

综述

杨晨, 顾钢, 周挺, 等. 昆虫内生细菌对蚜虫及寄生蜂功能的影响研究进展[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(4). YANG Chen, GU Gang, ZHOU Ting, et al. Research progress on the impact of endophytic bacteria in insects on the function of aphids and parasitoids[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(4). doi:10.16472/j.chinatobacco.2023.T0001

昆虫内生细菌对蚜虫及寄生蜂功能的影响研究进展

杨晨¹, 顾钢², 周挺², 赖宇飞³, 赖荣泉^{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, 福建省福州市仓山区福建农林大学上下店路14号 350002;

2 中国烟草总公司福建省公司, 福建省福州市北环中路133号 350003;

3 山东农业大学植物保护学院, 山东省泰安市岱宗大街61号 271018

摘要: 内生细菌与其寄主昆虫在长期的进化过程中, 形成了互利共生关系。内生细菌可为寄主昆虫提供生长发育所需的营养、合成生物活性物质、提高寄主昆虫的免疫力等。利用内生细菌改变昆虫生态适应性与抗逆性已经成为一个热门研究方向, 并展现了良好的应用前景。本文综述了昆虫内生细菌对蚜虫及寄生蜂功能影响的研究进展, 以期能为昆虫内生细菌对蚜虫及寄生蜂的功能研究提供参考。

关键词: 蚜虫; 寄生蜂; 昆虫内生细菌; 互作; 害虫防治

内生菌可以分为动物内生菌和植物内生菌。植物内生菌在植物组织内部生存, 植物不会因为与植物内生菌共生而产生明显病害症状; 动物内生菌在动物组织表面及内部生存, 如昆虫内生菌、动物源放线菌等^[1]。昆虫的肠道、马氏管等组织部位均有内生菌存活^[2-3]。内生菌种类与生存的组织部位和携带内生菌的昆虫种类有关, 昆虫生活的环境条件影响着昆虫体内内生菌的分布^[4]。内生菌在与宿主长期生活中形成了互利共生关系^[5]。内生菌对昆虫的生长、繁殖、扩散、物种进化等有着重要意义^[6-7]。如烟粉虱在感染立克次氏体 *Rickettsia* 后, 出现产卵量增加、后代成活率提高等现象^[8-9]。沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 会改变寄生蜂的生殖行为, 诱导寄生蜂产雌孤雌生殖, *Wolbachia* 能提高寄生蜂的繁殖力和生育力^[10-11]。蚜虫内生菌包括初级共生体, 例如布赫纳氏菌 *Buchnera*, 以及次级共生菌, 包括立克次氏体属 *Rickettsia* spp., *Regiella insecticola*, *Rickettsiella viridis*, 沃尔巴克氏体属 *Wolbachia* spp., *Hamiltonella*, 杀雄菌 *Arsenophonus*, 不动杆菌 *Acinetobacter*, 微球菌 *Micrococcus*, 沙雷氏

菌 *Serratia*, *Fukatsuia symbiotica*, *Spiroplasma* 和假单胞菌 *Pseudomonadaceae*^[12-13]。内生菌可分为原生内生菌和次生内生菌。内生菌通过宿主的卵进行垂直传播或个体间进行水平传播^[14]。原生内生菌与宿主关联密切, 通过卵垂直传播, 负责供给必需的营养物质。没有原生内生菌, 宿主昆虫将无法正常工作^[15-16]。次生内生菌不都是宿主昆虫必需的, 部分次生内生菌通过卵进行垂直传播, 也有部分次生内生菌通过个体间进行水平传播^[17-18]。次生内生菌的种类和功能繁多^[19]。目前, 已知的一些内生菌的功能包括改变昆虫对天敌的防御能力、提高昆虫对病原物侵染的抵抗能力、为昆虫提供能量、协助昆虫传播病原体、提高昆虫对环境的适应能力和调控昆虫的生殖行为等。

近年来, 烟草行业在全国烟区大面积推广烟蚜茧蜂防治烟蚜技术。2018年起实现烟蚜茧蜂防治蚜虫全国植烟面积全覆盖, 在其他作物上的推广面积也已超过在烟草上的推广面积。目前已经累计推广1400万公顷^[20]。利用烟蚜茧蜂防治烟蚜, 对解决烟草农药残留问题、保护环境和保障农产品安全具有重要意义。2019

