# 两种平腹小蜂的研究进展

赵 灿， 张宝鑫， 李敦松*

（广东省农业科学院植物保护研究所，农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室，
广东省植物保护新技术重点实验室，广州 510640）

**摘要** 平腹小蜂是一类优良的卵寄生蜂，是寄生性天敌昆虫中已具有成熟的规模化繁殖技术和田间释放技术，并成功应用于害虫防治的天敌昆虫之一，在防治果树蝽类害虫方面效果显著。平腹小蜂的发育学、行为学、生态学、繁殖技术及田间应用技术的研究已有 60 多年历史，近年来，分子生物学和高通量测序手段的应用促进了对平腹小蜂的生理生化基础研究，研究领域也开始拓宽。本文从分类学、生物学特性、人工繁殖、共生菌、滞育、寄生机制、毒液蛋白和味觉受体基因等方面，对目前广泛应用于荔枝蝽和茶翅蝽防治的 2 种平腹小蜂，麻纹蝽平腹小蜂 *Anastatus fulloi* Sheng &Wang 和日本平腹小蜂 *Anastatus japonicus* Ashmead 近 30 年的研究进展进行归纳和总结，并对今后的研究方向进行展望，旨在为平腹小蜂的深入研究和应用技术研发提供参考。

**关键词** 平腹小蜂； 人工繁殖； 寄生机制； 滞育； 共生菌

**中图分类号**： S436.67 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2022239

# Advances in two species of *Anastatus*

ZHAO Can， ZHANG Baoxin， LI Dunsong*

（*Institute of Plant Protection*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Green Prevention and Control of Pests on Fruits and Vegetables in South China*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection*, *Guangzhou* 510640, *China*）

**Abstract** *Anastatus* is an excellent egg parasitic wasp, and mature mass rearing and field release technologies have been developed for this wasp. It is one of the few natural enemy insects that have been successfully applied in pest control, and it has a remarkable effect in controlling stink bug in fruit trees. Researches on the development, behavior, ecology, rearing technology and field application technology of *Anastatus* have been done for more than 60 years. In recent years, with the application of molecular biology and high-throughput sequencing, the research on physiology and biochemistry of *Anastatus* has been deepened and the research field broadened. Here we summarized the advances of *Anastatus fulloi* Sheng & Wang and *A. japonicus* Ashmead, which are widely used in the control of *Tessaratoma papillosa* and *Halyomorpha halys* in recent 30 years, mainly focusing on the taxonomy, biological characteristics, mass rearing, symbiotic bacteria, diapause, parasitic mechanism, venom protein and gustatory receptor gene. The controversial problems in the research of *Anastatus* were proposed, and the prospects for future studies were provided, so as to provide a reference for further research and application of *Anastatus*.

**Key words** *Anastatus* spp.; mass rearing; parasitic mechanism; diapause; symbiotic bacteria

全世界报道的平腹小蜂有 154 种[1]，其中中国有 14 种[2]。平腹小蜂寄主广泛，涉及昆虫纲 10 目 46 科，以半翅目 Hemiptera、鳞翅目 Lepidoptera、直翅目 Orthoptera 及双翅目 Diptera 为主，可用于多种农林害虫的生物防治[1,3]。平腹小蜂产卵期长，抗逆性强，是一种优良的寄生性天敌昆虫[4]。一些种类已成功用于生产上蝽类害虫的生物防治，如：荔枝蝽 *Tessaratoma papillosa*[5]、茶翅蝽 *Halyomorpha halys*[6-7]、缘蝽属的 *Amblypelta nitida*、芒果缘蝽 *Amblypelta lutescens lutescens*[8-10]、柑橘棱蝽

**收稿日期**： 2022-04-28 **修订日期**： 2022-06-06
**基金项目**： 国家自然科学基金青年基金(32001968)；2021 年广东省乡村振兴战略专项资金(2021S0063)；财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-32-12)
* 通信作者 E-mail：dsli@gdppri.cn

*Rhynchocoris humeralis*[11]等。

麻纹蝽平腹小蜂 *Anastatus fulloi* Sheng &Wang 是平腹小蜂类群中研究报道最多、应用面积较广的种类，其人工大量繁殖技术和田间释放技术较为成熟，在生产上成功用于防治荔枝重要害虫荔枝蝽已有 50 多年[12-14]。我国自 1960s 开始开展麻纹蝽平腹小蜂的繁殖利用研究[15]，其繁殖利用技术已在国内外被推广和借鉴利用。2011 年和 2017 年广东省农业科学院植物保护研究所分别与澳大利亚天敌公司(BioResources Pyt Ltd.)和台湾大学合作，建立本地平腹小蜂的生产线，用于防治本地鳄梨 *Persea americana*、百香果 *Passiflora edulis*、芒果 *Mangifera indica*、番木瓜 *Carica papaya*、台湾栾树 *Koelreuteria elegans* 等树上的蝽类害虫[12,16]。

