

白蛾黑棒啮小蜂的生殖力及替代寄主的繁蜂效果*

张艺馨^{1**} 史俊瑞¹ 付兴² 杨丽元¹
胡少锋¹ 马茜¹ 孙守慧^{1***}

(1. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110161; 2. 抚顺矿业集团有限责任公司林业处, 抚顺 113006)

摘要 【目的】白蛾黑棒啮小蜂 *Tetrastichus septentrionalis* 是防治美国白蛾 *Hyphantria cunea* 的重要寄生性天敌。明确白蛾黑棒啮小蜂生殖力及替代寄主的繁殖效果, 可为指导室内人工继代繁育该蜂提供理论依据和技术支撑。【方法】通过解剖白蛾黑棒啮小蜂雌成蜂生殖系统, 研究其生殖力, 采用寄生成功率等指标测定了美国白蛾蛹、柞蚕蛹 *Antheraea pernyi*、黄粉甲蛹 *Tenebrio molitor* 和大麦虫蛹 *Zophobas atratus* 的最适接蜂量, 并通过测定白蛾黑棒啮小蜂的寄生成功率、羽化率、每克蛹出蜂量和雌雄性比 4 项指标比较 4 种寄主蛹的繁蜂效果。【结果】白蛾黑棒啮小蜂雌性成蜂生殖系统包括 1 对卵巢、1 对侧输卵管、1 个中输卵管、1 个附腺、1 个受精囊、1 个杜氏腺、1 个毒囊以及其上的 1 个毒腺。每侧卵巢的卵巢管数量为 10–12 根, 各卵巢管中所含的卵粒数为 3–8 粒。理论上每头雌蜂卵巢中卵粒的最大数量可达 192 粒, 但从实际解剖结果来看, 最大怀卵量为 145 粒, 每头雌成虫平均含卵粒数为 106 粒; 综合寄生成功率、平均发育历期、每个寄主蛹的平均后代数量、后代雌雄性比和后代雌雄蜂体长 5 个指标, 确定供试繁育白蛾黑棒啮小蜂的 4 种寄主蛹的最适蜂蛹比分别为: 美国白蛾蛹为 3 : 1、柞蚕蛹为 100 : 1、黄粉甲蛹为 3 : 1、大麦虫蛹为 20 : 1; 人工繁育 5 代后黄粉甲蛹和美国白蛾蛹寄生成功率显著高于柞蚕蛹和大麦虫蛹, 其中以黄粉甲蛹的寄生成功率最高 (98.27%); 黄粉甲蛹、美国白蛾蛹和柞蚕蛹的羽化率均大于 97%, 其中以黄粉甲蛹最高 (98.26%); 每克蛹出蜂量柞蚕蛹最高 (1 333 头), 大麦虫蛹最低 (217 头); 雌雄性比柞蚕蛹最高 (7.65 : 1), 黄粉甲蛹其次 (6.64 : 1), 大麦虫蛹最低 (4.69 : 1)。【结论】根据寄生成功率、羽化率、每克蛹出蜂量和雌雄性比 4 项指标的测定结果, 4 种供试的寄主蛹都可供白蛾黑棒啮小蜂完成继代繁育, 除大麦虫蛹外, 其他 3 种蛹各有优势, 均具有较好的繁育效果, 可根据科学研究或规模化生产的不同需求以及获得寄主蛹的难易程度和成本来选择进行继代繁育。

关键词 白蛾黑棒啮小蜂; 生殖系统; 替代寄主; 人工繁育; 蜂蛹比

Fecundity of *Tetrastichus septentrionalis* and effects of alternative hosts on the mass rearing of this species

ZHANG Yi-Xin^{1**} SHI Jun-Rui¹ FU Xing² YANG Li-Yuan¹
HU Shao-Feng¹ MA Xi¹ SUN Shou-Hui^{1***}

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Department of Forestry, Fushun mining group Co., Ltd., Fushun 113006, China)

Abstract [Objectives] To improve the captive breeding of the wasp *Tetrastichus septentrionalis*, an important parasitic, biological control of *Hyphantria cunea*, by identifying the best hosts for the captive propagation of this species. [Methods] The structure of the reproductive system and fecundity of adult female *T. septentrionalis* were studied by dissection. The effects of four

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1400300)

**第一作者 First author, E-mail: 415819652@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: sshl@syau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-08-29; 接受日期 Accepted: 2022-12-31

different host species; *H. cunea*, *Antherea pernyi*, *Tenebrio molitor* and *Zophobas atratus* on the parasitism rate, eclosion rate, number of progeny per gram of host pupa, sex ratio and offspring body size of *T. septentrionalis*, were compared. **[Results]** The female reproductive system consists of a pair of symmetrical ovaries, a pair of lateral oviducts, a common oviduct, an accessory gland, a spermatheca, a Dufour gland, venom reservoir and a venom glands. There are 10-12 ovarian tubes per female, and the number of eggs contained in each ovariole ranged from 3 to 8. Theoretically, the maximum number of eggs in each female ovary could reach 192 (there are 12 ovarioles in both the left and right ovaries and the number of eggs in each was 8). However, the maximum number of eggs actually observed was 145, and the mean number of eggs per female was 106. The optimal parasitoid-host ratios for *T. septentrionalis* were: 3 : 1 for *H. cunea*, 100 : 1 for *A. pernyi* pupae, 3 : 1 for *T. molitor* pupae and 20 : 1 for *Z. atratus*. The parasitism rate of *T. molitor* pupae and *H. cunea* pupae was significantly higher than that of *A. pernyi* and *Z. atratus* pupae. After five captive-bred generations, the highest parasitism rate (98.27%) was recorded in *T. molitor* pupae. The emergence rate of *T. septentrionalis* from *T. molitor*, *H. cunea* and *A. pernyi* pupae was > 97%. The highest *T. septentrionalis* emergence rate (98.26%) was also recorded in *T. molitor* pupae. The number of female wasps per gram of pupa was highest for *A. pernyi* (1 333), followed by *T. molitor* (781), and lowest for *Z. atratus* (217). The female: male sex ratio of *T. septentrionalis* was highest for *T. molitor* (7.65 : 1), followed by *Z. atratus* (6.64 : 1), and lowest for *Z. atratus* (4.69 : 1). **[Conclusion]** Although *T. septentrionalis* can successfully parasitize all four species of host pupae, *Z. atratus* pupae were significantly less suitable than those of the other three species. Host pupae should be chosen according to the demands of scientific research, the scale of production, and cost.

