S-烯虫酯持续处理对四种重要储粮害虫幼虫生长发育的控制作用*

黄 超** 吕建华*** 白春启 胡 森 郭亚飞

（河南工业大学粮食和物资储备学院，粮食储藏安全河南省协同创新中心，郑州 450001）

摘 要 **【目的】** 了解 S-烯虫酯对重要储粮害虫持续处理的控制作用效果。**【方法】** 采用滤纸药膜法测定 S-烯虫酯处理后 4 种重要储粮害虫（赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、杂拟谷盗 *Tribolium confusum*、锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 和锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*）的幼虫存活率、幼虫死亡率、蛹期存活率、蛹期死亡率和羽化率。**【结果】** S-烯虫酯持续处理 4 周后，锈赤扁谷盗和锯谷盗均得到有效控制，最高羽化率不超过 10.00%；持续处理 6 周后，赤拟谷盗处理组大部分在幼虫期死亡，仅当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗处理组羽化率最高为 61.67%。S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 持续处理 7 周后，仅杂拟谷盗有羽化现象，羽化率为 41.67%。与对照组相比，处理组 4 种储粮害虫的幼虫期和蛹期均有不同程度延长，且随 S-烯虫酯处理剂量增加其生长发育历期呈延长趋势。**【结论】** S-烯虫酯对 4 种重要储粮害虫均有一定控制作用，对不同害虫的控制作用效果与处理时间和处理剂量密切相关。

关键词 S-烯虫酯；储粮害虫；控制作用；生长发育

The effectiveness of continuous treatment with S-methoprene on the growth and development of larvae of four major stored grain pests

HUANG Chao** LÜ Jian-Hua*** BAI Chun-Qi HU Sen GUO Ya-Fei

(Henan Collaborative Innovation Center for Grain Storage Security, School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract **[Aim]** To understand the effects of continuous exposure to S-methoprene on four major stored grain pests. **[Methods]** Insecticide-impregnated filter paper was used to measure the larval survival rate, larval mortality rate, pupal survival rate, pupal mortality rate, and emergence rate of four major stored grain pests (*Tribolium castaneum*, *Tribolium confusum*, *Cryptolestes ferrugineus*, and *Oryzaephilus surinamensis*) after S-methoprene treatment. **[Results]** Four weeks of continuous treatment with S-methoprene effectively controlled both *C. ferrugineus* and *O. surinamensis*, both of which had a maximum emergence rate of < 10.00%. Most *T. castaneum* larvae died after 6 weeks of continuous treatment. The *T. castaneum* emergence rate reached a maximum of 61.67% only at an S-methoprene dosage of 2×10^{-5} mg/cm^2. Only *T. confusum* had an emergence rate of 41.67% after 7 weeks of continuous treatment at a dosage of 4×10^{-5} mg/cm^2. Compared to the control groups, the larval and pupal stages of all four stored grain pests treated with S-methoprene were prolonged to varying degrees, and this prolongation increased with increasing S-methoprene dosage. **[Conclusion]** S-methoprene can control, to some extent, all four major stored grain pests tested, but the degree of control is closely related to the treatment duration and dosage.

Key words S-methoprene; stored grain pests; control effect; growth and development

*资助项目 Supported project：“十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD2100604）

**第一作者 First author，E-mail：2676128589@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：jianhlv@163.com

收稿日期 Received：2024-06-23；接受日期 Accepted：2025-02-13

粮食事关国运民生，粮食安全是国家安全的重要基础，而储粮害虫为害对粮食安全带来严峻挑战（Pruthi and Singh, 1950; Kumar, 2017）。例如，拟谷盗属 *Tribolium* 害虫为害储粮时会产生苯醌，严重危害人类健康（Park, 1934）；扁谷盗属 *Cryptolestes* 成虫及幼虫为害造成粮粒破碎或损伤，甚至导致粮堆发热霉变（Bharathi *et al*., 2023）；螟蛾科 Crambidae 会直接或间接危害储藏的烟叶、坚果、干果、谷类等农产品，幼虫取食会造成带状织物和虫粪污染（Ashworth, 1993）。施用化学药剂是防治储粮害虫的主要手段，但随着化学药剂的长期使用，引起害虫抗药性增强、环境污染和农药残留等问题，促使人们寻找环保、高效、安全的储粮害虫防治措施。在此背景下，S-烯虫酯这一新兴的生物化学农药成为备受关注的焦点（Henrick, 2007; Lawler, 2017）。

昆虫生长调节剂 S-烯虫酯是一种可抑制昆虫蜕皮和变态的保幼激素（Juvenile hormone, JH）类似物，多年来一直被国外用于控制疟疾、登革热、乙脑等蚊媒传播流行病，以及防治储藏物害虫、红火蚁 *Solenopsis invicta*、牛蝇 *Hypoderma bovis* 和蟑螂等（Des Lauriers *et al*., 2006; Wijayaratne *et al*., 2018）。近年来国内使用 S-烯虫酯主要用于蚊虫防治以及储藏物害虫治理（胡铁源等, 2023; 胡文博等, 2024），但鲜有报道 S-烯虫酯持续处理对重要储粮害虫生长发育过程的评价。因此，本文以赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、杂拟谷盗 *Tribolium confusum*、锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* 和锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 4 种重要储粮害虫为研究对象，以 S-烯虫酯为处理药剂，采用滤纸药膜法持续处理 4 种重要储粮害虫的幼虫，观察记录 4 种储粮害虫各阶段生长发育参数，为探究持续接触 S-烯虫酯对 4 种储粮害虫生长发育影响和科学使用 S-烯虫酯有效防治储粮害虫提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 虫源及饲养