日本平腹小蜂 *Anastatus japonicus*(*Anastatus disparis* 和 *Anastatus flavipes* 为其同物异名)，最早发现于日本[17]，近年国内开展了其对北方果树重要害虫茶翅蝽和点蜂缘蝽 *Riptortus pedestris* 的控害潜能评价，并首次对其滞育诱导和滞育贮存开展研究，显示了一定的开发潜力[7, 18-21]。

截至 2015 年，对两种平腹小蜂的研究报道仍然主要集中在生物学特性、行为学、繁殖技术、田间应用技术方面。2016 开始有通过分子生物学手段和高通量测序等手段研究平腹小蜂的寄生机制、体内共生菌、毒液蛋白等方面的报道。目前对平腹小蜂的深入研究较少，且进展缓慢。而日本平腹小蜂和麻纹蝽平腹小蜂种名早期存在使用混乱的现象，给相关研究工作带来阻碍，急需一篇全面概述 2 种平腹小蜂研究的报道，厘清不同研究内容的关系。本文综述了近 30 年麻纹蝽平腹小蜂和日本平腹小蜂的研究进展，并对今后的研究方向进行了展望，旨在为该两种平腹小蜂的深入研究及综合利用技术研发提供参考。

## 1 分类研究

中国有关平腹小蜂属昆虫的分类研究一直进展缓慢，部分平腹小蜂类群早期分类地位混乱，存在同种异名、隐存种的情况[22]。童新旺[23]在 1987 年发表了日本平腹小蜂 *Anastatus japonicus* Ashmead 在中国的新记录。1997 年盛金坤等报道了一个新种——麻纹蝽平腹小蜂 *A. fulloi* Sheng &Wang，并做了详细描述[24]。2017 年之前的文献报道中，在中国荔枝龙眼主产区被广泛应用于防治荔枝蝽的平腹小蜂常被误认为是日本平腹小蜂，通常用“*Anastatus* sp.”“荔枝蝽平腹小蜂”或者“*Anastatus japonicus*”。直到 2018 年唐璐[22]和 2020 年 Peng 等[2]鉴定发现，我国南方用于防治荔枝蝽的平腹小蜂为麻纹蝽平腹小蜂 *A. fulloi*。采集于北京郊区茶翅蝽卵块，由中国农业科学院植物保护研究所，农业农村部 CABI 生物安全联合实验室保存的平腹小蜂经鉴定为日本平腹小蜂[2,7]。2019 年之后，广东省农业科学院植物保护研究所和中国农业科学院植物保护研究所，农业农村部-CABI 生物安全联合实验室，在对这 2 种平腹小蜂的研究报道中均采用了正确的学名。但是不确定其他的文献报道是否仍然存在误用学名的现象，学名的误用为两种平腹小蜂的研究工作带来困扰。本文对以往文献的综述中，由广东省农业科学院提供的平腹小蜂，均采用麻纹蝽平腹小蜂。由中国农业科学院植物保护研究所，农业农村部-CABI 生物安全联合实验室提供的平腹小蜂，均采用日本平腹小蜂。

## 2 生物学特性

### 2.1 生活习性

麻纹蝽平腹小蜂主要以爬行方式扩散，可达 100 m，遇到惊扰时可跳跃逃跑[25-26]。黑暗和光线微弱时静伏，光照时活动[25]。田间主要以花蜜和裂果汁液为食。在广州，麻纹蝽平腹小蜂世代历期 23～33 d，一年有 8 代。田间以预蛹越冬，也有少量以成虫越冬[5,25, 27-28]。日本平腹小蜂在田间的生活史暂未见报道。

### 2.2 发育历期

麻纹蝽平腹小蜂以柞蚕卵为替代寄主，在(26±1)℃，RH(75±5)%，L//D=14 h//10 h 的条件下，从卵到成虫的发育历期为 20～22 d，其中卵期3 d，幼虫期(包括 1 龄、2 龄、3 龄和老熟幼虫)6 d，预蛹期 6～7 d，蛹期(包括初蛹、中蛹和后蛹)5～6 d[29]。日本平腹小蜂以茶翅蝽卵作为寄主，在 L//D=16 h//8 h，RH 60%～70%，温度 20、25、30℃条件下，从卵到成虫的发育历期分别为(34.60±0.27)、(22.33±0.22)、(17.1±0.28)d[30]。日本平腹小蜂以点蜂缘蝽卵为寄主，在(25±1)℃，RH(60±10)%，L//D=16 h//8 h 的条件下，从卵到成虫的发育历期为 20.78 d[21]。两种平腹小蜂的发育历期

均随着温度降低而显著延长。

### 2.3 繁殖能力

麻纹蝽平腹小蜂和日本平腹小蜂均可孤雌产雄生殖[4,25]。在 16～30℃,RH 40%～80%时,麻纹蝽平腹小蜂日产卵量与温度和湿度均呈正相关[4,25]。在 25～32℃,麻纹蝽平腹小蜂每头雌蜂一生的平均产卵量为 228.2 粒,日均产卵量为 5.7～11.3 粒[4,25]。不同发育期的荔枝蝽卵均可以被麻纹蝽平腹小蜂寄生,并羽化出子代蜂[4,25]。

