二十一世纪我国昆虫化学生态学研究进展与展望*

李静静** 赵晨晨 何海芳 汤清波*** 闫凤鸣***

（河南农业大学植物保护学院，河南农业大学化学生态学研究所，郑州 450046）

摘 要 化学生态学是一门探讨生物间化学通讯机制及其实际应用的交叉学科。进入 21 世纪以来，我国化学生态学在理论、方法和技术层面均取得了长足进展，展现出研究维度多元化、研究方法综合化以及研究成果应用化的新趋势，并在以下关键领域取得系列重要成果：（1）昆虫信息素的鉴定、功能解析及调控机制；（2）昆虫嗅觉和味觉感受机制；（3）微生物组介导的昆虫适应性进化；（4）化学信号调控的昆虫对环境的生态适应机制。在应用上，研发了一系列基于化学生态学原理的绿色产品，助推了一批高科技企业的孵化，为有效解决农林生产中的实际问题提供了创新方案。随着生物技术、人工智能、大数据与合成生物学等前沿技术的深度交叉融合，化学生态学研究有望在推动服务国家粮食安全、生物多样性保护与农业绿色可持续发展方面开辟更广阔的前景。

关键词 化学生态学；进展；重要成果；应用；展望

Advances and prospects of insect chemical ecology in China in the 21st century

LI Jing-Jing** ZHAO Chen-Chen HE Hai-Fang TANG Qing-Bo*** YAN Feng-Ming***

(Institute of Chemical Ecology, College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract Chemical ecology is an interdisciplinary science that studies the mechanisms underlying chemical communication between organisms, as well as the practical applications of these. Since the beginning of the new century, research on the theories and technologies of chemical ecology in China has progressed rapidly, demonstrating new trends such as diversified research dimensions, integrated research approaches, and the application-oriented research goals. Important progress has been made in: (1) The identification of insect pheromones and determining their function and underlying regulatory mechanisms; (2) Understanding the mechanisms underlying insect olfactory and gustatory perception; (3) Understanding microbe-mediated adaptive mechanisms in insects; and (4) Understanding the ecological adaptation of insects to their environment mediated by chemical substances. With respect to the practical application of chemical ecology, a range of products have been developed, numerous high-tech enterprises have been started, and several issues in agricultural and forestry production have been addressed. With advances in biotechnology, artificial intelligence, big data, synthetic biology, and other scientific technologies, the field of chemical ecology is poised to have an even more vibrant future.

Key words chemical ecology; progress; key achievements; applications; prospects

化学生态学（Chemical ecology）是一门典型的交叉融合学科。自从 20 世纪 50 年代末诞生以来，其研究范畴和手段随着社会需要和科技进步持续拓展和革新（闫凤鸣等, 2025）。进入 21

*资助项目 Supported projects：河南省自然科学基金重点科学基金项目（232300421110）；河南省科技攻关项目（252102110221, 242102111091）；国家自然科学基金项目（31672367, 31901886）

**第一作者 First author，E-mail：jjli@henau.edu.cn

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：qbtang@henau.edu.cn；fmyan@henau.edu.cn

收稿日期 Received：2025-07-30；接受日期 Accepted：2025-08-27

世纪以来，借助生物技术、分子技术、多组学和人工智能技术的广泛应用，该学科在我国迎来了革命性发展，我国科技工作者在相关理论和应用研究中作出了一系列国际瞩目的贡献。本文旨在回顾化学生态学的发展历程，系统梳理 21 世纪以来我国昆虫化学生态学方面的理论和应用方面的特色、亮点，并就学科未来走向提出若干建议。

1　昆虫化学生态学的发展概况

化学生态学发展历程可以分为传统化学生态学阶段、分子生物学阶段和多组学应用阶段（李静静等, 2022），而我国的化学生态学研究水平，实现了从传统阶段的跟随，到分子阶段的并跑，再到组学阶段理论和应用方面的部分领先，显示出强劲的发展势头与创新潜力。

（1）传统化学生态学阶段（20 世纪 50 年代末-20 世纪 80 年代）：这个阶段以昆虫信息素的分离、鉴定、合成和应用为起点，随后植物与昆虫互作关系成为热点研究领域，植物次生物质的功能开始得到初步阐释。本阶段的研究奠定了整个化学生态学研究的理论和技术基础，气相色谱和液相色谱及质谱技术得到广泛应用，触角电位和单感器记录等电生理技术，风洞和各类嗅觉仪等行为测定技术得到了普遍运用（Barbier, 1976）。

（2）分子生物学应用阶段（20 世纪 90 年代-21 世纪初）：本阶段分子生物学技术被系统引入化学生态学，研究由个体与群落层面的现象描述深入到分子与细胞层面的因果机制。其中德国马克斯·普朗克学会（Max planck institute）及其相关团队，围绕植物诱导抗性、植物直接与间接防御以及三级营养关系取得一系列突破。研究焦点深入至分子层面，集中揭示了昆虫口腔分泌物中的激发子（如 Volicitin）、植物防御物质（如蛋白酶抑制剂）、次生物质代谢通路，以及乙烯、水杨酸和茉莉酸等关键信号传导途径（Seybold, 2004）。这一时期标志着学科从“化学现象的描写”迈向“机制性解析”，为随后的多组学时代与应用转化奠定了坚实基础。

