

DOI: 10.5846/stxb202110092804

李贤, 朱俊洪, 叶政培, 陈俊谕, 符悦冠, 张方平. 蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的控制作用. 生态学报, 2022, 42(20): 8483-8491.

Li X, Zhu J H, Ye Z P, Chen J Y, Fu Y G, Zhang F P. The control efficiency of *Scutellista caerulea* Fonscolombe on *Parasaissetia nigra* Nietner. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8483-8491.

蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的控制作用

李 贤^{1,2}, 朱俊洪², 叶政培¹, 陈俊谕¹, 符悦冠¹, 张方平^{1,*}

1 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101

2 海南大学植物保护学院, 海口 570228

摘要:蓝色长盾金小蜂 *Scutellista caerulea* Fonscolombe 是橡胶树重要害虫橡副珠蜡蚧 *Parasaissetia nigra* Nietner 的一种外寄生性天敌。为了明确蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的控害潜能,为该寄生蜂的进一步利用提供数据支撑。在室内通过体视镜下解剖观察寄生蜂在寄主腹下是否产卵测定了不同温度、寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂的寄生功能反应、寻找效应和自身密度干扰效应。温度设置有 21、24、27、30、33、36℃ 共 6 个处理,寄主发育阶段设初期成虫(1—2 d 成虫)、褐色期成虫(体色褐色,产卵前 3—4 d 成虫)、黑色期成虫(体色黑色,产卵 1—2 d 成虫)三个处理。结果显示:蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能反应符合 Holling-Ⅱ型和 Holling-Ⅲ型模型,在 21—36℃ 范围内,33℃ 时该蜂寄生效能最大,为 44.4201,21℃ 时最小,为 9.2458;在橡副珠蜡蚧为初期成虫—黑色期成虫范围内,寄生效能由大到小为黑色期成虫>褐色期成虫>初期成虫,分别为 18.9044、13.7410、7.2002。采用 Hassell-Varley 干扰模型对不同温度下蓝色长盾金小蜂受自身密度干扰的寄生作用率进行拟合,表明蓝色长盾金小蜂在寄生时存在种群内个体间自我干扰情况。温度会影响蓝色长盾金小蜂的搜寻和自我干扰,在 21—33℃ 范围内,33℃ 搜寻常数和干扰常数达到最大值,分别为 0.6116、0.7535。当温度为 33℃,寄主发育阶段为黑色期成虫时,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧有较强的控制能力,自身干扰作用最强。

关键词:蓝色长盾金小蜂;橡副珠蜡蚧;功能反应;寻找效应;干扰效应

The control efficiency of *Scutellista caerulea* Fonscolombe on *Parasaissetia nigra* Nietner

LI Xian^{1,2}, ZHU Junhong², YE Zhengpei¹, CHEN Junyu¹, FU Yueguan¹, ZHANG Fangping^{1,*}

1 Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China

2 College of Plant Protection, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: *Scutellista caerulea* Fonscolombe is an ectoparasitic enemy of *Parasaissetia nigra* Nietner, an important pest of rubber trees. This study aims to clarify the control efficiency of *S. caerulea* on *P. nigra* and provide data support for its further utilization. The functional response, searching efficiency and mutual interference of this parasitoid were measured indoors by dissecting to see if the wasp laid eggs under the host's abdomen at different temperatures and host developmental stages. There were 6 treatments for temperature, including 21, 24, 27, 30, 33, 36 °C, and three treatments were used for the developmental stages of the hosts, early adult (1 to 2 d adult), brown adult (brown body color, 3 to 4 d before spawning), black adult (black body color, adults 1—2 days after laying eggs). The results showed that the functional response of *S. caerulea* to *P. nigra* matched the Holling-Ⅱ and Holling-Ⅲ models. In the range of 21—36 °C, the control efficiency of *S. caerulea* on *P. nigra* was the maximum at 33 °C, 44.4201 and the minimum at 21 °C, 9.2458, and both models show that at 33 °C, the upper limit of parasitism is the largest, which were 45.7 and 19.2, respectively. The control

基金项目:海南省自然科学基金项目(321RC623);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-33-GW-BC2);热科院基本业务费项目(1630042017002)

收稿日期:2021-10-09; 采用日期:2022-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangpingz97@163.com

efficiency to the different development stages of *P. nigra* were: the largest in the black stage, followed by the brown adult, and the smallest in the early adult stage, which were 18.9044, 13.7410, and 7.200, respectively. And both models show that when *P. nigra* was black adult stage, the upper limit of parasitism was the largest, which were 15.7 and 12.2, respectively. Both models show that when *P. nigra* was early adult stage, the upper limit of parasitism was the lowest, which were 5.2 and 4.4. In addition, the Hassell-Varley interference model was used to fit the parasitic action rate of *S. caerulea* interfered by its own density under different temperatures, which indicated that *S. caerulea* had self-interference among individuals in the population when they parasitized. Temperature affected the search and self-interference of *S. caerulea*. In the range of 21—33 °C, the search constant and interference constant reached their maximum values at 33 °C, which were 0.6116 and 0.7535, respectively. In summary, when the developmental stage of *P. nigra* is the black adult, and the temperature is 33 °C, *S. caerulea* has the stronger ability to control *P. nigra*, and the mutual interference is the strongest.

