



杨华, 赵丹阳, 秦长生. 绿僵菌与 3 种杀虫剂混配对樟巢螟的协同作用 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (6): 1494 - 1501.

绿僵菌与 3 种杀虫剂混配对樟巢螟的协同作用

杨 华^{1,2}, 赵丹阳², 秦长生^{2*}

(1. 华南农业大学农学院, 广州 510640; 2. 广东省林业科学研究院/广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广州 510520)

摘要: 采用定量喷雾法测定了绿僵菌、白僵菌以及 3 种杀虫剂对樟巢螟 *Orthaga achatina* 低龄幼虫的室内毒力, 并测定了金龟子绿僵菌 Ma09 与 3 种杀虫剂混配后的协同作用。结果显示: 4 种昆虫病原菌菌株均对樟巢螟 2~3 龄幼虫具有较好的致死效果, 用绿僵菌和白僵菌孢悬液处理后, 死亡高峰期在 3~4 d; 白僵菌 GDLY9 的防治效果最好, 处理浓度为 1×10^9 孢子/mL 下 LT_{50} 和 LT_{90} 分别为 3.01 d、3.95 d, 金龟子绿僵菌 Ma09、3297 效果相当, 黄绿绿僵菌 M985 的 LT_{50} 相对低一些, 但是 LT_{90} 优于金龟子绿僵菌 Ma09 和 3297。金龟子绿僵菌 Ma09 与苯氧威、除虫脲和短稳杆菌混配后均表现出增效作用, 协同指数分别为 20.43、27.53 和 33.13。

关键词: 樟巢螟; 绿僵菌; 白僵菌; 毒力测定; 协同作用

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 06-1494-08

Synergistic effects of *Metarhizium* mixed with three pesticides against *Orthaga achatina*

YANG Hua^{1,2}, ZHAO Dan-Yang², QIN Chang-Sheng^{2*} (1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: The bioassay of *Metarhizium*, *Beauveria* and three pesticides to *Orthaga achatina* was measured by quantitative spray method, and the synergistic effect of Ma09 mixed with three chemical agents was determined. The results showed that all the four kinds of entomopathogenic fungi had better lethal effect on the second instar larvae of *O. achatina*. After treatment with suspension of *Metarhizium* and *Beauveria*, the peak of death was observed at 3~4 days. The control effect of GDLY9 was the best, LT_{50} and LT_{90} were 3.01 d and 3.95 d at the concentration of 1×10^9 spores /mL, respectively. The effects of Ma09 and the strain of 3297 were similar, while LT_{50} of M985 was relatively low, but LT_{90} was better than that of Ma09 and 3297. The combination of Ma09 with fenoxycarb, diflubenzuron and *Empedobacter brevis* showed synergistic effect, and the cooperativity indexes were 20.43, 27.53 and 33.13, respectively.

Key words: *Orthaga achatina*; *Metarhizium*; *Beauveria*; bioassay; synergism

樟巢螟 *Orthaga achatina* 又称樟丛螟、樟叶瘤丛螟, 属鳞翅目 Lepidoptera 螟蛾科 Pyrididae 瘤丛螟属 *Orthaga*, 主要危害樟科 Lauraceae 植物, 在广东省韶关市、肇庆市以及潮州市等多地造成严重危

害 (邱华龙等, 2016)。该虫以幼虫危害寄主植物叶片, 1~2 龄幼虫啃食叶片, 2~3 龄后开始吐丝结巢, 将小树枝和叶片粘粘在一起, 连同虫粪卷结在一起形成 10~20 cm 大小不等的鸟巢状的虫

基金项目: 樟树病虫害防治技术规程 (2019-DB-10)

作者简介: 杨华, 女, 1980 年生, 吉林人, 博士, 林业工程师, 主要从事林业有害生物研究, E-mail: yanghua@sinogaf.cn

* 通讯作者 Author for corresponding: 秦长生, 硕士, 研究员, 主要从事林业有害生物研究, E-mail: 919824595@qq.com

收稿日期 Received: 2020-10-04; 接受日期 Accepted: 2020-10-27

苞, 在虫苞内取食嫩枝和嫩叶, 发生严重时, 整株叶片均可以被吃光, 严重影响樟树的生长及美观 (魏书军等, 2008; 赵丹阳等, 2016)。

目前对樟巢螟防治主要依赖于化学防治 (张念环等, 2005; 杨晓娟等, 2006), 但化学防治会产生相应的“3R”问题。而绿僵菌、白僵菌等昆虫病原真菌可以主动侵入寄主体壁, 分泌毒素致死寄主 (徐金柱等, 2017), 并在体内迅速繁殖, 使其发病迅猛, 可在短期内有效遏制多种农林害虫种群数量增长; 还能在寄主缺乏的情况下宿存于土壤中, 在适宜条件下能随虫口的增加而大量繁殖, 与害虫的发生保持较好的一致性, 能起到对害虫持续控制的作用 (Yang *et al.*, 2019)。

