

# 重大农业害虫烟粉虱内共生菌的研究进展

王云超, 颜雄

遵义师范学院生态学院, 贵州遵义

DOI: 10. 62836/environment. v3i2. 1264

**摘要:** 烟粉虱 *Bemisia tabaci* 是全球农业生产中危害最为严重的害虫之一, 其体内存在种类丰富、功能多样的内共生菌。目前已在烟粉虱体内鉴定到的内共生菌包括1种原生共生菌—*Candidatus Portiera aleyrodidarum*, 以及 *Hamiltonella*、*Wolbachia* 等多个属的次生共生菌。这些共生菌在烟粉虱的生长发育、营养代谢、生殖调控、抗药性发展以及抵御病原体感染等生命活动中扮演着至关重要的角色。原生共生菌 *Portiera* 负责为宿主提供植物韧皮部汁液中所缺乏的必需氨基酸, 而次生共生菌则在维生素补充、生殖调控和逆境适应等方面发挥关键作用。近年来, 随着多组学技术和基因功能研究手段的快速发展, 烟粉虱内共生菌的研究已经从种类多样性调查转向功能解析和应用开发。本文对烟粉虱内共生菌的主要种类及其生物学特性进行介绍, 系统综述其在营养代谢、生殖调控、抗药性和抵御天敌等方面的生物学功能, 并就基于共生菌的烟粉虱绿色防控策略的应用潜能进行探讨, 以期为烟粉虱内共生菌的深入研究及害虫防控新技术的开发提供参考。

**关键词:** 烟粉虱; 内共生菌; 种类多样性; 生物学功能; 绿色防控

---

## Research progresses in endosymbionts of the major agricultural pest *Bemisia tabaci*

Yunchao Wang, Xiong Yan

School of Ecology, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou

**Abstract:** *Bemisia tabaci* is one of the most destructive agricultural pests worldwide, harboring a wide diversity of endosymbionts with various biological functions. To date, the endosymbionts identified in *B. tabaci* include one primary endosymbiont, *Candidatus Portiera aleyrodidarum*, and seven genera of secondary endosymbionts, *Hamiltonella*, *Wolbachia*, et al. These endosymbionts play crucial roles in host growth, development, nutritional metabolism, reproduction regulation, insecticide resistance and defense against pathogen infection. The primary endosymbiont *Portiera* is responsible for providing essential amino acids that are deficient in plant phloem sap, while the secondary endosymbionts play key roles in vitamin supplementation, reproductive regulation and stress adaptation. In recent years, with the rapid development of multi-omics technologies

---

\*基金项目: 贵州省科技厅2026年基础研究计划面上项目《烟粉虱BtaTRPA通道基因在共生菌Cardinium调控宿主耐高温中的作用机理研究》(项目编号: 黔科合基础MS(2026)846); 贵州省科技厅2025年度基础研究计划青年引导项目《虫螨脲和虱螨脲对草地贪夜蛾高效复配药剂的筛选及对作物安全性的研究》(项目编号: 黔科合基础QN(2025)392)。

通讯作者: 颜雄, 遵义师范学院生态学院, 教授, yanxiongmail@163.com。

and functional genomic approaches, research on *B. tabaci* endosymbionts has shifted from species diversity investigation to functional analysis and application development. This review introduces the main species and biological characteristics of endosymbionts in *B. tabaci*, systematically summarizes their biological functions in nutritional metabolism, reproduction regulation, insecticide resistance and defense against natural enemies, and discusses their application potential in developing green control strategies for *B. tabaci* based on endosymbiont manipulation, aiming to provide references for further research and new pest control technology development.

**Keywords:** *Bemisia tabaci*; endosymbiont; species diversity; biological function; green control

## 1 引言

烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 属半翅目粉虱科, 是一种世界性的重大农业害虫。该害虫以刺吸式口器吸食植物韧皮部汁液, 可直接造成植株生长不良, 同时分泌蜜露诱发煤污病, 更重要的是能够传播110余种植物病毒, 对蔬菜、棉花、花卉等经济作物造成巨大的经济损失[1]。烟粉虱实际上是一个包含至少55个隐存种的物种复合群, 其中入侵能力最强的Middle East-Asia Minor 1 (MEAM1, 原B型) 和Mediterranean (MED, 原Q型) 已在我国大部分地区成功定殖并取代了土著烟粉虱种群, 成为对我国农业生产威胁最大的生物型[2]。