Key Words: *Scutellista caerulea* Fonscolombe; *Parasaissetia nigra* Nietner; functional response; searching efficiency; mutual interference

橡副珠蜡蚧 *Parasaissetia nigra* Nietner 属同翅目 Hemiptera 蚧总科 Coccoidea 蜡蚧科 Coccidae, 来源于非洲, 目前分布于除南极洲之外的六大洲^[1]。橡副珠蜡蚧为多食性昆虫, 可取食 92 科寄主植物^[2], 可为害橡胶树, 近年来云南、海南橡胶产业受其影响严重^[3-4]。早期对该虫的防治主要依赖化学农药, 但存在有效药剂种类少、施药困难、对人畜与环境有安全隐患等问题。因此, 对该虫的防治急需寻求新的技术手段。目前, 生物防治技术的应用, 尤其利用天敌是该虫防治的一个新方向。而通过天敌资源的广泛筛选、评价可获得更多适宜性强、应用前景好的天敌种类, 为进一步的研究及利用提供基础支撑。目前, 已有多位学者对其开展了天敌资源调查及防控技术的研究, 发现了多种可利用的橡副珠蜡蚧本土天敌, 如斑翅食蚧蚜小蜂 *Coccophagus ceroplastae* Howard、副珠蜡蚧阔柄跳小蜂 *Metaphycus parasaissetiae* Zhang and Huang、日本食蚧蚜小蜂 *Coccophagus japonicus* Compere、优雅歧脉跳小蜂 *Diversinervus elegans* Silvestri 等^[5-8]。其中, 斑翅食蚧蚜小蜂、日本食蚧蚜小蜂、优雅歧脉跳小蜂可寄生橡副珠蜡蚧 2 龄若虫至成虫^[9-11], 副珠蜡蚧阔柄跳小蜂只对橡副珠蜡蚧成虫有控制作用^[12]。

本研究团队于 2018 年在海南省琼中县一橡胶苗圃中新发现了一种橡副珠蜡蚧的成虫寄生蜂, 经鉴定该蜂为蓝色长盾金小蜂 *Scutellista caerulea* Fonscolombe, 属膜翅目 Hymenoptera 小蜂总科 Chalcidoidea 金小蜂科 Pteromalidae^[13]。该蜂的寄主有无花果蜡蚧 *Ceroplastes rusci* Linnaeus、橄榄黑盔蚧 *Saissetia oleae* Olivier、褐软蚧 *Coccus hesperidum* Linnaeus、佛州龟蜡蚧 *Ceroplastes floridensis* Comstock 等^[14-15]。该蜂是一种外寄生蜂, 其成虫将卵产在寄主的腹面, 以寄主产在腹下的卵为食物^[16], 只寄生成虫期橡副珠蜡蚧, 嗜好产卵于黑色成虫期 (体色黑色, 产卵 1—2 d) 橡副珠蜡蚧^[17]。目前, 国内外对蓝色长盾金小蜂的报道较为缺乏, 且以寄主、分布范围、季节丰富度为主^[13, 18], 尚未见其对寄主控害潜能的相关研究报道。利用蓝色长盾金小蜂来控制橡副珠蜡蚧, 首要是需明确其对橡副珠蜡蚧的寄生功能反应及其自身密度干扰效应。本研究在室内进行不同温度、寄主橡副珠蜡蚧的不同发育阶段条件下蓝色长盾金小蜂的寄生功能反应和自身密度干扰效应试验, 以期明确蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的控害潜能以及找到利用该寄生蜂控制橡副珠蜡蚧的最佳温度, 寄主发育阶段以及蜂虫比, 为蓝色长盾金小蜂的田间应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫: 于云南省热带作物研究所试验场六队 (20.05°N, 102.72°E) 橡胶树采集橡副珠蜡蚧, 在中国热带农业科学院环境与植物保护研究所养虫室内用南瓜 *Cucurbita moschata* (Duch. ex Lam.) Duch. ex Poirlet (品种: 蜜本, 购买于海南省儋州市南瓜供应商) 果实, 繁殖至成虫备用, 繁殖条件为温度 25—27°C、相对湿度 70%—90%。于海南省琼中县新进农场橡胶增殖苗圃园 (19.03°N, 109.84°E) 收集蓝色长盾金小蜂蛹, 待其羽

化后,用南瓜果实饲养的橡副珠蜡蚧繁殖,25—27℃、相对湿度 70%—90%。

1.2 方法

1.2.1 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

试验以橡副珠蜡蚧黑色期成虫(体色黑色,产卵 1—2 d 成虫)为供试寄主,设置的寄主密度分别为 5、10、15、20、25 头。在南瓜上挑选有上述橡副珠蜡蚧密度的部位,用刀切下,去除多余的瓜瓤和瓜肉,只留下带有上述蚧虫的南瓜块(约 4 mm 厚),分别单独放在直径为 9 cm 的培养皿内,然后每个皿内接入 1 头已交配的蓝色长盾金小蜂雌蜂,并放入蘸有 15%蔗糖水的小棉球,随后用纱布封住皿口,再将上述正接蜂的培养皿放在人工气候箱中,设置光周期为 L12 h : D12 h,湿度为 (70±5)%,并设置不同的温度梯度,分别为 21、24、27、30、33、36℃,接蜂 24 h 后取出,将蓝色长盾金小蜂从培养皿中移除,在体视镜下解剖橡副珠蜡蚧,并记录被寄生的蜡蚧数量。每个实验处理重复 4 次。

1.2.2 不同寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

试验分别以橡副珠蜡蚧初期成虫(1—2 d 成虫)、褐色期成虫(体色褐色,产卵前 3—4 d 成虫)、黑色期成虫(体色黑色,产卵 1—2 d 成虫)为供试寄主,设置的寄主密度分别为 5、10、15、20、25 头。按照 1.2.1 的方法将蓝色长盾金小蜂接入置有橡副珠蜡蚧的培养皿,并将正接蜂的培养皿放在人工气候箱中,设置光周期为 L12 h : D12 h,湿度为 (70±5)%,温度为 27℃,接蜂 24 h 后取出,将蓝色长盾金小蜂从培养皿中移除,在体视镜下解剖橡副珠蜡蚧,并记录被寄生的蜡蚧数量。每个实验处理重复 4 次。

