

# 加硒饲料对赤拟谷盗生长发育、氧化应激及耐药性的影响

李嘉旭<sup>1</sup>, 程思宇<sup>1</sup>, 邓婷文<sup>1</sup>, 刘 钰<sup>1</sup>, 郭 璇<sup>1</sup>, 汤秋玲<sup>1,2</sup>, 毕 洁<sup>1,2</sup>, 贺艳萍<sup>1,2</sup>

(武汉轻工大学食品科学与工程学院<sup>1</sup>, 武汉 430023)

(武汉轻工大学, 大宗粮油精深加工教育部重点实验室<sup>2</sup>, 武汉 430023)

**摘要:** 本文探究饲料中硒对赤拟谷盗 (*Tribolium castaneum*) 生长发育、种群动态、氧化应激反应及多杀菌素耐受性的影响。结果表明, 硒处理显著延长了一龄幼虫的发育历期, 但缩短了五龄幼虫历期; 低硒饲养赤拟谷盗的内禀增长率 ( $r$ )、周限增长率 ( $\lambda$ ) 和净增殖率 ( $R_0$ ) 及成虫存活率均显著高于高硒组; 高硒处理导致赤拟谷盗成虫存活率和各年龄阶段期望寿命显著下降。氧化应激方面, 幼虫的超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性普遍高于成虫, 而过氧化物酶 (POD) 活性则相反。与对照组相比, 硒处理显著升高幼虫 SOD 活性但降低成虫 SOD 活性。幼虫 CAT 活性在硒处理下整体升高 (低硒组仍低于对照组); 而成虫 CAT 活性在所有硒处理中均受到抑制。谷胱甘肽 S-转移酶 (GST) 活性在幼虫和成虫中均被硒显著诱导, 表明硒对昆虫抗氧化酶活性具有显著影响, 且受到虫态差异性和剂量效应的影响。同时硒处理导致幼虫中脂质过氧化产物丙二醛 (MDA) 含量显著上升, 而成虫中, 低硒组 MDA 含量则显著降低, 高硒组与对照组无差异。与对照组相比低硒组成虫对多杀菌素耐受性最强, 高硒组次之。硒可能通过调节赤拟谷盗的氧化还原稳态, 进而影响其生长发育、种群增长及杀虫剂耐受性, 并且这种影响因浓度、虫态而异。

**关键词:** 硒; 赤拟谷盗; 发育历期; 氧化应激; 耐药性

DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001276

中图分类号: TS210 文献标识码: A 文章编号: 1003-0174(2026)01-0179-08

网络首发时间: 2025-11-25 09:52:48

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251124.1700.002>

## Effects of selenium-enriched diets with different selenium concentrations on the growth, development, oxidative stress, and insecticide tolerance of *Tribolium castaneum*

Li Jiayu<sup>1</sup>, Cheng Siyu<sup>1</sup>, Deng Tingwen<sup>1</sup>, Liu Yu<sup>1</sup>, Guo Xuan<sup>1</sup>, Tang Qiuling<sup>1,2</sup>, Bi Jie<sup>1,2</sup>, He Yanping<sup>1,2</sup>

(School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University<sup>1</sup>, Wuhan 430023)

(Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil,

Ministry of Education, Wuhan Polytechnic University<sup>2</sup>, Wuhan 430023)

**Abstract:** In this study, the effects of selenium in diets on the growth and development, population dynamics, oxidative stress response, and spinosad tolerance of *Tribolium castaneum* were investigated. The results showed that the development duration of the first-instar larvae was significantly prolonged, while that of the fifth-instar larvae was significantly shortened by selenium treatment. The intrinsic rate of increase ( $r$ ), finite rate of increase ( $\lambda$ ), net reproductive rate ( $R_0$ ) and adult survival rate of *T. castaneum* reared on low-selenium diets were significantly higher than those reared on high-selenium diets. High-selenium treatment resulted in a significant decrease in the adult survival rate and age-specific life expectancy of *T. castaneum* adults at all developmental ages. In terms of oxidative stress, the activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in larvae were generally higher than those

收稿日期: 2025-08-31

第一作者: 李嘉旭, 男, 2001 年出生, 硕士, 储粮害虫及其防治, l208982537@163.com

通信作者: 贺艳萍, 女, 1976 年出生, 副教授, 储粮害虫及其防治, heyp@whpu.edu.cn

in adults, whereas the activity of peroxidase (POD) showed the opposite trend. Compared with the control group, the SOD activity of larvae was significantly increased, while that in adults was significantly decreased by selenium treatment. The CAT activity in larvae was generally increased under selenium treatment (although it remained lower than that in the control group), whereas the CAT activity in adults was significantly inhibited in all selenium-treated groups. The activity of glutathione S-transferase (GST) was significantly induced by selenium in both larvae and adults, indicating that selenium exerted a significant effect on the activities of antioxidant enzymes in insects, which was affected by the developmental stage differences and dose-dependent effects. At the same time, the content of malondialdehyde (MDA), a lipid peroxidation product, in larvae was significantly increased by selenium treatment. In adults, however, the MDA content in the low-selenium group was significantly reduced, while no significant difference was observed between the high-selenium group and the control group. In addition, compared with the control group, the adults in the low-selenium group exhibited the strongest tolerance to spinosad, followed by those in the high-selenium group. In summary, selenium may affect the growth and development, population growth, and insecticide tolerance of *T. castaneum* by regulating its redox homeostasis, and such effects varied with the selenium concentration and insect developmental stage.

