



利用功能反应模型评价球孢白僵菌对 东亚小花蝽捕食二斑叶螨的影响

陈亚丰^{1,2}, 王 甦², 邸 宁^{2,*}, 金道超^{1,*}

(1. 贵州大学昆虫研究所, 贵州山地农业病虫害重点实验室, 农业农村部贵阳作物有害生物科学观测实验站, 贵阳 550025;
2. 北京市农林科学院植物保护环境保护研究所, 北京 100097)

摘要: 【目的】天敌昆虫和生防菌剂的应用都是害虫生物防治的有效手段, 在生产中通过两者联合进行害虫的生物防治具有极强的应用前景和潜在的防控增效作用, 然而生防菌对天敌的安全性评价是必不可少的。本研究旨在评估球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 与东亚小花蝽 *Orius sauteri* 联合应用进行害虫生物防治的可行性。【方法】测定了东亚小花蝽 5 龄若虫经 2 种不同浓度的球孢白僵菌孢悬液(常规浓度: 1×10^7 孢子/mL; 低浓度: 5×10^3 孢子/mL) 和孢子粉(1×10^7 孢子/头) 处理后成虫羽化率以及经上述处理后的东亚小花蝽 5 龄若虫对不同密度下的二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 雌成螨的捕食能力。【结果】东亚小花蝽 5 龄若虫经白僵菌孢子粉(1×10^7 孢子/头) 处理后, 成虫羽化率显著降低, 其余处理的成虫羽化率与对照无显著差异。3 个处理组中东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食功能反应均符合 Holling II 型, 搜寻效应随猎物密度增加逐渐降低。经低浓度球孢白僵菌孢悬液(5×10^3 孢子/mL) 处理的东亚小花蝽 5 龄若虫的理论日最大捕食量(N_{a-max}) 最高, 猎物处理时间最短(T_h), 搜寻效应回归线随猎物密度增加下降趋势最小; 而球孢白僵菌孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫理论日最大捕食量最低, 猎物处理时间最长。【结论】低浓度的白僵菌孢悬液对东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食能力无影响, 而孢子粉对该天敌 5 龄若虫捕食二斑叶螨雌成螨造成不利影响。本研究初步证明低浓度白僵菌孢悬液与东亚小花蝽联合应用防控二斑叶螨具有可行性。

关键词: 东亚小花蝽; 二斑叶螨; 球孢白僵菌; 生防菌; 天敌昆虫; Holling 模型; 搜寻效应; 生物防治

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2021)08-0967-09

Evaluation of the effects of *Beauveria bassiana* on the predation of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) by *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae) using functional response model

CHEN Ya-Feng^{1,2}, WANG Su², DI Ning^{2,*}, JIN Dao-Chao^{1,*} (1. Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Guiyang, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Region, Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Plant and Environment Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract 【Aim】The application of natural enemies and biocontrol bacteria are effective means of pest

基金项目: 北京市农林科学院青年科学基金项目(QNJJ201917); 北京市优秀人才培养资助项目(2018000020060G181); 国家自然科学基金青年基金项目(1901945); 北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20200420); 北京市科技计划项目(Z201100008020014)

作者简介: 陈亚丰, 男, 1995 年 12 月生, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: gs.chenyf18@gzu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: dining@ipepbaafs.cn; daochaojin@126.com

收稿日期 Received: 2021-01-05; 接受日期 Accepted: 2021-03-13

biological control, and the combined application of the two kinds of agents have strong application prospects and potential of synergistic effect on biological control in the production. However, it is essential to evaluate the safety of biocontrol bacteria on natural enemies. This study aims to assess the biocontrol potential of combined release of *Beauveria bassiana* and *Orius sauteri* for biological control of pests. **【Methods】** We measured the emergence rate of *O. sauteri* adults after the 5th instar nymphs were treated with two different concentrations of *B. bassiana* spore suspensions (routine concentration: 1×10^7 conidia/mL; low concentration: 5×10^3 conidia/mL) and spore powder (1×10^7 conidia/individual) and the predation ability of the 5th instar nymphs of *O. sauteri* subjected to the above treatments to female adults of *Tetranychus urticae* under different prey densities. **【Results】** The emergence rate of *O. sauteri* adults was significantly reduced after the 5th instar nymphs were treated with *B. bassiana* spore powder (1×10^7 conidia/individual), and there was no significant difference in adult emergence rate between the other treatments and control. The predation of the 5th instar nymphs of *O. sauteri* in the three treatment groups on female adults of *T. urticae* fitted with Holling II functional response models, and the searching efficiency reduced with the increasing of prey densities. Specifically, the 5th instar nymphs of *O. sauteri* treated with *B. bassiana* spore suspension at a low concentration (5×10^3 conidia/mL) showed the highest daily maximal predation amount (N_{a-max}) and the shortest handling time (T_h), and the regression of searching efficiency showed the lowest decreasing trend with the increasing of prey density. However, the 5th instar nymphs of *O. sauteri* treated with *B. bassiana* spore powder had the lowest N_{a-max} and the longest T_h . **【Conclusion】** Low concentration of *B. bassiana* spore suspension does not affect the predation ability of the 5th instar nymphs of *O. sauteri* on female adults of *T. urticae*, but spore powder treatment causes adverse effect to the predation ability of the 5th instar nymphs of this natural enemy on female adults of *T. urticae*. This study preliminarily demonstrated the feasibility of the combined application of low concentration of *B. bassiana* spore suspension and *O. sauteri* on the control of *T. urticae*.

