

分类号：  
学 号：20222012079

密 级：公开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕 士 学 位 论 文



### 氟铃脲对绿盲蝽的亚致死效应研究

学 位 申 请 人	汪协
指 导 教 师	陆宴辉 研究员 王佩玲 教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	植物保护
研 究 方 向	农业昆虫与害虫防治
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子  
2025 年 11 月

分类号：  
学 号：20222012079

密 级：公开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕 士 学 位 论 文



### 氟铃脲对绿盲蝽的亚致死效应研究

学 位 申 请 人	汪协
指 导 教 师	陆宴辉 研究员 王佩玲 教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	植物保护
研 究 方 向	农业昆虫与害虫防治
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子  
2025 年 11 月

**Study on the sublethal effects of hexaflumuron on  
*Apolygus lucorum***

A Dissertation Submitted to  
**Shihezi University**  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
**Master of Agriculture**

By  
**Wang Xie**  
**(Plant Protection)**

Dissertation Supervisor: Prof. Lu Yan-hui  
Prof. Wang Pei-ling

November, 2025

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

汪协、

时间： 2025 年 11 月 24 日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

汪协、

时间： 2025 年 11 月 24 日

导师签名：

王佩玲

时间： 2025 年 11 月 24 日

## 摘要

**【目的】**绿盲蝽 (*Apolygus lucorum*) 是我国 Bt 棉推广种植后从次要地位上升成为主要地位的一种多食性害虫, 能够对棉花、葡萄、枣树和茶树等多种农作物造成重大危害。目前防治绿盲蝽的主要措施依旧是化学防治, 而面对长久依赖化学防治带来的稳定势必是不可持续的, 在诸多地区绿盲蝽对各类药剂已产生不同程度的抗性, 而筛选和推广新型杀虫剂变得尤为重要。本研究通过研究氟铃脲 (Hexaflumuron) 对绿盲蝽的亚致死效应来明确其具体作用, 并初步分析氟铃脲对绿盲蝽基因表达的影响, 为氟铃脲在绿盲蝽防治中应用奠定科学基础。

**【方法】**首先通过人工饲料混药法进行了氟铃脲对绿盲蝽若虫和成虫的室内毒力测定, 然后根据室内毒力测定的得到的亚致死浓度 ( $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$ 、 $LC_{50}$ ) 对绿盲蝽进行亚致死效应的研究。从生命表所观察到氟铃脲亚致死浓度对绿盲蝽生长发育和繁殖的影响进行氟铃脲对绿盲蝽 1 日龄雌虫的转录组分析, 了解氟铃脲对绿盲蝽具体影响的相关基因。

### **【结果】氟铃脲对绿盲蝽的室内毒力测定**

氟铃脲表现出对绿盲蝽若虫高毒力, 而绿盲蝽成虫相比于若虫表现出对氟铃脲敏感性较弱。氟铃脲处理绿盲蝽 1 龄若虫  $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$ 、 $LC_{50}$  和  $LC_{90}$  值分别为 0.013 mg/L、0.116 mg/L、0.311 mg/L 和 0.609 mg/L; 3 龄若虫  $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$ 、 $LC_{50}$  和  $LC_{90}$  值分别 0.018、0.127、0.337 mg/L 和 0.655 mg/L; 1 日龄成虫  $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$ 、 $LC_{50}$  和  $LC_{90}$  值分别为 0.089 mg/L、4.587 mg/L、13.193 mg/L 和 26.902 mg/L。

### **亚致死浓度氟铃脲对不同虫态绿盲蝽的影响**

氟铃脲亚致死处理绿盲蝽 3 龄若虫时, 发现  $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$  处理与对照组相比在成虫寿命、产卵量和卵孵化率无显著影响。 $LC_{50}$  处理绿盲蝽 3 龄若虫对羽化后成虫与对照组相比成虫寿命无影响, 卵孵化率无影响, 而雌虫产卵量明显下降, 与对照组相比下降了 24.39%。在氟铃脲亚致死处理绿盲蝽 1 日龄成虫时, 发现  $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$  和  $LC_{50}$  与对照组相比明显减少雌成虫寿命, 依次缩短了 15.26 %、56.24 %、50.69 %;  $LC_{50}$  处理与对照组相比明显减少雄成虫寿命, 减少了 35.38%。 $LC_{20}$ 、 $LC_{50}$  处理与对照组相比显著减低绿盲蝽单雌产卵量, 依次降低了 90.28%、87.11%;  $LC_{50}$  处理与对照组相比卵孵化率显著降低, 降低了 70.28%。综上所述,  $LC_{50}$  处理绿盲蝽 1 日龄成虫生长发育及繁殖影响最大, 其次是  $LC_{20}$  处理, 而  $LC_{10}$  处理无明显影响。