Key words *Tetrastichus septentrionalis*; reproductive system; alternative-host; rearing; parasitoid-host ratios

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 属于鳞翅目 (Lepidoptera) 目夜蛾科 (Erebidae), 又名秋幕毛虫, 原产于北美, 是我国重大外来林业有害生物 (Morris, 1963; Bi, 2018), 具有适应性强、繁殖量大、寄主种类多、传播途径广、危害严重、防治难度大等特点。自 1979 年从朝鲜的新义州传入我国丹东, 现已蔓延到我国 14 个省 (自治区、直辖市) 611 个县级行政区, 对我国农林业生态系统和园林植物造成了严重危害 (杨忠岐, 2004; 罗立平等, 2018; 李硕等, 2022); 主要以幼虫取食桑树 *Morus* sp.、榆树 *Ulmus pumila*、杨树 *Populus* sp.、垂柳 *Salix babylonica*、杏 *Armenica vulgaris* 等 49 科 108 属的 300 余种植物 (季荣, 2003; 杨忠岐和张永安, 2007; 孙守慧等, 2021; 赵旭东等, 2022)。截止目前, 化学防治是短期快速防治的有效途径, 但长期使用会使美国白蛾产生抗药性, 同时污染环境, 杀害天敌, 破坏生态平衡 (罗立平等, 2018; 邱立新等, 2022; 赵旭东等, 2022); 利用白蛾聚集盘绒茧蜂 *Cotesia gregalis* Yang et You、康刺腹寄蝇 *Compsilura concinnata* (Meigen) 和白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 等优势天敌昆虫以及

性信息素、病原性天敌 (病毒、细菌、真菌)、植物源杀虫剂等措施防治美国白蛾可有效解决这一问题 (Zhang *et al.*, 1996; 段彦丽等, 2009; 刘子欢等, 2015; 张龙娃等, 2016; 陈沉等, 2020; 胡天义等, 2022)。寄生蜂是一类重要的寄生性天敌昆虫, 在害虫生物防治和综合治理中发挥着极其重要的作用 (时敏, 2020)。特别是优势寄生性天敌白蛾周氏啮小蜂的广泛应用, 使美国白蛾生物防控取得了重大进展 (杨忠岐, 1990; 郑雅楠等, 2012), 为其它优势天敌的研发与应用提供了范例。

白蛾黑棒啮小蜂 *Tetrastichus septentrionalis* Yang, 属啮小蜂属 *Tetrastichu*、黑棒啮小蜂种团 (Howardi-group), 对美国白蛾蛹寄生率高达 12%-24% (杨忠岐等, 2001), 是美国白蛾蛹期的重要寄生性天敌; 除寄生美国白蛾蛹外, 还能寄生柳毒蛾 *Leucoma salicis* (Linnaeus)、杨毒蛾 *Leucoma candida* (Staudinger)、杨扇舟蛾 *Clostera anachoreta* (Denis & Schiffermüller)、杨小舟蛾 *Micromelalopha troglodyta* (Graeser) 等多种鳞翅目食叶害虫, 具有产卵量高、雌蜂比例大、寄生能力强等优良生物学特性, 在林木害虫生物防治

方面有着广阔的利用前景(曲花荣等, 2007; 闫俊香等, 2018; 姬琨, 2019)。寄生蜂卵巢结构、卵子发育模式及寄生蜂产卵规律在害虫生物防治的实践中有重要的指导作用, 特别是为寄生蜂的大规模生产、田间和保护地大量释放提供参考(徐海云等, 2015), 但国内外对白蛾黑棒啮小蜂雌蜂生殖系统并无报道; 同时, 寻求易于生产的替代寄主是白蛾黑棒啮小蜂的人工繁殖需要首先解决的问题, 目前多以柞蚕蛹为替代寄主进行大规模繁育, 国内也有利用杨小舟蛾、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 的蛹对该蜂进行转寄主复壮(姬琨, 2019; 曲花荣等, 2007; 闫俊香等, 2018)。为提升白蛾黑棒啮小蜂人工繁育效率和寄生蜂品质, 筛选出更多的替代寄主, 可有效降低该寄生蜂繁育成本, 增加其应用范围。观测白蛾黑棒啮小蜂雌性成蜂内部生殖系统, 明确其生殖潜力, 有利于改进繁殖方法, 提高其室内繁蜂产量和品质, 为大量应用白蛾黑棒啮小蜂防治美国白蛾提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

白蛾黑棒啮小蜂: 于 2020 年 9 月实验室从丹东市振兴区阳光幼儿园附近杨树树下采集的美国白蛾蛹中出蜂。在温度 (24 ± 1) °C; 湿度 $65\%\pm 5\%$; 光周期 16 L : 8D 条件下以 4 种寄主继代繁育; 美国白蛾蛹: 美国白蛾虫源购自中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究中心。在温度 (24 ± 1) °C; 湿度 $65\%\pm 5\%$; 光周期 16 L : 8D 条件下饲养。卵用 10% 的甲醛溶液消毒后置于养虫室中等待孵化。孵化后的 1-3 龄幼虫在塑料小盒中饲养, 每个养虫盒中幼虫 30 头, 盒中放置适量饲料; 3 龄后, 将幼虫分拨至 $16\text{ cm} \times 11\text{ cm} \times 5.5\text{ cm}$ 养虫盒中, 每个养虫盒 10-15 头, 每天清理虫粪并更换新的饲料; 一直饲喂至化蛹; 柞蚕蛹: 柞蚕蛹购于沈阳市马关桥农贸市场; 黄粉甲蛹: 黄粉甲和大麦虫蛹购于沈阳市花鸟虫鱼市场, 在温度 (24 ± 1) °C; 湿度 $65\%\pm 5\%$;

光周期 16 L : 8D 条件下, 用麦麸继代继代繁育, 化蛹后收集待用。

1.2 雌成虫卵巢生殖系统解剖

利用随机抽样的方法选出 30 头雌蜂。将白蛾黑棒啮小蜂雌蜂置于 10% 的乙醇溶液, 数分钟虫体死后, 放在载玻片凹陷处。在双目解剖镜 (SMZ-161 Series) 下用解剖针除去头胸部分, 剔除粘着于卵巢上的脂肪及消化系统等物, 然后将带有完整生殖系统的载玻片置于生物显微镜 (MOTIC, BA210) 下观察、拍照。

1.3 白蛾黑棒啮小蜂最适替代寄主及接蜂量

1.3.1 不同蜂蛹比繁育白蛾黑棒啮小蜂 根据预实验结果, 4 种寄主蛹的蜂蛹比分别为: 美国白蛾蛹设置 5 个蜂蛹比 (1 : 1、2 : 1、3 : 1、4 : 1、5 : 1), 柞蚕蛹设置 3 个蜂蛹比 (50 : 1、80 : 1 和 100 : 1), 黄粉甲蛹设置 5 个蜂蛹比 (1 : 1、2 : 1、3 : 1、4 : 1、5 : 1), 大麦虫蛹设置 4 个蜂蛹比 (5 : 1、10 : 1、15 : 1、20 : 1); 分别取大小、体重一致的黄粉甲蛹、美国白蛾蛹、大麦虫蛹单头装入指形管内, 柞蚕蛹单头置于试管 (10 mL) 中, 分别按不同蜂蛹比接入交尾 48 h 后的雌蜂, 以脱脂棉塞紧管口, 编号后放入恒温培养箱 (HWS-380 型) 中进行继代繁育 [(24 ± 1) °C; 16 L : 8D; $65\%\pm 5\%$], 直至羽化出蜂, 记录每头寄主蛹出蜂量和出蜂天数, 统计寄生率、雌雄性比和体长等。每个处理 15 头蛹, 重复 3 次。