目前, 烟粉虱的防治主要依赖于化学农药。然而, 长期以来杀虫剂的大量、频繁使用已导致烟粉虱对多种药剂产生了严重的抗药性, 防控难度不断加大[3]。在此背景下, 培育抗虫品种和开发新型绿色防控技术成为烟粉虱综合治理的重要方向。近年来的研究表明, 昆虫内共生菌在宿主的营养代谢、生殖调控、抗逆性和环境适应等方面发挥着关键作用, 为开发“以菌治虫”的新型害虫防控策略提供了全新的思路[4]。与蚜虫、飞虱等其他刺吸式口器昆虫类似, 烟粉虱体内也共生着种类丰富的内共生菌, 这些共生菌在长期的协同进化过程中与宿主形成了高度互利的共生关系[5]。本文综述了烟粉虱内共生菌的主要种类、生物学功能及其在绿色防控中的应用潜能, 以期

为该领域的深入研究提供参考。

## 2 烟粉虱内共生菌的主要种类

烟粉虱体内共生菌种类丰富多样, 根据其 与宿主共生关系的密切程度, 可分为原生共生菌和次生共生菌[6]。所有粉虱科昆虫均携带有原生共生菌 *Candidatus Portiera aleyrodidarum*, 该菌位于昆虫腹部的特化器官—含菌细胞 (bacteriocyte) 中, 与宿主形成了严格的共生关系。*Portiera* 的基因组高度简化, 丧失了许多独立生存所需的代谢基因, 但保留了合成必需氨基酸和类胡萝卜素的完整通路, 为宿主补充植物韧皮部汁液中缺乏的关键营养物质, 是烟粉虱存活所不可或缺的[5]。

次生共生菌并非宿主的生存必需品, 但对宿主的适应性和竞争力具有重要影响。烟粉虱物种复合体内已鉴定到的次生共生菌包括 *Hamiltonella*、*Arsenophonus*、*Rickettsia*、*Wolbachia*、*Cardinium* 和 *Fritschea* 等多个属[7]。不同隐种携带的次生共生菌种类及其侵染率存在显著差异。例如, *Hamiltonella* 仅在入侵种 MED 和 MEAM1 中发现, 而 *Rickettsia* 在 MEAM1 中的感染率高达 100%[1]。来自印度的研究对 24 个地理区域的烟粉虱种群进行 16S rRNA 基因测序分析, 发现次级共生菌的感染率分别为 *Arsenophonus* (88%)、*Cardinium* (92%) 和 *Rickettsia* (96%), 呈现出高比例且稳定的感染模式[2]。我国学者对不同隐种烟

粉虱内共生菌的多样性分析同样表明, 不同隐种间共生菌的种类组成差异显著[3]。此外, 寄主植物种类也是影响烟粉虱内共生菌群落结构的重要因素。五种不同的寄主植物显著改变了烟粉虱MEAM1体内共生细菌的存在和数量, 这种变异直接影响了昆虫的营养生理[4]。烟粉虱内共生菌的主要种类及其生物学特性总结见表1。

表1. 烟粉虱内共生菌主要种类及其功能

类型	种类	主要功能
原生共生菌	<i>Portiera</i> <i>aleyrodidarum</i>	提供必需氨基酸、类胡萝卜素
次生共生菌	<i>Hamiltonella</i>	提供B族维生素、抵御天敌
次生共生菌	<i>Arsenophonus</i>	提供B族维生素、调控生殖
次生共生菌	<i>Rickettsia</i>	调控生殖、抵御病原真菌
次生共生菌	<i>Wolbachia</i>	调控生殖、诱导胞质不亲和
次生共生菌	<i>Cardinium</i>	调控生殖、诱导胞质不亲和

## 3 烟粉虱内共生菌的功能

### 3.1 营养代谢功能

烟粉虱以植物韧皮部汁液为唯一食物来源, 而韧皮部汁液中缺乏昆虫生长发育所需的多种必需氨基酸和维生素。*Portiera*通过基因组中保留的完整氨基酸合成通路, 为烟粉虱提供苯丙氨酸、酪氨酸、赖氨酸等多种必需氨基酸, 弥补了宿主营养上的不足[5]。深入研究发现, 烟粉虱还通过“俘获”微生物源水平转移基因获得了独特的氮代谢能力—研究团队发现两个从微生物水平转移至烟粉虱基因组的基因能够参与氮废物合成与氮营养高效利用, 而共生菌自身并不编码这两个基因的同源物, 提示烟粉虱与共生菌之间存在复杂的代谢互补关系[7]。