### **亚致死浓度氟铃脲对绿盲蝽的转录组分析**

通过 RNA-seq 分析了不同亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄雌成虫各个时间段的转录组数据变化, 其中亚致死浓度氟铃脲 ( $LC_{10}$ 、 $LC_{20}$  和  $LC_{50}$ ) 处理绿盲蝽后第 0 h 阶段绿盲蝽体内差异表达基因数量最多, 随时间延长第 48 h 和第 96 h 绿盲蝽体内差异表达基因数量不断减少。其中,  $LC_{10}$  处理绿盲蝽体内差异表达基因最少,  $LC_{50}$  处理最多。 $LC_{20}$  处理与  $LC_{50}$  处理相同时间段下 GO 富集分析和 KEGG 通路分析中都表现出较高的相似性。深入挖掘基因过程中, 发现 *CTSB*、*CTSL* 等相关基因

都有所上调，并发现载脂蛋白和储存蛋白相关基因的下调。

**【结论】**氟铃脲处理绿盲蝽 1 龄若虫和 3 龄若虫表现出高毒力，而对其成虫毒力较弱。在氟铃脲  $LC_{50}$  处理绿盲蝽若虫能够降低后代产卵量， $LC_{20}$  处理和  $LC_{50}$  处理绿盲蝽 1 日龄成虫能够显著减少雌虫和雄虫寿命，并降低单雌产卵量和卵孵化率。在氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄雌成虫时，能够抑制载脂蛋白和储存蛋白相关基因的表达。

**关键词：**绿盲蝽；氟铃脲；生长发育；繁殖；转录组

## Abstract

**[Objective]** *Apolygus lucorum* has escalated from a secondary to a major pest in China following the widespread adoption of Bt cotton, inflicting substantial damage on crops including cotton, grape, jujube, and tea. Chemical control remains the primary management strategy; however, sustained reliance on this approach is unsustainable. Resistance to various insecticides has been reported in numerous regions, underscoring the critical need to screen and deploy novel insecticides. This study elucidated the sublethal effects of Hexaflumuron on *A. lucorum* and preliminarily analyzed its impact on gene expression, providing a scientific basis for its use in the control of this pest.

**[Methods]** The toxicity of hexaflumuron to nymphs and adults of *A. lucorum* was first determined via indoor bioassays using an artificial diet incorporation method. Sublethal concentrations (LC<sub>10</sub>, LC<sub>20</sub>, LC<sub>50</sub>) derived from these bioassays were then used to evaluate sublethal effects. Life table parameters were used to assess the impacts of these concentrations on growth, development, and reproduction. Furthermore, transcriptome analysis of 1-day-old female adults was conducted to identify genes associated with the response to hexaflumuron.

### **[Results] Toxicity of Hexaflumuron to *A. lucorum***

Hexaflumuron exhibited high toxicity against *Apolygus lucorum* nymphs, whereas adults demonstrated comparatively weaker susceptibility. The LC<sub>10</sub>, LC<sub>20</sub>, LC<sub>50</sub>, and LC<sub>90</sub> values for 1st-instar nymphs were 0.013 mg/L, 0.116 mg/L, 0.311 mg/L, and 0.609 mg/L, respectively. Corresponding values for 3rd-instar nymphs were 0.018 mg/L, 0.127 mg/L, 0.337 mg/L, and 0.655 mg/L. For 1-day-old adults, the LC<sub>10</sub>, LC<sub>20</sub>, LC<sub>50</sub>, and LC<sub>90</sub> values were 0.089 mg/L, 4.587 mg/L, 13.193 mg/L, and 26.902 mg/L, respectively.

### **Sublethal Effects of Hexaflumuron on Different Developmental Stages of *A. lucorum***

When 3rd-instar nymphs were treated with sublethal concentrations of hexaflumuron, no significant differences in adult longevity, fecundity, or egg hatch rate were observed in the LC<sub>10</sub> and LC<sub>20</sub> treatment groups compared to the control. The LC<sub>50</sub> treatment did not affect the longevity or egg hatch rate of the resulting adults, but it significantly reduced the fecundity of female adults by 24.39% compared to the control.

