

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2020.02.002

4 种昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用

梁铭荣¹⁺, 李子园¹⁺, 戴钊萱², 陆永跃¹, 陈科伟¹, 王磊^{1*}
¹华南农业大学农学院, 广东 广州 510642; ²湖南农业大学植物保护学院, 湖南 长沙 410128

摘要:【目的】探讨昆虫病原线虫对草地贪夜蛾幼虫的侵染效果。【方法】在室内条件下采用生测试验法,测定了小卷蛾斯氏线虫 A II、长尾斯氏线虫 X-7、夜蛾斯氏线虫 SN 和嗜菌异小杆线虫 H06 等 4 种昆虫病原线虫对草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的致死作用。【结果】小卷蛾斯氏线虫 A II 与草地贪夜蛾数量比为 50:1 时,36 h 后草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的死亡率分别为 92% 和 100%。长尾斯氏线虫 X-7 与草地贪夜蛾数量比为 50:1 时,36 h 后草地贪夜蛾 2 龄幼虫的死亡率为 80%;在数量比 30:1 时,36 h 后草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率为 100%。夜蛾斯氏线虫 SN 与草地贪夜蛾数量比为 400:1 时,36 h 后草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的死亡率分别为 88% 和 85%。嗜菌异小杆线虫 H06 与草地贪夜蛾在 400:1 时,36 h 后草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的死亡率分别为 32% 和 67.5%。【结论】小卷蛾斯氏线虫 A II 具有较好的草地贪夜蛾生物防治潜质,其次是长尾斯氏线虫 X-7。

关键词: 昆虫病原线虫; 草地贪夜蛾; 致死作用; 生物防治



Virulence of four entomopathogenic nematodes on fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)

LIANG Mingrong¹⁺, LI Ziyuan¹⁺, DAI Qianxuan², LU Yongyue¹, CHEN Kewei¹, WANG Lei^{1*}
¹College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
²College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China

Abstract: 【Aim】 This study aimed to examine the infection effect of entomopathogenic nematode on the 2nd and 5th instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith). 【Method】 We used a bioassay to test the virulence of four entomopathogenic nematodes: *Steinernema carpocapsae* A II, *S. longicaudum* X-7, *S. feltiae* SN and *Heterorhabditis bacteriophora* H06, under laboratory conditions. 【Result】 After exposing one *S. frugiperda* larva to 50 *S. carpocapsae* A II for 36 hours, the mortality rates were 92% for 2nd and 100% for 5th instar *S. frugiperda* larvae. When exposed to 50 *S. longicaudum* X-7, the mortality of 2nd instar *S. frugiperda* larvae was 80% and 100% for 5th instar *S. frugiperda* larvae in the presence of only 30 *S. longicaudum* X-7. After exposing one *S. frugiperda* larva face to 400 *S. feltiae* SN for 36 hours, the mortality rates of 2nd and 5th instar *S. frugiperda* larvae were 88% and 85% and 32% and 67.5% in the presence of 400 *H. bacteriophora* H06. 【Conclusion】 The results showed that *S. carpocapsae* A II and *S. longicaudum* X-7 had great potential on biological control of 2nd and 5th instar *S. frugiperda* larvae.

Key words: entomopathogenic nematode; *Spodoptera frugiperda*; lethal effect; biological control.

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 发现其为害(杨学礼等,2019)。该虫为多食性害虫,属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 又称秋粘虫,可取食玉米 *Zea mays* L.、高粱 *Sorghum bicolor* (L.) Moench、水稻 *Oryza sativa* L.、甘蔗 *Saccharum officinarum*、甜菜 *Beta vulgaris* L.、番茄 *Solanum lyco-* (fall armyworm),是原产于美洲的重大迁飞性害虫 (Early *et al.*, 2018),2019 年 1 月首次在我国云南

收稿日期(Received): 2019-10-26 接受日期(Accepted): 2020-03-12
基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B020223004); 广东省外来入侵物种风险评估和监测预警共性关键技术研发创新团队建设项目(2019KJ134); 省级农业科技创新及推广项目(2018LM2161)
作者简介: *为并列第一作者。梁铭荣,男,硕士研究生。研究方向: 昆虫生态学和害虫防治。E-mail: 1511857642@qq.com。李子园,女,硕士研究生。研究方向: 害虫生物防治。E-mail: 791046629@qq.com
* 通信作者(Author for correspondence), E-mail: wanglei1107@outlook.com

persicum、马铃薯 *Solanum tuberosum* L. 以及棉花 *Gossypium* spp. 等 80 多种作物。根据取食偏好性可将草地贪夜蛾分为“玉米型”和“水稻型”, 目前我国仅发现“玉米型”的危害(张磊等, 2019)。草地贪夜蛾可造成玉米和水稻等作物严重减产等危害, 如巴西玉米产量损失达 19% ~ 100% (Dal et al., 2012)。截至 2019 年 7 月初, 草地贪夜蛾已经扩散至 22 个省区的 1128 个县, 发生危害面积超过 55 万 hm^2 (王磊等, 2019), 草地贪夜蛾的入侵对我国的农业及粮食生产安全造成了严重威胁。