（3）组学和大数据阶段（21 世纪初至今）：自从 2000 年公布人类基因组草图，基因组学和生物信息学得到了长足发展，测序技术日新月异，同时，蛋白组、转录组、代谢组、表观组等组学技术逐步成熟和得到广泛应用，为化学生态学提供了系统性的研究工具（Baudino *et al.*, 2016）。在更深层次上系统、全面和深入研究了昆虫化学感受机制、植物活性次生物质的生物合成及其作用机理、植物抗逆机理，揭示了生物之间化学联系及其遗传机理的全貌，为调控生物之间化学关系、生物行为和作物抗性奠定了基础。

我国科学工作者在化学生态学领域做了大量工作，为国际化学生态学研究与应用做出了突出贡献。我国从 20 世纪 60-70 年代开始就进行昆虫信息素和植物活性物质的鉴定、应用工作，取得了令国际社会瞩目的成就（杜家纬, 1988），并同步推进了相关理论构建（钦俊德, 1987）及发展战略方面的研究，研究范围不断扩展，从农林害虫到医学昆虫及水生昆虫，研究内容从信息素应用、昆虫与植物的关系扩展到三级营养关系等。近 20 年来，我国在化学生态学领域围绕信息化学物质的生态功能、化学感受（嗅觉/味觉）的分子基础、植物抗性物质的生物合成与调控、昆虫信息素的合成与信号调控、昆虫环境适应的化学生态机制，以及昆虫-植物-天敌-微生物多营养级互作的化学网络等方面，取得了一系列具有引领性的研究成果，持续拓展了学科的理论边界。上述理论突破与我国在昆虫信息素（Cui and Zhu, 2016）以及植物与微生物次生代谢物等绿色防控技术的开发与应用相互促进，共同为农林与卫生（病媒）害虫的绿色防控提供了关键支撑，推动形成了“理论-技术-应用”协同发展的良性格局。

2　新世纪我国化学生态学研究的新特点

进入 21 世纪后，我国化学生态学研究呈现出方向多元化、方法综合化和目标应用化的鲜明特征。

2.1　研究方向多元化

进入 21 世纪以来，我国化学生态学研究在

广度与深度上持续拓展，呈现以下三个显著特征：（1）研究体系趋于复杂化：研究焦点从早期的植物-昆虫二元互作关系，逐步拓展至植物-昆虫-天敌-微生物共同构成的多元化通讯网络（Huang *et al*., 2014; Sun *et al*., 2019, 2022; Li *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2022），并进一步延伸至地上-地下生态系统互作等新型领域；（2）研究对象不断深化与扩展：在昆虫性信息素方面，从早期的提取、鉴定和合成，逐步深入到其调控机制、生物合成途径与规模化应用（Cui and Zhu, 2016; Guo *et al*., 2020, 2022）；在植物代谢物质方面，从化学结构鉴定和行为调控功能，拓展至其在植物-昆虫互作、环境适应性及协同进化中的作用等（Sun *et al*., 2004; Huang *et al*., 2018; Yang *et al*., 2020a; Lu *et al*., 2021; Pan *et al*., 2021）；在昆虫共生微生物方面，从物种多样性、互作共生机制，到其对到宿主表型、多营养级互作及动植物免疫调控的深层机制（Yao, 2014; Yan *et al*., 2024）；（3）向医学领域积极延伸：研究系统从农业和林草昆虫，扩展至蚊、蜱等医学昆虫，聚焦其化学生态过程及对人类健康的影响（Zhang *et al*., 2022）。这些研究趋势表明，我国昆虫化学生态学已逐步形成纵横结合、多维度推进的立体化研究格局。

2.2 研究方法综合化

新世纪以来，我国化学生态学研究在方法上呈现出显著的交叉融合趋势。一方面，与分子生物学、基因组学、蛋白质组学、代谢组学等学科深度结合，从分子层面系统阐释生物间化学通讯的作用机制。例如，借助基因组学探讨昆虫对植物次生代谢物质的适应性进化，利用代谢组学揭示植物在环境胁迫下的次生代谢动态响应（Xia *et al*., 2021; Li *et al*., 2022）。另一方面，注重室内实验与野外研究的有机结合，既在实验室开展精细的化学分析、生理生化实验，也通过野外实地观测和长期定位实验，获取更真实、系统的生态数据（Huang *et al*., 2010）。