In 1-day-old adults treated with sublethal hexaflumuron, the LC<sub>10</sub>, LC<sub>20</sub>, and LC<sub>50</sub> treatments significantly reduced female adult longevity by 15.26%, 56.24%, and 50.69%, respectively, compared to the control. The LC<sub>50</sub> treatment also significantly reduced male adult longevity by 35.38%. Furthermore, the LC<sub>20</sub> and LC<sub>50</sub> treatments significantly decreased fecundity per female by 90.28% and 87.11%, respectively. The LC<sub>50</sub> treatment also led to a significant reduction in egg hatch rate by 70.28%. In summary, the LC<sub>50</sub> treatment had the most substantial impact on the development and reproduction of 1-day-old adults, followed by the LC<sub>20</sub> treatment, while the LC<sub>10</sub> treatment showed no significant effects.

### **Transcriptome Analysis of *A. lucorum* under Sublethal Hexaflumuron**

RNA-seq analysis of 1-day-old female adults treated with different sublethal concentrations (LC<sub>10</sub>, LC<sub>20</sub>, LC<sub>50</sub>) of hexaflumuron across various time points revealed that the number of differentially expressed genes (DEGs) was highest at 0 hours post-treatment and progressively decreased at 48 and 96 hours. The LC<sub>10</sub> treatment resulted in the fewest DEGs, while the LC<sub>50</sub> treatment produced the most. GO enrichment and KEGG pathway analyses showed high similarity between the LC<sub>20</sub> and LC<sub>50</sub> treatments at corresponding time points. Further investigation identified upregulation of genes such as CTSB and CTSL, alongside the downregulation of genes associated with apolipoproteins and storage proteins.

#### **【Conclusion】**

Hexaflumuron exhibited high toxicity against 1st and 3rd-instar nymphs of *A. lucorum* but lower toxicity against adults. Treatment of nymphs with LC<sub>50</sub> hexaflumuron reduced the fecundity of the subsequent generation. Treatment of 1-day-old adults with LC<sub>20</sub> and LC<sub>50</sub> significantly shortened the longevity of both females and males and reduced fecundity per female and egg hatch rate. Furthermore, hexaflumuron treatment suppressed the expression of genes related to apolipoproteins and storage proteins in 1-day-old female adults.

**Key words:** *Apolygus lucorum*; Hexaflumuron; growth and development; reproduction; transcriptome

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 文献综述.....	1
1.1 绿盲蝽的生物学特性以及防治概述.....	1
1.1.1 绿盲蝽形态特征.....	1
1.1.2 绿盲蝽生活习性.....	2
1.1.3 绿盲蝽的危害规律.....	3
1.1.4 绿盲蝽的防治措施.....	3
1.2 氟铃脲的研究概况.....	4
1.2.1 氟铃脲控制害虫的作用.....	5
1.2.2 氟铃脲的作用机制研究.....	5
1.3 杀虫剂对昆虫的亚致死效应.....	7
1.3.1 杀虫剂对昆虫的亚致死剂量.....	7
1.3.2 对昆虫生态行为的影响.....	8
1.3.3 对昆虫生长发育的影响.....	8
1.3.4 对昆虫繁殖力的影响.....	9
1.4 研究目的与意义.....	10
1.5 技术路线.....	11
第 2 章 氟铃脲对绿盲蝽的室内毒力测定.....	12
2.1 材料与方法.....	12
2.1.1 供试药剂.....	12
2.1.2 供试虫源.....	13
2.1.3 供试仪器.....	13
2.1.4 试验方法.....	13
2.1.5 数据分析.....	15
2.2 结果与分析.....	16
2.2.1 氟铃脲对绿盲蝽 1 龄若虫的室内毒力测定.....	16
2.2.2 氟铃脲对绿盲蝽 3 龄若虫的室内毒力测定.....	16
2.2.3 氟铃脲对绿盲蝽 1 日龄成虫的室内毒力测定.....	17
2.3 结论与讨论.....	18
第 3 章 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽不同虫态对成虫生长发育与繁殖的影响.....	19
3.1 材料与方法.....	19
3.1.1 供试药剂.....	19
3.1.2 供试虫源.....	19
3.1.3 供试材料.....	19
3.1.4 试验方法.....	20
3.1.5 数据分析.....	20
3.2 结果与分析.....	21
3.2.1 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 3 龄若虫对成虫生长发育及繁殖力的影响.....	21
3.2.2 亚致死浓度氟铃脲处理 1 日龄成虫对其生长发育及繁殖力的影响.....	23
3.3 结论与讨论.....	26
第 4 章 亚致死浓度氟铃脲对绿盲蝽 1 日龄雌成虫的转录组分析.....	28
4.1 试验方法.....	28
4.1.1 供试药剂.....	28