**Key words:** selenium; *Tribolium castaneum*; developmental duration; oxidative stress; insecticide tolerance

硒是生物体必需的微量元素,参与抗氧化防御和免疫调节过程<sup>[1]</sup>,对昆虫生理功能具有毒物兴奋效应(hormesis),呈现低浓度刺激,高浓度抑制或胁迫的效应<sup>[2,3]</sup>。研究表明,低浓度硒可激活超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶的活性,可能增强昆虫的抗逆性<sup>[4]</sup>;而高浓度硒则诱发严重的氧化应激,导致昆虫生长发育受阻甚至死亡。例如,饲料中添加亚硒酸钠显著降低了黄粉虫的存活率<sup>[5]</sup>;氟唑硒脲处理则延长了小菜蛾的幼虫期并降低其化蛹率和羽化率<sup>[6]</sup>。这些效应与硒参与调控谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)等关键的抗氧化防御通路密切相关<sup>[7]</sup>。

由硒所调节的抗氧化防御系统与昆虫对杀虫剂的耐受性之间存在密切联系。昆虫的解毒酶系统,如谷胱甘肽S-转移酶(GSTs),在代谢杀虫剂和应对氧化应激中均起着重要作用。有研究发现,一定浓度的亚硒酸钠可诱导蜜蜂抗氧化活性升高<sup>[8]</sup>,对多杀菌素产生抗性的蓟马品系,其体内GSTs的活性显著高于敏感品系<sup>[9]</sup>。由此可见,任何能够调节昆虫体内抗氧化和解毒酶活性的环境因素(如硒),都可能影响害虫对杀虫剂的敏感性。

随着富硒农产品的推广,富硒谷物进入仓储环节的数量可能增加。然而,目前尚不清楚储粮中硒的存在会如何影响仓储害虫的种群动态及其对常用防护剂的反应。赤拟谷盗(*Tribolium castaneum* Herbst)是一种全球广泛分布的粉食性仓储害虫,具有繁殖力强、世代重叠严重、抗药性发展迅速等特点,对粮食储藏安全构成严重威胁<sup>[10]</sup>。赤拟谷盗对

多种杀虫剂已产生抗药性,使得传统化学防治效力不断下降<sup>[11]</sup>。多杀菌素作为一种高效的生物源储粮防护剂,其长期有效性正面临抗性发展的挑战。本研究探究加硒饲料对赤拟谷盗生理生态的“剂量-效应”影响,研究结果为富硒粮食的储藏风险及优化其害虫防控策略提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试昆虫及饲养

赤拟谷盗为实验室长期饲养的未接触任何药剂的相对敏感品系。选取一对健康雌雄蛹,饲喂含质量分数5%酵母的全麦粉基础饲料,置于温度29~31℃、相对湿度65%~75%、全黑暗的恒温恒湿培养箱中培养,其产生的子代作为本实验的虫源。于蛹期进行分组饲养,实验饲料设置:对照组为基础饲料(含质量分数5%酵母的全麦粉);低硒组为在基础饲料中添加质量分数为0.005%硒元素(以纯度95%的L-硒代蛋氨酸形式添加);高硒组为在基础饲料中添加质量分数0.020%硒元素(添加形式同低硒组)。所有实验组均在相同环境条件下(温度29~31℃、相对湿度65%~75%)进行恒温恒湿黑暗培养。

本研究基于昆虫毒理学和生理生态学研究的需求,旨在揭示硒对赤拟谷盗的剂量依赖性生物学效应及其氧化应激机制,通过设置高于GH/T 1135—2024《富硒农产品》中粮食及其副产品中硒的含量(1.5~5.0 mg/kg),用于观察硒在亚致死和毒性剂

量下对赤拟谷盗生长发育、种群参数、抗氧化酶系统及杀虫剂耐受性的影响,通过预实验确定在全麦粉中添加硒的质量分数为0.005%和0.020%。

### 1.2 不同硒浓度饲料饲养的赤拟谷盗生命表构建

由于赤拟谷盗的生长周期比较长,为缩短实验周期,将同组饲料饲养的赤拟谷盗的成虫前期生长发育和成虫期繁殖的实验,同时进行观察和数据收集。

分别在对照、低硒与高硒3组饲料中各接入200头2周龄赤拟谷盗成虫,持续饲养24 h后,从每组收集50粒卵。采用12孔酶标板进行单粒隔离培养,每孔放置1粒卵并添加0.1 g相应组别的饲料,所有培养板均置于前述条件下的培养箱中进行饲养。从卵期开始,持续观察并记录每个个体的生长发育进程,并在蛹期进行性别鉴定,待赤拟谷盗个体羽化为成虫,将其雌雄配对,并记录成虫寿命及其每日产卵量,每日观察完成后将配对成虫转移至新的装有对应饲料的离心管中,记录并构建生命表数据。

### 1.3 不同硒浓度饲料对赤拟谷盗氧化应激指标的影响

通过试剂盒的方法分别对赤拟谷盗高龄(5~6龄)幼虫和成虫中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT),谷胱甘肽S转移酶(GSTs)等抗氧化酶和脂质过氧化产物丙二醛(MDA)进行了测定。每组设3个重复,每个样品取0.1 g试虫(幼虫约50头,成虫约80头)制备酶液。采用试剂盒测定总SOD、POD、CAT活性、MDA含量(WST-8法)及GST活性,所有操作均严格依照试剂盒说明书进行。酶液蛋白浓度通过Bradford法进行定量。

