



补充营养和微量元素对烟蚜茧蜂寄生能力及生长发育相关酶的影响

赖荣泉^{1, #, *}, 韩梦^{1, #}, 顾钢^{2, *}, 周挺², 张榜¹,
赖宇飞³, 杨晨¹

(1. 福建农林大学植物保护学院 生物防治研究所, 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福州 350002;

2. 中国烟草总公司福建省公司, 福州 350003; 3. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018)

摘要:【目的】烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 作为烟蚜 *Myzus persicae* 的一种优势寄生蜂, 被广泛用于生产, 但在烟蚜茧蜂大规模扩繁的过程中, 饲养多代后常常会出现寄生能力下降、体型变小等问题。本研究旨在通过测定分析补充不同浓度营养成分和微量元素对退化烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时的寄生率、子代成蜂体型和子代成蜂中生长发育相关酶(酚氧化酶和羧酸酯酶)含量与活性的影响, 筛选出复壮效果最好的复壮方式。【方法】室内挑选饲养至10代后出现明显种群退化的烟蚜茧蜂成蜂饲喂不同浓度(5%, 10%和20%)营养成分(蜂蜜、葡萄糖和蔗糖)及不同浓度(0.25, 0.5, 1, 2和4 mg/L)的微量元素(Cu, Fe, Zn, Mn和Co)溶液, 测定寄生率、子代成蜂体型及子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶的含量和活性。【结果】在补充营养试验中, 10%蜂蜜溶液对烟蚜茧蜂的复壮效果最好, 使寄生率比对照组(纯净水)提高了28.00%, 但对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响不显著; 饲喂10%葡萄糖组烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量最高, 比对照组提高了38.00%; 饲喂10%蔗糖组烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶活性最高, 是对照组的3倍; 饲喂10%蔗糖组烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量最高, 比对照组提高了56.00%; 饲喂10%葡萄糖组烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶活性最高, 是对照组的1.3倍。补充微量元素试验中, 补充1 mg/L Fe对烟蚜茧蜂的复壮效果最好, 使寄生率比对照组提高了25.33%, 但对其子代成蜂体型的影响不显著; 烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量也最高, 比对照组提高了50.00%。各微量元素饲喂组烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶的活性均低于对照组; 饲喂1 mg/L Zn组烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量最高, 和对照组相比提高了29.31%; 饲喂1 mg/L Mn组子代成蜂酚氧化酶活性最高, 是对照组的1.51倍。【结论】生产上可对退化的烟蚜茧蜂种群补充饲喂10%蜂蜜水或补充1 mg/L Fe来提高烟蚜茧蜂对烟蚜的寄生能力, 达到复壮烟蚜茧蜂种群的目的。

关键词: 烟蚜茧蜂; 烟蚜; 寄生能力; 羧酸酯酶; 酚氧化酶

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2024)02-0203-10

Effects of supplemental nutrition and trace elements on the parasitic ability of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae) and growth and development-related enzymes

LAI Rong-Quan^{1, #, *}, HAN Meng^{1, #}, GU Gang^{2, *}, ZHOU Ting², ZHANG Bang¹, LAI Yu-Fei³, YANG

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2017J01617, 2020J01523); 中国烟草总公司福建省公司项目(2021350000240017, 2022350000240069); 福建农林大学科技创新基金项目(CXZX2020013A); 中国国家留学基金项目(202008350060)

作者简介: 赖荣泉, 男, 1975年6月生, 福建长汀人, 博士, 副教授, 研究方向为烟蚜茧蜂防控烟蚜调控及机制, E-mail: lrq305@fafu.edu.cn;

韩梦, 女, 1998年5月生, 重庆长寿人, 硕士研究生, 研究方向为烟蚜茧蜂种群退化规律及调控, E-mail: 1770453201@qq.com

共同第一作者 Authors with equal contribution

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: gugang318@163.com; lrq305@fafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-03-23; 接受日期 Accepted: 2023-05-10

Chen¹ (1. State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Biological Control Research Institute, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Province Corporation of China National Tobacco Corporation, Fuzhou 350003, China; 3. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: 【Aim】 *Aphidius gifuensis*, as a dominant parasitic wasp of *Myzus persicae*, has been widely used in production. However, during the propagation of *A. gifuensis* on a large scale, many problems such as reduced parasitic ability and smaller body size often occur after multiple generations of breeding. The purpose of this study is to screen the best rejuvenation methods by detecting and analyzing the effects of supplementing different concentrations of nutrients and trace elements on the parasitism rates and offspring adult size of *A. gifuensis* adults on *M. persicae*, and the contents and activities of growth and development-related enzymes in adults of the offspring of *A. gifuensis*. 【Methods】 *A. gifuensis* adults of the degenerated population after being reared in laboratory for 10 generations were fed with solutions of different concentrations (5%, 10% and 20%) of nutrients (honey, glucose and sucrose), and different concentrations (0.25, 0.5, 1, 2 and 4 mg/L) of trace elements including Cu, Fe, Zn, Mn and Co, the parasitism rate and offspring adult size, and the contents and activities of carboxylesterase (CarE) and phenoloxidase (PO) in adults of the offspring were determined. 【Results】 In supplemental nutrition experiments, 10% honey solution had the best rejuvenation effect on *A. gifuensis*, causing the parasitism rate to increase by 28.00% compared with the control (purified water), but had no significant effect on the offspring adult size. In the group fed with 10% glucose, the CarE content in adults of the offspring of *A. gifuensis* was the highest, which was 38.00% higher than that in the control group. The CarE activity in adults of the offspring of *A. gifuensis* in the group fed with 10% sucrose was the highest, which was 3-fold as high as that in the control group. In the group fed with 10% sucrose, the phenoloxidase content in adults of the offspring of *A. gifuensis* was the highest, which was 56.00% higher than that in the control group. The highest phenoloxidase activity in adults of the offspring of *A. gifuensis* was found in the group fed with 10% glucose, being 1.3-fold as high as that in the control group. In supplemental trace element experiments, the supplementation of 1 mg/L Fe had the best rejuvenation effect on *A. gifuensis*, resulting in the parasitism rate to increase by 25.33% compared with the control group, but had no significant effect on the offspring adult size. The CarE content in adults of the offspring of *A. gifuensis* in the group fed with 1 mg/L Fe was the highest, which was increased by 50.00% as compared with that in the control group. The CarE activities in adults of the offspring of *A. gifuensis* in groups fed with various trace elements were lower than that in the control group. In the group fed with 1 mg/L Zn, the PO content in adults of the offspring of *A. gifuensis* was the highest, increased by 29.31% as compared with that in the control group. In the group fed with 1 mg/L Mn, the PO activity in adults of the offspring of *A. gifuensis* was the highest, which was 1.51-fold as high as that in the control group. 【Conclusion】 In production, feeding 10% honey solution or supplementing 1 mg/L Fe can be used to improve the parasitic ability of *A. gifuensis* on *M. persicae*, so as to restore or regulate the degenerated population of *A. gifuensis*.

