通信信息在植物−木虱−天敌三级营养关系中作用的研究进展

梁嘉宜[1,2,3] 康传志[2] 石旺鹏[3] 葛 阳[2*] 陈宏灏[1*]

（1. 宁夏农林科学院植物保护研究所，银川 750002；2. 中国中医科学院中药资源中心，道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室，北京 100700；3. 中国农业大学植物保护学院，北京 100193）

摘要：木虱总科昆虫是半翅目中的重要类群，已报道了4 000多种，其中包含柑橘木虱*Diaphorina citri*、马铃薯木虱*Bactericera cockerelli*、中国梨喀木虱*Cacopsylla chinensis*、梧桐木虱*Carsidara limbata*和枸杞木虱*Bactericera gobica*等重要世界性害虫，对粮食、经济和药用植物带来了严重威胁。木虱不仅刺吸植物汁液造成直接损伤，还可作为包括植原体在内等多种病原的传播媒介，引发黄龙病、黄化病、衰退病等。木虱总科害虫通常食性比较专一，与宿主植物关系密切。基于其取食和繁殖目的能特异性感知和利用宿主植物，其嗅觉、味觉、视觉、触觉在选择与适应宿主植物、种内和种间交流通信中都发挥了重要作用。为阐明木虱如何通过其化学信息、物理信息等信号选择寄主和逃避天敌及其机制，从而挖掘新的木虱绿色防控技术，该文对木虱嗅觉、味觉、视觉和触觉信号在植物−木虱−天敌三级营养关系中的作用及其在木虱防治中的应用进行系统综述，分析木虱理化、机械、感受系统在寄主适应及逃避天敌中的作用及机制，以期为植物−木虱−天敌三级营养关系的深入研究和木虱的可持续防控提供新思路和新方法。

关键词：木虱；三级营养关系；寄主植物；信息素；天敌；防治；化学通信

Research progress on the role of communication signals in the tri-trophic interactions among plants, psyllids and natural enemies

Liang Jiayi[1,2,3] Kang Chuanzhi[2] Shi Wangpeng[3] Ge Yang[2*] Chen Honghao[1*]

（1. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China; 3. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China）

Abstract: Psyllids (Hemiptera: Psylloidea) represent a significant group within Hemiptera, with over 4 000 described species. Among them, *Diaphorina citri*, *Bactericera cockerelli*, *Cacopsylla chinensis*, *Carsidara limbata*, and *Bactericera gobica* are globally significant pests that pose serious threats to food crops, economic plants, and medicinal plants. Psyllids cause direct damage by feeding on plant sap and also act as vectors for various pathogens, including phytoplasmas, which induce diseases such as huanglongbing (HLB), yellows, and decline syndromes. Most psyllid species exhibit a narrow host range and maintain close relationships with their host plants. To locate suitable hosts for feeding and

基金项目：宁夏回族自治区农业科技自主创新项目（NGSB-2021-10-02），中央级公益性科研院所基本科研业务费（ZZ14-YQ-048，ZJ2023015），中国中医科学院科技创新工程项目（CI2024E003），湖北省中医药管理局中医药创新团队项目（ZY2025J002），宁夏回族自治区重点研发计划项目（2025BBF01005）

* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：1374285418@qq.com，chenhunhao@126.com

收稿日期：2025-07-23

reproduction, they are capable of specifically perceiving and utilizing host-derived cues. Their olfactory, gustatory, visual, and tactile senses play crucial roles in host plant selection, adaptation, and intra- and interspecific communication. To clarify how psyllids select hosts and evade natural enemies through chemical, physical and other signaling mechanisms and to identify potential green control strategies, this review systematically summarizes current knowledge on olfactory, gustatory, visual, and tactile signals involved in plant-psyllid-natural enemy tri-trophic interactions and their applications in psyllid control. It further analyzed the functions and mechanisms of psyllids' physicochemical and mechanosensory systems in host adaptation and predator avoidance. This review aimed to provide new insights and approaches for advancing research on plant-psyllid-natural enemy tri-trophic interactions and for promoting the sustainable management of psyllids.

Key words: psyllid; tri-trophic interaction; host plant; pheromone; natural enemy; pest management; chemical communication

木虱是一类植食性半翅目昆虫，广泛分布于全球各类农业和生态系统中，其不仅可以直接取食植物汁液，也可以作为植物病原的传播媒介。木虱害虫通常食谱比较窄，且具有极强的寄主适应性，能特异性地通过嗅觉、味觉、视觉、触觉感知和利用宿主植物，高效完成其对宿主植物的选择与适应，特别是化学信息在其觅食、配偶识别、产卵选择、逃避天敌等一系列生命活动中发挥着核心作用，是其环境适应性进化的基础。利用调控昆虫行为的理化信息来防治害虫越来越受到重视（Kalepu et al.，2024）。作者对Web of Science核心数据库收录的木虱环境适应性领域文献进行了检索，发现有关木虱行为适应及其机制和应用的研究自20世纪50年代以来持续增长，尤其在2000年后呈现明显上升趋势，引用次数也波动上升，在2010年后增长趋势明显，至2020年达到高峰（图1）。本文将对通信信息在寄主植物–木虱–天敌三级营养关系中的作用进行综述，重点总结分析化学信号物质在木虱环境适应性中的作用，并在利用行为信号防治木虱方面进行展望，以期为木虱绿色防控理论和技术研究提供指导。

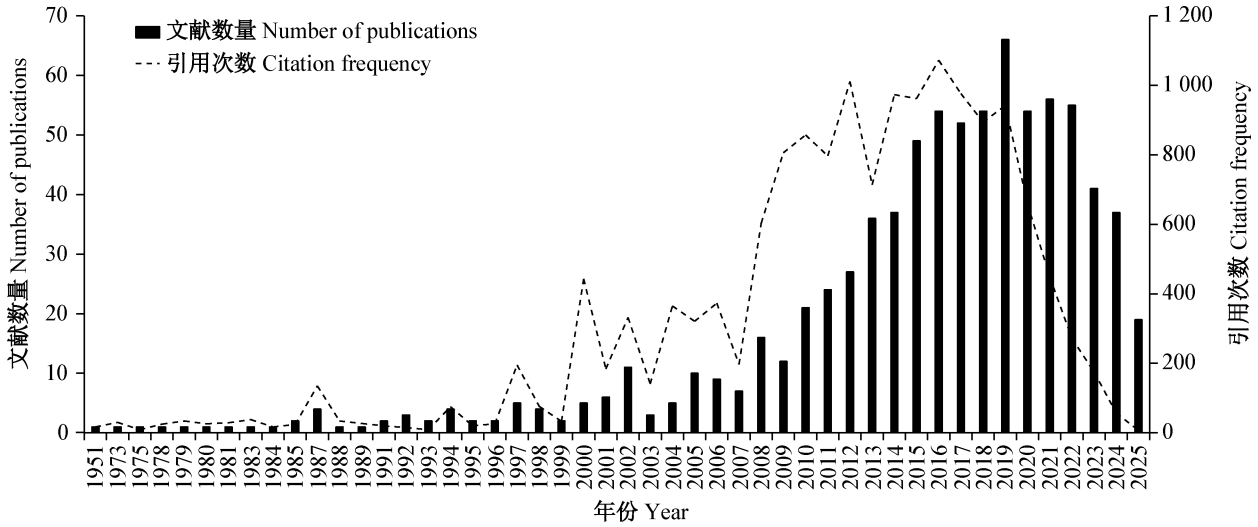

图1 木虱环境适应性领域研究文献数量和引用次数年变化趋势

Fig. 1 Annual trends in the number of publications and citations in the field of psyllid environmental adaptability

1 木虱种内通信研究进展

1.1 木虱种内嗅觉信号

在自然生态系统中，同种昆虫个体之间最常见的通信渠道是化学通信，这种通信依赖于信息素，信息素是昆虫种内化学分子语言，信息素能引起同种昆虫其他个体强烈的行为反应，包括交配、聚集、警戒等（Soroker et al.，2004；Vandermoten et al.，2012；Foster & Anderson，2022），从而保障物种的定殖及繁衍。