在技术手段上，随着数字 PCR、高效液相色谱、气相色谱-质谱联用、核磁共振、冷冻电子显微学等技术的广泛应用，我国化学生态工作者得以对生物体内关键信号分子与代谢物实现高灵敏、准确的定性定量，从而能够深入解析其高分辨率时空动态变化（Wang *et al*., 2024; Zhao *et al*., 2024）。此外，随着计算生物学和反向化学生态学技术的发展，构建了昆虫嗅觉受体蛋白结构与功能预测数据库，通过计算机模拟手段预测蛋白结构与化学配体的互作机制（Li *et al*., 2023; Xue *et al*., 2025），进一步推动化学生态学研究向精准化、机制化方向发展。

2.3 研究目标应用化

研究目标紧密对接需求导向，聚焦于通过解析害虫行为和生理的化学调控机制，靶向开发新型绿色农药和生物防治技术，以期减少化学农药依赖，降低环境压力，并提高农产品品质。具体应用路径包括并不局限于：利用昆虫性信息素进行害虫监测和诱捕；创制基于植物次生代谢物质的生物农药；运用生物技术手段增强作物抗性或干扰害虫行为。此外，对生物毒素、植物免疫诱抗物质等生物活性物质的深入探索，也能够为开发具有药用、保健等高价值生物产品提供科学依据，并能够推动生物资源的可持续利用（Sun *et al*., 2018; Jiang *et al*., 2020）。

3 我国化学生态学代表性研究成果

进入新世纪以来，随着现代生物技术以及相关科学研究手段的迅猛发展，我国化学生态学研究迎来了新的发展机遇，并在多个核心领域取得了系列重要突破。在昆虫信息素的鉴定、功能及调控机制、昆虫嗅觉和味觉的感受机制、微生物介导的昆虫适应性机制以及化学物质介导的昆虫与植物的互作关系等方面取得了很多成果，推动了学科的纵深发展。

3.1 昆虫信息素的鉴定、功能及调控机制

昆虫信息素是昆虫种内和种间通讯的重要化学媒介，可分为性信息素（Sex pheromone）、聚集信息素（Aggregation pheromone）、告警信息素（Alarm pheromone）、示踪信息素（Trail pheromone）和抗产卵信息素（Anti-oviposition pheromone）等，在昆虫的求偶、交配、觅食、

聚集、产卵、防御报警和种间识别等行为中发挥重要作用。对昆虫信息素的鉴定、调控机制解析以及开发与利用，是实现精准调控害虫行为、推动害虫绿色可持续防控发展的关键手段之一。

在昆虫性信息素研究方面，我国科学家取得了系列重要进展。全世界已鉴定和合成的昆虫性信息素或类似物有 2 000 余种，我国鉴定和合成的重要害虫的性信息素也有近百种（Cui and Zhu, 2016; Guo *et al*., 2020, 2022）。中国科学院分子植物科学卓越创新中心王四宝团队首次发现了二十七烷是雄性按蚊 *Anopheles coluzzii* 性信息素的主要成分，系统地揭示了按蚊婚飞交配受内源生物钟基因、外源光和温度信号协同调控的分子机制，阐述了按蚊两性求偶的化学通讯奥秘（Wang *et al*., 2021）。基于在化学生态前言领域取得的杰出成绩，王四宝研究员获得了国际化学生态学会（International Society of Chemical Ecology, ISCE）颁发的“西尔弗斯坦-西蒙尼奖”（Silverstein-Simeone Award）。此外，中国科学院动物研究所王琛柱团队、中国科学院西双版纳植物园谭恳团队、华中农业大学王满囷团队、河北大学魏建荣团队、中国林业科学研究院森林环境与保护研究所张真等团队先后鉴定出我国重大入侵害虫草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（Jiang *et al*., 2022）、点蜂缘蝽 *Riptortus pedestris*（Xu *et al*., 2021a）、金环胡蜂 *Vespa mandarinia*（Dong *et al*., 2022）、云斑天牛 *Batocera horsfieldi*、桃红颈天牛 *Aromia bungii*（Wang *et al*., 2018）等昆虫的性信息素，极大地推动了我国基于化学生态的害虫绿色防控策略的基础和应用研究。

在聚集信息素领域，中国科学院康乐院士团队的研究具有里程碑意义和巨大的应用价值。该团队先后划时代的揭示 4-乙烯基苯甲醚（4-Vinylanisole, 4VA）和苯乙腈（Phenylacetonitrile）分别是东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 的聚集信息素（Guo *et al*., 2020）和警戒信息素（Chang *et al*., 2023），并揭示了苯丙氨酸代谢通路是产生这些信息素和调控飞蝗散居型与群居型相关转变的关键“代谢开关”，阐述了该代谢流受飞蝗种群密度与捕食压力等生态因子的精准调控，通过多分支酶促反应生成功能各异的分子的精细调控途径，最终构建起“环境信号→代谢重编程→行为表型”的动态调控网络（图 1）（Guo and Kang, 2025）；在应用上，基于 4VA 前体结构以及与合成酶构效关系设计的小分子抑制剂 4-硝基苯酚（4-Nitrophenol, 4NP）能有效地抑制飞蝗的群聚行为，该最新研究成果于 2025 年 6 月发表在国际刊物《Nature》上（Guo *et al*., 2025），国际昆虫学会理事长 Walter S. Leal 称其将成为化学生态学的教科书式范例。