Key words: *Aphidius gifuensis*; *Myzus persicae*; parasitic ability; carboxylesterase; phenoloxidase

烟蚜 *Myzus persicae* 也叫桃蚜,是烟草上一种分布广、数量多、危害重的害虫,即使被寄生,还能继续为害(Lai *et al.*, 2017)。它从烟草苗床揭膜、烟苗移入大田,直至烟叶采收前都能刺吸烟株汁液造成危害(潘明真等, 2022)。在为害过程中,不仅会分泌

蜜露诱导煤烟病,污染叶片,还会传播多种病毒病,如烟草黄瓜花叶病毒病等,导致烟叶的产量及质量下降(Lai *et al.*, 2011),造成严重的经济损失。烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 是烟蚜的重要天敌之一,同时也是我国烟区烟蚜天敌中的优势种(白

晶晶等, 2020)。在自然条件下自然寄生率通常为 20% ~ 60%, 可高达 89.16%, 广泛用于我国各烟区烟蚜防控(安涛等, 2017; 杨静等, 2017)。且烟蚜茧蜂既能防控烟蚜, 又能间接抑制烟草病毒病的传播(李晓宇等, 2017)。目前, 利用烟蚜茧蜂生物防治烟蚜已在实际生产中得到广泛应用, 取得了显著效果。然而, 在人工大量扩繁烟蚜茧蜂的过程中, 长期室内保蚜、保蜂及烟蚜茧蜂种群近亲繁殖等导致烟蚜茧蜂的寄生率下降、体型变小等寄生能力减弱问题(谢应强等, 2020; 王巧妮等, 2021), 降低其对烟蚜的寄生能力和对其传播的病毒病的控制效果, 推高了防控成本。

谢应强等(2021)向烟蚜茧蜂退化种群饲喂蜂蜜、蔗糖和葡萄糖等糖类物质对烟蚜茧蜂的寄生力有显著复壮效果。其中, 饲喂蜂蜜的复壮效果最好, 使寄生率相比对照组(无饲喂)提高了 54.69%。微量元素对动物的生长发育和生产性能具有重要作用。锰能够提高意大利蜜蜂 *Aphis mellifera ligustica* 幼虫化蛹率和羽化出房率(夏振宇等, 2019)。在意大利蜜蜂幼虫饲料中添加适量钴时, 蜜蜂幼虫化蛹率显著提升, 蜜蜂幼虫血淋巴中总蛋白和葡萄糖含量显著增多(刘家昕等, 2019)。但微量元素对烟蚜茧蜂的寄生能力影响未见相关报道。

昆虫的整个生长发育过程中, 有多种酶参与调控了这一系列复杂的生理过程, 包括丙酮酸激酶、几丁质酶、保幼激素酯酶、羧酸酯酶、酚氧化酶和海藻糖酶等。其中, 羧酸酯酶、酚氧化酶在昆虫生长发育过程中起到了重要的作用。羧酸酯酶是重要的解毒酶, 除了在昆虫的解毒代谢中起作用外, 它还参与昆虫的生长发育调节、神经发育调节等生理活动(任娜娜等, 2014)。酚氧化酶可把单酚羟化成二酚(如多巴), 接着二酚被氧化成醌。在非酶促反应条件下, 醌形成的最终产物是黑色素, 而生成的黑色素对昆虫的正常生长发育具有重要作用(刘丽萍等, 2013)。但对烟蚜茧蜂复壮的这些相关酶影响, 未见相关报道。

本课题组前期研究发现: 室内连续饲养烟蚜茧蜂 8 代后, 烟蚜茧蜂寄生率随饲养代数下降, F_1 代的寄生率高达 64.00%, F_8 代的寄生率为 46.40%, 且前 7 个世代烟蚜茧蜂的羽化率均在 87.50% 以上, 但 F_8 代羽化率仅为 69.64%(白晶晶等, 2020, 2022; Lai *et al.*, 2021; 王巧妮等, 2021; 吴珂珂等, 2022; 马富华等, 2023)。室内续代饲养的烟蚜茧蜂, 其各项能力均会显著下降, 7 代后更为明显。

因此, 为保持室内连续饲养烟蚜茧蜂后的寄生力, 本研究测定分析了不同营养成分和微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜的寄生能力及其子代体型和生长发育相关酶含量和活性影响, 探究其对烟蚜茧蜂的复壮效果, 探明补充营养和微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜的寄生能力及生长发育相关酶的影响, 为实际生产中烟蚜茧蜂的复壮调控提供科学参考。

1 材料与方法

本研究在福建农林大学科技园田间实验室和应用生态研究所进行。

1.1 供试材料

1.1.1 供试植物和昆虫: 烟草品种: 云烟 87。供试蚜源: 烟蚜采自福建农林大学试验田烟株, 在室内繁殖约 50 代后作为供试蚜源。供试蜂源: 采自龙岩市烟草公司上杭分公司科技园烟株。将采集的僵蚜放入室内具有烟蚜的养虫笼中(长 × 宽 × 高 = 30 cm × 30 cm × 30 cm), 待其羽化、饲养。当饲养至 10 代后, 烟蚜茧蜂出现明显寄生能力退化, 即烟蚜茧蜂寄生率明显下降、体型明显变小时(王巧妮等, 2021), 作为供试蜂源。

1.1.2 试剂仪器: 试剂: 多花种蜂蜜(波美度 $\geq 42^\circ$), 福建省神蜂科技开发有限公司生产; 蔗糖(蔗糖分 $\geq 99\%$), 云南蔗珍甜贸易有限公司生产; 葡萄糖粉剂(葡萄糖 $> 99\%$), 重庆和平制药有限公司生产; 硫酸锰(一水合物, 纯度 99%)、硫酸铜(五水合物, 纯度 99%)、硫酸钴(七水合物, 纯度 99.5%)、硫酸锌(一水合物, $Zn \geq 35.5\%$)、硫酸亚铁(纯度 90%)、牛血清蛋白(生物技术级)、毒扁豆碱(纯度 98.0%)、SDS(纯度 92.5%)和邻苯二酚(纯度 99.5%), 上海麦克林生化科技股份有限公司生产; 考马斯亮蓝 G-250(纯度 100%)和固蓝 B 盐, 北京索莱宝科技有限公司生产; 乙酸-1 萘酯(纯度 98%), 上海易恩化学技术有限公司生产。

仪器: 体视摄影显微镜(Leica m165c), 苏州中烁电子科技有限公司生产; 智能人工气候箱(MRC-250B-LED), 购自宁波普朗特仪器有限公司; 高速冷冻离心机(CR22), 德国 KA 公司生产; 紫外可见分光光度计(T6 新世纪), 济南思卓医疗机械有限公司生产; 电子天平(AUY120), 日本 SHIMADZU 公司生产; 电热恒温水槽(DK-8D), 上海恒科技有限公司生产; 超纯水机(SU-S2-20L), 四川科瑞峰环境科技有限公司生产。