4 种储粮害虫均在河南工业大学储藏物害虫防治实验室长期饲养。饲养条件：（28±2）℃、相对湿度 65%±5%。饲料：赤拟谷盗和杂拟谷盗饲料为全麦粉（含 5.00%质量分数为啤酒酵母）；锈赤扁谷盗和锯谷盗饲料为碎小麦和燕麦片（质量比为 1∶1，含质量分数为 5.00%的啤酒酵母）。

试虫获取方法：随机取赤拟谷盗、杂拟谷盗、锯谷盗和锈赤扁谷盗成虫约 1 000 头于添加对应饲料的柱形塑料瓶中培养，培养 1 d 后，用 100 目筛网晒出虫卵。以上试虫虫卵置于对应饲料中饲养，饲养条件：（28±2）℃、相对湿度 65%±5%、全暗处理。以卵期开始饲养 20 d 后的幼虫为供试幼虫。

1.2 实验器材与试剂

生化培养箱：SPX-250 型（北京市永光明医疗仪器厂）；S-烯虫酯乳油：50 g/L（拜尔有限公司）；聚四氟乙烯分散液：60%（Weight percent, wt）（上海麦克林生化科技股份有限公司）。

1.3 生物测定

设置 S-烯虫酯滤纸药膜（d=11 cm）剂量为 0、2×10^{-5}、4×10^{-5}、8×10^{-5}、16×10^{-5} 和 32×10^{-5} mg/cm^2。分别取质量浓度为 50 g/L S-烯虫酯乳油 0、40、80、160、320 和 640 μL 于容量瓶（1 000 mL）中，加水稀释定容至 1 000 mL 后，即得到 0、2×10^{-3}、4×10^{-3}、8×10^{-3}、1.6×10^{-2} 和 3.2×10^{-5} mg/mL 的 S-烯虫酯水溶液，用移液枪分别取 1 230 mL S-烯虫酯水溶液，均匀滴在 1 张滤纸（d=11 cm）上，即得到 0、2×10^{-5}、4×10^{-5}、8×10^{-5}、1.6×10^{-4} 和 3.2×10^{-4} mg/cm^2 滤纸药膜。将处理好的滤纸药膜放在条件为（28±2）℃、相对湿度 65%±5%、避光的培养箱中干燥水分，24 h 后，放入培养皿（d=11 cm, h=1 cm）内备用。将滤纸药膜与培养皿底部用固体胶粘连不留空隙，皿壁涂有聚四氟乙烯，防止待测试虫逃离药膜。分别取饲养 20 d 的幼虫 20 头放置于上述制备的药膜表面，加入 0.3 g 对应饲料作为食物，每周观察记录试虫发育状态，直至试虫全部发育为成虫或死亡（用小毛刷触碰不动为死亡）。重复 3 次。实验装置如图 1。

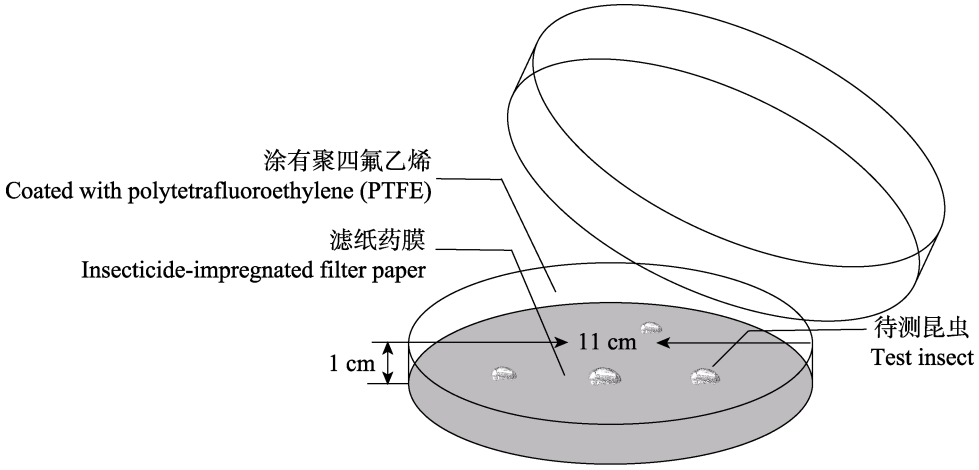

图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup

1.4　数据处理

首先采用 Excel 2021、Word 2016 对实验数据进行统计处理，然后使用 SPSS Statistics 26 软件对数据进行 Duncan 氏差异显著性分析。试虫幼虫存活率（试虫为幼虫形态且存活）、幼虫死亡率、蛹期存活率（试虫为蛹形态且存活）、蛹期死亡率和羽化率计算公式如下：