在报警信息素和示踪信息素方面，我国研究成果同样显著。中国农业科学院王桂荣团队揭示了(*E*)-β-法尼烯（*E*-β-farnesene, EBF）在植物、蚜虫及其天敌昆虫之间的三级营养级互作中的作用，发现不同来源的 EBF 具有不同的生态功能，蚜虫释放的 EBF 系蚜虫报警信息素，但是蚜虫取食诱导的植物源 EBF 能够吸引天敌大灰优蚜蝇 *Eupeodes corollae* 成虫，大灰优蚜蝇幼虫也能够利用蚜虫释放的 EBF 进行蚜虫定位（Wang *et al*., 2022）；进一步，该团队对 EBF 的不同来源、合成与释放机制，跨营养水平的信号接收模式以及进化关系进行了系统阐述，发表在 2025 年度的《昆虫学年评》（《Annual Review of Entomology》）上（图 2）（Wang *et al*., 2025）。河北大学陈立团队鉴定了我国重大入侵害虫红火蚁 *Solenopsis invicta* 示踪信息素的主要成分，其主要成分(*Z*, *E*)-α-法尼烯（*Z*, *E*-α-farnesene）还能够调控共生蚜虫的扩散行为和生殖行为，使它们之间的共生关系更加稳定（Xu *et al*., 2021b, 2023），进一步阐释了该入侵害虫的适应性机制。

3.2　昆虫嗅觉和味觉感受机制

我国学者近年来鉴定了多种昆虫的化学感受蛋白基因序列，包括昆虫的嗅觉感受和味觉感受相关蛋白的序列。结合化学生态学手段，分析了多个化学感受蛋白的表达特征，鉴定了其功能，解析了其生态意义。

在嗅觉感受机制方面，王桂荣研究员团队发现棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的气味受体 HarmOR42 及其他 11 个鳞翅目昆虫的直系同源 ORs 谱系基因在鳞翅目昆虫感知被子植物花香成分苯乙醛（Phenylacetaldehyde）的过程中起关