1.3 补充营养对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时的寄生率和子代体型影响测定

参考王巧妮等(2021)及谢应强等(2021)方法。本实验共设置 10 个处理,分别为 3 个浓度(5%, 10% 和 20%)的蜂蜜、蔗糖和葡萄糖水溶液及对照组纯净水。每处理和对照均重复 3 次,共 30 次。从室内饲养至 10 代退化的烟蚜茧蜂种群中,随机收取僵蚜于 2 mL 指形管中。每个指形管放 1 头,用纱布蒙住管口。待其羽化后,挑选出同时产生、大小一致的雌雄成蜂各 30 头,并在指形管中塞入小脱脂棉球,用一次性塑料滴管分别在脱脂棉上滴上不同浓度的营养成分及纯净水进行分组饲喂。24 h 后,按雌:雄=1:1 的比例进行配对。2 h 后,分别接入具有 100 头 2-3 龄烟蚜若蚜的小养虫笼中(雌蜂:烟蚜=1:100),并放入人工气候箱(温度 25 ℃、相对湿度 75%、光周期 14L:10D)内饲养。待僵蚜形成后,用毛刷取下僵蚜放入 2 mL 指形管中,统计数量;并每 12 h 观察 1 次烟蚜茧蜂羽化情况;僵蚜羽化后,从每个处理组中选择有代表性的 6 头烟蚜茧蜂成蜂在体视摄影显微镜下测量其后足胫节的长度作为体型大小的指标(谢应强等, 2021; 马富华等, 2022)。

$$\text{寄生率}(\%) = \frac{\text{僵蚜总数}}{\text{烟蚜总数}} \times 100 \quad (1)$$

1.4 补充微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时的寄生率和子代体型影响测定

本实验共设置 26 个处理,分别以硫酸铜(五水合物)、硫酸亚铁、硫酸锌(一水合物)、硫酸锰(一水合物)、硫酸钴(七水合物)为微量元素来源配制成的不同浓度(0.25, 0.5, 1, 2 和 4 mg/L)的微量元素(Cu, Fe, Zn, Mn 和 Co)水溶液及对照组纯净水。每个处理或对照重复 3 次,其他方法和具体操作步骤同 1.3 节。

1.5 复壮效果最好的营养元素和微量元素浓度下烟蚜茧蜂子代羧酸酯酶和酚氧化酶活性测定

在 1.3 和 1.4 节试验基础上,以分别筛选出的复壮效果最好(寄生率最高)的浓度为实验浓度,比较补充营养和微量元素对烟蚜茧蜂子代羧酸酯酶和酚氧化酶活性的影响,寄生率和子代体型测定的操作方法同 1.3 节。

1.5.1 羧酸酯酶的含量及活性测定:每个处理或对照的烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜若蚜后,收取僵蚜单独放置。待其羽化后 12 h 内,进行羧酸酯酶含量和活性测定,每个处理或对照重复 3 次。

酶液制备:每个对照或处理挑选出 5 头烟蚜茧蜂成蜂,分别加入 1 mL 磷酸缓冲液(0.04 mol/L, pH 7.0)于 2 mL 指形管中。在冰浴下匀浆,匀浆液在 4 ℃ 10 800 r/min 条件下离心 20 min,取上清液作为酶源。

羧酸酯酶含量测定:参照 Bradford(1976)考马斯亮蓝 G-250 法测定羧酸酯酶蛋白含量并制定标准曲线。

羧酸酯酶活性测定:羧酸酯酶比活力测定参照 van Asperen(1962)和常静等(2016)方法。反应总体积为 3.2 mL,含 0.04 mol/L pH 7.0 的磷酸缓冲液 450 μL, 3×10^{-4} mol/L 的底物(含体积比为 1:1 的毒扁豆碱) 1.8 mL 及适当稀释的酶液 50 μL。在 30 ℃ 水浴中反应 15 min 后,加入 0.9 mL 显色剂(1% 固蓝 B 盐:5% SDS=2:15, v/v)终止反应。静置 15 min 后,在波长 600 nm(以 α-NA 为底物)下测定吸光度(OD)值。根据得到的 OD 值和酶液蛋白含量,再按下列公式计算酶的比活力。

$$\text{羧酸酯酶比活力} = \frac{\text{OD} \times V}{t \times \rho_{\text{Pro}} \times V_E} \quad (2)$$

其中,OD 为不同波长下测定的吸光度值[以多酚含量(μmol)表示];V 为反应总体积(mL);t 为反应时间(min); ρ_{Pro} 为蛋白质量浓度(mg/mL); V_E 为反应酶液体积(mL)。

1.5.2 酚氧化酶的含量及活性测定:每个处理或对照的烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜若蚜后,收取僵蚜单独放置。待其羽化后 12 h 内进行酚氧化酶含量和活性测定,每个处理重复 3 次。

酶液制备:参照刘守柱(2008)和白晶晶等(2020)方法进行。每个处理或对照挑选出 5 头烟蚜茧蜂成蜂,分别加入 0.2 mol/L 磷酸缓冲液(pH 6.9) 1 mL 于 2 mL 离心管中,低温研磨成均浆液,冰浴下静置 15 min 后,将匀浆液在 4 ℃ 条件下 8 000 r/min 高速冷冻离心机中离心 30 min,除去溶液液面表层的脂类和色素,取上清液作为酶源备用。

酚氧化酶含量测定:方法同 1.5.1 节。

酚氧化酶活性测定:酚氧化酶活性测定参照 Benjamin 和 Montgomery(1973)及张菊华等(2017)方法进行。2 mL 的酶活性测定体系中包含终浓度为 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 6.9),1 mmol/L 邻苯二酚溶液。最后加入 300 μL 酶液振荡 5 s。以缓冲液作为参比,于紫外分光光度计 475 nm 下测定光密度随时间变化的增长曲线。以缓冲液为参比连续测定 3 min,每分钟内 OD₄₇₅ 升高 0.001 为一个活力单

位,并根据下列公式计算酚氧化酶活性。

$$\text{酚氧化酶活性} [\text{U}/(\text{mg} \cdot \text{min})] = \frac{\Delta A_{475} \times V_t}{W \times V_s \times 0.001 \times t}$$

(3)

其中, V_t 为酶液提取液总体积; W 为烟蚜茧蜂质量 (mg); V_s 为测定酶液总体积; t 为反应时间 (min)。

1.6 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 软件记录、整理数据;利用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析,使用 LSD 多重比较法进行差异显著性比较,置信概率为 0.95, $P < 0.05$ 为显著差异;数据均采用平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果

2.1 补充营养对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜的影响

2.1.1 补充营养对烟蚜茧蜂寄生率的影响:不同营养成分对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜的寄生率影响如图 1 所示。

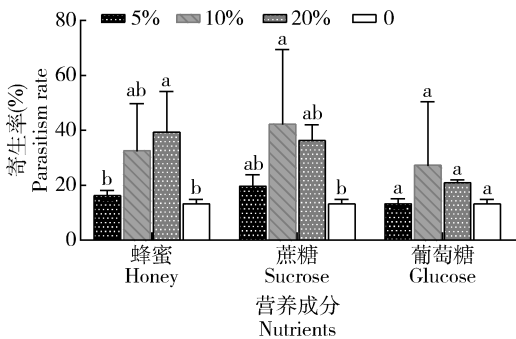


图 1 饲喂不同浓度的营养成分对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响

Fig. 1 Effects of feeding different concentrations of nutrients on the parasitism rates of *Aphidius gifuensis*

adults on *Myzus persicae*

0: 纯净水对照 Purified water as the control (CK). 下同。The same below. 柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 (LSD 检验);下图同。Different lowercase letters above bars indicate significant difference at the 0.05 level (LSD test). The same for the following figures.