Key words: *Orius sauteri*; *Tetranychus urticae*; *Beauveria bassiana*; biocontrol bacterium; natural enemy; Holling model; searching efficiency; biological control

利用天敌昆虫对害虫进行生物防治可有效避免化学投入品带来的害虫抗药性和环境污染等问题(陈学新, 2010)。不同天敌的混合释放可以在增加群落稳定性的同时减少天敌种群的自然衰退, 因此天敌的联合应用对于降低虫害造成的产量损失具有潜在增效作用(Heimple and Mills, 2008; 李姝等, 2014)。目前, 不同天敌的联合应用包括多种天敌昆虫混合释放和利用天敌昆虫携带生防菌进行防控增效, 而天敌之间的兼容性是影响防治效果的重要因素(Chow *et al.*, 2008; 吴圣勇等, 2019)。

白僵菌 *Beauveria* spp. 是广谱性的昆虫病原微生物, 可以寄生鳞翅目、鞘翅目、半翅目和膜翅目等 15 目 149 科 700 多种昆虫和蛱蝶类(季香云和杨长举, 2003)。白僵菌因具有寄主范围广、致病性较强等优点, 已成为害虫生物防治中应用最为广泛的虫生真菌之一(高红等, 2011; 郭涵等, 2020)。然而白僵菌也有一定局限性, 因为杀虫谱较广的病原微生物在杀死害虫的同时, 也可能会对天敌昆虫产生

负面影响(Ong and Vandermeer, 2015; 杨清碰和李莉, 2017; 吴圣勇等, 2019)。有研究表明, 用白僵菌孢子悬液 (1×10^7 孢子/mL) 处理松墨天牛 *Monochamus alternatus* 寄生性天敌管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani* 7 d 后, 天敌死亡率高达 100% (杨清碰和李莉, 2017)。然而 Wu 等 (2016) 研究表明施用白僵菌对捕食性天敌巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* 的种群密度没有影响; 杨芷等 (2020) 发现白僵菌孢子对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 的羽化时间和羽化率等无不良影响。因此系统性地评价白僵菌对天敌的影响是白僵菌与天敌昆虫联合应用的前提。

二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 是一种重要的世界性害螨, 世代周期短, 寄主范围广。由于化学药剂长期大量的不合理使用导致该螨对多种杀螨剂产生不同程度的抗性, 因此通过生物防治来降低二斑叶螨的危害变得更加重要(宫亚军等, 2014)。东亚小花螨 *Orius sauteri* 作为一种重要的生防天敌(Wang *et al.*,

2019) 在我国分布范围广、适应性强,其对叶螨、蓟马和粉虱等害虫的防治效果已在温室和田间得到广泛证实(蒋月丽等,2011;尹健等,2013;Wang et al.,2014)。

目前针对白僵菌与小花蝽属天敌联合应用防治害虫的研究较少。Gao 等(2012)研究表明,无论用白僵菌孢悬液直接施用于东亚小花蝽,还是用白僵菌处理过的西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 饲喂东亚小花蝽均不会对其生长发育造成影响,但该研究未评价白僵菌对东亚小花蝽捕食能力的影响。Shipp 等(2003)研究表明美洲小花蝽 *O. insidiosus* 成虫不应与球孢白僵菌在温室中联合释放应用,然而该研究仅使用了单一浓度的孢子悬浮液。本研究通过比较经球孢白僵菌 *B. bassiana* 孢子粉与不同浓度的孢子悬浮液处理后的东亚小花蝽羽化率以及捕食二斑叶螨的功能反应模型评价白僵菌对东亚小花蝽的安全性,以期东亚小花蝽与白僵菌温室联合释放应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

东亚小花蝽采自北京市农林科学院玉米试验田,在人工气候箱(三洋, MH351)(温度 $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 相对湿度 $60\% \pm 5\%$,光周期 16L:8D,光照强度 800 lx)中饲养 20 代以上,所用饲养猎物为经紫外光照射 30 min 杀胚处理过的新鲜米蛾 *Corcyra cephalonica* 卵。选取同日孵化的东亚小花蝽,待若虫生长至 5 龄第 1 天,随机选择作为试验材料,试验前饥饿处理 12 h。

二斑叶螨雌成螨于 2019 年 8 月自北京市农林科学院玉米试验田采集,将分离鉴定后的 200 头雌成螨在温室(温度 $27 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 $40\% \pm 5\%$)内用盆栽芸豆 *Phaseolus vulgaris* 饲养扩繁。扩繁过程中每隔 10 d 将带螨的叶片从芸豆苗剪下,转移到新的芸豆上,以保证叶螨食物充足。

供试球孢白僵菌菌种(菌株号: D1-5)由吉林省农业科学院提供,浓度为 500 亿个孢子/g。

1.2 不同球孢白僵菌处理的东亚小花蝽羽化率测定

试验包括以下处理:(1)空白对照,即未经处理过的东亚小花蝽 5 龄若虫;(2)阴性对照,东亚小花蝽 5 龄若虫用 5 mL 含 0.05% 吐温 80(国药集团化学试剂有限公司)的无菌水浸泡 5 s;(3)孢子粉处理,参照杨清碰和李莉(2017)的方法并加以改进,