$$幼虫存活率=\frac{幼虫存活数量}{测试试虫总数（20头）}\times 100\%，$$

$$幼虫死亡率=\frac{幼虫死亡数量}{测试试虫总数（20头）}\times 100\%，$$

$$蛹期存活率=\frac{蛹存活数量}{测试试虫总数（20头）}\times 100\%，$$

$$蛹期死亡率=\frac{蛹死亡数量}{测试试虫总数（20头）}\times 100\%，$$

$$羽化率=\frac{成虫数量}{测试试虫总数（20头）}\times 100\%。$$

2　结果与分析

2.1　持续接触 S-烯虫酯 1 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 1 周对锈赤扁谷盗的幼虫存活率和幼虫死亡率有显著影响（表 1）。锈赤扁谷盗对照组幼虫存活率显著大于处理组（F=9.656; df=5, 12; P<0.05），同时锈赤扁谷盗处理组的幼虫存活率均小于其他 3 种害虫幼虫存活率。锈赤扁谷盗处理组的幼虫存活率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼虫存活率为 85.00%。锈赤扁谷盗对照组幼虫死亡率显著小于处理组（F=9.656; df=5, 12; P<0.05），处理组最大幼虫死亡率为 25.00%；当 S-烯虫酯处理剂量小于 1.6×10^{-4} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗处理组的幼虫死亡率显著大于其他 3 种害虫幼虫死亡率（2×10^{-5} mg/cm^2：F=37.867; df=3, 8; P<0.05, 4×10^{-5} mg/cm^2：F=21.444; df=3, 8; P<0.05, 1.6×10^{-4} mg/cm^2：F=4.632; df=3, 8; P<0.05）。

2.2　持续接触 S-烯虫酯 2 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 2 周对 4 种害虫的幼虫存活率、幼虫死亡率和蛹期存活率均有显著影响（表 2）。杂拟谷盗对照组幼虫存活率显著小于处理组幼虫存活率（F=4.135; df=5, 12; P<0.05），锈赤扁谷盗对照组幼虫存活率显著大于处理组（F=17.142; df=5, 12; P<0.05），但锈赤扁谷盗对照组幼虫死亡率显著小于处理组（F=45.556; df=5, 12; P<0.05），赤拟谷盗（F=95.954; df=5, 12; P<0.05）、杂拟谷盗（F=12.00; df=5, 12; P<0.05）和锈赤扁谷盗（F=9.000; df=5, 12; P<0.05）对照组蛹期存活率均显著高于处理组。赤拟谷盗幼虫死亡率随 S-烯虫酯处理剂量升高而增加，赤拟谷盗、杂拟谷盗和锈赤扁谷盗蛹期存活率随 S-烯虫酯处理剂

表 1　持续接触 S-烯虫酯药膜 1 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 1　Effects of one week continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量（mg/cm^2）Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%）Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	100.00±0.00 Aa	98.33±1.67 ABa	83.33±3.33 Bc	91.67±3.33 Aabc	88.33±4.41 BCbc	93.33±1.67 ABab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	98.33±1.67 Aab	91.67±3.33 Ab	96.67±3.33 Aab	98.33±1.67 Aab
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	98.33±1.67 Aa	75.00±2.89 Cc	75.00±2.89 Cc	76.67±4.41 Bbc	81.67±1.67 Cbc	85.00±2.89 Bb
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	93.33±1.67 Ba	98.33±1.67 Aa	93.33±3.33 Aa	91.67±1.67 ABa	93.33±4.41 ABa
幼虫死亡率（%）Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 BCc	16.67±3.33 Ba	8.33±3.33 Babc	11.67±4.41 ABab	6.67±1.67 ABbc
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Cc	1.67±1.67 Cab	8.33±3.33 Ba	3.33±3.33 Cab	1.67±1.67 Bab
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	25.00±2.89 Aa	25.00±2.89 Aa	23.33±4.41 Aab	18.33±1.67 Aab	15.00±2.89 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	6.67±1.67 Ba	1.67±1.67 Ca	6.67±3.33 Ba	8.33±1.67 ABa	6.67±4.41 ABa
蛹期存活率（%）Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
蛹期死亡率（%）Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
羽化率（%）Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa

表中数据为平均值±标准误，不同小写字母表示同行之间差异显著，不同大写字母表示相同发育参数条件下同列之间差异显著（$P<0.05$，Duncan 氏新复极差法检验）。下表同。

The date in the table are mean±SE, and followed by different lowercase letters indicate significant difference within the same row, while different uppercase letters indicate significant difference within the same column under the same developmental parameter conditions ($P<0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

表 2　持续接触 S-烯虫酯药膜 2 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 2　Effects of two weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量（mg/cm^2） Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	53.33±3.33 Bb	53.33±4.41 BCb	75.00±2.89 Ba	58.33±6.01 Bab	58.33±4.41 Cab	61.67±6.01 Bab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	66.67±8.82 ABb	83.33±4.41 Aa	93.33±1.67 Aa	88.33±4.41 Aa	90.00±2.89 Aa	90.00±2.89 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	83.33±4.41 Aa	58.33±4.41 Bb	60.00±2.89 Cb	45.00±2.89 Bc	55.00±2.89 Cbc	46.67±1.67 Bc
	锯谷盗 *O. surinamensis*	26.67±6.01 Cb	41.67±8.33 Bb	25.00±2.89 Db	61.67±6.01 Ba	73.33±6.01 Ba	63.33±7.26 Ba
幼虫死亡率（%）（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 Bc	25.00±2.89 Bb	41.67±6.01 Aa	41.67±4.41 Aa	38.33±6.01 Aab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Bb	6.67±1.67 Cb	11.67±4.41 Ba	10.00±2.89 Ca	10.00±2.89 Ba
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ad	41.67±4.41 Ac	40.00±2.89 Ac	55.00±2.89 Aa	45.00±2.89 Abc	53.33±1.67 Aab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ab	6.67±1.67 Bb	3.33±1.67 Cb	38.33±6.01 Aa	26.67±6.01 Ba	36.67±7.26 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	46.67±3.33 Ba	38.33±4.41 Ab	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	33.33±8.82 BCa	16.67±4.41 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	15.00±5.00 Ca	0.00±0.00 Cb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	73.33±6.01 Aa	51.67±6.67 Ab	71.67±3.33 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
蛹期死亡率（%）(%) Pupal mortality rate	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa

量升高逐渐降低，最低蛹期存活率为 0。

持续接触 S-烯虫酯 2 周，当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗幼虫存活率显著低于其他害虫（F=120.800; df=5, 12; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量为 8×10^{-5}（F=120.800; df=5, 12; P<0.05）和 3.2×10^{-4} mg/cm^2（F=12.991; df=5, 12; P<0.05）时，锈赤扁谷盗幼虫存活率也显著低于其他害虫。锈赤扁谷盗处理组除了 S-烯虫酯处理剂量为 1.6×10^{-4} mg/cm^2，其他处理剂量下锈赤扁谷盗幼虫死亡率均显著高于其他 3 种害虫（2×10^{-5} mg/cm^2：F=61.778; df=5, 12; P<0.05, 4×10^{-5} mg/cm^2：F=52.458; df=5, 12; P<0.05, 8×10^{-4} mg/cm^2：F=13.185; df=5, 12; P<0.05, 3.2×10^{-5} mg/cm^2：F=4.632; df=5, 12; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量低于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗蛹期存活率显著高于其他 3 种害虫（0×10^{-5} mg/cm^2：F=16.068; df=3, 8; P<0.05, 2×10^{-5} mg/cm^2：F=25.156; df=3, 8; P<0.05, 4×10^{-5} mg/cm^2：F=12.991; df=3, 8; P<0.05）。S-烯虫酯处理 2 周对 4 种害虫的蛹期死亡率和羽化率均无显著影响（P>0.05）。

2.3 持续接触 S-烯虫酯 3 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 3 周对 4 种害虫的幼虫存活率、幼虫死亡率、蛹期存活率、蛹期死亡率和羽化率均有显著影响（表 3）。杂拟谷盗对照组幼虫存活率显著小于处理组幼虫存活率（F=45.471; df=5, 12; P<0.05），杂拟谷盗幼虫存活率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼虫存活率为 85.00%。锈赤扁谷盗对照组幼虫死亡率显著小于处理组（F=37.431; df=5, 12; P<0.05），当 S-烯虫酯处理剂量为 1.6×10^{-4} mg/cm^2 时，杂拟谷盗幼虫死亡率显著高于其他处理剂量（F=4.846; df=5, 12; P<0.05），锯谷盗幼虫死亡率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼虫死亡率为 81.67%。锈赤扁谷盗对照组蛹期存活率显著大于处理组（F=45.375; df=5, 12; P<0.05），当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗（F=75.000; df=5, 12; P<0.05）和杂拟谷盗（F=3.574; df=5, 12; P<0.05）蛹期死亡率显著大于其他处理剂量，赤拟谷盗和锈赤扁谷盗蛹期存活率随 S-烯虫酯处理剂量增加而降低。当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗蛹期死亡率显著高于其他处理剂量（F=172.095; df=5, 12; P<0.05）；赤拟谷盗（F=87.650; df=5, 12; P<0.05）和杂拟谷盗（F=42.036; df=5, 12; P<0.05）对照组羽化率显著高于处理组，4 种储粮害虫羽化率随 S-烯虫酯处理剂量增加而降低。

当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} 和 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗幼虫死亡率显著高于赤拟谷盗、杂拟谷盗和锯谷盗（2×10^{-5} mg/cm^2：F=85.714; df=3, 8; P<0.05, 4×10^{-5} mg/cm^2：F=28.447; df=3, 8; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 和 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗蛹期死亡率显著高于其他 3 种害虫（2×10^{-5} mg/cm^2：F=46.375; df=3, 8; P<0.05, 4×10^{-5} mg/cm^2：F= 867.000; df=3, 8; P<0.05）；锯谷盗对照组羽化率显著高于其他 3 种害虫（F=60.583; df=3, 8; P< 0.05）。

2.4 持续接触 S-烯虫酯 4 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 4 周对 4 种害虫的幼虫存活率、幼虫死亡率、蛹期存活率、蛹期死亡率和羽化率均有显著影响，锯谷盗和锈赤扁谷盗幼虫全部羽化为成虫或死亡（表 4）。当 S-烯虫酯处理剂量为 8×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗幼虫存活率显著大于其他处理剂量的幼虫存活率（F=20.483; df=5, 12; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量为 3.2×10^{-4} mg/cm^2 时，杂拟谷盗幼虫存活率显著大于其他处理剂量的幼虫存活率（F=533.480; df=5, 12; P<0.05）。杂拟谷盗幼虫存活率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼虫存活率为 81.67%。杂拟谷盗（F=13.914; df=5, 12; P<0.05）、锈赤扁谷盗（F=173.360; df=5, 12; P<0.05）和锯谷盗（F=3 032.400; df=5, 12; P<0.05）对照组幼虫死亡率显著小于处理组。当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} 和 8×10^{-5} mg/cm^2