从图 1 可知:饲喂不同浓度的蜂蜜水时烟蚜茧蜂寄生率总体上无显著差异 ($F_{3,8} = 3.581, P = 0.066$),但随着浓度的增加,其寄生率也逐渐升高。在 20% 浓度时,对烟蚜茧蜂复壮效果最好,烟蚜茧蜂寄生率达到了 39.33%,和对照组相比寄生率提高了 16.33%。饲喂 5% 的蜂蜜水时,复壮效果最

差,烟蚜茧蜂寄生率仅为 16.33%。其中,饲喂 20% 蜂蜜水与饲喂 5% 蜂蜜水和对照组之间烟蚜茧蜂寄生率差异显著 ($P < 0.05$),与饲喂 10% 蜂蜜水之间烟蚜茧蜂寄生率差异不显著 ($P > 0.05$)。

饲喂不同浓度的蔗糖时烟蚜茧蜂寄生率总体上无显著差异 ($F_{3,8} = 2.986, P = 0.096$)。在饲喂 10% 浓度蔗糖时复壮效果最好,烟蚜茧蜂寄生率为 42.33%,和对照组相比提高了 28.67%;饲喂 5% 浓度的蔗糖时,复壮效果最差,烟蚜茧蜂寄生率为 19.67%,和对照组相比提高了 6.34%。其中饲喂 10% 蔗糖和对照组之间烟蚜茧蜂寄生率差异显著 ($P < 0.05$),饲喂 5% 和 20% 蔗糖及对照组之间烟蚜茧蜂寄生率差异不显著 ($P > 0.05$)。

饲喂不同浓度葡萄糖时烟蚜茧蜂的寄生率没有显著差异 ($F_{3,8} = 0.998, P = 0.442$)。

通过不同浓度的营养成分对烟蚜茧蜂的寄生率影响,筛选出复壮效果最好 (寄生率最高) 的营养成分浓度为 10%。因此,以 10% 为统一浓度进行不同营养成分对烟蚜茧蜂寄生率、子代体型和生长发育相关酶的影响测定。

2.1.2 最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂寄生率的影响:最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响如图 2 所示。

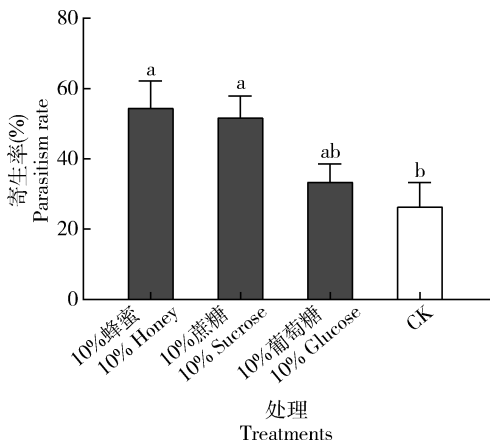


图 2 饲喂最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响

Fig. 2 Effects of feeding the optimal concentration of nutrients on the parasitism rates of *Aphidius gifuensis* adults on *Myzus persicae*

饲喂 10% 浓度的不同营养成分时烟蚜茧蜂的寄生率差异显著 ($F_{3,8} = 6.626, P = 0.044$)。饲喂 10% 蜂蜜水时,烟蚜茧蜂的寄生率最高 (54.33%),和对照组相比提高了 28.00%。饲喂 10% 蔗糖水时

烟蚜茧蜂的寄生率和饲喂 10% 葡萄糖时烟蚜茧蜂成蜂的寄生率次之, 分别为 51. 67% 和 33. 33%, 和对照组相比分别提高了 25. 34% 和 7. 00%。其中, 饲喂蜂蜜和蔗糖与对照之间差异显著 ($P < 0. 05$), 与饲喂葡萄糖间差异不显著 ($P > 0. 05$)。

2. 1. 3 最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响:饲喂 10% 的最佳浓度营养成分对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响如图 3 所示。饲喂不同的营养成分时其子代成蜂后足胫节长度没有显著差异 ($F_{3,20} = 1. 316, P = 0. 297$)。

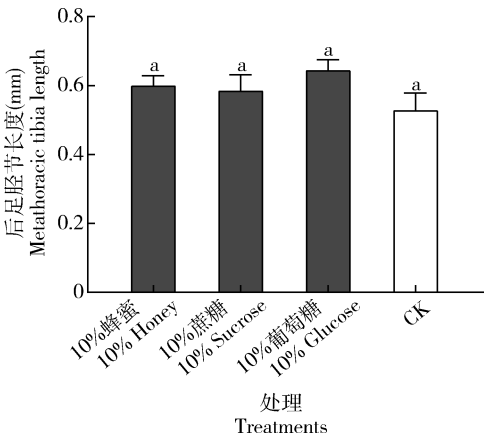


图3 饲喂最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响
Fig. 3 Effects of feeding the optimal concentration of nutrients on the offspring adult size of *Aphidius gifuensis*

2. 1. 4 最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂子代生长发育相关酶的影响:饲喂 10% 浓度蜂蜜水、蔗糖、葡萄糖对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶含量和活性的影响如表 1 所示。采用考马斯亮蓝 G-250 法测定蛋白质含量, 求得标准蛋白曲线为 $y =$

$6. 399x + 0. 02857 (R^2 = 0. 993)$, 并通过计算以此求得饲喂 10% 蜂蜜、蔗糖、葡萄糖后烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶蛋白的含量和活性。

由表 1 可知:饲喂不同营养成分后, 烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量达到了极显著差异 ($F_{3,8} = 79. 851, P = 0. 001$), 其羧酸酯酶比活力也达到了显著差异 ($F_{3,8} = 6. 026, P = 0. 019$)。在饲喂 10% 蜂蜜后, 烟蚜茧蜂子代成蜂体内羧酸酯酶的含量和活性和对照组无显著差异 ($P > 0. 05$)。饲喂 10% 蔗糖后, 烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量和对照组相比显著下降 ($P < 0. 05$), 活性和对照组相比显著提高 ($P < 0. 05$)。饲喂 10% 葡萄糖后, 烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量有显著提高 ($P < 0. 05$), 而活性和对照组相比没有显著变化 ($P > 0. 05$)。因此, 饲喂不同营养物质后, 烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量的大小排序为: 葡萄糖 > 蜂蜜 > CK > 蔗糖; 羧酸酯酶比活力由高到低的排序是: 蔗糖 > 蜂蜜 > 葡萄糖 > CK。

