

白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用

王小艺¹, 杨忠岐^{1,*}, 唐艳龙¹, 姜 静¹, 高 纯², 刘云程³, 张显文³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091;

2. 辽宁省宽甸县森林病虫害防治检疫站, 辽宁宽甸 118200; 3. 辽宁省凤城市赛马镇林业站, 辽宁凤城 118113)

摘要: 栗山天牛 *Massicus raddei* (Blessig) 是我国东北危害栎树的重要害虫。在对其进行生物防治研究中, 通过功能反应实验方法探讨了利用寄生蜂白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao 对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用。结果表明: 白蜡吉丁肿腿蜂在取食寄主补充营养的过程中, 对栗山天牛 1~2 龄小幼虫的致死作用随着寄主密度的增加而显著提高, 功能反应符合 Holling II 型方程, 平均每日最大致死量为 0.53 头。寄生作用功能反应符合 Holling I 型方程, 寻找时间 21 d 内的寄主密度阈限为 4 头。当该肿腿蜂密度固定为 1 头时, 对栗山天牛致死作用和寄生作用的寻找效率均随寄主密度的上升而降低。当寄主密度固定不变时, 随着寄生蜂密度的增加寄主的死亡数量线性升高, 被寄生的寄主数量也上升, 但该肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫致死作用和寄生作用的寻找效率均显著下降, 表明白蜡吉丁肿腿蜂是防治栗山天牛低龄幼虫的良好天敌。研究结果对于合理评价白蜡吉丁肿腿蜂在生产上的控害能力和制定寄生蜂的林间释放应用技术规程提供了依据。

关键词: 栗山天牛; 白蜡吉丁肿腿蜂; 功能反应; 寻找效应; 生物防治

中图分类号: Q968.1 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2010)06-0675-08

Parasitism of *Sclerodermus pupariae* (Hymenoptera: Bethyridae) on the young larvae of *Massicus raddei* (Coleoptera: Cerambycidae)

WANG Xiao-Yi¹, YANG Zhong-Qi^{1,*}, TANG Yan-Long¹, JIANG Jing¹, GAO Chun², LIU Yun-Cheng³, ZHANG Xian-Wen³ (1. Key Laboratory of Forest Protection, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forest Pest Control & Quarantine Station of Kuandian County, Kuandian, Liaoning 118200, China; 3. Forestry Station of Saima Town of Fengcheng County, Fengcheng, Liaoning 118113, China)

Abstract: *Massicus raddei* (Blessig) (Coleoptera: Cerambycidae) is an important wood-boring insect pest infested *Quercus* spp. in northeastern China. To explore the biological control approaches, parasitism of a recent described species of parasitoid, *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao, on the 1st–2nd instar larvae of *M. raddei* was determined. The results showed that the number of killed young larvae of the longhorn beetle significantly increased along with the increase of host densities during the parasitoid adults' feeding on hosts for supplementary nutrition. The functional response could be described by Holling type II model, with the average maximum 0.53 host individuals killed per day. The functional response for parasitism fitted Holling type I equation, with the upper limit of host density of 4 larvae per tube during a searching time of 21 days. When the parasitoid density was fixed as one wasp per test tube, the searching efficiencies for both killing action and parasitism on young larvae of *M. raddei* decreased along with the increase of host densities. When the host density was fixed, along with the increase of host densities the number of host individuals killed increased linearly and the number of parasitized host individuals also increased, whereas the searching efficiencies for both killing action and parasitism of the parasitoid on the young larvae of *M. raddei* decreased significantly. These findings may serve as reference for rational evaluation on the ability of *S. pupariae* against the pest in fields and establishment of technical criteria for natural enemy release in forests.

Key words: *Massicus raddei*; *Sclerodermus pupariae*; functional response; searching efficiency; biological control

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972377); 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD08A12)

作者简介: 王小艺, 男, 1974年生, 博士, 副研究员, 研究方向为害虫生物防治, E-mail: xywang@caf.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yzhqi@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2009-12-22; 接受日期 Accepted: 2010-02-25

栗山天牛 *Massicus raddei* (Blessig) 在我国大部分省市均有分布(陈世骧等, 1959), 近年来成为我国东北林区栎类树木 *Quercus* spp. 最为严重的蛀干害虫(季长龙等, 1995; 王忠友, 1999; 蔡元才等, 1999; 高国平, 2001; 孙晓玲等, 2006)。该害虫生活历期长, 3 年发生 1 代, 幼虫长期隐蔽生活于树干木质部, 危害成熟林。在我国天然林保护工程实施的东北林区造成了重大灾害(孙永平, 2001; 皮忠庆等, 2007)。目前对该虫尚无便捷而有效的控制措施, 防治极为困难, 主要是采取清理虫害木、人工捕捉成虫、树干打孔注药等防治方法, 但费工费力收效甚微(侯义等, 2000; 孙永平, 2001)。在生物防治方面, 吉林省和辽宁省引进哈氏肿腿蜂进行过人工繁育和林间释放试验, 取得了一些成效, 但寄生率较低(谢振东等, 1999; 姜杰和郑柏华, 2005), 且该虫耐低温性能差, 越冬死亡率高, 调查发现越冬后其数量大幅度减少(谢振东等, 2000)。

