



郑惠中, 杨开朗, 覃艳妮, 郭文娟, 温俊宝. 三种杀虫剂对昆虫病原线虫侵染臭椿沟眶象幼虫能力的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (5): 1312–1320.

## 三种杀虫剂对昆虫病原线虫侵染臭椿沟眶象幼虫能力的影响

郑惠中, 杨开朗, 覃艳妮, 郭文娟, 温俊宝\*

(北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 昆虫病原线虫在 20 世纪初后已发展成为生物防治领域研究热点之一, 作为生防制剂被广泛使用, 且可与杀虫剂混用。臭椿沟眶象 *Eucryptorrhynchus brandti* 是重要的林木蛀干害虫, 对宁夏农田防护林主要树种臭椿 *Ailanthus altissima* 造成严重危害。目前臭椿沟眶象的主要防治方法之一是化学防治, 但效果不理想。为了降低对臭椿沟眶象幼虫的农药使用剂量并提高防治效果, 需筛选与昆虫病原线虫混用适合的杀虫剂。本研究测试了 4.5% 氯氰菊酯乳油、10% 吡虫啉可溶液剂、5% 呕虫脒乳油对小卷蛾斯氏线虫 *Steinerinema carpocapsae* All、长尾斯氏线虫 *Steinerinema longicaudum* X-7 存活以及侵染率的影响, 以筛选对臭椿沟眶象 3 龄幼虫致死效果好、能与昆虫病原线虫混用的杀虫剂和混用配比。结果表明, 3 种杀虫剂对 2 种线虫的存活均无亚致死作用; 吡虫啉对 2 种线虫的致死率无明显影响; 不同浓度的氯氰菊酯和呫虫脒对 2 种线虫的致死率存在显著差异, 其中有效成分为 88.97 μg/mL、17.79 μg/mL 的氯氰菊酯和有效成分为 307.89 μg/mL、61.58 μg/mL 的呫虫脒对 2 种线虫的致死率均显著高于对照。3 种药剂与 X-7、All 混用对臭椿沟眶象 3 龄幼虫均表现为增效或叠加作用, 其中有效成分为 8.89 μg/mL 的氯氰菊酯和有效成分为 7.67 μg/mL 的吡虫啉与线虫 X-7 混用对臭椿沟眶象 3 龄幼虫表现出增效作用, 致死率分别为 41.67%、54.17%, 其它浓度和其它药剂与 2 种线虫混用的各处理均表现为叠加作用。该结果为进一步利用昆虫病原线虫开展野外防治试验奠定了基础。

**关键词:** 臭椿沟眶象; 3 龄幼虫; 昆虫病原线虫; 杀虫剂

中图分类号: Q966; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 05-1312-09

## Impacts of three chemical pesticides on infectivity of entomopathogenic nematode against *Eucryptorrhynchus brandti*

ZHENG Hui-Zhong, YANG Kai-Lang, QIN Yan-Ni, GUO Wen-Juan, WEN Jun-Bao\* ( Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Entomopathogenic nematodes have been widely used as biological control agents since early 20<sup>th</sup> century. *Eucryptorrhynchus brandti* is an important forest pest, which causes serious damage to the main tree species, *Ailanthus altissima*, of the farmland shelter forest in Ningxia. Chemical control is one of the main methods used to prevent and control *E. brandti*, but the effect is poor. In order to improve the control efficacy against the larvae of *E. Brandti*, compatibility of three chemical pesticides with entomopathogenic nematodes were studied. The effects of 4.5% cypermethrin oil, 10% imidacloprid solution and 5% acetamiprid oil on the survival and infection rates of *Steinerinema carpocapsae* All and *Steinerinema longicaudum* X-7 were tested. Results showed that three pesticides had no sub-lethal effect on

© 1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基金项目: 国家重点研发计划生物安全关键技术研发重点专项 (2018YFC1200400); 国家自然科学基金 (31770691)

作者简介: 郑惠中, 女, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事森林昆虫学研究, E-mail: 17863807527@163.com

\* 通讯作者 Author for correspondence: 温俊宝, 博士, 教授, 主要研究方向为植物检疫、森林昆虫学, E-mail: wenjb@bjfu.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-07-26; 接受日期 Accepted: 2020-12-22

the entomopathogenic nematodes. There was no significant effect of imidacloprid on the mortality of the two nematodes. The active ingredient of cypermethrin at 88.97  $\mu\text{g}/\text{mL}$  and 307.89  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , acetamiprid at 17.79  $\mu\text{g}/\text{mL}$  and 61.58  $\mu\text{g}/\text{mL}$  caused significantly higher mortality of the nematodes when compared with the control. All different pesticide-nematode combinations showed additive or synergistic interaction against the 3<sup>rd</sup> instar larvae of *E. brandti*. Synergistic effect was found in the combination of imidacloprid at 8.89  $\mu\text{g}/\text{mL}$  and cypermethrin at 7.67  $\mu\text{g}/\text{mL}$  with *S. longicaudum* X-7, with larval mortality of 41.67% and 54.17%, respectively. The results provide basis for further field experiments to evaluate the efficacy of combination of entomopathogenic nematode with chemical pesticides to control *E. brandti*.