### 1.4 赤拟谷盗成虫对多杀菌素的敏感性测定

采用闪烁瓶玻璃药膜法进行生物测定,以评估不同饲料饲养组(对照、低硒和高硒)的赤拟谷盗成虫对多杀菌素的敏感性。用丙酮溶解多杀菌素原药(质量分数为94.2%)配制为合适质量浓度的多杀菌素药液,将其按照梯度向闪烁瓶中各加入1 mL,不断滚动闪烁瓶至药液全部挥发后通风处过夜,次日接入2周龄赤拟谷盗各30头,进行3个重复,待72 h后记录其死亡情况。使用Poloplus 2.0软件对生物测定数据进行统计分析,计算多杀菌素对各组试虫的致死中浓度(LC<sub>50</sub>)、95%置信限区间、斜率、卡方值等。

### 1.5 数据分析

基于不同处理组(对照、低硒和高硒)中赤拟谷盗的生长发育历期、存活及雌成虫每日产卵量等原始数据,采用两性生命表理论和TWOSEX-MSChart软件进行年龄-阶段两性生命表分析<sup>[12,13]</sup>。首先,通过TWOSEX-MSChart软件中随机配对建构生命表(Bootstrap match)功能,将前期分别获得的成虫前期和成虫期的2个生命表数据进行随机配对构建生成完整的个体生命表,在此基础上再进行生命表参数的分析和计算<sup>[14]</sup>。具体计算参数:年龄特异性存活率( $l_x$ ),年龄-龄期存活率( $s_{xj}$ ),年龄-龄期特异性繁殖值( $v_{xj}$ ),年龄-阶段期望寿命( $e_{xj}$ )和年龄-阶段分布(SASD)等生命表参数和内禀增长率( $r$ )、周限增长率( $\lambda$ )、净增殖率( $R_0$ )和平均世代周期( $T$ )等种群参数。所有参数估计的方差和标准误均通过100 000次Bootstrap随机抽样获得,不同处理间参数的差异采用配对Bootstrap检验进行统计比较<sup>[14]</sup>。

抗氧化酶活性和MDA数据的平均值和标准误采用单因素方差分析和Tukey氏多重比较进行差异显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同硒浓度饲料对赤拟谷盗生长发育、繁殖力和种群参数的影响

不同浓度硒对赤拟谷盗的生长发育具有显著影响(表1)。低硒组卵期显著长于高硒组( $P < 0.05$ ),而其1龄和2龄幼虫期则显著短于高硒组( $P < 0.05$ );

表1 取食不同硒含量小麦粉饲料的赤拟谷盗生长发育及繁殖力参数

发育参数	对照组	低硒组	高硒组
卵期/d	3.0 ± 0.2ab	3.2 ± 0.1a	2.9 ± 0.1b
1龄幼虫期/d	5.0 ± 0.2c	5.9 ± 0.1b	7.2 ± 0.4a
2龄幼虫期/d	2.4 ± 0.1ab	2.1 ± 0.2b	2.8 ± 0.3a
3龄幼虫期/d	2.7 ± 0.2a	3.0 ± 0.2a	2.7 ± 0.2a
4龄幼虫期/d	2.5 ± 0.2a	2.1 ± 0.1b	2.4 ± 0.3ab
5龄幼虫期/d	3.6 ± 0.3a	2.9 ± 0.2b	2.7 ± 0.2b
6龄幼虫期/d	11.7 ± 0.6a	12.4 ± 0.6a	12.2 ± 0.6a
蛹期/d	5.8 ± 0.1a	5.9 ± 0.1a	5.7 ± 0.1a
成虫期/d	35.1 ± 2.9a	33.3 ± 2.1a	34.0 ± 2.0a
雌虫寿命/d	72.9 ± 5.0a	73.4 ± 2.5a	75.0 ± 2.8a
雄虫寿命/d	70.7 ± 3.7a	65.8 ± 4.4a	65.8 ± 3.4a
平均寿命/d	71.7 ± 3.0a	71.0 ± 2.2a	72.0 ± 2.3a
前生殖期(APOP)/d	1.3 ± 0.2a	1.2 ± 0.1a	1.3 ± 0.2a
总生殖前期(TPOP)/d	39.9 ± 1.1a	40.1 ± 0.6a	40.6 ± 0.8a
单雌繁殖力/头	325.2 ± 66.5a	300.3 ± 34.1a	228.7 ± 36.3a

注:表中数据为平均数 ± 标准误。同行不同小写字母表示经配对Bootstrap检验方法检验,差异显著( $P < 0.05$ )。余同。

在4龄幼虫阶段,低硒组的发育时间显著短于对照组( $P < 0.05$ );至5龄幼虫期,高硒组与低硒组的发育时间均显著短于对照组( $P < 0.05$ )。然而,6龄幼虫、蛹和成虫的发育历期、雌雄虫寿命、平均寿命、前生殖期、总生殖前期及繁殖力等,各处理组间均无显著差异( $P > 0.05$ )。

通过对取食不同硒浓度饲料的赤拟谷盗种群参数进行比较分析,由表2可见,与对照组相比,低硒组与高硒组的 $r$ 、 $\lambda$ 、 $R_0$ 和 $T$ 均无显著差异( $P > 0.05$ )。低硒饲料对种群增长具有一定的促进作用,而高硒饲料则表现出一定的抑制作用,但均未达到统计学显著性水平。然而,低硒组的 $r$ 、 $\lambda$ 和 $R_0$ 均显著高于高硒组( $P < 0.05$ )。