具体为将 0.5 g 球孢白僵菌孢子粉均匀撒在直径 9 cm 的培养皿中,让 1 头东亚小花蝽 5 龄若虫在培养皿上爬行 5 min,平均每头小花蝽附着孢子数约为 1×10^7 个;(4)常规浓度孢悬液处理,即用 5 mL 推荐浓度 1×10^7 孢子/mL 的孢悬液(吴圣勇,2014)将东亚小花蝽 5 龄若虫浸泡 5 s;(5)采用低浓度(5×10^3 孢子/mL)孢悬液浸泡东亚小花蝽 5 龄若虫,方法同上。其中常规浓度和低浓度的球孢白僵菌孢悬液均由含 0.05% 吐温 80 的无菌水配制。孢子粉处理的东亚小花蝽带菌量为常规浓度孢悬液处理带菌量的 2 000 倍,常规浓度孢悬液处理的东亚小花蝽带菌量为低浓度孢悬液处理带菌量的 2 000 倍。东亚小花蝽经不同处理的带菌量计算方法如下:带菌量=(小花蝽处理后重量-小花蝽处理前重量)×浓度;各处理下选取 15 头东亚小花蝽 5 龄若虫的数值取平均值。

将上述 5 种处理的东亚小花蝽 5 龄若虫置于透明的塑料养虫盒中,每盒 20 头。养虫盒为直径 10 cm、高 8 cm 的圆柱形。为保证养虫盒通风,盒盖用直径为 9 cm 的 100 目纱网封住。每个养虫盒中放入足量米蛾卵(处理同 1.1 节)作为东亚小花蝽的食物。5 d 后统计东亚小花蝽成虫羽化率(羽化率=羽化数/20×100%)。各处理重复 5 次。

1.3 不同球孢白僵菌处理的东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨的捕食能力测定

东亚小花蝽处理同 1.2 节。猎物密度设置为 10,20,30,40,50,60 和 70 头/皿共 7 个梯度水平。用毛笔将相应数量的二斑叶螨雌成螨转移至直径 9 cm 的培养皿中,然后将 1 头饥饿处理 12 h 的东亚小花蝽 5 龄若虫放入培养皿,盖上皿盖后用封口膜(BEMIS,美国)封住,以防止东亚小花蝽和二斑叶螨逃逸。随后将培养皿置于人工气候箱(条件同 1.1 节)24 h 后观察统计各猎物密度及不同处理下存活的叶螨数量,并计算东亚小花蝽的捕食量(捕食量=初始叶螨数量-存活叶螨数量)。以只放入叶螨而不放入东亚小花蝽的培养皿为空白对照来校正实际的捕食量(实际捕食量=观测捕食量-空白对照死亡量)。各处理重复 10 次。

1.4 不同球孢白僵菌处理的东亚小花蝽对二斑叶螨的捕食功能反应模型分析

使用 1.3 节中得到的数据拟合 Holling II 型功能反应模型。模型方程为: $N_a = a'T_r N / (1 + a'T_h N)$ (Holling, 1959)。式中 N 为猎物密度, N_a 为相应密度下的捕食量, a' 为瞬间攻击率, T_r 为捕食者可利用

的总时间(本研究为 1 d), T_h 为平均处理时间(即捕食者捕食 1 头猎物所消耗的时间)。

1.5 不同球孢白僵菌处理的东亚小花蝽对二斑叶螨的搜寻效应分析

利用 1.4 节中拟合 Holling II 型功能反应模型所得参数,对东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的搜寻效应依公式进行估算: $S = a'/(1 + a' T_h N)$ 。式中 S 为搜寻效应值, N 为猎物密度, a' 及 T_h 同 Holling II 型功能反应模型方程。

1.6 数据分析

采用 R(v. 4.0.0) 对东亚小花蝽的校正捕食量与猎物密度和处理之间的关系进行双因素方差分析(two-way ANOVA; 其中东亚小花蝽的校正捕食量为因变量,猎物密度和处理为自变量,考虑自变量之间的交互作用),评估处理和猎物密度以及它们的交互效应对东亚小花蝽 5 龄若虫捕食量影响的显著性。利用 SPSS 26.0(IBM) 进行卡方检验来验证不同处理的东亚小花蝽对二斑叶螨的取食是否拟合 Holling II 功能反应模型。采用单因素方差分析(one-way ANOVA) 检验白僵菌处理对东亚小花蝽羽化率影响的显著性,分析之前先对羽化率百分比数据进行反正弦平方根转换。采用 Tukey HSD 法比较东亚小花蝽羽化率在不同处理之间、同一猎物密度下捕食量的差异显著性。所有分析中差异显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理对东亚小花蝽羽化率的影响

球孢白僵菌孢悬液(常规浓度: 1×10^7 孢子/mL; 低浓度: 5×10^3 孢子/mL) 和孢子粉(1×10^7 孢子/头) 处理对东亚小花蝽羽化率具显著影响($F = 11.121$, $df = 4, 24$, $P < 0.001$)。未羽化的东亚小花蝽在羽化前死亡。其中用孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫,其成虫羽化率最低,其余 4 组间无显著性差异($P > 0.05$) (图 1)。

2.2 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食能力

东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食量受猎物密度、处理以及猎物密度与处理的交互作用影响显著(猎物密度: $F = 489.061$, $df = 6, 315$, $P < 0.001$; 处理: $F = 44.041$, $df = 4, 315$, $P < 0.001$; 猎物密度 $\times$ 处理: $F = 2.724$, $df = 24, 315$,

$P < 0.001$)。除猎物密度为 10 头外,球孢白僵菌孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食量均显著低于阴性对照和空白对照($P < 0.05$)。在猎物密度为 50 头/皿时 2 个浓度孢悬液处理中东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食量均显著低于空白对照($P < 0.05$),但与阴性对照无显著差异($P > 0.05$);但在其他 6 个猎物密度下 2 个浓度孢悬液处理中东亚小花蝽 5 龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食量与空白和阴性对照均无显著差异($P > 0.05$) (图 2)。