麻纹蝽平腹小蜂的性比受光照强度、温度、寄主卵粒大小、寄主卵新鲜程度和寄主胚胎发育期等的影响[25]。光线弱时子代雌雄比较低。以蓖麻蚕卵为寄主时,卵粒重量越小,或者使用 3 日龄以上的卵,麻纹蝽平腹小蜂的雌雄比下降。高温可降低雌蜂产卵量,并导致孤雌生殖[4,25]。

当用蜂蜜水饲养并以点蜂缘蝽卵为寄主,日本平腹小蜂在 (25±1)℃,RH(60±10)%,光周期 L//D=16 h//8 h 时单雌一生平均产卵量为 15.64 粒,范围 8～29 粒,雌性率为 31.95%。平均产卵期为 8.71 d,最短为 4 d,最长为 20 d[21]。若用 20%蜂蜜水饲养,以茶翅蝽卵作为寄主,在 RH(60±5)%,光周期 L//D=16 h//8 h 时,在 20、25、30℃下,日均的产卵量分别为 4.3、6.6 粒和 7.8 粒[30]。日本平腹小蜂在 15℃条件下不能产卵[30]。

### 2.4 贮存和寿命

生产中常需要对天敌昆虫进行冷藏来保种,或短时间内积累足够量的天敌昆虫用于田间释放[5,31]。规模化繁殖中多采用将发育 10 d 的麻纹蝽平腹小蜂转移到 10～15℃的冷库冷藏 3～12 个月[5,31]。3 个月的短期冷藏对麻纹蝽平腹小蜂的羽化率没有显著影响,但是冷藏 6～12 个月后羽化率显著下降,其中冷藏 12 个月羽化率降低 50%。长期冷藏也会导致麻纹蝽平腹小蜂寄生率显著降低[31]。黄明度等发现 1～2 龄幼虫在 10～12℃下发育至预蛹可进入休眠,存放 6 个月,羽化率仍达 97.3%[25]。孙新涛发现人工卵饲养的麻纹蝽平腹小蜂蛹,随着冷藏时间延长羽化后产卵量减少,寿命缩短[32]。

Zhao 等发现正常发育到老熟幼虫的日本平腹小蜂,在 10℃冷藏 6 个月其羽化率显著下降,约为 60%,而进入滞育状态的老熟幼虫羽化率仍在 90%以上,与未冷藏的日本平腹小蜂羽化率无显著差异。滞育可以显著提高日本平腹小蜂的耐寒性,延长储存时间[19]。

## 3 人工繁殖

蒲蛰龙等在 1960s 开始对麻纹蝽平腹小蜂进行人工繁殖研究[28]。麻纹蝽平腹小蜂的规模化繁殖经历了以蓖麻蚕卵、人工卵和柞蚕卵作为替代寄主的 3 个时期[12]。20 世纪 60 年代、70 年代我国南方主要以蓖麻蚕卵繁殖麻纹蝽平腹小蜂。从 1984 年起,使用人工寄主卵繁殖平腹小蜂[33]。1989 年,广东省农业科学院植物保护研究所开始以柞蚕卵为替代寄主,在繁殖设备、繁殖方法、田间释放技术等方面进行研发[12,34]。创新和改进了一批繁蜂设备,包括:柞蚕卵连续烘干机、自动涂胶机、高效繁蜂柜等[35-37]。为实现省力化应用,设计了平腹小蜂简易释放卡[38],球形释放器和无人机投放装置[39]。已建立成熟的麻纹蝽平腹小蜂人工繁殖方法,其基本流程是:柞蚕卵清洗和消毒、采用柞蚕卵烘干机进行烘干、机器自动涂胶、粘卵、繁蜂柜繁蜂、滞育储存。繁殖效率可达每日 1 000 万头[12]。日本平腹小蜂的规模化繁殖方法,主要参照麻纹蝽平腹小蜂的繁殖技术。

## 4 共生菌

共生菌与宿主形成稳定、可遗传的共生系统,可提高寄生蜂对寄主的适应性及对化学农药的抗性等[40-45]。项佳韦通过高通量测序技术和 16S rDNA 克隆技术对麻纹蝽平腹小蜂体内共生菌进行了初步研究[45]。发现福清野外种群体内的共生菌有 6 大类,而广东实验室种群只有 2 大类[45]。通过荧光原位杂交技术(FISH)证明了立克次氏体 *Rickettsia* 在野外种群的麻纹蝽平腹小蜂体内是经卵垂直传播。在雄成虫精巢附腺中也发现 *Rickettsia* 的存在[45]。*Rickettsia* 对寄生蜂的影响包括:孤雌生殖、对宿主昆虫适应度、抵御环境胁迫能力和雄性致死等[45-46]。有研究报道 *Rickettsia*、沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 和 *Cardinium* 是能诱导产生孤雌生殖现象的 3 种细菌[47],推测 *Rickettsia*、*Wolbachia* 在平腹小蜂孤雌生殖中发挥重要作用。但是共生菌在平腹小蜂的体内具体发挥什么作用,以及如何发挥作用,还有待进一步的研究。