白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao(膜翅目: 肿腿蜂科)(待发表新种)最早在天津发现外寄生于白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire(鞘翅目: 吉丁甲科)蛹上(王小艺, 2005), 后来发现自然条件下也能寄生在白蜡树上危害的咖啡虎天牛 *Xylotrechus grayii* White 幼虫(王小艺, 个人观察)。生物学特性的研究结果表明, 能被该蜂取食、寄生并使后代正常完成生长发育的寄主还有柑桔窄吉丁 *Agrilus auriventris*、苹小吉丁 *A. mali*、花椒窄吉丁 *A. zanthoxylumi*、核桃脊胸纹吉丁 *Nalanda* sp.、复纹狭天牛 *Stenomalus complicatus*、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis*、松褐天牛 *Monochamus alternatus*、麻天牛 *Thyestilla gebleri* 等多种吉丁甲和天牛的幼虫(武辉等, 2008)。白蜡吉丁肿腿蜂雌雄性比高、寿命长, 繁殖力、扩散力、寄主搜索和攻击能力均较强, 是一种非常优良的蛀干害虫天敌(武辉等, 2008)。该蜂产卵前往往还在补充营养过程中杀死多头寄主, 具有良好的生物防治应用前景。由于该蜂自然生存于华北地区, 对冬季低温的耐受性可能会比哈氏肿腿蜂更强。为探索利用白蜡吉丁肿腿蜂开展栗山天牛的生物防治, 评价其对栗山天牛幼虫的搜寻能力、控制作用大小, 估算天敌的林间释放量, 本研究测定了白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛 1~2 龄幼虫的寄生作用, 以及寄主密度和寄生蜂自身密度对寻找效应的影响, 现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 试虫

栗山天牛 *Massicus raddei* (Blessig) 1~2 龄幼虫, 2008 年 8 月采自辽宁省宽甸县大西岔镇白菜地村试验林区(44°44.78' N, 125°11.63' E, 海拔 486.6 m), 主要树种为辽东栎 *Quercus liaotungensis* Koidz., 树龄大多数在 40 年以上。

白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao, 2008 年 4 月采自天津市大港区官港森林公园内(38°56' N, 117°29' E, 海拔 4.0 m)绒毛白蜡 *Fraxinus velutina* Torr. 林受害树上的白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire 蛀道内, 供试昆虫为带回实验室经人工饲养 2 代以上的种群。

1.2 功能反应实验方法

1.2.1 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的功能反应测定: 将直径为 1.0~1.5 cm 辽东栎树枝剪成 5~8 cm 的小段, 两端用石蜡封住以防失水。用雕刻刀将枝条表皮切一“U”字形伤口, 直至木质部, 将表皮揭开但不割断, 在表皮下的木质层挖一个约 1.0 cm×2.0 cm 的小凹槽, 视天牛幼虫大小而决定所挖凹槽的尺寸。将栗山天牛幼虫放入凹槽中, 盖好树皮, 再用 Parafilm 膜缠好切口, 令天牛幼虫在枝段内自行蛀食。

将栗山天牛 1~2 龄幼虫接入栎树木段内, 按每根木段分别接 1, 2, 4, 6, 8 头栗山天牛幼虫进行分组。将带虫枝条放入直径 2.8 cm、长 11.5 cm 大玻璃试管内, 每管接入已交配的雌蜂 1 头, 每个处理(不同天牛幼虫密度)重复 4 次, 21 d 后解剖木段检查栗山天牛幼虫的存活情况, 记录天牛幼虫的死亡率、寄生率和寄生蜂的产卵量。对照组不接入寄生蜂, 以观察天牛幼虫的自然死亡率。

1.2.2 白蜡吉丁肿腿蜂自身密度对栗山天牛低龄幼虫功能反应的影响测定: 将栗山天牛 1~2 龄幼虫接入栎树木段内, 每根木段接 6 头天牛幼虫, 然后放入直径 2.8 cm、长 11.5 cm 的大玻璃试管内, 每管分别接入已交配的白蜡吉丁肿腿蜂雌蜂 1, 2, 4, 6, 8 头, 每个处理(不同寄生蜂密度)重复 4 次。16 d 后解剖木段检查栗山天牛幼虫的存活情况, 记录天牛幼虫的死亡率、寄生率和寄生蜂的产卵量。对照组不接入肿腿蜂, 以观察天牛幼虫的自然死亡率。试验在室内自然变温条件下进行, 处理期间室内平均温度为 25.4℃ (20.6~31.9℃), 相对温度为 57.8% (33%~70%)。

1.3 数据统计与处理

1.3.1 功能反应: 由于白蜡吉丁肿腿蜂雌成虫在产卵前需要先取食寄主幼虫补充营养, 如果寄主幼虫个体较小, 在此过程中会杀死一定数量的寄主。因此, 本研究对这 2 种情况分开考虑, 将寄生蜂对寄主幼虫的致死作用和寄生作用的数据进行分别处理。首先对实验结果进行散点图的初步拟合, 观察数据大致符合哪一类型的功能反应模型。接近 Holling I 型方程的用公式(1)进行拟合, 接近 Holling II 型方程的用公式(2)进行拟合。

$$N_a \begin{cases} a' \cdot T_s \cdot N & (0 < N < N_x) \\ a' \cdot T_s \cdot N & (N \geq N_x) \end{cases} \quad (1)$$

$$N_a = \frac{T \cdot a' \cdot N}{1 + a' \cdot T_h \cdot N} \quad (2)$$

其中, N_a 为被寄生的寄主数目(头), N 为初始寄主密度(头), N_x 为被寄生寄主数目的上限(头), a' 为瞬时攻击率, T_s 为寻找时间(d)。 T 为实验处理时间(21 d), T_h 为寄主处理时间(d)。