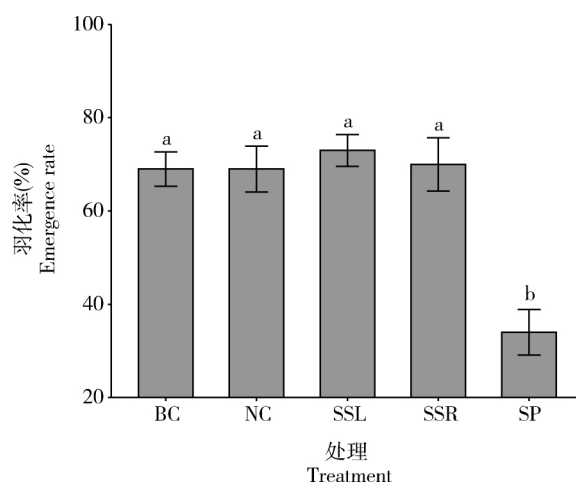


图 1 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理对东亚小花蝽成虫羽化率的影响

Fig. 1 Effect of spore suspension and spore powder of *Beauveria bassiana* on the emergence rate of *Orius sauteri* adults

BC: 空白对照 Blank control; NC: 阴性对照(含 0.05% 吐温 80 的无菌水) Negative control (sterile water containing 0.05% Tween-80); SSL: 球孢白僵菌孢悬液(5×10^3 孢子/mL) *B. bassiana* spore suspension (5×10^3 conidia/mL); SSR: 球孢白僵菌孢悬液(1×10^7 孢子/mL) *B. bassiana* spore suspension (1×10^7 conidia/mL); SP: 球孢白僵菌孢子粉(1×10^7 孢子/头) *B. bassiana* spore powder (1×10^7 conidia/individual). 下同 The same below. 东亚小花蝽 5 龄若虫经 2 种不同浓度的球孢白僵菌孢悬液(常规浓度: 1×10^7 孢子/mL; 低浓度: 5×10^3 孢子/mL) 和孢子粉(1×10^7 孢子/头) 处理 5 d 后统计成虫羽化率。图中数据为平均值 $\pm$ 标准误; 柱上不同字母表示羽化率在不同处理间差异显著($P < 0.05$, Tukey HSD 法)。The 5th instar nymphs of *O. sauteri* were treated with two different concentrations of *B. bassiana* spore suspensions (routine concentration: 1×10^7 conidia/mL; low concentration: 5×10^3 conidia/mL) and spore powder (1×10^7 conidia/individual). The adult emergence rate was counted at 5 d after treatment. Data in the figure are means $\pm$ SE. Different letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, Tukey HSD test).

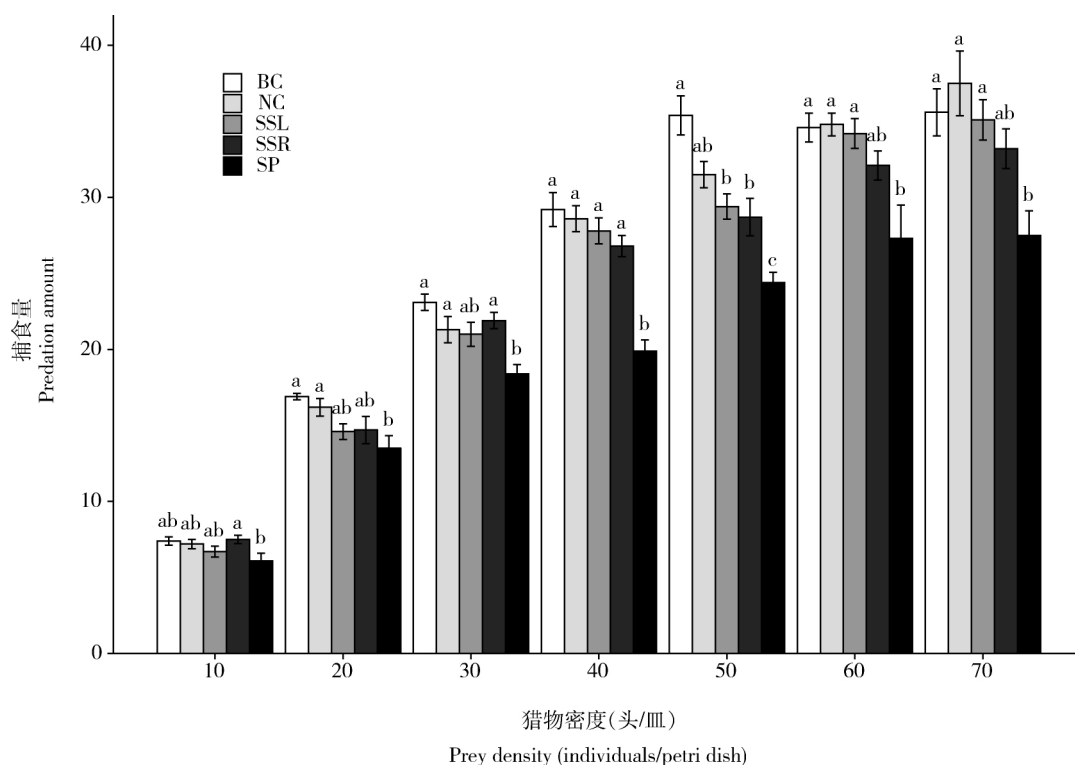


图2 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽5龄若虫在二斑叶螨雌成螨不同密度下的捕食量

Fig. 2 Predation amounts of female adults of *Tetranychus urticae* by the 5th instar nymphs of *Orius sauteri* treated with spore suspension and spore powder of *Beauveria bassiana* under different prey densities

图中数据为平均值 ± 标准误; 柱上不同字母表示在同一猎物密度下不同处理间捕食量差异显著 ($P < 0.05$, Tukey HSD 法)。Data in the figure are means ± SE. Different letters above bars indicate that the predation amounts were significantly different among treatments under the same prey density ($P < 0.05$, Tukey HSD test).