## 5 滞育

滞育是昆虫为抵抗外界不良环境，通过内源性调节产生的发育停滞的现象[48-49]。调控寄生蜂滞育行为是实现寄生性天敌产品的长期贮存、延长控害时间和提高抗逆性的重要手段[50]。早在 1962 年，蒲蛰龙等发现麻纹螬平腹小蜂在广州以老熟幼虫越冬，如将越冬老熟幼虫转移到较高温度环境下(25～30℃)，其随时可恢复发育，说明麻纹螬平腹小蜂在冬季并非真正滞育[28]。

日本平腹小蜂在田间滞育的情况还未见报道。赵灿等研究发现日本平腹小蜂在室内以老熟幼虫进入滞育[18-19]。日本平腹小蜂 2～3 龄幼虫是对外界环境变化最敏感的虫态。17～20℃结合短光周期(L//D=10 h//14 h 或 L//D=6 h//18 h)可诱导日本平腹小蜂进入滞育，而低温(11～14℃)或长光周期(L//D=14 h//10 h)条件下，日本平腹小蜂均无法进入滞育[19]。除了中温和短光照条件，还需要结合滞育诱导时间才能获得较高的滞育率。滞育诱导时间过长或者过短都会降低日本平腹小蜂的滞育率。滞育诱导条件在日本平腹小蜂幼虫体内具有累积效应，以卵期作为诱导始期，可以获得较高的滞育率。经滞育诱导进入老熟幼虫状态的日本平腹小蜂和正常发育的老熟幼虫经 10℃冷藏 6 个月后，滞育老熟幼虫的羽化率显著高于正常发育的老熟幼虫，与未冷藏日本平腹小蜂的羽化率无显著差异[19]。说明滞育可以显著提高日本平腹小蜂对低温的抗逆性、延长货架期、降低天敌产品的生产成本[19]。日本平腹小蜂滞育老熟幼虫，主要是通过积累脂类、甘油三酯、糖原等能源物质及山梨醇等低温保护物质、提高抗氧化能力等提高自身的抗逆性，保证滞育个体的发育和存活[20]。

由于寄生蜂个体微小，难以解剖，注射 dsRNA 常造成小型寄生蜂死亡等，导致以平腹小蜂为代表的寄生蜂滞育分子机制的研究进展缓慢[51]。寄生蜂滞育调控机制研究的缺乏也限制了相关滞育调控技术的应用和提高。随着多种组学技术的广泛应用，RNA 干扰技术以及基因编辑技术(如 CRISPR/Cas9)等在丽蝇蛹集金小蜂 *Nasonia vitripennis* 中的成功应用[52-53]，将促进寄生蜂滞育的深入研究，推测以平腹小蜂为代表的寄生蜂滞育机理的研究将成为未来研究的热点。

## 6 寄生机制的研究

### 6.1 寄主次生物质对平腹小蜂的影响

平腹小蜂对寄主卵的寻找和定位机制尚不明确。寄生蜂从搜索寄主昆虫到成功寄生受到环境因素和化学因素等多种因素的影响[54]。利它素是寄生蜂寻找寄主昆虫过程中起重要作用的化学因素[55]。在麻纹螬平腹小蜂搜索荔枝螬卵及产卵过程中起作用的利它素主要存在于荔枝螬成虫、排泄物和卵上[56]。荔枝螬成虫及其臭腺分泌的气味物质，能将麻纹螬平腹小蜂引诱到寄主的栖息地；荔枝螬排泄物及卵上的化学物质可引起麻纹螬平腹小蜂对寄主卵的近距离搜索；只有接触到寄主卵后麻纹螬平腹小蜂才会有明显的产卵管刺探行为[57]。麻纹螬平腹小蜂对不同颜色的卵粒无特殊趋性，但是对球形和半球形的卵粒表现出明显的趋性[57]。

麻纹螬平腹小蜂对寄主的选择受学习经历的影响[57-58]。学习训练可显著提高麻纹螬平腹小蜂对荔枝叶片、丁香烯、荔枝螬卵等的趋性，随着时间延长，学习效果不断增强[58-59]。以柞蚕卵繁殖的麻纹螬平腹小蜂对柞蚕卵信息的记忆随时间延长逐渐减弱，96 h 后开始明显减弱[59]。麻纹螬平腹小蜂对不同品种的荔枝表现出不同的趋性[59-60]，喜欢‘三月红’和‘怀枝’，对‘桂味’‘糯米糍’‘黑叶’和‘妃子笑’等品种没有明显的趋性。害虫取食和机械损伤会增强其对‘三月红’的趋性[59-60]。