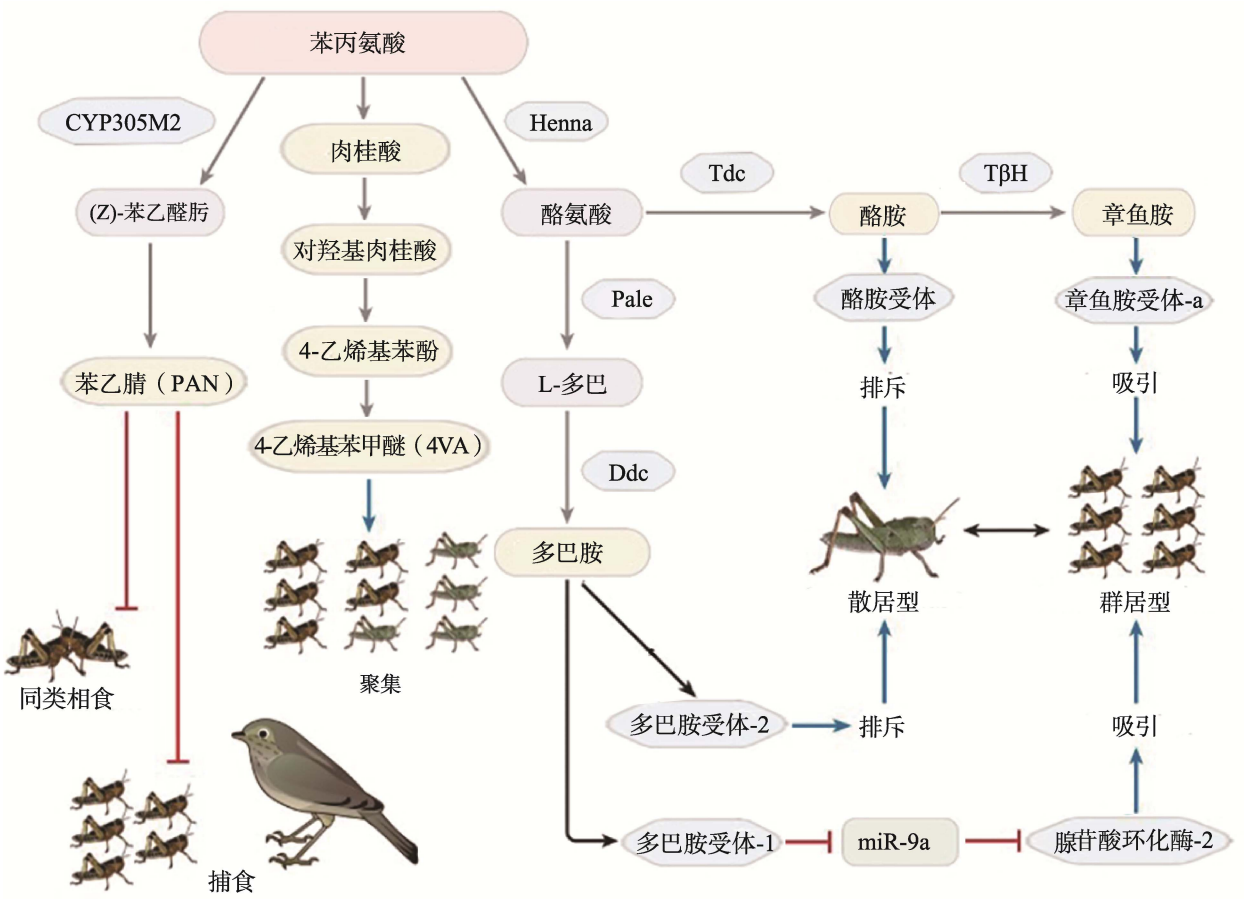

图 1　化学物质介导的飞蝗表型可塑变化及生态功能（Guo *et al*., 2025; Guo and Kang, 2025）

Fig. 1　Chemically mediated phenotypic plasticity changes and ecological functions in migratory locusts (Guo *et al*., 2025; Guo and Kang, 2025)

由苯丙氨酸衍生的多种神经递质与信息素共同构成一个控制蝗虫表型可塑性的复杂调控网络 Multiple neurotransmitters and pheromones from phenylalanine work together to form a complex regulatory network that controls the phenotypic plasticity of locusts. 苯丙氨酸：Phenylalanine；(Z)-苯乙醛肟：(Z)-PAOx；苯乙腈：Henylacetonitrile（PAN）； 4-乙烯基苯甲醚：4-Vinylanisole（4VA）：酪氨酸：Tyrosine；酪胺：Tyramine；章鱼胺：Octopamine；L-多巴：L-Dopa；多巴胺：Dopamine；酪胺受体：Tyramine receptor；章鱼胺受体-α：Octopamine receptor α；多巴胺受体-2：Dopamine receptor 2；多巴胺受体 1：Dopamine receptor 1；小 RNA-9a：miR-9a；腺苷酸环化酶-2：Adenylyl cyclase 2；肉桂酸：Cinnamic acid；对羟基肉桂酸：4-Coumaric acid；4-乙烯基苯酚：4-Vinylphenol；同类相食：Cannibalism；捕食：Predation；聚集：Aggregation；排斥：Repulsion：；吸引：Attraction；散居型：Solitary phase；群居型：Gregarious phase；PAN 合成关键限速酶：CYP305M2；苯丙氨酸羟化酶：Phenylalanine hydroxylase；酪胺脱羧酶：Tyrosine decarboxylase（Tdc）；酪胺 β-羟化酶：Tyramine b-hydroxylase（TβH）；酪氨酸羟化酶：Tyrosine hydroxylase（Pale）；多巴脱羧酶：Decarboxylase（Ddc）。

键作用，这些 ORs 与鳞翅目成虫的管状喙结构口器协同进化，促进并维持了这些昆虫与开花植物之间精密的适应性特征和生态互作关系（Guo *et al*., 2021）。雄性橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 强烈趋向寄主植物的挥发物甲基丁香酚，王桂荣研究团队鉴定出橘小实蝇一个特异嗅觉受体 OR94b1 介导对甲基丁香酚的识别，并发现在取食后通过代谢将甲基丁香酚转化为(*E*)-松柏醇，该物质能显著增强雄性橘小实蝇聚集求偶场对雌蝇的吸引力，从而提高繁殖成功率（Zhang *et al*., 2024a）。在种间互作中，大灰优蚜蝇和豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum* 分别利用 OR3（Wang *et al*., 2022）和 OR5（Zhang *et al*., 2017）来特异识别 EBF。尤为重要的是，王桂荣团队进一步解析了