4.1.2 供试虫源.....	28
4.1.3 样品的收集和 RNA 的提取.....	28
4.1.4 文库构建及 Illumina 测序 .....	29
4.1.5 测序数据筛选和分析 .....	30
4.1.6 数据验证.....	30
4.2 结果与分析.....	32
4.2.1 转录组质量评估.....	32
4.2.2 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄成虫的差异表达基因 .....	35
4.2.3 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄成虫差异表达基因 GO 功能注释分析.....	37
4.2.4 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄成虫差异表达基因 KEGG 功能分析 .....	43
4.2.5 亚致死浓度氟铃脲处理绿盲蝽 1 日龄雌成虫关键基因筛选 .....	48
4.2.6 荧光定量 PCR 验证 .....	49
4.3 结果与讨论.....	50
第 5 章 总结与展望.....	52
5.1 总结.....	52
5.2 展望.....	52
参考文献.....	54
致谢.....	62
作者简介.....	63

## 第1章 文献综述

盲蝽属隶属于半翅目 Heteroptera 盲蝽科 Miridae, 是世界重要农林害虫之一, 全球超过 11000 种, 而中国就有 1000 多种 (Wu, et al., 2007; Lu, et al., 2010)。国外报道主要发生的盲蝽种类有牧草盲蝽 *Lygus lineolaris*、豆荚盲蝽 *Lygus hesperus* 和绿淡盲蝽 *Creontiades dilutus* 等可为害当地多种经济作物 (Naranjo, et al., 2008; Snodgrass and Scott, 2000; Wilson, et al., 2015)。目前, 我国国内常有地区报道盲蝽危害情况发生, 其中有绿盲蝽 *Apolygus lucorum*、三点盲蝽 *Adelphocoris fasciaticollis*、中黑盲蝽 *Adelphocoris suturalis*、苜蓿盲蝽 *Adelphocoris lineolatus* 和牧草盲蝽 *Lygus pratensis* 这几种盲蝽种类。绿盲蝽主要分布在我国长江、黄河流域, 危害棉花、枣树和茶树等作物。中黑盲蝽是长江流域的主要种群, 三点盲蝽是黄河流域的优势种群, 苜蓿盲蝽在我国黄河流域和西北地区均有发生, 牧草盲蝽主要发生在西北地区 (姜玉英等, 2015; 陆宴辉等, 2010)。在过去几十年里, 随着种植结构的调整, 特别是 Bt 棉花在我国大规模商业化种植以来, 害虫群落结构不断演替, 盲蝽属已经上升为农田主要害虫之一, 可严重危害棉花 (Lu, et al., 2010)、枣树 (樊宗芳等, 2019)、苹果树 (苏恒等, 2022) 等作物。目前为防治绿盲蝽需使用大量化学农药, 如此会面临危害人体健康、杀伤田间益虫、害虫产生抗药性或是使用不规范造成害虫种群数量不降反增的诸多危害 (高君晓等, 2008; 吴孔明等, 2009)。因此, 筛选高效低毒的农药, 一直是害虫化学防治领域研究的核心。氟铃脲属于苯甲酰脲类杀虫剂, 有高效低毒等特点, 在鳞翅目、鞘翅目害虫防治中应用广泛 (米娜等, 2009), 也有少量研究报道氟铃脲可用半翅目盲蝽类害虫防治 (Tan, et al., 2014), 但对其如何调控盲蝽生长发育及相关基因表达机制研究还比较缺乏。因此, 本研究以绿盲蝽为研究对象, 系统开展氟铃脲亚致死效应对绿盲蝽若虫以及成虫生长发育、存活和繁殖力的影响, 并通过差异表达基因分析具体影响, 为利用氟铃脲有效防治绿盲蝽提供科学依据。

### 1.1 绿盲蝽的生物学特性以及防治概述

#### 1.1.1 绿盲蝽形态特征

绿盲蝽一个完整的生活史有卵、若虫和成虫三个阶段, 因此属于不完全变态昆虫。其中卵的特征: 长约 1 mm 左右, 宽约 0.26 mm 左右, 透明并淡黄色, 一般不成熟的卵为白色, 都呈长条状, 头部有白色横条是卵盖, 卵盖歪曲, 两端有突起。一般绿盲蝽会