荔枝螬成虫挥发物(*E*)-2-己烯醛是否对平腹小蜂有吸引作用，王建武等[58]与迟国梁等[59]的研究结论完全相反，还有待进一步验证。从麻纹螬平腹小蜂的寄主植物以及寄主中收集到 29 种相关化学信息素物质，其中寄主植物荔枝中 20 种，蒙古栎中 11 种，天然寄主荔枝螬中 11 种，而柞蚕卵中 4 种[61-62]。嗅觉行为试验结果显示，*β*-石竹烯(*β*-caryophyllene)、十一烷(undecane)、(*E*)-*α*-法呢烯[(*E*)-*α*-farnesene]、(＋)-芳香烯[(＋)-aromadendrene]和顺-3-己二醇(*cis*-3-hexen-ol)5 种物质对麻纹螬平腹小蜂具有明显的吸引作用，2-乙基-己醇(2-ethylhexanol)、*α*-石竹烯(*α*-caryophyllene)和乙酸乙酯(ethyl acetate)对其具有明显驱避作用[61-62]。荔枝次生代谢物质与天敌昆虫的互作关系研究进展缓慢，主要受荔枝种植地域所限，对荔枝害虫和其天敌昆虫研究主要集中于少数几个研究团队所致[63]。

### 6.2 寄生嗅觉机制

对不同气味的性质和浓度的识别使昆虫能够定位食物资源和产卵场所、寻找异性配偶、避免天敌和不利环境的伤害,进而能够生存和繁衍后代[64]。通过麻纹蝽平腹小蜂触角转录组测序,共鉴定获得 48 个 ORs 氨基酸全长序列和 13 个 IRs 氨基酸,其中包括 3 种共受体 Orco 以及 IR8a 和 IR25a 序列[61-62]。通过 RNA 干扰试验,明确了麻纹蝽平腹小蜂的寄主搜寻和产卵过程中的嗅觉感应主要依赖于 ORs 相关途径而不是 IRs 相关途径[61-62]。基因沉默后小蜂的触角 EAG 测定结果显示,对其具有明显的吸引作用的物质中(*E*)-α-法呢烯和 β-石竹烯可能与嗅觉受体 AjapOR35 特异性结合[61-62]。进一步的产卵试验结果表明,(*E*)-α-法呢烯和 β-石竹烯的产卵吸引效应在 AjapOR35 沉默后消失,说明存在于寄主植物中的这些起吸引作用的物质可以诱导麻纹蝽平腹小蜂定位产卵,AjapOR35 与其嗅觉定位和产卵行为有关,揭示了嗅觉基因在麻纹蝽平腹小蜂搜寻寄主过程中的作用机制[61-62]。

### 6.3 毒液蛋白

毒液是寄生蜂成功寄生的关键因子[65]。寄生蜂毒液是由蛋白酶、蛋白酶抑制剂、抗菌活性物质、麻痹毒素、其他蛋白和非蛋白物质等构成的复合物[66]。不同种类的寄生蜂毒液的组成不同[67]。麻纹蝽平腹小蜂的毒液器官为蜜蜂型,位于雌蜂腹部近背面,卵巢的下方。雌蜂羽化后第 7 天,毒囊体积达到最大[29]。Wang 等[68]通过 Label-free 测序技术鉴定到麻纹蝽平腹小蜂的 81 个毒液蛋白组分,并提出了一个关于麻纹蝽平腹小蜂寄生过程的假设模型:1)麻纹蝽平腹小蜂产卵时,将卵和毒液一同注射到寄主的卵壳和胚胎之间的缝隙中;2)毒液中的精氨酸激酶可迅速麻痹寄主,使其失去抵抗力;3)毒液中一定量的贮存蛋白可使寄主发育停滞,进入滞育状态;4)毒液中的几丁质酶加速免疫相关蛋白如钙网蛋白向寄主体内的扩散,抑制寄主的免疫应答;5)各个毒液蛋白组分之间相互协作,在荔枝蝽平腹小蜂的卵未孵化时,为其创造安全的生境;待卵孵化后,保证后代以寄主胚胎为食,导致寄主死亡,最终达到控制害虫的目的。对麻纹蝽平腹小蜂毒液蛋白功能的研究还未开展。对日本平腹小蜂寄生机制的相关研究还未见报道。

## 7 味觉受体基因的研究

昆虫的味觉系统在其取食选择、交配和产卵等多种行为反应中也起到重要的作用[69]。麻纹蝽平腹小蜂味觉相关基因的研究刚刚开展。最近,5 个麻纹蝽平腹小蜂的味觉受体基因(*AjapGR*58、*AjapGR*49、*AjapGR*64*f*、*AjapGR*38、*AjapGR*2)被鉴定发现,这 5 个基因在成虫的不同组织和性别中的表达量有明显差异[70]。通过系统发育树分析,推测 *AjapGR*58、*AjapGR*49 以及 *AjapGR*38 行使苦味感知功能,*AjapGR*64*f* 和 *AjapGR*2 行使甜味感知功能[70]。对日本平腹小蜂味觉受体基因的功能研究还未见报道。