基金项目: 中国烟草总公司福建省公司项目 (2021350000240017, 2022350000240069)

作者简介: 杨晨 (1998—), 硕士, 研究方向为昆虫生态及烟草害虫生态控制, Tel: 15087494342, Email: 417358944@qq.com

通讯作者: 赖荣泉 (1975—), 博士, 副教授/烟草行业高级农艺师, 硕士生导师, 研究方向为昆虫生态与烟草植保技术研究, Tel: 18305914718, Email: lrq305@fafu.edu.cn

收稿日期: 2023-01-02; 网络出版日期: 2024-01-10

年, 该技术被联合国粮农组织作为害虫生物防治的主推技术和典型成功案例向全球推介。然而, 烟蚜茧蜂在自然界中种群数量少, 烟区需要通过人工繁殖和释放烟蚜茧蜂来增强其对烟蚜的防控^[21]。为了解昆虫内生细菌对烟蚜和烟蚜茧蜂的生长发育、生殖等的影响。本文综述了内寄生细菌对蚜虫和寄生蜂功能影响的研究进展, 以期对相关研究以及更好地利用寄生蜂防治蚜虫提供参考。

1 内生细菌对蚜虫的影响

内生细菌几乎存在于所有蚜虫体内, 蚜虫和内生细菌之间形成了紧密的互利共生关系^[22]。蚜虫的内生细菌包括一种垂直传播的专性共生细菌(初生共生细菌)布赫纳氏菌(*Buchnera aphidicola*)和一种或多种兼性共生细菌(次生共生细菌)。

1.1 内生细菌对蚜虫生长发育、适应能力的影响

B. aphidicola 通过卵由亲代垂直传播到子代。*B. aphidicola* 不能在蚜虫体外单独存活; 蚜虫需要 *B. aphidicola* 提供多种氨基酸和维生素, 维持正常的生长发育, 二者都离不开对方^[23-24], 蚜虫无法从食物中直接得到这些氨基酸和维生素。*Rickettsia* 可显著缩短麦长管蚜若虫的总发育历期^[25]。*Secondary symbionts* 能改善豌豆蚜耐高温能力^[26]。*Hamiltonella defensa* 导致蚜虫的攻击性和逃逸反应降低^[27]。麦长管蚜感染了 *R. insecticola* 后, 产生有翅蚜的比率下降^[28]。麦长管蚜感染 *R. insecticola* 会导致其若蚜发育历期延长, 使其存活率降低; 降低麦长管蚜抵抗高温的能力^[29]。

1.2 内生细菌对蚜虫产仔量或繁殖的影响

宿主的生殖行为受 *Rickettsia* 影响, 宿主昆虫的孤雌生殖、杀雄等行为受到了 *Rickettsia* 的诱导^[30-31]。如感染 *Rickettsia* 导致麦长管蚜成蚜繁殖力提高^[25]。严硕等^[32]研究发现, 经过利福平处理后的烟蚜 *B. aphidicola* 的 *DNAK* 基因表达量显著降低, 而且后代数显著下降。次生共生细菌 *Serratia symbiotica* 能够提高烟蚜的日繁殖率, 即有利于烟蚜的生殖; 但 *S. symbiotica* 会导致烟蚜若虫发育缓慢, 不利于烟蚜的生长发育^[33]。麦长管蚜在感染了 *R. insecticola* 后, 其在中、低等密度饲养的种群和较适温度下饲养的种群净增殖率和内禀增长率都比自然不感染品系和脱共生品系低, 但在 31℃ 高温下饲养的种群和高密度下饲养的种群, 感染和去除 *R. insecticola* 品系的净增殖率和内禀增长率不再有显著差异, 并且在有些基因型蚜虫中还显著高于去除品系^[29]。在 25℃ 单独培养的麦长管蚜, 在其被 *R. insecticola* 感染后, 麦长管蚜的产仔量降低; *R.*

insecticola 导致麦长管蚜发育减缓, 寿命降低, 产蚜量减少^[29]。

1.3 内生细菌对蚜虫个体、体重、寿命等的影响

Rickettsia 使麦长管蚜成蚜体重增加^[25]。随着温度升高, 感染了 *R. insecticola* 的麦长管蚜平均寿命缩短^[28]。蚜虫用白三叶草饲养后体重有所下降, 通过给蚜虫注射相应的共生菌后, 其体重增长^[34]。豌豆蚜脱共生菌后若蚜发育历期延长、成蚜寿命缩短、若蚜存活率下降、体重减小^[35]。