**Key words:** *Eucryptorrhynchus brandti*; 3<sup>rd</sup> instar larvae; entomopathogenic nematodes; pesticides

臭椿沟眶象 *Eucryptorrhynchus brandti* (Harold) 属鞘翅目 Coleoptera 象甲科 Curculionidae 沟眶象属 *Eucryptorrhynchus*, 是危害臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle 及其变种千头椿的主要钻蛀性害虫(赵养昌, 1980; Borovec, 2013), 常与其近缘种沟眶象 *E. scrobiculatus* (Motschulsky) 混合危害, 近年来在宁夏发生尤其严重, 已成为危害宁夏林业的主要害虫。臭椿沟眶象幼虫孵化后蛀入韧皮部, 随着虫体发育向内钻蛀取食, 形成不规则坑道, 严重破坏臭椿树的疏导组织(葛腾, 2000)。臭椿受臭椿沟眶象和沟眶象的单独或混合危害, 造成大量死亡或树势衰弱。

近年来生产上利用昆虫捕获网对沟眶象的阻隔及捕获效果显著(Yang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019), 但因沟眶象和臭椿沟眶象的体型区别, 臭椿沟眶象虫体小肩部窄, 行动更灵便, 易穿过裙摆式捕虫网的洞口, 因此无法用捕虫网有效防控臭椿沟眶象。目前对臭椿沟眶象等钻蛀性害虫仍以化学防治为主。王旭(2019)对臭椿沟眶象幼虫的杀虫剂室内毒力测定结果显示氯氰菊酯>吡虫啉>啶虫脒; 杨鹏(2015)通过树干注药测试杀虫剂对沟眶象的防治效果, 其中5%吡虫啉对沟眶象的致死率为38.79%, 为效果较优的药剂; 杨开朗(2015)在两种象甲危害初期, 在树干捆绑塑料裙基础上使用氯氰菊酯常规喷雾, 在危害初期防治效果较好。由于臭椿沟眶象幼虫在树干内隐蔽活动、越冬, 林间注药、喷雾得使用高药量、频用药才可以起到防治效果, 对环境危害大、农田土壤污染重, 且害虫易产生抗药性。为降低农药使用量, 本研究寻找新的针对臭椿沟眶象幼虫高效、环境友好的防治技术(杨忠岐等, 2018)。

昆虫病原线虫(Entomopathogenic nematodes, EPN)能主动搜寻寄主昆虫、专性寄生, 适应臭椿

沟眶象幼虫的钻蛀特性。EPN对人畜、植物及有益生物安全, 在大多数欧美国家和政府可以豁免注册、生产及施放(丛斌等, 1999; 董国伟等, 2001)。全球已有多种昆虫病原线虫商品化生产并田间大面积应用。我国有使用斯氏线虫防治臭椿沟眶象、沟眶象的初步探索(佟振亮等, 1993; 秦绪兵等, 1999), 对象甲类害虫进行生物防治时常选用斯氏线虫。如 *Steinernema carpocapsae* A24 对香蕉扁黑象甲幼虫和成虫都有较高的毒力(徐洁莲, 1991); Dembilio等(2009)利用斯氏线虫 *S. carpocapsae* 在田间控制红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* 的防治效果为83.8%~99.7%; Shamseldean等(2004)分别从3个不同的区域收集了3种有效的 *Steinernema* 线虫, 经过室内实验对红棕象甲的致死率均能达到100%; Llacer等(2009)使用手动背负式喷雾器对棕榈树干和基部进行喷洒, 对红棕象甲的防治效果可达到80%和98%。因此本试验选用了对臭椿沟眶象幼虫防效较好的两个商品化斯氏线虫品系。

将昆虫病原线虫与其他杀虫制剂结合使用, 是对许多害虫常规化学防治的有效替代。与普通化学杀虫剂相比, EPN的使用成本仍然过高, 将EPN与杀虫剂联合使用, 可有效抑制害虫危害(Koppenhofer and Grewal, 2005), 减缓抗药性的的发展, 也可以降低EPN的施用量从而降低防治成本(Yan *et al.*, 2012)。EPN和苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*、白僵菌 *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin、吡虫啉等混用比各自单独使用会产生协同作用(Koppenhöfer *et al.*, 1997; Koppenhöfer *et al.*, 1998; Koppenhöfer *et al.*, 2000; Polararevpn *et al.*, 2007; Koppenhöfer *et al.*, 2008)。王果红等(2007)利用小卷蛾斯氏线虫 All品系与毒死蜱、吡虫啉混用防治褐纹甘蔗象 *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller), 防效明显优于单

独使用化学药剂毒死蜱、吡虫啉或小卷蛾斯氏线虫。王玉东等 (2012) 将低浓度的吡虫啉与 *S. longicaudum* X-7 线虫混用后处理暗黑金龟 *Holotrichia parallela* 2 龄幼虫, 杀虫效果明显提高。Williams 等 (2013) 将 *S. carpocapsae* Weiser 线虫、白僵菌、绿僵菌配置悬浮液混合在树桩周围施用, 防治蛀干害虫松树皮象 *Hylobius abietis*, 对松树皮象的致死率可达 60% 等。

本文测定了 3 种化学杀虫剂与不同品系商品化斯氏线虫混合使用的效果, 通过确定高效应用组合, 为臭椿沟眶象幼虫的综合治理和未来昆虫病原线虫的田间应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试昆虫及线虫

供试昆虫: 臭椿沟眶象 3 龄幼虫, 采自宁夏石嘴山市平罗县小兴墩、大兴墩、通伏乡等地, 由室内人工饲料配比喂养 (具体方法见表 1)。

表 1 臭椿沟眶象幼虫人工饲料配置比例

Table 1 Proportion of artificial feed for *Eucryptorrhynchus brandti* larvae

种类 Kind	重量 (g) Weight
琼脂粉 Agar powder	3
蔗糖 Sucrose	4
臭椿树粉 <i>Ailanthus altissima</i> ( Mill. )	20
Swingle powder	
土豆 (榨汁) Potatoes ( Juicing)	30
冷却到 60°C Cooling to 60°C	
山梨酸钾 Potassium sorbate	0.25
尼泊金钾酯 Methylparaben	0.25