表 3　持续接触 S-烯虫酯药膜 3 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 3　Effects of three weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量（mg/cm^2） Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	10.00±2.89 Bc	18.33±6.01 ABbc	50.00±8.66 Aa	46.67±7.26 ABa	38.33±6.01 Bab	41.67±3.33 Ba
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Cd	33.33±6.01 Ac	31.67±1.67 Ac	68.33±9.28 Ab	70.00±2.89 Ab	85.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	18.33±1.67 Aa	18.33±7.26 ABa	35.00±8.66 Aa	23.33±4.41 Ca	30.00±2.89 Ba	28.33±3.33 BCa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Cb	0.00±0.00 Cb	0.00±0.00 Bb	30.00±5.00 BCa	26.67±3.33 Ba	18.33±8.82 Ca
幼虫死亡率（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 CDc	46.67±6.01 Ba	53.33±7.26 Ba	61.67±6.01 Aa	58.33±3.33 Ba
	杂拟谷盗 *T. confusum*	1.67±1.67 Ac	11.67±1.67 Bbc	10.00±2.89 Cbc	16.67±9.28 Cb	30.00±2.89 Ba	15.00±0.00 Cbc
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	46.67±3.33 Ab	65.00±8.66 Aa	76.67±4.41 Aa	70.00±2.89 Aa	71.67±3.33 ABa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ab	6.67±1.67 BCb	3.33±1.67 Cb	70.00±5.00 ABa	73.33±3.33 Aa	81.67±8.82 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	21.67±4.41 Ca	21.67±4.41 Aa	3.33±3.33 BCb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	36.67±4.41 Bb	21.67±1.67 Ac	58.33±4.41 Aa	15.00±2.89 Ac	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	50.00±2.89 Aa	35.00±7.64 Ab	0.00±0.00 Cc	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Dc	21.67±4.41 Aa	11.67±3.33 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
蛹期死亡率（%） Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ab	25.00±2.89 Ba	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ab	8.33±4.41 Ca	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ca	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ac	63.33±6.67 Ab	85.00±2.89 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	68.33±1.67 Ba	33.33±7.26 Ab	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	56.67±6.67 Ba	25.00±5.77 Ab	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	30.00±2.89 Ca	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	8.33±3.33 Bb	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac

表 4　持续接触 S-烯虫酯药膜 4 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 4　Effects of four weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量（mg/cm^2） Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 Ac	15.00±0.00 Ab	28.33±4.41 Aa	15.00±2.89 Bb	18.33±1.67 Bb
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Bc	5.00±2.89 Bc	51.67±1.67 Ab	81.67±1.67 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ca	0.00±0.00 Ca
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ca	0.00±0.00 Ca
幼虫死亡率（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ab	1.67±1.67 Cb	70.00±10.00 Ba	71.67±4.41 Ba	85.00±2.89 Ba	81.67±1.67 Ba
	杂拟谷盗 *T. confusum*	1.67±1.67 Ac	18.33±3.33 Bb	13.33±1.67 Cbc	43.33±10.93 Ca	48.33±1.67 Ca	18.33±1.67 Cb
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	61.67±7.26 Ab	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ad	6.67±1.67 BCb	3.33±1.67 Cc	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ab	3.33±1.67 Ab	8.33±3.33 BCa	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Bc	18.33±6.67 Ab	35.00±7.64 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ca	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ca	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
蛹期死亡率（%） Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ab	35.00±2.89 Ba	3.33±3.33 Cb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	18.33±1.67 Cb	33.33±3.33 Ba	16.67±1.67 Ab	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Ab	38.33±7.26 Ba	0.00±0.00 Cb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ac	83.33±1.67 Ab	96.67±1.67 Aa	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	100.00±0.00 Aa	58.33±6.01 Ab	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	98.33±1.67 Aa	63.33±4.41 Ab	35.00±10.41 Ac	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	98.33±1.67 Aa	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	10.00±2.89 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac

时，赤拟谷盗（F=5.000; df=5, 12; P<0.05）和杂拟谷盗（F=12.629; df=5, 12; P<0.05）蛹期存活率显著大于其他处理剂量的蛹期存活率，锈赤扁谷盗幼虫死亡率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼虫死亡率为 100.00%。当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗（F=61.171; df=5, 12; P<0.05）和锈赤扁谷盗（F=27.842; df=5, 12; P<0.05）蛹期死亡率显著大于其他处理剂量的蛹期死亡率。当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 时，杂拟谷盗（F=68.167; df=5, 12; P<0.05）、锯谷盗（F=2 352.200; df=5, 12; P<0.05）蛹期死亡率显著大于其他处理剂量的蛹期死亡率。赤拟谷盗、杂拟谷盗、锈赤扁谷盗和锯谷盗对照组羽化率显著高于处理组（*T. castaneum*: F=306.538; df=5, 12; P<0.05，*T. confusum*: F=77.753; df=5, 12; P<0.05, *C. ferrugineus*: F=3 481.000; df=5, 12; P<0.05, *O. surinamensis*: F=1 164.000; df=5, 12; P<0.05），羽化率随 S-烯虫酯处理剂量增加呈降低趋势。

当 S-烯虫酯处理剂量为 3.2×10^{-4} mg/cm^2 时，杂拟谷盗幼虫存活率显著大于其他 3 种害虫（F=1 081.333; df=3, 8; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} 和 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗幼虫死亡率显著大于赤拟谷盗、杂拟谷盗和锯谷盗（2×10^{-5} mg/cm^2: F=42.920; df=3, 8; P<0.05，4×10^{-5} mg/cm^2: F=80.561; df=3, 8; P<0.05），当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 时，杂拟谷盗羽化率显著大于其他 3 种害虫（F=11.308; df=3, 8; P<0.05）。

