。

1.3.4 添加回收试验

称取 10.0 g 大豆空白样品, 分别添加 0.01、0.05、0.20 mg/kg 3 个水平的噻虫嗪标准溶液和 0.01、0.05、0.50 mg/kg 3 个水平的高效氯氟氰菊酯标准溶液, 每个水平 5 次重复, 设空白对照。按照 1.3.1 样品提取和净化和 1.3.2 仪器设备条件进行检测, 计算添加回收和相对标准偏差。

半衰期采用一级动力学方程按照公式(1)~(2)进行计算。

$$C_t=C_0e^{-kt} \quad (1)$$

$$T_{1/2}=\ln2/k \quad (2)$$

式中: $C_t$ 为农药在 $t$ 时间的浓度, mg/kg; $t$ 为采样时间, d; $C_0$ 为初始浓度, mg/kg; $k$ 是速率常数; $T_{1/2}$ 为半衰期, d。

### 1.4 数据处理

用 Excel 2023 进行数据统计分析, 用 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 方法验证

噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在大豆上的标准曲线如表 3 所示, 结果显示分别在 0.002~0.050 μg/mL, 0.005~0.500 μg/mL 范围内呈现良好的线性关系, 相关系数均大于 0.99。液相色谱-串联质谱法检测噻虫嗪、气相色谱-串联质谱法检测高效氯氟氰菊酯的定量限均为 0.02 mg/kg。添加回收试验见表 4, 结果表明, 噻虫嗪在大豆中的回收率为 79.9%~92.4%, 相对标准偏差为 0.46%~8.71%, 高效氯氟氰菊酯在大豆中的回收率为 84.50%~97.10%, 相对标准偏差为 0.39%~9.11%, 回收率符合农药残留分析要求[38]。目标农药噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的保留时间分别为 2.312 和 17.739, 没有其他因素有干扰, 选择性好。结果显示, 该方法线性关系良好, 回收率满足要求, 选择性高, 适合用于噻虫嗪和氯氟氰菊酯的农药残留检测分析。

**表 3 噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆中的线性方程、决定系数和定量限**
**Table 3 Linear equations, coefficient of determination, limits of quantitation of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin in *Glycine max* L. Merr**

| 农药 | 线性方程 | 决定系数($r^2$) | 线性范围/(μg/mL) | 定量限/(mg/kg) |
|---|---|---|---|---|
| 噻虫嗪 | $Y$=251.183587$X$–645.403901 | 0.9981 | 0.002~0.050 | 0.02 |
| 高效氯氟氰菊酯 | $Y$=24.854$X$+306.220 | 0.9996 | 0.005~0.500 | 0.02 |

**表 4　高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪在菜用大豆中的添加回收率及相对标准偏差**

**Table 4　Forrecoveries and relative standard deviations of lambda-cyhalothrin and thiamethoxam in *Glycine max* L. Merr**

| 农药 | 添加水平/(mg/kg) | 回收率/% | 相对标准偏差/% |
|---|---|---|---|
| 噻虫嗪 | 0.01 | 88.9 | 0.63 |
| | 0.05 | 92.4 | 0.46 |
| | 0.20 | 79.9 | 8.71 |
| 高效氯氟氰菊酯 | 0.01 | 84.5 | 0.91 |
| | 0.05 | 90.4 | 0.39 |
| | 0.50 | 97.1 | 9.11 |

## 2.2　消解动态试验

### 2.2.1　噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆上的残留和消解动态

分别对噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯推荐剂量和 2 倍推荐剂量的消解动态进行线性拟合，结果见图 2 和表 5。根据 GB/T 31270.1—2025《化学农药环境安全评价试验准则 第 1 部分: 土壤降解试验》，噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯均属于易降解农药。