1.3.2 不同寄主密度下寄生蜂的寻找效应: 寄生蜂对寄主致死作用的寻找效应参考捕食性天敌的寻找效应计算方法, 按下面公式(3)计算, 寄生作用的寻找效应按公式(4)计算。

$$E = \frac{N_a}{N \cdot P} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{P} \cdot \ln\left(\frac{N}{N - N_a}\right) \quad (4)$$

其中, E 为寻找效应, N_a 为被寄生的寄主数目, N 为寄主密度, P 为天敌密度。

1.3.3 寄生蜂自身密度对栗山天牛低龄幼虫功能反应的影响: 首先对实验数据进行散点图的初步拟

合, 观察结果大致符合哪一类型的数学模型, 然后利用 SAS 软件进行参数的拟合和方程显著性检验。

1.3.4 不同寄生蜂密度下的寻找效应: 寄生蜂自身密度对寻找效应的影响按 Hassell(1969)模型拟合(丁岩钦, 1994)。

$$E = Q \cdot P^{-m} \quad (5)$$

其中, E 为寻找效应, Q 为寻找参数, m 为相互干扰参数, P 为寄生蜂的密度。

1.3.5 统计分析方法: 本研究所有数据的统计分析均采用 SAS(Version 9.1.3)软件包进行(陈子星和徐夕水, 1997; SAS Institute Inc., 2006)。回归分析采用 PROC REG 命令, 多重比较采用 PROC GLM 命令。

2 结果与分析

2.1 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的功能反应

2.1.1 致死作用功能反应: 白蜡吉丁肿腿蜂属于抑性寄生方式, 其雌蜂在找到寄主幼虫后, 首先利用产卵器刺蜇寄主并分泌毒液注入寄主体内, 使寄主幼虫永久性麻痹, 然后才在不食不动的寄主体上产卵。在产卵寄生前, 雌蜂需先吮吸寄主幼虫体液以补充营养, 完成卵巢和卵的发育。如果寄主个体较小, 则雌蜂在产卵前需要杀死多头寄主幼虫才能完成补充营养过程。在天敌数量为 1 头的情况下, 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛 1~2 龄小幼虫的致死作用随着寄主密度的增加而显著提高($df = 4, 15, F = 4.07, P = 0.0199$)(表 1)。

表 1 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用(处理后 21 d)

Table 1 Parasitism of *Sclerodermus pupariae* on the young larvae of *Massicus raddei* (21 d after treatment)

寄主密度(头/管) Host density (individuals/tube)	平均致死数(头/管) Mean killed hosts (individuals/tube)	平均寄生数(头/管) Mean parasitized hosts (individuals/tube)	平均产卵量(粒/管) Mean oviposition (eggs/tube)
1	1.00 ± 0.00 c	0.25 ± 0.25 a	0.75 ± 0.75 c
2	2.00 ± 0.00 bc	0.50 ± 0.29 a	0.75 ± 0.75 c
4	3.00 ± 0.41 abc	1.00 ± 0.00 a	10.50 ± 2.33 a
6	4.75 ± 0.75 a	1.00 ± 0.41 a	4.75 ± 1.60 bc
8	4.25 ± 1.49 ab	1.00 ± 0.00 a	6.00 ± 0.91 b

表中同一列数据(平均值 ± SE)后不同字母表示各处理间经多重比较(Tukey 检验)在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 表 2 同。Mean (± SE) values within each column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ based on analysis of variance (TSRT). The same for Table 2.

经模型拟合, 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的致死作用功能反应符合 Holling II 型方程

($r = 0.9953, df = 1, 3, F = 317.33, P = 0.0004$)(图 1)。

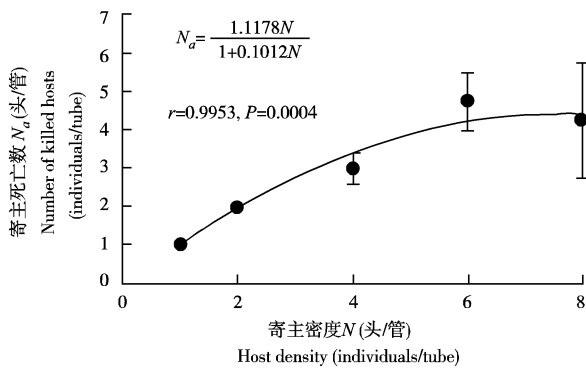


图1 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫致死作用的功能反应

Fig. 1 Functional response for killing action of *Sclerodermus pupariae* on the young larvae of *Massicus raddei*

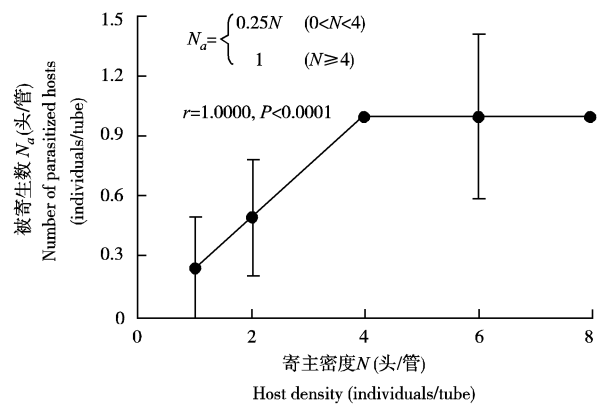


图2 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生功能反应

Fig. 2 Functional response for parasitism of *Sclerodermus pupariae* on *Massicus raddei* young larvae