## 8 小结与展望

平腹小蜂作为防治蝽类害虫效果显著的天敌昆虫,在生物防治中具有重要的应用价值。由于平腹小蜂主要用于中国华南地区荔枝蝽的防治,使得投入到平腹小蜂研究的力量有明显的区域性。日本平腹小蜂和麻纹蝽平腹小蜂学名的误用,也给平腹小蜂的深入研究和应用技术的提高带来了阻碍。近年来随着分子生物学和高通量测序技术的发展,对平腹小蜂的研究越来越深入,研究领域涉及寄生机制、体内共生菌、毒液蛋白等。但是进展缓慢,对平腹小蜂的认识还停留在较浅层面。寄生蜂个体小,难以解剖,注射 dsRNA 常造成小型寄生蜂死亡等也是造成平腹小蜂滞育分子调控机制、寄生机制、毒液蛋白功能研究等进展缓慢的重要原因。平腹小蜂基因组信息空白也限制了其深入研究。

近年来,由于各级政府大力发展绿色农业,利用平腹小蜂防治蝽类害虫的绿色防控技术成为在荔枝、龙眼、梨、桃、杏、李、山楂、猕猴桃等果树上开展“农药减量”行动的主要手段之一,因此迫切需要科研工作者对平腹小蜂展开更多元、更详细、更透彻的研究。有关平腹小蜂种群遗传结构、寄主的选择机制、产卵机制,与寄主及共生菌的互作关系,滞育调控机制等都是值得深入研究与探索的方向,这些研究将为平腹小蜂的大规模饲养、储存、应用技术等提供参考,提高寄生蜂在生物防治中的应用效果。

## 参考文献

[1] NOYES J S. Universal chalcidoidea database [EB/OL]. (2019

-05-18)[2022-04-28]. http://www.nhm.ac.uk/chalcidoids.

[2] PENG Lingfei, GIBSON G A P, TANG Lu, et al. Review of the species of *Anastatus* (Hymenoptera: Eupelmidae) known from China, with description of two new species with brachypterous females [J]. Zootaxa, 2020, 4767(3): 351-401.

[3] 廖定熹, 李学骝, 庞雄飞, 等. 中国经济昆虫志 第34册 膜翅目: 小蜂总科(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 186-190.

[4] 蒲蛰龙. 卵寄生蜂繁殖利用的理论和实践[M]//蒲蛰龙. 蒲蛰龙选集. 广州: 中山大学出版社, 1992: 135-184.

[5] LI Dunsong, LIAO Chunyan, ZHANG Baoxin, et al. Biological control of insect pests in litchi orchards in China [J]. Biological Control, 2014, 68(1): 23-36.

[6] 侯峥嵘, 梁洪柱, 陈倩, 等. 利用平腹小蜂防治荼翅蝽田间应用效果[J]. 中国森林病虫, 2009, 28(4): 39-43.

[7] MI Qianqian, ZHANG Jinping, HAYE T, et al. Fitness and interspecific competition of *Trissolcus japonicus* and *Anastatus japonicus*, egg parasitoids of *Halyomorpha halys* [J/OL]. Biological Control, 2021, 152: 104461. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2020.104461.

[8] FAY H, DE F S. Egg parasitoids of fruitspotting bugs (*Amblypelta* spp.): Potential for their mass rearing and strategic release [R]. Queensland Horticulture Institute, Queensland Department of Primary Industries: Mareeba, Australia, 1997.

[9] HUWER R, MADDOX C D, FAY H, et al. A multi target approach to fruit spotting bug management [C]// Proceedings of the Ⅶ World Avocado Congress, Cairns, Australia, 2011.

[10] GOVENDER A W. Australian fruitspotting bugs, *Amblypelta nitida* Stål and *A. lutescens lutescens* Distant (Hemiptera: Coreidae), and the potential for their biologically based management in macadamia orchards [D]. Brisbane: University of Queensland, 2015.

[11] SHRESTHA R. Productivity improvement of citrus fruits through effective fruit drop management technique in the mid and far western development region of Nepal [R]. National Citrus Research Program. Dhankuta, Nepal, 2011.

[12] 赵灿, 张宝鑫, 袁曦, 等. 广东省农业科学院害虫生物防治研究60年: 成就与展望[J]. 广东农业科学, 2020, 47(11): 93-102.

[13] 张宝鑫, 郑苑, 宋子伟, 等. 利用平腹小蜂防治荔枝蝽示范试验[J]. 中国热带农业, 2020, 97(6): 57-62.

[14] ZHAO Can, ZHANG Baoxin, LIU Zixin, et al. Effects of cold storage on host *Antheraea pernyi* egg quality for the egg parasitoid *Anastatus fulloi* Sheng and Wang [J/OL]. Insects, 2021, 12: 1057. DOI: 10.3390/insects12121057.

[15] 包建中, 古德祥. 中国生物防治[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1998: 124-134.

[16] 吴怡慧, 潘宣任, 吴登桢, 等. 荔枝椿象防治及天敌平腹小蜂之应用[C]//植物防检疫科技研发成果发表论文集. 2018: 27-35.