草地贪夜蛾的防治主要依赖化学农药, 包括甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、茚虫威、四氯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、高效氯氟氰菊酯、氟氯氰菊酯、甲氰菊酯、溴氰菊酯、乙酰甲胺磷、虱螨脲、虫螨腈、辛硫磷、灭幼脲等(金涛等, 2019; 王勇庆等, 2019; 赵胜园等, 2019)。不合理的药剂使用, 不仅会大量杀伤天敌, 降低农作物食用安全性, 还可能促使草地贪夜蛾产生抗药性(Boaventura et al., 2020; Yu & McCord, 2007; Yu et al., 2003)。研究发现, 墨西哥和波多黎各的草地贪夜蛾种群对毒死蜱、氯菊酯、氟虫双酰胺、氯虫苯甲酰胺、灭多虫、灭多威、氯氟菊酯、溴氰菊酯、多杀菌素、乙基多杀菌素等化学农药都产生了不同倍数的抗药性(Gutierrez-moreno et al., 2019)。

为减少化学农药的使用以及降低或延缓草地贪夜蛾的抗药性, 科研工作者开展了利用生物源农药、寄生性天敌、病原微生物等生物防治手段对草地贪夜蛾防控效果的研究(Dasilva et al., 2009; Grijalba et al., 2018; Gutierrez-ramirez et al., 2015; Molina-ochoa et al., 2003; Prasanna et al., 2018; Rios-velasco et al., 2011; Rivero-borja et al., 2018; Shylesha et al., 2018)。我国在草地贪夜蛾生物防治方面也开展了一系列的探索。陈利民等(2019)研究发现灭幼脲、虱螨脲、短稳杆菌 *Empedobacter brevis* 和苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 对草地贪夜蛾具有较好防效; 李志刚等(2019)发现夜蛾黑卵蜂 *Telenomus* spp. 与螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* Ishi 寄生草地贪夜蛾; 白僵菌 *Beauveria* sp. 对草地贪夜蛾的效果测定也有相关的研究报道(程东美等, 2019)。

昆虫病原线虫(entomopathogenic nematode, EPN) 是昆虫的专化性寄生天敌, 包括斯氏线虫科 Steioertidae 和异小杆线虫科 Heterorhabditidae(吴文

丹等, 2014; Kaya & Gaugler, 1993; San-blas, 2013)。国外科研人员在使用昆虫病原线虫防控草地贪夜蛾上做了大量的工作(Cossentine et al., 2010; Georgis et al., 2005; Vega et al., 2000)。斯氏线虫 *Steinernema riobravo* 对草地贪夜蛾预蛹和蛹的致死率高达 46.1% (Raulston et al., 1992)。本研究在实验室条件下测试了 4 种已经商业化生产的昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用, 以期明确昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的控制效果, 筛选出高效的昆虫病原线虫品系, 为田间应用昆虫病原线虫防治草地贪夜蛾提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫与昆虫病原线虫

草地贪夜蛾卵块采自广州市花都区玉米田, 待其孵化后在饲养箱内饲养, 使用草地贪夜蛾人工饲料 II 进行饲养(李子园等, 2019)。

供试病原线虫为小卷蛾斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* A II 品系、长尾斯氏线虫 *Steinernema longicaudum* X-7 品系、夜蛾斯氏线虫 *Steinernema feltiae* SN 品系和嗜菌异小杆线虫 *Heterorhabditis bacteriophora* H06 品系, 购自山东潍坊宏润农业科技有限公司。

1.2 4种病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用测定

在直径 90 mm 培养皿中放置一张直径 90 mm 的滤纸, 在培养皿中放入 10 头同一天孵化且大小相似的草地贪夜蛾 2 龄幼虫, 然后加入 1 mL 对应剂量的线虫纯水悬浮液, 使得小卷蛾斯氏病原线虫 A II 和长尾斯氏病原线虫 X-7 与草地贪夜蛾 2 龄幼虫数量比均为 2 : 1、5 : 1、10 : 1、20 : 1 和 50 : 1, 夜蛾斯氏线虫病原线虫 SN 与草地贪夜蛾 2 龄幼虫数量比为 50 : 1、100 : 1、150 : 1、200 : 1 和 400 : 1, 嗜菌异小杆线虫病原线虫 H06 与草地贪夜蛾 2 龄幼虫数量比为 25 : 1、50 : 1、100 : 1、200 : 1 和 400 : 1。使用纯水作为对照。培养皿内放置足够多的草地贪夜蛾人工饲料, 然后将培养皿放置于培养箱内, 饲养温度 $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$, 饲养湿度 $70\% \pm 10\%$, 每隔 12 h 观察记录处理后草地贪夜蛾的死亡情况, 由于线虫在自然环境中存活时间较短, 整个试验总计观察 36 h。以毛刷轻触幼虫体表, 无反应的判定为死亡。每个处理重复 5 次。

4 种线虫对草地贪夜蛾 5 龄幼虫致死作用的测定方法与 2 龄幼虫的相同, 长尾斯氏线虫 X-7 与草

地贪夜蛾 5 龄幼虫的数量比为 10 : 1、20 : 1、30 : 1、40 : 1、50 : 1,夜蛾斯氏线虫 SN 与草地贪夜蛾 5 龄幼虫的数量比为 50 : 1、100 : 1、200 : 1、300 : 1 和 400 : 1,小卷蛾斯氏线虫 A II 和嗜菌异小杆线虫 H06 与草地贪夜蛾 5 龄幼虫的数量比也与 2 龄幼虫的数量比相同。每个处理重复 4 次。