1.4 内生细菌对蚜虫抵御天敌的影响

内生菌可提高蚜虫对天敌的抵抗能力。蚜虫的专性虫生真菌—新蚜虫痂霉 *Pandora neoaphidis*, 其利用孢子发芽产生的菌丝寄生于蚜虫的表皮, 而后侵入蚜虫外壳杀死蚜虫。JULIA 等^[36]发现, 不同豌豆蚜种群在感染 *R. insecticola* 后, 对 *P. neoaphidis* 的抗性不同, 在测定了豌豆蚜对 2 种寄生蜂和 *P. neoaphidis* 的抵抗能力后, 发现它们对 3 种天敌的抗性都有显著改变。CLAIRE 等^[37]通过对不带有 *R. insecticola* 的蚜虫显微注射了带有 *R. insecticola* 蚜虫体液, 发现注射后的蚜虫对 *P. neoaphidis* 抗性显著增加。*R. insecticola* 帮助桃蚜抵御 *Aphidius colemani* 的寄生^[38]。带有 *R. insecticola* 的麦长管蚜体内的寄生蜂 *Aphelinus asychis* 生长发育会受到 *R. insecticola* 的负面影响^[39]。

黑豆蚜对寄生蜂 *Lysiphlebus fabarum* 的抗性随着共生菌 *H. defensa* 数量的增加而增强, 寄生蜂寄生含有共生菌的蚜虫会导致其出蜂率降低, 发育迟缓, 体型变小^[40]。*H. defensa* 可帮助禾谷缢管蚜对抗寄生蜂 *A. colemani* 的寄生^[41]。JULIA 等^[42]发现含有 *H. defensa* 的豌豆蚜对寄生蜂 *Aphidius eadyi* 和 *Aphidius ervi* 有显著的抗性, 携带 *R. insecticola* 的豌豆蚜对病原体 *P. neoaphidis* 有显著抗性。

2 内生细菌对寄生蜂的影响

2.1 内生细菌对寄生蜂生殖、寄生力、性比的影响

昆虫生长发育、繁殖等方面与共生菌有着密切的联系^[43]。寄生蜂体内存在着大量的共生微生物, 如 *Wolbachia*、*Buchnera*、*Cardinium*、*Spiroplasma*、*Rickettsia*、*Blochmannia*、*Wigglesworthia* 等^[44-45]。*Wolbachia* 属于变形菌门 Proteobacteri, 革兰氏阴性菌^[46]。*Wolbachia* 在昆虫中分布最广, 能改变寄生蜂的生殖行为, 如诱导其产雌孤雌生殖, 导致宿主后代性比发生改变。*Wolbachia* 可提高宿主的繁殖能力, 使宿主寄生蜂更容易在新的环境中建立种群, 有利于种群分化^[12-13]。赤眼蜂的产雌孤雌生殖行为与 *Wolbachia* 有着紧密联

系^[47]。卷蛾赤眼蜂随着世代的增加,产雌孤雌生殖行为也逐渐增加,这与 *Wolbachia* 具有一定的相关性^[48]。瘿蜂产雌孤雌生殖是由 *Wolbachia* 引起的^[49]。赤眼蜂的扩散能力和寄生能力在感染 *Wolbachia* 后得到了提高^[50]。丽蝇蛹集金小蜂的出蜂量和子代性比在感染了 *Wolbachia* 后显著提高^[51]。*Rickettsia* 属于变形菌纲 Proteobacteria, 革兰氏阴性菌。HAGIMORI 等^[31]首次报道了荚新姬小蜂的孤雌生殖与感染了 *Rickettsia* 有关。GIORGINI 等^[30]研究发现含有 *Rickettsia* 的寄生蜂 *Pnigalio soemius* 的后代全为雌性,在使用利福平处理后, *P. soemius* 后代几乎全部为雄性。*S. symbiont* 会导致寄生蜂 *A. ervi* 幼虫的死亡,使其寄生率下降^[52]。携带 *H. defensa* 的蚜虫会影响寄主植物释放挥发物,破坏寄主植物吸引寄生蜂的能力,拖延寄生蜂的产卵时间^[53]。