2.5　持续接触 S-烯虫酯 5 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 5 周对赤拟谷盗和杂拟谷盗的幼虫死亡率、蛹期死亡率和羽化率均有显著影响（表 5）。赤拟谷盗和锈赤扁谷盗幼虫死亡率随 S-烯虫酯处理剂量增加而增加，最高幼死亡虫率分别为 98.33%和 100.00%。当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗蛹期死亡率显著大于其他处理剂量的蛹期存活率（F=42.855; df=5, 12; P<0.05）。赤拟谷盗、杂拟谷盗、锈赤扁谷盗和锯谷盗对照组羽化率显著大于处理组（*T. castaneum*: F=583.000; df=5, 12; P<0.05，*T. confusum*: F=102.311; df=5, 12; P<0.05, *C. ferrugineus*: F=3 481.000; df=5, 12; P<0.05, *O. surinamensis*: F=1 164.000; df=5, 12; P<0.05），赤拟谷盗羽化率随 S-烯虫酯处理剂量增加而降低。

当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} 和 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗幼虫死亡率显著大于赤拟谷盗、杂拟谷盗和锯谷盗（2×10^{-5} mg/cm^2: F=42.920; df=3, 8; P<0.05，4×10^{-5} mg/cm^2: F=289.639; df=3, 8; P<0.05）。当 S-烯虫酯处理剂量为 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗蛹期死亡率显著小于赤拟谷盗、杂拟谷盗和锯谷盗（F=223.667; df=3, 8; P<0.05）；当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗蛹期死亡率显著大于其他 3 种害虫（F= 38.286; df=3, 8; P<0.05）。

2.6　持续接触 S-烯虫酯 6 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 6 周对杂拟谷盗的幼虫存活率和幼虫死亡率均有显著影响，赤拟谷盗幼虫全部羽化为成虫或死亡（表 6）。S-烯虫酯持续处理 6 周后，仅有杂拟谷盗幼虫存活，4 种害虫蛹存活率均为 0；当 S-烯虫酯处理剂量大于 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗幼虫死亡率均大于 88.33%；S-烯虫酯处理剂量小于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗和杂拟谷盗均有在蛹期死亡的现象；当 S-烯虫酯处理剂量大于 4×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗和杂拟谷盗羽化率均为 0。

2.7　持续接触 S-烯虫酯 7 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 7 周对杂拟谷盗幼虫存活率和幼虫死亡率均有显著影响，杂拟谷盗幼虫全部羽化为幼虫或死亡（表 7）。持续暴露在经 S-烯虫酯处理滤纸药膜表面 7 周，4 种储粮害虫全部羽化为成虫或死亡。较高剂量 S-烯虫酯处理 4 种储粮害虫发现，赤拟谷盗、杂拟谷盗、锈赤扁谷盗和锯谷盗幼虫死亡率达到 90.00%以上，甚至达到 100.00%。当 S-

表 5　持续接触 S-烯虫酯药膜 5 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 5　Effects of five weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量（mg/cm^2） Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	8.33±1.67 Aa	1.67±1.67 Bb	3.33±1.67 Bb
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Bc	40.00±2.89 Ab	61.67±4.41 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba
幼虫死亡率（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ad	1.67±1.67 Cd	88.33±3.33 Bc	91.67±1.67 Abc	98.33±1.67 Aa	96.67±1.67 Aab
	杂拟谷盗 *T. confusum*	1.67±1.67 Ac	18.33±3.33 Bc	16.67±4.41 Cc	45.00±10.41 Bab	60.00±2.89 Ba	38.33±4.41 Bb
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	61.67±7.26 Ab	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ad	6.67±1.67 BCb	3.33±1.67 Dc	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	5.00±2.89 Aa	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
蛹期死亡率（%） Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	36.67±4.41 Ba	11.67±3.33 Cb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	18.33±1.67 Cb	41.67±4.41 Ba	50.00±8.66 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Ab	38.33±7.26 Ba	0.00±0.00 Db	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ac	83.33±1.67 Ab	96.67±1.67 Aa	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	100.00±0.00 Aa	61.67±4.41 Ab	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	98.33±1.67 Aa	63.33±4.41 Ab	41.67±8.82 Ac	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	98.33±1.67 Aa	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	10.00±2.89 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac

表 6　持续接触 S-烯虫酯药膜 6 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 6　Effects of six weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量 (mg/cm^2) Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	13.33±4.41 Ab	48.33±4.41 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Ba	0.00±0.00 Ba
幼虫死亡率（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 Cc	88.33±3.33 Bb	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	1.67±1.67 Ad	18.33±3.33 Bc	0.00±0.00 Cd	45.00±10.41 Bb	86.67±4.41 Ba	51.67±4.41 Bb
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	61.67±7.26 Ab	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ad	6.67±1.67 BCb	3.33±1.67 Cc	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
蛹期死亡率（%） Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	36.67±4.41 Ba	11.67±3.33 Cb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	18.33±1.67 Cb	41.67±4.41 Ba	55.00±10.41 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Ab	38.33±7.26 Ba	0.00±0.00 Db	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ac	83.33±1.67 Ab	96.67±1.67 Aa	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	100.00±0.00 Aa	61.67±4.41 Ab	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	98.33±1.67 Aa	61.67±4.41 Ab	41.67±8.82 Ac	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	98.33±1.67 Aa	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	10.00±2.89 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac

表 7　持续接触 S-烯虫酯药膜 7 周对 4 种储粮害虫幼虫生长发育的影响

Table 7　Effects of seven weeks continuous exposure to S-methoprene-impregnated filter paper on the growth and development of larvae of four stored grain pests