近年来国内外学者对木虱的种内信息素开展了相关研究，已被报道的木虱有4 000多种，但目前种内信息素研究仅在梨黄喀木虱 *Cacopsylla pyricola*（Soroker et al.，2004）、中国梨喀木虱 *Cacopsylla chinensis*（万津瑜等，2013）、柑橘木虱 *Diaphorina citri*（Zanardi et al.，2018）、马铃薯木虱 *Bactericera cockerelli*（Horton et al.，2008）、开心果隆脉木虱 *Agonoscena pistaciae*（Bazzaz et al.，2019）、枸杞木虱 *Bactericera gobica* 中有报道。马铃薯木虱和梨黄喀木虱个体在交配前身体会伸出触角，这表明嗅觉在求偶过程的配偶评估中发挥了重要作用（Krysan，1990；Lubanga et al.，2014）。本文对目前已报道的木虱信息素鉴定情况进行了总结。已报道的木虱信息素主要为性信息素，木虱雄虫对雌虫表现出趋性，已鉴定出的活性成分包括多种体表碳氢化合物（大约21到37个碳原子的正烃烷、甲基支链烷烃），如13-甲基二十七烷（Guédot et al.，2009）、2-甲基二十七烷（万津瑜等，2013）和3-甲基二十七烷（Ganassi et al.，2018）等。此外，在柑橘木虱中鉴定出了挥发性较强的信息素月桂酸（Mann et al.，2013）、乙酸（Zanardi et al.，2018）和1-壬醛（Luo et al.，2023）。木虱具有聚集行为，柑橘木虱成虫聚集在新梢上活动（Sétamou et al.，2008；Costa et al.，2010），马铃薯木虱在马铃薯 *Solanum tuberosum* 田呈聚集分布（Butler & Trumble，2012）。对木虱聚集信息素的研究也有报道，在马铃薯木虱中首次报道了雄虫会被雄虫气味吸引，推测可能存在雄性聚集信息素（Guédot et al.，2010），开心果隆脉木虱体表挥发物也有聚集作用，但未鉴定出其活性成分（Bazzaz et al.，2019）。另外，中国梨喀木虱若虫对其蜜露也表现出趋性，但具体活性成分未报道（刘奇志等，2015）。

在木虱对信息素的感受机制方面也有较多报道。木虱触角上分布的感器及其中的神经元是其感受嗅觉信号的重要生理结构，触角感器种类、分布等的差异会影响木虱对种内嗅觉信号的感受及识别能力。木虱触角呈线形，与其他昆虫相比，木虱的嗅觉系统比较简单，触角上的感器通常较少（Zhang et al.，2020）。在中国梨喀木虱触角上只发现了毛形感器、刺形感器、锥形感器、栓锥形感器和刚毛形感器5种感器（吴海朝等，2023）。柑橘木虱触角上观察到多孔毛形感器（I、II）、无孔毛形感器（I、II、III）、刺形感器、腔形感器、板形感器、刚毛（长、短）形感器及未鉴定的单孔感器（Onagbola et al.，2008），推测其中的毛形感器及坑状的板形感器主要感知交配等行为的化学信号，每个板形感器中有3个嗅觉受体神经元（Coutinho-Abreu et al.，2014）。柑橘木虱和胡萝卜个木虱 *Trioza apicalis* 的雌雄虫间的感器种类、数量及分布均无明显差异（Kristoffersen et al.，2006），但柑橘木虱雌虫触角顶部的短刚毛尖端向内凹陷，雄虫中则未发现（Onagbola et al.，2008）。枸杞木虱雌雄虫触角上共有7种感器结构，雌雄虫的感器类别没有差异，根据感器表面感觉孔及内部树枝状神经突触结构共发现触角鼻、刺形、锥形等5种感器类型可能具有嗅觉感受功能（Ge et al.，2022）。此外还发现枸杞木虱触角上的感器分布、数量及内部神经突触数量存在雌雄二型性，雄虫鞭节第7节的触角鼻内部神经突触数量明显多于雌虫，且多个鞭节上的刺形感器数量多于雌虫，推测雄虫可能通过上述感器识别性信息素（Ge et al.，2022）。关于木虱脑部嗅觉相关的神经结构研究鲜有报道，在柑橘木虱大脑中甚至没有发现触角叶这一昆虫主要的嗅觉中枢结构（Zhang et al.，2020）。

目前仅针对柑橘木虱和枸杞木虱感受、识别信息素的分子机制进行了研究。在柑橘木虱的转录中共鉴定出9个气味结合蛋白（odorant-binding protein，OBP）、12个化学感受蛋白（chemosensory protein，CSP）、46个气味受体（olfactory receptor，OR）、4个感觉神经元膜蛋白（sensory neuron membrane protein，SNMP）和4个气味降解酶（Wu et al.，2016；Zhang et al.，2020）。Wu et al.（2016）发现大部分CSP在柑橘木虱触角和腹部组织中的表达并无显著差异，但Zhang et al.（2020）发现有4个CSP编码基因 *DcitCSP1*、*DcitCSP8*、*DcitCSP10* 和 *DcitCSP12* 及6个OBP编码基因 *DcitOBP2*、*DcitOBP3*、*DcitOBP6*、*DcitOBP7*、*DcitOBP8* 和 *DcitOBP9* 主要在触角中表达。柑橘木虱不同发育阶段的嗅觉相关基因表达水平也有显著变化，其中成虫性成熟期 *DcitOBP7* 和 *DcitOBP12* 基因的表达量显著升高，这可能与柑橘木虱的繁殖有关；荧光竞争结合试验表明DcitOBP3与柑橘木虱性信息素成分月桂酸的结合能力均强于其他物质（乌天宇等，2020）。因此，OBP是识别并结合木虱信息素的重要蛋白。Liu et al.（2025）从枸杞木虱雌雄虫触角及全虫转录组中鉴定到102个化学感受相关蛋白，包括15个OBP、18个CSP、26个OR、8个味觉受体（gustatory receptor，GR）、32个离子通道型受体（ionotropic receptor，IR）和3个SNMP，通过分析其在触角、头部和身体不同部位的表达差异，发现了4个OBP、9个CSP、1个气味受体

共受体（odorant receptor co-receptor，Orco）、3个IR基因在触角中高表达，推测这些基因可能参与枸杞木虱对化学信息的嗅觉识别过程。综上所述，目前在木虱种内嗅觉信号研究中已鉴定出的活性成分均为性信息素，也有研究报道木虱中存在聚集信息素，但活性成分仍有待进一步研究。关于木虱对种内嗅觉信号的感受机制研究仍相对较少，且主要集中在触角感器内外部结构研究及嗅觉相关基因的鉴定、组织表达及与种内信息素的体外结合方面，尚未鉴定出识别木虱信息素的OR蛋白。

1.2　木虱种内听觉信号

在木虱的种内通信中，听觉信号也是重要的通信方式（Lubanga et al.，2014）。木虱雌雄虫会通过二重唱进行交流，根据物种不同，雄虫或雌虫发出第1声鸣叫，如果有潜在配偶回应就会建立二重唱。有研究发现，雌虫一般不会主动发出声音信号，而只会在感知到雄虫信号后才会回应；在极少数情况下，少数物种的雌虫会在未感知到雄虫的情况下发出信号（Lubanga et al.，2014；Liao et al.，2022）。雄虫常发出唧唧声和颤音信号吸引雌虫，而雌虫在愿意交配时也会回应唧唧的声音信号。木虱的声音信号表现出物种特异性，即使在近缘物种中也是如此，在某些情况下具有分类学信息（Percy et al.，2006；Liao & Yang，2015；Liao et al.，2016），即使形态相似的物种，也可以通过声音信号的特征来区分。例如，喀木虱属*Cacopsylla*的3种木虱可以通过鸣叫次数、鸣叫间隔和鸣叫持续时间等特征来区分（Liao & Yang，2015）。如个木虱属*Trioza*的棱果花个木虱*T. acuminatissima*和新木姜子个木虱*T. neolitseacola*在形态上几乎相同，然而二者的鸣叫持续时间却存在显著差异（Liao et al.，2016；2022）。即使是同一种木虱，不同型之间的信号频率也存在差异，冬型和夏型梨木虱雄虫信号的颤音频率有显著差异（Liao et al.，2022；Jocson et al.，2023）。关于木虱的振动发声机制，与由前翅和胸部部分之间的摩擦产生的摩擦理论假说不同（Ouvrard et al.，2008），Polajnar et al.（2024）利用激光测振仪及高速视频记录对自由移动的欧洲梨喀木虱*C. pyrisuga*进行监测，发现雄虫主要通过其翅尖的振动产生声音信号，不涉及翅和胸部摩擦的颤动；雌虫的声音信号主要包括带有间隔的连续鸣声，雄虫的声音信号更复杂，既包括鸣叫也包括颤音，雌雄虫声音信号的基频分别为131.4 Hz和148.3 Hz。木虱的振动声音信号主要用于交配行为，可以通过回放振动信号来实现对木虱的引诱或对其交配的干扰（Polajnar et al.，2014）。科研人员研究开发了能够产生同步二重振动的装置，诱捕寻找配偶的柑橘木虱雄虫或干扰其交配（Mankin et al.，2013；2015；Lujo et al.，2016；Fernandez，2020）；同样，回放马铃薯木虱雌虫的声音信号可以吸引雄虫，从而显著降低其交配成功率（Avosani et al.，2020a，b）。因此，包括梨木虱、柑橘木虱在内的多个木虱种类通过振动产生的声音信号是其种内通信的重要信号类型，基于模拟雌虫声音信号来吸引雄虫的研究证明了通过声音信号干扰木虱交配行为的可能性，相关声波干扰装置在田间的应用效果仍有待进一步探究。