1.3 数据分析

使用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov test 对数据进行正态分布检验。符合正态分布的使用 Levene's test 进行方差齐性检验。对于方差齐性的,使用单因素方差分析,并使用 LSD test 进行多重比较。对于不符合正态分布和方差不齐的,先使用 Kruskal-Wallis test 进行检验,如果总体 P 值小于 0.05,使用 Mann-Whitney test 进行两两比较。所有数据分析程序运行于 SPSS 20.0。

2 结果与分析

2.1 不同剂量病原线虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用

研究表明,参试线虫的剂量越大,草地贪夜蛾 2 龄幼虫的死亡率也越高,且随着侵染时间的延长,其死亡率提高。除嗜菌异小杆线虫 H06 外,其他参试线虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫均有较高的致死率,其中,小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率最高,对照组草地贪夜蛾 2 龄幼虫的死亡率均为 0(表 1-4)。

2.1.1 不同剂量小卷蛾斯氏线虫 A II 品系对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用 由表 1 可知,当小卷蛾斯氏线虫 A II 品系与草地贪夜蛾数量比为 50 : 1、20 : 1、10 : 1、5 : 1 和 2 : 1,处理 12 h 时,草地贪夜蛾 2 龄幼虫的死亡率分别为 10%、8%、4%、2%和 0,无显著差异($\chi^2 = 4.729$, $df = 4$, $P = 0.316$);而在处理 24 h 时,其死亡率分别为 88%、84%、42%、42%和 2%;在处理 36 h 时,其死亡率分别为 92%、90%、66%、48%和 4%。在数量比为 50 : 1 和 20 : 1,处理 24 和 36 h 时,小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率无显著差异(24 h: $U = 9.500$, $P = 0.439$; 36 h: $U = 11.000$, $P = 0.734$),说明这 2 个剂量对草地贪夜蛾的防治均有较好效果。

2.1.2 不同剂量长尾斯氏线虫 X-7 品系对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用 长尾斯氏线虫 X-7 品系与草地贪夜蛾数量比为 50 : 1,处理 24、36 h 和数量比为 20 : 1,处理 36 h 时,草地贪夜蛾 2 龄幼

虫死亡率为 62%、80% 和 62%,其控害效果无显著差异($U = 6.500$, $P = 0.202$),但与其他处理对草地贪夜蛾的致死作用有显著差异($\chi^2 = 25.190$, $df = 5$, $P < 0.001$)(表 2)。说明该线虫在数量比为 50 : 1 下处理 24 h 及在数量比为 20 : 1 下处理 36 h 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率较高。

表 1 不同剂量小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用
Table 1 Lethal effect of different dosages of *Steinernema carpocapsae* A II against *S. frugiperda* 2nd instar larvae

数量比 Ratio	草地贪夜蛾 2 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
50 : 1	10.00±7.75Aa	88.00±2.00Ab	92.00±2.00Ab
20 : 1	8.00±3.74Aa	84.00±4.00Ab	90.00±4.47Ab
10 : 1	4.00±2.45Aa	42.00±5.83Bb	66.00±6.00Bc
5 : 1	2.00±2.00Aa	42.00±5.83BCb	48.00±3.74Cb
2 : 1	0.00±0.00Aa	2.00±2.00Da	4.00±2.45Da
0 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00DEa	0.00±0.00DEa

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P > 0.05$).

表 2 不同剂量处理下长尾斯氏线虫 X-7 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用
Table 2 Lethal effect of different dosages of *Steinernema longicaudum* X-7 against *S. frugiperda* 2nd instar larvae

数量比 Ratio	草地贪夜蛾 2 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
50 : 1	32.00±3.74Aa	62.00±4.90Ab	80.00±6.32Ab
20 : 1	12.00±4.90Ba	36.00±6.78Bb	62.00±10.12Ab
10 : 1	2.00±2.00BCa	4.00±4.00Ca	10.00±3.16Ba
5 : 1	0.00±0.00CDa	4.00±2.45CDab	6.00±2.45BCb
2 : 1	0.00±0.00CEa	0.00±0.00CEa	0.00±0.00Da
0 : 1	0.00±0.00CFa	0.00±0.00CFa	0.00±0.00DEa

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P > 0.05$).

2.1.3 不同剂量夜蛾斯氏线虫 SN 品系对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用 由表 3 可知,当数量比为 50 : 1 时,夜蛾斯氏线虫 SN 品系对草地贪夜蛾的致死率远低于小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7。当其数量比为 400 : 1、200 : 1、150 : 1、100 : 1 时,处理 24 h 的草地贪夜蛾死亡率无显著差异($\chi^2 = 5.104$, $df = 3$, $P = 0.164$),处理 36 h 也无显著差异($\chi^2 = 0.966$, $df = 3$, $P = 0.809$)。该线虫在数量

比为 100 : 1 时,对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率才达到 82%,而小卷蛾斯氏线虫 A II 与草地贪夜蛾数量比为 20 : 1 时致死率可达 90%。