1.3.2 4 种寄主蛹继代繁育白蛾黑棒啮小蜂效果对比 分别采用 4 种寄主蛹的蜂蛹比: 美国白蛾蛹 3 : 1、柞蚕蛹 100 : 1、黄粉甲蛹 3 : 1、大麦虫蛹 20 : 1 条件下, 培养条件同 1.3.1。接入白蛾黑棒啮小蜂继代繁育 5 代后, 统计不同寄主蛹接蜂后白蛾黑棒啮小蜂寄生成功率、羽化率、出蜂总数和后代性比, 柞蚕蛹 30 个重复, 其余 3 种蛹各 90 个重复。

1.4 统计方法

寄生成功率 (%) = 被成功寄生的蛹数 (头) /

总蛹数 (头) ×100,

羽化率 (%) =羽化出成蜂数 (头) /小蜂总蛹数 (头) ×100。

利用 Excel 2017 和 SPSS 22.0 软件对所有试验数据进行相关统计分析, 差异显著性采用单因素方差分析法, 多重比较采用 Duncan’s 新复极差法 (性比的多重比较采用 χ^2 检验)。

2 结果与分析

2.1 白蛾黑棒啮小蜂生殖能力的解剖研究

2.1.1 白蛾黑棒啮小蜂的雌性内生殖系统

白蛾黑棒啮小蜂雌蜂体长约 2.3 mm, 腹部长约 1.2 mm, 腹部宽约 0.85 mm。雌性生殖系统位于整个腹部 (图 1)。

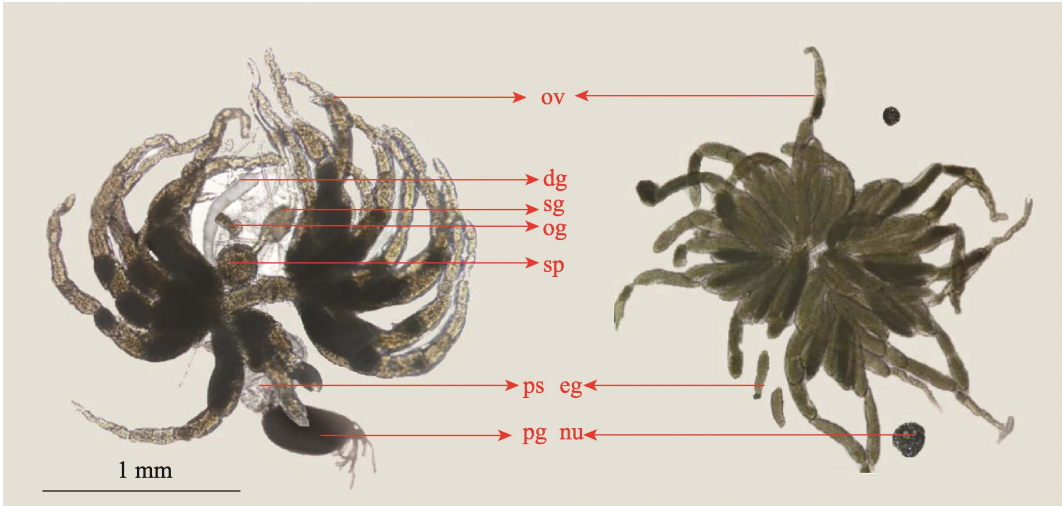


图 1 白蛾黑棒啮小蜂雌蜂内生殖器的形态

Fig. 1 Morphology of internal female genitalia of *Tetrastichus septentrionalis*

ov: 卵巢管; eg: 卵细胞; og: 输卵管附腺; sp: 受精囊; sg: 受精囊腺;
ps: 毒囊; pg: 毒腺; nu: 营养体; dg, 杜氏腺。
ov: Ovarioles; eg: Egg; og: Oviductusg gland; sp: Spermatheca; sg: Spermatheca gland;
ps: Poison sac; pg: Poison gland; nu: Nutrients; dg: Dufour gland.

白蛾黑棒啮小蜂每个卵巢含 10-12 根卵巢管, 左右卵巢在腹部内分别向前背方延伸, 围绕肠道, 占据了腹部内的绝大部分空间。卵巢似一串香蕉状, 短而粗。卵巢管下方与短粗的侧输卵管相连。中输卵管的背方生有 1 个纺锤状受精囊, 囊上连有 1 个受精囊腺。在侧输卵管与中输卵管连接处的侧方, 各生有 1 对双球状输卵管附腺。卵巢中卵巢管和卵粒的数量不定, 除了受到个体差异影响。甚至在同一个体中, 左右卵巢中卵巢管的数量也不一致, 各卵巢管中所含的卵粒数量亦不同。

侧输卵管基部稍微膨大, 膨大部分比侧输卵管上其他部分稍透明, 其下端与中输卵管相接,

两者构成“Y”字形。中输卵管末端还相连着 2 个突出的附腺。一个为毒囊, 无色透明, 末端连着毒腺, 另一个为呈长棒状、乳白色的杜氏腺。

在刚羽化出的雌成虫腹部内还有为卵巢管内卵的发育提供营养物质的营养体。它们大都集中于两个卵巢之间。其大小不一致, 直径为 0.022-0.108 mm 之间, 内含明显可见的小脂肪球。

2.1.2 雌成虫卵巢管中卵的数量 成熟的卵粒呈牡蛎形, 中部略弯。刚解剖出的新卵粒长 0.065-0.100 mm, 宽 0.035-0.065 mm。卵巢中卵巢管和卵粒的数量不定, 有的卵巢管数量少而卵粒多, 有的卵巢管数量多而卵粒少, 表明卵巢管数量与卵粒数并无直接关系, 见表 1。

表 1 白蛾黑棒啮小蜂雌性成虫左右卵巢的卵巢管数与卵粒数
Table 1 Number of ovarian tubes and egg grains of *Tetrastichus septentrionalis*

样本号 No.	左右卵巢的卵巢 管数 (根) Number of ovarian tubes in the left and right ovaries	卵巢含卵粒 总数 (粒) Total number of eggs contained in the ovary	样本号 No.	左右卵巢的卵巢 管数 (根) Number of ovarian tubes in the left and right ovaries	卵巢含卵粒 总数 (粒) Total number of eggs contained in the ovary
1	10 : 10	115	16	10 : 10	94
2	10 : 10	90	17	11 : 10	112
3	10 : 10	93	18	11 : 10	104
4	12 : 10	96	19	12 : 11	102
5	10 : 12	106	20	12 : 10	98
6	11 : 12	106	21	10 : 12	113
7	10 : 10	95	22	12 : 10	108
8	10 : 10	88	23	12 : 10	124
9	11 : 10	104	24	12 : 12	145
10	10 : 11	97	25	12 : 11	132
11	11 : 10	106	26	12 : 12	127
12	12 : 12	113	27	10 : 12	116
13	12 : 10	110	28	10 : 11	96
14	10 : 10	97	29	10 : 11	116
15	12 : 11	105	30	10 : 10	98
总计卵粒数 Total number of eggs		3 206.1	平均每头雌蜂含卵粒数 The average number of egg particles per female bee head		106.87