本项目选用 3 株绿僵菌 (Ma09、3297 和 Mf985)、1 株白僵菌 (GDLY9) 及 3 种高效低毒杀虫剂 (苯氧威、除虫脲和短稳杆菌) 对樟巢螟低龄幼虫进行了毒力测定, 并测定了金龟子绿僵菌 Ma09 和 3 种杀虫剂混配对樟巢螟低龄幼虫的协同作用, 以期筛选出更为安全、低毒、高效的樟巢螟防治药剂, 为樟巢螟的防治提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试药剂

供试菌株: 蚱蜢绿僵菌 Mf985、金龟子绿僵菌 Ma09、金龟子绿僵菌 3297 及球孢白僵菌 GDLY9。菌株由广东省森林培育与保护利用重点实验室保存, 绿僵菌孢子粉含孢量约为 3×10^9 孢子/g, 白僵菌含孢量约为 5×10^9 孢子/g, 含水量小于 5%。

供试药剂: 苯氧威 (3% 乳油, 河南省郑州市沙隆达伟新农药有限公司)、除虫脲 (20% 悬浮剂, 河南省安阳市安林生物化工责任有限公司)、

短稳杆菌 *Empedobacter brevis* (100 亿孢子/ml 悬浮剂, 镇江市润宇生物科技开发有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 绿僵菌、白僵菌以及 3 种杀虫剂对樟巢螟低龄幼虫的毒力

从林间采集樟巢螟虫苞带回实验室, 用细毛笔挑取健康活泼的 2~3 龄幼虫作为供试昆虫。将幼虫置于 15 cm 培养皿中, 底部铺有滤纸, 以新鲜樟树叶片饲喂。分别将绿僵菌、白僵菌和 3 种杀虫剂配制成一定浓度的药液并按梯度进行稀释, 采用 Potter 塔喷雾法, 将装有幼虫的培养皿置于喷雾塔的载物台上, 每次喷 1 mL 药剂到虫体上, 将幼虫用细毛笔挑取后转移至养虫盒中饲养观察, 统计每日死亡数。每个处理 30 头, 3 次重复, 以 0.1% 吐温-80 溶液为对照。

1.2.2 绿僵菌与 3 种杀虫剂混配对樟巢螟低龄幼虫的毒力

选择金龟子绿僵菌 Ma09 分别与苯氧威、除虫脲和短稳杆菌进行混配并测定其协同增效作用。绿僵菌孢子悬液配制成 1×10^6 孢子/mL 的浓度, 加入杀虫剂, 使杀虫剂稀释浓度达到 1 000 倍, 参照 1.2 进行樟巢螟低龄幼虫的毒力测定。同时分别测定单独使用绿僵菌和杀虫剂对低龄樟巢螟幼虫毒力。根据下列公式计算协同毒力指数 (c. i) 并将其作为评判两种药剂相互作用的依据, 当 $c. i \geq 20$ 时为判定为增效作用, $c. i \leq -20$ 时为拮抗作用, $-20 < c. i < 20$ 时则判定为相加作用。校正死亡率试验中绿僵菌·苯氧威与绿僵菌·除虫脲每个处理供试幼虫 50 头, 5 次重复, 共 250 头。绿僵菌·短稳杆菌供试幼虫每个处理 50 头, 4 次重复, 共 200 头。理论死亡率试验中各处理均 50 头, 5 次重复, 共计 250 头。

$$\text{实际死亡率 (\%)} = \frac{\text{试验死虫数}}{\text{供试虫数}} \times 100$$

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

$$\text{混剂理论死亡率 (\%)} = 1 - (1 - \text{单剂 A 死亡率}) \times (1 - \text{单剂 B 死亡率})$$

$$\text{协同毒力指数 (c. i)} = \frac{\text{实际校正死亡率} - \text{理论死亡率}}{\text{理论死亡率}} \times 100$$

1.3 数据处理与分析

所得数据用 SPSS 20.0 统计软件进行处理分析, 采用 Duncan 氏新复极差测验进行差异显著性

分析。并运用 Probit 机率值分析法求出毒力回归方程、半致死时间 LT_{50} 、 LT_{90} 、95% 置信区间、卡方值、显著性等 (贾春生, 2006)。

2 结果与分析

2.1 绿僵菌、白僵菌对樟巢螟低龄幼虫的毒力

不同浓度下, 4 种昆虫病原菌处理后, 樟巢螟每日死亡情况 (图 1)。总体上, 死亡高峰期基本

在处理后的第 3~4 天, 1×10^8 孢子/mL 浓度的孢子悬浮液处理后 6 d 之内樟巢螟全部死亡。低浓度的孢子悬浮液处理后, 死亡持续时间较长, 7~8 d 之内仍有活虫, 有些处理甚至持续至 12 d。白僵菌 GDLY9 的效果要优于其他 3 种绿僵菌。基本上所有浓度处理后 6 d 之内樟巢螟全部死亡。