供试线虫: 采用市面上现有的商品化线虫, 小卷蛾斯氏线虫 *S. carpocapsae* All、长尾斯氏线虫 *S. longicaudum* X-7, 均购自浙江绿神天敌生物技术有限公司。实验用不同批次的线虫重复两次。

### 1.2 供试化学药剂

供试化学药剂商品信息见表 2。在王旭 (2019) 研究基础上, 将上述 3 种杀虫剂对臭椿沟眶象幼虫的 LC<sub>50</sub> 设为基础浓度, 在此基础浓度上再分别用蒸馏水稀释 5 倍、10 倍、20 倍 (简称为 1/5 LC<sub>50</sub>、1/10 LC<sub>50</sub>、1/20 LC<sub>50</sub>) ; 即吡虫啉为

153.3、30.66、15.33 和 7.67 μg/mL, 氯氰菊酯为 88.97、17.79、8.89 和 4.45 μg/mL, 喹虫脒为 307.89、61.58、30.79、15.39 μg/mL。

表 2 杀虫剂及来源

Table 2 Chemical pesticides used in the study

杀虫剂 Chemical pesticides	生产厂家 Manufacturer	毒性 Toxicity
5% 喹虫脒	海利尔药业集团股份有限公司	低毒 Low toxicity
5% Acetamiprid	Hailier Pharmaceutical Group Co., Ltd	
4.5% 氯氰菊酯	深圳诺普信农化股份有限公司	中毒 Medium toxicity
4.5% Cypermethrin	Shenzhen Nuopuxin Agrochemical Co., Ltd	
10% 吡虫啉	河北威远生化农药有限公司 Hebei Weiyuan	低毒 Low toxicity
10% Imidacloprid	Biochemical Pesticide Co., Ltd	

### 1.3 药剂对线虫存活和侵染率的影响

用蒸馏水将供试线虫稀释为 100 IJs/mL 摆匀, 将各药剂稀释成所需浓度梯度 LC<sub>50</sub>、1/5 LC<sub>50</sub>、1/10 LC<sub>50</sub> 和 1/20 LC<sub>50</sub>。取 5 mL 上述混匀液体移入培养皿 (直径 9 cm) 在 25°C ± 1°C 的黑暗条件下放置 24 h, 显微镜下每个处理随机检查 1 mL 混合液中线虫的存活数量, 计算存活率。每处理设 3 个重复, 以清水线虫悬浮液作对照。若药剂对线虫的致死作用或者亚致死作用没有超过 10%, 则继续测定该药剂对线虫侵染率的影响。

参照魏洪义等 (1991) 判定昆虫病原线虫对药剂的反应标准: (1) 死亡: 身体僵直或卷曲, 不活动, 对针刺无反应; (2) 亚致死: 身体卷曲, 由于药剂麻痹作用引起痉挛性或抽搐性活动, 对针刺无反应或反应非常迟缓; (3) 不受药剂影响: 与对照线虫一样, 身体活动舒展或静止不动, 不动的线虫经探针触碰后反应迅速。

### 1.4 线虫与药剂混用对臭椿沟眶象幼虫的作用效果

将单头臭椿沟眶象 3 龄幼虫放入装有 30 g 人工配制饲料的饲养杯中 (直径 5 cm、高 4.5 cm)。

设药剂单独处理、线虫(200 IJs/虫)单独处理、线虫(200 IJs/虫)与药剂混合处理和清水对照。将参试药剂配成所需浓度备用, 将线虫悬浮液加入参试药剂, 按设定浓度配成系列试剂, 摆匀, 取1 mL均匀喷施药剂、线虫及两者混合液, 使药剂或线虫渗入饲料中, 以便触及试验对象, 将盖子轻盖, 置于25°C±1°C下培养。每个处理10头幼虫, 3次重复。处理72 h, 每24 h检查幼虫存活情况。

### 1.5 数据分析

数据处理及统计分析全部在EXCEL、SPSS软件中进行, 处理间经方差分析差异显著后, 用Duncan多重比较方法进行显著性分析。昆虫病原线虫对臭椿沟眶象幼虫的致病力均用死亡率(%)和校正死亡率(%)表示:

$$\text{死亡率}(\%) = \frac{\text{线虫致死虫数}}{\text{处理总虫数}} \times 100$$

$$\text{校正死亡率}(\%) = \frac{\text{处理组死亡率} - \text{对照组死亡率}}{1 - \text{对照组死亡率}} \times 100$$

由 $\chi^2$ 独立性检验判断线虫与化学药剂对臭椿沟眶象幼虫的联合作用类型(张中润等, 2006; 王玉东等, 2012)。

$$M = [M_N + M_I(1 - M_N)]$$

$$M_E = M \times N$$

$$\chi^2 = (M_{NI} - M_E)^2 / M_E$$

其中,  $M$ 、 $M_E$ 分别表示线虫与各药剂混用对供试昆虫的期望致死率及致死数;  $M_N$ 和 $M_I$ 分别为线虫和各药剂单独处理供试昆虫的校正死亡率;  $M_{NI}$ 为线虫与各药剂混用对供试昆虫的实际校正死

亡率;  $N$ 为供试昆虫总数。

线虫与各药剂混用后联合作用类型的判断依据为: 当 $\chi^2 < 3.84$ ( $df = 1$ 和 $P = 0.05$ )时, 显示两种杀虫因子混用表现为相加作用(Additivity), 即两种杀虫因子混用后的毒力和各因子毒力的总和相似; 当 $\chi^2 \geq 3.84$ ( $df = 1$ 和 $P = 0.05$ )及 $M_{NI} < M_E$ 时, 显示两种杀虫因子混用表现为拮抗作用(Antagonism), 即两种杀虫因子混用后的毒力明显低于各因子毒力的总和; 当 $\chi^2 \geq 3.84$ ( $df = 1$ 和 $P = 0.05$ )及 $M_{NI} > M_E$ 时, 显示两种杀虫因子混用表现为增效作用(Synergism)即两种杀虫因子混用后的毒力明显超过各因子毒力的总和(张中润等, 2006; 王玉东等, 2012)。