推荐剂量下，施药后 2 h~14 d，噻虫嗪的初始残留量为 0.025 mg/kg。第 5 d 残留值最大为 0.088 mg/kg，后逐渐降低，呈现先上升后下降的趋势，第 14 d 降低至 0.049 mg/kg。其消解动态方程为 $Y$=0.11482e$^{-0.06453X}$，半衰期为 10.7 d ($T_{1/2}$<15 d)。2 倍推荐剂量下，噻虫嗪的初始残留量为 0.15 mg/kg，第 5 d 残留值最大为 0.32 mg/kg，第 14 d 降至 0.086 mg/kg。其消解动态方程为 $Y$=0.72e$^{-0.162X}$，半衰期为 4.3 d ($T_{1/2}$<15 d)，属于易降解农药。如表 5 所示，推荐剂量下，噻虫嗪消解动态方程拟合的决定系数为 0.896，略低，主要因气温波动、田间降雨及叶面微生物变化造成数据离散所致，本研究参照农残检测通用规范采用一级动力学计算半衰期，测算结果具备参考价值，但在后续的试验研究中，可对比开展零级、双相一级动力学多模型拟合，筛选最优消解方程进一步提升拟合效果。

此外，本研究出现高剂量处理噻虫嗪降解半衰期缩短的特殊规律，并非试验误差所致，噻虫嗪为新烟碱类杀虫剂，药剂稳定性受环境 pH 与微生物活性影响突出，是双重降解协同增效的结果，高施药浓度持续定向筛选植株叶面、根际土著微生物，诱导噻虫嗪专一降解菌群富集，生物降解效率显著提升，同时高浓度药液改变叶面微环境酸碱度，打破药剂原有水解稳定条件，加快噻虫嗪化学水解进程，两类降解途径共同推动高剂量组药剂消解速率提升、半衰期缩短。

2 种剂量下，噻虫嗪残留趋势一致，即: 施药后残留量呈现先上升第 5 d 达到峰值后逐步消解降低的趋势。可见噻虫嗪在菜用大豆中残留具有先富集后消解的动态过程。以上残留特征与噻虫嗪内吸性较强相契合，菜用大豆中的噻虫嗪残留可能是由于噻虫嗪通过内吸作用，进入植株茎叶后，继续向内部组织器官传导所至，其中施药后第 5 d 内吸传导达到峰值。

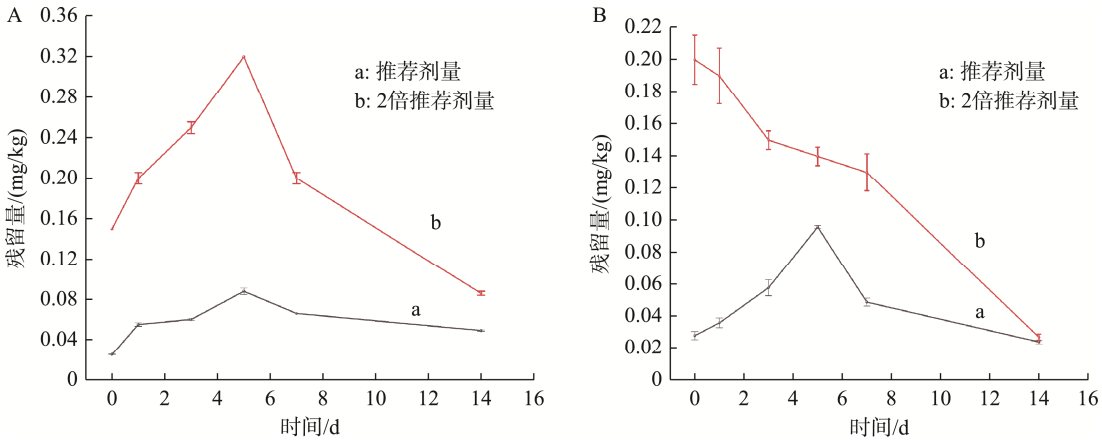



图 2　噻虫嗪(A)、高效氯氟氰菊酯(B)在菜用大豆中的残留动态

Fig.2　Residue dynamics of thiamethoxam (A) and lambda-cyhalothrin (B) in *Glycine max* L. Merr