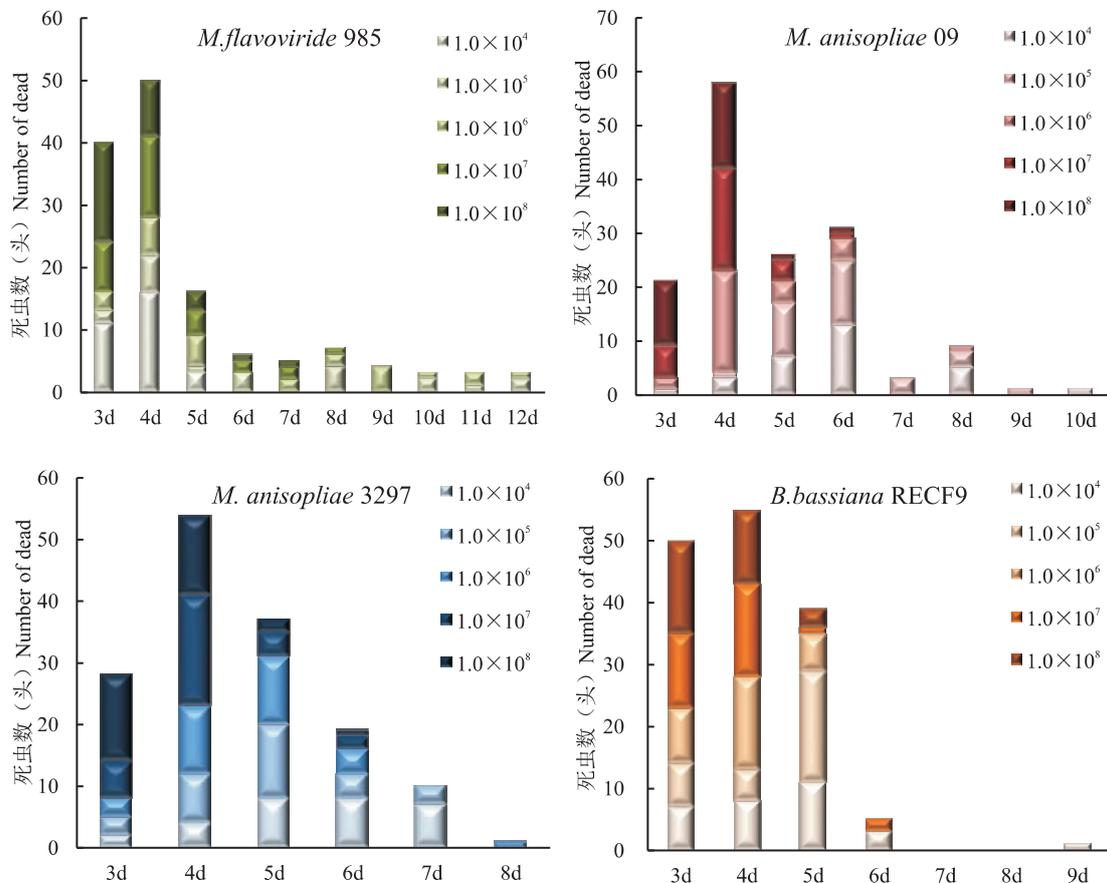


图 1 樟巢螟在 4 种昆虫病原真菌不同浓度下日死亡情况

Fig. 1 *Orthaga achatina* larvae daily death of 4 entomopathogenic fungi at different concentrations

表 1~表 4 展示了 3 种绿僵菌和 1 种白僵菌对低龄樟巢螟幼虫的毒力, 回归分析表明, 死亡率与时间呈线性相关, 并且致死中时相随着孢子浓度的增大而降低。当孢子浓度达到 10^8 孢子/mL 这一级别时, 4 种昆虫病原菌的致死中时均在 3 d 左右, 分别为 3.21、3.5、3.03、3.01 d。当孢子浓度为 10^4 孢子/mL 这一级别时, 4 种病原菌的致死中时差异较大, 分别为 8.48、5.54、5.06 和 3.89 d, 其种白僵菌 GDLY9 效果最好 (LT_{50} 为 5.06 d), 绿僵菌 3297 效果最差 (LT_{50} 为 8.48 d)。绿僵菌 Mf985 和 Ma09 效果相当, LT_{50} 均在 5 d 左右。

2.2 3 种化学药剂对樟巢螟的毒力

处理 24 h 后, 苯氧威和除虫脲的致死中浓度 LC_{50} 分别为 35.89 和 129.42 $\mu\text{g/mL}$, 苯氧威的效果显著优于除虫脲; 同样处理 48 h 后, 苯氧威的 LC_{50} 为 13.67 $\mu\text{g/mL}$, LC_{90} 为 35.53 $\mu\text{g/mL}$, 均显著低于除虫脲 (LC_{50} 为 82.53 $\mu\text{g/mL}$, LC_{90} 为 158.38 $\mu\text{g/mL}$), 说明苯氧威对樟巢螟低龄幼虫的防治效果要优于除虫脲 (表 5)。短稳杆菌对樟巢螟低龄幼虫也表现出了良好的致死作用 (表 6), 1×10^8 孢子/mL 浓度处理后的 LT_{50} 和 LT_{90} 分别为 1.28、2.50 d, 并且各个浓度在处理 5 d 后, 死亡率均达到了 100%。