$\frac{1}{N_a} = 0.8946 - \frac{1}{N} + 0.09054$, 转换为圆盘方程
为 $N_a = \frac{1.1178N}{1 + 0.1012N}$

其中, 瞬时攻击率 a' 为 0.05323, 寄主处理时间 T_h 为 1.9013 天/头, 理论上 21 d 内 1 头白蜡吉丁肿腿蜂雌蜂对栗山天牛 1~2 龄小幼虫的最大致死量为 11.04 头, 平均每日最大致死量为 0.53 头。

2.1.2 寄生作用功能反应: 当寄生蜂数量为 1 头的情况下, 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛 1~2 龄小幼虫的寄生数量起初随着寄主密度的增加而升高, 但当达到某一极限值后, 就保持在上限不再上升 (图 2)。被寄生的寄主数在不同寄主密度下无显著差异 ($df = 4, 15, F = 2.00, P = 0.1462$) (表 1), 但产卵量存在明显不同 ($df = 4, 15, F = 8.36, P = 0.0009$) (表 1)。经模型拟合, 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用功能反应符合 Holling I 型方程, 这是由于肿腿蜂特殊的抚幼习性 (brood guarding behavior) 所造成的。当 $0 < N < 4$ 时, $N_a = 0.25N$ ($r = 1.0000, df = 1, 1, F = \infty, P < 0.0001$); 当 $N \geq 4$ 时, $N_a = 1$ 。本研究中, 当寻找时间 T_s 为 21 d 时, 白蜡吉丁肿腿蜂的寄主密度阈限 N_x 为 4 头, 瞬时攻击率 a' 为 0.0119 头/天。

2.2 寄主密度对寄生蜂寻找效应的影响

2.2.1 致死作用寻找效应: 寄生蜂对寄主致死作用的寻找效应参考捕食性天敌的寻找效应计算方法, 按数据处理方法中的公式 (3) 进行计算。结果表明, 随着寄主密度的增加, 寄生蜂的寻找效率呈直线下降 ($y = -0.06421x + 1.0843, r = -0.9380, df = 1, 3, F = 21.95, P = 0.0184$) (图 3)。

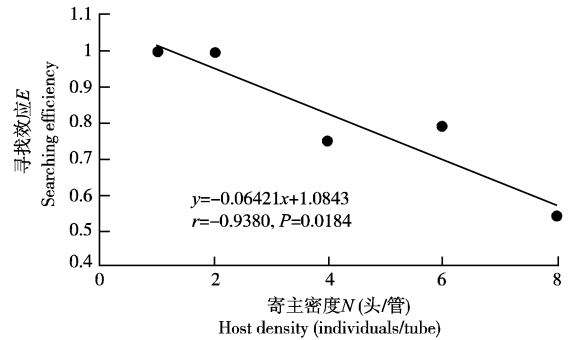


图3 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的致死作用寻找效应

Fig. 3 Searching efficiency in killing action of *Sclerodermus pupariae* on *Massicus raddei* young larvae

2.2.2 寄生作用寻找效应: 寄生作用的寻找效应按数据处理方法中的公式 (4) 计算。寻找效率随着寄主密度上升而降低 ($y = -0.02365x + 0.3351, r = -0.9257, df = 1, 3, F = 17.96, P = 0.0241$) (图 4)。

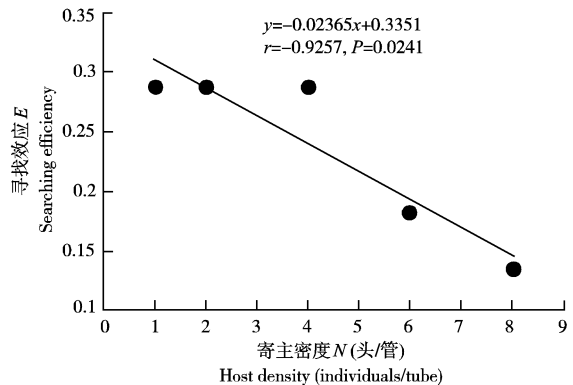


图4 白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用寻找效应

Fig. 4 Searching efficiency in parasitism of *Sclerodermus pupariae* on *Massicus raddei* young larvae

2.3 白蜡吉丁肿腿蜂自身密度对栗山天牛低龄幼虫致死作用和寄生作用的影响

2.3.1 致死作用：当寄主密度固定为 6 头不变时，随着寄生蜂密度的增加寄主的致死数量显著上升

($df = 4, 14, F = 3.53, P = 0.0341$) (表 2)，二者呈明显的线性关系 ($y = 0.3005x + 3.7220, r = 0.9919, df = 1, 3, F = 183.15, P = 0.0009$) (图 5)。

表 2 不同密度的白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用 (处理后 16 d)

Table 2 Parasitism of *Sclerodermus pupariae* at different densities on *Massicus raddei* young larvae (16 d after treatment)

寄生蜂密度(头/管) Parasitoid density (wasp/tube)	平均致死数(头/管) Mean killed hosts (individuals/tube)	平均寄生数(头/管) Mean parasitized hosts (individuals/tube)	平均产卵量(粒/管) Mean oviposition (eggs/tube)
1	4.00 ± 0.71 c	0.75 ± 0.25 a	4.00 ± 1.58 a
2	4.25 ± 0.63 bc	1.25 ± 0.25 a	10.25 ± 4.27 a
4	5.00 ± 0.00 abc	1.75 ± 0.48 a	10.75 ± 4.87 a
6	5.67 ± 0.33 ab	2.00 ± 0.58 a	15.33 ± 7.22 a
8	6.00 ± 0.00 a	2.00 ± 0.41 a	11.25 ± 4.97 a

寄主密度固定为 6 头/管；图 5~8 同。Host density is 6 individuals/tube, and the same for Figs. 5-8.