1.2.3 不同温度下蓝色长盾金小蜂自身密度干扰效应

试验以橡副珠蜡蚧黑色期成虫(体色黑色,产卵 1—2 d 成虫)为供试寄主,设置寄主密度为 30 头,接下来试验方法同 1.2.1。每个实验处理重复 4 次。

1.3 数据分析

蓝色长盾金小蜂的日均寄生量用 SPSS23.0 统计软件进行分析,采用单因素方差分析(ANOVA),Duncan 法比较差异显著性。图表用 Microsoft Excel 2016 版完成。

Holling-Ⅱ型功能反应模型^[19]: $Na = aNT / (1 + aThN)$, Na 为被寄生寄主数; a 为瞬时攻击率; N 为寄主密度; Th 为处理时间,即平均寄生一头寄主所花的时间; T 为天敌发现和寄生寄主的总时间(本试验为 1 d)。

Holling-Ⅲ型功能反应模型^[20]: $Na = a'e^{-b/N}$, Na 为被寄生寄主数; N 为寄主密度; a' 为最大寄生量; b 为最佳寻找密度。

寻找效应^[21]: $S = a / (1 + aThN)$, S 为寻找效应; a 为瞬时攻击率; Th 为处理时间; N 为寄主密度。

Hassell-Varley 干扰模型^[22]: $E = QP^{-m}$, E 为寄生作用率; Q 为搜寻常数; P 为寄生蜂密度; m 为干扰参数。

分摊竞争强度^[23]: $I = (E_1 - E_p) / E_1$, I 为分摊竞争强度; E_1 为 1 头寄生蜂的寄生作用率; E_p 为 p 头寄生蜂的寄生作用率。

2 结果

2.1 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

2.1.1 温度对蓝色长盾金小蜂日均寄生量的影响

同一寄主密度下,当寄主密度为 5 头时,日均寄生量在 27、30、33℃ 时最大,均为 4.3 头,21℃ 时最小,为 2.3 头,显著小于其他 5 个温度下的日均寄生量;当寄主密度为 10 头时,日均寄生量在 30、33℃ 时最大,均为 8.7 头,显著大于其他温度下的日均寄生量;当寄主密度为 15 头、20 头、25 头时,日均寄生量 33℃ 时最大,分别为 11.0 头、13.0 头、15.3 头,均显著高于 21 和 24℃ 下的日均寄生量。同一温度下,随着寄主密度的增大,蓝色长盾金小蜂日均寄生量呈上升趋势,但增幅逐渐减小,当寄主密度为 5 头时最小,显著小于其他寄主密度下的日均寄生量,25 头时最大,特别是 33℃ 时,寄主密度为 25 头时的寄生量约是 5 头时的 3.56 倍(表 1)。

表 1 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的日均寄生量

Table 1 Mean number of *P. nigra* parasitized daily by *S. caerulea* at different temperatures

温度 Temperature/°C	橡副珠蜡蚧密度 <i>P. nigra</i> density/(头/皿)				
	5	10	15	20	25
21	2.3±0.3Cb	4.3±0.3Bc	6.3±0.9Ab	6.3±0.7Ac	6.7±0.3Ac
24	4.0±0.6Ba	6.3±0.7Ab	7.3±0.9Ab	8.3±0.3Abc	7.7±0.3Ac
27	4.3±0.3Ca	7.0±0.0Bb	8.3±1.2ABab	9.3±0.9Aabc	10.3±0.3Ab
30	4.3±0.3Ca	8.7±0.3Ba	9.0±0.6Bab	10.7±0.9ABab	12.3±0.9Ab
33	4.3±0.3Da	8.7±0.3Ca	11.0±1.0BCa	13.0±2.1ABa	15.3±1.2Aa
36	4.0±0.6Ca	6.7±0.7Bb	9.0±1.2ABab	10.0±1.0Aabc	11.0±0.0Ab

表中数据为平均值±标准误,同行数据后的不同大写字母或同列后的不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

2.1.2 拟合 Holling-Ⅱ型功能反应模型

将 Holling-Ⅱ模型转化为一元线性方程,对 N 及 Na 分别取倒数进行回归分析。结果表明:参数估计 R^2 值均大于 0.9676,经卡方检验, χ^2 为 0.0058—0.2378, $\chi^2 < \chi^2_{(0.05)} = 7.81$,表明理论值与观测值较吻合,说明不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的功能反应符合 Holling-Ⅱ型模型。温度为 24℃ 时,蓝色长盾金小蜂瞬时攻击率最大,为 1.2456;温度为 33℃ 时,其处理时间最短,寄生效能及寄生上限最大,分别为 0.0219、44.4201、45.7 头;温度为 21℃ 时,其瞬时攻击率、寄生效能最小,分别为 0.5529、9.2458;温度为 24℃ 时,处理时间最长,为 0.0856,寄生上限最小,为 11.7 头。因而,可知 33℃ 时,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生能力最强(表 2)。

表 2 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的 Holling-Ⅱ型功能反应参数估计

Table 2 The Holling-Ⅱ functional responses parameter of *S. caerulea* to *P. nigra* at different temperatures