2　木虱与其寄主植物的关系

木虱大都食谱较窄，因而其对寄主具有很强的选择性和适应性。传播黄龙病的柑橘木虱主要为害芸香科植物，特别是柑橘属*Citrus*植物，表现出高度的专一性（Silva et al.，2023）。柑橘木虱对不同寄主的偏好性及适应性不同，其中九里香*Murraya paniculata*和黄皮*Clausena lansium*是最适合的寄主，其次是柠檬*Citrus*×*limon*，而对枳壳*Citrus*×*aurantium*的取食意愿较低（王辉等，2011）。柑橘木虱也可在福建茶*Carmona microphylla*上生存繁殖（王辉等，2011）。马铃薯木虱的寄主包括茄科、豆科等作物和杂草，其寄主选择机制复杂（Prager et al.，2014）。梨木虱是梨树*Pyrus communis*上的专食性害虫，其寄主范围高度集中于蔷薇科梨属*Pyrus*植物，但存在品种偏好和少量近缘寄主（Civolani et al.，2023；赵龙龙等，2024）。枸杞木虱是枸杞的主要和常发专性害虫之一，主要为害宁夏枸杞*Lycium barbarum*及中华枸杞*Lycium chinense*，集中为害枸杞叶片、嫩梢、花蕾及幼果（马娟，2017；刘赛等，2020）。

木虱主要依赖其化学感受系统识别寄主，其中嗅觉扮演着重要角色。此外，味觉、视觉和触觉也在不同情况下不同程度参与木虱寄主识别过程。木虱通过感知植物的理化信号来评估寄主品质和适宜性。

2.1　嗅觉信号在木虱寄主定位中的作用

本文对已报道的能引起木虱行为反应的寄主植物挥发物及其相关信息进行了总结，发现寄主植物释放的挥发性物质在木虱寄主定位中起着关键作用。梨花挥发的罗勒烯、*α*-蒎烯、水杨酸甲酯、顺式-3-己烯-1-醇、顺-3-己烯基乙酸酯的合成混合物能显著吸引梨喀木虱*Cacopsylla pyri*雌虫，而雪松油和肉桂树皮油可驱避梨喀木虱（Czarnobai De Jorge et al.，

2024)。相比野生品种,番茄 *Solanum lycopersicum* 栽培品种 Floradade 因释放高丰度的邻伞花烃、γ-松油烯等单萜类物质,能显著吸引马铃薯木虱成虫产卵(Mayo-Hernández et al.,2019)。柑橘木虱雌雄成虫均能被柑橘属植物和九里香属 *Murraya* 九里香挥发物显著吸引,但雄虫对甜橙 *Citrus sinensis* 挥发物的响应更强,而雌虫对九里香的挥发物更敏感(Patt & Sétamou,2010)。能引起木虱行为反应的34种寄主植物挥发物主要是萜类、酚类衍生物、脂肪醛类和酮类等几大类。不同木虱对寄主植物挥发物的识别表现出明显的重叠性,萜类化合物尤其是单萜烯和倍半萜烯在木虱寄主植物挥发物中占比最高,如β-蒎烯、柠檬烯、罗勒烯等单萜烯以及β-石竹烯等倍半萜烯(Yuvaraj et.al.,2013)。β-石竹烯是澳洲梳木虱 *Ctenarytaina eucalypti*(Yuvaraj et. al.,2013)、柑橘木虱(Patt & Sétamou,2010;Beloti et al.,2017; Zhang et al., 2020)、马铃薯木虱(Mayo-Hernández et al.,2019)、花斑喀木虱 *Cacopsylla picta*(Mayer et al.,2011)的寄主植物挥发物的主要成分;而柠檬烯能被开心果隆脉木虱(Homayoonzadeh et al.,2022)、柑橘木虱(Zhong et al.,2019;Zhang et al.,2020;Liu et al.,2021)识别。水杨酸甲酯可被胡萝卜个木虱(Gross et al.,2022)、柑橘木虱(Zhong et al.,2019;Zhang et al.,2020;Liu et al.,2021)和梨喀木虱(Czarnobai De Jorge et al.,2024)共同感知。电生理结果表明胡萝卜个木虱的寄主胡萝卜 *Daucus carota* 和针叶树挥发物的质谱峰有明显的重叠性,4种具有电生理活性化合物存在于多种提取物中(Kristoffersen et al.,2008)。不同木虱的寄主植物挥发物组成成分各异,但一些关键挥发物如单萜烯类和单萜醇类化合物可能作为广谱引诱信号在木虱的寄主定位过程中发挥着重要作用,是木虱识别寄主植物的共同化学线索。

有关木虱对寄主植物挥发物的嗅觉感受机制的报道较少,木虱嗅觉感受分子机制的研究目前仅集中在柑橘木虱、枸杞木虱(祁全梅等,2021;Shuai et al.,2025)上,未见关于木虱 OR 功能的报道。柑橘木虱的嗅觉结合蛋白 DcitOBP7 是识别寄主挥发物的关键分子,体外试验证实 DcitOBP7 与水杨酸甲酯、芳樟醇和 R-(+)-柠檬烯结合力极强(Liu et al.,2021)。与鳞翅目昆虫相比,木虱的触角感器、嗅觉相关基因数量较少。木虱通过高度特化的嗅觉受体神经元(olfactory receptor neuron,ORN)检测植物挥发物,每个 ORN 通常仅表达一种受体蛋白,木虱的 ORN 数量相较于其他昆虫较少。如胡萝卜个木虱约有50个 ORN,属于4种不同类型,且不同 ORN 具有高度选择性,每个神经元最多对3种不同寄主植物挥发物作出反应(Kristoffersen et al.,2008)。澳洲梳木虱触角 S1 感器中的 B 神经元对含氧单萜芳樟表现出极强的特异性响应,而芳樟醇激活的神经元几乎不响应其他化合物(Yuvaraj et al.,2013)。尽管木虱的 ORN 数量不多,但其仍可以通过这些 ORN 完成对关键寄主植物挥发物的识别。胡萝卜个木虱 S1 感器中的神经元对胡萝卜特异性倍半萜和针叶树共有的松油烯-4-醇均有响应,这种交叉响应使其能在夏寄主胡萝卜和冬寄主针叶树间切换,体现其对季节性环境变化的适应性(Kristoffersen et al.,2008)。此外,木虱 ORN 存在一定的冗余度,胡萝卜个木虱中发现了4种可能的 ORN 类型,其中一种 ORN 类型存在于3种感器中,另一种 ORN 类型存在于所有4种感器中(Kristoffersen et al.,2008),神经元的冗余度可能为其生存关键化学信号的检测提供保障。