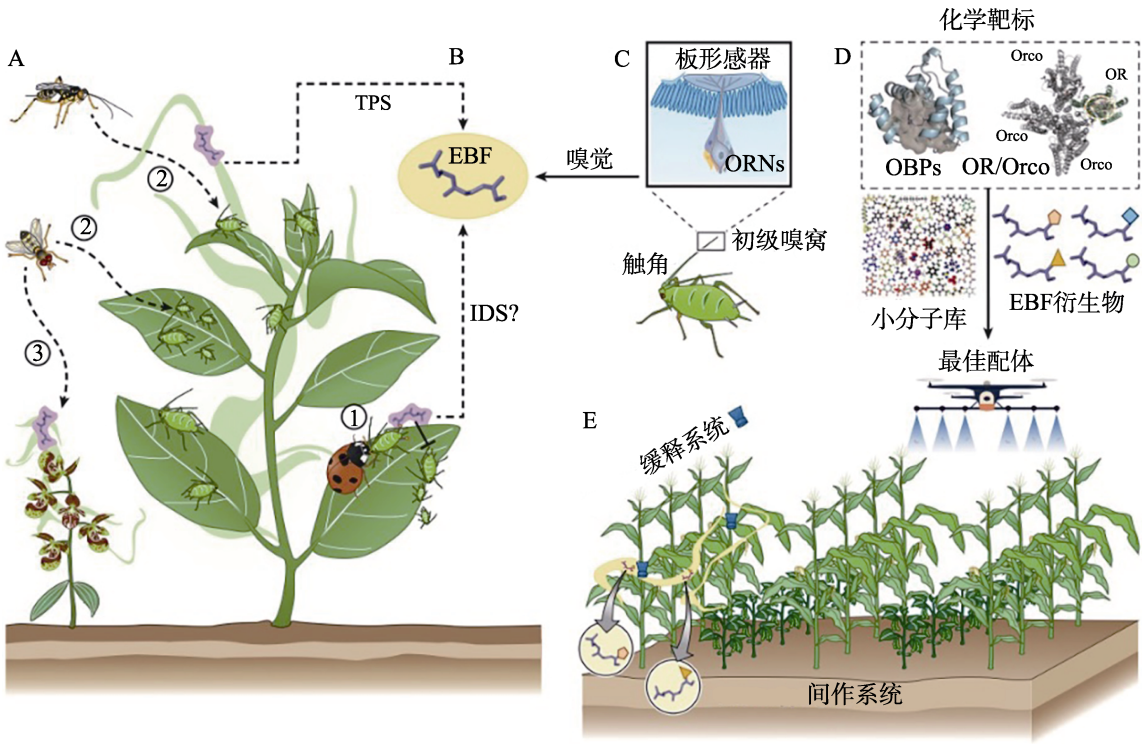

图 2　(*E*)-β-法尼烯的来源、生物合成、生态功能及应用（Wang *et al*., 2025）

Fig. 2　Origins, biosynthesis, ecological functions, and applications of (*E*)-β-farnesene (Wang *et al*., 2025)

A. (*E*)-β-法尼烯（EBF）的多种来源。EBF 既可作为蚜虫报警信息素（①），也是蚜虫取食诱导的植物挥发物（②），同时由模拟蚜虫报警信息素的花卉分泌（③）；B. 从植物到蚜虫的 EBF 生物合成。植物通过萜类合成酶合成 EBF，而蚜虫体内的合成途径尚不明确；C. EBF 激活蚜虫位于触角第 6 节原生感觉圈内的嗅觉受体神经元；D. 结构生物学与计算机模拟手段的发展促进了化学靶标的发现。通过对 EBF 的结构修饰，已设计合成出多种具有杀虫或驱虫活性的 EBF 衍生物。可通过计算机模拟进行分子对接和小分子库的高通量筛选以预测 OR 配体；E. 蚜虫综合治理策略。结合缓释系统、无人机喷洒系统和间作系统，可有效控制蚜虫种群并减少作物损害。

A. EBF from diverse sources. EBF acts as an aphid alarm pheromone (①), a herbivore-induced plant volatile (②), and is also emitted by flowers that mimick aphid alarm pheromones (③). B. Biosynthesis of EBF from plants to aphids. Plants synthesize EBF via terpene synthases, whereas the biosynthetic pathways in aphids remain elusive. C. EBF activates ORNs housed in the primary rhinaria on the 6th antennal segment. D. Advances in structural biology and in silico simulation methods have facilitated the discovery of chemical targets. Structural modifications of EBF have enabled the design and synthesis of diverse EBF derivatives with insecticidal or insect-repellent properties. In addition, molecular docking and high-throughput screening of small molecule libraries can be performed in silico to predict potential OR ligands. E. A multi-strategy approach for aphid control. An integrated pest management strategy—combining slow-release systems, UAV spray systems, and intercropping—can effectively suppress aphid populations and reduce crop damage. 缩写 Abbreviation：板形感器：Placoid sensillum；嗅觉受体神经元：Ororant receptor neurosn (ORNs)；化学靶标：Chemical targets；触角：Antenna；原生感觉圈：Primary rhinaria；(*E*)-β-法尼烯：EBF；萜类合成酶：Terpene synthases（TPS）；气味结合蛋白：Odorant-binding proteins（OBPs）；嗅觉共受体：Odorant receptor coreceptor（Orco）；嗅觉受体 5：Odorant receptor 5（OR5）；嗅觉：Olfaction；缓释系统：Slow-release systems；间作系统：Intercropping systems；异戊二烯基二磷酸合成酶：IDS；小分子库：Small molecule libraries；EBF 衍生物：EBF derivatives EBF；最佳配体：Best ligands；无人飞行器：UAV.