2.3 白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽对二斑叶螨雌成螨的捕食功能反应模型

球孢白僵菌孢悬液(常规浓度: 1×10^7 孢子/mL; 低浓度: 5×10^3 孢子/mL)和孢子粉(1×10^7 孢子/头)处理的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食能力均符合Holling II型功能反应($R^2 > 0.9$, $P > 0.05$)。表1中不同处理下东亚小花蝽的实际捕食量与理论值差异均不显著($P > 0.05$)。其中低浓度孢悬液处理的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成虫的理论日最大捕食量最高(略高于空白对照组)猎物处理时间最短;而常规浓度孢悬液处理的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成虫的理论日最大捕食量低于前者,猎物处理时间长于前者。此外,孢子粉处理的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成虫的日最大捕食量最低,猎物处理时间最长。

2.4 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成螨的搜寻效应

根据功能反应参数计算出不同处理、不同猎物密度下东亚小花蝽5龄若虫的搜寻效应指数(图3)。在

不同处理下,东亚小花蝽5龄若虫的搜寻效应随猎物密度的增加而呈线性趋势下降(空白对照: $y = -0.0020x + 0.7812$; 阴性对照: $y = -0.0020x + 0.7566$; 低浓度孢悬液: $y = -0.0014x + 0.6984$; 常规浓度孢悬液: $y = -0.0037x + 0.7870$; 孢子粉: $y = -0.0029x + 0.6500$)。用低浓度孢子悬浮液处理的东亚小花蝽5龄若虫捕食二斑叶螨雌成螨时搜寻效应随猎物密度增加下降趋势最缓。

3 讨论

广谱性病原微生物通常会对天敌昆虫造成不良影响,从而限制其与天敌昆虫联合应用的防治效果(Ong and Vandermeer, 2015)。本研究结果中,用球孢白僵菌孢子粉处理后的东亚小花蝽成虫羽化率最低,理论日最大捕食量最低,单头猎物处理时间最长(表1);与空白对照相比,孢子粉处理对东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨的捕食量影响显著(图2),这表明孢子粉对该天敌的捕食行为有不利影响。虽然经低浓度孢悬液处理后的东亚小花蝽5龄若虫对二

表 1 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫对二班叶螨雌成螨的捕食功能反应模型

Table 1 Functional response models of the 5th instar nymphs of *Orius sauteri* treated with spore suspension and spore powder of *Beauveria bassiana* preying on female adults of *Tetranychus urticae*

处理 Treatment	功能反应方程 Functional response equation	R^2	瞬间攻击率 Instantaneous attack rate a'	处理时间 Handling time T_h	理论日最大捕食量 Daily maximal predation amount N_{a-max}^*	χ^2	P
球孢白僵菌孢子粉(1×10^7 孢子/头) <i>B. bassiana</i> spore powder (1×10^7 conidia/individual)	$N_a = 0.67N / (1 + 0.006N)$	0.9838	0.6722	0.0101	66.56	2.333	0.887
球孢白僵菌孢悬液(1×10^7 孢子/mL) <i>B. bassiana</i> spore suspension (1×10^7 conidia/mL)	$N_a = 0.82N / (1 + 0.007N)$	0.9941	0.8176	0.0090	90.84	2.213	0.899
球孢白僵菌孢悬液(5×10^3 孢子/mL) <i>B. bassiana</i> spore suspension (5×10^3 conidia/mL)	$N_a = 0.70N / (1 + 0.002N)$	0.9911	0.7023	0.0034	206.56	2.948	0.815
空白对照 Blank control	$N_a = 0.79N (1 + 0.003N)$	0.9835	0.7885	0.0040	197.13	2.770	0.837
阴性对照(含 0.05% 吐温 80 的无菌水) Negative control (sterile water containing 0.05% Tween-80)	$N_a = 0.76N / (1 + 0.003N)$	0.9890	0.7641	0.0043	177.70	2.770	0.837

* $N_{a-max} = a' / T_h$.