**表 5　噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在大豆中的消解动态**

**Table 5　Dissipation dynamics of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin in *Glycine max* L. Merr**

| 基质 | 剂量 | 残留最大值/(mg/kg) | 出现时间 | 消解动态方程 | 决定系数($r^2$) | 半衰期/d |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 噻虫嗪 | 推荐剂量 | 0.088 | 5 d | $Y$=0.11482e$^{-0.06453X}$ | 0.896 | 10.7 |
| | 2 倍推荐剂量 | 0.320 | 5 d | $Y$=0.72e$^{-0.162X}$ | 0.998 | 4.3 |
| 高效氯氟氰菊酯 | 推荐剂量 | 0.096 | 5 d | $Y$=0.2575e$^{-0.20901X}$ | 0.910 | 3.3 |
| | 2 倍推荐剂量 | 0.200 | 2 h | $Y$=0.2076e$^{-0.09484X}$ | 0.920 | 7.3 |

推荐剂量下, 高效氯氟氰菊酯初始残留量为 0.028 mg/kg, 第 5 d 残留值最大为 0.096 mg/kg, 后逐渐消解, 第 14 d 降低至 0.024 mg/kg, 呈现先上升后下降的趋势, 其消解动态方程为 $Y$=0.2575e$^{-0.20901X}$, 半衰期为 3.3 d ($T_{1/2}$<15 d)。2 倍推荐剂量下, 高效氯氟氰菊酯的初始残留量为 0.20 mg/kg, 施药后 14 d 残留值降低至 0.027 mg/kg。2 倍推荐剂量下的残留消解趋势与推荐剂量不同, 无先升后降的趋势, 而是呈逐步下降的趋势。2 倍剂量的高效氯氟氰菊酯在大豆上的消解先慢后快, 降解率由 5%增加至 86.5%, 其消解的动态方程为 $Y$=0.2076e$^{-0.09484X}$, 半衰期为 7.3 d ($T_{1/2}$<15 d), 属于易降解农药。

推荐剂量和 2 倍推荐剂量的高效氯氟氰菊酯, 其变化趋势存在明显差异, 原因在于高效氯氟氰菊酯属于拟除虫菊酯类杀虫剂, 脂溶性强、易吸附于作物表皮角质层, 药剂消解规律与施药剂量、制剂剂型密切相关。本研究中高效氯氟氰菊酯在不同用药剂量下残留消解曲线存在明显差异, 除表观残留初始沉积量区别外, 受剂型助剂调控, 悬浮剂填料提升药液叶面附着率, 表层可淋溶残留更多。低剂量药剂基本被作物角质层吸附固定, 受光解、淋溶影响小, 后期消解速率平缓; 高剂量药液超出表皮吸附容量, 大量药剂滞留植株表面, 前期在雨水冲刷与光解作用下快速降解, 进而造成高低剂量残留消解动态分化。

2.2.2 噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆上的最终残留水平

噻虫嗪、高效氯氟氰菊酯在大豆中的最终残留限量见表 6。可见推荐剂量施药安全间隔期 14 d 时, 推荐剂量下, 菜用大豆中噻虫嗪的残留量为 0.049 mg/kg>MRL (0.01 mg/kg), 高效氯氟氰菊酯的残留量是 0.024 mg/kg>MRL (0.02 mg/kg), 存在超标的风险。2 倍推荐剂量下, 噻虫嗪的残留量为 0.086 mg/kg>MRL (0.01 mg/kg), 高效氯氟氰菊酯的残留为 0.027 mg/kg>MRL (0.02 mg/kg), 均未达标, 残留风险显著增加。