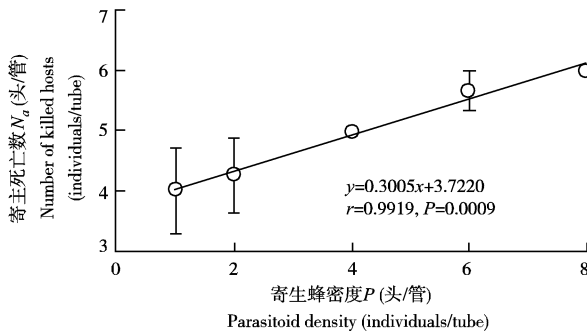


图 5 不同密度的白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的致死作用

Fig. 5 Killing action of *Sclerodermus pupariae* at different densities on the young larvae of *Massicus raddei*

2.3.2 寄生作用：当寄主密度固定不变时，随着寄生蜂密度的增加，被寄生的寄主数量上升，但各处理间的寄生数无显著差异 ($df = 4, 14, F = 1.90, P = 0.1658$) (表 2)，二者呈明显的抛物线关系 ($y = -0.03807x^2 + 0.5136x + 0.3141, r = 0.9182, df = 2, 2, F = 188.65, P = 0.0053$) (图 6)。寄生蜂不同密度下的产卵量也无明显差异 ($df = 4, 14, F = 0.73, P = 0.5869$) (表 2)。

2.3.3 寄生蜂自身密度对寻找效应的影响：不同密度下的寄生蜂对栗山天牛低龄幼虫致死作用和寄生作用的寻找效应均按 Hassell (1969) 模型拟合。结果表明，随着寄生蜂密度的增加，白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫致死作用 ($E = 0.6432P^{-0.7954}, r = -0.9988, df = 1, 3, F = 1195.50, P < 0.0001$) 和寄生作用 ($E = 0.1369P^{-0.5185}, r = -0.9769, df = 1,$

$3, F = 62.60, P = 0.0042$) 的寻找效应均显著下降 (图 7, 8)。

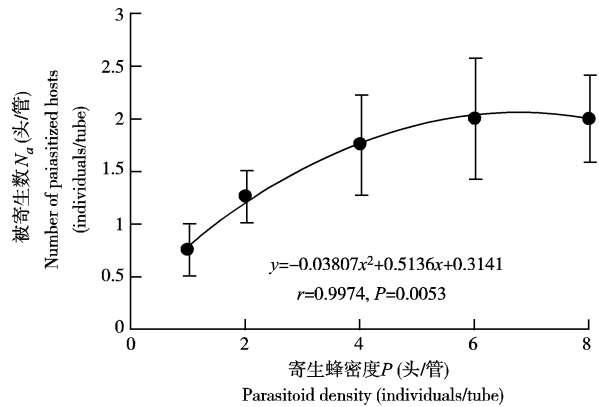


图 6 不同密度的白蜡吉丁肿腿蜂对栗山天牛低龄幼虫的寄生作用

Fig. 6 Parasitism of *Sclerodermus pupariae* at different densities on the young larvae of *Massicus raddei*

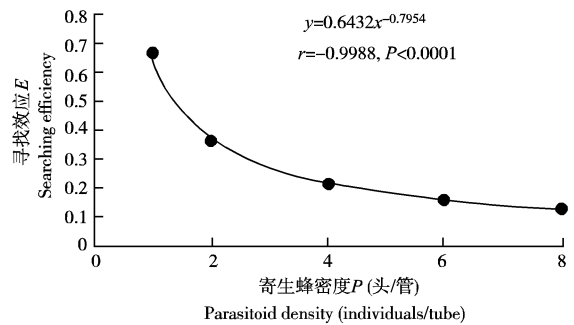


图 7 寄生蜂自身密度对栗山天牛低龄幼虫致死作用寻找效应的影响

Fig. 7 Effect of parasitoid densities on their searching efficiency for the killing action on *Massicus raddei* young larvae

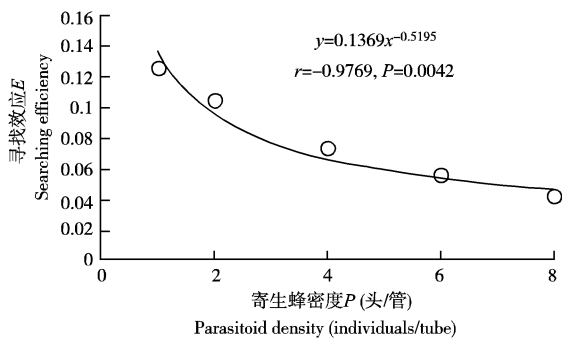


图8 寄生蜂自身密度对栗山天牛低龄幼虫寄生作用寻找效应的影响

Fig. 8 Effect of parasitoid densities on their searching efficiency for the parasitism on *Massicus raddei* young larvae