2.2 视觉和触觉信号在木虱寄主选择中的作用

视觉和触觉在木虱寄主选择中也发挥了一定作用。通过 Y 型嗅觉仪测定发现,视觉线索显著增强了嗅觉线索对木虱的吸引力,当仅存在嗅觉信息时,未交配的木虱个体无法表现出定向行为;而当视觉线索与嗅觉线索结合时,雌虫和雄虫均表现出强烈的趋向性,表明视觉线索在缺乏嗅觉信号时无法独立引导木虱定位寄主,但能显著提升嗅觉信息的有效性(Wenninger et al.,2009)。通过四臂选择试验发现,崇义野橘挥发物中水杨酸苷、单萜类挥发物(如柠檬烯、桧烯)等吸引物质的含量较高,防御物质如茉莉酸含量较低,加之叶片黄色色调更弱的特点使其成为木虱的首选寄主,即通过视觉与嗅觉的双重信号吸引柑橘木虱(Zhong et al.,2019)。在马铃薯木虱的寄主选择行为中,其通过评估叶片物理特性与化学信号来选择产卵位点,触觉在其产卵选择中发挥了重要作用。田间试验结果表明马铃薯木虱雌虫倾向于选择嫩叶作为产卵基质,可能是其组织柔软且易被刺穿,而老叶因角质化程度高导致触觉阻力增大而被规避(Thinakaran et al.,2015)。在实验室条件下马铃薯木虱雌虫在产卵前会进行口器刺探行为,通过味觉与触觉联合判断宿主的适宜性(Buchman et al.,2011),这种味觉及触觉的双重验证机制提高了其对寄主筛选的效率。干扰柑橘木虱的视蛋白基因后,可降低其对紫外光、绿光和蓝光的趋光效率,这揭示了其趋光、趋色行为的分子机制(Li

et al.，2020）。

2.3 味觉信号在木虱定殖寄主中的作用

昆虫在其寄主选择过程中主要依赖味觉系统识别植物营养和次生物质。关于木虱GR及其功能的报道较少。在中国梨喀木虱头部转录组中鉴定到了2个GR（Xu et al.，2019），在枸杞木虱中发现了8个GR，而在寡食性柑橘木虱中发现了20个GR（Wu et al.，2016）。木虱味觉系统通过对韧皮部汁液中营养物质及次生代谢物的协同感知来调控对寄主植物的适应性。韧皮部汁液的摄取是木虱长期生存、发育和繁殖的关键，柑橘木虱（George et al.，2022）和马铃薯木虱（Olaniyan et al.，2020）在适宜寄主上优先并频繁进行韧皮部取食，在非优寄主或非寄主上的韧皮部取食行为显著减少或无法完成，成为限制其种群建立的核心因素（Mustafa et al.，2021；George et al.，2022）。韧皮部汁液的高糖分和氨基酸浓度恰好满足木虱发育和繁殖能量需求（乌天宇等，2020）。柑橘木虱成虫倾向于在新芽和嫩叶部位聚集，这些部位富含游离氨基酸、糖类等营养物质，同时次生代谢物如单宁、酚类的含量较低，形成“高营养–低防御”的化学信号组合，木虱通过GR感知这些信号后优先选择此类区域进行取食和产卵（Yasuda et al.，2005）。柑橘木虱的味觉系统通过感知伞花烃和短链有机酸如甲酸、乙酸来促进取食行为，揭示了木虱味觉系统对特定化学信号的感知机制是优化取食行为的关键（George et al.，2016；Lapointe et al.，2016）。施氮后梨树幼苗中必需氨基酸及非必需氨基酸含量显著增加，造成中国梨喀木虱取食活动及体重的增加，提高了其在宿主植物上的适应性（Qin et al.，2024）。Fotirić Akšić et al.（2015）研究发现沙梨*Pyrus pyrifolia*叶片中富含对羟基苯甲酸、阿魏酸、七叶苷水合物和柚皮苷等酚类化合物，阿魏酸与七叶苷水合物的协同积累可干扰木虱消化酶活性，而柚皮苷则可通过GR触发拒食反应。另外，次生物质在抗性品种中的特异性积累可通过味觉干扰影响木虱对寄主的取食行为（Sharma & Raman，2017），山梨糖醇作为韧皮部主要糖分通过GR促进取食适应性，表明木虱通过味觉系统对寄主代谢物产生特异性响应（Gallinger，2020；Gallinger & Gross，2020）。此外，澳洲梳木虱寄主富含的甾醇类、甘油三酯和枸杞木虱寄主富含的甜菜碱等也通过被木虱味觉系统感知后进而影响其寄主选择、取食行为及适应性（Sharma & Raman.，2017；刘晓丽等，2018）。

3 木虱与其天敌的关系

目前有关木虱–天敌关系的研究主要集中在木虱天敌种类及天敌对不同木虱的控制效果方面。木虱的天敌种类丰富，已报道的木虱捕食性天敌种类主要包括瓢虫科、草蛉科、半翅目蝽类以及蜘蛛。在南宁市的调查发现，柑橘木虱自然天敌种类共有15种，其中昆虫纲天敌9种，蛛形纲天敌6种，主要的捕食性天敌包括六斑月瓢虫*Menochilus sexmaculata*、龟纹瓢虫*Propylea japonica*、双带盘瓢虫*Lemnia biplagiata*、粗网巧瓢虫*Oenopia chinensis*、异色瓢虫*Harmonia axyridis*和中华通草蛉*Chrysoperla sinica*等（白津铭等，2022）。南方小花蝽*Orius strigicollis*也可用于柑橘木虱的防控（Lin et al.，2023）。烟草恩盲蝽*Engytatus nicotianae*是马铃薯木虱的重要捕食性天敌，对马铃薯木虱若虫表现出明显的偏好性，尤其喜食1~3龄若虫。在温室条件下，单独释放烟草恩盲蝽能够有效控制番茄植株上马铃薯木虱的数量（Veronesi et al.，2022）。纹玛草蛉*Mallada signata*也是马铃薯木虱的有效捕食性天敌，其3龄幼虫在24 h内可捕食75头马铃薯木虱若虫（Zhou et al.，2024）。在温室中，每株番茄释放8头刚孵化的纹玛草蛉1龄幼虫，马铃薯木虱数量可减少64%（Zhou et al.，2024）。多异瓢虫*Hippodamia variegata*是马铃薯木虱的另一种重要捕食性天敌。当多异瓢虫以马铃薯木虱为食时，其发育和繁殖虽然不如以桃蚜*Myzus persicae*为食时表现好，但仍能有效控制木虱的数量（Sarkar et al.，2023）。在温室条件下，释放多异瓢虫幼虫可使马铃薯木虱若虫数量减少66%，成虫数量减少59%（Sarkar et al.，2023）。短齿爪盲蝽*Deraeocoris brevis*和二星瓢虫*Adalia bipunctata*是梨黄喀木虱的重要捕食性天敌，可以控制梨黄喀木虱种群在梨树生长后期的发生（DuPont et al.，2020；Krndija et al.，2024）。除了捕食性天敌外，寄生性天敌也对木虱种群发挥了重要的控制作用，木虱寄生蜂主要包括跳小蜂科、姬小蜂科、蚜小蜂科及金小蜂科寄生蜂（秦紫芳和石旺鹏，2021）。如柑橘木虱短胸姬小蜂*Tamarixia radiata*和阿里食虱跳小蜂*Diaphorencyrtus aligarhensis*（王竹红等，2019；白津铭等，2022）是柑橘木虱的主要寄生性天敌。个木虱短胸姬小蜂*Tamarixia triozae*是马铃薯木虱的主要寄生性天敌（Davidson et al.，2023）。枸杞木虱跳小蜂*Psyllaephagus arenarius*和枸杞木虱短胸姬小蜂*Tamarixia lyciumi*均能寄生枸

杞木虱若虫(巫鹏翔等,2017)。寄生蜂与烟草恩盲蝽组合使用对番茄上马铃薯木虱的控制效果显著优于单独使用其中一种天敌(Veronesi et al.,2022)。

有关木虱对天敌的适应性研究较少。例如,中国梨喀木虱若虫分泌大量黏稠的富含糖类及氨基酸的蜜露,覆盖在身体表面可形成"保护罩",减少天敌小花蝽*O. sauteri*的攻击频率(Ge et al.,2020)。