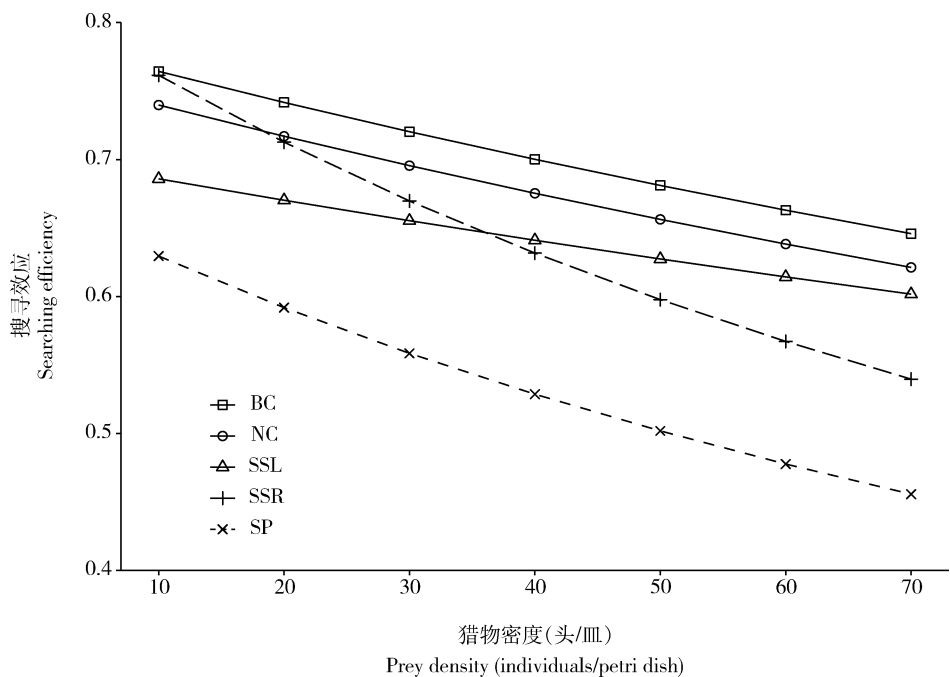


图 3 球孢白僵菌孢悬液和孢子粉处理的东亚小花蝽 5 龄若虫在不同猎物密度下对二班叶螨雌成螨的搜寻效应

Fig. 3 The searching efficiency of the 5th instar nymphs of *Orius sauteri* treated with spore suspension and spore powder of *Beauveria bassiana* to the female adults of *Tetranychus urticae* under different prey densities

斑叶螨雌成螨的实际捕食量略低于空白对照,但该处理下的理论日最大捕食量高于空白对照,单头猎物处理时间最短,且搜寻效应指数随猎物密度升高下降趋势最缓(表 1; 图 3)。除球孢白僵菌孢子粉处理外,其余各处理下东亚小花蝽的羽化率无显著差异(图 1)。因此,白僵菌对天敌的施用方式和浓

度选择是影响联合应用防效的重要因素。

通过拟合功能反应模型,比较功能反应参数可以直观地了解高营养级的天敌昆虫对靶标害虫的控制潜能(王甦等,2014)。本研究结果表明,经不同剂型和浓度球孢白僵菌处理后的东亚小花蝽5龄若虫对二斑叶螨雌成螨的捕食功能反应均符合Holling II型圆盘方程(表1),即捕食量随猎物密度的上升而上升,当猎物密度达到一定程度时捕食量不再增加。这与东亚小花蝽对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*(代晓彦等,2020;孙贝贝等,2020)、桃蚜 *Myzus persicae*(邢秀霞等,2010)、西花蓟马 *F. occidentalis*(张安盛等,2008)和大豆蚜 *Aphis glycines*(韩岚岚等,2015)的捕食功能反应结果趋势一致。

白僵菌在实际应用过程中常需人工抛洒或机器施药,药液或菌粉喷洒于植物叶面,而害虫产卵一般主要在叶背,导致施用效率低等问题(杨芷等,2020)。而天敌昆虫具有极强的活动和搜寻能力,作为生物防治的一项重要组成部分,在农业可持续发展中具有显著的专业优势(张帆等,2015)。Zhang等(2016,2018)等用虫生真菌环链棒束孢 *Isaria catenianulata*与尼氏真绥螨 *Euseius nicholsi*联合释放防治二斑叶螨,发现环链棒束孢的孢子能大量附着在二斑叶螨身体各部,侵入体内致其死亡,虽有少量孢子可附于尼氏真绥螨足上,有的孢子也能产生芽管,但不能侵入尼氏真绥螨体内(Zhang *et al.*,2018);环链棒束孢与尼氏真绥螨联合较单一使用更能有效控制二斑叶螨田间种群(Zhang *et al.*,2016)。东亚小花蝽体型小、活动能力强,常出现在叶片背面和结构复杂的花里。通过天敌携带白僵菌,利用其主动搜索和扩散能力,能够在天敌捕食害虫的同时,将白僵菌携带至药液不易喷洒的地方,从而实现对害虫的持续防控,提高二者的应用效率(孙光芝等,2004;Wu *et al.*,2016;吴圣勇等,2019)。本研究结果中低浓度球孢白僵菌孢悬液对东亚小花蝽的羽化率无显著影响(图1),且与对照相比,其捕食能力未受影响(图2),因此通过东亚小花蝽携带球孢白僵菌来防治二斑叶螨具有可行性。

本研究初步证明了低浓度球孢白僵菌孢悬液处理东亚小花蝽后,其羽化率以及对二斑叶螨雌成虫的捕食能力未受显著影响。与田间推荐浓度的球孢白僵菌孢悬液相比,该低浓度孢悬液对东亚小花蝽较为安全,表明二者联合应用防治二斑叶螨具有潜在的实用价值。本研究是在可控条件下开展的,而

在田间白僵菌的毒力会受到多种因素的影响(季香云和杨长举,2003;全亚娟等,2010),天敌的定殖是否受到影响仍有待进一步研究,所以需要进一步开展田间安全性和有效性评价试验来挖掘利用东亚小花蝽携带白僵菌的控害效果。

致谢 感谢吉林省农业科学院徐文静老师提供球孢白僵菌菌种。

参考文献 (References)