食物中添加硒主要显著影响了赤拟谷盗的早期发育阶段(卵期及低龄幼虫期),表现为改变其发育速率,但这种效应并未持续到后期虫态(如蛹期和成虫期),也未对其最终繁殖力及种群参数产生显著影响。这表明在本实验设定的浓度下,硒对赤拟谷盗的生长发育抑制效应具有一定的阶段特异性。

表2 取食不同硒含量小麦粉饲料的赤拟谷盗的种群参数

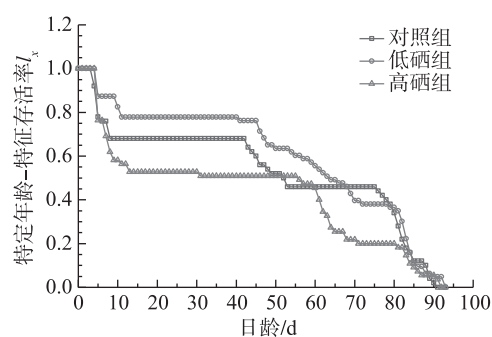
种群参数	组别		
	对照组	低硒组	高硒组
内禀增长率( $r$ )/ $d^{-1}$	0.082 ± 0.007ab	0.096 ± 0.003a	0.080 ± 0.005b
周限增长率( $\lambda$ )/ $d^{-1}$	1.086 ± 0.072ab	1.100 ± 0.036a	1.084 ± 0.051b
净增长率( $R_0$ )	97.58 ± 28.68ab	162.05 ± 26.40a	79.00 ± 19.16b
平均世代时间( $T$ )/ $d$	55.8 ± 1.6a	53.2 ± 0.8a	54.5 ± 1.3a

## 2.2 不同硒浓度饲料对赤拟谷盗种群存活率、繁殖力、期望寿命和繁殖值的影响

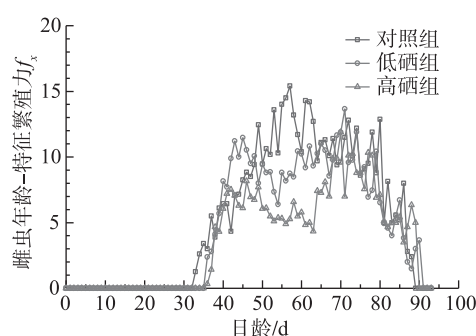
由赤拟谷盗的年龄特异性存活率曲线( $l_x$ ) (图1a)可知,低硒组存活率最高,其次为对照组,而高硒组最低;由雌虫年龄-特征繁殖力曲线( $f_x$ ) (图1b)可知,硒的添加会导致种群繁殖力下降且繁殖高峰后移;由种群年龄-阶段特征繁殖力曲线( $m_x$ ) (图1c)得出,低硒组繁殖力略高于其他2组;由种群年龄-阶段特征繁殖值曲线( $l_x m_x$ ) (图1d)可知,低硒组繁殖值明显高于对照组和高硒组。

赤拟谷盗年龄-龄期存活率 $s_{xj}$ 曲线(图2)可见,由3个种群各发育阶段存在重叠现象表明不同浓度硒处理显著影响赤拟谷盗的各龄期及雌雄成虫的存活率。对照组、低硒组和高硒组分别在第44、46、45日龄完全发育为成虫,其成虫前期存活率依次为68.00%、77.78%和50.91%。雌成虫最高存活率在对照组、低硒组和高硒组分别为26.00%、50.78%

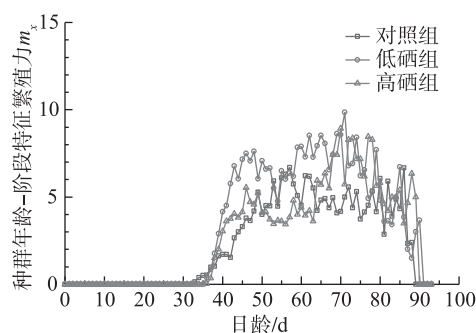
和34.55%;雄成虫最高存活率分别为38.00%、22.22%和16.36%。