豌豆蚜 OR5 与其共受体 Orco 以 1∶3 比例形成 OR-Orco 复合物的组装模式，为驱避剂设计提供了结构基础（Wang *et al*., 2024, 2025）。

在味觉感受机制方面，王琛柱团队发现棉铃虫幼虫味觉受体 GR6、GR10、GR180 和 GR13 分别参与感知蔗糖、香豆素、肌醇等植物化合物

（Chen *et al*., 2022; Zhang *et al*., 2024c; Tan *et al*., 2025）。菜粉蝶 *Pieris rapae* 能够通过 GR28 感受其十字花科寄主特异次生代谢物质黑芥子苷（Yang *et al*., 2021）。小菜蛾 *Plutella xylostella* 则通过GR34感知抑制其取食和产卵的植物激素物质油菜素内酯（Yang *et al*., 2020b）。南京农业大学董双林团队则发现小菜蛾 3 个嗅觉受体能够特异识别其十字花科寄主特异次生物质芥子油苷降解产物（Liu *et al*., 2020b）。王桂荣团队发现棉铃虫雌虫下唇须中的 3 个味觉受体（GR1/2/3）能够共同介导寄主植物释放 CO_2 以感知产卵场所（Chen *et al*., 2025）。对于单食性昆虫家蚕 *Bombyx mori*，中国科学院分子植物科学卓越创新中心潭安江团队发现家蚕苦味受体基因 *GR66* 能够调控家蚕的取舍选择，*GR66* 突变体家蚕幼虫除了取食桑叶以外，还能够主动取食苹果、梨、玉米、大豆、花生等非寄主植物（Zhang *et al*., 2019），该研究为培育适合工厂化饲养的家蚕新品种提供了创新的理论基础。

3.3 微生物介导的昆虫适应性机制

昆虫与微生物在长期博弈和协同演化过程中形成了互利共生、致病寄生和免疫防御等多样的互作关系和调节机制，揭示这些机制能够为控制有害微生物和利用微生物调控害虫行为奠定科学基础。

在媒介昆虫-微生物-病原体互作领域，我国研究取得了突破性进展。例如蚊子是疟疾、登革热、寨卡热等多种疾病的传播媒介。清华大学基础医学院程功教授等团队发现埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 肠道共生菌粘质沙雷氏菌 *Serratia marcescens* 可辅助登革热病毒感染蚊虫肠道上皮细胞，提高蚊虫对病毒的易感性（Wu *et al*., 2019）。进一步，在白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 及埃及伊蚊的肠道中发现 1 种 *Rosenbergiella* 属的定殖细菌，该细菌可显著抑制伊蚊通过叮咬吸血感染登革病毒及寨卡病毒，这种共生菌通过分泌一种葡萄糖脱氢酶将吸血蚊虫肠道环境快速酸化，导致蚊虫肠道微环境重塑，使病毒颗粒进入脱衣壳的状态并失去感染活性。这为通过干预共生菌方式防控登革热等烈性蚊媒病毒传染病提供了全新的技术平台和工作思路（Zhang *et al*., 2024b）。

在抗疟研究方面，中国科学院分子植物科学卓越创新中心王四宝研究组通过代谢产物活性分析等手段在蚊虫体内成功分离出具有天然抗疟活性的共生细菌分泌物-脂肪酶蛋白 AmLip，并揭示出该抗疟效应蛋白是特异肠道共生菌通过胞外囊泡递送的模式靶向杀灭疟原虫的创新机制（Gao *et al*., 2021, 2023）；进一步，还发现了蚊虫肠道共生菌通过群体感应调控苯丙氨酸代谢以增强抗疟原虫感染的分子机制（Jiang *et al*., 2023）。

在微生物促进昆虫营养适应与入侵方面，研究同样成果显著。中国科学院动物研究所孙江华团队围绕红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 及其共生微生物开展系统研究，不仅揭示了红脂大小蠹与伴生真菌长梗细帚霉 *Leptographium procerum* 形成了一种共生入侵复合体（Lu *et al*., 2010），还进一步发现红脂大小蠹的肠道共生细菌能够通过调节肠道微环境及其代谢产物，维持“红脂大小蠹-共生入侵真菌”这一共生体系的稳定性（Lu *et al*., 2016; Liu *et al*., 2020a, 2024）。该研究深化了对入侵昆虫与多种共生微生物之间复杂互作关系的理解。

3.4 化学物质介导的昆虫对环境的生态适应

昆虫能够利用不同来源的化学物质以应对定位寄主、回避非寄主、定位猎物、驱避天敌、克服植物防御等挑战，我国科学家在该领域取得了系统性进展，从理论创新到机制解析均有重要突破。

在入侵生态学与种间互作方面，理论研究引领了国际前沿。河北大学的孙江华团队与中国科学院动物研究所的赵莉蔺团队揭示了信息化合物介导的松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 和红脂大小蠹入侵机制，首次提出并验证了“共生入侵”和“返入侵”假说，建立了虫菌“共生入侵”理论学说，提出了信息化合物介导的虫菌共生维持机制（Lu *et al*., 2010, 2016; Zhao *et al*.,