表 3 不同剂量夜蛾斯氏线虫 SN
对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用

Table 3 Lethal effect of different dosages of <i>Steinernema feltiae</i> SN against <i>S. frugiperda</i> 2 nd instar larvae			
数量比 Ratio	草地贪夜蛾 2 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
400 : 1	70.00±3.16Aa	74.00±4.00Aab	88.00±5.83Ab
200 : 1	20.00±3.16Ba	54.00±7.48Ab	80.00±7.07ABc
150 : 1	16.00±4.0BCa	60.00±8.37Ab	78.00±8.60ABb
100 : 1	26.00±6.78BDa	66.00±4.00Ab	82.00±9.70ABb
50 : 1	8.00±2.00Ea	28.00±3.74Ba	56.00±11.66Bb
0 : 1	0.00±0.00Fa	0.00±0.00Ca	0.00±0.00Ca

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

2.1.4 不同剂量嗜菌异小杆线虫 H06 品系对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用 嗜菌异小杆线虫 H06 品系各处理对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率均较低(表 4)。当数量比为最高(400 : 1)时,处理 12 和 24 h 对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死率均为 0,处理 36 h 时,致死率才达到该线虫在试验中的最高值(32%)。

表 4 不同剂量嗜菌异小杆线虫 H06
对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的致死作用

Table 4 Lethal effect of different dosages of <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> H06 against <i>S. frugiperda</i> 2 nd instar larvae			
数量比 Ratio	草地贪夜蛾 2 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
400 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Aa	32.00±7.35Ab
200 : 1	0.00±0.00Aa	2.00±2.00Aa	16.00±10.30ABCDa
100 : 1	0.00±0.00Aa	2.00±2.00Aab	14.00±5.10ABb
50 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Aa	6.00±4.00BCDa
25 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Aa	0.00±0.00CDa
0 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Da

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

2.2 不同剂量病原线虫对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用

当参试线虫剂量达到试验剂量最高时,4 种参

试线虫对草地贪夜蛾 5 龄幼虫均有较高的致死率,其中小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 与草地贪夜蛾 5 龄幼虫数量比分别为 5 : 1 和 10 : 1 时,处理 36 h 后,草地贪夜蛾 5 龄幼虫的死亡率可达 50%以上,效果较好;对照组草地贪夜蛾 5 龄幼虫的死亡率均为 0(表 5-8)。

2.2.1 不同剂量小卷蛾斯氏线虫 A II 品系对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用 由表 5 可知,处理 12 h 时,除数量比为 50 : 1 外,各剂量的线虫对草地贪夜蛾的致死率无显著差异($\chi^2 = 8.742$, $df = 5$, $P = 0.120$),致死率均较低;当处理 24 h,数量比为 50 : 1、20 : 1、10 : 1 时,小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用无显著差异($\chi^2 = 2.816$, $df = 2$, $P = 0.245$),死亡率分别为 62.5%、45%、40%;当处理 36 h,数量比为 50 : 1 时,小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾的致死率显著高于其他处理,致死率达 100%。

表 5 不同剂量小卷蛾斯氏线虫 A II
对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用

Table 5 Lethal effect of different dosages of <i>Steinernema carpocapsae</i> A II against <i>S. frugiperda</i> 5 th instar larvae			
数量比 Ratio	草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
50 : 1	15.00±6.45Aa	62.50±17.97ABab	100.00±0.00Ac
20 : 1	2.50±2.50ABa	45.00±2.89ACb	87.50±6.29Bc
10 : 1	7.50±4.79ABa	40.00±0.00Ab	67.50±2.50CDc
5 : 1	0.00±0.00Ba	27.50±4.79Bb	62.50±6.29Dc
2 : 1	0.00±0.00Ba	0.00±0.00Da	0.00±0.00EFa
0 : 1	0.00±0.00Ba	0.00±0.00Da	0.00±0.00Fa

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

2.2.2 不同剂量长尾斯氏线虫 X-7 品系对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用 在处理 12 h 时,长尾斯氏线虫 X-7 与草地贪夜蛾数量比为 50 : 1、40 : 1、30 : 1 时,对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死率分别为 25%、7.5%、5%,无显著差异($\chi^2 = 2.695$, $df = 2$, $P = 0.260$),而当数量比为 20 : 1、10 : 1 时,致死率均为 0;在处理 24 h,数量比为 50 : 1、40 : 1 时,长尾斯氏线虫 X-7 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死率无显著差异且达到较高水平($U = 3.500$, $P = 0.155$),分别为 95%、82.5%;在处理 36 h,数量比为 50 : 1、40 : 1、30 : 1 时,长尾斯氏线虫 X-7 对草地贪夜蛾

5 龄幼虫的致死率均达到 100%,而数量比为 20 : 1 时,长尾斯氏线虫 X-7 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死率也可到 80%的较高水平(表 6)。

表 6 不同剂量处理下长尾斯氏线虫 X-7 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用
Table 6 Lethal effect of different dosages of *Steinernema longicaudum* X-7 against *S. frugiperda* 5th instar larvae