温度 Temperature/°C	功能反应方程 Function response equation	瞬间攻击率(a) Instantaneous attack rate	处理时间(Th) Treatment time	寄生效能(a/Th) Parasitic efficacy	寄生上限($1/Th$) Maximum parasitizing/(头/d)	R^2	χ^2
21	$Na = 0.5529N / (1 + 0.0331N)$	0.5529	0.0598	9.2458	16.7	0.9816	0.2378
24	$Na = 1.2456N / (1 + 0.1066N)$	1.2456	0.0856	14.5514	11.7	0.9748	0.1078
27	$Na = 1.2061N / (1 + 0.0770N)$	1.2061	0.0638	18.9044	15.7	0.9982	0.0058
30	$Na = 1.0664N / (1 + 0.0478N)$	1.0664	0.0434	24.5714	23.0	0.9676	0.2093
33	$Na = 0.9728N / (1 + 0.0213N)$	0.9728	0.0219	44.4201	45.7	0.9935	0.0763
36	$Na = 0.9946N / (1 + 0.0483N)$	0.9946	0.0486	20.4650	20.6	0.9984	0.0218

Na :被寄生寄主数 Number of host parasitized; N :寄主密度 Host density

2.1.3 拟合 Holling-Ⅲ型功能反应模型

采用 Holling-Ⅲ型功能反应方程对 N 的倒数及 Na 进行曲线拟合。结果表明:参数估计 R^2 值均大于 0.9719,经卡方检验, χ^2 为 0.0307—0.1536, $\chi^2 < \chi^2_{(0.05)} = 7.81$,表明理论值与观测值较吻合,说明不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的功能反应符合 Holling-Ⅲ型模型。温度为 33℃ 时,寄生量最大,为 19.2 头,这与 Holling-Ⅱ型得到的结果 33℃ 时寄生上限最大相一致。温度为 24℃ 时,最佳寻找密度最低,为 4.4 头,33℃ 时,最佳寻找密度最高,为 7.6 头(表 3)。

2.1.4 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寻找效应

同一温度下,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寻找效应随着寄主密度的增大而降低,寄主密度为 5 头时最高,25 头时最低。在同一寄主密度下,蓝色长盾金小蜂的寻找效应受温度影响明显,在 21—33℃,随着温度的升高,其寻找效应逐渐增大,33℃ 时达到最大值,当温度高于 33℃,其寻找效应下降(图 1)。

表 3 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的 Holling-III 型功能反应参数估计

Table 3 The Holling-III functional responses parameters of *S. caerulea* to *P. nigra* at different temperatures

温度 Temperature/℃	功能反应方程 Function response equation	最大寄生量 (<i>a'</i>) Maximum parasitizing/(头/d)	最佳寻找密度 (<i>b</i>) Optimal search density/(头/皿)	<i>R</i> ²	χ^2
21	$Na = 9.3046e^{-6.7969/N}$	9.3	6.8	0.9824	0.0947
24	$Na = 9.7924e^{-4.4372/N}$	9.8	4.4	0.9754	0.0656
27	$Na = 12.1741e^{-5.2447/N}$	12.2	5.2	0.9913	0.0307
30	$Na = 14.8646e^{-6.11485/N}$	14.9	6.1	0.9719	0.1536
33	$Na = 19.18394e^{-7.5584/N}$	19.2	7.6	0.9886	0.1301
36	$Na = 13.5706e^{-6.2593/N}$	13.6	6.3	0.9853	0.0388

2.2 不同寄主发育阶段条件下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

2.2.1 寄主发育阶段对蓝色长盾金小蜂日均寄生量的影响

不同寄主发育阶段下,寄主密度一定时,日均寄生量均以黑色期成虫时最大;但当寄主密度为 5、15 头时,三种寄主发育阶段下的日均寄生量差异不显著,当寄主密度为 10、20、25 时,寄主发育阶段为黑色期成虫的日均寄生量显著高于初期成虫时的日均寄生量。同一寄主发育阶段下,随着寄主密度的增大,蓝色长盾金小蜂日均寄生量逐渐增大,但增幅逐渐减小;寄主在 3 个发育阶段,均是寄主密度为 5 头时的日均寄生量显著低于 25 头时的日均寄生量,特别是寄主发育阶段为黑色期成虫时,寄主密度为 5 头时的寄生量约是 25 头时的 41.75%(表 4)。

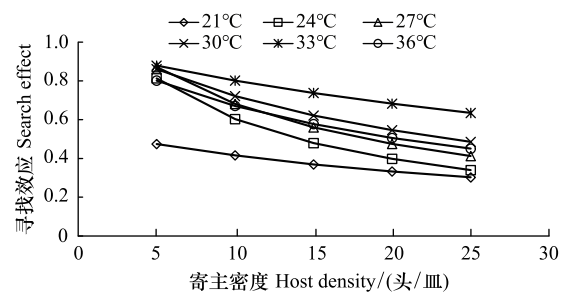


图 1 不同温度条件下蓝色长盾金小蜂寻找效应与寄主密度的关系

Fig.1 Relationship between search effect of *S. caerulea* and densities of host at different temperatures

表 4 不同寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的日均寄生量

Table 4 Mean number of *P. nigra* parasitized daily by *S. caerulea* at different host ages

寄主发育阶段 Host age	橡副珠蜡蚧密度 <i>P. nigra</i> density/(头/皿)				
	5	10	15	20	25
初期成虫 Adult of early instar	3.0±0.6Ba	3.7±0.9ABb	5.3±0.3ABa	5.7±0.9ABb	6.0±1.2Ab
褐色期成虫 Adult of brown instar	4.0±0.6Ba	6.3±0.7ABa	6.7±0.9Aa	7.0±1.0Aab	7.3±0.7Ab
黑色期成虫 Adult of black instar	4.3±0.3Ca	7.0±0.0Ba	8.3±1.2ABa	9.3±0.9Aa	10.3±0.3Aa