**表 6 噻虫嗪、高效氯氟氰菊酯在大豆中的最终残留限量**
**Table 6 Terminal residue levels of thiamethoxam and lambda-cyhalothrin in *Glycine max* L. Merr**

| 施药剂量 | 安全间隔期/d | 最终残留量/(mg/kg) | |
|---|---|---|---|
| | | 噻虫嗪 | 高效氯氟 |
| 空白对照 | 14 | 未检出 | 未检出 |
| 推荐剂量 | 14 | 0.049 | 0.024 |
| 2 倍推荐剂量 | 14 | 0.086 | 0.027 |

在消解过程中, 基于一级消解动力学模型 $C_t$=$C_0$e$^{-kt}$拟合各组实测农药残留数据, 得到对应的消解常数 K, 结合噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆上的 MRL 分别为 0.01 mg/kg、0.02 mg/kg, 反向推算噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在推荐剂量下和 2 倍推荐剂量下的菜用大豆临界采收期, 同时考虑整个生产过程中, 噻虫嗪和推荐剂量高效氯氟氰菊酯农药残留量呈现先富集后消解的趋势, 把试验结果与菜用大豆的实际生产相结合, 为确保食品安全, 建议将菜用大豆的采收安全间隔期延长至 16 d 及以上。

## 3 讨论与结论

本研究以 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂为研究对象, 建立了 QuEChERS-液相色谱-串联质谱法和 QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定菜用大豆中噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的农药残留方法, 检测方法呈现良好的线性关系、灵敏度高、准确性好, 为开展菜用大豆上噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的残留检测提供了技术支撑。

本研究探究了菜用大豆中的噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯的消解规律和最终残留量, 消解动态试验表明: 推荐剂量和 2 倍推荐剂量下噻虫嗪菜用大豆中的残留均呈现先增加后降低的趋势。说明噻虫嗪的内吸作用对其在大豆中的残留影响显著。研究结果与郇志博等[36]、郭曼等[37]的研究相似。此外, 在本研究中, 关于菜用大豆中噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯农药残留消解动态的发现的 3 个问题是值得进一步研究的, 首先在此次农药残留田间试验中, 推荐剂量下噻虫嗪消解动态方程拟合的决定系数为 0.896, 拟合数据出现离散, 考虑在后续的研究中, 可对比开展零级、双相一级动力学多模型拟合, 筛选最优消解方程进一步提升拟合效果; 2 倍推荐剂量下噻虫嗪半衰期比推荐剂量下的半衰期短, 研究结果与的陈国峰等[33]、黄艳萍等[34]、郇志博等[36]、郭曼等[37]研究不同, 其次高效氯氟氰菊酯推荐剂量和 2 倍推荐剂量下的消解动态存在明显差异, 因各个地区的光照时间、强度、湿度、土壤类型、pH 等因素不同, 造成了噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯在菜用大豆上的消解动态差异。

最终残留试验表明: 为确保食品安全, 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂的施用应严格按照推荐剂量施用, 建议将采收安全间隔期延长至 16 d 及以上, 同时加强对噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯残留的监测; 严禁超剂量施用, 否则在安全间隔期后, 两种农药均存在超标风险。本研究解析了 22%噻虫•高氯氟微囊悬浮-悬浮剂在菜用大豆上的残留消解动态, 为其在菜用大豆上的安全性评估和科学施用提供了有力参考。

## 参考文献

[1] 周伦政, 王雨涵. “十五五”期间我国大豆增产潜力与路径[J]. 中国油脂, 2026, 51(4): 9–14, 37.
Zhou Lunzheng, Wang Yuhan. Soybean production potential and path in China during the 15th Five-Year Plan period [J]. China Oils and Fats, 2026, 51(4): 9–14, 37.

[2] 韩晓增, 邹文秀, 张谦, 等. 大豆扩种计划下黑龙江省大豆生产特点、技术需求及生产建议[J]. 大豆科技, 2023(2): 1–5, 20.
Han Xiaozeng, Zou Wenxiu, Zhang Qian, et al. Characteristics,

technology requirements and production suggestions of soybean production in Heilongjiang Province under the soybean expansion plan [J]. Soybean Science & Technology, 2023(2): 1–5, 20.