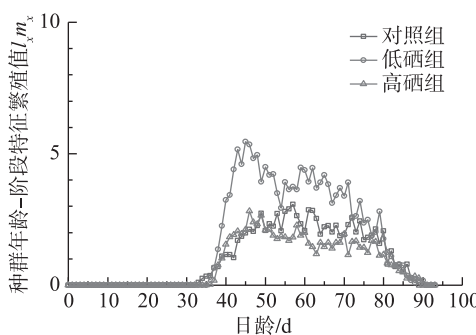
a 特定年龄-特征存活率 $l_x$



b 雌虫年龄-特征繁殖力 $f_x$



c 种群年龄-阶段特征繁殖力 $m_x$



d 种群年龄-阶段特征繁殖值 $l_x m_x$

图1 不同硒浓度饲料对赤拟谷盗种群存活率、繁殖力的影响

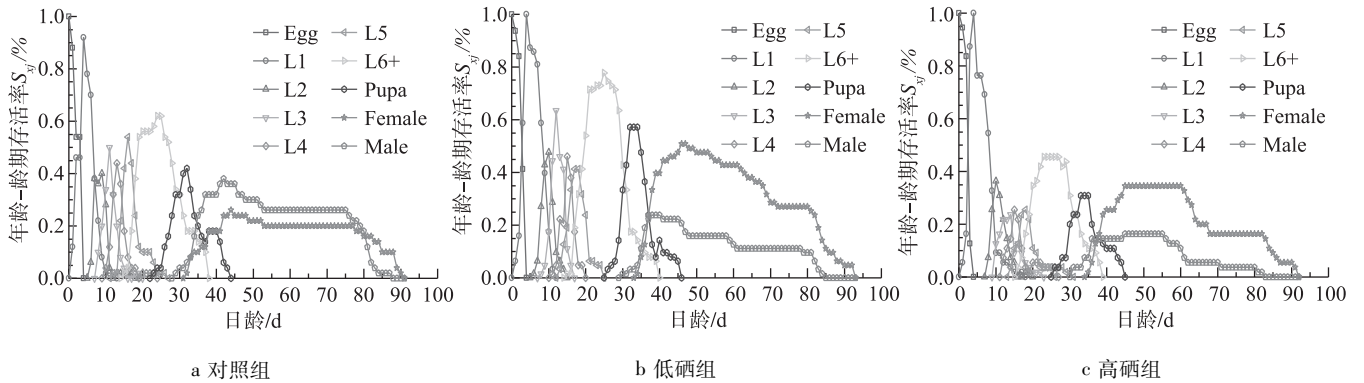


图2 不同浓度硒饲料赤拟谷盗年龄-龄期存活率  $S_{ij}$

根据图3年龄-龄期特异性繁殖值曲线( $v_{ij}$ )可知,对照组赤拟谷盗雌成虫繁殖值峰值(141.56头,第53日龄)显著高于低硒组(91.95头,第42日龄)和高硒组(86.14头,第68日龄)( $P < 0.05$ ),而低硒组与高硒组之间无显著差异。

对图4年龄阶段期望寿命曲线( $e_{ij}$ )进行分析,发现高硒处理导致赤拟谷盗各发育阶段的期望寿命普遍下降。在0日龄时,高硒组卵期期望寿命(40.51 d)显著低于对照组(50.52 d)和低硒组(56.89 d)。对照组的雄成虫期望寿命(41.74 d,第29日龄)明显高于低硒组(35.80 d,第30日龄)和高

硒组(34.78 d,第31日龄)。结果表明,硒添加显著缩短了赤拟谷盗的期望寿命,且硒浓度越高影响更大。

图5稳定的年龄-龄期分布 SASD 结果显示,硒处理显著改变了赤拟谷盗各虫态和龄期的时间分布。低硒组各幼虫龄期持续时间普遍较短,1龄至5龄幼虫的发育持续时长依次为11、9、9、9和12日;对照组相应龄期持续时间分别为12、12、12、14和15日;而高硒组则延长至17、12、13、15和17日。结果表明,不同浓度硒能够影响赤拟谷盗的种群发育进程,低硒缩短了幼虫发育时间,而高硒则会导致发育延迟。