2.2 白蛾黑棒啮小蜂对 4 种寄主蛹最适接蜂量

2.2.1 美国白蛾蛹的最适接蜂量 以美国白蛾蛹为寄主, 寄生成功率随蜂蛹比增加有升高的趋势, 当蜂蛹比为 5 : 1 时, 寄生率最高, 可达 100%; 平均发育历期在蜂蛹比为 3 : 1 和 4 : 1 时, 极显著短于其他蜂蛹比; 不同蜂蛹比条件下, 每个寄主蛹的平均后代数量差异显著 ($P < 0.05$), 当蜂蛹比为 4 : 1 时, 每个寄主蛹的平均后代数量最高 (107 头); 后代雌、雄性比和后代雌、雄蜂体长都随蜂蛹比增加而减小 (表 2)。综合寄生成功率、平均发育历期、每个寄主蛹的平均后代数量、后代雌雄性比和后代雌雄蜂体长 5 个指标, 兼顾接蜂时雌蜂的利用效率, 建议在应用美国白蛾蛹繁育白蛾黑棒啮小蜂时使用 3 : 1 的蜂蛹比接蜂。

2.2.2 柞蚕蛹的最适接蜂量 以柞蚕蛹为替代寄主, 寄生成功率随蜂蛹比增加而增加, 当蜂蛹比为 100 : 1 时, 寄生率最高, 可达 86.67%; 不同蜂蛹比的平均发育历期差异不显著; 不同蜂蛹比条件下, 每个寄主蛹的平均后代数量差异显著, 当蜂蛹比为 100 : 1 时, 每个寄主蛹的平均后代数量最高 (16 350 头); 后代雌、雄性比在 50 : 1 时最大 (8.13 : 1), 80 : 1 时最小 (7.46 : 1), 且与 80 : 1 和 100 : 1 差异极显著 ($P < 0.01$); 后代雌、雄蜂体长范围相同, 表明在这 3 个蜂蛹比条件下, 繁育出的白蛾黑棒啮小蜂个体大小没有显著差异 (表 3)。综合寄生成功率、平均发育历期、每个寄主蛹的平均后代数量、后代雌雄性比和后代雌雄蜂体长 5 个指标, 建议在应用柞蚕蛹繁育白蛾黑棒啮小蜂时使用 100 : 1 的蜂蛹比接蜂。

表 2 不同蜂蛹比对美国白蛾蛹繁蜂效果的影响
Table 2 Comparison of the effect of *Hyphantria cunea* pupae breeding *Tetrastichus septentrionalis* under different parasitoid-host ratios

蜂蛹比 Parasitoid-host ratios	寄生成功率(%) Parasitism rate (%)	平均发育历期(d) Mean development duration (d)	每个寄主蛹的平均后代数量(头) Average number of offspring (ind.)	后代雌雄性比 Offspring sex ratio	后代雌雄蜂体长(mm) Offspring sex ratio (mm)
1 : 1	56.67±5.77 ^{cC}	28.65±1.27 ^{aA}	55.29±12.27 ^{dD}	7.32 ^{aA}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
2 : 1	66.67±5.77 ^{cC}	27.50±1.14 ^{bB}	67.30±8.96 ^{cC}	6.84 ^{bB}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
3 : 1	83.33±5.77 ^{bB}	26.52±0.50 ^{cC}	92.68±14.33 ^{bB}	6.42 ^{cC}	♀1.6-2.3 ♂1.1-1.3
4 : 1	80.00±10.00 ^{bB}	26.45±0.50 ^{cC}	107.39±18.06 ^{aA}	6.12 ^{dD}	♀1.6-2.0 ♂1.1-1.3
5 : 1	100 ^{aA}	27.73±1.31 ^{bB}	98.52±9.54 ^{abAB}	5.56 ^{eE}	♀1.6-1.8 ♂0.9-1.3

表中同一列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, 多重比较采用 Duncan 氏新复极差法, 只有性比的多重比较采用 χ^2 检验), 表中同一列后标有不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$, 多重比较采用 Duncan 氏新复极差法, 性比的多重比较采用 χ^2 检验)。下表同。
Data with different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level by Duncan's new multiple range test, and χ^2 test is used only for multiple comparison of sex ratio. while with different capital letters in the same column indicate extremely significant differences at 0.01 level by Duncan's new multiple range test, and χ^2 test is used for multiple comparison of sex ratio. The same below.

表 3 不同蜂蛹比对柞蚕蛹繁蜂效果的影响
Table 3 Comparison of the effect of *Antherea pernyi* pupae breeding *Tetrastichus septentrionalis* under different parasitoid-host ratios

蜂蛹比 Parasitoid-host ratios	寄生成功率(%) Parasitism rate (%)	平均发育历期(d) Mean development duration (d)	每个寄主蛹的平均后代数量(头) Average number of offspring (ind.)	后代雌雄性比 Offspring sex ratio	后代雌雄蜂体长(mm) Offspring sex ratio (mm)
50 : 1	46.67±11.54 ^{bB}	27.34±1.67 ^{aA}	10 827.00±1 088.55 ^c	8.13 ^{aA}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
80 : 1	73.33±23.09 ^{abAB}	26.64±2.06 ^{aA}	13 265.73±1 169.86 ^b	7.46 ^{cC}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
100 : 1	86.67±11.55 ^{aA}	27.38±2.18 ^{aA}	16 350.46±1 159.35 ^a	7.72 ^{bB}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5

2.2.3 黄粉甲蛹的最适接蜂量 以黄粉甲蛹为替代寄主, 寄生成功率随蜂蛹比增加而增加, 当蜂蛹比达到或超过 3 : 1 时, 寄生率都可达 100%; 平均发育历期在蜂蛹比为 3 : 1 和 4 : 1 时, 极显著短于其他蜂蛹比; 不同蜂蛹比条件下,

每个寄主蛹的平均后代数量差异显著, 当蜂蛹比为 5 : 1 时, 每个寄主蛹的平均后代数量最高(108 头); 后代雌、雄性比在 1 : 1 时最大(7.76 : 1), 5 : 1 时最小(5.43 : 1); 后代雌、雄蜂体长都随蜂蛹比增加而减小(表 4)。综合寄生成功率、

平均发育历期、每个寄主蛹的平均后代数量、后代雌雄性比和后代雌雄蜂体长 5 个指标, 建议在应用黄粉甲蛹繁育白蛾黑棒啮小蜂时使用 3 : 1 的蜂蛹比进行接蜂。

2.2.4 大麦虫蛹的最适接蜂量 以大麦虫蛹为替代寄主, 寄生成功率随蜂蛹比增加而增加, 当蜂蛹比 20 : 1 时, 寄生率可达 73.33%; 平均发育历期在蜂蛹比为 15 : 1 和 20 : 1 时, 极显著短于其他蜂蛹比; 不同蜂蛹比条件下, 每个寄主蛹