表 1 绿僵菌 Mf985 对樟巢螟幼虫的毒力
Table 1 Toxicity of Mf985 to *Orthaga achatina* larvae

浓度 (孢子/mL) Concentrations	毒力回归方程 Regression equation	致死中时 Median lethal time		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
		LT ₅₀ (95% confidence interval)	LT ₉₀ (95% confidence interval)		
1 × 10 ⁴	Y = 0.1907X - 1.6169	8.48 (7.70 ~ 9.39)	15.2 (13.48 ~ 17.99)	6.836	0.654
1 × 10 ⁵	Y = 0.2458X - 1.6587	6.75 (6.10 ~ 7.37)	11.96 (10.93 ~ 13.45)	6.496	0.689
1 × 10 ⁶	Y = 0.6489X - 2.3851	3.68 (3.20 ~ 4.06)	5.65 (5.21 ~ 6.30)	3.919	0.561
1 × 10 ⁷	Y = 1.0253X - 3.6136	3.52 (2.28 ~ 4.15)	4.77 (4.15 ~ 6.86)	8.479	0.076
1 × 10 ⁸	Y = 1.6596X - 5.3278	3.21 (2.91 ~ 3.43)	3.98 (3.72 ~ 4.52)	0.055	0.973

表 2 绿僵菌 Ma09 对樟巢螟幼虫的毒力
Table 2 Toxicity of Ma09 to *Orthaga achatina* larvae

浓度 (孢子/mL) Concentrations	毒力回归方程 Regression equation	致死中时 Median lethal time		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
		LT ₅₀ (95% confidence interval)	LT ₉₀ (95% confidence interval)		
1 × 10 ⁴	Y = 0.9078X - 5.0278	5.54 (5.25 ~ 5.83)	6.95 (6.58 ~ 7.48)	4.731	0.450
1 × 10 ⁵	Y = 0.7219X - 3.9087	5.42 (5.08 ~ 5.74)	7.19 (6.75 ~ 7.83)	4.152	0.528
1 × 10 ⁶	Y = 0.8838X - 3.4975	3.96 (2.74 ~ 4.69)	5.41 (4.68 ~ 7.65)	14.881	0.011
1 × 10 ⁷	Y = 1.2526X - 3.9101	3.12 (2.68 ~ 3.40)	4.15 (3.84 ~ 4.72)	3.289	0.656
1 × 10 ⁸	Y = 1.4832X - 5.1870	3.50 (3.23 ~ 3.73)	4.36 (4.08 ~ 4.84)	1.781	0.878

表 3 绿僵菌 3297 对樟巢螟幼虫的毒力
Table 3 Toxicity of 3297 to *Orthaga achatina* larvae

浓度 (孢子/mL) Concentrations	毒力回归方程 Regression equation	致死中时 Median lethal time		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
		LT ₅₀ (95% confidence interval)	LT ₉₀ (95% confidence interval)		
1 × 10 ⁴	Y = 0.7889X - 3.9905	5.06 (4.74 ~ 5.38)	6.68 (6.24 ~ 7.38)	0.842	0.933
1 × 10 ⁵	Y = 0.9209X - 4.0112	4.36 (4.04 ~ 4.64)	5.75 (5.38 ~ 6.32)	1.125	0.890
1 × 10 ⁶	Y = 0.9070X - 3.7710	4.16 (3.83 ~ 4.46)	5.57 (5.21 ~ 6.14)	6.095	0.192
1 × 10 ⁷	Y = 0.9065X - 3.7713	3.55 (3.25 ~ 3.81)	4.57 (4.26 ~ 5.08)	2.421	0.659
1 × 10 ⁸	Y = 1.0935X - 3.3094	3.03 (2.50 ~ 3.34)	4.20 (3.87 ~ 4.80)	1.181	0.881

表 4 白僵菌 GDLY9 对樟巢螟幼虫的毒力
Table 4 Toxicity of GDLY9 to *Orthaga achatina* larvae

浓度 (孢子/mL) Concentrations	毒力回归方程 Regression equation	致死中时 Median lethal time		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
		LT ₅₀ (95% confidence interval)	LT ₉₀ (95% confidence interval)		
1 × 10 ⁴	Y = 0.6692X - 2.6046	3.89 (2.94 ~ 4.55)	5.81 (5.09 ~ 7.27)	12.545	0.051
1 × 10 ⁵	Y = 1.2431X - 4.7577	3.82 (3.56 ~ 4.07)	4.83 (4.51 ~ 5.37)	8.118	0.017
1 × 10 ⁶	Y = 1.4923X - 5.0386	3.38 (3.09 ~ 3.61)	4.24 (3.95 ~ 4.77)	0.376	0.829
1 × 10 ⁷	Y = 1.0232X - 3.2112	3.14 (2.65 ~ 3.46)	4.39 (4.05 ~ 4.99)	3.446	0.328
1 × 10 ⁸	Y = 1.3598X - 4.0956	3.01 (2.51 ~ 3.28)	3.95 (3.66 ~ 4.60)	0.149	0.700