将卵通过产卵器产入寄主组织内，只露出白色卵盖部分，一般肉眼无法观察到。若虫共有5个龄期，一般体长变化在1 mm至3.5 mm，体宽变化在0.5 mm至2 mm，随着若虫龄期增长，若虫体色先由淡黄色变为深绿绿色，1龄若虫一般呈现淡黄色，2~4龄若虫几乎呈现绿色，成熟的5龄若虫呈现深绿色。若虫触角随龄期增长由灰色变为红褐色，前胸背板呈梯形，盾片三角形，足同样也是绿色。成虫特征：体长在5-5.5 mm，宽度2.5 mm左右，虫体周身为绿色，复眼黑色且突出，无单眼，喙四节，末端可达到后腿节端部，端节呈现黑色（董松，2018）。

### 1.1.2 绿盲蝽生活习性

绿盲蝽属于半翅目，盲蝽科，食性复杂，寄主植物多达54科288种（姜玉英等，2015）。在华北地区，早春时期绿盲蝽转移至棉田之前寄主植物主要为播娘蒿 *Descurainia Sophia*、葎草 *Humulus scandens*、紫花苜蓿 *Medicago sativa*（Lu, et al., 2012）。夏寄主主要为绿豆 *Vigna radiata*、蓖麻 *Ricinus communis*、凤仙花 *Impatiens balsamina* 和向日葵 *Helianthus annuus* 等（Pan, et al., 2015）。在新疆阿克苏地区早春寄主为甘草 *Glycyrrhiza uralensis*、藜 *Chenopodium album*、欧洲油菜 *Brassica napus* 等，夏季寄主主要为白花草木樨 *Melilotus albus*、黄花草木樨 *Melilotus officinalis*、甘草等（王凯涛等，2024）。

绿盲蝽在不同地区的发生规律也有差异。王凯涛等（2024）在新疆阿克苏地区常见植物上对绿盲蝽进行种群动态监测，发现1代绿盲蝽于5月中旬~6月上旬枣园中发生，到2代成虫在6月上旬~7月上旬开始从枣园等寄主植物转移到棉田中，3代~4代在7月上旬~9月中旬主要为害棉花等作物，5代成虫是9月上旬~10月中旬迁回枣园，并且绿盲蝽3~5代世代严重重叠。而鲁北地区长期监测，结果表明绿盲蝽一年发生4代，1代发生于4月中旬的枣树上，越冬于9月上旬成虫迁飞至枣树等寄主植物，以卵越冬（邢茂德等，2021）。

绿盲蝽常在日光弱的时间活动于荫凉的植物冠层，在胶东地区通过观察苹果树不同位置，发现绿盲蝽若虫在一天中4:00~22:00时间段有早晚两个转移上树活动高峰期，分别在6:00~8:00和20:00~22:00，树干背影面虫口密度相对于阳面要高，符合绿盲蝽的生活习性（曲诚怀等，2024）。

绿盲蝽迁飞能力强，10日龄绿盲蝽飞行能力最强，日飞行距离最远可达40 km。随当地生态系统中寄主植物的开花顺序依次进行转移取食，并有在寄主植物蕾花期产卵的习性（Pan, et al., 2013）。耿辉辉等（2012）在棉田观察绿盲蝽成虫的活动规律时，发现在棉花顶部20cm诱捕到的成虫数量最高，且雄虫明显高于雌性。

### 1.1.3 绿盲蝽的危害规律

我国发现绿盲蝽危害现象最早报道在上个世纪 30 年代,而随后 50 年代在黄河、长江流域大面积发生(陆宴辉, 2008)。而随后半个世纪里,绿盲蝽在全国地区发生较轻。90 年代随着 Bt 棉花的应用推广,棉铃虫等主要靶标害虫的危害减少,棉田施药量也伴随着大幅度的减少,但同棉铃虫兼防的次要害虫盲蝽蟥种类急剧上升,并造成了巨大的经济损失(Wu, et al., 2002; Lu, et al., 2010)。绿盲蝽因迁飞能力强,陆续在全国地区都有发现其新踪迹。陆宴辉等人(2014)首次在新疆北疆昌吉州玛纳斯县发现了绿盲蝽为害棉花、葡萄等多种农作物。随后在新疆阿克苏地区发现绿盲蝽为害棉花和枣树等经济作物(李海强等, 2020)。