[3] 胡壮壮, 王路路, 姜雪冰, 等. 我国大豆产业发展现状分析及对策[J]. 大豆科技, 2023(4): 1–11.
Hu Zhuangzhuang, Wang Lulu, Jiang Xuebing, et al. Analysis and countermeasure of soybean industry development status in China [J]. Soybean Science & Technology, 2023(4): 1–11.

[4] 叶文武, 刘万才, 王源超. 中国大豆病虫害发生现状及全程绿色防控技术研究进展[J]. 植物保护学报, 2023, 50(2): 265–273.
Ye Wenwu, Liu Wancai, Wang Yuanchao. Occurrence status and whole-process green control technologies for soybean diseases and pests in China [J]. Journal of Plant Protection, 2023, 50(2): 265–273.

[5] 李琼, 张晓明. 病虫害对 5 个大豆主产国大豆产量影响的概述[J]. 农学学报, 2018, 8(4): 23–27.
Li Qiong, Zhang Xiaoming. Effect of diseases and insect pests on soybean yield in the top five soybean producing countries: a review [J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(4): 23–27.

[6] 韦启迪. 都安县大豆病虫害防控存在的问题及其对策[J]. 南方农业, 2025, 19(10): 171–173.
Wei Qidi. Problems and countermeasures in the prevention and control of *Glycine max* diseases and pests in Du'an County [J]. South China Agriculture, 2025, 19(10): 171–173.

[7] 林厚泽, 接伟光, 杨冬莹. 大豆农药残留及降解方法研究现状[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 8–12.
Lin Houze, Jie Weiguang, Yang Dongying. Research status on pesticide residue degradation methods in soybean [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(6): 8–12.

[8] 张祥喜, 廖且根, 袁丽娟, 等. 毒死蜱在大豆和土壤中的消解动态与最终残留研究[J]. 大豆科学, 2023, 42(1): 77–82.
Zhang Xiangxi, Liao Qiegen, Yuan Lijuan, et al. Dissipation dynamic and terminal residue of chlorpyrifos in soybean and soil [J]. Soybean Science, 2023, 42(1): 77–82.

[9] 高志山. 吡虫啉等种子包衣防治小麦蚜虫及其持效机理初探[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013: 2–5.
Gao Zhishan. Seed dressing with imidacloprid and other neonicotinoids against wheat aphids and control mechanism [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013: 2–5.

[10] 范银君, 史雪岩, 高希武. 新烟碱类杀虫剂吡虫啉和噻虫嗪的代谢研究进展[J]. 农药学学报, 2012, 14(6): 587–596.
Fan Yinjun, Shi Xueyan, Gao Xiwu. Research progresses on the metabolism of neonicotinoids imidacloprid and thiamethoxam [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2012, 14(6): 587–596.

[11] 陈莉, 王东, 刘冰洁, 等. QuEChERS-超高效液相色谱串联质谱法测定噻虫嗪在芥菜叶和芥菜根中的残留和消解动态研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7295–7300.
Chen Li, Wang Dong, Liu Bingjie, et al. Determination of thiamethoxam in mustard leaf and mustard root by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry and research its degradation dynamics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(21): 7295–7300.

[12] 李若同, 胡继业. 马铃薯中噻虫胺和嘧菌酯的残留和膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 303–309.
Li Ruotong, Hu Jiye. Determination and dietary risk of clothianidin and azoxystrobin residues in potatoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 303–309.

[13] 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.

[14] 张艳丽, 张艺潇, 陈燕玲, 等. 甘肃省苹果农药残留分析及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 194–202.
Zhang Yanli, Zhang Yixiao, Chen Yanling, et al. Analysis and risk assessment of pesticide residue in apples in Gansu Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(4): 194–202.

[15] 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 Aijuan, Bian Yanli, Feng Yizhi, et al. Residue dissipation and dietary risk assessment of chlorfenapyr and thiamethoxam in *Asparagus* [J]. Agrochemicals, 2021, 60(9): 654–658.