2.2.2 拟合 Holling- II 型功能反应模型

将 Holling- II 模型转化为一元线性方程,对 *N* 及 *Na* 分别取倒数进行回归分析。结果表明:参数估计 *R*² 值均大于 0.9212,经卡方检验 χ^2 为 0.0058—0.0687 $\chi^2 < \chi^2(0.05) = 7.81$,表明理论值与观测值较吻合,说明蓝色长盾金小蜂对不同发育阶段橡副珠蜡蚧的功能反应符合 Holling- II 型模型。寄主为褐色期成虫时,蓝色长盾金小蜂瞬时攻击率最大;寄主为黑色期成虫时,其处理时间最短,寄生效能最大,寄生上限最大,分别为 0.0638、18.9044、15.7 头。寄主为初期成虫时,其瞬时攻击率最小、处理时间最长、寄生效能最小、寄生上限最小,分别为 0.9295、0.1291、7.2002、7.7 头。因而,可知寄主为黑色期成虫时,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生能力最强(表 5)。

2.2.3 拟合 Holling-III 型功能反应模型

采用 Holling-III 型功能反应方程对 *N* 的倒数及 *Na* 进行曲线拟合。结果表明:参数估计 *R*² 值均大于

0.8870,经卡方检验, χ^2 为0.0146—0.15360730, $\chi^2 < \chi^2_{(0.05)} = 7.81$,表明理论值与观测值较吻合,说明蓝色长盾金小蜂对不同发育阶段橡副珠蜡蚧的功能反应符合Holling-Ⅲ型模型。寄主为黑色期成虫时,最大寄生量最大,为12.2头,这与Holling-Ⅱ型结果相一致。黑色期成虫时,最佳寻找密度最高,为5.2头(表6)。

表5 不同寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的Holling-Ⅱ型功能反应参数估计

Table 5 The Holling-Ⅱ functional responses parameters of *S. caerulea* to *P. nigra* at different host ages

寄主发育阶段 Host age	功能反应方程 Function response equation	瞬间攻击率(<i>a</i>) Instantaneous attack rate	处理时间(<i>Th</i>) Treatment time	寄生效能(<i>a/Th</i>) Parasitic efficacy	寄生上限(1/ <i>Th</i>) Maximum parasitizing/ (头/d)	<i>R</i> ²	χ^2
初期成虫 Adult of early instar	$Na = 0.9295N / (1 + 0.1200N)$	0.9295	0.1291	7.2002	7.7	0.9212	0.0687
褐色期成虫 Adult of brown instar	$Na = 1.4112N / (1 + 0.1449N)$	1.4112	0.1027	13.7410	9.7	0.9627	0.0430
黑色期成虫 Adult of black instar	$Na = 1.2061N / (1 + 0.0770N)$	1.2061	0.0638	18.9044	15.7	0.9982	0.0058

表6 蓝色长盾金小蜂对不同发育阶段橡副珠蜡蚧的Holling-Ⅲ型功能反应参数估计

Table 6 The Holling-Ⅲ functional responses parameters of *S. caerulea* to *P. nigra* at different host ages

寄主发育阶段 Host age	功能反应方程 Function response equation	最大寄生量(<i>a'</i>) Maximum parasitizing/(头/d)	最佳寻找密度(<i>b</i>) Optimal search density/(头/皿)	<i>R</i> ²	χ^2
初期成虫 Adult of early instar	$Na = 6.8404e^{-4.4146/N}$	6.8	4.4	0.8870	0.0730
褐色期成虫 Adult of brown instar	$Na = 8.6240e^{-3.7340/N}$	8.6	3.7	0.9777	0.0146
黑色期成虫 Adult of black instar	$Na = 12.1741e^{-5.2447/N}$	12.2	5.2	0.9913	0.0307

2.2.4 不同寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寻找效应

同一寄主发育阶段下,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寻找效应随着寄主密度的增大而降低,当寄主密度为5头时最大,为25头时最小,在同一寄主密度下,蓝色长盾金小蜂的寻找效应随着寄主发育阶段的增大而增大,寄主为黑色期成虫的寻找效应最大,寄主为初期成虫的寻找效应最小(图2)。

2.3 不同温度下蓝色长盾金小蜂自身密度干扰效应

在同一温度下,蓝色长盾金小蜂的平均寄生量及寄生作用率随其自身密度的增加而下降,分摊竞争强度则增大,说明该蜂个体间存在种内竞争和相互干扰。对不同温度下蓝色长盾金小蜂受自身密度干扰的寄生作用率采用Hassell-Varley干扰模型进行拟合,寄生作用率和寄生蜂密度间的相关系数 $R^2 > 0.8458$,表明该模型能较好的反映该蜂寄生时种内个体间自我干扰情况。温度会影响蓝色长盾金小蜂的搜寻和自我干扰,在21—33℃范围内,随着温度升高,搜寻常数和干扰常数增大,33℃达到最大值,分别为0.6116、0.7535,当温度高于33℃时,搜寻常数和干扰常数减小(表7)。

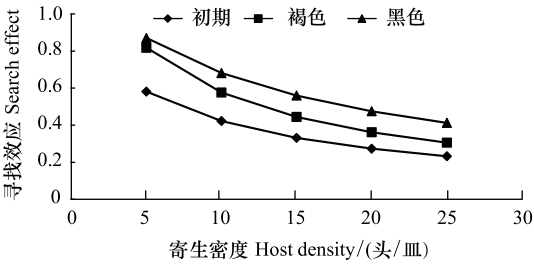


图2 不同寄主发育阶段条件下蓝色长盾金小蜂寻找效应与寄主密度的关系

Fig.2 Relationship between search effect of *S. caerulea* and densities of host at different host ages