3 讨论

功能反应是研究害虫生物防治中天敌对害虫捕食或寄生能力的经典方法,也是了解天敌-猎物种群数量动态的重要内容,能较准确地获得天敌昆虫的搜寻能力、处理速率及其影响因素,为评价天敌对害虫的控制效能提供重要依据(徐汝梅, 1987; 欧晓明等, 1998)。生产上寄生蜂的释放量将直接影响生物防治的实际效果,只有掌握好合理的释放比例,才能充分发挥天敌的作用,在有效控制害虫的同时又节省天敌资源(邵岩岩等, 2008)。

国内外关于肿腿蜂的应用研究均较多(Abbas *et al.*, 2008; Hong *et al.*, 2008; Jaramillo and Vega, 2009),特别是在哈氏肿腿蜂 *Sclerodermus harmandi*、*Cephalonomia stephanoderis*、*Goniozus legneri*、*Prorops nasuta*、*Aphanogmus* sp. 的引进利用(Berry, 1998; Infante *et al.*, 2003)、人工繁育技术(Abbas, 1999; Portilla, 1999; IruLandi *et al.*, 2009)以及释放防治技术(Damon and Valle, 2002; IruLandi *et al.*, 2008; 姚万军和杨忠岐, 2008)等方面的研究。白蜡吉丁肿腿蜂是近年在我国天津发现的蛀干害虫寄生蜂新种(王小艺, 2005)。2008年在辽宁省宽甸县的林间释放试验结果显示,该蜂在自然条件下能找到并成功寄生栗山天牛的低龄幼虫,也能够耐受我国东北地区冬季自然条件下的低温而安全越冬,显示出了良好的生物防治应用前景(王小艺等, 未发表资料)。栗山天牛虽然不是白蜡吉丁肿腿蜂的原始寄主,但这类多寄主型的寄生蜂学习能力一般都较强,通过学习行为和人工驯化作用提高寄生蜂对目标害虫及其生活环境的适应性,从而提高生物防治的效果是一条值得探索的途

径。如川硬皮肿腿蜂羽化期和成虫初期经历松枝皮、松针、松节油、杉枝皮等挥发物后,雌蜂对这些植物材料的选择性明显提高(杨伟等, 2005)。通过驯化后的川硬皮肿腿蜂更加适应松褐天牛的生活环境,对马尾松上松褐天牛幼虫的寄生能力显著提高(张犀和周祖基, 2007)。寄生蜂的联系性学习行为是对那些具有隐蔽性和逃避反应的寄主的有效适应,学习行为和接触经验对寄生性天敌昆虫寻找寄主和选择寄主龄期具有明显的影响(Dutton *et al.*, 2000)。有些寄生蜂甚至可对与寄主毫无关系的气味产生学习能力,雌蜂经历后表现出明显的嗜好性(Lewis and Tumlinson, 1988; Lewis and Takasu, 1990)。

对于个体较小(体长小于1 cm)的天牛幼虫,白蜡吉丁肿腿蜂在产卵前会因补充营养取食而导致多头寄主死亡,但对于个体较大的天牛幼虫,则不会出现这种情况,雌蜂往往能在同一寄主上完成补充营养和产卵的全过程。对于寄生蜂的寄主搜索能力和寻找效率,实验室的研究结果和林间试验情况必然存在一定的差异,室内测定时由于枝段小、空间小,寄生蜂容易发现并找到目标害虫,寄生蜂的相互干扰效应也会更加明显。而在林间自然条件下,由于树干粗大,天牛密度较低,寄生蜂需要花费更长时间才能找到寄主害虫。因此,实验室内的测定结果只能作为生产上应用时的参考指标。由于肿腿蜂是一类较为特殊的寄生蜂,雌蜂具有抚幼习性,产完卵后并不马上离开寄主,而是留在寄生后寄主体上继续照料后代,直到下一代成蜂羽化为止。因此,建议防治上至少应以1:1的益害比例(肿腿蜂数量:天牛数量)释放天敌。

致谢 安徽农业大学邹运鼎教授对本文在数据处理方法和拟合公式的选用上给予了耐心的指导和详尽解释。谨致谢忱!

参考文献 (References)

- Abbas MST, 1999. Biological studies and mass-rearing of the ectoparasitoid, *Goniozus legneri* Gordh (Hymenoptera, Bethyilidae). *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 77(1): 151-158.
- Abbas MST, Shidi RH, Jumah S, Al-Khatry SA, 2008. Utilization of *Goniozus* sp. (Hym.: Bethyilidae) as a bio-control agent against the lesser date moth, *Batrachedra amydaraula* (Meyrick) (Lep.: Batrachedridae) in date palm orchards in Sultanate of Oman. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 18(1): 47-50.
- Berry JA, 1998. The bethylinae species (Hymenoptera: Bethyilidae: Bethylinae) imported into New Zealand for biological control of pest