[16] 张湘宁, 李翔, 田建刚, 等. 超高效三氟氯氰菊酯的合成及生物活性研究[J]. 现代农药, 2008, 7(4): 14–16, 21.
Zhang Xiangning, Li Xiang, Tian Jiangang, et al. Research on synthesis and bioactivity of gamma-cyhalothrin [J]. Modern Agrochemicals, 2008, 7(4): 14–16, 21.

[17] 孙明娜, 童舟, 董旭, 等. 高效氯氟氰菊酯乳油和水乳剂在大豆上的残留和降解动态[J]. 现代农药, 2021, 20(2): 34–38.
Sun Mingna, Tong Zhou, Dong Xu, et al. Residue and degradation dynamics of lambda-cyhalothrin in soybean [J]. Modern Agrochemicals, 2021, 20(2): 34–38.

[18] 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 Mengzhu, Li Jianyu, Fang Ling, et al. Residual behavior and dietary risk assessment of lambdacyhalothrin in *Papaya* [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2024(1): 9–14.

[19] 蒋丽君, 董晖, 陆萍, 等. 高效氯氟氰菊酯乳油在芹菜中的残留量检测及其消解动态[J]. 上海农业科技, 2023(4): 50–51, 59.
Jiang Lijun, Dong Hui, Lu Ping, et al. Detection of lambda-cyhalothrin emulsifiable concentrate residues in celery and its dissipation dynamics [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2023(4): 50–51, 59.

[20] Ajermoun N, Loudiki A, Farahi A, et al. Review: sensor evaluation for thiamethoxam detection in different matrices [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(11): 116508.

[21] Medeiros J, Acayaba R, Montagner C. A química na avaliação do impacto à saúde humana diante da exposição aos pesticidas [J]. Química Nova, 2021(44): 584–598.

[22] Catae A F, Roat T C, De Oliveira R A, et al. Cytotoxic effects of thiamethoxam in the midgut and Malpighian tubules of Africanized *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) [J]. Microscopy Research and Technique, 2014, 77(4): 274–281.

[23] Choudhary A, Mohindru B, Karedla A K, et al. Sub-lethal effects of thiamethoxam on *Apis mellifera* Linnaeus [J]. Toxin Reviews, 2021, 13(4): 1–14.

[24] Strobl V, Albrecht M, Villamar-Bouza L, et al. The neonicotinoid thiamethoxam impairs male fertility in solitary bees, *Osmia cornuta* [J].

Environmental Pollution, 2021, 284: 117106.

[25] Hilton M J, Jarvis T D, Ricketts D C. The degradation rate of thiamethoxam in European field studies [J]. Pest Management Science, 2016, 72(2): 388–397.

[26] Wang Kun, Wang Zhong, Xie Yanhua, et al. Molecular mechanism investigation on the interaction of Clothianidin with human serum albumin [J]. Spectroscopy Letters, 2019, 52(5): 246–252.

[27] 高翀. 高效氯氟氰菊酯·噻虫嗪微囊悬浮—悬浮剂的制备与性能研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2022: 12–16, 40–52.
Gao Chong. Study on preparation and properties of high-efficiency cyhalothrin thiamethoxam microcapsule suspension-suspending agent [D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2022: 12–16, 40–52.

[28] 徐勇, 徐清华, 姜雯, 等. 22%噻虫·高氯氟微囊悬浮-悬浮剂防治星天牛药效试验[J]. 农药, 2023, 62(6): 458–460, 463.
Xu Yong, Xu Qinghua, Jiang Wen, et al. Efficacy test of thiamethoxam·lambda-cyhalothrin 22% ZC for the control of Anoplophora chinensis [J]. Agrochemicals, 2023, 62(6): 458–460, 463.