表 5 苯氧威和除虫脲对樟巢螟幼虫的毒力

Table 5 Toxicity of enoxycarb and diflubenzuron to *Orthaga achatina* larvae

杀虫剂 Pesticide	时间 (h) Time	毒力回归方程 Regression equation	致死中浓度 (μg/mL) Median lethal concentration		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
			LC ₅₀ (95% confidence interval)	LC ₉₀ (95% confidence interval)		
苯氧威 Enoxycarb	48	Y = 0.0586X - 0.8016	13.67 (9.28 ~ 17.99)	35.53 (28.64 ~ 49.61)	1.006	0.800
	24	Y = 0.047X - 1.6887	35.89 (30.46 ~ 42.92)	63.13 (53.86 ~ 78.46)	3.548	0.315
除虫脲 Diflubenzuron	48	Y = 0.0169X - 1.3943	82.53 (67.71 ~ 101.84)	158.38 (131.7 ~ 207.75)	4.981	0.173
	24	Y = 0.0128X - 1.6529	129.42 (109.53 ~ 154.24)	229.76 (196.73 ~ 283.22)	0.860	0.835

表 6 短稳杆菌对樟巢螟幼虫的毒力

Table 6 Toxicity of *Empedobacter brevis* to *Orthaga achatina* larvae

浓度 (孢子/mL) Concentrations	毒力回归方程 Regression equation	致死中时 Median lethal time		卡方值 Chi-square value χ^2	显著性 Pvalue P
		LT ₅₀ (95% confidence interval)	LT ₉₀ (95% confidence interval)		
4 × 10 ⁸	Y = 2.0408X - 1.2629	0.06 (0.01 ~ 1.23)	1.25 (0.85 ~ 4.00)	17.929	0.003
2 × 10 ⁸	Y = 2.5627X - 2.2185	0.87 (0.32 ~ 2.06)	1.37 (0.97 ~ 6.41)	21.437	0.001
1 × 10 ⁸	Y = 1.0504X - 1.3480	1.28 (0.40 ~ 2.50)	2.50 (1.75 ~ 5.62)	23.497	0.001
5 × 10 ⁷	Y = 1.0700X - 1.9916	1.86 (1.62 ~ 2.12)	3.06 (2.73 ~ 3.54)	2.443	0.785
2.5 × 10 ⁷	Y = 1.0062X - 2.0569	3.01 (2.51 ~ 3.28)	3.95 (3.66 ~ 4.60)	2.342	0.800

2.3 绿僵菌与 3 种化学药剂混配对樟巢螟低龄幼虫的毒力

协同作用结果 (表 7) 表明, 混配剂中, 绿僵菌 Ma09 与 3 种杀虫剂混配对樟巢螟 2~3 龄幼虫致死效果均比较好, 混配后其校正死亡率分别为

100%、85.78% 和 87.56%, 绿僵菌与 3 种药剂混配后协同指数分别为 20.43、27.52 和 33.13, 均大于 20, 表现出增效作用, 并且绿僵菌与苯氧威混配后对低龄樟巢螟幼虫的致死率达到了 100%, 防治效果明显。

表 7 绿僵菌 Ma09 与 3 种杀虫剂混配对樟巢螟幼虫的增效作用

Table 7 Synergism of Ma09 and 3 pesticides against *Orthaga achatina* larvae

供试药剂 Insecticide	死亡率 (%) Mortality		校正死亡率 (%) Corrected mortality	死亡率 (%) Mortality		理论死亡 (%) Theoretical mortality	协同指数 Cooperativity index
	处理 Treatment	对照 Control		杀虫剂 Pesticide	绿僵菌 Ma09		
绿僵菌·苯氧威 Ma09·Enoxycarb	100.00 ± 0.00	1.20 ± 1.10	100.00	77.20 ± 7.56	25.60 ± 6.07	83.04	20.43
绿僵菌·除虫脲 Ma09·Diflubenzuron	86.8 ± 10.26	7.20 ± 3.03	85.78	56.00 ± 10.86	25.60 ± 6.07	67.26	27.52
绿僵菌·短稳杆菌 Ma09· <i>Empedobacter brevis</i>	88.00 ± 6.32	3.50 ± 1.00	87.56	54.00 ± 11.49	25.60 ± 6.07	65.78	33.13

注: 表中数据为处理后 3 d 的观察结果统计。其中, 绿僵菌单剂的浓度为 1 × 10⁶ 孢子/mL, 苯氧威和除虫脲单剂浓度分别稀释 1000 倍, 短稳杆菌单剂浓度为 1 × 10⁷ 孢子/mL。Note: The data in the table were the statistics of observation results 3 days after treatments. Among them, the concentration of *Metarhizium* was 1 × 10⁶ spores/mL, Phenoxycarb and Diflubenzuron were diluted 1000 times, and the concentration of *Bacillus brevis* was 1 × 10⁷ spores/mL.