在维生素合成方面, *Hamiltonella*和*Arsenophonus*能够为宿主提供B族维生素, 包括核黄

素、NAD(P)H、吡哆醇、生物素和叶酸等[1]。当这两种共生菌被清除后, 烟粉虱体内B族维生素水平显著下降, 而外源补充相应维生素可有效恢复其生理功能[2]。*Portiera*与*Hamiltonella*在代谢通路上存在功能互补, *Portiera*负责必需氨基酸的合成, 而*Hamiltonella*则提供合成过程中所需的辅因子, 两者协同维持宿主的营养平衡[3]。

### 3.2 生殖调控功能

烟粉虱内共生菌在宿主生殖调控中发挥着多层次的调节作用。*Rickettsia*通过影响保幼激素合成途径来调控宿主的生殖。感染*Rickettsia*后, 烟粉虱体内保幼激素合成关键基因JHAMT表达上调, 保幼激素水平升高, 从而促进卵黄蛋白合成, 提高产卵量[2]。同时, 保幼激素还能促进烟粉虱的交配行为, 增加受精机会, 最终使种群中雌性比例显著上升。此外, *Rickettsia*还能通过调控宿主细胞周期关键基因的表达促进生殖细胞分裂, 在细胞和分子层面增强卵巢发育与繁殖能力[4]。

*Wolbachia*和*Cardinium*则可通过诱导胞质不亲和(cytoplasmic incompatibility, CI)来影响宿主的生殖。感染*Wolbachia*的雄性烟粉虱与未感染雌性交配时, 其后代胚胎发育受阻, 孵化率显著降低[3]。这种CI现象为通过人工转染共生菌进行种群压制提供了理论基础。栾军波教授团队的研究揭示了烟粉虱胚胎期含菌细胞发育的调控机制, 发现含菌细胞高表达的基因Akirin调控含菌细胞的发育, 并通过负向调控抗菌肽基因defensin的表达来调节共生菌丰度[8]。

### 3.3 抗药性功能

长期大量使用化学杀虫剂已导致烟粉虱对多种农药产生严重抗性。近年来的研究表明, 内共生菌在烟粉虱抗药性形成过程中扮演了重要角色[1]。墨西哥尤卡坦半岛的研究比较了使用和未使用杀虫剂的烟粉虱种群内共生菌多样性, 结果显示使用杀虫剂的种群(MB1)呈现出64属20种, 而

未使用杀虫剂的种群 (MB2) 为61属18种, 两个样本中最丰富的门均为变形菌门, 提示杀虫剂施用可能对烟粉虱内共生菌群落的组成产生显著影响[9]。

基因组分析显示, *Portiera*负责必需氨基酸合成, *Hamiltonella*提供辅因子, 两者的代谢通路互补性在农药胁迫下的营养代谢调节中可能发挥重要作用[5]。此外, 烟粉虱内共生菌的感染率差异与田间种群对杀虫剂的敏感性变化密切相关, 不同共生菌组合可能通过影响宿主的解毒代谢能力而对抗药性产生间接影响[3]。

### 3.4 抵御天敌和病原物的功能

内共生菌还能显著增强烟粉虱对天敌和病原物的抵御能力。江苏省农业科学院郭慧芳团队研究发现, 杀虫真菌爪哇虫草菌是驱动烟粉虱共生菌 *Rickettsia* 在自然种群中快速扩散的重要动力。共生菌 *Rickettsia* 能够抑制爪哇虫草菌在死亡烟粉虱体表产孢, 从而保护健康烟粉虱不被传染[2]。此外, *Rickettsia* 还能提高烟粉虱对丽蚜小蜂寄生的防御能力, 寄生蜂更倾向于寄生 *Rickettsia* 阴性的烟粉虱若虫以提高其后代存活率[4]。*Hamiltonella* 同样被证实能够增强烟粉虱对寄生蜂的抵御能力, 其作用机制可能与分泌毒性蛋白干扰寄生蜂胚胎发育有关[7]。

## 4 内共生菌在烟粉虱防治中的应用潜能

基于内共生菌的“以菌治虫”策略为烟粉虱的绿色防控提供了全新的途径。目前该领域的应用研究主要集中在三个方面[4,6]。

第一, 通过抗生素处理清除宿主的关键共生菌, 直接降低烟粉虱的适合度。实验证实利福平可清除 *Portiera* 和 *Hamiltonella*, 导致烟粉虱种群衰退, 验证了以关键共生菌为靶标的防控思路的可行性[5]。