的平均后代数量差异显著, 当蜂蛹比为 20 : 1 时, 每个寄主蛹的平均后代数量最高 (182 头); 后代雌、雄性比在蜂蛹比 10 : 1 时最大 (5.41 : 1), 15 : 1 时最小 (4.52 : 1); 后代雌、雄蜂体长都随蜂蛹比增加而减小 (表 5)。综合寄生成功率、平均发育历期、每个寄主蛹的平均后代数量、后代雌雄性比和后代雌雄蜂体长 5 个指标, 建议在应用大麦虫蛹繁育白蛾黑棒啮小蜂时使用 20 : 1 的蜂蛹比进行接蜂。

表 4 不同蜂蛹比对黄粉甲蛹繁蜂效果的影响
Table 4 Comparison of the effect of *Tenebrio molitor* pupae breeding *Tetrastichus septentrionalis* under different parasitoid-host ratios

蜂蛹比 Parasitoid-host ratios	寄生成功率 (%) Parasitism rate (%)	平均发育历期 (d) Mean development duration (d)	每个寄主蛹的平均后代数量 (头) Average number of offspring (ind.)	后代雌雄性比 Offspring sex ratio	后代雌雄蜂体长 (mm) Offspring sex ratio (mm)
1 : 1	66.33±5.77 ^{cC}	26.79±1.87 ^{aA}	54.26±11.83 ^{bB}	7.76 ^{aA}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
2 : 1	83.33±11.54 ^{bB}	25.92±1.55 ^{aA}	64.72±15.0 ^{bB}	6.47 ^{bB}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
3 : 1	100 ^{aA}	22.87±1.07 ^{cC}	101.53±19.20 ^{aA}	5.97 ^{dD}	♀1.6-2.3 ♂1.1-1.3
4 : 1	100 ^{aA}	22.57±1.07 ^{cC}	98.23±13.40 ^{aA}	6.17 ^{cC}	♀1.6-2.0 ♂1.1-1.3
5 : 1	100 ^{aA}	24.10±1.71 ^{bB}	108.47±19.05 ^{aA}	5.43 ^{eE}	♀1.6-1.8 ♂0.9-1.3

表 5 不同蜂蛹比对大麦虫蛹繁蜂效果的影响
Table 5 Comparison of the effect of *Zophobas atratus* pupae breeding *Tetrastichus septentrionalis* under different parasitoid-host ratios

蜂蛹比 Parasitoid-host ratios	寄生成功率 (%) Parasitism rate (%)	平均发育历期 (d) Mean development duration (d)	每个寄主蛹的平均后代数量 (头) Average number of offspring (ind.)	后代雌雄性比 Offspring sex ratio	后代雌雄蜂体长 (mm) Offspring sex ratio (mm)
5 : 1	44.67±30.55 ^{cC}	32.57±1.98 ^{aA}	82.57±13.30 ^{cC}	5.32 ^{bB}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
10 : 1	44.67±11.54 ^{cC}	32.71±1.25 ^{aA}	96.14±15.72 ^{cC}	5.41 ^{aA}	♀1.8-2.3 ♂1.2-1.5
15 : 1	60.00±20.00 ^{bB}	28.67±1.22 ^{bB}	156.33±12.47 ^{bB}	4.52 ^{dD}	♀1.6-2.3 ♂1.1-1.3
20 : 1	73.33±11.54 ^{aA}	28.40±1.77 ^{bB}	182.20±11.90 ^{aA}	4.56 ^{cC}	♀1.6-2.3 ♂1.1-1.3

2.3 4 种寄主蛹繁育白蛾黑棒啮小蜂效果比较

用 4 种寄主蛹连续人工繁育白蛾黑棒啮小

蜂至第 5 代, 选取寄生成功率、羽化率、每克蛹出蜂量、雌雄性比 4 项指标测定白蛾黑棒啮小蜂繁蜂效果 (表 6)。

表 6 不同蜂蛹比对 4 种寄主蛹繁蜂效果的影响
Table 6 A comparison of the effectiveness of four types of host pupae for breeding *Tetrastichus septentrionalis*

寄主蛹 Host pupae	样本数 (头) Sample number (ind.)	寄主蛹平均重量 (g) Host pupae of average weight (g)	寄生成功率 (%) Parasitism rate (%)	羽化率 (%) Eclosion rate (%)	每克蛹出蜂量 (头) Number of adults per gram of pupae (ind.)	雌雄性比 Offspring sex ratio
黄粉甲蛹 <i>Tenebrio molitor</i>	90	0.16±0.01	98.27±3.34 ^{aA}	98.26±1.86 ^{aA}	781.07±152.63 ^{bB}	6.64 ^{bB}
美国白蛾蛹 <i>Hyphantria cunea</i>	90	0.13±0.04	86.67±6.67 ^{abAB}	97.67±1.98 ^{aA}	737.67±49.88 ^{bB}	6.27 ^{cC}
柞蚕蛹 <i>Antherea pernyi</i>	30	11.15±1.33	83.33±11.55 ^{bcBC}	97.33±1.88 ^{aA}	1 333.85±234.69 ^{aA}	7.65 ^{aA}
大麦虫蛹 <i>Zophobas atratus</i>	90	0.85±0.07	66.67±11.55 ^{cC}	82.22±8.16 ^{bB}	217.44±29.72 ^{cC}	4.69 ^{dD}

试验结果表明, 黄粉甲蛹和美国白蛾蛹寄生成功率显著高于柞蚕蛹和大麦虫蛹, 其中以黄粉甲蛹的寄生成功率最高 (98.27%); 黄粉甲蛹、美国白蛾蛹和柞蚕蛹的羽化率均大于 97%, 其中以黄粉甲蛹最高(98.26%); 每克蛹出蜂量柞蚕蛹最高 (1 333 头), 黄粉甲蛹其次 (781 头), 大麦虫蛹最低 (217 头); 雌雄性比柞蚕蛹最高 (7.65 : 1), 黄粉甲蛹其次 (6.64 : 1), 大麦虫蛹最低 (4.69 : 1)。可见, 4 种供试的寄主蛹都能完成对白蛾黑棒啮小蜂的继代饲养, 综合寄生成功率、羽化率、每克蛹出蜂量和雌雄性比 4 项指标的测定结果, 除大麦虫蛹的效果不理想之外, 其他 3 种蛹各有优势, 均具有较好的繁育效果。

3 结论与讨论

白蛾黑棒啮小蜂属于卵育型寄生蜂, 雌蜂通过不断地补充营养物质保证卵细胞的发育(徐海云等, 2015)。白蛾黑棒啮小蜂的雌性生殖系统结构的解剖结果与同一种团的白蛾黑基啮小蜂雌性生殖系统类似(颜学武等, 2008)。白蛾黑棒啮小蜂野外寄生美国白蛾蛹, 平均每头寄主的出蜂量为 87.6 头, 雌雄比为 7 : 1, 均低于白蛾