4 利用理化信息防控木虱的研究进展

本文对已报道的可调控寄主植物-木虱-天敌三级营养关系的化学信号物质进行了总结,发现疆梨喀木虱*Cacopsylla bidens*诱导的寄主植物挥发物对捕食性天敌如花蝽、草蛉有吸引作用(Valle et al.,2023)。疆梨喀木虱为害后,梨树挥发物组成发生变化,释放多种诱导挥发物,主要包括脂肪醛类(如壬醛、癸醛)、萜烯类(如*β*-石竹烯、(*E*,*E*)-*α*-法尼烯)以及芳香族化合物(如甲基水杨酸酯)等,其中甲基水杨酸酯和(*E*,*E*)-*α*-法尼烯出现频率最高,其在疆梨喀木虱为害后释放量显著增加,并对花蝽和草蛉具有较强的吸引作用,使它们能够更有效地寻找和捕食疆梨喀木虱(Valle et al.,2023)。

柑橘木虱若虫分泌的含糖蜜露黏附在柑橘枝叶上,能够吸引小麻臭蚁*Linepithema humile*前来取食;作为回报,蚂蚁主动攻击柑橘木虱短胸姬小蜂、草蛉等木虱天敌,形成"蜜露-保护"共生链,干扰天敌捕食行为(Hoddle et al.,2022)。木虱5龄若虫能释放十四醛和反-2-壬烯醛等挥发物,这些化合物能被柑橘木虱短胸姬小蜂的触角探测到,协助柑橘木虱短胸姬小蜂找到木虱若虫并将卵产入其体表,被寄生的木虱若虫逐渐干枯死亡(Liu et al.,2024)。

目前,基于通信信号的木虱防控技术已在木虱综合治理体系中发挥作用,利用木虱化学通信、视觉及触觉的多感官信号实现可持续性防治。在利用物理信号方面,可采用金属化聚乙烯地膜干扰木虱视觉(Yan et al.,2015),悬挂粘虫板诱杀成虫,也可通过土壤覆盖干扰若虫孵化(Echegaray et al.,2017),通过水枪冲洗蜜露进而减少若虫聚集(DuPont et al.,2021)。在生境调控措施方面,可采用间作驱避植物如橘-番石榴*Psidium guajava*间作趋避木虱,建设防护林带削弱木虱迁飞能力(Yan et al.,2015;Czarnobai De Jorge et al.,2024)。在生物防治方面,需重点保护天敌群落,如跳小蜂等寄生蜂(秦紫芳和石旺鹏,2021)。巴西采用"推-拉-杀"系统在果园边界种植柑橘木虱诱捕作物九里香,配合喷施矿物黏土颗粒膜,使柑橘树木虱数量较常规管理减少95%,显著阻断黄龙病传播链(Eduardo et al.,2023);美国华盛顿州梨黄喀木虱防治采用"选择用药+物理清除+天敌保护"策略,花前使用矿物油等选择性药剂,花后改用植物源农药,采用顶喷灌溉清除蜜露,并同步实施天敌保护来解决当地梨黄喀木虱的抗药性和季节晚期防控难题(DuPont et al.,2021)。我国冀东梨区木虱防治采用"农业清理为基础、生物保护为核心、化学防控为补充"策略,使用碱性洗涤剂溶解蜜露,并结合性信息素、糖醋液诱集等措施,通过狡微索跳小蜂*Trechnites insidiosus*和其他木虱跳小蜂属天敌实现对梨园害虫中国梨喀木虱等的综合治理(Gao et al.,2023)。综上,基于木虱的化学、视觉、触觉信号,将物理阻隔、化学信息调控与生物防治有机结合,并根据区域特点定制实施,在保证防治效果的同时降低化学农药依赖,为木虱防控提供了可持续解决方案。

5 展望

木虱科昆虫许多是世界性害虫,其不仅直接刺吸为害,而且很多种类可以传播危险性病原,若虫分泌蜜露引诱蚂蚁来保护自己进而引起霉污病,其生态关系涉及植物、木虱自身及天敌间的复杂通信机制。当前基于通信原理的综合防控策略主要包括两个方面,一方面是生物防治优化,即保护瓢虫、草蛉等天敌,结合信息素诱芯诱杀木虱,减少化学药剂对天敌的负面影响;另一方面是农业与化学措施协同,统一放梢缩短嫩梢暴露期,阻断木虱产卵信号;冬季清园期使用矿物油乳剂封闭越冬场所,降低虫源密度。总之,植物-木虱-天敌三者通信以化学信号为核心,优化天敌利用是可持续防控的关键。目前有关木虱种内关系的研究主要集中在性信息素在其种群调节中的作用,性信息素往往由雌虫释放并引诱雄虫前来交配,在生产中利用性信息素诱杀雄虫或者干扰其求偶,而雄虫释放的信息素往往可以吸引两性并起到聚集作用,引起木虱群集为害,在生产中利用雄虫释放的信息素来调节木虱种群密度可以获得更好的效果,应该加强这方面的研究。

当前木虱与植物之间关系的研究主要集中在植物挥发物对木虱寄主选择、定位和定殖的影响方面,这对明确木虱寄主特异性的机制十分重要,可以为生态调控木虱种群数量提供新思路。但是有关植物对木虱的抗性化学生态学机制研究较少,未来可加强这方面的研究,这对于利用抗性物质来防治木虱

具有重大意义。木虱与天敌之间的关系仅仅局限于天敌对木虱的捕食或者寄生能力，对于天敌如何高效寻找和捕获木虱的机制研究不多，加强这方面的研究对于提高天敌对木虱的防治效果十分重要。木虱与昆虫病原微生物之间的关系、木虱与植物内生菌之间的关系等方面的研究未来也需要加强，相关研究可以为木虱的绿色防控提供可靠的新方法和新技术。另外，要加强木虱对嗅觉、味觉、视觉、听觉信号感受分子机制的研究，可从分子角度为木虱的绿色防控提供新思路和新技术。

参 考 文 献（References）

Avosani S, Sullivan TES, Ciolli M, Mazzoni V, Suckling DM. 2020a. Vibrational communication and evidence for vibrational behavioural manipulation of the tomato potato psyllid, *Bactericera cockerelli*. Entomologia Generalis, 40(4): 351−363

Avosani S, Sullivan TE, Ciolli M, Mazzoni V, Suckling DM. 2020b. Can vibrational playbacks disrupt mating or influence other relevant behaviours in *Bactericera cockerelli* (Triozidae: Hemiptera)? Insects, 11(5): 299

Bai JM, Huang Y, Liao YM, Huang YM, Zhu WQ, Ren LY. 2022. Investigation into natural enemy species of *Diaphorina citri* in Nanning City. Journal of Southern Agriculture, 53(7): 1944−1952 (in Chinese) [白津铭, 黄元腾吉, 廖咏梅, 黄奕蔓, 朱文倩, 任立云. 2022. 南宁市柑橘木虱自然天敌种类调查. 南方农业学报, 53(7): 1944−1952]

Bazzaz A, Hassani MR, Tezerji ZS. 2019. Attraction of *Agonoscena pistaciae* (Hemiptera: Aphalaridae) to male or female psyllid in field condition. Journal of Entomological Research, 10(4): 55−63

Beloti VH, Santos F, Alves GR, Bento JMS, Yamamoto PT. 2017. Curry leaf smells better than citrus to females of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). Arthropod-Plant Interactions, 11(5): 709−716

Buchman JL, Sengoda VG, Munyaneza JE. 2011. Vector transmission efficiency of liberibacter by *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Triozidae) in zebra chip potato disease: effects of psyllid life stage and inoculation access period. Journal of Economic Entomology, 104(5): 1486−1495

Butler CD, Trumble JT. 2012. The potato psyllid, *Bactericera cockerelli* (Sulc) (Hemiptera: Triozidae): life history, relationship to plant diseases, and management strategies. Terrestrial Arthropod Reviews, 5(2): 87−111

Civolani S, Soroker V, Cooper WR, Horton DR. 2023. Diversity, biology, and management of the pear psyllids: a global look. Annals of the Entomological Society of America, 116(6): 331−357

Costa MG, Barbosa JC, Yamamoto PT, Leal RM. 2010. Spatial distribution of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) in citrus orchards. Scientia Agricola, 67(5): 546−554