[17] ASHMEAD W H. Descriptions of new Hymenoptera from Japan. Ⅱ [J]. Journal of the New York Entomological Society, 1904, 12(3): 146-165.

[18] 赵灿, 夏玥, 郭义, 等. 平腹小蜂滞育诱导研究[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(2): 282-287.

[19] ZHAO Can, GUO Yi, LIU Zixin, et al. Temperature and photoperiodic response of diapause induction in *Anastatus japonicus*, an egg parasitoid of stink bugs [J/OL]. Insects, 2021, 12: 872. DOI: 10.3390/insects12100872.

[20] 刘子欣, 夏玥, 吴其峰, 等. 日本平腹小蜂滞育幼虫的重要生化物质变化[J]. 植物保护, 2021, 47(6): 158-165.

[21] 李文敬, 陈菊红, 米倩倩, 等. 日本平腹小蜂对点蜂缘蝽的控害潜能研究[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(7): 26-31.

[22] 唐璐. 中国平腹小蜂属系统分类研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.

[23] 童新旺. 几种小蜂寄主新纪录[J]. 昆虫天敌, 1987, 9(1): 54.

[24] 盛金坤, 王国红, 俞云祥, 等. 平腹小蜂属四新种记述(膜翅目: 旋小蜂科)[J]. 昆虫分类学报, 1997, 19(1): 60-66.

[25] 黄明度, 麦秀慧, 吴伟南, 等. 荔枝蝽象卵寄生蜂—平腹小蜂 *Anastatus* sp. 的生物学及其应用的研究[J]. 昆虫学报, 1974, 17(4): 362-375.

[26] 谢钦铭, 梁广文, 曾玲, 等. 平腹小蜂扩散行为与距离的初步研究[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(1): 110-113.

[27] 刘雨芳, 古德祥. 荔蝽卵平腹小蜂越冬环境初步调查[J]. 昆虫知识, 1998, 35(4): 227-230.

[28] 蒲蛰龙, 麦秀慧, 黄明度. 利用平腹小蜂防治荔枝蝽试验初报[J]. 植物保护学报, 1962, 1(3): 301-306.

[29] 王成兴. 荔枝蝽平腹小蜂毒液器官形态构造及其毒液蛋白组分分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.

[30] 米倩倩. 荼翅蝽沟卵蜂和平腹小蜂对寄主的适应性及种间竞争研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.

[31] 张宝鑫, 赵灿, 李敦松. 冷藏对荔枝蝽卵平腹小蜂羽化的影响[C]//陈万权. 植物健康与病虫害防控. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020: 101.

[32] 孙新涛. 平腹小蜂在人工卵上的部分生物学特性及其触角超微结构观察[D]. 福州: 福建农林大学, 2003.

[33] 刘志诚, 王志勇, 孙姒纫. 利用人工寄主卵繁殖平腹小蜂防治荔枝蝽[J]. 生物防治通报, 1986, 2(2): 54-58.

[34] 刘建峰, 刘志诚, 王春夏, 等. 大量繁殖平腹小蜂防治荔枝蝽蠓的研究[J]. 昆虫天敌, 1995, 17(4): 177-179.

[35] 李敦松, 张宝鑫, 章玉苹, 等. 平腹小蜂大量繁殖柜: 201444825U [P]. 2010-05-05.

[36] 赵灿, 李敦松, 张宝鑫, 等. 一种柞蚕卵连续烘干装置: 211120537U [P]. 2020-07-28.

[37] 宋子伟, 张宝鑫, 李敦松, 等. 一种蜂卵分离的平腹小蜂繁殖装置和繁蜂方法: 104839049A [P]. 2015-08-19.

[38] 张宝鑫, 李敦松, 赵灿, 等. 一种繁殖释放卡及对折式繁殖释放卡: 209914814U [P]. 2020-01-10.

[39] 郭义，李敦松，黄少华，等. 一种用于无人机的投放装置：210734508U [P]. 2020－06－12.

[40] 赵志宏，赵晨晨，梁林. 昆虫内共生菌研究进展[J]. 吉林农业，2018(3)：108－110.

[41] 高飞，李玉艳，王曼姿，等. 丽蝇蛹集金小蜂的生物学及其滞育调控机制研究进展[J]. 环境昆虫学报，2020，42(2)：355－363.

[42] ALMEIDA R P D. *Trichogramma* and its relationship with *Wolbachia*：identification of *Trichogramma* species，phylogeny，transfer and costs of *Wolbachia* symbionts [D]. Wagningen：Wageningen University，2004.

[43] 张海燕. 赤眼蜂种间 *Wolbachia* 转染与生防潜力研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2009.

[44] KREMER N，CHARIF D，HENRI H，et al. A new case of *Wolbachia* dependence in the genus *Asobara*：evidence for parthenogenesis induction in *Asobara japonica* [J]. Heredity，2009，103(3)：248－256.

[45] 项佳韦. 麻纹螬平腹小蜂体内共生菌多样性及立克次氏体在生殖系统的分布[D]. 福州：福建农林大学，2019.