数量比 Ratio	草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
50 : 1	25.00±10.41Aa	95.00±5.00Ab	100.00±0.00Ab
40 : 1	7.50±7.50ABCDa	82.50±6.29ABb	100.00±0.00Ac
30 : 1	5.00±2.89ABCDa	72.50±6.29Bb	100.00±0.00Ac
20 : 1	0.00±0.00BCDa	35.00±2.89CDb	80.00±4.08Bc
10 : 1	0.00±0.00CDa	25.00±5.00Db	52.50±7.50Cc
0 : 1	0.00±0.00Da	0.00±0.00Ea	0.00±0.00Da

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

2.2.3 不同剂量夜蛾斯氏线虫 SN 品系对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用 当夜蛾斯氏线虫 SN 与草地贪夜蛾数量比达 300 : 1 和 400 : 1,处理 36 h 时,其对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死水平才较高,致死率分别为 75%和 85%(表 7)。在数量比为 50 : 1,处理 36 h 时,致死率仅为 15%,低于长尾斯氏线虫 X-7、小卷蛾斯氏线虫 A II 和嗜菌异小杆线虫 H06 的 100%、100%和 45%(表 5、表 6、表 8)。

表 7 不同剂量夜蛾斯氏线虫 SN 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用
Table 7 Lethal effect of different dosages of *Steinernema feltiae* SN against *S. frugiperda* 5th instar larvae

数量比 Ratio	草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
400 : 1	15.00±6.45Aa	57.50±7.50Ab	85.00±6.45Ac
300 : 1	10.00±7.07ABa	50.00±8.16ABb	75.00±2.89Ac
200 : 1	10.00±7.07ABa	30.00±5.77BCb	42.50±4.79Bbc
100 : 1	0.00±0.00Ba	15.00±2.89CDb	20.00±5.77CDbc
50 : 1	0.00±0.00Ba	12.50±2.50Db	15.00±2.89Dbc
0 : 1	0.00±0.00Ba	0.00±0.00Ea	0.00±0.00Ea

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

2.2.4 不同剂量嗜菌异小杆线虫 H06 品系对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用 由表 8 可知,当嗜菌异小杆线虫 H06 与草地贪夜蛾数量比为 400 : 1、

200 : 1、100 : 1 和 50 : 1,处理时间为 36 h 时,草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率较高,分别为 67.5%、52.5%、52.5%和 45%,无显著差异($\chi^2=4.864$, $df=3$, $P=0.182$)。但在数量比为 50 : 1,嗜菌异小杆线虫 H06 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死率低,而长尾斯氏线虫 X-7、小卷蛾斯氏线虫 A II 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死率可达 100%。

表 8 不同剂量嗜菌异小杆线虫 H06 对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的致死作用
Table 8 Lethal effect of different dosages of *Heterorhabditis bacteriophora* H06 against *S. frugiperda* 5th instar larvae

数量比 Ratio	草地贪夜蛾 5 龄幼虫死亡率 Mortality of <i>S. frugiperda</i> /%		
	12 h	24 h	36 h
400 : 1	7.50±4.79Aa	20.00±9.13Aa	67.50±4.79Ab
200 : 1	0.00±0.00Aa	20.00±12.25Aab	52.50±4.79ABb
100 : 1	0.00±0.00Aa	17.50±11.81Aa	52.50±2.50ABb
50 : 1	0.00±0.00Aa	15.00±8.66Aab	45.00±13.23ABCb
25 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±.00Ba	27.50±4.78Cb
0 : 1	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Aa	0.00±0.00Da

数据为平均值±标准误差,同列数据后相同大写字母表示差异不显著,同行数据后相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)。
The data are mean±SE; same capital letters within a column indicate no significant difference, same lowercase letters within a row indicate no significant difference($P>0.05$).

3 讨论

研究发现,测试的 4 种线虫对草地贪夜蛾幼虫的致死效果差异很大。长尾斯氏线虫 X-7、小卷蛾斯氏线虫 A II 品系对草地贪夜蛾的防控效果较好。在 36 h 处理,数量比为 50 : 1 时,长尾斯氏线虫 X-7 线虫对 2 龄和 5 龄的草地贪夜蛾幼虫的防控效果分别为 80%和 100%;在 36 h 处理,数量比为 20 : 1 时,小卷蛾斯氏线虫 A II 线虫对 2 龄和 5 龄的草地贪夜蛾幼虫防控效果分别为 90%和 87.5%。而夜蛾斯氏线虫 SN 和嗜菌异小杆线虫 H06 对草地贪夜蛾的防效较差,在数量比为 50 : 1 的处理下,对草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的死亡率均低于 60%。其中小卷蛾斯氏线虫 A II 品系对草地贪夜蛾致死作用最强,在 24 和 36 h 2 个处理时间对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的侵染效果均优于其他 3 种线虫品系,而对草地贪夜蛾 5 龄幼虫,长尾斯氏线虫 X-7 品系侵染效果最优。本研究发现,长尾斯氏线虫 X-7 和嗜菌异小杆线虫 H06 对高龄幼虫致死率要高于对低龄幼虫的致死率。高龄幼虫对病原线虫的敏感度高于低龄幼虫的现象在多种昆虫均有报道(王晓