Coutinho-Abreu IV, Forster L, Guda T, Ray A. 2014. Odorants for surveillance and control of the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*). PLoS ONE, 9(10): e109236

Czarnobai De Jorge B, Koßmann A, Hummel HE, Gross J. 2024. Evaluation of a push-and-pull strategy using volatiles of host and non-host plants for the management of pear psyllids in organic farming. Frontiers in Plant Science, 15: 1375495

Davidson M, Sachtleben T, MacDonald F, Watkins L, Barnes AM, Drayton G, Walker M. 2023. The establishment and spread of *Tamarixia triozae*, a parasitoid of the potato psyllid, in New Zealand. BioControl, 68(4): 363−373

DuPont ST, John Strohm C. 2020. Integrated pest management programmes increase natural enemies of pear psylla in Central Washington pear orchards. Journal of Applied Entomology, 144(1/2): 109−122

DuPont ST, Strohm C, Nottingham L, Rendon D. 2021. Evaluation of an integrated pest management program for central Washington pear orchards. Biological Control, 152: 104390

Echegaray ER, Vinchesi AC, Rondon SI, Alvarez JM, McKinley N. 2017. Potato psyllid (Hemiptera: Triozidae) response to insecticides under controlled greenhouse conditions. Journal of Economic Entomology, 110(1): 142−149

Eduardo WI, Silva AC, Volpe HXL, Alquézar B, Peña L, Miranda MP. 2023. Push-pull and kill strategy for *Diaphorina citri* control in citrus orchards. Entomologia Experimentalis et Applicata, 171(4): 287−299

Fernandez F. 2020. Bioacoustic trapping methods for the Asian citrus psyllid. Master thesis. Pomona: California State Polytechnic University

Foster SP, Anderson KG. 2022. Some factors influencing calling behavior and mass emission rate of sex pheromone from the gland of the moth *Chloridea virescens*. Journal of Chemical Ecology, 48 (2): 141−151

Fotirić Akšić MM, Dabić DČ, Gašić UM, Zec GN, Vulić TB, Tešić ŽL, Natić MM. 2015. Polyphenolic profile of pear leaves with different resistance to pear psylla (*Cacopsylla pyri*). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63(34): 7476−7486

Gallinger J. 2020. Influence of primary and secondary plant metabolites on the migration and feeding behavior of *Cacopsylla pruni*, the vector of European stone fruit yellows. PhD thesis. Dossenheim: Julius Kühn-Institut

Gallinger J, Gross J. 2020. Phloem metabolites of *Prunus* sp. rather than infection with candidatus phytoplasma prunorum influence feeding behavior of *Cacopsylla pruni* nymphs. Journal of Chemical Ecology, 46(8): 756−770

Ganassi S, Germinara GS, Pati S, Civolani S, Cassanelli S, Sabatini MA, De Cristofaro A. 2018. Evidence of a female-produced sex pheromone in the European pear psylla, *Cacopsylla pyri*. Bulletin of Insectology, 71(1): 57−64

Gao LJ, Li LF, Ji MH, Xu JT, Hao BF. 2023. Occurrence and integrated control of *Psylla chinensis* in eastern Hebei Province. Plant Diseases & Pests, 14(1): 14

Ge Y, Liu PP, Zhang L, Snyder WE, Smith OM, Shi WP. 2020. A sticky

situation: honeydew of the pear psylla disrupts feeding by its predator *Orius sauteri*. Pest Management Science, 76(1): 75−84

Ge Y, Smith OM, Chen WL, Liu PP, Yuan QJ, Kang CZ, Wang TL, Sun JH, Yan BB, Liu XL, et al. 2022. Morphological characterization and sexual dimorphism of the antennal sensilla in *Bactericera gobica* Loginova (Hemiptera: Psyllidae): a scanning and transmission electron microscopic study. PeerJ, 10: e12888

George J, Kanissery R, Bashyal M, Tamayo B, Stelinski LL. 2022. Survival and feeding behavior of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) adults on common cover crops in citrus. Agriculture, 12(12): 2175

George J, Robbins PS, Alessandro RT, Stelinski LL, Lapointe SL. 2016. Formic and acetic acids in degradation products of plant volatiles elicit olfactory and behavioral responses from an insect vector. Chemical Senses, 41(4): 325−338

Gross J, Gallinger J, Görg LM. 2022. Interactions between phloem-restricted bacterial plant pathogens, their vector insects, host plants, and natural enemies, mediated by primary and secondary plant metabolites. Entomologia Generalis, 42(2): 185−215

Guédot C, Horton DR, Landolt PJ. 2010. Sex attraction in *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Triozidae). Environmental Entomology, 39(4): 1302−1308

Guédot C, Millar JG, Horton DR, Landolt PJ. 2009. Identification of a sex attractant pheromone for male winterform pear psylla, *Cacopsylla pyricola*. Journal of Chemical Ecology, 35(12): 1437−1447

Hoddle MS, Hoddle CD, Morgan DJW, Milosavljević I. 2022. Successful biological control of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, in California//Van Driesche RG, Winston RL, Perring TM, Lopez VM. Contributions of classical biological control to the U.S. Food security, forestry, and biodiversity. Morgantown, West Virginia: USDA Forest Service, pp. 127−143

Horton DR, Guédot C, Landolt PJ. 2008. Attraction of male summerform pear psylla to volatiles from female pear psylla: effects of female age, mating status, and presence of host plant. Canadian Entomologist, 140(2): 184−191

Jocson DMI, Gonzales MT, Horton DR, Nottingham LB, Beers EH, Oeller LC, Crowder DW. 2023. Characterizing substrate-borne vibrational mating signals produced by pear psylla, *Cacopsylla pyricola* (Hemiptera: Psyllidae). Journal of Insect Behavior, 36(4): 267−276

Kalepu R, Hassan M, Mohd Assa' ad N, Abdul Hamid AA, Nor Muhammad NA. 2024. Insights of the *Rhynchophorus ferrugineus* chemosensory system towards controlling its palm infestation problem: progress from omics research and technologies. International Journal of Tropical Insect Science, 44(3): 1021−1035

Kristoffersen L, Hallberg E, Wallén R, Anderbrant O. 2006. Sparse sensillar array on *Trioza apicalis* (Homoptera, Triozidae) antennae: an adaptation to high stimulus levels? Arthropod Structure & Development, 35(2): 85−92

Kristoffersen L, Larsson MC, Anderbrant O. 2008. Functional characteristics of a tiny but specialized olfactory system: olfactory receptor neurons of carrot psyllids (Homoptera: Triozidae). Chemical Senses, 33(9): 759−769

Krndija J, Ivezić A, Sarajlić A, Barošević T, Kuzmanović B, Petrović K, Stojačić I, Trudić B. 2024. Natural enemies of the pear psylla, *Cacopsylla pyri* (Hemiptera: Psyllidae), and the possibilities for its biological control: a case study review in the western Balkan countries. Agronomy, 14(4): 668

Krysan JL. 1990. Laboratory study of mating behavior as related to diapause in overwintering *Cacopsylla pyricola* (Homoptera: Psyllidae). Environmental Entomology, 19(3): 551−557

Lapointe SL, Hall DG, George J. 2016. A phagostimulant blend for the Asian citrus psyllid. Journal of Chemical Ecology, 42(9): 941−951

Li HL, Zheng XL, Huang ZY, Lu W. 2020. Review of reproductive behavior in *Diaphorina citri* (Kuwayama) (Homoptera: Liviidae). Journal of Plant Diseases and Protection, 127(5): 601−606

Liao YC, Huang SS, Yang MM. 2016. Substrate-borne signals, specific recognition, and plant effects on the acoustics of two allied species of *Trioza*, with the description of a new species (Psylloidea: Triozidae). Annals of the Entomological Society of America, 109(6): 906−917

Liao YC, Percy DM, Yang MM. 2022. Biotremology: vibrational communication of Psylloidea. Arthropod Structure & Development, 66: 101138

Liao YC, Yang MM. 2015. Acoustic communication of three closely related psyllid species: a case study in clarifying allied species using substrate-borne signals (Hemiptera: Psyllidae: *Cacopsylla*). Annals of the Entomological Society of America, 108(5): 902−911