3 讨论与结论

绿僵菌能通过主动侵染寄主、穿透昆虫体壁致死寄主, 其发病迅猛, 可在短期内有效遏制害虫种群数量的急剧增加, 将害虫控制在经济损害水平以下。据童应华等 (2014) 报道, 绿僵菌 Mal291-2 对樟巢螟具有较强的致病力, 以点滴法将 1.0×10^8 孢子/mL 的孢子悬液接到 2~3 龄幼虫的体表, LT_{50} 为 6.29 d。本实验选用的几种昆虫病原菌对樟巢螟低龄幼虫均具有较强的致病力, 1.0×10^8 孢子/mL 浓度处理的 LT_{50} 在 3~4 d 之间。生物测定中不同的接种方式导致毒力测定结果差异较大, 有时甚至无法比较 (Wraight *et al.*, 1998)。规范的生物测定方法要求真菌制剂的接种方式尽可能模拟自然侵染, 利于田间应用, 因此最好采用喷雾或者喷粉方式进行。此外不同的菌株之间毒力差异也比较大, 大量的关于绿僵菌菌株筛选的研究表明 (臧欢等, 2013; 于浩海等, 2014; 刘晨等, 2014; 练涛等, 2019; 邓嘉茹等, 2020), 虽然不同的菌株对不同寄主显示出了显著的致病性差异, 但筛选出的高致病力菌株的 LT_{50} 都在 2~8 d, 利用绿僵菌、白僵菌等开展农林害虫的防治, 菌株之间的差异具有较大利用空间, 因此针对不同寄主进行菌株筛选是十分必要的。

细菌杀虫剂是另一种可利用的生物杀虫剂, 刘树生 (刘树生, 2009) 利用 8 000 IU/mg 苏云金杆菌可湿性粉剂防治樟巢螟, 7 d 后防治效果达到 92.28%, 持效期长。关丽梅 (关丽梅等, 2018) 等人分离出来一株对樟巢螟具有较高毒力的致病性粘质沙雷氏菌 (LS-1), 樟巢螟感染该菌后虫体发红、发黑, 变软, 部分甚至流出脓液, 感染 120 h 后, 校正死亡率为 69.1%, 说明该菌株对樟巢螟具有很强的致死作用。本实验中所使用的短稳杆菌是一种革兰氏阴性菌, 源自田间自然感病的斜纹叶蛾 *Spodoptera litura* 幼虫 (王以一等, 2014), 是多种鳞翅目害虫的重要细菌性致病菌 (杨延芳等, 2016; 王义生等, 2018; 王迎春等, 2019) 经大规模发酵而获得的产品, 已在国内外多个地区进行了推广应用。本研究表明该菌对樟巢螟 2~3 龄幼虫也具有较高的致死性。各个浓度下致死中时在 1~3 d, 并且 5 d 后全部死亡。

昆虫生长调节剂针对昆虫特定生长期, 具有高度的选择性, 对人和动物都是安全的, 并且与传统杀虫剂机理不同, 可以有效缓解因长时间大量使用传统杀虫剂带来的抗药性问题 (何佳和蒋志胜, 2003)。苯氧威是一种非萘烯类氨基甲酸酯类化合物, 具有胃毒和触杀作用, 并对多种昆虫有保幼激素活性, 可抑制幼虫蜕皮, 无法发育成成虫 (孙德莹等, 2006)。除虫脲是第 1 个苯甲酰苯脲类选择性杀虫剂, 具有触杀和胃毒作用, 是另一种昆虫生长调节剂类杀虫剂 (Yao *et al.*, 2020)。二者虽然都在蜕皮过程中发挥作用, 但是作用机制完全不同。苯氧威是一种非甾体保幼激素类似物, 主要作用是阻止昆虫发育、抑制变态发生; 而除虫脲属于几丁质合成抑制剂, 可使昆虫表皮的几丁质合成过程受阻, 沉积受抑制。也正是因为二者的作用机制不同, 将其与绿僵菌混配后获得的作用效果亦不同 (c.i 苯氧威 = 20.43; c.i 除虫脲 = 27.52)。绿僵菌分泌大量表皮降解酶降解体壁, 打通侵入通道, 从而成功侵入。而除虫脲恰恰抑制了昆虫体壁主要成分几丁质的合成, 从而使得绿僵菌更加容易侵染, 因此将绿僵菌与除虫脲混用后具有更好的增效作用。使用微生物杀虫剂和昆虫病原菌的混合后相比较化学杀虫剂对环境 and 天敌的影响更小。一般情况下, 化学杀虫剂及其助剂等往往会对病原菌孢子造成伤害, 但是同为生物源的昆虫病原菌通常不会对真菌产生影响 (Zou *et al.*, 2013), 因此试验中所选用的绿僵菌与短稳杆菌混配后增效作用最好。

据调查樟巢螟在大部分地区 1 年发生 2 代, 部分地区存在 3 代 (樊敏等, 2006; 温小玲和吴希从, 2007), 第 1 代整齐, 第 2 代有少数出现世代重叠现象, 7~8 月份幼虫和成虫同时出现。因此最佳防治时间应该为第 1 代幼虫为害期 5~7 月份。本实验所选用的几种药剂对樟巢螟 2~3 龄幼虫均有较好的致死效果。但是由于樟巢螟不同于其他鳞翅目害虫, 其幼虫隐藏于虫苞中, 因此林间防治的时候常规的喷雾方法有时候难以渗入虫苞中, 可考虑将绿僵菌与 3 种杀虫剂混合其制成微胶囊粉剂, 喷粉机喷施粉剂, 操作简单, 并且对环境要求低 (杨华等, 2018)。大面积的林间生物防治技术的研发是下一步需要解决的问题, 因此需要大量培养绿僵菌孢子粉, 而本实验室已经形成了