2.2 内生细菌对寄生蜂寿命的影响

一些内生菌能协助宿主寄生蜂增加寄生能力、出蜂量,同时宿主也为感染内生菌付出代价,缩短了寄生蜂的寿命。感染 *Wolbachia* 会导致赤眼蜂的寿命缩短,如拟澳洲赤眼蜂感染后,雌蜂寿命缩短,感染当代处女蜂寿命比未感染 *Wolbachia* 的雌蜂缩短 3.26 d, F1~F4 代雌蜂寿命分别比未感染 *Wolbachia* 的雌蜂缩短 3.26 d、2.09 d、1.99 d、0.91 d,呈现出逐代增加的趋势^[54]。去除 *Wolbachia* 对丽蝇蛹集金小蜂成蜂、丽蚜小蜂雌成蜂寿命无显著影响^[51,55]。

3 小结与展望

内生细菌与昆虫在长期的进化过程中形成了密切的共生关系,对于昆虫生长、发育以及进化非常重要。昆虫在取食植物的过程中,内生菌起到了重要作用;同时植物内生菌和害虫天敌及其内生菌帮助植物抵御害虫,在植物对抗害虫为害中起重要作用。昆虫肠道微生物有着复杂多样的种群结构和功能,帮助昆虫适应不同的环境^[56]。开发和利用内生菌特定的生物学功能较为重要^[57]。通过内生细菌诱导宿主改变生殖行为,使其进行孤雌生殖^[48],对提高寄生蜂生防效能、加快工厂化生产十分重要:即提高种群增殖率、增加种群数量;使个体在进入新生活环境中更容易建立种群;加快规模化培养的速度^[47]。*Wolbachia* 诱导寄生蜂进行产雌孤雌生殖,使子代全为雌性,在工厂化生产中提高了子代雌性比,降低了养殖过程中养殖雄性寄生蜂的成本;工厂化生产中 *Wolbachia* 可以使寄生蜂更容易找到寄主,提高产卵强度,但也应考虑子代雌性比与繁蜂效率间的关系,适当降低产卵强度,减少过寄生行为的发生。可利用内生细菌对寄主的影响,来控制烟蚜的生长、发育繁殖以及提高烟蚜茧蜂的繁殖效

率和寄生率等。

内生细菌与蚜虫、寄生蜂个体之间相互作用的研究表明:内生细菌与其宿主之间具有互利共生关系,是蚜虫、寄生蜂体内必不可少的微生物群落,在宿主蚜虫、寄生蜂的生长发育、繁殖、寿命、抗逆性等诸多方面发挥着重要作用。这些内生细菌与宿主互利共生,建立了双赢的关系,对于宿主蚜虫、寄生蜂维持体内平衡和促进宿主集体健康具有重要意义。通过寻找内生细菌与蚜虫、寄生蜂间共生关系的内涵,进一步明确共生细菌对蚜虫、寄生蜂的作用机制,将会不断优化和完善寄生蜂的人工饲养技术。

寄生蜂对于蚜虫有着明显的控制作用,有关寄生蜂和蚜虫感染的内生细菌种类及其作用的研究已取得一些进展,但仍然有许多科学问题亟待进一步研究。第一,探究自然条件下寄生蜂、蚜虫与内生细菌互作的影响。第二,解析内生细菌调控寄生蜂寄生蚜虫的行为及分子机制。第三,探索通过抑制蚜虫体内有益内生细菌从而减弱蚜虫对天敌的抵抗能力的方法。对寄生蜂和蚜虫感染的内生细菌种类及其作用进行研究,有助于进一步明确内生细菌对于宿主的重要作用,为深入研究内生细菌在蚜虫和寄生蜂间的互作关系以及解析内生细菌调控寄生蜂寻找寄主的行为及分子机制提供一定参考。