此外, 饲喂不同营养成分后烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量达到了显著差异 ($F_{3,8} = 16. 123, P = 0. 001$), 酚氧化酶活性也有显著差异 ($F_{3,8} = 6. 192, P = 0. 018$)。饲喂 10% 蜂蜜后, 烟蚜茧蜂子代酚氧化酶含量和活性与对照组相比均无显著差异 ($P > 0. 05$); 饲喂 10% 蔗糖后, 烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量显著提高 ($P < 0. 05$), 但是酚氧化酶活性和对照组相比无显著变化 ($P > 0. 05$); 饲喂 10% 葡萄糖后, 烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量和活性与对照组相比没有显著差异 ($P > 0. 05$)。因此, 饲喂不同营养物质后, 烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量的大小排序为: 蔗糖 > 蜂蜜 > CK > 葡萄糖; 酚氧化酶活性由高到低的排序是: 葡萄糖 > 蜂蜜 > CK > 蔗糖。

表 1 饲喂最佳浓度的营养成分对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶含量及活性的影响

Table 1 Effects of feeding the optimal concentration of nutrients on the contents and activities of carboxylesterase (CarE) and phenoloxidase (PO) in adults of the offspring of *Aphidius gifuensis*

处理 Treatments	羧酸酯酶含量 CarE content (mg/mL)	羧酸酯酶活性 CarE activity [μmol/(min · mg)]	酚氧化酶含量 PO content (mg/mL)	酚氧化酶活性 PO activity [U/(mg · min)]
10% 蜂蜜 10% Honey	0. 0346 ± 0. 0001 b	2. 9207 ± 0. 6743 b	0. 0192 ± 0. 0011 b	6. 7618 ± 0. 6590 ab
10% 蔗糖 10% Sucrose	0. 0280 ± 0. 0002 c	5. 3358 ± 0. 0830 a	0. 0295 ± 0. 0005 a	4. 4148 ± 1. 2259 b
10% 葡萄糖 10% Glucose	0. 0474 ± 0. 0015 a	2. 5794 ± 1. 0446 b	0. 0174 ± 0. 0025 b	8. 7003 ± 0. 1101 a
CK	0. 0344 ± 0. 0005 b	1. 7772 ± 0. 0665 b	0. 0189 ± 0. 0003 b	6. 7084 ± 0. 1880 ab

表中数据为平均值 ± 标准误; 同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0. 05$, one-way ANOVA, LSD 检验); 表 2 同。Data in the table are mean ± SE. Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant difference by one-way ANOVA ($P < 0. 05$, LSD test). The same for Table 2.

2.2 补充微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜的影响

2.2.1 微量元素对烟蚜茧蜂寄生率的影响:饲喂不同浓度的微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响如图 4 所示。

饲喂不同浓度的 Cu 元素时烟蚜茧蜂寄生率无显著差异 ($F_{5,12}=2.658, P=0.077$),但各处理组烟蚜茧蜂寄生率均低于对照组,而补充 1 和 2 mg/L Cu 元素组烟蚜茧蜂寄生率显著低于饲喂清水的对照组 ($P < 0.05$),两个浓度引起的寄生率均为 7.67%,和对照组相比降低了 16.66%。饲喂不同浓度的 Fe 元素时烟蚜茧蜂寄生率有极显著差异 ($F_{5,12}=21.809, P=0.001$),其中 1 mg/L Fe 元素处理组复壮效果最好,烟蚜茧蜂寄生率达到了 59.00%,和对照组相比提高了 34.67%; 4 mg/L Fe 元素处理组的复壮效果最差,烟蚜茧蜂寄生率为 9.33%,和对照组相比降低了 15.00%;其余浓度处理组和对照组相比烟蚜茧蜂寄生率差异均不显著

($P>0.05$)。饲喂不同浓度的 Zn 元素水溶液时烟蚜茧蜂寄生率差异不显著 ($F_{5,12}=0.997, P=0.460$)。饲喂不同浓度的 Mn 元素时烟蚜茧蜂寄生率有显著差异 ($F_{5,12}=4.598, P=0.011$),其中, 0.25 mg/L 浓度的复壮效果最好,烟蚜茧蜂寄生率达 51.67%,和对照组相比提高了 27.34%,并且和其他 4 个浓度处理组及对照组相比差异显著 ($P < 0.05$)。饲喂不同浓度的 Co 元素时烟蚜茧蜂的寄生率有显著差异 ($F_{4,10}=3.431, P=0.037$),其中, 4 mg/L 浓度时,无僵蚜产生;其余 4 个浓度处理组烟蚜茧蜂寄生率均低于对照组,1 mg/L 浓度时烟蚜茧蜂寄生率最低,为 5.67%,和对照组相比降低了 18.66%。

通过不同浓度的微量元素对烟蚜茧蜂的寄生率影响,筛选出复壮效果最好(寄生率最高)的微量元素浓度为 1 mg/L。因此,以 1 mg/L 为统一浓度进行不同微量元素对烟蚜茧蜂寄生率、子代体型和生长发育相关酶的影响测定。

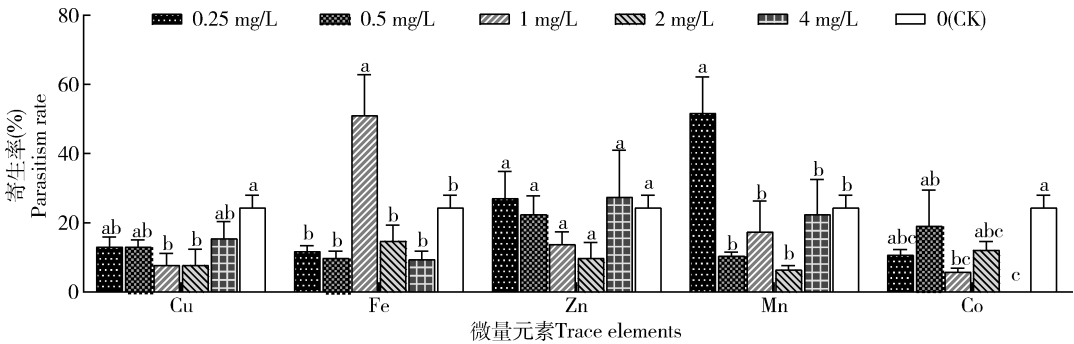


图 4 饲喂不同浓度的微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响
Fig. 4 Effects of feeding different concentrations of trace elements on the parasitism rates of *Aphidius gifuensis* adults on *Myzus persicae*

2.2.2 最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂寄生率的影响:饲喂最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时的寄生率的影响如图 5 所示。在 1 mg/L 的最佳浓度下,不同微量元素使烟蚜茧蜂寄生率有极显著显著 ($F_{5,12}=10.230, P=0.001$),其中,补充 Fe 元素的烟蚜茧蜂寄生率最高,为 42.33%,和对照组相比提高了 25.33%;其余处理的烟蚜茧蜂寄生率均低于对照组,其中, Co 元素处理组寄生率最低,为 5.00%,和对照组相比降低了 12.00%。

2.2.3 最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响:饲喂最佳浓度对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响如图 6 所示。