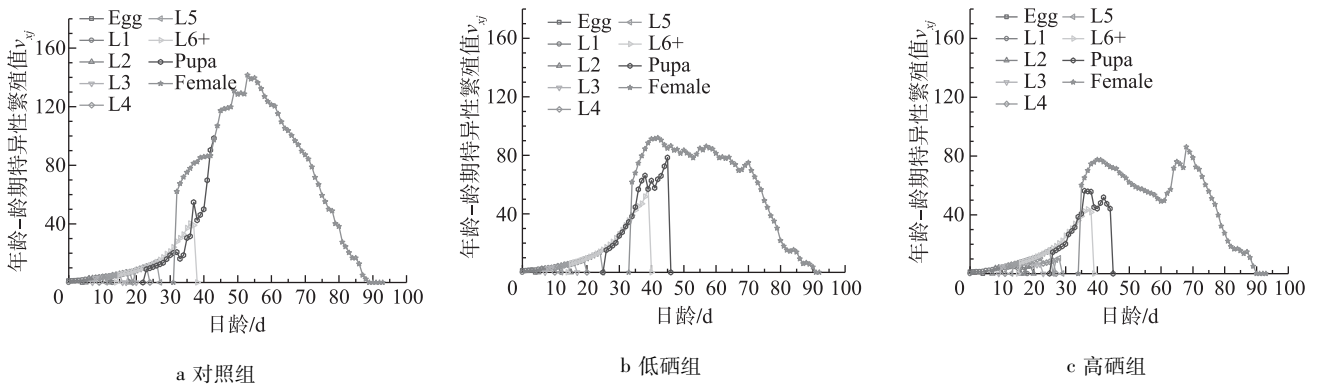


图3 不同浓度硒饲料赤拟谷盗年龄-龄期特异性繁殖值  $v_{ij}$

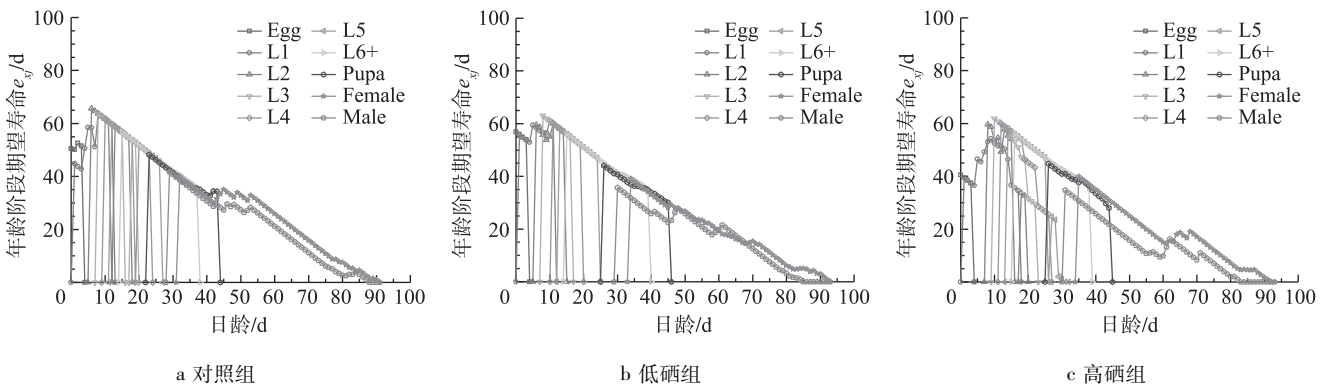


图4 不同硒浓度饲料赤拟谷盗年龄阶段期望寿命

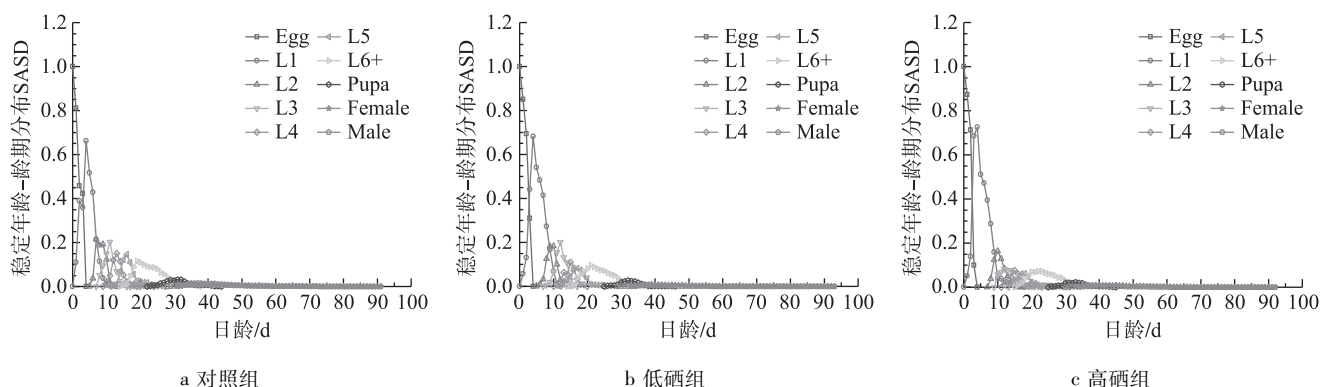


图5 不同硒浓度饲料赤拟谷盗稳定年龄-龄期分布 SASD

结果表明,饲料中添加硒通过改变赤拟谷盗的年龄-阶段结构,显著影响其种群动态。低硒处理展现出一定的“刺激效应”,表现为存活率与繁殖值的提升,并缩短了幼虫发育周期;而高硒处理则产生了明确的“抑制效应”,导致存活率降低、发育延迟及繁殖高峰后移。这表明硒对赤拟谷盗种群的影响具有典型的浓度双重性,低浓度可能刺激其种群增长,而高浓度则能有效抑制种群增长。

### 2.3 不同浓度硒对赤拟谷盗氧化应激反应的影响

不同硒浓度饲料饲养后赤拟谷盗体内酶活性和脂质过氧化物 MDA 测定结果如表 3 所示,幼虫的 SOD 和 CAT 活性普遍高于成虫,而 POD 活性则呈现相反趋势,成虫显著高于幼虫。与对照组相比,高硒组和低硒组幼虫的 SOD 活性显著升高,而成虫中则显著降低。在 POD 活性方面,高硒组幼虫显著低于对照组和低硒组,而在成虫中则显著高于后两者。幼虫 CAT 活性在高硒组中显著高于对照组和低硒组,低硒组则显著低于对照组;成虫中,高硒组与低硒组的 CAT 活性均显著低于对照组。此外,高硒组幼虫和成虫的 GST 活性均显著高于对照组和低硒组。结果表明,硒对昆虫抗氧化酶活性具有显著影响,且具有发育阶段差异性和剂量效应。

表3 不同浓度硒对赤拟谷盗幼虫及成虫体内氧化应激相关酶活性(U/mg prot)及 MDA 含量( $\mu\text{mol/L}$ )的影响

试虫状态	名称	组别		
		对照组	低硒组	高硒组
幼虫	SOD	2.52 ± 0.21bB	4.07 ± 0.26aB	3.82 ± 0.26aB
	POD	9.74 ± 0.23aB	9.74 ± 0.11aB	7.17 ± 0.03bB
	CAT	1.14 ± 0.23aB	0.97 ± 0.11bB	0.79 ± 0.03cB
	GST	1.79 ± 0.15abA	1.16 ± 0.22bA	2.67 ± 0.55aA
	MDA	17.94 ± 1.00bB	31.88 ± 2.67aA	28.55 ± 0.84aB
成虫	SOD	47.63 ± 2.62aA	23.81 ± 0.27bA	19.57 ± 2.84bA
	POD	18.38 ± 0.25bA	15.35 ± 0.62cA	20.90 ± 0.67aA
	CAT	2.62 ± 0.25bA	2.21 ± 0.62cA	3.10 ± 0.67aA
	GST	1.26 ± 0.02cA	1.66 ± 0.13bA	3.86 ± 0.05aA
	MDA	45.42 ± 0.29aA	35.99 ± 1.73bA	41.94 ± 3.85abA