参考文献

- [1] 汪福源,顾觉奋,高向东,等. 动物内生真菌研究进展[J]. 国外医药(抗生素分册), 2017, 38(2): 58-61.
WANG Fuyuan, GU Juefen, GAO Xiangdong, et al. Research Progress of Animal Endophytic Fungi[J]. World Notes on Antibiotics. 2017, 38(2): 58-61.
- [2] 薛宝燕,程新胜,陈树仁,等. 昆虫共生菌研究进展[J]. 中国微生物学杂志, 2004, 16(3): 189-191.
XUE Baoyan, CHENG Xinsheng, CHEN Shuren, et al. Research progress of insect symbiotic bacteria[J]. Chinese Journal of Microecology, 2004, 16(3): 189-191.
- [3] 郭军,吴杰,邓先余,等. 昆虫肠道菌群的功能研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2015, 52(6): 1345-1352.
GUO Jun, WU Jie, DENG Xianyu, et al. Advances in research on insect gut microbiota and their functions[J]. Acta Entomologica Sinica, 2015, 52(6): 1345-1352.
- [4] 谭周进,肖启明,谢丙炎,等. 昆虫内共生菌研究概况[J]. 微生物学通报, 2005, 32(4): 140-143.
TAN Zhoujin, XIAO Qiming, XIE Bingyan, et al. A Review on Endosymbionts in Insects[J]. Bulletin of Microbiology, 2005, 32(4): 140-143.
- [5] Angela E, DOUGLAS. Multiorganismal insects: Diversity and function of resident microorganisms[J]. Annual Review of Entomology, 2015(60): 17-34.
- [6] 胡紫媛,夏婧. 昆虫肠道菌群组学研究及功能和应用进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(1): 102-112.
HU Ziyuan, XIA Qiang. Advances in the Histology Study, Function and Application of Insect Intestinal Flora[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(1): 102-112.
- [7] Engel P, Moran NA. The gut microbiota of insects-diversity in