在 1 mg/L 的最佳浓度下,饲喂不同微量元素对

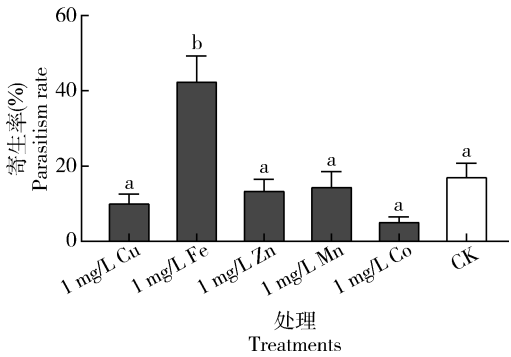


图 5 饲喂最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂成蜂寄生烟蚜时寄生率的影响
Fig. 5 Effects of feeding the optimal concentration of trace elements on the parasitism rates of *Aphidius gifuensis* adults on *Myzus persicae*

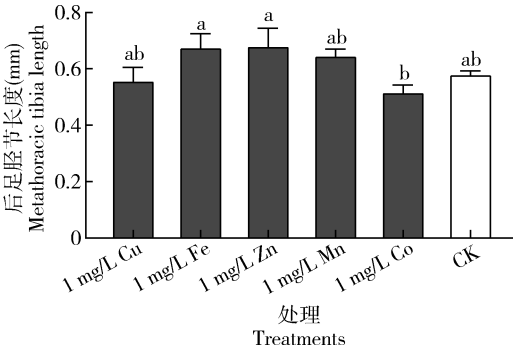


图6 饲喂最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂子代成蜂体型的影响

Fig. 6 Effects of feeding the optimal concentration of trace elements on the offspring adult size of *Aphidius gifuensis*

烟蚜茧蜂子代成蜂体型总体上无显著影响 ($F_{5,30} = 2.195$, $P = 0.081$)。其中,补充 1 mg/L Zn 元素时烟蚜茧蜂子代成蜂体型最大,后足胫节长 0.675 mm,和对照组相比增长了 17.36%。补充 1 mg/L Co 元素时烟蚜茧蜂成蜂体型最小,后足胫节长为 0.512 mm,和对照组相比降低了 11.11%。

2.2.4 最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂子代生长发育相关酶的影响:饲喂最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶含量和活性的影响如表 2 所示。采用考马斯亮蓝 G-250 法测定蛋白质含量,求得标准蛋白曲线为 $y = 6.399x + 0.02857$ ($R^2 = 0.993$),并通过计算以此求得饲喂 1 mg/L 的不同微量元素烟蚜茧蜂子代羧酸酯酶和酚氧化酶蛋白的含量和活性。经过方差分析:补充不同微量元素后,烟蚜茧蜂子代羧酸酯酶含量达到了极显著差异 ($F_{5,12} = 54.63$, $P = 0.001$),其羧酸酯酶比活力之间也有极显著差异 ($F_{5,12} = 6.468$, $P = 0.004$)。

在补充 1 mg/L Cu, Fe 和 Zn 元素后,对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量和对照组相比均有显著提高 ($P < 0.05$),这些微量元素均对羧酸酯酶有促进作用,只有补充 1 mg/L Co 元素后,烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量和对照组相比有显著下降 ($P < 0.05$)。补充 1 mg/L 微量元素后,羧酸酯酶活性和对照组相比都显著下降 ($P < 0.05$),但补充不同微量元素之间的羧酸酯酶活性没有显著差异 ($P > 0.05$)。因此,补充不同的微量元素后烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量的大小排序为:Fe > Zn > Cu > Mn > CK > Co; 羧酸酯酶活性的大小排序为:CK > Co > Zn > Mn > Fe > Cu。

补充最佳浓度不同微量元素后,烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量达到了极显著差异 ($F_{5,12} = 35.534$, $P = 0.001$),酚氧化酶活性达到了极显著差异 ($F_{5,12} = 84.115$, $P = 0.000$)。补充 1 mg/L Cu, Fe 和 Zn 3 种微量元素后,烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量和对照组相比均有显著提升 ($P < 0.05$)。在补充 1 mg/L Fe 和 Zn 元素后,烟蚜茧蜂子代酚氧化酶活性也有显著提升 ($P < 0.05$),和对照相比分别提高了 1.49 和 1.15 倍,而补充 1 mg/L Cu 元素对烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶活性没有显著影响 ($P > 0.05$)。补充 1 mg/L Mn 元素后,烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量和对照组相比没有显著变化 ($P > 0.05$),但酚氧化酶活性和对照组相比有显著提升 ($P < 0.05$) (提高了 1.51 倍)。补充 1 mg/L Co 元素后,烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量和对照组相比显著下降 ($P < 0.05$),其活性和对照组相比有显著提升 ($P < 0.05$)。因此,补充不同的微量元素后烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量的大小排序为:Zn > Fe > Cu > CK > Mn > Co; 酚氧化酶活性的大小排序为:Mn > Fe > Co > Zn > CK > Cu。

表2 饲喂最佳浓度的微量元素对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶含量及活性的影响

Table 2 Effects of feeding the optimal concentration of trace elements on the contents and activities of carboxylesterase (CarE) and phenoloxidase (PO) in adults of the offspring of *Aphidius gifuensis*

处理 Treatments	羧酸酯酶含量 CarE content (mg/mL)	羧酸酯酶活性 CarE activity [μmol/(min · mg)]	酚氧化酶含量 PO content (mg/mL)	酚氧化酶活性 PO activity [U/(mg · min)]
1 mg/L Cu	0.0381 ± 0.0003 c	0.2228 ± 0.0627 b	0.0431 ± 0.0008 b	8.3667 ± 0.0912 c
1 mg/L Fe	0.0526 ± 0.0007 a	0.9042 ± 0.0814 b	0.0442 ± 0.0008 b	13.2462 ± 0.0885 a
1 mg/L Zn	0.0443 ± 0.0011 b	2.4561 ± 0.7749 b	0.0503 ± 0.0006 a	11.1221 ± 0.2505 b
1 mg/L Mn	0.0355 ± 0.0001 d	1.3207 ± 0.0709 b	0.0370 ± 0.0009 cd	13.5106 ± 0.2059 a
1 mg/L Co	0.0297 ± 0.0002 e	3.5969 ± 0.0063 b	0.0364 ± 0.0003 d	11.4245 ± 0.3136 b
CK	0.0350 ± 0.0004 d	11.0173 ± 3.7589 a	0.0389 ± 0.0006 c	8.9184 ± 0.32004 c

3 讨论

目前,关于昆虫种群退化复壮方式,主要分为以下几种方式:补充营养成分,野外种群杂交,为退化种群提供半自然条件(杜钦祥等, 2022),转寄主繁殖(李会, 2011)等。但关于烟蚜茧蜂种群复壮技术大都集中在补充营养成分和杂交复壮,且都未进行复壮技术对退化烟蚜茧蜂生理生化的影响研究。