## 2 结果与分析

### 2.1 杀虫剂对昆虫病原线虫存活的影响

分别用吡虫啉、啶虫脒和高效氯氰菊酯药液连续浸泡2个品系供试线虫, 24 h检查发现, 在试验浓度内3种杀虫剂对供试线虫均无亚致死作用, 只有不同程度的死亡现象, 但死亡率均未超过10%, 且死亡率并随各药剂浓度降低而降低。与对照相比, 啶虫脒对线虫致死率最高, 为4.2%, 氯氰菊酯次之, 吡虫啉最安全。2个品系线虫对不同药剂的耐药性存在差异( $P < 0.05$ ), X-7品系对氯氰菊酯的耐药性更强一些。3种药剂低浓度处理线虫死亡率差异不大, 但啶虫脒引起的死亡率较其它稍高。

表3 不同浓度的化学杀虫剂对线虫死亡率的影响

Table 3 Mortality of nematodes after treated with different concentrations of chemical pesticides

化学杀虫剂 Chemical pesticide	线虫 Nematode	亚致死(%) Sublethal	CK	死亡率(%) Mortality			
				LC <sub>50</sub>	1/5 LC <sub>50</sub>	1/10 LC <sub>50</sub>	1/20 LC <sub>50</sub>
吡虫啉 Imidacloprid	<i>Steinernema longicaudum</i> X-7	-	0.67±0.33 b	2.96±0.37 aB	2.23±0.23 aA	1.17±0.17 bB	0.76±0.03 bA
	<i>S. carpocapsae</i> All	-	0.83±0.33 b	3.33±0.33 aAB	2.60±0.31 aA	1.30±0.06 bB	0.93±0.07 bA
氯氰菊酯 Cypermethrin	<i>S. longicaudum</i> X-7	-	0.67±0.33 c	3.33±0.17 aAB	2.33±0.17 bA	1.29±0.25 cB	0.80±0.31 cA
	<i>S. carpocapsae</i> All	-	0.83±0.33 b	3.67±0.33 aAB	2.73±0.13 aA	1.33±0.33 bB	0.98±0.02 bA
啶虫脒 Acetamiprid	<i>S. longicaudum</i> X-7	-	0.67±0.33 d	3.37±0.32 aAB	2.40±0.26 bA	2.17±0.17 bcA	1.40±0.31 cdA
	<i>S. carpocapsae</i> All	-	0.83±0.33 d	4.20±0.31 aA	3.03±0.55 abA	2.33±0.33 bcA	1.43±0.30 cdA

注: 同行数据后标有不同小写字母者表示在0.05水平上的差异显著; 同一药剂对2品系线虫死亡率数据后的不同大写字母者表示在0.05水平上差异显著。Note: Data with different lowercase letters in the same row were significantly different at 0.05 level, while with different capital letters in the same pesticides were significantly different at 0.05 level.

## 2.2 线虫与药剂对臭椿沟眶象幼虫的交互作用

### 2.2.1 不同浓度的氯氰菊酯与 2 个品系线虫混用对臭椿沟眶象幼虫的致死效果

参试药剂氯氰菊酯单独处理臭椿沟眶象幼虫表现出较低的致死效果, 只有在  $LC_{50}$  ( $88.97 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) 表现出 30% 左右的致死作用。参试线虫分别与氯氰菊酯  $LC_{50}$  ( $88.97 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) 混用的致死效果显著高于低剂量混用效果。氯氰菊酯各浓度与线虫混

用的杀虫效果 ( $D_{NI}$ ) 比氯氰菊酯单用 ( $D_I$ )、线虫单用 ( $D_N$ ) 均明显提高。其中 X-7 与  $1/10 LC_{50}$  ( $8.89 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) 混用对臭椿沟眶象幼虫的致死效果为增效作用, 比氯氰菊酯单用直接增加了 33.34% 的死亡率, 比线虫单用直接增加 35% 的死亡率, 而其它剂量与线虫混用的致死效果则为相加作用 (表 4)。

表 4 2 个品系线虫与氯氰菊酯混用对臭椿沟眶象幼虫的交互作用

Table 4 Interaction of *Steinernema longicaudum* X-7 and *S. carpocapsae* All and cypermethrin against 3<sup>rd</sup> instar larvae of *Eucryptorrhynchus brandti*

线虫 Nematode	浓度 Concentration	CK	$D_I$ (%)	$D_N$ (%)	$D_{NI}$ (%)	$M_E$	$M_{NI}$	$\chi^2$	作用类型 Effect
<i>S. longicaudum</i>	$LC_{50}$	0	$30.00 \pm 11.55$	$6.67 \pm 3.33$	$69.71 \pm 5.07$ a	3.47	6.97	3.53	A
	$1/5 LC_{50}$	0	$17.08 \pm 8.91$	$6.67 \pm 3.33$	$47.92 \pm 2.08$ b	2.26	4.79	2.83	A
	$1/10 LC_{50}$	0	$8.33 \pm 4.17$	$6.67 \pm 3.33$	$41.67 \pm 8.33$ b	1.44	4.17	5.18	S
	$1/20 LC_{50}$	0	$4.17 \pm 4.00$	$6.67 \pm 3.33$	$16.67 \pm 4.17$ c	1.06	1.67	0.35	A
<i>S. carpocapsae</i>	$LC_{50}$	0	$30.00 \pm 11.55$	$23.33 \pm 8.82$	$55.42 \pm 5.42$ ab	4.63	5.54	0.18	A
	$1/5 LC_{50}$	0	$17.08 \pm 8.91$	$23.33 \pm 8.82$	$51.25 \pm 4.73$ b	3.64	5.13	0.61	A
	$1/10 LC_{50}$	0	$8.33 \pm 4.17$	$23.33 \pm 8.82$	$37.50 \pm 7.22$ b	2.97	3.75	0.20	A
	$1/20 LC_{50}$	0	$4.17 \pm 4.00$	$23.33 \pm 8.82$	$20.83 \pm 4.17$ c	2.65	2.08	0.12	A