一套完整的金龟子绿僵菌 Ma09 中试生产工艺, 可大量生产绿僵菌孢子粉。但是对于白僵菌还未形成完整的生产工艺。因此在药剂混配协同作用试验中选择金龟子绿僵菌 Ma09 而没有选择效果更好的白僵菌 GDLY9。

参考文献 (References)

- Deng JR, Sun LH, Bi KK, *et al.* Screening and identification of the entomopathogenic fungus isolated from Egyptian fluted scale *Icerya aegyptiaca* and bioassay of its pathogenicity [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (1): 53–64. [邓嘉茹, 孙龙华, 毕可可, 等. 埃及吹绵蚧昆虫病原真菌的筛选、鉴定及其致病性测定 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (1): 53–64]
- Fan M, Xu WY, Guan LQ, *et al.* Study on occurrence and control of *Orthaga achatina* Bulter and *Moricella rufonota* Rohwer [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2006, 22 (3): 51–54. [樊敏, 徐薇玉, 管丽琴, 等. 樟巢螟、樟叶蜂发生危害和防治技术研究 [J]. 上海农业学报, 2006, 22 (3): 51–54]
- Guan LM, Zhan ZG, Wang JC, *et al.* Isolation and identification of a bacteria pathogen from *Orthaga achatina* and its bioactivity assay [J]. *Jiangxi Science*, 2018, 36 (4): 537–543. [关丽梅, 占智高, 王金昌, 等. 樟巢螟致病菌的分离鉴定及其杀虫活性测定 [J]. 江西科学, 2018, 36 (4): 537–543]
- He J, Jiang ZS. The comparison between the mechanisms of two insect growth regulators [J]. *Pesticides*, 2003, 42 (6): 12–13. [何佳, 蒋志胜. 两类昆虫生长调节剂作用机制的比较 [J]. 农药, 2003, 42 (6): 12–13]
- Jia CS. Calculating the LC_{50} of insecticides with software SPSS [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (3): 414–417. [贾春生. 利用 SPSS 软件计算杀虫剂的 LC_{50} [J]. 应用昆虫学报, 2006, 43 (3): 414–417]
- Lian T, Qin CS, Jie YZ, *et al.* Biological characteristics of six strains of entomophytic fungi and their pathogenicity against *Curculio chinensis* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 642–649. [练涛, 秦长生, 揭育泽, 等. 六株虫生真菌的生物学特性及其对油茶象甲的致病力 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 642–649]
- Liu C, Xie X, Chen Y, *et al.* Study on the pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* to *Sinoxylon japonicum* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (5): 749–755. [刘晨, 谢晓, 陈易彤, 等. 球孢白僵菌和绿僵菌对日本双棘长蠹致病力的研究 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (5): 749–755]
- Liu SS. Efficacy test of 8 000 IU/mg BT powder against *Orthaga achatina* [J]. *Private Science and Technology*, 2009, 23 (5): 84. [刘树生. 8 000 IU/mg 苏云金杆菌可湿性粉剂防治樟巢螟的药效试验 [J]. 民营科技, 2009, 23 (5): 84]
- Qiu HL, Cai WQ, Zhao DY, *et al.* Risk analysis of *Orthaga achatina* in China [J]. *Forest and Environmental Science*, 2016, 32 (6): 29–33. [邱华龙, 蔡卫群, 赵丹阳, 等. 樟巢螟在中国的风险性分析 [J]. 林业与环境科学, 2016, 32 (6): 29–33]
- Sun DY, Hu JH, Shi YL, *et al.* Experiment of 3% high permeation fenoxycarb against *Laelia coenosa candida* [J]. *Forest Pest and Disease*, 2006, 25 (2): 37–39. [孙德莹, 胡建辉, 石跃龙, 等. 3% 高渗苯氧威防治芦毒蛾幼虫的试验 [J]. 中国森林病虫害, 2006, 25 (2): 37–39]
- Tong YH, Li WJ, Ma SJ. Pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* and its crude toxin against *Orthaga achatina* (Lepidoptera: Pyralidae) larvae [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (4): 418–427. [童应华, 李万里, 马淑娟. 金龟子绿僵菌及其粗毒素对樟巢螟幼虫的致病性 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (4): 418–427]
- Wang YC, Li LY, Gong XJ, *et al.* Control effect of six insecticides on *Spodoptera litura* in tea garden [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (15): 145–147. [王迎春, 李兰英, 龚雪蛟, 等. 6 种杀虫剂对茶园斜纹夜蛾的防治效果 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (15): 145–147]
- Wang YS, Wang GX, Su W, *et al.* Efficacy of *Empedobacter brevis* on controlling *Mythimna separate* (Walker) in corn field [J]. *Pesticides*, 2018, 57 (5): 380–382. [王义生, 王广祥, 孙晷, 等. 短稳杆菌对玉米黏虫防治试验 [J]. 农药, 2018, 57 (5): 380–382]
- Wang YY, Li BP, Gao XW, *et al.* Direct impacts of the bacteria *Empedobacter brevis* (GXW15–4) on adult eclosion, fecundity and longevity in *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2014, 30 (5): 606–611. [王以一, 李保平, 高小文, 等. 短稳杆菌对斑痣悬茧蜂成虫羽化、生殖和寿命的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2014, 30 (5): 606–611]
- Wen XL, Wu Xc. Study on *Orthaga achatina* Butier outbreak in east China and its comprehensive control technology [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35 (29): 9309–9310. [温小玲, 吴希从. 华东地区樟巢螟的发生及其综合防治技术研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (29): 9309–9310]
- Wei SJ, Xu FL, Hua FL, *et al.* A camphor insect pest – bionomics of *Orthaga olivacea* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2008, 45 (4): 562–565. [魏书军, 许发良, 滑福林, 等. 香樟害虫—橄榄绿瘤丛螟的生物学特性 [J]. 昆虫知识, 2008, 45 (4): 562–565]
- Wraight SP, Carruthers RI, Bradley CA, *et al.* Pathogenicity of the entomopathogenic fungi *Paecilomyces* spp. and *Beauveria bassiana* against the silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii* [J]. *Journal of Invertebr Pathol*, 1998, 71 (3): 217–226.
- Xu JZ, Qin CS, Yang H, *et al.* Production and dynamic of destruxins from *Metarhizium* spp. [J]. *Forest and Environmental Science*, 2017, 33 (5): 1–5. [徐金柱, 秦长生, 杨华, 等. 绿僵菌产毒素能力及产毒素动态分析 [J]. 林业与环境科学, 2017, 33 (5): 1–5]
- Yang H, Qin CS, Chen YM, *et al.* Persistence of *Metarhizium* (Hypocreales: Clavicipitaceae) and *Beauveria bassiana*