本研究在对烟蚜茧蜂饲喂了不同浓度的营养成分后,发现不同浓度的蜂蜜、蔗糖、葡萄糖整体上均能提高烟蚜茧蜂成蜂对烟蚜的寄生率。10% 和 20% 浓度对烟蚜茧蜂寄生率的影响不大, 10% 的浓度稍好(图 1);在 10% 的最佳浓度下,蜂蜜对烟蚜茧蜂的复壮效果最好(图 2)。这和谢应强等(2021)的研究结果相一致,而不同营养成分对烟蚜茧蜂体型的复壮效果较差,和对照组相比无显著差异(图 3)。通过对烟蚜茧蜂子代羧酸酯酶和酚氧化酶含量和活性进行测定,本研究发现:饲喂 10% 葡萄糖后显著提高了烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量,但其活性反而降低(表 1),造成这种现象的原因可能和烟蚜茧蜂较高的羧酸酯酶含量有关系。饲喂 10% 蔗糖后,烟蚜茧蜂子代成蜂酚氧化酶含量提高,这对烟蚜茧蜂生长发育有明显的促进作用,但活性并没有受到影响(表 1)。酚氧化酶的含量变化可能和饲喂蔗糖后的高寄生率有关。但具体的原因,有待进一步研究。

微量元素在动物的生长发育中起到了重要作用。正确使用微量元素能提高动物健康水平,促进动物生长,而过量使用则效果相反,有可能导致动物中毒死亡(王旗招, 2011)。在饲料中适量添加锰后,意大利蜜蜂幼虫和成蜂体内精氨酸酶活性、抗氧化酶活性影响显著,化蛹率和羽化出房率也显著提高(夏振宇, 2019)。在饲料中适量添加钴元素后,意大利蜜蜂幼虫和成蜂体内精氨酸酶活性、抗氧化酶活性影响显著,化蛹率和羽化出房率也显著提高(刘家昕, 2019)。本研究分别添加了不同的 5 种微量元素发现:饲喂浓度为 1 mg/L 的 Fe 元素或 0.25 mg/L 的 Mn 元素时对烟蚜茧蜂成蜂对烟蚜的寄生率提升效果最好,而高浓度(超过 1 mg/L)的 Co 元素溶液容易造成烟蚜茧蜂的死亡(图 4)。在 1 mg/L 的最佳浓度下,Fe 的复壮效果最好,烟蚜茧蜂成蜂对烟蚜若蚜的寄生率达 42.33%; Co 元素的复壮效果最差,甚至有负面影响烟蚜茧蜂,寄生率仅为

5.00%; Cu, Zn 和 Mn 元素的复壮效果一般(图 5)。在 1 mg/L 的最佳浓度下,饲喂 5 种微量元素对烟蚜茧蜂子代体型影响不显著(图 6)。对于子代成蜂羧酸酯酶和酚氧化酶含量和活性测定,发现:除 Co 元素外,其他微量元素均对烟蚜茧蜂子代成蜂羧酸酯酶含量有显著提高,而所有微量元素对子代成蜂羧酸酯酶活性有一定的抑制作用(表 2)。造成这种现象的原因可能是摄入微量元素的浓度稍高导致,但具体原因有待进一步研究。

同时,在补充最佳浓度的 Fe 元素后烟蚜茧蜂寄生率最高,子代成蜂酚氧化酶含量和活性均显著提升(表 2)。这些现象说明烟蚜茧蜂寄生率和烟蚜茧蜂体内生长发育相关的酶含量和活性有一定关联,但具体的相关机制有待进一步研究。

综上,可以采用补充 10% 蜂蜜水或添加浓度为 1 mg/L 微量元素 Fe,作为室内长时间持续扩繁导致烟蚜茧蜂寄生力退化后的复壮措施。

参考文献 (References)

An T, Zhang HZ, Han YH, Chen HY, Zhang LS, 2017. Transcriptome analysis of diapause-associated genes of *Aphidius gifuensis* Ashmaed. *Chin. J. Biol. Control*, 33(5): 604–611. [安涛, 张洪志, 韩艳华, 陈红印, 张礼生, 2017. 烟蚜茧蜂滞育关联基因的转录组学分析. 中国生物防治学报, 33(5): 604–611]

Bai JJ, Gu G, Lai RQ, Zhou T, Mi YE, Han M, Zhang B, 2022. Effects of temperature and juvenile hormone analogs on the emergence time and rate of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Acta Tabac. Sin.*, 28(2): 131–137. [白晶晶, 顾钢, 赖荣泉, 周挺, 米月娥, 韩梦, 张榜, 2022. 温度及保幼激素类似物对烟蚜茧蜂羽化时间和羽化率的影响. 中国烟草学报, 28(2): 131–137]

Bai JJ, Gu G, Lai RQ, Zhou T, Wu XT, Chen DM, Shu J, 2020. Effects of juvenile hormone analogs on the growth and development, parasitism rate and activities of molting-related enzymes in *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Acta Entomol. Sin.*, 63(9): 1091–1100. [白晶晶, 顾钢, 赖荣泉, 周挺, 吴晓婷, 陈丹明, 舒静, 2020. 保幼激素类似物对烟蚜茧蜂生长发育、寄生率和蜕皮相关酶活性的影响. 昆虫学报, 63(9): 1091–1100]

Benjamin ND, Montgomery MW, 1973. Polyphenol oxidase of royal ann cherries: Purification and characterization. *J. Food Sci.*, 38(5): 799–806.

Bradford MM, 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72: 248–254.

Chang J, Zhang W, Li HP, Diao QY, 2016. Study on susceptibility to pyrethroids and carboxylesterase activity in *Myzus persicae* on potato. *Chin. J. Pestic. Sci.*, 18(2): 201–206. [常静, 张薇, 李海平, 刁青云, 2016. 马铃薯桃蚜对拟除虫菊酯类杀虫剂的敏感性及其体内羧酸酯酶活性研究. 农药学学报, 18(2): 201–206]

Du QX, Cai HL, Li JY, Wu SL, Zeng WA, Zhai ZG, Yang ZX, 2022. Effects of field rejuvenation on biological characteristics of *Arma*

chinensis and its progeny. *Chin. J. Biol. Control*, 38(6): 1619 – 1624. [杜钦祥, 蔡海林, 李建勇, 伍绍龙, 曾维爱, 翟争光, 杨中侠, 2022. 田间复壮对蚜蟥当代及其子代生物学特性的影响. 中国生物防治学报, 38(6): 1619 – 1624]

Lai RQ, Bai JJ, Gu G, Zhou T, Mi YE, Zhang B, Han M, 2021. Juvenoids on aphids to prolong optimal stages. *Entomol. Res.*, 51(3): 133 – 142.

Lai RQ, You MS, Lotz LAPB, Vasseur L, 2011. Response of green peach aphids and other arthropods to garlic intercropped with tobacco. *Agron. J.*, 103(3): 856 – 863.

Lai RQ, You MS, Zhu CZ, Gu G, Lin ZL, Liao LL, Lin LT, Zhong XJ, 2017. *Myzus persicae* and aphid-transmitted viral disease control via variety intercropping in flue-cured tobacco. *Crop Prot.*, 100: 157 – 162.