发育参数 Developmental parameter	物种 Species	剂量 (mg/cm^2) Dosage (mg/cm^2)					
		0 (CK)	2×10^{-5}	4×10^{-5}	8×10^{-5}	1.6×10^{-4}	3.2×10^{-4}
幼虫存活率（%） Larval survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
幼虫死亡率（%） Larval mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	1.67±1.67 Cc	88.33±3.33 Bb	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	1.67±1.67 Ad	18.33±3.33 Bc	16.67±4.41 Cc	45.00±10.41 Bb	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	1.67±1.67 Ac	61.67±7.26 Ab	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ad	6.67±1.67 BCb	3.33±1.67 Dc	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa	100.00±0.00 Aa
蛹期存活率（%） Pupal survival rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa	0.00±0.00 Aa
蛹期死亡率（%） Pupal mortality rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	0.00±0.00 Ac	36.67±4.41 Ba	11.67±3.33 Cb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	0.00±0.00 Ac	18.33±1.67 Cb	41.67±4.41 Ba	55.00±10.41 Aa	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	0.00±0.00 Ab	38.33±7.26 Ba	0.00±0.00 Db	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	0.00±0.00 Ac	83.33±1.67 Ab	96.67±1.67 Aa	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
羽化率（%） Emergence rate (%)	赤拟谷盗 *T. castaneum*	100.00±0.00 Aa	61.67±4.41 Ab	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac
	杂拟谷盗 *T. confusum*	98.33±1.67 Aa	61.67±4.41 Ab	41.67±8.82 Ac	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad	0.00±0.00 Ad
	锈赤扁谷盗 *C. ferrugineus*	98.33±1.67 Aa	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Bb	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab	0.00±0.00 Ab
	锯谷盗 *O. surinamensis*	100.00±0.00 Aa	10.00±2.89 Bb	0.00±0.00 Bc	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac	0.00±0.00 Ac

烯虫酯处理剂量低于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，仅杂拟谷盗可以羽化为成虫，但当 S-烯虫酯处理剂量大于 4×10^{-5} mg/cm^2 时，4 种重要储粮害虫几乎不能发育为成虫。

3　结论与讨论

昆虫生长发育受保幼激素调控，因此保幼激素类似物被广泛应于害虫防控。S-烯虫酯作为保幼激素类似物已被用于防治蚊虫和储粮害虫（Wigglesworth, 1934; Su *et al*, 2023）。截至目前，S-烯虫酯对储粮害虫的研究均为短期处理或长期处理后的致死作用效果（Daglish, 2008; 胡铁源等, 2023），鲜有报道 S-烯虫酯对重要储粮害幼虫持续处理后各虫态控制作用研究。因此，本研究使用不同剂量 S-烯虫酯处理 4 种重要储粮害虫幼虫，持续观察 4 种害虫生长发育参数，直至害虫发育为成虫或死亡。研究结果表明，S-烯虫酯的处理剂量、试虫种类和处理时间对其作用效果具有显著影响。

S-烯虫酯持续处理 4 周后，锯谷盗和锈赤扁谷盗幼虫全部羽化为成虫或死亡；当 S-烯虫酯处理剂量大于 2×10^{-5} mg/cm^2 时，锈赤扁谷盗幼虫死亡率均为 100%，这与胡铁源等（2023）使用不同浓度梯度的烯虫酯对锈赤扁谷盗研究结果不同，这可能是不同的处理时间和施药方式导致死亡率不同，相同的是实验结果均表明锈赤扁谷盗幼虫死亡率随 S-烯虫酯处理剂量增加呈升高趋势。当 S-烯虫酯处理剂量大于 4×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗幼虫死亡率均为 100.00%，这与 Mian 和 Mulla（1982）使用烯虫酯对锯谷盗老熟幼虫研究结果相似，但当 S-烯虫酯处理剂量低于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，锯谷盗处理组幼虫死亡率低于 10.00%，且锯谷盗蛹期存活率均高于 80.00%，这与 Loschiavo 等（1976）使用烯虫酯处理锯谷盗 1 日龄幼虫研究结果不同，可能是试虫虫龄和施药方式不同导致实验结果差异。总的来说，S-烯虫酯可在一个月内有效抑制锈赤扁谷盗和锯谷盗幼虫的生长发育。

S-烯虫酯持续处理 6 周后，赤拟谷盗幼虫全部羽化为成虫或死亡；处理组除 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时赤拟谷盗幼虫死亡率较低外，其他处理组幼虫死亡率均在 88.33%以上，这与 Tucker 等（2014）使用烯虫酯处理赤拟谷盗幼虫 30 d 后，幼虫死亡率、蛹期存活率和成虫率研究结果均相似；当 S-烯虫酯处理剂量为 2×10^{-5} mg/cm^2 时，赤拟谷盗羽化率为 61.67%，其他处理组无羽化情况，赤拟谷盗羽化率随 S-烯虫酯处理剂量升高而降低，这与 Wijayaratne 等（2012）研究结果相似。

S-烯虫酯持续处理 7 周，杂拟谷盗幼虫全部羽化或死亡；当 S-烯虫酯处理剂量大于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，杂拟谷盗幼虫死亡率均为 100.00%，杂拟谷盗羽化率随 S-烯虫酯处理剂量升高呈逐渐降低趋势，处理组最高羽化率为 61.67%，这与 Arthur 和 Hoernemann（2004）使用处理剂量为 1.9×10^{-3} mg/cm^2 保幼激素类似物烯虫乙酯处理杂拟谷盗幼虫 5 周研究结果相似，但本研究使用 S-烯虫酯处理剂量远低于 Arthur 和 Hoernemann（2004）的剂量，这可能是由于不同的实验材料弥补了 S-烯虫酯处理剂量的差异。