注: 同列数据后标有不同小写字母者表示在 0.05 水平上差异显著; A, 相加作用; S, 增效作用; CK, 清水对照;  $D_I$ 、 $D_N$  和  $D_{NI}$  分别表示化学农药、线虫、化学农药 + 线虫混用下臭椿沟眶象幼虫的校正死亡率。下表同。Note: Data with different lowercase letters in the same column were significantly different at 0.05 level; A, Additivity; S, Synergism; CK, Water control;  $D_I$ 、 $D_N$  and  $D_{NI}$  represent corrected mortality rate of *E. brandti* larvae treated by chemical pesticide, nematodes, chemical pesticide and nematodes combination, respectively. The same below.

### 2.2.2 不同浓度的吡虫啉与 2 个品系线虫混用对臭椿沟眶象幼虫的致死效果

结果显示吡虫啉单独处理臭椿沟眶象幼虫, 幼虫的死亡率与药剂浓度成正相关。低浓度混用致死效果要好于高浓度混用的效果。吡虫啉和 X-7、All 混用比单用的致死效果高, 死亡率均在 50% 以上, 表现出相加或增效作用; 其中  $1/20 LC_{50}$  ( $7.67 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) 与 X-7 混用表现出增效作用, 作用效果为 54.17%, 效果增加 224.96%, 高于与 All 混用的防效 (表 5)。

### 2.2.3 不同浓度的啶虫脒与 2 个品系线虫混用对臭椿沟眶象幼虫的致死效果

啶虫脒单独处理臭椿沟眶象幼虫, 幼虫的死亡率与药剂浓度成正相关。啶虫脒的不同浓度梯

度与 2 种线虫 X-7、All 混用时, 比相同浓度药剂单用或线虫单用的致死效果提高, 均表现为相加作用。其中 X-7 与啶虫脒  $LC_{50}$  ( $307.89 \mu\text{g}/\text{mL}$ ) 混用比药剂单用对臭椿沟眶象幼虫的致死率增加 32.36% (表 6)。

## 3 结论与讨论

将昆虫病原线虫与化学杀虫剂混用, 既可以提高臭椿沟眶象幼虫的防治效果, 又可以降低化学药剂的污染及延缓害虫抗药性的产生, 是臭椿沟眶象幼虫综合治理的有效手段。昆虫病原线虫可以与许多农药兼容并混合使用, 但也有多种农药对线虫的生存会有影响, 任何新的线虫种 - 农

表5 2个品系线虫与吡虫啉混用对臭椿沟眶象幼虫的交互作用

Table 5 Interaction of *Steinernema longicaudum* X-7 and *S. carpocapsae* All and imidacloprid against 3<sup>rd</sup> instar larvae of *Eucryptorrhynchus brandti*

线虫 Nematode	浓度	CK	$D_I$ (%)	$D_N$ (%)	$D_{NI}$ (%)	$M_E$	$M_{NI}$	$\chi^2$	作用类型 Effect
<i>S. longicaudum</i>	LC <sub>50</sub>	0	64.71 ± 3.53	6.67 ± 3.33	80.00 ± 11.55 a	6.71	8.00	0.25	A
	1/5 LC <sub>50</sub>	0	37.50 ± 7.22	6.67 ± 3.33	54.17 ± 8.33 bc	4.17	5.42	0.37	A
	1/10 LC <sub>50</sub>	0	25.00 ± 0.00	6.67 ± 3.33	62.5 ± 7.21 abc	3.00	6.25	3.52	A
	1/20 LC <sub>50</sub>	0	16.67 ± 4.17	6.67 ± 3.33	54.17 ± 4.17 bc	2.22	5.42	4.60	S
<i>S. carpocapsae</i>	LC <sub>50</sub>	0	64.71 ± 3.53	23.33 ± 8.82	61.18 ± 9.34 ab	7.29	6.12	0.19	A
	1/5 LC <sub>50</sub>	0	37.50 ± 7.22	23.33 ± 8.82	62.50 ± 0.00 abc	5.21	6.25	0.21	A
	1/10 LC <sub>50</sub>	0	25.00 ± 0.00	23.33 ± 8.82	62.50 ± 0.00 abc	4.25	6.25	0.94	A
	1/20 LC <sub>50</sub>	0	16.67 ± 4.17	23.33 ± 8.82	50.00 ± 7.22 c	3.61	5.00	0.54	A

表6 2个品系线虫与啶虫脒混用对臭椿沟眶象幼虫的交互作用

Table 6 Interaction of *Steinernema longicaudum* X-7 and *S. carpocapsae* All and acetamiprid against 3<sup>rd</sup> instar larvae of *Eucryptorrhynchus brandti*