- structure and function[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2013, 37(5): 699-735.
- [8] BRUMIN M, KONTSEDALOV S, GHANIM M. Rickettsia influences thermotolerance in the whitefly *Bemisia tabaci* B biotype[J]. Insect Science, 2011, 18(1): 57-66.
- [9] HIMLERAG, ADACHI HAGIMORI T, BERGEN JE, et al. Rapid spread of a bacterial symbiont in an invasive whitefly is driven by fitness benefits and female bias[J]. Science, 2011, 332(6026): 254-256.
- [10] AESCHLIMANN JP. Simultaneous occurrence of thelytoky and bisexuality in hymenopteran species, and its implications for the biological control of pests[J]. Entomophaga, 1990, 35(1): 3-5.
- [11] STOUTHAMER R. The use of sexual versus asexual wasps in biological control[J]. Entomophaga, 1993, 38(1): 3-6.
- [12] XU Weili, LIU Weijiao, LI Jinming, et al. Buchnera breaks the specialization of the cotton-specialized aphid (*Aphis gossypii*) by providing nutrition through zucchini[J]. Frontiers in nutrition, 2023, 10:1128272-1128272.
- [13] XU Tingting, CHEN Jing, JIANG Liyun, et al. Diversity of bacteria associated with Hormaphidinae aphids (Hemiptera: Aphididae)[J]. Insect science, 2019, 28(1):165-179.
- [14] 张焱, 张毅波, 张婧, 等. 刺吸式昆虫次生内共生菌的研究进展[J]. 生物安全学报, 2016, 25(2): 92-98.
- ZHANG Yan, ZHANG Yibo, ZHANG Jing, et al. Advances of the secondary endosymbionts in sap-feeding insects[J]. Journal of Biosafety, 2016, 25(2): 92-98.
- [15] MORAN NA, MCCUTCHEON JP, ATSUSHI N. Genomics and evolution of heritable bacterial symbionts[J]. Annual Review of Genetics, 2008(42): 165-190.
- [16] RYUICHI Koga, MENG Xianying, TSUTOMU Tsuchida, et al. Cellular mechanism for selective vertical transmission of an obligate insect symbiont at the bacteriocyte-embryo interface[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(20): E1230-1237.
- [17] Brumin MARINA, Levy MAGGIE, Ghanim MURAD. Transovarial transmission of Rickettsia spp. and organ-specific infection of the whitefly *Bemisia tabaci*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(16): 5565-5574.
- [18] AYELET CF, MOSHE I, NETTA MD, et al. Horizontal transmission of the insect symbiont Rickettsia is plant-mediated[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2012, 279(1734): 1791-1796.
- [19] 杨义婷, 郭建洋, 龙楚云, 等. 昆虫内共生菌及其功能研究进展[J]. 昆虫学报, 2014, 57(1): 111-122.
- YANG Yiting, GUO Jianyang, LONG Chuyun, et al. Advances in endosymbionts and their functions in insects[J]. Acta Entomologica Sinica, 2014, 57(1): 111-122.
- [20] 李苏榕, 蔺忠龙, 张立猛. “以虫治虫”为大农业附着绿色底色[N]. 云南日报, 2022-08-15(8).
- LI Surong, LIN Zhonglong, ZHANG Limeng. “Fighting bugs with bugs” has added to green large agriculture[N]. Yunnan Daily, 2022-08-15(8).
- [21] 白晶晶, 顾钢, 赖荣泉, 等. 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[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(2): 131-137.
- BAI Jingjing, GU Gang, LAI Rongquan, et al. Effects of temperature and juvenile hormone analogs on the emergence time and rate of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphididae)[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2022, 28(2): 131-137.
- [22] 李迁, 范佳, 孙京瑞, 等. 昆虫内共生菌-昆虫-植物互作关系研究进展[J]. 植物保护学报, 2016, 43(6): 881-891.
- LI Qian, FAN Jia, SUN Jingrui, et al. Research progress in the interactions among the plants, insects and endosymbionts[J]. Journal of Plant Protection, 2016, 43(6): 881-891.
- [23] BAUMANN P. Biology of bacteriocyte-associated endosymbionts of plant sap-sucking insects[J]. Annu Rev Microbiol, 2005(59): 155-189.