Lin T, Guo YQ, Hu JF, Rao WH, Wei H, Chen XY, Yang G, Fan GC. 2023. Toxicity risk assessment of flupyradifurone for the predatory pirate bug, *Orius strigicollis* (Poppius) (Heteroptera: Anthocoridae), a biological control agent of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Ecotoxicology and Environmental Safety, 267: 115632

Liu QZ, Tian BL, Shi WP, Liu ZL, Zhou HY. 2015. A method of attracting pear psyllid nymphs: CN105010400A. 2015-11-04 (in Chinese) [刘奇志, 田宝良, 石旺鹏, 刘志龙, 周海鹰. 2015. 一种诱集梨木虱若虫的方法: CN105010400A. 2015-11-04]

Liu S, Li JL, Yang MK, Qiao HL, Guo K, Xu R, Xu CQ, Chen J. 2020. Influence of *Bactericera gobica* Loginova on growth of *Lycium barbarum* L. Modern Chinese Medicine, 22(5): 715−719, 728 (in Chinese) [刘赛, 李建领, 杨孟可, 乔海莉, 郭昆, 徐荣, 徐常青, 陈君. 2020. 枸杞木虱对宁夏枸杞生长的影响. 中国现代中药, 22(5): 715−719, 728]

Liu XL, Li F, Li XL, Ma JG. 2018. Relationships between host plant selection of *Paratrioza sinica* and host plant physical characteristics and secondary plant compounds. Jiangsu Agricultural Sciences, 46(5): 88−91 (in Chinese) [刘晓丽, 李锋, 李晓龙, 马建国. 2018. 枸杞木虱寄主选择性与寄主物理性状及次生物质的关系. 江苏农业科学, 46(5): 88−91]

Liu XQ, Jiang HB, Fan JY, Liu TY, Meng LW, Liu Y, Yu HZ, Dou W, Wang JJ. 2021. An odorant-binding protein of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, participates in the response of host plant volatiles. Pest Management Science, 77(7): 3068−3079

Liu YM, Huang YY, Wang FF, Hu YW, Zhang ZL, Cuthbertson AGS, Qiu BL, Sang W. 2024. Electrophysiological and behavioral responses of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae) to volatiles of nymphal *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). Journal of Insect Science, 24(3): 23

Liu ZH, Ge Y, Zhang ZK, Liang JY, Kang CZ, Zhang CC, Chen K, Wan XF, Zhang L, Shi WP, et al. 2025. Transcriptome screening and identification of chemosensory genes in the goji berry psyllid, *Bactericera gobica* (Hemiptera: Psyllidae). Biology, 14(8): 1105

Lubanga UK, Guédot C, Percy DM, Steinbauer MJ. 2014. Semiochemical and vibrational cues and signals mediating mate finding and courtship in Psylloidea (Hemiptera): a synthesis. Insects, 5(3): 577−595

Lujo S, Hartman E, Norton K, Pregmon EA, Rohde BB, Mankin RW. 2016. Disrupting mating behavior of *Diaphorina citri* (Liviidae). Journal of Economic Entomology, 109(6): 2373−2379

Luo HY, Tang XA, Deng YC, Deng ZY, Liu MX. 2023. The extraction and identification of active components of the sex pheromones of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. Pesticide Biochemistry and Physiology, 192: 105421

Ma J. 2017. Harmful characteristics and control techniques of *Paratrioza sinica*. Rural Science and Technology, (5): 54−55 (in Chinese) [马娟 . 2017. 枸杞木虱的危害特点及防治技术 . 乡村科技, (5): 54−55]

Mankin RW, Rohde B, McNeill S. 2015. Vibrational duetting mimics to trap and disrupt mating of the devastating Asian citrus psyllid insect pest. Proceedings of Meetings on Acoustics, 25(1): 010006

Mankin RW, Rohde BB, McNeill SA, Paris TM, Zagvazdina NI, Greenfeder S. 2013. *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) responses to microcontroller-buzzer communication signals of potential use in vibration traps. Florida Entomologist, 96(4): 1546−1555

Mann RS, Rouseff RL, Smoot J, Rao N, Meyer WL, Lapointe SL, Robbins PS, Cha D, Linn CE, Webster FX, et al. 2013. Chemical and behavioral analysis of the cuticular hydrocarbons from Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. Insect Science, 20(3): 367−378

Mayer CJ, Vilcinskas A, Gross J. 2011. Chemically mediated multitrophic interactions in a plant-insect vector-phytoplasma system compared with a partially nonvector species. Agricultural and Forest Entomology, 13(1): 25−35

Mayo-Hernández J, Ramírez-Chávez E, Molina-Torres J, Guillén-Cisneros MD, Rodríguez-Herrera R, Hernández-Castillo F, Flores-Olivas A, Valenzuela-Soto JH. 2019. Effects of *Bactericera cockerelli* herbivory on volatile emissions of three varieties of *Solanum lycopersicum*. Plants, 8(11): 509

Mustafa T, Horton DR, Cooper WR, Zack RS, Thinakaran J, Karasev AV, Munyaneza JE. 2021. Stylet probing behavior of two *Bactericera* (Hemiptera: Psylloidea: Triozidae) species on host and nonhost plants. Environmental Entomology, 50(4): 919−928

Olaniyan O, Rodríguez-Gasol N, Cayla N, Michaud E, Wratten SD. 2020. *Bactericera cockerelli* (Sulc), a potential threat to China's potato industry. Journal of Integrative Agriculture, 19(2): 338−349

Onagbola EO, Meyer WL, Boina DR, Stelinski LL. 2008. Morphological characterization of the antennal sensilla of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), with reference to their probable functions. Micron, 39(8): 1184−1191

Ouvrard D, Burckhardt D, Soulier-Perkins A, Bourgoin T. 2008. Comparative morphological assessment and phylogenetic significance of the wing base articulation in Psylloidea (Insecta, Hemiptera, Sternorrhyncha). Zoomorphology, 127(1): 37−47

Patt JM, Sétamou M. 2010. Responses of the Asian citrus psyllid to volatiles emitted by the flushing shoots of its rutaceous host plants. Environmental Entomology, 39(2): 618−624

Percy DM, Taylor GS, Kennedy M. 2006. Psyllid communication: acoustic diversity, mate recognition and phylogenetic signal. Invertebrate Systematics, 20(4): 431−445

Polajnar J, Eriksson A, Rossi Stacconi MV, Lucchi A, Anfora G, Virant-Doberlet M, Mazzoni V. 2014. The process of pair formation mediated by substrate-borne vibrations in a small insect. Behavioural Processes, 107: 68−78

Polajnar J, Kvinikadze E, Harley AW, Malenovský I. 2024. Wing buzzing as a mechanism for generating vibrational signals in psyllids (Hemiptera: Psylloidea). Insect Science, 31(5): 1466−1476

Prager SM, Esquivel I, Trumble JT. 2014. Factors influencing host plant choice and larval performance in *Bactericera cockerelli*. PLoS ONE, 9(4): e94047

Qi QM, Li QR, Guo QY. 2021. Bioinformatics analysis of ORCO gene and its coding protein of *Paratrioza sinica*. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 25(1): 96−102, 109 (in Chinese) [祁全梅, 李秋荣, 郭青云 . 2021. 枸杞木虱ORCO基因及其编码蛋白的生物信息学分析 . 河北农业科学, 25(1): 96−102, 109]

Qin ZF, Ge Y, Jia WT, Zhang L, Feng MY, Huang XZ, Fu Z, Shi WP. 2024. Nitrogen fertilization enhances growth and development of *Cacopsylla chinensis* by modifying production of ferulic acid and amino acids in pears. Journal of Pest Science, 97(3): 1417−1431

Qin ZF, Shi WP. 2021. Research status and prospect on the parasitoids of psyllids. Chinese Journal of Biological Control, 37(5): 1082−1089 (in Chinese) [秦紫芳, 石旺鹏 . 2021. 木虱寄生蜂研发现状及趋势 . 中国生物防治学报, 37(5): 1082−1089]

Sarkar SC, Milroy SP, Xu W. 2023. Potential of variegated lady beetle *Hippodamia variegata* in management of invasive tomato potato psyllid *Bactericera cockerelli*. Pest Management Science, 79(2): 821−832