- leafrollers. *New Zealand Journal of Zoology*, 25(4): 329–333.
- Cai YC, Huang PF, Han GS, Gao LX, 1999. Damage and management of *Massicus raddei*. *Forest Pest and Disease*, 18(2): 25–26. [蔡元才, 黄培发, 韩国昇, 高立新, 1999. 栗山天牛的危害与防治. 森林病虫通讯, 18(2): 25–26]
- Chen SX, Xie YZ, Deng GF, 1959. Economic Insect Fauna of China. (Fasc. 1, Coleoptera: Cerambycidae). Science Press, Beijing. 43. [陈世骧, 谢蕴贞, 邓国藩, 1959. 中国经济昆虫志(第一册, 鞘翅目: 天牛科). 北京: 科学出版社. 43]
- Chen ZX, Xu XS, 1997. Key to Exercises in SAS Program of Biostatistics. Computer Centre, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. 38–40, 117–123. [陈子星, 徐夕水, 1997. 生物统计 SAS 程序题解. 北京: 中国农业科学院计算中心. 38–40, 117–123]
- Damon A, Valle J, 2002. Comparison of two release techniques for the use of *Cephalonomia stephanoderis* (Hymenoptera: Bethyliidae), to control the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) in Soconusco, southeastern Mexico. *Biological Control*, 24(2): 117–127.
- Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Science Press, Beijing. 252–317. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 252–317]
- Dutton A, Mattiacci L, Dorn S, 2000. Learning used as a strategy for host stage location in an endophytic host-parasitoid system. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 94(2): 123–132.
- Gao GP, 2001. Research on Biological and Ecological Characters and Controlling Techniques of *Massicus raddei*. MSc Thesis, Northeast Forestry University, Harbin. [高国平, 2001. 栗山天牛生物生态学特性及防治技术的研究. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文]
- Hong JI, Koh SH, Chung YJ, Shin SC, Kim GH, Choi KS, 2008. Biological characteristics of *Sclerodermus harmandi* (Hymenoptera: Bethyliidae) parasitized on cerambycid. *Korean Journal of Applied Entomology*, 47(2): 133–139.
- Hou Y, Ji CL, Gao C, Lü J, Tan SK, Li MG, Zhang H, 2000. Study on biological characters and prevention techniques of *Massicus raddei*. *Liaoning Forestry Science and Technology*, (5): 15–18. [侯义, 季长龙, 高纯, 吕军, 谭胜科, 李明贵, 张辉, 2000. 栗山天牛生物学特性及防治技术研究. 辽宁林业科技, (5): 15–18]
- Infante F, Mumford J, Garcia-Ballinas A, 2003. Predation by native arthropods on the African parasitoid *Prorops nasuta* (Hymenoptera: Bethyliidae) in coffee plantations of Mexico. *Florida Entomologist*, 86(1): 86–88.
- Irulandi S, Rajendran R, Samuel SD, Chinniah C, Kumar PKV, Sreedharan K, 2008. Efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuill. and an exotic parasitoid, *Cephalonomia stephanoderis* (Betrem) (Hymenoptera: Bethyliidae) for the management of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biological Control*, 22(1): 91–97.
- Irulandi S, Samuel SD, Kumar PKV, Sreedharan K, 2009. Parasitism by the exotic parasitoid, *Cephalonomia stephanoderis* Betrem (Hymenoptera: Bethyliidae) on coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (F.) on Pulney hills, Tamil Nadu. *Hexapoda*, 16(1): 32–35.
- Jaramillo J, Vega FE, 2009. *Aphanogmus* sp. (Hymenoptera: Ceraphronidae): a hyperparasitoid of the coffee berry borer parasitoid *Prorops nasuta* (Hymenoptera: Bethyliidae) in Kenya. *Biocontrol Science and Technology*, 19(1): 113–116.
- Ji CL, Hou Y, Gao C, 1995. Preliminary survey for the occurrence of *Massicus raddei*. *Liaoning Forestry Science and Technology*, (2): 40–41. [季长龙, 侯义, 高纯, 1995. 栗山天牛发生情况调查初报. 辽宁林业科技, (2): 40–41]
- Lewis WJ, Takasu K, 1990. Use of learned odours by a parasitic wasp in accordance with host and food needs. *Nature*, 348: 635–636.
- Lewis WJ, Tumlinson JH, 1988. Host detection by chemically mediated associative learning in a parasitic wasp. *Nature*, 331: 257–259.
- Lou J, Zheng BH, 2005. Artificial rearing of *Sclerodermus guani* and its application on the control of *Massicus raddei*. *Liaoning Forestry Science and Technology*, (6): 29–30. [娄杰, 郑柏华, 2005. 管氏肿腿蜂人工繁殖及在防治栗山天牛中的应用. 辽宁林业科技, (6): 29–30]
- Ou XM, Jiang HH, Chen CM, 1998. Functional response of *Telenomus euproctidis* Wilcox (Hymenoptera: Scelionidae) to its host *Euproctis pseudoconspersa* Strand (Lepidoptera: Lymantriidae). *Natural Enemies of Insects*, 20(1): 13–18. [欧晓明, 江汉华, 陈常铭, 1998. 茶毒蛾黑卵蜂的功能反应. 昆虫天敌, 20(1): 13–18]
- Pi ZQ, Wang B, Ning CL, Yu YP, Gao JC, Hou B, Mu ZH, Cao LJ, Gao LJ, Wang L, 2007. A report on special survey to *Massicus raddei* in Jilin Province of China. *Jilin Forestry Science and Technology*, 36(1): 39–42. [皮忠庆, 王宝, 宁长林, 于艳萍, 高峻崇, 侯彬, 牟智慧, 曹丽君, 高立军, 王丽, 2007. 吉林省栗山天牛专项调查技术报告. 吉林林业科技, 36(1): 39–42]
- Portilla M, 1999. Mass rearing technique for *Cephalonomia stephanoderis* (Hymenoptera: Bethyliidae) on *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) developed using *Cenibra* artificial diet. *Revista Colombiana de Entomologia*, 25(1/2): 57–66.
- SAS Institute Inc., 2006. SAS OnlineDoc®. Version 9.1.3. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. <http://support.sas.com/onlinedoc/913/docMainpage.jsp>.
- Shao YY, Li JJ, Qian HT, Dong H, Cong B, 2008. A study on functional response of *Bracon hebetor* to *Coryra cephalonica*. *China Plant Protection*, 28(2): 9–12. [邵岩岩, 李晶津, 钱海涛, 董辉, 丛斌, 2008. 麦蛾茧蜂对米蛾功能反应的研究. 中国植保导刊, 28(2): 9–12]
- Sun XL, Cheng B, Gao CQ, Zhou GP, Dong CQ, Lu YB, Lu YQ, 2006. Review of study on outbreak and prevention of *Mallambyx raddei* Blessig. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, (1): 54–56. [孙晓玲, 程彬, 高长启, 周广平, 董长青, 鹿永斌, 鹿永强, 2006. 栗山天牛发生及防治的研究现状. 吉林师范大学学报(自然科学版), (1): 54–56]
- Sun YP, 2001. Control Techniques for *Massicus raddei*. Liaoning Science and Technology Press, Shenyang. [孙永平, 2001. 栗山天牛防治技术. 沈阳: 辽宁科学技术出版社]