注:表中数据为平均数±标准误,同行不同小写字母表示组间差异性显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示成虫幼虫差异性显著( $P < 0.05$ )。

幼虫中,高硒组和低硒组 MDA 含量显著高于对照组,而成虫中,高硒组与对照组无显著差异,而低硒组 MDA 含量甚至显著低于对照组,说明硒处理对氧化损伤的影响因发育阶段而具有差异性,表明赤拟谷盗通过动态调整其抗氧化防御策略以应对硒诱导的氧化压力。

### 2.4 不同硒浓度饲料饲养下赤拟谷盗成虫对多杀菌素的耐药性影响

不同硒浓度饲料饲养的赤拟谷盗成虫对多杀菌素的毒力测定结果如表 4 所示,低硒组赤拟谷盗成虫对多杀菌素耐受性最强,其致死中浓度( $LC_{50}$ )为 638.0 mg/L 显著高于对照组,而高硒组的耐受性次之略高于对照组,其但  $LC_{50}$  值置信限与对照组具有重叠,因此两者差异并不显著。

食物中的硒浓度是调节赤拟谷盗对多杀菌素耐受性的关键因素,但低浓度产生的耐受性强于高浓度硒,这可能是因为低剂量硒通过诱导解毒酶系等方式预先激活了害虫的防御机制,从而提高了害虫对杀虫剂的耐药性。

表4 不同硒浓度饲料饲养下赤拟谷盗成虫对多杀菌素的毒力测定结果

组别	$LC_{50}$ /mg/L	95% 置信 限/mg/L	斜率(均 值±标准误)	卡方值 ( $\chi^2$ )	自由度 (df)	P 值
对照组	368.6	288.2 ~ 467.8	1.272 ± 0.161	6.48	18	0.993 9
低硒组	638.0	480.6 ~ 915.5	1.051 ± 0.158	10.35	18	0.919 8
高硒组	472.6	365.7 ~ 623.9	1.163 ± 0.159	4.11	18	0.999 7

## 3 讨论

硒对脊椎动物和昆虫的毒理学效应均源于其双重性,但其效应窗口和表现形式存在显著差异<sup>[4,5,15]</sup>。硒是包括人在内的脊椎动物所必需的微量元素,但其效应窗口极为狭窄,对人类而言,低硒状态与死亡风险增加、免疫功能差、认知能力下降和甲状腺功能障碍有关。另一方面,过量摄入会通过诱导氧化应激、取代含硫氨基酸破坏蛋白质功能等

机制,导致急/慢性中毒,表现为神经、消化系统损伤及毛发脱落等<sup>[15,16]</sup>。硒在大多数昆虫中尚未证实必需性,主要表现为毒性效应。其毒性机制与脊椎动物类似,但效应具有高度的物种特异性和浓度依赖性,可导致死亡率上升、生长发育受抑制以及繁殖力下降等<sup>[4,5,17]</sup>。

本研究发现,食物中添加硒对赤拟谷盗幼虫发育历期产生了显著的阶段特异性影响,表现为低硒与高硒处理均延长了1龄幼虫期,但缩短了5龄幼虫期。这种发育节奏的改变与硒干扰几丁质代谢密切相关。研究显示适量硒可增强家蚕的几丁质合成,促进生长发育<sup>[17]</sup>,而亚硒酸钠则影响意大利蜜蜂蜂王的几丁质更新<sup>[18]</sup>。推测1龄幼虫期的延长可能是硒胁迫初期抑制几丁质合成所致,而5龄幼虫期的缩短则可能与后期几丁质分解代谢加速有关,这体现了昆虫应对环境胁迫的一种适应性发育策略。

氧化应激是硒发挥作用的关键生理途径,硒作为抗氧化酶(如GPx)的核心组分,显著影响了昆虫的抗氧化防御系统。本研究结果表明,食物中添加硒在赤拟谷盗体内引发了复杂的氧化应激反应。幼虫主要通过提升SOD和CAT活性来应对,但仍出现了显著的脂质过氧化(MDA含量升高)。而成虫则更依赖于提升POD和GST活性,这种发育阶段依赖性的抗氧化防御策略差异,反映了幼虫与成虫在代谢率和生理功能上的不同。GST是昆虫关键的Ⅱ相解毒酶,其活性增强与对多杀菌素等杀虫剂的耐受性密切相关<sup>[19,20]</sup>,低硒和高硒处理均显著诱导了GST活性的升高。

本研究中观察到的低硒组赤拟谷盗对多杀菌素耐受性显著增强的现象,可能是由硒预先激活了包括GST在内的解毒酶系统所导致。这种预先的激活状态当其接触到多杀菌素时,能够更快、更有效地进行解毒,从而显著提高了对多杀菌素的耐受性,这一机制在西花蓟马和甜菜夜蛾对多杀菌素类杀虫剂的抗性研究中已得到证实<sup>[21,22]</sup>。