容等,1994; Park *et al.*, 2001)。例如,金永玲和韩日畴(2009)的研究发现,小卷蛾斯氏线虫 A II 处理小菜蛾 *Plutella xylostella* L. 幼虫 48 h 后,小菜蛾 3 龄幼虫致死率为 75%,均高于 1 龄的 40% 和 2 龄的 65%。夜蛾斯氏线虫 IGA 侵染剂量为 1000 条·头⁻¹时,处理 48 h 后,舞毒蛾 *Lymantria dispar* L. 6 龄和 2 龄的致死率分别为 100% 和 73.3% (滑莎等,2018)。雷利平等(2013)发现二点委夜蛾 *Atheis lepigone* (Moschler) 高龄幼虫对 *H. bacteriophora* HB8 线虫较低龄的敏感,当线虫与幼虫数量比 50 : 1,处理 120 h 后,二点委夜蛾 5 龄幼虫和 3 龄幼虫的死亡率分别为 91.67% 和 78.18%。长尾斯氏线虫 GJ 侵染剂量为 300 条·头⁻¹时,在 20 和 47 h 时对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fabricius) 5~6 龄幼虫的致死效果均优于 2 龄幼虫 (Park *et al.*, 2001)。小卷蛾斯氏线虫和长尾斯氏线虫属于伏击型侵染策略的线虫,而嗜菌异小杆线虫属于追击型侵染策略的线虫,夜蛾斯氏线虫属于中间型线虫 (滑莎等,2018),草地贪夜蛾 2 龄幼虫体形小、爬行速度快,这可能是嗜菌异小杆线虫 H06 和夜蛾斯氏线虫 SN 品系对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的侵染效果较小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 品系差的原因。线虫主要通过幼虫的口器、肛门、气孔和皮肤表面进入幼虫体内,高龄幼虫的体型更大,与线虫的接触面积就越大,接触线虫的量就越大,这为线虫的穿透提供了更多的机会,因而高龄幼虫死亡率高 (Park *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2020)。草地贪夜蛾 5 龄幼虫体形较 2 龄幼虫大很多,因此推测其气门等自然孔口也较 2 龄幼虫大,线虫有更多的侵染机会,进而致死能力明显增强。

国外科研人员利用昆虫病原线虫防治草地贪夜蛾做了大量工作。Lezama-gutierrez *et al.* (2001) 和 Molina-ochoa *et al.* (2003) 在田间调查发现,斯氏线虫是土壤中草地贪夜蛾的重要天然病原物。前人对斯氏线虫对草地贪夜蛾的毒力测定显示,夜蛾斯氏线虫 Mexican 品系对草地贪夜蛾的致死中量为 7.6 头线虫比 1 头 5 龄草地贪夜蛾; 38~52 h 处理后,草地贪夜蛾 5 龄幼虫的死亡率大于 60% (Fuxa *et al.*, 1988)。而斯氏线虫属 *Steinernema* sp. 与草地贪夜蛾 3 龄幼虫数量比为 80 : 1 时,48 h 处理后,草地贪夜蛾的死亡率为 100% (Garcia *et al.*, 2008)。Caccia *et al.* (2014) 在实验室条件下分别放

置 50 和 100 头斯氏线虫侵染每培养皿 15 头草地贪夜蛾末龄幼虫,6 d 内幼虫死亡率分别为 93% 和 100%。斯氏线虫与草地贪夜蛾 3 龄幼虫为 500 : 1 时,处理 96 h 后,草地贪夜蛾幼虫死亡率才达到 90% 以上 (Leyva-hernández *et al.*, 2018)。本研究显示,小卷蛾斯氏线虫 A II 线虫在 5 头线虫比 1 头 5 龄草地贪夜蛾以上的处理剂量下,36 h 后对草地贪夜蛾的致死率超过 60%,当线虫剂量提高到 50 头线虫比 1 头草地贪夜蛾时,草地贪夜蛾的死亡率达到 100%。长尾斯氏线虫 X-7 与草地贪夜蛾 5 龄幼虫在数量比为 10 : 1,36 h 后对草地贪夜蛾的致死率均超过 50%,且当剂量提高到 30 头线虫比 1 头草地贪夜蛾时,草地贪夜蛾的死亡率达到 100%。说明小卷蛾斯氏线虫 A II 线虫和长尾斯氏线虫 X-7 线虫比上述筛选出来的线虫对草地贪夜蛾具有更快的致死速度和更低的致死剂量。因此,小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 在草地贪夜蛾的生物防治方面具有更大的潜力。

本研究发现,小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 在室内条件下对草地贪夜蛾的 2 龄和 5 龄幼虫具有较好的致死效果,目前小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 均已商业化生产,这 2 种线虫在防治草地贪夜蛾方面具有较好的应用前景。本研究只测试了病原线虫在室内条件对草地贪夜蛾 2 龄和 5 龄幼虫的致死效果,小卷蛾斯氏线虫 A II 和长尾斯氏线虫 X-7 在田间对草地贪夜蛾的防控效果及其合适的施用方式还需进一步的研究。根据草地贪夜蛾不同龄期的生活习性采用不同施用方法和剂量,进一步探讨实际可行的应用技术,将为草地贪夜蛾的生物防治提供新途径。

参考文献

- 程东美,洪婉雯,孙辉,华宏伟,张子枫,徐汉虹,张志祥, 2019. 草地贪夜蛾幼虫僵虫发生率调查及致病菌分离鉴定. 环境昆虫学报. (2019-07-18) [2019-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20190717.1722.002.html>.
- 陈利民,黄俊,吴全聪,吴倩倩,潘逸明,吕要斌, 2019. 绿色杀虫剂对草地贪夜蛾杀虫活性比较测定. 环境昆虫学报, 41(4): 775-781.
- 滑莎,赵红盈,王从丽,王鑫鹏,李春杰, 2018. 昆虫病原线虫对舞毒蛾幼虫的侵染能力. 东北林业大学学报, 46(5): 89-92.