绿盲蝽通过刺吸式口器取食植物新生组织,同时会分泌唾液。绿盲蝽危害棉花的嫩芽部分,使棉花顶部芽叶缩成一团形成“破头疯”,后期随叶片生长,会出现明显的空洞形成“破叶疯”。在棉花蕾铃期时,为害花铃导致植株落花、落果等问题,影响产量及品质(赵明宇, 2022)。在枣树、葡萄等果树上,危害果树生长点,被害嫩叶先出现枯死小点,然后形成不规则空洞,导致叶面积减少使植株发育停滞而枯萎,受害严重的植物甚至无法开花使产量严重下降(林赫杰, 2020)。绿盲蝽危害果树幼果可导致受害部位 2 d 左右颜色变黄,3~4 d 受害部位扩大显现出褐色或黑色,然后果实萎缩,紧接着开始脱落,严重影响果实产量和品质(赵杰等, 2021)。

### 1.1.4 绿盲蝽的防治措施

化学信息素(性信息素)可用于诱捕成年雄虫,减缓害虫种群增长。将丙烯酸丁酯和丙酸丁酯按质量比 3:1 配制的食诱剂对盲蝽成虫诱捕效果明显(窦术英等, 2017)。二甲基二硫醚(Dimethyl disulfide, DMDS)等杀螨剂产品具有驱避作用;DMDS 叶面喷洒后 6 天内,棉田中成虫种群数量显著降低(Pan, et al., 2013)。利用将绿盲蝽信息素制成盒子放置在棉田中,百株残虫数平均下降了 33.18%;被害棉蕾数平均下降了 29.17%,成为在预测预报方面比黑光灯或频振式测报灯更理想的工具(邢茂德等, 2014)。

根据绿盲蝽产卵和觅食习性的认识用于预防害虫的发生并采取相应的农业措施。绿盲蝽有将卵产在枣树上的枯枝进行越冬的习惯,春季刮树皮、清楚田间及周围杂草,并结合冬季修剪枣树等措施可减少越冬虫卵(苏恒等, 2022)。绿盲蝽为多食性害虫,常见寄主植物有棉花、苜蓿、向日葵、枣树等,应避免两两之间毗邻或间作,改善整体耕作布局,减少绿盲在不同寄主间的交叉危害(姜玉英等, 2015)。在若虫高峰期刈割苜蓿地可降低盲蝽的危害程度(Mueller, et al., 2005)。

盲蝽的捕食性天敌有瓢虫、小花蝽等。而寄生性天敌红颈常室茧蜂 *Peristenus spretus* 作为绿盲蝽的优势天敌,对其若虫的日最大寄生数量为 102.0 头,现在已实现规模化饲

养（李林懋等，2012；罗淑萍等，2012）。人工饲养的红颈常室茧蜂以 5-7 d 的间隔进行 2-3 次后续释放，按 1: 100（寄生蜂蛹与盲蝽数量）的比例可达到 80%左右的寄生率（罗淑萍等，2016）。杀虫剂常致使天敌控害能力下降。例如：吡虫啉等多种常用化学药剂对红颈常室茧蜂有负面作用，导致其寄生率降低 77.2%（夏施珂等，2021）。施用高效低毒生物农药是一种解决防治害虫中杀虫剂与保护天敌之间矛盾的方法。白僵菌作为已知昆虫病原真菌中最普遍的一种，也是应用最广的真菌之一，在防治各种害虫中有良好的表现（李增智，2015）。通过研究发现在 28℃、 $1.0 \times 10^8$  个孢子/ml 浓度时对绿盲蝽的致死效果最佳，防效较强（李锦潮等，2022）。

化学防治目前是控制绿盲蝽田间种群数量的主要措施。新烟碱类、菊酯类、有机磷类是化学防治绿盲蝽中的主流杀虫剂，对其由较高的防效（王家哲等，2022）。施用杀虫剂不能盲目，应与信息素诱捕到的监测情况相结合，针对春季绿盲蝽若虫出现的高峰期，实现杀虫剂高效少量的喷洒方法（Snodgrass and Scott, 2000）。长期单一使用化学杀虫剂能够使害虫快速产生抗药性，出现害虫再猖獗现象。农药的交替使用、混用或者采用选择性高且残留小的农药，能够减缓抗药性的产生，以提高害虫防治效率（张乃芹等，2007）。

植食性昆虫一般通过视觉反馈来选择寄主，针对这一特性，选择害虫对个别颜色具有趋性的行为能够有效防治害虫并起到监测田间害虫群落变化的作用。（张未仲等，2018）。通过在枣园放置不同颜色粘虫板来观察绿盲蝽数量，其中绿色和黄色粘虫板诱集到的绿盲蝽数量最多，其次是蓝色粘虫板，而黑色粘虫板最差（王辉等，2019）。在葡萄园中，绿盲蝽对颜色的趋向略不同于枣园，绿盲蝽更趋向于绿色和青色的粘虫板（王丽丽等，2014）。在棉田中绿盲蝽对绿色粘虫板同样表现出强烈的趋性（梁启富等，2012）。