- Wang XY, 2005. Biology of the Emerald Ash Borer and Its Biological Control. Postdoctoral Research Report, Chinese Academy of Forestry, Beijing. [王小艺, 2005. 白蜡窄吉丁的生物学及其生物防治研究. 北京: 中国林业科学研究院博士后出站报告]
- Wang ZY, 1999. Damage of *Massicus raddei* on *Quercus* spp. and its control strategy. *Liaoning Forestry Science and Technology*, (3): 32-33. [王忠友, 1999. 栗山天牛对柞树类的危害及防治对策. 辽宁林业科技, (3): 32-33]
- Wu H, Wang XY, Li ML, Yang ZQ, Zeng FX, Wang HY, Bai L, Liu SJ, Sun J, 2008. Biology and mass rearing of *Scleroderma pupariae* Yang et Yao (Hymenoptera: Bethyridae), an important ectoparasitoid of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 51(1): 46-54. [武辉, 王小艺, 李孟楼, 杨忠岐, 曾繁喜, 王红艳, 白玲, 刘松君, 孙进, 2008. 白蜡吉丁肿腿蜂的生物学特性及人工繁殖. 昆虫学报, 51(1): 46-54]
- Xie ZD, Zhang XC, Zhang PY, Cui MZ, Jiang DD, Tang JY, Zhang ZR, Sui XY, Hou B, Wang YL, Sun YY, Qiu CA, Liu SC, Wang KJ, 2000. Preliminary study on *Mallambyx raddei* control using *Scleroderma* sp. *Jilin Forestry Science and Technology*, 29(4): 10-14. [谢振东, 张绪成, 张佩勇, 崔明哲, 姜殿东, 唐景银, 张忠仁, 隋希英, 侯彬, 王业隆, 孙元友, 邱春安, 刘世臣, 王凯军, 2000. 利用管氏肿腿蜂防治栗山天牛林间放蜂技术试验. 吉林林业科技, 29(4): 10-14]
- Xie ZD, Zhang XC, Zhang PY, Cui MZ, Jiang DD, Yang YX, Sui XY, Hou B, Tang JY, Zhang ZR, 1999. Studies on the artificial rearing of *Scleroderma guani* using larvae of *Massicus raddei* as host. *Jilin Forestry Science and Technology*, 28(6): 11-12. [谢振东, 张绪成, 张佩勇, 崔明哲, 姜殿东, 杨玉新, 隋希英, 侯彬, 唐景银, 张忠仁, 1999. 用栗山天牛幼虫做寄主人工繁殖管氏肿腿蜂的试验研究. 吉林林业科技, 28(6): 11-12]
- Xu RM, 1987. Insect Population Ecology. Beijing Normal University Press, Beijing. 318-338 [徐汝梅, 1987. 昆虫种群生态学. 北京: 北京师范大学出版社. 318-338]
- Yang W, Xie ZH, Zhou ZJ, Huang Q, Yang CP, 2005. The learning behavior of *Scleroderma sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyridae) fed on the fictitious hosts *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Acta Entomologica Sinica*, 48(5): 731-735. [杨伟, 谢正华, 周祖基, 黄琼, 杨春平, 2005. 用替代寄主繁殖的川硬皮肿腿蜂的学习行为. 昆虫学报, 48(5): 731-735]
- Yao WJ, Yang ZQ, 2008. Studies on biological control of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) with a parasitoid, *Scleroderma guani* (Hymenoptera: Bethyridae). *Journal of Environmental Entomology*, 30(2): 127-134. [姚万军, 杨忠岐, 2008. 利用管氏肿腿蜂防治光肩星天牛技术研究. 环境昆虫学报, 30(2): 127-134.]
- Zhang X, Zhou ZJ, 2007. Controlling *Monochamus alternatus* by domestication of *Scleroderma sichuanensis*. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 28(4): 16-20. [张犀, 周祖基, 2007. 驯化川硬皮肿腿蜂生物防治松褐天牛. 四川林业科技, 28(4): 16-20]

(责任编辑: 袁德成)