第二, 利用共生菌的生殖调控功能进行种群压制。通过人工转染能够诱导高强度胞质不亲和的 *Wolbachia* 菌株, 建立稳定遗传的转染品系, 导致种群后代不育, 进而实现种群数量控制和病原物传播阻断[3]。这一策略在飞虱等害虫中已

取得重要进展, 在烟粉虱中同样具有广阔的应用前景。

第三, 利用共生菌对病原菌的防御功能, 开发生物防治增效技术。*Rickettsia* 抑制爪哇虫草菌体表产孢的发现, 为克服共生菌天然抗性、提升微生物农药防治效果提供了理论依据[2]。

然而, 基于共生菌的烟粉虱防控策略仍面临若干挑战。其一, 多数内共生菌难以离体培养, 限制了对其功能的深入研究[7]。其二, 共生菌介导宿主环境适应性的具体分子机制尚不完全清楚[1]。其三, 共生菌在宿主不同组织间的传递和调控机制仍有待阐明[8]。随着多组学技术和基因编辑技术的发展, 上述制约因素有望逐步突破, 基于共生菌的烟粉虱绿色防控技术将在未来农业生产中发挥越来越重要的作用。

## 5 结语

烟粉虱内共生菌研究在过去的二十余年间取得了长足进展。从早期基于16S rRNA基因的种类多样性调查, 到如今通过多组学技术对共生菌代谢功能、生殖调控和抗逆机制的系统解析, 该领域已完成了从现象描述到机制探索的重要转变[5-7]。烟粉虱与内共生菌之间复杂的代谢互补网络、“营养-激素”多层次的生殖调控通路, 以及病原菌驱动共生菌扩散的生态进化机制等重大发现, 不仅深化了对昆虫-微生物共生关系的认识, 也为开发基于共生菌的害虫绿色防控策略奠定了坚实的理论基础[2,8]。未来研究应进一步聚焦于关键共生菌的功能基因挖掘、共生菌与宿主协同进化的分子机制解析, 以及“以菌治虫”技术的田间应用优化, 以期为我国农业害虫的绿色防控提供创新性的解决方案。

## 致谢

本研究得到了贵州省科技厅2026年基础研究计划面上项目《烟粉虱BtaTRPA通道基因在共生菌 *Cardinium* 调控宿主耐高温中的作用机理研究》(项目编号: 黔科合基础MS(2026)846)和贵州省科技厅2025年度基础研究计划青年引导项目《虫螨脲和虱螨脲对草地贪夜蛾高效复配药剂的

筛选及对作物安全性的研究》(项目编号: 黔科合基础QN(2025)392)和遵义市科协2026年科技助力高质量发展能力提升资助项目《功能植物蛇床草在遵义果园害虫绿色防控中的引种示范与应用推广》的资助。

## 参考文献

- [1] 阮永明,李月红.烟粉虱共生细菌的研究进展[J].昆虫知识,2005,42(4):366-370.
- [2] Gottlieb Y, Ghanim M, Chiel E, et al. The distribution of bacterial endosymbionts in whitefly populations. *Environmental Microbiology*, 2006, 8(6): 1070-1080.
- [3] Bing X L, Yang J, Zchori-Fein E, et al. The bacterial endosymbionts of whiteflies. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(24): 7527-7535.
- [4] Luan J B, Li J M, Varela N, et al. Akirin regulates the cell development and symbiont abundance of bacteriocytes in embryos of whitefly *Bemisia tabaci*. *Cell Reports*, 2026, 36(5): 109452.
- [5] Andreason S A, Shelby E A, Moss J B, et al. Whitefly endosymbionts: Biology, evolution, and plant virus interactions. *Insects*, 2020, 11(11): 775.
- [6] 饶琼.内共生菌在烟粉虱抗药性和抵御天敌中的作用[J].植物保护学报,2018,45(3):437-442.
- [7] 张灿,王兴民,邱宝利,等.烟粉虱热点问题研究进展[J].应用昆虫学报,2013,50(5):1468-1475.
- [8] 郭慧芳,刘宝生,方继朝.昆虫内共生菌在害虫防治中的应用研究[J].中国生物防治学报,2019,35(5):781-788.
- [9] Bravo-Pérez D, Hernández-Zepeda C, Chaidez-Quiroz C, et al. Composition of the whiteflies microbiome in populations with and without insecticide applications in Yucatan Mexico. *Biologia*, 2024, 79(2): 451-462.