## 1.2 氟铃脲的研究概况

昆虫生长调节剂（Insect growth regulators, IGRs）主要通过干扰昆虫的正常生长发育迫使昆虫死亡或降低其活动能力。这类杀虫剂有高选择性、对环境污染小、对有益生物影响小等特点，符合可持续发展农业的要求。根据其作用方式及化学结构分为保幼激素、几丁质合成抑制剂和蜕皮激素类似物等。作为几丁质合成抑制剂的苯甲酰基脲类杀虫剂（Benzoylphenolureas, BPU）起源是由 1972 年荷兰科研工作者 VanDuphar 在开发新型除草剂的时候偶尔发现一种物质 Du19111 开始，该物质无除草活性而对昆虫几丁质的生物合成却有抑制作用（辛天蓉等，2015）。而后陆续出现苯甲酰基脲类杀虫剂用于防治鳞翅目、鞘翅目、双翅目和半翅目等害虫，目前已有不错的成效，现在其主要产品有除虫脲、氟啶脲、氟铃脲等。

### 1.2.1 氟铃脲控制害虫的作用

氟铃脲主要作用方式为胃毒，并有一定的触杀作用，有大量文献表明氟铃脲对于害虫的卵和幼虫有良好的控制作用。在 5 ppm 和 25 ppm 浓度下，氟铃脲显著抑制墨西哥棉铃象 *Anthonomus grandis* 在春季和秋季时的产卵量和幼虫孵化率，并确定其能有效抑制墨西哥棉铃象的虫口密度 (Lopez, et al., 2009)。通过浸叶法测定氟铃脲对小菜蛾 *Plutella xylostella* 卵、3 龄幼虫和成虫的  $LC_{50}$  值分别为 37.32 mg/L、1.48 mg/L 和 348.38 mg/L，发现其卵和幼虫有较高的毒力而对于成虫的毒力不是很理想 (MAHMOUNDVAND, et al., 2010)。谷实夜蛾 *Helicoverpa zea* 喂食混有 5.0 mg 氟铃脲的蔗糖溶液后，雌性成虫连续 2.5 d 卵孵化率显著降低，而在相同条件下喂食分别雌性或雄性时孵化率并没有不同，表明氟铃脲的杀卵作用 (Khorshidi, et al., 2019)。

氟铃脲虽对许多昆虫成虫毒力表现并不理想，但是会影响其繁殖。通过放射标记法发现氟铃脲在成年甜菜象虫 *Aubeonymus amriaefranciscae* 的生殖系统中比老熟的甜菜象的残留更多，并且导致其胚胎发育受损和卵孵化率下降 (Perez-Farinos, et al., 1998)。也有研究发现经过氟铃脲处理后的埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 雌性和雄性相比于没有经过处理的授精率下降了 78~80% (Vasuki, 1997)。在氟铃脲 316 ppm 处理下，地中海粉螟 *Ephestia kuehniella* 的繁殖力和生育力分别下降了 97.88% 和 100%，能够有效减少其种群数量 (Ashouri, et al., 2014)。

### 1.2.2 氟铃脲的作用机制研究

几丁质 (Chitin) 又称之为甲壳素、壳多糖、甲壳质，广泛存在于自然界之中，在真菌、昆虫和甲壳类动物中都有其踪迹 (Andersen, et al., 1995)。几丁质这类多糖在昆虫发挥着重要作用，不仅是昆虫外骨骼的主要成分，同样是中肠围食膜的重要成分，约占昆虫蜕皮物质的 40% 左右 (Kramer, et al., 1995)。几丁质的合成与降解对于昆虫的生长发育有重要作用，因此成为一项控制害虫的方法思路 (张文庆等, 2011)。Candy 和 Kilby 首次提出昆虫几丁质的生物合成始于海藻糖终止于几丁质，并说明了参与几丁质合成的酶共有 8 个 (Candy and Kilby, 1962)。目前研究最多就是海藻糖酶和几丁质合成酶，这两类酶分别负责几丁质合成途径的开始和结束，能有效的对其进行调控从而抑制几丁质合成达到控害效果。海藻糖酶有两个基因分别是：可溶性海藻糖酶基因 (*Tre-1*) 和膜结合海藻糖酶基因 (*Tre-2*)；昆虫几丁质合成酶的两个基因是 A 基因 (*CHSA*) 和 B 基因 (*CHSB*)。这两类酶的关键基因成为后续昆虫几丁质合成抑制剂针对害虫控制中的重要研究对象。