- [24] WILSON ACC, ASHTON PD, CALEVRO F, et al. Genomic insight into the amino acid relations of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*, with its symbiotic bacterium *Buchnera aphidicola*[J]. Insect Mol Biol, 2010, 19(2): 249-258.
- [25] 张荣芳. 次级共生菌的检测及三种共生菌对麦长管蚜温度适应性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- ZHANG Rongfang. Detection of secondary symbiotic bacteria and effects of three secondary endosymbionts on adaptation of *sitobion avenae* under different temperatures[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2019.
- [26] Montllor CB, axmen A, Purcell AH. Facultative bacterial endosymbionts benefit pea aphids *Acyrtosiphon pisum* under heat stress[J]. Ecol. Entomol, 2002, 27(2): 189-195.
- [27] Dion E, Polin SE, Simon JC, et al. Symbiont infection affects aphid defensive behaviours[J]. Biol Lett, 2011, 7(5): 743-746.
- [28] 雷海霞. 次级共生菌 *Regiella insecticola* 和温度对麦长管蚜生物学特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- LEI Haixia. Effects of secondary symbiotic bacteria *Regiella insecticola* and temperature on the biological traits of *sitobion avenae*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [29] 马婷婷. 次级共生菌 *Regiella insecticola* 对麦长管蚜生物学特征的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- MA Tingting. Effects of facultative endosymbionts *Regiella insecticola* on biological traits of the grain aphid *sitobion avenae*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [30] Giorgini M, Bernardo U, Monti MM, et al. Rickettsia symbionts cause parthenogenetic reproduction in the parasitoid wasp *Pnigalio soemius* (Hymenoptera: Eulophidae)[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(8): 2589-2599.
- [31] Hagimori TETSUYA, Abe YOSHIHISA, Date SHUICHI, et al. The first finding of a *Rickettsia bacterium* associated with parthenogenesis induction among insects[J]. Current Microbiology, 2006, 52(2): 97-101.
- [32] 严硕, 张战泓, 刘勇, 等. 内共生菌 *Buchnera* 对桃蚜生长发育的影响[J]. 中国蔬菜, 2017(5): 13-16.
- YAN Shuo, ZHANG Zhanhong, LIU Yong, et al. Effects of *Buchnera* on *Myzus persicae* growth and development[J]. China Vegetables, 2017(5): 13-16.
- [33] 刘艳红. 共生菌在提高桃蚜利用寄主植物氮营养及防御能力中的作用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LIU Yanhong. Role of symbionts in using nitrogen nutrition of host plants and defending against stresses: A case study for *Myzus Persicae*[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2019.
- [34] 郝娜, 郭建青. 内共生菌介导的蚜虫适应性研究进展[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(4): 7-8+15.
- HAO Gang, GUO Jianqing. Research progress of aphid adaptation mediated by endosymbionts[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(4): 7-8+15.
- [35] 杨巧燕. 豌豆蚜体内共生菌对蚜虫与寄主互作关系的影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- YANG Qiaoyan. Research on the effects of the intracellular bacterial symbionts in *Acyrtosiphon pisum* Harris on the interaction between aphids and host plants[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [36] FERRARI J, Müller C, Kraaijeveld A, et al. Clonal variation and covariation in aphid resistance to parasitoids and a pathogen[J]. Evolution, 2001, 55(9): 1805-1814.
- [37] SCARBOROUGH CL, FERRARI J, GODFRAY HCJ. Aphid protected from pathogen by endosymbiont[J]. Science, 2005, 310(5755): 1781-1781.
- [38] VORBURGER C, GEHRER L, RODRIGUEZ P. A strain of the bacterial symbiont *Regiella insecticola* protects aphids against parasitoids[J]. Biol. Lett., 2010, 6(1): 109-111.