Li H, 2011. Studies on Rejuvenescence of *Chouioia cunea* Yang. MSc Thesis, Shandong Agricultural University, Tai'an. [李会, 2011. 白蛾周氏啮小蜂复壮技术研究. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文]

Li XY, Cheng JL, Zhang JT, Fu Q, Ru BL, Chen YH, An DR, 2017. Population dynamics of *Myzus persicae* (Sulzer) in Hanzhong tobacco planting areas and control effects of *Aphidius gifuensis* Ashmead. *Tob. Sci. Technol.*, 50(5): 19 – 23. [李晓宇, 成巨龙, 张家韬, 付强, 汝冰璐, 陈雅寒, 安德荣, 2017. 汉中烟区烟蚜发生动态及烟蚜茧蜂防控效果分析. 烟草科技, 50(5): 19 – 23]

Liu JX, 2019. Effects of Cobalt on Growth and Development of Honeybee Larvae and Physiological Function of Workers (*Apis mellifera* L.). MSc Thesis, Shandong Agricultural University, Tai'an. [刘家昕, 2019. 钴对意大利蜜蜂幼虫生长发育和成年工蜂生理机能的影响. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文]

Liu LP, Xi GS, Wang F, Liu XM, 2013. Research progress of phenoloxidase in insects. *Chin. Bull. Life Sci.*, 25(4): 383 – 387. [刘丽萍, 奚耕思, 王芳, 刘晓明, 2013. 昆虫酚氧化酶的研究进展. 生命科学, 25(4): 383 – 387]

Liu SZ, 2008. Characteristics of Immune Function and the Response against the against the Insecticides and Other External Interference Factors of Insect Phenoloxidase. PhD Dissertation, Shandong Agricultural University, Tai'an. [刘守柱, 2008. 昆虫酚氧化酶免疫学功能及其对杀虫剂等外来干扰因子的响应. 泰安: 山东农业大学博士学位论文]

Ma FH, Zhou T, Lai RQ, Gu G, Han M, 2023. Effects of tobacco varieties, seedling raising methods and sources of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on the parasitic ability of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomol. Sin.*, 66(1): 85 – 91. [马富华, 周挺, 赖荣泉, 顾钢, 韩梦, 2023. 烟草品种、育苗方式和烟蚜来源对烟蚜茧蜂寄生能力的影响. 昆虫学报, 66(1): 85 – 91]

Pan MZ, Zhang Y, Cao HH, Wang XX, Liu TX, 2022. Research progresses, application, and prospects in aphid biological control on main crops in China. *J. Plant Prot.*, 49(1): 146 – 172. [潘明真, 张毅, 曹贺贺, 王杏杏, 刘同先, 2022. 我国主要农作物蚜虫生物防治的研究进展、应用与展望. 植物保护学报, 49(1): 146 – 172]

Ren NN, Xie M, You YC, You MS, 2014. An overview on the study of insect carboxylesterases (COEs) and the COE-mediated resistance to insecticides. *J. Fujian Agric. For. Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 43(4): 337 – 344. [任娜娜, 谢苗, 尤燕春, 尤民生, 2014. 羧酸酯酶及其介导昆虫抗药性的研究进展. 福建农林大学学报(自然科学版), 43(4): 337 – 344]

van Asperen K, 1962. A study of housefly esterases by means of a sensitive colorimetric method. *J. Insect Physiol.*, 8(4): 401 – 416.

Wang QN, Lai RQ, Gu G, Wu XT, Bai JJ, Mi YE, Shu J, Gao GG, 2021. Generational parasitism of *Aphidius gifuensis* on *Myzus persicae*. *Chin. J. Biol. Control*, 37(5): 963 – 969. [王巧妮, 赖荣泉, 顾钢, 吴晓婷, 白晶晶, 米月娥, 舒静, 高改改, 2021. 福建烟区不同世代烟蚜茧蜂对烟蚜的寄生效应. 中国生物防治学报, 37(5): 963 – 969]

Wang QZ, 2011. Effects and influences of trace elements on animals. *Chin. Livestock Poult. Breed.*, 7(9): 31 – 32. [王旗招, 2011. 微量元素对动物的作用与影响. 中国畜禽种业, 7(9): 31 – 32]

Wu KK, Gu G, Lai RQ, Zhou T, Han M, 2022. Effects of photoperiod, temperature and humidity on the parasitic ability and reproduction of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomol. Sin.*, 65(11): 1488 – 1497. [吴珂珂, 顾钢, 赖荣泉, 周挺, 韩梦, 2022. 光周期和温湿度对烟蚜茧蜂寄生能力和繁殖的影响. 昆虫学报, 65(11): 1488 – 1497]

Xia ZY, 2019. Effects of Manganese on Growth and Development of Honeybee Larvae (*Apis mellifera* L.) and Physiological Function of Adult Worker Honeybee. MSc Thesis, Shandong Agricultural University, Tai'an. [夏振宇, 2019. 锰对意大利蜜蜂幼虫生长发育和成年工蜂生理机能的影响. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文]

Xia ZY, Zhang WX, Wang HF, Liu ZG, Wang Y, Xu BH, 2019. Effects of manganese on growth, development and antioxidant capacity of Italian bee larvae. *Apic. China*, 70(10): 66 – 70. [夏振宇, 张卫星, 王红芳, 刘振国, 王颖, 胥保华, 2019. 锰对意大利蜜蜂幼虫生长发育和抗氧化能力的影响. 中国蜂业, 70(10): 66 – 70]

Xie YQ, Zhang HZ, Li YY, Kong L, Xiang M, Yang HL, Zhang LM, Ai HM, Zhang LS, 2020. Population degradation rule of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Chin. J. Biol. Control*, 36(2): 163 – 168. [谢应强, 张洪志, 李玉艳, 孔琳, 向梅, 杨红利, 张立猛, 艾洪木, 张礼生, 2020. 烟蚜茧蜂的种群退化规律. 中国生物防治学报, 36(2): 163 – 168]

Xie YQ, Zhang HZ, Xiang M, Zhang LM, Wang DL, Li YY, Ai HM, Zhang LS, 2021. Population rejuvenation technique for *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Chin. J. Biol. Control*, 37(2): 201 – 208. [谢应强, 张洪志, 向梅, 张立猛, 王德玲, 李玉艳, 艾洪木, 张礼生, 2021. 烟蚜茧蜂的种群复壮技术. 中国生物防治学报, 37(2): 201 – 208]

Yang J, Zou GJ, Yang Y, Pan HP, Long QR, 2017. Biological prevention and control effects of *Aphidius gifuensis* on *Myzus persicae* and aphid-transmitted virus. *Guizhou Agric. Sci.*, 45(7): 47 – 50. [杨静, 邹光进, 杨颜, 潘和平, 龙秋蓉, 2017. 烟蚜茧蜂对烟蚜与蚜传病毒病的生物防控效果. 贵州农业科学, 45(7): 47 – 50]

Zhang JH, Wang W, Lin SH, Liu W, Su DL, Li GY, 2017. Effect of cloves, *Schisandra chinensis* and chitosan compound preservative on storage quality and disease-resistant enzyme activity of blueberries. *J. Chin. Inst. Food Sci. Technol.*, 17(12): 139 – 148. [张菊华, 王伟, 林树花, 刘伟, 苏东林, 李高阳, 2017. 丁香、五味子及壳聚糖复合保鲜剂对蓝莓贮藏品质及抗病酶活的影响. 中国食品学报, 17(12): 139 – 148]