周氏啮小蜂的出蜂量和雌雄性比, 但其成蜂的个体显著大于后者。解剖结果进一步证实了白蛾黑棒啮小蜂有很大的生殖潜力, 室内利用黄粉甲蛹培养出的成蜂每头雌蜂平均含卵粒数为 87.75 粒, 补充 10%的蜂蜜水后可提高到 106.87 粒, 最高达 145 粒。白蛾黑棒啮小蜂卵巢管数量与卵粒数并无直接关系, 而同种昆虫卵巢管数的差异则可能因为个体大小、遗传和营养等因素有关。这一结论与杨忠岐(1995)对白蛾周氏啮小蜂卵巢的研究和钟林海等(2016)霍氏啮小蜂的卵巢的研究相吻合。

白蛾黑棒啮小蜂的寄主范围较广, 本研究以美国白蛾蛹、柞蚕蛹、黄粉虫蛹、大麦虫蛹为寄主, 在室内进行替代寄主优化试验。试验发现, 在恒温培养箱中进行继代繁育[(24±1)℃; 16 L : 8D; 65%±5% RH]。其中寄生成功率黄粉甲蛹最高, 大麦虫蛹最低; 发育历期黄粉甲蛹最短, 大麦虫蛹最长; 每克蛹出蜂量、雌雄性比柞蚕蛹最大, 黄粉甲蛹其次, 大麦虫蛹最低。目前在生产中白蛾黑棒啮小蜂大规模繁育以柞蚕蛹为主要寄主(徐海云等, 2015; 闫俊香等, 2018; 姬琨, 2019), 但人工繁育小蜂时, 柞蚕蛹期易发生脓病、僵化病、软化病等多种病害, 影响柞

蚕蛹的质量,从而影响繁蜂的成功率和成品蜂质量(张桂莉,2019)。虽然黄粉虫蛹作为白蛾黑棒啮小蜂的替代寄主每克蛹出蜂量、雌雄性比没有柞蚕蛹效果理想,但可以满足白蛾黑棒啮小蜂生长发育要求,且黄粉虫饲养成本低、易获得,也是人工大量繁殖白蛾黑棒啮小蜂的优良繁蜂替代寄主。

在一定范围内,寄生成功率、随蜂蛹比增加而升高。以美国白蛾蛹为寄主,蜂蛹比为 5:1 时,寄生率最高,可达 100%;以柞蚕蛹为寄主,当蜂蛹比为 100:1 时,寄生率最高,可达 86.67%,林燕萍按 1 头蛹接 80 头蜂(2017);以黄粉甲蛹为寄主,当蛹蜂比达到或超过 3:1 时,寄生率都可达 100%;以大麦虫蛹为寄主,寄生成功率随蜂蛹比增加而增加,当蛹蜂比 20:1 时,寄生率都可达 73.33%。但后代雌、雄性比和后代雌、雄蜂体长和出蜂量可能随蜂蛹比增加而减小。在蜂蛹比较小的处理中,幼虫个体充分吸收营养完成发育,出现子代个体数量少,个体大的现象。相反,在蜂蛹比较大的处理组中,有限的营养物不能保证所有子代均完成发育,出现子代个体数量大,个体偏小的情况。蜂蛹比继续增大,寄主体内卵量多而营养不足导致小蜂幼虫争夺营养或自相残杀,产生过寄生现象。这一结论与杨忠岐和谢恩魁(1998)对白蛾周氏啮小蜂幼虫发育的研究,杨明禄和李时建(2011)对白蛾周氏啮小蜂幼虫发育的研究、王雪菲等(2020)对管氏肿腿蜂幼虫发育的研究,以及郭同斌等(2010)对白蛾黑基啮小蜂幼虫发育的研究基本吻合。在具体的繁育应用中,可根据科学研究或规模化生产的不同需求、获得寄主蛹的难易程度及成本来选择合适的寄主进行继代繁育。

寄主的种类、龄期和体型大小等明显影响寄主的营养,进而影响天敌的适合度(Cohen *et al.*, 2005)。其中寄主种类对天敌的适应性影响最大,天敌昆虫会为后代发育寻找到最适合的寄主(王小艺和杨忠岐,2010)。大麦虫蛹表皮比较坚硬,通过我们的强制寄生试验发现白蛾黑棒啮小蜂不喜欢寄生大麦虫蛹,这一结论与赵海燕等(2016)对蝇蛹金小蜂 *Pachycrepoideus*

vindemmiae 对寄主选择的研究和 Khethani 等(2013)对赤眼蜂 *T. toidealute* 寄生行为及结果研究相吻合。除此之外,寄生时寄主龄期差异反映了寄主的质量,且成为影响天敌昆虫寄主适宜度的限制因素之一(Chen *et al.*, 2017)。通过我们的观察发现白蛾黑棒啮小蜂在大麦虫蛹上产卵寄生期比较长,大麦虫蛹一直在发育,导致寄生后的啮小蜂对大麦虫蛹的组织和器官利用得不充分,可能是单位重量出蜂量显著偏低的原因之一,这与吴晓霜等(2018)对日本食蚜蚜小蜂寄主的龄期选择性结果研究相吻合。除此之外,由于大麦虫蛹活力较强,白蛾黑棒啮小蜂接蜂后,大麦虫蛹被蛰刺后长时间不能被麻痹,甚至击打白蛾黑棒啮小蜂,导致白蛾黑棒啮小蜂寄生未成功。这一结论与刘云等(2021)利用桃红颈天牛 *Aromia bungii* (Fald) 幼虫对管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani* (Xiao et Wu) 规模化繁育的研究相吻合。白蛾黑棒啮小蜂能够成功寄生鞘翅目的大麦虫和黄粉虫,与美国白蛾属于不同目,说明该寄生蜂的寄主专化性不强,寄主范围较大,可能存在对非目标害虫的控制作用,需要进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Bi YG, 2018. An auto-contamination trapstrips system for biological control of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Noctuidae), an invasive pest in China. *Journal of Pest Management*, 64(3): 230–235.
- Chen C, Song LW, Zuo TT, Wang Y, Nan JK, Sun SH, 2020. Natural enemy complex of *Hyphantria cunea* (Drury) in Shenyang area. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(3): 353–360. [陈沉, 宋丽文, 左彤彤, 王悦, 南俊科, 孙守慧, 2020. 沈阳地区美国白蛾的天敌复合体. 中国生物防治学报, 36(3): 353–360.]
- Chen XY, Hopkins RJ, Zhao YP, Guo HH, 2017. A place to grow? Host choice and larval performance of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae) in the host *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology*, 46(3): 642–648.
- Duan YL, Qu LJ, Wang YZ, Zhang YA, Tao WQ, Guan L, Yang ZQ, 2009. Sustainable Effects for *Hyphantria cunea* nuclear polyhedrosis virus on the host insects and the diffusion approach of the virus. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(6): 83–86. [段彦丽, 曲良建, 王玉珠, 张永安, 陶万强, 关玲, 杨忠岐, 2009. 美国白蛾核型多角体病毒传播途径及对寄主的持续作用. 林业科学,