- 金涛, 林玉英, 马光昌, 马子龙, 向凯萍, 易克贤, 彭正强, 2019. 杀虫剂对新入侵海南草地贪夜蛾种群幼虫的毒力. 热带作物学报, 40(8): 1571-1576.
- 金永玲, 韩日畴, 2009. 小卷蛾斯氏线虫 A II 品系对小菜蛾感染力测定. 植物保护, 35(5): 128-131.
- 雷利平, 南宫自艳, 李立涛, 董志平, 王勤英, 2013. 昆虫病原线虫对二点委夜蛾致病力的研究. 环境昆虫学报, 35(2): 171-175.
- 李志刚, 吕欣, 押玉柯, 徐齐云, 叶静文, 韩诗畴, 张春兰, 李军, 2019. 粤港两地田间发现夜蛾黑卵蜂与螟黄赤眼蜂寄生草地贪夜蛾. 环境昆虫学报, 41(4): 760-765.
- 李子园, 戴钊萱, 邝昭琅, 梁铭荣, 王磊, 陆永跃, 陈科伟, 2019. 3 种人工饲料对草地贪夜蛾生长发育及繁殖力的影响. 环境昆虫学报, 41(6): 1147-1154.
- 王磊, 陈科伟, 陆永跃, 2019. 我国草地贪夜蛾入侵扩张动态与发生趋势预测. 环境昆虫学报, 41(4): 683-694.
- 王晓容, 李素春, 梁关生, 吴浪明, 卢辉红, 高佳莉, 1994. 泰山 1 号线虫对斜纹夜蛾的致死作用. 仲恺农业技术学院学报, 7(2): 28-32.
- 王勇庆, 马千里, 谭煜婷, 郑群, 闫文娟, 杨帅, 徐汉虹, 张志祥, 2019. 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的毒力及田间防效. 环境昆虫学报, 41(4): 782-788.
- 吴文丹, 尹姣, 曹雅忠, 肖春, 李克斌, 2014. 我国昆虫病原线虫的研究与应用现状. 中国生物防治学报, 30(6): 817-822.
- 杨学礼, 刘永昌, 罗茗钟, 李依, 王文辉, 万飞, 姜虹, 2019. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾. 云南农业(1): 72.
- 张磊, 靳明辉, 张丹丹, 姜玉英, 刘杰, 吴孔明, 萧玉涛, 2019. 入侵云南草地贪夜蛾的分子鉴定. 植物保护, 45(2): 19-24.
- 赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 杨现明, 吴孔明, 2019. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定. 植物保护, 45(3): 10-14.
- BOAVENTURA D, BOLZAN A, PADOVEZ F E O, OKUMA D M, OMOTO C, NAUEN R, 2020. Detection of a ryanodine receptor target-site mutation in diamide insecticide resistant fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Pest Management Science*, 76(1): 47-54.
- CACCIA M G, VALLE E D, DOUCET M E, LAX P, 2014. Susceptibility of *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa gelatopoeon* (Lepidoptera: Noctuidae) to the entomopathogenic nematode *Steinernema diaprepesi* (Rhabditida: Steinernematidae) under laboratory conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(1): 123-126.
- COSENTINE J E, JUDD G J R, BISSETT J D, LACEY L A, 2010. Susceptibility of apple clearwing moth larvae, *Synanthedon myopaeformis* (Lepidoptera: Sesiidae) to *Beauveria bassiana* and *Metarhizium brunneum*. *Biocontrol Science and Technology*, 20(7): 703-707.
- DAL POGETTO M H F A, PRADO E P, GIMENES M J, CHRISTOVAM R S, REZENDE D T, AGUIAR-JUNIOR H O, 2012. Corn yield with reduction of insecticidal sprayings against fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Agronomy*, 11(1): 17-21.
- DASILVA A B, BATISTA J D, DE BRITO C H, 2009. Predatory capacity of *Euborellia annulipes* (Lucas, 1847) on *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797). *ActaSci-Agron*, 31(1): 7-11.
- EARLY R, GONZÁLEZ-MORENO P, MURPHY S T, DAY R, 2018. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *Neobiota*, 40: 25-50.
- FUXA J R, RICHITER A R, AGUDELO-SILVA F, 1988. Effect of host age and nematode strain on susceptibility of *Spodoptera frugiperda* to *Steinernema feltiae*. *Journal of Nematology*, 20(1): 91-95.
- GARCIA L C, RAETANO C G, LEITE L G, 2008. Application technology for the entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis indica* and *Steinernema* sp. (Rhabditida: Heterorhabditidae and Steinernematidae) to control *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in corn. *Neotropical Entomology*, 37(3): 305-311.
- GEORGIS R, KOPPENHOFER A M, LACEY L A, BELAIR G, DUNCAN L W, GREWAL P S, SAMISH M, TAN L, TORR P, VAN TOL R W H M, 2005. Successes and failures in the use of parasitic nematodes for pest control. *Biological Control*, 38(1): 103-123.
- GRIJALBA E P, ESPINEL C, CUARTAS P E, CHAPARRO M L, VILLAMIZAR L F, 2018. *Metarhizium rileyi* biopesticide to control *Spodoptera frugiperda*: stability and insecticidal activity under glasshouse conditions. *Fungal Biol-Uk*, 122(11): 1069-1076.
- GUTIERREZ-MORENO R, MOTA-SANCHEZ D, BLANCO C A, WHALON M E, TERAN-SANTOFIMIO H, RODRIGUEZ-MACIEL J C, DIFONZO C, 2019. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic insecticides in Puerto Rico and Mexico. *Journal of Economic Entomology*, 112(2): 792-802.
- GUTIÉRREZ-RAMÍREZ A, ROBLES-BERMUDEZ A, CAMBERO-CAMPOS J, SANTILLÁN-ORTEGA C, ORTÍZ-CATÓN M, CORONADO-BLANCO J M, CAMPOS-