[46] GIORGINI M，BERNARDO U，MONTI M M，et al. *Rickettsia* symbionts cause parthenogenetic reproduction in the parasitoid wasp *Pnigalio soemius* (Hymenoptera：Eulophidae) [J]. Applied Environmental Microbiology，2010，76(8)：2589－2599.

[47] STOUTHAMER R，BREEUWER J A J，HURST G D D. *Wolbachia pipientis*：microbial manipulator of arthropod reproduction [J]. Annual Review of Microbiology，1999，53：71－102.

[48] JULIE A R. Epigenetic influences on diapause [J]. Advances in Insect Physiology，2017，53(1)：115－144.

[49] ANE M A，DORA N，RODOLFO C，et al. Diapause in *Drosophila melanogaster*-photoperiodicity，cold tolerance and metabolites [J]. Journal of Insect Physiology，2018，105(1)：46－53.

[50] 张礼生，陈红印，王孟卿，等. 寄生蜂的滞育研究进展[J]. 中国生物防治学报，2014，30(2)：149－164.

[51] 张洪志，高飞，刘梦姚，等. 近十年全球小型寄生蜂滞育研究得新进展[J]. 环境昆虫学报，2018，40(1)：82－91.

[52] RAGO A，GILBERT D G，CHOI J H，et al. OGS2：Genome re-annotation of the jewel wasp *Nasonia vitripennis* [J/OL]. BMC Genomics，2016，17：678. DOI：10.1186/s12864-016-2886-9.

[53] LI Ming，AU L Y C，DOUGLAH D，et al. Generation of heritable germline mutations in the jewel wasp *Nasonia vitripennis* using CRISP/Cas9 [J/OL]. Scientific Reports，2017，7(1)：901. DOI：10.1038/s41598-017-00990-3.

[54] VINSON S B. Host selection by insect parasitoids [J]. Annual Review of Entomology，1976，21(1)：109－133.

[55] MURALI-BASKARAN R K，KUMAR J，PARTHIBAN P，et al. Role of kairomone in biological control of crop pests-A review [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology，2018，101：3－15.

[56] 刘雨芳，古德祥. 平腹小蜂 *Anastatus japonicus* 搜索寄主利它素的初步研究[C]//张芝利，朴永范，吴钜文. 中国有害生物综合治理论文集. 北京：中国农业科技出版社，1996：1160－1165.

[57] 刘雨芳，古德祥. 荔枝蝽取食行为的研究[J]. 昆虫学报，2000，43(2)：152－158.

[58] 王建武，周强，徐涛，等. 挥发性信息化合物与学习行为在平腹小蜂寄主选择过程中的作用[J]. 生态学报，2003，23(9)：1791－1797.

[59] 迟国梁，徐涛，王建武. 信息化合物在平腹小蜂寄主选择过程中的作用[J]. 应用生态学报，2007，18(4)：865－870.

[60] 迟国梁，徐涛，王建武. 荔枝受荔枝蝽危害后对平腹小蜂趋性的影响[J]. 昆虫学报，2006，49(6)：976－981.

[61] WANG Yinliang，CHEN Qi，GUO Junqi，et al. Molecular basis of peripheral olfactory sensing during oviposition in the behavior of the parasitic wasp *Anastatus japonicus* [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology，2017，89：58－70.

[62] 李婧. 荔枝蝽平腹小蜂的寄生嗅觉机制研究[D]. 长春：东北师范大学，2018.

[63] 罗顺影. 次生物质对荔枝害虫及天敌行为反应的研究进展[J]. 广东农业科学，2013，40(11)：66－68.

[64] BRUCE T J A，WADHAMS L J，WOODCOCK C M. Insect host location：a volatile situation [J]. Trends in Plant Science，2005，10(6)：269－274.

[65] 严智超，叶昕海，王蓓蓓，等. 寄生蜂毒液蛋白组成、功能及进化的研究进展[J]. 中国生物防治学报，2017，33(1)：1－10.

[66] ASGARI S，RIVERS D B. Venom proteins from endoparasitoid wasps and their role in host-parasite interactions [J]. Annual Review of Entomology，2011，56(1)：313－335.

[67] JONES D，LELUK J. Venom proteins of the endoparasitic wasp *Chelonus* Near *curvimaculatus*：Characterization of the major components [J]. Archives of Insect Biochemistry & Physiology，1990，13(1/2)：95－106.

[68] WANG Chengxin，JIN Fengliang，MANDAL S D，et al. Insights into the venom protein components of the egg parasitoid *Anastatus japonicus* (Hymenoptera：Eupelmidae) [J]. Pest Management Science，2020，76：2113－2126.

[69] DETHIER V G，CRNJAR R. Candidate codes in the gustatory system of caterpillars [J]. Journal of General Physiology，1982，79(4)：549－569.

[70] 李婧，张俊杰，王寅亮，等. 荔枝椿平腹小蜂触角味觉受体基因的鉴定与表达分析[J]. 吉林农业大学学报，2017，39(3)：292－298.

(责任编辑：杨明丽)