总体来看，S-烯虫酯持续处理对 4 种储粮害虫生长发育均有显著影响，对 4 种重要储粮害虫的控制作用受 S-烯虫酯处理时间和处理剂量交互影响。S-烯虫酯可抑制 4 种重要储粮害虫的生长发育，总体呈现随 S-烯虫酯处理剂量增加幼虫死亡率和羽化率降低趋势。S-烯虫酯剂量大于 4×10^{-5} mg/cm^2 且持续处理 4 周，可完全控制锈赤扁谷盗幼虫。S-烯虫酯剂量大于 8×10^{-5} mg/cm^2 时，持续处理 4 周，可完全控制锯谷盗幼虫；持续处理 6 周，可完全控制赤拟谷盗幼虫。S-烯虫酯剂量大于 1.6×10^{-4} mg/cm^2 且持续处理 7 周，可完全控制杂拟谷盗幼虫。当 S-烯虫酯处理剂量高于 1.6×10^{-4} mg/cm^2 时且持续处理幼虫 7 周，可完全抑制 4 种储粮害虫的羽化，抑制子代的发生。S-烯虫酯对储粮害虫的控制作用还与施药方式、作用材料、温度和湿度等非生物因素密切相关，不同施药方式对储粮害虫的控制作用差异巨大。因此，还需要进一步完善使用 S-烯虫酯的相关标准，防止乱用、错用和盲目施药情况的发生；

为进一步验证 S-烯虫酯实际应用效果，推荐使用 S-烯虫酯处理剂量大于 8×10^{-5} mg/cm^2 对储粮害虫的控制作用进行实仓验证。

参考文献 (References)

Arthur FH, Hoernemann CK, 2004. Impact of physical and biological factors on susceptibility of *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) to new formulations of hydroprene. *Journal of Stored Products Research*, 40(3): 251–268.

Ashworth JR, 1993. The biology of *Ephestia elutella*. *Journal of Stored Products Research*, 29(3): 199–205.

Bharathi VSK, Jian FJ, Jayas DS, 2023. Biology, ecology, and behavior of rusty grain beetle [*Cryptolestes ferrugineus* (Stephens)]. *Insects*, 14(7): 590.

Daglish GJ, 2008. Impact of resistance on the efficacy of binary combinations of spinosad, chlorpyrifos-methyl and s-methoprene against five stored-grain beetles. *Journal of Stored Products Research*, 44(1): 71–76.

Des Lauriers A, Li J, Sze K, Baker SL, Gris G, Chan J, 2006. A field study of the use of methoprene for West Nile virus mosquito control. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(6): 517–527.

Henrick CA, 2007. Methoprene. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 23(Suppl 2): 225–239.

Hu TY, Xie BB, Li YY, Zhang HQ, Mu HL, Wang ML, Song LW, 2023. Relative tolerance to S-methoprene in life stages of the *Cryptolestes* species. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association* , 38(12): 38–45. [胡铁源, 谢冰冰, 李燕羽, 张洪清, 穆海亮, 王明亮, 宋丽雯, 2023. 不同发育虫态扁谷盗属对 S-烯虫脂耐受性研究. 中国粮油学报, 38(12): 38–45.]

Hu WB, Yang LP, Bao WF, Liang Y, Song XP, Su TY, Liu XB, Li XW, Liu QY, 2024. A systematic review on efficacy of S-methoprene for controlling dengue vector *Aedes* mosquitoes. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 35(1): 115–120. [胡文博, 杨丽萍, 包文风, 梁莹, 宋秀平, 刘小波, 李学文, 刘起勇, 2024. S-烯虫酯对登革热媒介伊蚊控制效果的系统综述. 中国媒介生物学及控制杂志, 35(1): 115–120.]

Kumar R, 2017. Insect Pests of Stored Grain: Biology, Behavior, and Management Strategies. New York: Apple Academic Press. 435–442.

Lawler SP, 2017. Environmental safety review of methoprene and bacterially-derived pesticides commonly used for sustained mosquito control. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139: 335–343.

Loschiavo SR, 1976. Effects of the synthetic insect growth regulators methoprene and hydroprene on survival, development or reproduction of six species of stored-products insects. *Journal of Economic Entomology*, 69(3): 395–399.

Mian LS, Mulla MS, 1982. Biological activity of IGRs against four stored-product coleopterans. *Journal of Economic Entomology*, 75(1): 80–85.

Park T, 1934. Observations on the general biology of the flour beetle, *Tribolium confusum*. *The Quarterly Review of Biology*, 9(1): 36–54.

Pruthi HS, Singh M, 1950. Pests of stored grain and their control. *Agricultural and Food Sciences & Indian Journal of Agricultural Sciences*, 18: 65–92.

Su TY, Yu JS, Zhang Y, Qian XH, Su H, 2023. Comparative bioactivity of S-methoprene and novel S-methobutene against mosquitoes (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 60(6): 1357–1363.

Tucker AM, Campbell JF, Arthur FH, Zhu KY, 2014. Horizontal transfer of methoprene by *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Tribolium confusum* Jacquelin du Val. *Journal of Stored Products Research*, 57: 73–79.

Wigglesworth VB, 1934. Memoirs: The physiology of ecdysis in *Rhodnius prolixus* (Hemiptera). II. factors controlling moulting and 'metamorphosis'. *Journal of Cell Science*, 2(306): 191–222.

Wijayaratne LKW, Arthur FH, Whyard S, 2018. Methoprene and control of stored-product insects. *Journal of Stored Products Research*, 76: 161–169.

Wijayaratne LKW, Fields PG, Arthur FH, 2012. Residual efficacy of methoprene for control of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae at different temperatures on varnished wood, concrete, and wheat. *Journal of Economic Entomology*, 105(2): 718–725.