- (Hypocreales: Clavicipitaceae) in tobacco soils and potential as biocontrol Agents of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2019, 48 (1): 147 – 155.
- Yang H, Xu JZ, Zhao DY, *et al.* Evaluation of the potential of *Metarhizium* microcapsules for controlling *Ceracris kiangsu* Tsai [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (4): 553 – 558. [杨华, 徐金柱, 赵丹阳, 等. 绿僵菌微胶囊剂防治黄脊竹蝗的潜力评价 [J]. 中国生物防治学报, 2018, 34 (4): 553 – 558]
- Yang YF, Zhu YL, Wu CD, *et al.* Effects of *Empedobacter brevis* on the control of *Cnaphalocrocis medinalis* on field [J]. *Anhui Agriculture Science Bulletin*, 2016, 22 (22): 81 – 82. [杨延芳, 朱元良, 吴承东, 等. 100 亿/mL 短稳杆菌防治稻纵卷叶螟田间效果试验 [J]. 安徽农学通报, 2016, 22 (22): 81 – 82]
- Yang XJ, Zhang X, Gao TD. Screening test of rain – resistant insecticide for the control of *Orthaga olivacea* [J]. *China Plant Protection*, 2006, 26 (10): 35 – 36. [杨晓娟, 章霞, 高泰东. 农药防治樟巢螟耐雨药剂筛选试验 [J]. 中国植保导刊, 2006, 26 (10): 35 – 36]
- Yao Q, Quan LF, Xu S, *et al.* Effect of diflubenzuron on the chitin biosynthesis pathway in *Conopomorpha sinensis* eggs [J]. *Insect Science*, 2020, 1 – 15.
- Yu HH, Guo W, Li RJ, *et al.* Screening and molecular identification of *Metarhizium* Strains against *Holotrichia oblita* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2014 (6): 834 – 838. [于浩海, 郭巍, 李瑞军, 等. 对华北大黑鳃金龟幼虫高毒力绿僵菌菌株的筛选及分子鉴定 [J]. 中国生物防治学报, 2014, 30 (6): 834 – 838]
- Zang H, Liu TH, Li RJ, *et al.* Screening for high virulence strains of *Metarhizium anisopliae* and yield determination of its extracellular protease [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2013, 15 (2): 183 – 187. [臧欢, 刘廷辉, 李瑞, 等. 高毒力金龟子绿僵菌的筛选及其胞外蛋白酶产量测定 [J]. 农药学报, 2013, 15 (2): 183 – 187]
- Zhang NH, Qian B, Pu ZX. Efficacy of diflubenzuron a kind of insect growth regulators on controlling *Orthaga olivacea* [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 2005, 32 (4): 33 – 53. [张念环, 钱彪, 浦振祥. 灭幼脉Ⅲ号等昆虫生长调节剂防治樟巢螟药效试验 [J]. 江苏林业科技, 2005, 32 (4): 33 – 53]
- Zhao DY, Qin Z, Liao FY, *et al.* Species and damage of pests on *Cinnamomum camphora* in Guangdong province [J]. *Forest Pest and Disease*, 2016, 35 (6): 21 – 26. [赵丹阳, 秦长生, 廖仿炎, 等. 广东省樟树有害生物调查及主要种类危害特点 [J]. 中国森林病虫, 2016, 35 (6): 21 – 26]
- Zou C, Li L, Dong T, *et al.* Joint action of the entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* and four chemical insecticides against the whitefly *Bemisia tabaci* [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2013, 24 (3): 315 – 324.