[29] 潘虹, 顾爱国, 孙长恩, 等. 22%高效氯氟氰菊酯·噻虫嗪微囊悬浮-悬浮剂的高效液相色谱分析方法[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 302–303.
Pan Hong, Gu Aiguo, Sun Chang'en, et al. Analysis method of 22% beta-cypermethrin thiamethoxam microcapsule suspension-suspending agent by high performance liquid chromatography [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 302–303.

[30] 尚妍妍, 侯志广, 王思威, 等. 247 g/L 高效氯氟氰菊酯·噻虫嗪微囊悬浮剂在大豆田土壤中的残留动态研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 13777–13779.
Shang Yanyan, Hou Zhiguang, Wang Siwei, et al. Research on the residual of 247 g/L lambda-cyhalothrin and thiamethoxam CS in soybean and soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(25): 13777–13779.

[31] 张蓉, 李辛夷, 郑培, 等. 改良 QuEChERS-LC-MS/MS 法测定动物源性食品中噻虫嗪和噻虫胺的残留量[J]. 中国口岸科学技术, 2021, 3(S1): 31–35.
Zhang Rong, Li Xinyi, Zheng Pei, et al. Determination of thiamethoxam and clothianidin residues in animal derived food by modified QuEChERS-LC-MS/MS [J]. China Port Science and Technology, 2021, 3(S1): 31–35

[32] 董惠颖, 谷婧妍, 李贤宾, 等. 高效氯氟氰菊酯、噻虫胺在设施韭菜和土壤中的残留消解动态[J]. 农药科学与管理, 2024, 45(12): 32–40.
Dong Huiying, Gu Jingyan, Li Xianbin, et al. Decline of lambda-cyhalothrin and clothianidin in Chinese chives and soil under greenhouse condition [J]. Pesticide Science and Administration, 2024, 45(12): 32–40.

[33] 陈国峰, 李雪茹, 刘峰, 等. 高效氯氟氰菊酯、噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在小麦中的残留及消解动态分析[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(1): 119–125.
Chen Guofeng, Li Xueru, Liu Feng, et al. Residue and degradation dynamic of lambda-cyhalothrin, thiamethoxam and clothianidin in wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(1): 119–125.

[34] 黄艳萍, 王新全, 堵紫妍, 等. 设施芹菜噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯连续施用后消散、积累与风险评估[J]. 农药学学报, 2024, 26(3): 604–611.
Huang Yanping, Wang Xinquan, Du Ziyan, et al. Dissipation, accumulation and risk assessment of thiamethoxam and beta-cyfluthrin in greenhouse celery after continuous spraying [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2024, 26(3): 604–611.

[35] 杨静, 马小龙, 季莉, 等. 噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在枸杞中的残留消解及膳食摄入风险评估[J]. 植物保护, 2024, 50(1): 239–243, 255.
Yang Jing, Ma Xiaolong, Ji Li, et al. Residual digestion and dietary intake risk assessment of thiamethoxam and its metabolite clothianidin in *Lycium barbarum* [J]. Plant Protection, 2024, 50(1): 239–243, 255.

[36] 郇志博, 罗金辉, 谢德芳. 噻虫嗪在甘蔗和土壤中的残留行为及风险评估[J]. 南方农业学报, 2018, 49(11): 2282–2291.
Xun Zhibo, Luo Jinhui, Xie Defang. Residue behavior and risk assessment of thiamethoxam in sugarcane and soil [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(11): 2282–2291.

[37] 郭曼, 高飞, 李爽, 等. 噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在甘蓝和土壤中的残留动态行为[J]. 农药, 2022, 61(12): 905–909.
Guo Man, Gao Fei, Li Shuang, et al. The residues of thiamethoxam and its metabolite clothianidin on cabbage and soil [J]. Agrochemicals, 2022, 61(12): 905–909.

[38] 赵善欢. 植物化学保护[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 122–134.
Zhao Shanhuan. Phytochemical protection [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 122–134.

(责任编辑: 蔡世佳 曹岱琳)