## 4 结论

硒对赤拟谷盗的影响具有hormesis效应。低浓度硒通过诱导积极的激素效应,虽略微延长初期幼虫发育时间,但通过激活抗氧化和解毒系统,提高了成虫存活率和种群增长潜力,并增强了对化学杀虫剂的耐受性。高浓度硒则产生明显的毒性效应,抑制种群发展。本研究不仅揭示了硒在赤拟谷盗生理

生态中的复杂作用,更提出环境中低剂量的微量元素胁迫有可能作为一种“预适应”机制,增强农业害虫对杀虫剂的解毒能力,从而对害虫综合治理的有效性构成潜在威胁。未来研究应进一步阐明硒诱导的杀虫剂耐受性具体分子机制,并为评估硒元素在害虫抗药性演化中的作用和富硒粮食的储藏害虫防治提供参考。

## 参考文献

- [1] Rayman M P. Selenium and human health[J]. The Lancet, 2012, 379(9822):1256-1268
- [2] Mechora Š. Selenium as a protective agent against pests: a review[J]. Plants, 2019, 8(8):262
- [3] So J, Choe D H, Rust M K, et al. The impact of selenium on insects[J]. Journal of Economic Entomology, 2023, 116(4):1041-1062
- [4] Occai B K, Hassan W, Da Rocha J B T. Gender-based behavioral and biochemical effects of diphenyl diselenide in *Drosophila melanogaster* [J]. Chemico-Biological Interactions, 2018, 279:196-202
- [5] Hogan G R, Razniak H G. Selenium-induced mortality and tissue distribution studies in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. Environmental Entomology, 1991, 20(3):790-794
- [6] Guo X, Huang Z, Xiong L, et al. Azoleselenourea disrupted the midgut and caused malformed development of *Plutella xylostella* [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(4):1104-1116
- [7] Bartolini D, Giustarini D, Pietrella D, et al. Glutathione S-transferase P influences the Nrf2-dependent response of cellular thiols to selenium compounds[J]. Cell Biology and Toxicology, 2020, 36(4):379-386
- [8] Chi X, Wei W, Zhang W, et al. Sodium selenium enhances the antioxidative activities and immune functions of *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) and increases the selenium content in royal jelly[J]. Environmental Entomology, 2020, 49(1):169-177
- [9] Li D, Zhi J, Yue W, et al. Resistance to spinetoram affects host adaptability of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) based on detoxifying enzyme activities and an age-stage-two-sex life table[J]. Environmental Entomology, 2022, 51(4):780-789
- [10] Campbell J F, Athanassiou C G, Hagstrum D W, et al. *Tribolium castaneum*: a model insect for fundamental and applied research[J]. Annual Review of Entomology, 2022, 67:347-365
- [11] Athanassiou C G, Phillips T W, Wakil W. Biology and

- control of the khapra beetle, *Trogoderma granarium*, a major quarantine threat to global food security[J]. Annual Review of Entomology, 2019, 64:131 – 148
- [12] Huang H, Chi H, Smith C L. Linking demography and consumption of *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) fed on *Solanum photeinocarpum* (Solanales: Solanaceae): with a new method to project the uncertainty of population growth and consumption[J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(1):1 – 9
- [13] Chi H, Liu H. Two new methods for the study of insect population ecology[J]. Zoological Studies, 1985, 24(2): 225 – 240
- [14] Wei M, Chi H, Guo Y, et al. Demography of *Cacopsylla chinensis* (Hemiptera: Psyllidae) reared on four cultivars of *Pyrus bretschneideri* (Rosales: Rosaceae) and *P. communis* pears with estimations of confidence intervals of specific life table statistics[J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 113(5):2343 – 2353
- [15] Lü Q, Liang X, Nong K, et al. Advances in research on the toxicological effects of selenium[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 106(5): 715 – 726
- [16] Genchi G, Lauria G, Catalano A, et al. Biological activity of selenium and its impact on human health[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(3):2633
- [17] Jiang L, Peng L, Cao Y, et al. Effect of dietary selenium supplementation on growth and reproduction of silkworm *Bombyx mori* L[J]. Biological Trace Element Research, 2020, 193(1):271 – 281
- [18] 史文凯, 黎力之, 张海波, 等. 亚硒酸钠对意大利蜜蜂蜂王卵巢基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(9):5974 – 5982
- Shi W, Li L, Zhang H, et al. Effects of sodium selenite on gene expression in ovary of *Apis mellifera* queen[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(9):5974 – 5982
- [19] Enayati A A, Ranson H, Hemingway J. Insect glutathione transferases and insecticide resistance[J]. Insect Molecular Biology, 2005, 14(1):3 – 8
- [20] Łukaszewicz S, Borowiak – Sobkowiak B, Durak R, et al. Interaction between *Acyrtosiphon pisum* and selenium – treated *Pisum sativum*[J]. The European Zoological Journal, 2021, 88(1):58 – 76
- [21] 薛雨欣. 甜菜夜蛾对多杀菌素类杀虫剂靶标抗性机制的研究及其田间种群抗性分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022: 35 – 40
- Xue Y. Study on resistance mechanism of *Spodoptera exigua* to spinosad insecticides and analysis of field population resistance [D]. Xiangyang: Northwest A & F University, 2022: 35 – 40
- [22] 李丽荣. 花蓟马对多杀菌素类杀虫剂的敏感性及其作用机理解析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 33 – 35
- Li L. Sensitivity of *Frankliniella intonsa* (trybom) to spinosyn insecticides and their mechanism of action[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2024: 33 – 35.