线虫 Nematode	浓度	CK	$D_I$ (%)	$D_N$ (%)	$D_{NI}$ (%)	$M_E$	$M_{NI}$	$\chi^2$	作用类型 Effect
<i>S. longicaudum</i>	LC <sub>50</sub>	0	55.00 ± 2.89	6.67 ± 3.33	72.80 ± 9.14 a	5.80	7.21	0.34	A
	1/5 LC <sub>50</sub>	0	25.00 ± 7.22	6.67 ± 3.33	20.83 ± 4.17 c	3.00	2.08	0.28	A
	1/10 LC <sub>50</sub>	0	12.50 ± 0.00	6.67 ± 3.33	41.67 ± 4.17 b	1.83	4.17	2.99	A
	1/20 LC <sub>50</sub>	0	8.33 ± 4.16	6.67 ± 3.33	33.3 ± 4.17 bc	1.44	3.33	2.48	A
<i>S. carpocapsae</i>	LC <sub>50</sub>	0	55.00 ± 2.89	23.33 ± 8.82	51.25 ± 9.44 b	6.55	5.13	0.31	A
	1/5 LC <sub>50</sub>	0	25.00 ± 7.22	23.33 ± 8.82	33.33 ± 4.17 bc	4.25	3.33	0.20	A
	1/10 LC <sub>50</sub>	0	12.50 ± 0.00	23.33 ± 8.82	45.83 ± 4.17 b	3.29	4.58	0.51	A
	1/20 LC <sub>50</sub>	0	8.33 ± 4.16	23.33 ± 8.82	33.33 ± 8.33 bc	2.97	3.33	0.04	A

药组合都需要评估相容性 (Koppenhöfer and Grewal, 2005)。因此线虫与杀虫剂混用并非简单地将两者混配，而必须通过对线虫安全性和适合度的相关试验来验证。昆虫病原线虫对不同化学药剂的耐受能力不同，选择对线虫安全的化学药剂也是混用成功的关键 (王玉东等, 2012)。

本研究发现测试的3种化学药剂对供试线虫均无亚致死作用。2种昆虫病原线虫对不同杀虫剂的耐药性存在差异，其中吡虫啉造成的线虫致死率较低，是对线虫较为安全的混配农药，低浓度氯氰菊酯次之，而啶虫脒和高浓度氯氰菊酯对2种线虫的致死率与对照相比显著提高。Yan 等

(2012) 将环境友好型杀虫剂与昆虫病原线虫结合使用，结果显示其中使用的氯氰菊酯和吡虫啉等对线虫的存活和传染性无不良影响，与本试验结果一致，证实吡虫啉、氯氰菊酯可与线虫混用。

Koppenhöfer (2005) 和 Grewal (2005) 等研究说明两种因子对某一害虫的联合使用，可对害虫的杀灭速度和死亡率产生拮抗、叠加或增效作用。叠加效应表示两种药剂相互独立行动，没有相互作用；增效作用是指两种药剂的联合(或补充)作用，其效果比单独作用药剂的效果之和更大。在本试验中，2种线虫与3种供试药剂混用后对臭椿沟眶象3龄幼虫的防治效果存在明显差异，

混用后的杀虫效果比两者单用的效果提高。其中线虫与化学药剂  $LC_{50}$ 、 $1/5 LC_{50}$  剂量混用后均表现叠加作用,  $1/20 LC_{50}$  的吡虫啉、 $1/10 LC_{50}$  的氯氰菊酯与 *S. longicaudum* X-7 品系混用可产生明显的增效作用。本研究结果表明, 氯氰菊酯和吡虫啉可与昆虫病原线虫混用, 共同防治臭椿沟眶象。

杀虫剂和昆虫病原线虫之间的增效效果, 主要是两种机制: 杀虫剂影响线虫的行为, 或者杀虫剂影响目标害虫的行为, 这种更常见 (Koppenhöfer, 2005; Grewal, 2005)。Koppenhöfer 等 (2000 b) 研究发现, 线虫与吡虫啉混用后, 吡虫啉减少蛴螬的防御行为, 从而增加线虫对蛴螬的附着和渗透, 即通过药剂降低目标害虫对线虫的防御能力, 从而利于线虫的侵染; 另外药剂可能刺激线虫的感受神经, 使线虫兴奋活性提高, 导致线虫的搜索和攻击能力增强 (Koppenhöfer et al., 1998; 武海斌等, 2014)。出于成本考虑本文主要对低剂量浓度进行了研究, 并根据结果推测低剂量的化学杀虫剂可能更有助于昆虫病原线虫侵害臭椿沟眶象幼虫。Koppenhöfer (2000)、Triggiani (1976) 等研究发现, 低剂量药剂能引起目标昆虫代谢活动的变化, 使其释放物如  $CO_2$ 、分泌物等增多, 而线虫对这些物质敏感。而高浓度药剂因为对线虫的存活有明显影响, 可能抑制了线虫的活力。本研究未设计试验进行协同作用出现原因及低剂量效果较好原因的具体验证, 未来需进一步研究。

在 2 种供试线虫中, X-7 品系与 3 种药剂混用对臭椿沟眶象幼虫致死效果提升要均高于 All 品系与药剂的混用效果, 因此 X-7 品系可作为优选品系, 进一步研究其与药剂混用对林间臭椿沟眶象幼虫的防治效果。近年来关于 EPN 防控钻蛀性害虫应用技术的研究逐渐增多, 陆永跃 (2012) 对应用昆虫病原线虫防治香蕉假颈象甲的施用方法进行研究发现, 将线虫液注入蛀道的注射法最优。目前国内林地野外应用昆虫病原线虫的技术还不成熟, 仍处初步探索阶段。臭椿沟眶象幼虫钻蛀危害, 隐蔽生活, 如何采用合适的施用方法让线虫制剂接触到虫体是林间应用的难点。此外, 面对宁夏干燥、紫外线强等环境特点, 避免或改善对线虫不利的环境因子也是未来要重点考虑的方面。纳米技术、渗透处理等新方法或许可以为昆