- Chen XX, 2010. Recent progress, existing problems and prospects in biological control of insect pests in China. *Chin. Bull. Entomol.*, 47 (4): 615–625. [陈学新, 2010. 21世纪我国害虫生物防治研究的进展、问题与展望. 昆虫知识, 47(4): 615–625]
- Chow A, Chau A, Heinz KM, 2008. Compatibility of *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae) with *Amblyseius (Iphiseius) degenerans* (Acari: Phytoseiidae) for control of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) on greenhouse roses. *Biol. Control*, 44 (2): 259–270.
- Dai XY, Wang Y, Zhai YF, Zhou H, Li LL, Zheng L, Chen H, 2020. Predation capability of *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae) on the 1st instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomol. Sin.*, 63(5): 649–654. [代晓彦, 王瑜, 翟一凡, 周浩, 李丽莉, 郑礼, 陈浩, 2020. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾1龄幼虫的捕食能力. 昆虫学报, 63(5): 649–654]
- Gao H, Zhang R, Wan YJ, 2011. Advance of studies on classification of genus *Beauveria*. *Sci. Seric.*, 37(4): 730–736. [高红, 张冉, 万永继, 2011. 白僵菌的分类研究进展. 蚕业科学, 37(4): 730–736]
- Gao YL, Reitz SR, Wang J, Tamez-Guerra P, Wang ED, Xu XN, Lei ZR, 2012. Potential use of the fungus *Beauveria bassiana* against the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* without reducing the effectiveness of its natural predator *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae). *Biocontrol Sci. Technol.*, 22(7): 803–812.
- Gong YJ, Wang ZH, Shi BC, Cui WX, Jin GH, Sun YY, Wei SJ, 2014. Sensitivity of different field populations of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) to the acaricides in Beijing area. *Sci. Agric. Sin.*, 47(15): 2990–2997. [宫亚军, 王泽华, 石宝才, 崔文夏, 金桂华, 孙艳艳, 魏书军, 2014. 北京地区二斑叶螨不同种群的药剂敏感性. 中国农业科学, 47(15): 2990–2997]
- Guo H, Liu ZD, Sun JH, 2020. Effects of spore suspension concentration and host body size on the pathogenicity of *Beauveria bassiana* against *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae. *Acta Entomol. Sin.*, 63(7): 835–842. [郭涵, 刘柱东, 孙江华, 2020. 孢悬液浓度和宿主体型大小对球孢白僵菌对松墨天牛幼虫的致病力的影响. 昆虫学报, 63(7): 835–842]
- Han LL, Dong TY, Zhao KJ, Zhu MH, Sun WP, Xu ZX, Shi L, 2015. Predation of *Aphis glycines* by *Orius sauteri* nymphs. *Chin. J. Biol.*