- 45(6): 83–86.]
- Guo TB, Wang HC, Xu KQ, Qiu CL, Xiong DB, Du W, Yang ZL, Yan XW, 2010. Artificial production of *Tetrastichus nigricoxae* Yang and field investigation for control of *Micromelalopha troglodyta* Graeser. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 33(5): 81–86. [郭同斌, 王虎斌, 徐克勤, 仇才楼, 熊大斌, 杜伟, 杨中林, 颜学武, 2010. 白蛾黑基啮小蜂的人工繁殖及其对杨小舟蛾的防治效果. 南京农业大学学报, 33(5): 81–86.]
- Hu TY, Zhao XD, Geng YS, Zhang LW, Li FL, Hao DJ, 2022. Trapping activity of sex pheromone lure synthesized independently of *Hyphantria cunea* in forest and its application. *Forest Pest and Disease*, 41(6):48–52. [胡天义, 赵旭东, 耿慧舒, 张龙娃, 李逢良, 郝德君, 2022. 自主合成美国白蛾性信息素诱芯林间诱捕活性及应用. 中国森林病虫, 41(6):48–52.]
- Ji K, 2019. Study on artificial rejuvenation technology of *Tetrastichus septentrionalis*. *Horticulture & Seed*, 39(4): 63–64, 79. [姬琨, 2019. 白蛾黑棒啮小蜂人工复壮技术研究. 园艺与种苗, 39(4): 63–64, 79.]
- Ji R, Xie BY, Li XH, Gao ZX, Li DM, 2003. Research progress on the invasive species, *Hyphantria cunea*. *Entomological Knowledge*, 40(1): 13–18. [季荣, 谢宝瑜, 李欣海, 高增祥, 李典谟, 2003. 外来入侵种——美国白蛾的研究进展. 昆虫知识, 40(1): 13–18.]
- Khethani V, Rami K, Kerstin K, 2013. Effect of temperature and host species on parasitism, development time and sex ratio of the egg parasitoid *Trichogrammatoidea lutea* Girault (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Biological Control*, 64(3): 211–216.
- Li S, Sun H, Zhou YT, Li XD, Yu ZJ, Dong ZH, 2022. The occurrence of major forestry pests in 2021 and the occurrence trend forecast in 2022. *Forest Pest and Disease*, 41(2): 44–47. [李硕, 孙红, 周艳涛, 李晓冬, 于治军, 董振辉, 2022. 2021年全国主要林业有害生物发生情况及2022年发生趋势预测. 中国森林病虫, 41(2): 44–47.]
- Liu Y, Zhang Y, Fu CC, Liu ZZ, Sun XJ, 2021. Study on large-scale breeding of *Sclerodermus guani* and its reproductive effects of alternative hosts. *Journal of Green Science and Technology*, 23(19): 104–105. [刘云, 张玉娇, 付翠翠, 刘在哲, 孙小健, 2021. 管氏肿腿蜂规模化繁育替代寄主研究. 绿色科技, 23(19): 104–105.]
- Liu ZH, Lu XJ, Li RJ, Liu TH, Guo W, Li BG, 2015. Effects of sublethal concentration of Bt on development of *Hyphantria cunea* and the parasitic wasp *Chouioia cunea* Yang. *Acta Phytophylacica Sinica*, 42(2): 278–282. [刘子欢, 陆秀君, 李瑞军, 刘廷辉, 郭巍, 李保国, 2015. 苏云金杆菌亚致死浓度对美国白蛾及其寄生蜂生长发育的影响. 植物保护学报, 42(2): 278–282.]
- Lin YP, Pei DL, Zhang SH, 2017. Breeding biology and forest release of *Tetrastichus septentrionalis*. Xuchang, Henan Provincial Plant Protection Society for the Eleventh Time. Henan, Xuchang: 167–171. [林艳平, 裴冬丽, 张素华, 2017. 白蛾黑棒啮小蜂繁育生物学及林间释放. 河南省植物保护学会第十一次. 河南许昌: 167–171.]
- Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Cao LM, 2018. Research progress in the management of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 721–735. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 曹亮明, 2018. 美国白蛾防控技术研究进展. 环境昆虫学报, 40(4): 721–735.]
- Morris RF, 1963. Synonymy and Color variation in the Fall webworm, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae). *Canadian Entomologist*, 95(11): 1217–1223.
- Qiu LX, Lu XL, Lin X, Wen XY, Fan SQ, Shi Y, Chang GB, 2022. Discussion on the prevention and control process of *Hyphantria cunea* in China and strategies in the new period. *Forest Pest and Disease*, 41(6): 1–7. [邱立新, 卢修亮, 林晓, 温玄烨, 范世奇, 时勇, 常国彬. 我国美国白蛾防控历程与新时期策略探讨. 中国森林病虫: 41(6):1–7.]
- Qu HE, Shao LA, Pang HC, Nie L, Yang J, Tan HL, 2007. Threshold temperature and effective accumulated temperature of *Tetrastichus septentrionalis*. *Forest Pest and Disease*, 26(4): 9–10, 47. [曲花荣, 邵凌松, 逢焕臣, 聂磊, 杨隽, 谭宏利, 2007. 白蛾黑棒啮小蜂的发育起点温度和有效积温. 中国森林病虫, 26(4): 9–10, 47.]
- Shi M, Tang P, Wang ZZ, Huang JH, Chen XX, Review of research on biological parasitoids and their use in control in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(3): 491–548. [时敏, 唐璞, 王知知, 黄健华, 陈学新, 2020. 中国寄生蜂研究及其在害虫生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 57(3): 491–548.]
- Sun SH, Nan JK, Yang LY, Song LW, Zuo TT, Wang Y, Li S, 2021. Research progress on natural enemies of the *Hyphantria cunea* (Drury). *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1331–1347. [孙守慧, 南俊科, 杨丽元, 宋丽文, 左彤彤, 王悦, 李硕, 2021. 美国白蛾天敌研究进展. 环境昆虫学报, 43(6): 1331–1347.]
- Wang XF, Chen M, Bai JW, Liu XX, Li HP, 2020. Parasitization of the mulberry longhorn beetle *Apriona germari* by *Sclerodermus guani* (Hymenoptera: Bethyidae) in laboratory and field trials. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(3): 335–339. [王雪菲, 陈孟, 白嘉伟, 刘鑫鑫, 李会平, 2020. 管氏肿腿蜂对桑天牛幼虫的寄生行为及防治效果. 中国生物防治学报, 36(3): 335–339.]
- Wang XY, Yang ZQ, 2010. Host adaptations of the generalist parasitoids and some factors influencing the choice of hosts. *Acta Ecologica Sinica*, 30(6): 1615–1627. [王小艺, 杨忠岐, 2010. 多寄主型寄生性天敌昆虫的寄主适应性及其影响因素. 生态学报, 30(6): 1615–1627.]