- FIGUEROA M, 2015. Parasitoids of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) found in Nayarit, Mexico. *Southwestern Entomologist*, 40(3): 555–564.
- KAYA H K, GAUGLER R, 1993. Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, 38: 181–206.
- LEYVA-HEMÁNDZ E H A, GARCÍA-GUTIÉRREZ C, RUÍZ-VEGA J, CALDERÓN-VÁZQUEZ C L, LUNA-GONZÁLEZ A, GARCÍA-SALAS S, 2018. Evaluation of the virulence of *Steinernema riobrave* and *Rhabditis blumi* against third instar larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Southwestern Entomologist*, 43(1): 189–197.
- LEZAMA-GUTIÉRREZ R, HAMM J J, MOLINA-OCCHOA J, LÓPEZ-EDWARDS M, PESCADOR-RUBIO A, GONZÁLEZ-RAMÍREZ M, STYER E L, 2001. Occurrence of entomopathogens of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Mexican States of Michoacán, Colima, Jalisco and Tamaulipas. *Florida Entomologist*, 84(1): 23–30.
- MOLINA-OCCHOA J, CARPENTER J E, HEINRICHS E A, FOSTER J E, 2003. Parasitoids and parasites of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas and Caribbean Basin; an inventory. *Florida Entomologist*, 86(3): 254–289.
- PARK S H, YU Y S, PARK J S, CHOO H Y, BAE S D, NAM M H, 2001. Biological control of tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Fabricius with entomopathogenic nematodes. *Biotechnology and Bioengineering*, 6(2): 139–143.
- PRASANNA B M, HUESING J E, EDDY R, PESCKKE V M, 2018. *Fall armyworm in Africa: a guide for integrated pest management*. Edo Mex, Mexico; CIMMYT.
- RAULSTON J R, PAIR S D, LOERA J, 1992. Prepupal and pupal parasitism of *Helicoverpa zea* and *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) by *Steinernema* sp. in cornfields in the lower Rio-grande valley. *Journal of Economic Entomology*, 85(5): 1666–1670.
- RIOS-VELASCO C, GALLEGOS-MORALES G, CAMBERO-CAMPOS J, CERNA-CHAVEZ E, DE RINCON-CASTRO M C, VALANZUELA-GARCIA R, 2011. Natural enemies of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Coahuila, Mexico. *Florida Entomologist*, 94(3): 723–726.
- RIVERO-BORJA M, GUZMÁN-FRANCO A W, RODRIGUEZ-LEYVA E, SANTILLÁN-ORTEGA C, PÉREZ-PANDURO A, 2018. Interaction of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* with chlorpyrifos ethyl and spinosad in *Spodoptera frugiperda* larvae. *Pest Management Science*, 74(9): 2047–2052.
- SAN-BLAS E, 2013. Progress on entomopathogenic nematology research: a bibliometric study of the last three decades: 1980–2010. *Biological Control*, 66(2): 102–124.
- SHYLES A N, JALALI S K, GUPTA A, VARSHNEY R, VENKATESAN T, SHETTY P, OJHA R, GANIGER P C, NAVIK O, SUBAHARAN K, BAKTHAVATSALAM N, BALLAL C R, RAGHAVENDRA A, 2018. Studies on new invasive pest *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and its natural enemies. *Journal of Biological Control*, 32(3): 145–151.
- VEGA F E, LACEY L A, REID A P, HERARD F, PILARSKA D, DANOYA E, TOMOV R, KAYA H K, 2000. Infectivity of a Bulgarian and an American strain of *Steinernema carpocapsae* against codling moth. *Biological Control*, 45(3): 337–343.
- YAN X, SHAHID A M, LIN Y Y, GU X H, ZHANG L M, LI J Z, HAN R C, 2020. Efficacy of entomopathogenic nematodes against the tobacco cutworm, *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(1): 64–72.
- YU S J, MCCORD J R E, 2007. Lack of cross-resistance to imidacloprid in insecticide-resistant *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Pest Management Science*, 63(1): 63–67.
- YU S J, NGUYEN S N, ABO-ELGHAR G E, 2003. Biochemical characteristics of insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 77(1): 1–11.

(责任编辑: 郑珊珊 郭莹)