- Control, 31(3): 322–326. [韩岚岚, 董天宇, 赵奎军, 朱明贺, 孙文鹏, 徐忠新, 石磊, 2015. 东亚小花蝽若虫对大豆蚜捕食功能的研究. 中国生物防治学报, 31(3): 322–326]
- Heimpel GE, Mils N, 2008. Biological Control: Ecology and Applications. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Holling CS, 1959. The components of predation as revealed by a study of small-mammal predation of the European pine sawfly. *Can. Entomol.*, 91(5): 293–320.
- Ji XY, Yang CJ, 2003. Infection and application of *Beauveria* spp. *Chin. J. Biol. Control*, 19(2): 82–85. [季香云, 杨长举, 2003. 白僵菌的致病性与应用. 中国生物防治, 19(2): 82–85]
- Jiang YL, Wu YQ, Duan Y, Gao XG, 2011. Control efficiencies of releasing *Orius sauteri* (Heteroptera: Anthocoridae) on some pests in greenhouse pepper. *Chin. J. Biol. Control*, 27(3): 414–417. [蒋月丽, 武予清, 段云, 高新国, 2011. 释放东亚小花蝽对大棚辣椒上几种害虫的防治效果. 中国生物防治学报, 27(3): 414–417]
- Li S, Lao SB, Wang S, Guo XJ, Zhang F, 2014. Control effect of *Orius sauteri* collaborated with *Encarsia formosa* on *Bemisia tabaci* in the greenhouse. *J. Environ. Entomol.*, 36(6): 978–982. [李姝, 劳水兵, 王甦, 郭晓军, 张帆, 2014. 东亚小花蝽和丽蚜小蜂对烟粉虱的协同控制效果研究. 环境昆虫学报, 36(6): 978–982]
- Ong TWY, Vandermeer JH, 2015. Coupling unstable agents in biological control. *Nat. Commun.*, 6(1): 5991.
- Shipp JL, Zhang Y, Hunt DWA, Ferguson G, 2003. Influence of humidity and greenhouse microclimate on the efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) for control of greenhouse arthropod pests. *Environ. Entomol.*, 32(5): 1154–1163.
- Sun BB, Hou ZR, Dong M, Li JP, Guo XH, Yin Z, 2020. Functional response of *Orius sauteri* to the 1st-instar larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *J. Plant Prot.*, 47(4): 845–851. [孙贝贝, 侯峥嵘, 董民, 李金萍, 郭喜红, 尹哲, 2020. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食作用. 植物保护学报, 47(4): 845–851]
- Sun GZ, Zhang JJ, Ruan CC, Li DJ, 2004. Selection of bacterium-carrying methods of *Trichogramma* and efficacy of *Ostrinia furnacalis* control. *J. Jilin Agric. Univ.*, 26(2): 138–141. [孙光芝, 张俊杰, 阮长春, 李大军, 2004. 赤眼蜂载菌方式筛选及田间防治玉米螟效果. 吉林农业大学学报, 26(2): 138–141]
- Tong YJ, Wu KM, Lu YH, Gao XW, 2010. Pathogenicity of *Beauveria* spp. strains to three species of mirids, *Apolygus lucorum*, *Adelphocoris suturalis* and *Adelphocoris lineolatus*. *J. Plant Prot.*, 37(2): 172–176. [全亚娟, 吴孔明, 陆宴辉, 高希武, 2010. 白僵菌对盲蝽的致病性. 植物保护学报, 37(2): 172–176]
- Wang S, Michaud JP, Tan XL, Zhang F, 2014. Comparative suitability of aphids, thrips and mites as prey for the flower bug *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae). *Eur. J. Entomol.*, 111(2): 221–226.
- Wang S, Zhao J, Zhang F, Guo XJ, 2014. Evaluation of potential management of *Bemisia tabaci* by two parasitoids mixed population via functional response model. *J. Environ. Entomol.*, 36(2): 188–193. [王甦, 赵静, 张帆, 郭晓军, 2014. 利用功能反应模型评价两种寄生蜂混合释放对烟粉虱的防控潜能. 环境昆虫学报, 36(2): 188–193]
- Wang SX, Di N, Chen X, Zhang F, Biondi A, Desneux N, Wang S, 2019. Life history and functional response to prey density of the flower bug *Orius sauteri* attacking the fungivorous sciarid fly *Lycoriella pleuroti*. *J. Pest Sci.*, 92: 715–722.
- Wu SY, 2014. Interactions among *Beauveria bassiana*, *Neoseiulus barkeri* and *Frankliniella occidentalis*. PhD Dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. [吴圣勇, 2014. 白僵菌、巴氏新小绥螨和西花蓟马间的互作关系研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文]
- Wu SY, Gao YL, Smagghe G, Xu XN, Lei ZR, 2016. Interactions between the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*, and the predatory mite *Neoseiulus barkeri*, and biological control of their shared prey/host *Frankliniella occidentalis*. *Biol. Control*, 98: 43–51.
- Wu SY, Yang QP, Xu CC, Xu XN, Lei ZR, 2019. Research prospect in interactions between entomopathogenic fungi and predatory mites and their combined applications. *Chin. J. Biol. Control*, 35(1): 127–133. [吴圣勇, 杨清坡, 徐长春, 徐学农, 雷仲仁, 2019. 昆虫病原真菌和捕食螨间的互作关系及二者联合应用研究进展. 中国生物防治学报, 35(1): 127–133]
- Xing XX, Wang JZ, Qin HY, Zhang XM, Duan LQ, 2010. Biological characteristics of *Orius sauteri* and its functional response to peach aphid. *J. Inner Mongolia Agric. Univ.*, 31(4): 47–50. [邢秀霞, 王建忠, 秦海英, 张晓敏, 段立清, 2010. 东亚小花蝽的生物学特性及其对桃蚜的功能反应. 内蒙古农业大学学报, 31(4): 47–50]
- Yang QP, Li L, 2017. Negative influence of *Beauveria bassiana* infection on female adults of a cryptoparasitoid *Scleroderma guani* (Hymenoptera: Bethyidae). *Acta Entomol. Sin.*, 60(1): 53–59. [杨清碰, 李莉, 2017. 球孢白僵菌侵染对管氏肿腿蜂雌成蜂的不利影响. 昆虫学报, 60(1): 53–59]
- Yang Z, Lu Y, Zhang QH, Mao G, Xu WJ, Zhao Y, Sui L, Cui LL, Zhang ZK, Li QY, 2020. Using fluorescence observation to clarify the synergistic control of Asian corn borer by *Trichogramma dendrolimi* phoretic biological pesticide. *Chin. J. Biol. Control*, 36(1): 58–64. [杨芷, 路杨, 张庆贺, 毛刚, 徐文静, 赵宇, 隋丽, 崔璐璐, 张正坤, 李启云, 2020. 利用荧光观测明确球孢白僵菌松毛虫赤眼蜂对亚洲玉米螟的防控增效作用. 中国生物防治学报, 36(1): 58–64]
- Yin J, Gao XG, Wu YQ, Jiang YL, Liu ST, Duan AJ, Zhang ZQ, Liu CY, 2013. Thrips control on the greenhouse eggplant by releasing *Orius sauteri* (Heteroptera: Anthocoridae). *Chin. J. Biol. Control*, 29(3): 459–462. [尹健, 高新国, 武予清, 蒋月丽, 刘顺通, 段爱菊, 张自启, 刘长营, 2013. 释放东亚小花蝽对茄子上蓟马的控制效果. 中国生物防治学报, 29(3): 459–462]
- Zhang AS, Yu Y, Men XY, Li LL, 2008. Predation of *Orius sauteri* nymphs on *Frankliniella occidentalis* nymphs. *Acta Phytophy. Sin.*, 35(1): 7–11. [张安盛, 于毅, 门兴元, 李丽莉, 2008. 东亚小花蝽若虫对西花蓟马若虫的捕食作用. 植物保护学报, 35

(1): 7 – 11]

Zhang F , Li S , Xiao D , Zhao J , Wang R , Guo XJ , Wang S , 2015.

Progress in pest management by natural enemies in greenhouse vegetables in China. *Sci. Agric. Sin.* , 48(17) : 3463 – 3476. [张帆 , 李妹 , 肖达 , 赵静 , 王然 , 郭晓军 , 王甦 , 2015. 中国设施蔬菜害虫天敌昆虫应用研究进展. *中国农业科学* , 48(17) : 3463 – 3476]

Zhang XN , Guo JJ , Zou X , Jin DC , 2018. Pathogenic differences of the entomopathogenic fungus *Isaria cateniannulata* to the spider mite

Tetranychus urticae (Trombidiformes: Tetranychidae) and its predator *Euseius nicholsi* (Mesostigmata: Phytoseiidae) . *Exp. Appl. Acarol.* , 75(1) : 69 – 84.

Zhang XN , Jin DC , Zou X , Guo JJ , 2016. Laboratory and Field evaluation of an entomopathogenic fungus , *Isaria cateniannulata* strain 08XS-1 , against *Tetranychus urticae* (Koch) . *Pest Manag. Sci.* , 72(5) : 1059 – 1066.

(责任编辑: 赵利辉)