昆虫几丁质酶基因存在于中肠、蜕皮腺记忆某些昆虫的毒腺中。中肠的几丁质酶发挥着降解中肠壁和围食膜的几丁质和消化功能的作用 (相静波, 2004)。并只在幼虫蜕

皮、幼虫化蛹和羽化成虫这几个阶段前短暂表达，这期间蜕皮激素对其有正调控作用，昆虫几丁质合成抑制剂和保幼激素起负调控作用（李瑶和范晓军，2011）。张展涛等人（2022）发现可通过注射苦瓜素 I 溶液于斜纹夜蛾幼虫时期，可抑制 *SICht* 和 *SICHS-A* 的表达，导致斜纹夜蛾生长发育受阻。刘晓健等人（2014）通过体外合成 *LmCHS2* 的 dsRNA 注射在成虫期第一天的飞蝗中，发现成虫取食量明显减少并且成虫死亡率在 78%-85%，并解剖发现中肠于胃盲囊长度缩短。

海藻糖被称为血糖，是昆虫血淋巴中的一种重要糖类物质，存在于幼虫、蛹和成虫阶段（Wyatt, 1967）。海藻糖不仅为昆虫的生命活动提供主要能量并且具有保护昆虫机体的作用（Tang, et al., 2008; Mihaela and Ryoza, 2008）。海藻糖酶是海藻糖的关键合成酶，可通过调控海藻糖酶间接影响几丁质的合成（Yang, et al., 2017）。有研究表明滞育激素（DH）可增强海藻糖对卵巢的活性，通过血淋巴的刺激渗入，导致卵母细胞中糖原的浓度更高，并且通过实时荧光定量 PCR 数据发现 DH 可增强海藻糖活性的主要原因是转录水平上调的 Treh-2 蛋白（Kamei, et al., 2011）。通过注射丁烯内酯类化合物 ZK-I-21、ZK-I-23 和胡椒碱类似物 ZK-PI-4 于草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 3 龄幼虫体内，注射 ZK-I-21 和 ZK-PI-4 后的草地贪夜蛾膜结合型海藻糖酶活性均显著下降，并发现注射化合物幼虫都造成幼虫发育不良的情况，原因是 3 种抑制剂可降低可溶性海藻糖基因或膜结合型海藻糖酶基因的表达，导致草地贪夜蛾海藻糖代谢紊乱进而使昆虫几丁质合成受阻，出现昆虫蜕皮困难、发育延缓等情况（王思彤等，2022）。

氟铃脲作为几丁质合成抑制剂其作用机制是通过抑制昆虫蜕皮阶段几丁质合成酶的形成，导致内膜的异常沉积，使昆虫蜕皮受阻而死亡（吴钜文等，2002）。在国外，有研究人员首次报道了灭幼虫脲 PH6038 干扰大菜粉蝶 *Pieris brassicae* 表皮几丁质的正常沉积（Kamminga, et al., 2012）。Post 和 Vincent 使用甘蓝粉蝶 *P. brassicae* 五龄幼虫证明，UDP-N-乙酰葡萄糖胺（UDP-NAGA）向几丁质的掺入在体内被明显抑制（Post and Vincent, 1973）。随后证明了 Du19111 能够抑制大菜粉蝶 *Pieris brassicae* 表皮几丁质的生物合成，但不抑制表皮蛋白的合成（Post, et al., 1974）。在国内，通过 120 和 240 mg/L 氟铃脲处理棉铃虫 3 龄幼虫均导致其几丁质含量降低，并发现在 60 mg/L 氟铃脲处理 72 h 后情况下几丁质酶活性逐渐增加（马龙等，2014）。也有研究发现氟铃脲对长足大竹象 *Cyrtotrachelus buqueti* 离体解毒酶 GST、AChE 活性均表现为抑制作用，对 CarE 是激活作用；对离体保护酶 POD 表现为抑制作用，在低浓度时离体 SOD 表现为抑制作用（陈章铭等，2019）。

有研究通过使用离体蜕皮美洲大蠊 *Periplaneta americana* 体壁证明<sup>3</sup>H 标记的 N-乙酰葡萄糖胺的掺入被除虫脲、缬氨霉素（一种钾离子载体）、三氟拉嗪（钙调蛋白抑制剂）和 8-溴-cAMP 完全抑制，但不受多氧霉素 D 抑制（Nakagawa, et al., 1993）。在之后研究中 Nakagawa 和 Matsumura 使用透化的完整体壁制备物证明，已知能降低细胞内液泡