3 结论与讨论

3.1 不同温度下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

功能反应是评价天敌对害虫控制潜能的一种重要方法^[24—26],其中Holling-Ⅱ型和Ⅲ型模型在寄生蜂的寄生功能评价中应用较为广泛,这两个模型具有一定的互补作用,同时采用这两种模型可以更好的描述天敌对

害虫的控害潜能^[27]。本研究中,不同温度下,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能反应符合 Holling-Ⅱ型和Ⅲ型模型,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的日均寄生量随着寄主密度的增大而增大,当寄主密度达到一定数量,其日均寄生量趋于饱和,这与稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang、淡足侧沟茧蜂 *Microplitis palidipes* Szépligeti、日本平腹小蜂 *Anastatus japonicus* Ashmead 等寄生蜂类似^[28—30]。天敌的捕食效能受温度影响^[31],在 33℃ 时,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生效能最大,为 44.4201,其次是 30℃、36℃。本实验采用 Holling-Ⅱ型和Ⅲ型模型拟合出的蓝色长盾金小蜂的寄生上限均在 33℃ 时最大,分别为 45.6 头和 19.2 头,两者相比较,Holling-Ⅲ型模型的结果更加符合蓝色长盾金小蜂的实际寄生情况,所以实际应用中,可以选择参考 Holling-Ⅲ型模型的结果。此外,温度会影响寄生蜂的寻找效应^[32—33],本实验中,温度对蓝色长盾金小蜂寻找效应有影响,同一密度下,温度在 33℃ 时的寻找效应高于其他温度下的寻找效应。该研究表明蓝色长盾金小蜂在较高温度下有较强的寄生能力,所以在实际应用中,可以考虑在温度较高的情况下释放蓝色长盾金小蜂,进行田间控害。

表 7 不同温度下蓝色长盾金小蜂自身密度的干扰反应方程及参数估计

Table 7 Equations and estimated parameters of interferential effect *S. caerulea* density at different temperatures

温度 Temperature/℃	寄生蜂密度(<i>P</i>) <i>S. caerulea</i> density/(头/皿)	平均寄生量 Average parasitic number/(头/d)	寄生作用率(<i>E</i>) Parasitic rate	分摊竞争强度(<i>I</i>) Intensity of scrambling competition	干扰效应模型 Interference effect mode	<i>R</i> ²
21	1	5.7±0.3a	0.1889	0.0000	$E = 0.1943P^{-0.2774}$	0.8458
	2	5.3±0.6ab	0.1778	0.0588		
	3	4.0±0.4bc	0.1333	0.2941		
	4	3.8±0.5c	0.1250	0.3382		
	5	3.9±0.1bc	0.1311	0.3059		
24	1	8.0±1.0a	0.2667	0.0000	$E = 0.2643P^{-0.3435}$	0.9525
	2	6.2±0.4b	0.2056	0.2292		
	3	5.2±0.2bc	0.1741	0.3472		
	4	5.3±0.2bc	0.1778	0.3333		
	5	4.4±0.1c	0.1467	0.4500		
27	1	10.0±0.0a	0.3333	0.0000	$E = 0.364P^{-0.4806}$	0.8988
	2	9.3±0.2a	0.3111	0.0667		
	3	6.3±0.2b	0.2111	0.3667		
	4	5.3±0.4c	0.1778	0.4667		
	5	4.9±0.1c	0.1644	0.5067		
30	1	14.0±0.6a	0.4667	0.0000	$E = 0.49P^{-0.5960}$	0.9796
	2	10.7±0.6b	0.3556	0.2381		
	3	7.6±0.3c	0.2519	0.4603		
	4	6.4±0.1cd	0.2139	0.5417		
	5	5.5±0.1c	0.1822	0.6095		
33	1	17.7±1.2a	0.5889	0.0000	$E = 0.6116P^{-0.7535}$	0.9926
	2	11.7±0.6b	0.3889	0.3396		
	3	8.0±0.2c	0.2667	0.5472		
	4	6.4±0.2cd	0.2139	0.6368		
	5	5.3±0.1d	0.1778	0.6981		
36	1	11.0±1.2a	0.3667	0.0000	$E = 0.3946P^{-0.3972}$	0.8822
	2	9.7±0.2ab	0.3222	0.1212		
	3	8.3±0.2bc	0.2778	0.2424		
	4	7.1±0.2cd	0.2361	0.3561		
	5	5.5±0.1d	0.1844	0.4970		

3.2 不同寄主发育阶段下蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧的寄生功能

捕食者(寄生蜂)的功能反应受到猎物(寄主)发育阶段的影响,例如斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* Wesmael 对不同龄期斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 幼虫、茶足柄瘤蚜茧蜂 *Lysiphlebus testaceipes* Cresson 对不同龄期苜蓿蚜 *Aphis craccivora* Koch 的寄生功能反应因寄主龄期的不同而受到明显影响^[34—35]。目前,大多数文献报道寄生蜂不同龄期寄主的寄生功能反应只采用 Holling-Ⅱ型模型进行拟合,很少采用 Holling-Ⅲ型模型进行拟合。本研究采用上述两种模型进行拟合,发现 Holling-Ⅱ和 Holling-Ⅲ型均能拟合蓝色长盾金小蜂对不同发育阶段橡副珠蜡蚧的寄生功能反应,以瞬时攻击率与处理时间之比 a/Th 作为评价指标,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧不同发育阶段的成虫的寄生效能为:黑色期成虫>褐色期成虫>初期成虫。本实验采用 Holling-Ⅱ型和Ⅲ型模型拟合出的蓝色长盾金小蜂的寄生上限均以黑色期成虫时最大,分别为 15.7 头和 12.2 头,两者相比较,无较大差异,结果均符合蓝色长盾金小蜂的实际寄生情况。此外,寄主发育阶段对寄生蜂寻找效应也有影响,胡浩等研究发现斑痣悬茧蜂对 2、3 龄斜纹夜蛾幼虫的搜寻效应均高于对 4 龄幼虫的搜寻^[35],本试验中,同一寄主密度下,寄主为黑色期成虫时,蓝色长盾金小蜂寻找效应高于褐色期成虫和初期成虫时的寻找效应。该研究表明蓝色长盾金小蜂对发育成熟的寄主有较强的寄生能力,所以在实际应用中,可以考虑在蚧虫以褐色期至黑色期成虫为主的情况下释放蓝色长盾金小蜂,进行田间控害。