虫病原线虫抵抗恶劣环境提供新途径, 同时针对臭椿沟眶象幼虫线虫和杀虫剂组合使用的经济可行性还需进一步研究。

### 参考文献 (References)

- Borovec R. Catalogue of Palaearctic Coleoptera [M]. Leiden: Brill, 2013: 231–232.
- Cong B, Liu WZ, Yang HW. Advances on theresearch and application of entomopathogenic nematode [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1999, 30 (3): 343–353. [从斌, 刘维志, 杨怀文. 昆虫病原线虫研究和利用的历史、现状与展望 [J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 30 (3): 343–353]
- Dembilio O, Llacer E, Altube MMMD, et al. Field efficacy of imidacloprid and *Steinernema carpocapsae* in a chitosan formulation against the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) in *Phoenix canariensis* [J]. *Pest Management Science*, 2010, 66: 365–370.
- Dong GW, Liu XJ, Yu XY, et al. A review on entomopathogenic nematodes [J]. *Entomological Knowledge*, 2001, 38 (2): 107–111. [董国伟, 刘贤进, 余向阳, 等. 昆虫病原线虫研究概况 [J]. 昆虫知识, 2001, 38 (2): 107–111]
- Dong ZL, Gao WC, Cao Q, et al. Control of weevils damaging ailanthus trees in Beijing with steiner nematid nematodes [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 1993, 9 (4): 173–175. [佟振亮, 高文呈, 曹琦, 等. 芫菁夜蛾线虫对沟眶象和臭椿沟眶象侵染力的研究 [J]. 生物防治通报, 1993, 9 (4): 173–175]
- Fallon DJ, Solter LF, Keena M, et al. Susceptibility of Asian long horned beetle, *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) (Coleoptera: Cerambycidae) to entomopathogenic nematodes [J]. *Biological Control*, 2004, 30: 430–438.
- Ge T. Bionomics of *Eucryptorrhynchus brandti* [J]. *Forest Pest and Disease*, 2000, 19 (2): 17–18. [葛腾. 臭椿沟眶象生物学特性初步研究 [J]. 森林病虫通讯, 2000, 19 (2): 17–18]
- Kapranas A, Malone B, Quinn S, et al. Efficacy of entomopathogenic nematodes for control of large pine weevil, *Hylobius abietis*: Effects of soil type, pest density and spatial distribution [J]. *Journal of Pest Science*, 2017, 90 (2): 495–505.
- Koppenhöfer AM, Grewal PS. Compatibility and interactions with agrochemicals and other biocontrol agents. In: Grewal PS, Ehlers R, Shapiro – Ilan DI, eds. *Nematodes as Biocontrol Agents* [M]. UK: CABI Publishing, 2005: 363–381.
- Koppenhöfer AM, Brown IM, Gaugler R, et al. Synergism of entomopathogenic nematodes and imidacloprid against white grubs: Greenhouse and field evaluation [J]. *Biological Control*, 2000, 19: 245–251. House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
- Koppenhöfer AM, Fuzy EM. Early timing and new combinations to increase the efficacy of neonicotinoid entomopathogenic nematode (Rhabditida: Heterorhabditidae) combinations against white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae) [J]. *Pest Management Science*, 2008,