Sétamou M, Flores D, French JV, Hall DG. 2008. Dispersion patterns and sampling plans for *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. Journal of Economic Entomology, 101(4): 1478−1487

Sharma A, Raman A. 2017. Feeding biology and nutritional physiology of Psylloidea (Insecta: Hemiptera): implications in host-plant relations. Current Science, 113(8): 1543−1552

Shuai WZ, Xia WX, Mei QQ, Rong LQ. 2025. Cloning, expression, and bioinformatics analysis of odorant receptor genes in *Paratrioza sinica*. CABI Agriculture and Bioscience, 6(1): 0004

Silva MS, Patt JM, de Jesus Barbosa C, Fancelli M, Mesquita PRR, de Medeiros Rodrigues F, Schnadelbach AS. 2023. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) responses to plant-

associated volatile organic compounds: a mini-review. Crop Protection, 169: 106242

Soroker V, Talebaev S, Harari AR, Wesley SD. 2004. The role of chemical cues in host and mate location in the pear *Psylla cacopsylla* Bidens (Homoptera: Psyllidae). Journal of Insect Behavior, 17(5): 613−626

Thinakaran J, Pierson EA, Longnecker M, Tamborindeguy C, Munyaneza JE, Rush CM, Henne DC. 2015. Settling and ovipositional behavior of *Bactericera cockerelli* (Hemiptera: Triozidae) on solanaceous hosts under field and laboratory conditions. Journal of Economic Entomology, 108(3): 904−916

Valle D, Mujica V, Gonzalez A. 2023. Herbivore-dependent induced volatiles in pear plants cause differential attractive response by lacewing larvae. Journal of Chemical Ecology, 49(5): 262−275

Vandermoten S, Mescher MC, Francis F, Haubruge E, Verheggen FJ. 2012. Aphid alarm pheromone: an overview of current knowledge on biosynthesis and functions. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 42(3): 155−163

Veronesi ER, Saville DJ, van Koten C, Wratten SD, Goldson SL. 2022. Potential of the mirid bug, *Engytatus nicotianae*, for the biological control of the tomato-potato psyllid in greenhouses. Crop Protection, 156: 105941

Wan JY, Zhou L, Zhang QW, Xu HL. 2013. Extraction and GC-MS identification of sex pheromone components from winterform adults *Cacopsylla chinensis* (Yang et Li). Journal of China Agricultural University, 18(2): 79−85 (in Chinese) [万津瑜, 周玲, 张青文, 徐环李. 2013. 中国梨木虱冬型成虫性信息素成分的提取和GC-MS鉴定. 中国农业大学学报, 18(2): 79−85]

Wang H, Ding F, Zhong Y, Jiang B, Yi GJ, Wang GP. 2011. The selectivity of *Diaphorina citri* to *Carmona microphylla* and Rutaceae hosts, and its tolerance to starvation and thirstiness. Journal of Plant Protection, 38(3): 283−284 (in Chinese) [王辉, 丁芳, 钟云, 姜波, 易干军, 王国平. 2011. 柑橘木虱对福建茶和芸香科植物的选择性及其耐饥渴能力. 植物保护学报, 38(3): 283−284]

Wang ZH, Li PL, Ge JQ, Zheng HN, Zhou JH, Huang J. 2019. Surveying for parasitoid wasps of *Diaphorina citri* Kuwayama and description of a new wasp species. Chinese Journal of Biological Control, 35(4): 504−516, 547 (in Chinese) [王竹红, 李鹏雷, 葛均青, 郑卉娜, 周军辉, 黄建. 2019. 柑橘木虱寄生性天敌调查及一新种记述. 中国生物防治学报, 35(4): 504−516, 547]

Wenninger EJ, Stelinski LL, Hall DG. 2009. Roles of olfactory cues, visual cues, and mating status in orientation of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) to four different host plants. Environmental Entomology, 38(1): 225−234

Wu HC, Bai PH, Liu BS, Hu RR, Fu QW, Zu GH. 2023. Types and distribution characteristics of sensilla of *Cacopsylla chinensis* adults. China Fruits, (10): 95−101 (in Chinese) [吴海朝, 白鹏华, 刘宝生, 胡瑞瑞, 伏倩文, 祖国浩. 2023. 中国梨喀木虱成虫感器类型与分布特征. 中国果树, (10): 95−101]

Wu PX, Ma BX, Xu J, Zhang R, He J, Zhang RZ. 2017. Parasitic biological characteristics of *Psyllaephagus arenarius* (Hymenoptera: Encyrtidae) on *Paratrioza sinica* (Hemiptera: Psyllidae). Acta Entomologica Sinica, 60(4): 431−440 (in Chinese) [巫鹏翔, 马宝旭, 徐婧, 张蓉, 何嘉, 张润志. 2017. 沙地木虱跳小蜂对枸杞木虱的寄生生物学特性. 昆虫学报, 60(4): 431−440]

Wu TY, Zhang XY, Beattie GAC, Cen YJ. 2020. Comparison of feeding behaviors and pathogen acquisition rates of adults and the 5th instar nymphs of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) on huanglongbing-infected citrus plants. Acta Entomologica Sinica, 63(2): 166−173 (in Chinese) [乌天宇, 张旭颖, Beattie GAC, 岑伊静. 2020. 亚洲柑橘木虱成虫和5龄若虫在感染黄龙病的柑橘上的取食行为及获菌效率比较. 昆虫学报, 63(2): 166−173]

Wu ZZ, Zhang H, Bin SY, Chen L, Han QX, Lin JT. 2016. Antennal and abdominal transcriptomes reveal chemosensory genes in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. PLoS ONE, 11(7): e0159372

Xu JW, Zhu XY, Chao QJ, Zhang YJ, Yang YX, Wang RR, Zhang Y, Xie MZ, Ge YT, Wu XL, et al. 2019. Chemosensory gene families in the oligophagous pear pest *Cacopsylla chinensis* (Hemiptera: Psyllidae). Insects, 10(6): 175

Yan HX, Zeng JW, Zhong GY. 2015. The push-pull strategy for citrus psyllid control. Pest Management Science, 71(7): 893−896

Yasuda K, Kawamura F, Oishi T. 2005. Location and preference of adult Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae) on Chinese box orange jasmine, *Murraya exotica* L. and flat lemon, *Citrus depressa*. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 49(3): 146−149

Yuvaraj JK, Andersson MN, Steinbauer MJ, Farnier K, Anderbrant O. 2013. Specificity and sensitivity of plant odor-detecting olfactory sensory neurons in *Ctenarytaina eucalypti* (Sternorrhyncha: Psyllidae). Journal of Insect Physiology, 59(5): 542−551

Zanardi OZ, Volpe HXL, Favaris AP, Silva WD, Luvizotto RAG, Magnani RF, Esperança V, Delfino JY, de Freitas R, Miranda MP, et al. 2018. Putative sex pheromone of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, breaks down into an attractant. Scientific Reports, 8: 455

Zhang H, Chen JL, Lin JH, Lin JT, Wu ZZ. 2020. Odorant-binding proteins and chemosensory proteins potentially involved in host plant recognition in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. Pest Management Science, 76(8): 2609−2618

Zhao LL, Gao X, Xue F, Ji JY, Wei MF, Ma RY. 2024. Adaptability of the winter form of Chinese pear psylla *Cacopsylla chinensis* on six non-host overwintering plants. Journal of Plant Protection, 51(3): 592−599 (in Chinese) [赵龙龙, 高欣, 薛涪, 冀佳悦, 魏明峰, 马瑞燕. 2024. 中国梨喀木虱对六种非寄主越冬植物的适应性. 植物保护学报, 51(3): 592−599]

Zhong ZF, Zhou XJ, Lin JB, Liu XJ, Shao J, Zhong BL, Peng T. 2019. Effects of leaf colorness, pigment contents and allelochemicals on the orientation of the Asian citrus psyllid among four Rutaceae host plants. BMC Plant Biology, 19(1): 254

Zhou N, Sarkar SC, Hoyle F, Xu W. 2024. Evaluation of the green lacewing, *Mallada signatus* as a biological control agent for the invasive tomato potato psyllid, *Bactericera cockerelli*. Journal of Applied Entomology, 148(7): 738−745

（责任编辑：李美娟）