3.3 不同温度下蓝色长盾金小蜂自身密度干扰效应

研究发现,许多寄生蜂在一定空间内会随自身种群数量的增加而出现干扰现象,如菜蛾盘绒茧蜂 *Cotesia vestalis* (Haliday)、象虫金小蜂 *Anisopteromalus calandrae* (Howard) 等^[36—37]。本研究发现蓝色长盾金小蜂个体间也存在这种干扰现象,在一定空间内,寄主数量一定时,蓝色长盾金小蜂自身密度越大,其寄生作用率逐渐减小,分摊竞争强度逐渐增大,干扰作用也就越大。此外,温度是影响干扰效应的一个重要影响因子,如黄色潜蝇茧蜂 *Opius flavus* Weng et Chen、腰带长体茧蜂 *Macrocentrus cingulum* Brischke 等的自身密度干扰效应会受到温度的影响^[33,38]。在本实验中,21—33℃ 范围内,随着温度升高,蓝色长盾金小蜂个体间干扰作用增大,33℃ 干扰作用达到最大,当温度高于 33℃ 时,其干扰效应开始下降,这可能是温度过低或者过高会抑制该蜂的活动能力^[39],从而使其个体间干扰作用减小。因此,在进行蓝色长盾金小蜂的室内扩繁和田间应用时,应控制寄生蜂和寄主的密度,以免造成天敌资源的浪费。

4 结论

当温度为 33℃ 时,蓝色长盾金小蜂对橡副珠蜡蚧黑色期成虫,有较强的寄生效能;蓝色长盾金小蜂存在自身相互干扰,33℃ 干扰作用最强。因此,田间释放蓝色长盾金小蜂控制橡副珠蜡蚧时,选择橡副珠蜡蚧多数处于黑色期成虫、温度为 33℃ 左右时进行释放,同时要控制好寄生蜂和寄主的密度,避免天敌的浪费。

参考文献 (References):

- [1] Ben-Dov Y, Miller D R. Scale Net: Systematic Database of the Scale Insects of the World (version Dec 2004). 2020.
- [2] Abdul-Rassoul M S, Mallo I M. First record of nigra scale, *Parasaissetia nigra* (Nietner, 1861) (Hemiptera; Coccidae) as a pest of fig trees in Iraq. Bulletin of the Iraq Natural History Museum, 2016, 14(2): 171-178.
- [3] 段波, 周明, 李加智, 李国华. 西双版纳橡胶介壳虫种类鉴定及其防治. 热带农业科技, 2005, 28(2): 1-3.
- [4] 张方平, 朱俊洪, 韩冬银, 李磊, 牛黎明, 符悦冠. 副珠蜡蚧柄跳小蜂的寄生影响因子. 生态学报, 2015, 35(21): 7255-7262.
- [5] 张方平, 符悦冠, 彭正强, 王帮, 张敬宝, 金启安. 温度和光周期对斑翅食蚧蚜小蜂发育与繁殖的影响. 生态学报, 2010, 30(5): 1280-1286.
- [6] 温丽娜, 符悦冠, 张方平, 金启安, 张敬宝. 温度对副珠蜡蚧柄跳小蜂发育和繁殖的影响. 昆虫知识, 2010, 47(1): 151-155.
- [7] 沈顺章, 张方平, 符悦冠, 李磊, 朱俊洪. 日本食蚧蚜小蜂的交配影响因子研究. 环境昆虫学报, 2017, 39(5): 1135-1141.
- [8] 李凤菊, 郑海涛, 黎来云, 许丽月, 王进强, 张永科, 朱国渊, 蔡志英. 优雅歧脉跳小蜂田间防治橡胶盔蚧试验. 热带农业科技, 2017, 40(2): 1-3.
- [9] 张方平, 符悦冠, 张敬宝, 韩冬银, 彭正强. 斑翅食蚧蚜小蜂对寄主龄期的选择性. 中国生物防治, 2009, 25(1): 89-91.