- 64: 725–735.
- Koppenhöfer AM, Grewal PS, Kaya HK. Synergism of imidacloprid and entomopathogenic nematodes against white grubs: The mechanism [J]. *Entomologia Experimentalis Applicata*, 2000, 94: 283–293.
- Koppenhöfer AM, Kaya HK. Additive and synergistic interaction between entomopathogenic nematodes and *Bacillus thuringiensis* for scarab grub control [J]. *Biological Control*, 1997, 8: 131–137.
- Koppenhöfer AM, Kaya HK. Synergism of imidacloprid and an entomopathogenic nematode: A novel approach to white grub (Coleoptera: Scarabaeidae) control in turfgrass [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1998, 91: 618–623.
- Llacer E, Altube MMMD, Jacas JA. Evaluation of the efficacy of *Steinernema carpocapsae* in a chitosan formulation against the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* [J]. *Phoenix Canariensis*, 2009, 54: 559–565.
- Lu YY, Liang GW. Controlling effect of *Steinernema carpocapsae* with spraying on banana pseudostem weevil *Odoiporus longicollis* Oliver in banana plantation [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 10: 105–107. [陆永跃, 梁广文. 喷淋法使用斯氏线虫对香蕉假茎象甲种群的控制作用 [J]. 广东农业科学, 2012, 10: 105–107]
- Oreste T, George O, Poinar Jr. Infection of adult lepidoptera by *Neoplectana carpocapsae* (Nematoda) [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 1976, 27 (3): 413–414.
- Polavarapu S, Koppenhofer AM, Barry JD, et al. Entomopathogenic nematodes and neonicotinoids for remedial control of oriental beetle, *Anomala orientalis* (Coleoptera: Scarabaeidae), in highbush blueberry [J]. *Crop Protection*, 2007, 26: 1266–1271.
- Qian XJ, Zhang WL, Liu CZ. Virulence of entomopathogenic nematodes and imidacloprid to *Bradysia odoriphaga* [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54 (2): 102–108. [钱秀娟, 张文丽, 刘长仲. 昆虫病原线虫与吡虫啉混用对异迟眼蕈蚊幼虫的毒力测定 [J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54 (2): 102–108]
- Qin XB, Lai BM, Li DJ, et al. Bionomics and control of *Eucryptorrhynchus brandti* [J]. *Forest Pest and Disease*, 1999, 5: 19–21. [秦绪兵, 赖便谋, 李东军, 等. 臭椿沟眶象生物学特性与防治 [J]. 森林病虫通讯, 1999, 5: 19–21]
- Shamseldean MM. Laboratory trials and field applications of egyptian and foreign entomopathogenic nematodes used against the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* [J]. *International Journal of Nematology*, 2004, 14 (1): 44–55.
- Wang GH, Han RC, Chen JH, et al. Combined efficacy of entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* All and pesticide against *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2007, 23 (3): 218–222. [王果红, 韩日畴, 陈静华, 等. 利用昆虫病原线虫与化学农药混用防治褐纹甘薯象 [J]. 中国生物防治, 2007, 23 (3): 218–222]
- Wang X. Adults Taxis and Larvae Chemical Pesticide Screening of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* and *E. brandti* [D]. Beijing: [2021]. [王晓东. 成虫趋化性和幼虫化学防治药剂筛选 [D]. 北京: 中国农业科学院植物保护研究所, 2021]
- Beijing Forestry University, 2019. [王旭. 沟眶象和臭椿沟眶象成虫趋性及幼虫化学防治药剂筛选 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019]
- Wang YD, Xiao C, Yin J, et al. Evaluation of the impacts on infection ability of entomopathogens nematodes to grub, *Holotrichia parallela* for three chemical pesticides [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2012, 28 (1): 67–73. [王玉东, 肖春, 尹姣, 等. 三种化学杀虫剂对病原线虫侵染暗黑鳃金龟能力的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2012, 28 (1): 67–73]
- Wei HY, Wang GH, Pang XF. Toxicity of three insecticides to the entomogenous nematode *Steinernema feltiae* [J]. *Natural Enemies of Insects*, 1991, 13 (2): 92–95. [魏洪义, 王国汉, 庞雄飞. 几种杀虫剂对斯氏线虫的毒力 [J]. 昆虫天敌, 1991, 13 (2): 92–95]
- Williams CD, Dillon AB, Harvey CD, et al. Control of a major pest of forestry, *Hylobius abietis*, with entomopathogenic nematodes and fungi using eradicant and prophylactic strategies [J]. *Forestry and management*, 2013, 305: 212–222.
- Wu HB, Ling F, Gong QT, et al. Evaluation of the effects of infection by different entomopathogenic nematodes and thiamethoxam on *Bradysia odoriphaga* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53 (6): 1233–1241. [武海斌, 凌飞, 宫庆涛, 等. 噴虫嗪对昆虫病原线虫侵染韭菜迟眼蕈蚊能力的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2016, 53 (6): 1233–1241]
- Wu HB, Xin L, Gong QT, et al. Evaluation of the effects of infection by different entomopathogenic nematodes and chemical pesticides on *Bradysia odoriphaga* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (4): 1060–1068. [武海斌, 辛力, 宫庆涛, 等. 化学杀虫剂对昆虫病原线虫侵染韭菜迟眼蕈蚊能力的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (4): 1060–1068]
- Xu JL, Yang P. Control of banana borer with *Steinernema carpocapsae* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crop*, 1991, 12 (2): 77–82. [徐洁莲, 杨平. 应用苹果蠹蛾线虫防治香蕉扁黑象甲的研究 [J]. 热带作物学报, 1991, 12 (2): 77–82]
- Yan X, Moens M, Han R, et al. Effects of selected insecticides on osmotically treated entomopathogenic nematodes [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2012, 119: 152–158.
- Yang KL, Wen XJ, Ren Y, et al. Control of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* (Coleoptera: Cucujidae), a major pest of *Ailanthus altissima* (Sapindales: Simaroubaceae), using a modified square trap net [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111: 1760–1767.
- Yang KL, Wen XJ, Ren Y, et al. Novel trunk trap net designs for the control of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75: 2618–2626. [杨开朗, 文晓静, 任勇, 等. 不同形状的树干诱捕网设计 [J]. 电子科技大学出版社. All rights reserved. http://www.cnki.net
- Yang KL. Study on Physical Capture and Trapping Techniques of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* (Coleoptera: Cucujidae) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. [杨开朗. 沟眶象物理捕获及诱杀技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015]

- Yang P. A Preliminary Study of the Artificial Raising and Prevention of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* ( Coleoptera: Cucujidae) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. [杨鹏. 沟眶象人工饲养及防治初探 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015]
- Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN, et al. Research advances of Chinese major forest pests by integrated management based on biological control [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (2): 163–183. [杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 等. 以生物防治为主的综合控制我国重大林木病虫害研究进展 [J]. 中国生物防治学报, 2018, 34 (2): 163–183]
- Zhang ZR, Cao L, Liu XL, et al. Screening of insecticides as synergists for entomopathogenic nematodes *Steinernema longicaudum* X-7 [J].

- Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (1): 68–73. [张中润, 曹莉, 刘秀玲, 等. 昆虫病原线虫 *Steinernema longicaudum* X-7 增效药剂的筛选 [J]. 昆虫知识, 2006, 43 (1): 68–73]
- Zhang ZR, Wang JH, Huang HJ, et al. Virulence of entomopathogenic nematodes against cashew nut borer *Nephopteryx* sp. in laboratory [J]. *Plant Protection*, 2017, 43 (1): 210–213. [张中润, 王金辉, 黄海杰. 昆虫病原线虫对腰果云翅斑螟的室内致病力 [J]. 植物保护, 2017, 43 (1): 210–213]
- Zhao YC, Chen YQ. Economic Entomology of China ( Book 20, Coleoptera, Weevil) [M]. Beijing: Science Press, 1980, 149–150. [赵养昌, 陈元清. 中国经济昆虫志 (第 20 册, 鞘翅目, 象甲科) [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 149–150]