- Wu XS, Zhang FP, Fu R, 2018. Host instar preference of *Coccophagus japonicus* Compere. *Journal of Environmental Entomology*, 40(6): 1375–1379. [吴晓霜, 张方平, 符悦冠, 2018. 日本食蚜蚜小蜂对寄主的龄期选择性. 环境昆虫学报, 40(6): 1375–1379.]
- Xu HY, Yang NW, Wan FH, 2015. Female reproductive system and ovary development of two parasitoids of tobacco whitefly. *Science & Technology Review*, 33(7): 79–83. [徐海云, 杨念婉, 万方浩, 2015. 两种烟粉虱寄生蜂的雌性生殖系统结构与卵巢发育特点. 科技导报, 33(7): 79–83.]
- Yan JX, Liu QS, Wang BY, Guo JQ, Yang F, 2018. *Tetrastichus septentrionalis* and artificial breeding technology application of prevention and control of leaf eating pests of poplar. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 38(2): 4–7. [闫俊香, 刘全山, 王炳焱, 郭俊强, 杨帆, 2018. 白蛾黑棒啮小蜂人工繁殖技术及其在防治杨树食叶害虫中的应用. 河南林业科技, 38(2): 4–7.]
- Yan XW, Guo TB, Jiang JH, Qian GZ, Du W, Wang HC, Yu YH, 2008. Biological characteristics of *Tetrastichus nigricoxae* Yang (Hymenoptera: Eulophidae). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 32(6): 29–33. [颜学武, 郭同斌, 蒋继宏, 钱桂芝, 杜伟, 王虎诚, 于艳华, 2008. 白蛾黑基啮小蜂的生物学特性. 南京林业大学学报(自然科学版), 32(6): 29–33.]
- Yang ML, Li SJ, 2011. Reproduction of *Chouioia cunea* Yang on *Tenebrio molitor* L. pupae. *Chinese Journal of Biological Control*, 27(3): 410–413. [杨明禄, 李时建, 2011. 利用黄粉虫蛹人工繁殖白蛾周氏啮小蜂的研究. 中国生物防治学报, 27(3): 410–413.]
- Yang ZQ, 1990. 美国白蛾的有效天敌—白蛾周氏啮小蜂. *Natural enemies of the Hyphantria cunea* (Drury)-*Chouioia cunea* Yang. *Forsers Pest and Disease*, 1990(2): 17. [杨忠岐, 1990. 美国白蛾的有效天敌—白蛾周氏啮小蜂. 森林病虫通讯, 1990 (2): 17.]
- Yang ZQ, 1995. Anatomy of internal reproductive system of *Chouioia cunea* (Hymenoptera, Chalcidoidea:Eulophidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 31(1): 23–26. [杨忠岐, 1995. 白蛾周氏啮小蜂雌性成虫内部生殖系统的解剖研究. 林业科学, 31(1): 23–26.]
- Yang ZQ, Xie EK, 1998. Behavior of *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 14(2): 49–52. [杨忠岐, 谢恩魁, 1998. 白蛾周氏啮小蜂的行为学. 中国生物防治, 14(2):49–52.]
- Yang ZQ, 2004. Advance in Bio-control researches of the important forest insect pests with natural enemies in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 20(4): 221–227. [杨忠岐, 2004. 利用天敌昆虫控制我国重大林木害虫研究进展. 中国生物防治, 20(4): 221–227.]
- Yang ZQ, Wang BH, Wei JR, 2001. A new species of Eulophidae (Hymenoptera: Chalcidoidea) parasitizing fall webworm in China and Korea. *Acta Entomologica Sinica*, 44(1): 98–102, 132. [杨忠岐, 王秉海, 魏建荣, 2001. 寄生于美国白蛾的啮小蜂一新种(膜翅目: 姬小蜂科). 昆虫学报, 44(1): 98–102, 132.]
- Yang ZQ, Zhang YA, 2007. Researches on techniques for biocontrol of the fall webworm, *Hyphantria cunea*, a severe invasive insect pest to China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 465–471, 622. [杨忠岐, 张永安, 2007. 重大外来入侵害虫——美国白蛾生物防治技术研究. 昆虫知识, 44(4): 465–471, 622.]
- Zhang GL, 2019. Study on effects of environmental factors on the decay of tussah pupa in the expansion of *Chouioia cunea* Yang. Master dissertation. Hebei: Hebei Agriculture University. [张桂莉, 2019. 环境因子对周氏啮小蜂扩繁中柞蚕蛹腐烂的影响研究. 硕士学位论文. 河北: 河北农业大学.]
- Zhang LW, Kang K, Liu YJ, Zhang J, Sun L, Zhan C, Huang CC, Jiang LY, Ye KY, Ding DG, 2016. Evaluation of *Beauveria bassiana* isolates as potential agents for control of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 59(1): 111–118. [张龙娃, 康克, 刘玉军, 张晶, 孙龙, 詹成, 黄长春, 蒋丽雅, 叶开云, 丁德贵, 2016. 美国白蛾高毒力球孢白僵菌菌株筛选. 昆虫学报, 59(1): 111–118.]
- Zhang QH, Schlyter F, Chu D, Ma XY, Ninomiya Y, 1996. Female calling behaviour and response of males to synthetic pheromone and virgin females in spring and summer generations of *Hyphantria cunea* (Drury) (Lep., Arctiidae) in northeastern China. *Journal of Applied Entomology*, 120: 15.
- Zhao HY, Yu XT, Lu YY, Liang YB, 2016. Effects of hosts on host selection of *Pachycrepoideus vindemmiae*. *Guangdong Agricultural Sciences*, 43(07): 100–104. [赵海燕, 余昕彤, 陆永跃, 梁延坡, 2016. 寄主对蝇蛹金小蜂选择行为的影响. 广东农业科学, 43(7): 100–104.]
- Zhao XD, Geng YS, Hao DJ, Dai LL, Sun SH, 2022. Research progress and prospect of the control technology of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Erebididae). *Forest Pest and Disease*, 41(5): 42–52. [赵旭东, 耿蕊舒, 郝德君, 代鲁鲁, 孙守慧, 2022. 美国白蛾防控技术的研究进展及展望. 中国森林病虫, 41(5): 44–52.]
- Zheng YN, Qi JY, Sun SH, Yang CC, 2012. Advance in research of *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae) and its biocontrol application in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 28(2): 275–281. [郑雅楠, 祁金玉, 孙守慧, 杨长成, 2012. 白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的研究和生物防治应用进展. 中国生物防治学报, 28(2): 275–281.]
- Zhong LH, Liao YL, Zhang Y, Wu WJ, 2016. Ovarian development and oogenesis in *Tetrastichus howardi* (Olliff) (Hymenoptera: Eulophidae). *Journal of Environmental Entomology*, 38(1): 154–158. [钟林海, 廖永林, 张杨, 吴伟坚, 2016. 霍氏啮小蜂的卵巢发育和卵子发生. 环境昆虫学报, 38(1): 154–158.]