- [10] 王进强. 优雅歧脉跳小蜂田间防治橡胶盔蚧技术. 热带农业科技, 2017, 40(2): 47.
- [11] 吴晓霜, 牛黎明, 符悦冠, 陈俊谕, 韩冬银, 李磊, 吴琦琦, 张方平, 朱俊洪. 日本食蚧蚜小蜂对橡副珠蜡蚧的控制作用研究. 应用昆虫学报, 2019, 56(2): 208-213.
- [12] 张方平, 牛黎明, 许永池, 韩冬银, 张敬宝, 符悦冠. 副珠蜡蚧阔柄跳小蜂对橡副珠蜡蚧的控制作用. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2166-2170.
- [13] Badary H, Abd-Rabou S. Role of pteromalid parasitoid *Scutellista caerulea* (Fonscolombe) (Hymenoptera: Pteromalidae) for biological control of the soft scale insects (Hemiptera: Coccidae) in Egypt. Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A, Entomology, 2011, 4(1): 49-58.
- [14] Tena A, Soto A, Garcia-Marí F. Parasitoid complex of black scale *Saissetia oleae* on citrus and olives: parasitoid species composition and seasonal trend. BioControl, 2008, 53(3): 473-487.
- [15] Abd-Rabou S N. New records of the soft scale insects hosts associated with the promising parasitoid, *Scutellista caerulea* (Fonscolombe) (Hymenoptera: Pteromalidae) in Egypt. Egyptian Journal of Agricultural Research, 2011, 89(4): 1295-1302.
- [16] Ehler L E. Observations on *Scutellista cyanea* Motsch. (Hymenoptera: Pteromalidae). The Pan-Pacific Entomologist, 1989, 65(2): 151-155.
- [17] 李贤, 牛黎明, 符悦冠, 陈俊谕, 李磊, 韩冬银, 张方平, 朱俊洪. 蓝色长盾金小蜂生物学习性观察. 中国生物防治学报, 2020, 36(3): 327-334.
- [18] Awamleh R A, Al-Antary T M, BILAL H M. Survey of natural enemies of fig wax scale *Ceroplastes rusci* L. (Homoptera: Coccidae) and seasonal abundance of the parasitoid *Scutellista caerulea* Fonscolombe (Hymenoptera: Pteromalidae) in Jordan. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 2009, 5(4): 434-445.
- [19] Holling C S. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. The Canadian Entomologist, 1959, 91(7): 385-398.
- [20] 汪世泽, 夏楚贵. Holling-Ⅲ型功能反应新模型. 生态学杂志, 1988, 7(1): 1-3, 44-44.
- [21] 丁岩钦. 昆虫种群数学生态学原理与应用. 北京: 科学出版社, 1980: 195-211.
- [22] Hassell M P, Varley G C. New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control. Nature, 1969, 223(5211): 1133-1137.
- [23] 邹运鼎, 耿继光, 陈高潮, 孟庆雷, 王公明. 异色瓢虫若虫对麦二叉蚜的捕食作用. 应用生态学报, 1996, 7(2): 197-200.
- [24] Nikbin R, Sahragard A, Hosseini M. Age-specific functional response of *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) parasitizing different egg densities of *Ephesia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae). Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(6): 1205-1216.
- [25] 杜文梅, 臧连生, 张俊杰, 祁颖慧, 阮长春. 两种不同地理种群松毛虫赤眼蜂对米蛾卵的寄生功能及数值反应. 中国农业科学, 2016, 49(23): 4669-4676.
- [26] Khan M H, Khuhro N H, Awais M, Memon R M, Asif M U. Functional response of the pupal parasitoid, *Dirhinus giffardii* towards two fruit fly species, *Bactrocera zonata* and *B. cucurbitae*. Entomologia Generalis, 2020, 40(1): 87-95.
- [27] 朱亮, 葛振泰, 宫亚军, 石宝才, 王甦, 魏书军. 温度对东亚小花蜡捕食美洲棘蓟马的影响. 植物保护学报, 2015, 42(2): 229-236.
- [28] Ma M Y, Peng Z P, He Y. Effects of temperature on functional response of *Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang (Hymenoptera: Mymaridae) on the eggs of whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera* Horváth and brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(8): 1313-1320.
- [29] 王金彦, 万年峰, 范能能, 蒋杰贤. 淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾的寄生功能反应. 应用昆虫学报, 2020, 57(6): 1319-1325.
- [30] 李文敬, 陈菊红, 米倩倩, 卓富彦, 钟永志, 豆少辉, 张峰, 史树森, 张金平. 日本平腹小蜂对点蜂缘蜡的控害潜能研究. 中国植保导刊, 2021, 41(7): 26-31.
- [31] Sagarra L A, Vincent C, Peters N F, Stewart R K. Effect of host density, temperature, and photoperiod on the fitness of *Anagrus kamali*, a parasitoid of the hibiscus mealybug *Maconellicoccus hirsutus*. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2000, 96(2): 141-147.
- [32] 陈俊谕, 陈泰运, 符悦冠, 张方平, 韩冬银, 牛黎明. 哥德恩蚜小蜂对螺旋粉虱的功能反应研究. 中国生物防治学报, 2013, 29(2): 175-180.
- [33] 李宏梦, 刘凯强, 何康来, 王振营. 腰带长体茧蜂对亚洲玉米螟幼虫的寄生功能反应. 中国生物防治学报, 2019, 35(3): 350-355.
- [34] 刘爱萍, 黄海广, 徐林波, 高书晶, 张玉慧, 康爱国. 茶足柄瘤蚜茧蜂对苜蓿蚜的寄生功能反应. 环境昆虫学报, 2012, 34(1): 69-74.
- [35] 胡浩, 孟玲, 李保平. 斑痣悬茧蜂对不同龄期斜纹夜蛾幼虫的寄生功能反应. 中国生物防治学报, 2015, 31(2): 176-180.
- [36] Saini A, Sharma P L. Functional response and mutual interference of *Cotesia vestalis* (Hymenoptera: Braconidae) on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Journal of Entomological Science, 2018, 53(2): 162-170.
- [37] 王燕, 郭军, 张晓敏, 胡大鸣, 戴仁怀, 杨洪, 张森稳, 龙星黔. 象虫金小蜂对烟草甲的寄生功能反应研究. 山地农业生物学报, 2021, 40(4): 82-86.
- [38] 杨琪, 曹凤勤, 崔志富, 程立生. 黄色潜蝇茧蜂的寄生功能反应研究. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 60-63.
- [39] 陈丽芳, 邵东华, 段景攀, 白玮杰. 温度对昆虫的影响. 内蒙古林业科技, 2015, 41(2): 57-61.