- [39] LUO Chen, MONTICELLI Lucie, MENG Linqin, et al. Effect of the endosymbiont *Regiella insecticola* on an aphid parasitoid[J]. *Entomologia Generalis*, 2017, 36(4): 300-307.
- [40] SCHMID M, SIEBER R, ZIMMERMANN YS, et al. Development, specificity and sublethal effects of symbiont-conferred resistance to parasitoids in aphids[J]. *Funct. Ecol.*, 2012, 26(1): 207-215.
- [41] LEYBOURNE DJ, BOS JIB, VALENTINE TA, et al. The price of protection: A defensive endosymbiont impairs nymph growth in the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi*[J]. *Insect Sci.*, 2020, 27(1): 69-85.
- [42] FERRARI J, DARBY AC, DANIELL TJ, et al. Linking the bacterial community in pea aphids with host-plant use and natural enemy resistance[J]. *Ecological Entomology*, 2010, 29(1):60-65.
- [43] 魏舸, 白亮, 曲爽, 等. 昆虫共生微生物在病虫害和疾病控制上的应用前景[J]. *微生物学报*, 2018, 58(6): 1090-1102.
- WEI Ge, BAI Liang, QU Shuang, et al. Insect microbiome and their potential application in the insect pest and vector-borne disease control[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2018, 58(6): 1090-1102.
- [44] SHIGENOBU S, WATANABE H, HATTORI M, et al. Genome sequence of the endocellular bacterial symbiont of aphids *Buchnera sp.* APS[J]. *Nature*, 2000, 407(6800): 81-86.
- [45] AKMAN L, YAMASHITA A, WATANABE, et al. Genome sequence of the endocellular obligate symbiont of tsetse flies, *Wigglesworthia glossinidia*[J]. *Nat Genet*, 2003, 32(3): 402-407.
- [46] WEINBAUER MG, FEREIDOUN R. Are viruses driving microbial diversification and diversity?[J]. *Environmental Microbiology*, 2004, 6(1): 1-11.
- [47] 刘淑平, 徐红星, 郑许松, 等. 寄生蜂体内共生菌 *Wolbachia* 研究进展[J]. *环境昆虫学报*, 2011, 33(1): 107-116.
- LIU Shuping, XU Hongxing, ZHENG Xusong, et al. The research progress in *Wolbachia* bacteria in the parasitic wasps[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33(1): 107-116.
- [48] 项宇, 沈佐锐, 王伟晶, 等. 卷蛾赤眼蜂体内共生菌 *Wolbachia* 对寄主产雌孤雌生殖行为的影响[J]. *昆虫知识*, 2006(2): 219-222.
- XIANG Yu, SHEN Zuorui, WANG Weijing, et al. Effect of wasp symbionts *Wolbachia* on the thelytokous parthenogenesis of *Trichogramma cacoeciae*[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2006(2): 219-222.
- [49] YOSHIHISA ABE, MIURA K. Does *Wolbachia* Induce Unisexuality in Oak Gall Wasps? (Hymenoptera: Cynipidae)[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2002, 95(5): 583-586.
- [50] SILVA IMMS, VAN MEER MMM, ROSKAM MM, et al. Biological control potential of *Wolbachia*-infected versus uninfected wasps: Laboratory and Greenhouse Evaluation of *Trichogramma cordubensis* and *T. deion* strains[J]. *Biocontrol Science and Technology*. 2000, 10(3): 223-238.
- [51] 李培光, 邱仕祺, 叶保华, 等. 去除 *Wolbachia* 对丽蝇蛹集金小蜂繁殖适合度和成蜂寿命的影响[J]. *昆虫学报*, 2015, 58(9): 966-972.
- LI Peiguang, QIU Shiqi, YE Baohua, et al. Influence of removing *Wolbachia* on the reproductive fitness and adult longevity of *Nasonia vitripennis* (Hymenoptera: Pteromalidae)[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58(9): 966-972.
- [52] OLIVER KM, RUSSELL JA, MORAN NA, et al. Facultative bacterial symbionts in aphids confer resistance to parasitic wasps[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2003, 100(4): 1803-1807.
- [53] FRAGO E, MALA M, WELDEGERGIS BT, et al. Symbionts protect aphids from parasitic wasps by attenuating herbivore-induced plant volatiles[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1):1860.
- [54] 潘雪红, 何余容, 陈科伟, 等. *Wolbachia* 感染对拟澳洲赤眼蜂寿命、生殖力和嗅觉反应的影响[J]. *昆虫学报*, 2007(3): 207-214.
- PAN Xuehong, HE Yurong, CHEN Kewei, et al. Effect of *Wolbachia* infection on longevity, fecundity and olfactory response of *Trichogramma confusum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2007(3): 207-214.
- [55] 周淑香, 李玉, 张帆. *Wolbachia* 共生对丽蚜小蜂生殖和适应性的影响[J]. *植物保护学报*, 2009, 36(1): 7-10.
- ZHOU Shuxiang, LI Yu, ZHANG Fan. Influence of *Wolbachia* on reproduction and the fitness of the parasitoid wasp *Encarsia formosa*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2009, 36(1): 7-10.
- [56] WEI FW. New angle to study the adaptive evolution: animal gut microbiome[J]. *Scientia Sinica: Vitae*, 2016, 46(11): 1338-1340.
- [57] 侯敏, 张晨曦, 詹发强, 等. 不同饲喂下棉铃虫肠道内生菌的分离鉴定及脱毒效果研究[J]. *微生物学报*, 2022, 62(1): 305-320.
- HOU Min, ZHANG Chenxi, ZHAN Faqiang, et al. Isolation, identification and detoxification of intestinal endophytes of *Helicoverpa armigera* under different feeding[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(1): 305-320.

Research progress on the impact of endophytic bacteria in insects on the function of aphids and parasitoids

YANG Chen¹, GU Gang², ZHOU Ting², LAI Yufei³, LAI Rongquan^{1*}

¹ Biological Control Research Institute/State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, 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: Endophytic bacteria and their host insects have formed a mutually symbiotic relationship over a long-term evolutionary process. Endophytic bacteria can provide essential nutrients for the growth and development of their host insects, synthesize bioactive substances, and improve host insects' immunity. Using endophytic bacteria to change the ecological adaptability and stress resistance of insects has become a research hotspot and shows good application prospects. This article reviews the research progress on the effects of insect endophytic bacteria on aphids and parasitoid function, aiming to provide reference for the research on the function of endophytic bacteria in aphids and parasitoids.

Keywords: aphid; parasitoids; endophytic bacteria in insects; interaction; insect pest control

*Corresponding author. Email: lrq305@fafu.edu.cn