2016），构建了昆虫与植物关系中的跨四界化学信息互作模型（Cheng *et al*., 2018），研发并集成了以信息素推/拉控制技术为核心的松材线虫和红脂大小蠹监测、检疫、防控综合技术体系（Sun *et al*., 2013）。河南大学李云河团队发现了二化螟 *Chilo suppressalis* 与褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 协同调控水稻防御，实现兼性“互惠共存”种间关系机制，揭示了二者通过协同抑制水稻防御，实现种间“互利共存”的生化和分子机制（Liu *et al*., 2021, 2023）；在三级营养关系上，该团队还解析了稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum* 利用稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 卵诱导的植物挥发物远距离判断寄主卵质量以提升后代生存适合度的生存策略（Tian *et al*., 2025）、以及褐飞虱可“操纵”水稻挥发物诱使邻近稻株对褐飞虱更加感虫的机制（Yao *et al*., 2025）。

在行为适应与感知机制方面，研究深入到了神经感官层面。东方黏虫 *Mythimna separata* 偏好产卵于狭窄缝隙（如叶鞘或人工纸缝），这种狭缝产卵方式能有效防止赤眼蜂寄生虫卵。王桂荣团队发现东方黏虫寻找狭缝作为产卵地的关键在于雌蛾产卵器上的鬃毛——它们能通过压电蛋白 Piezo 感知机械压力来判断缝隙大小，当鬃毛或 Piezo 受损时，雌蛾会随机产卵，导致虫卵易被赤眼蜂寄生（Ma *et al*., 2025）。

在昆虫克服与操纵植物防御方面，机制研究不断深化。浙江大学娄永根团队长期围绕水稻诱导抗虫反应的分子机理及其生物学和生态学功能，剖析了茉莉酸、水杨酸、乙烯和 MAPK 等防御信号途径以及相关受体、转录因子在调控水稻诱导抗虫反应中的作用，鉴定了系列昆虫激发子/效应子，探索了水稻挥发物在影响水稻-害虫-天敌三级营养关系中的作用（Lu *et al*., 2018; Wang *et al*., 2020; Li *et al*., 2024）。华中农业大学王满囷团队则发现褐飞虱危害水稻后，会导致水稻中萜烯合成酶的表达量以及柠檬烯的释放量上升，显著抑制褐飞虱卵的孵化率及发生程度，增强了水稻对多种褐飞虱及其他一些病害的抵抗力（Qiu *et al*., 2025）。中国科学院分子科学卓越创新中心的李建彩团队及合作者揭示了专食性昆虫烟草天蛾 *Manduca sexta* 利用寄主中两种不同代谢通路的产物进行互相解毒的机制（Heiling *et al*., 2022），中国科学院昆明植物研究所吴建强团队揭示了玉米抗虫基因与玉米主要激素信号途径互作介导和调控玉米对害虫的直接防御与间接防御机制（Qi *et al*., 2016; Malook *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2021）。这些研究为我们理解昆虫-植物-天敌三者之间的关系以及利用化学物质调控植物的抗性提供了新的研究视角和理论支撑。

在地上-地下生态系统互作方面，研究展现了化学信号的系统性影响。河南大学的丁建清和孙晓团队发现地上昆虫与地下昆虫的互作关系能够影响植物叶部和根部昆虫的种群结构，进而影响地上地下生态系统的组成。该团队以乌桕 *Triadica sebifera* -红胸律点跳甲 *Bikasha collaris* 为研究系统，发现跳甲地下幼虫取食会引起乌桕的系统性防御反应，诱导叶部挥发物 2-乙基-己醇和壬醛的浓度变化，这种改变能够驱避另外一种取食乌桕的昆虫乌桕卷象 *Heterapoderopsis bicallosicollis*；同时挥发物浓度的改变能够吸引同种的红胸律点跳甲成虫；进一步，红胸律点跳甲成虫取食乌桕叶片还会诱导乌桕产生系统性反应，增加根部营养物质，降低根部次生防御物质，从而通过提高红胸律点跳甲成虫幼虫的存活率、幼虫体重及其繁殖能力，促进跳甲幼虫的生长发育（Sun *et al*., 2012）。表明同种的地上-地下昆虫能够通过化学互作来降低异种昆虫的数量，影响根际和叶际昆虫的种群结构从而从中受益（Sun *et al*., 2019）。

4　学科建设与学术交流

化学生态学目前已经成为昆虫学、生态学、农业科学甚至是生命科学领域中最活跃的学科之一。进入 21 世纪，我国学者开始对化学生态学进行了系统的理论总结。2001 年，孔垂华、胡飞主编的《植物化感（相生相克）作用及其应用》由中国农业出版社出版；闫凤鸣主编的包括原理和方法的《化学生态学》（2003 年第 1 版，2011 年第 2 版，2025 年第 3 版）由科学出版社

出版；2010 年，孔垂华和娄永根主编的《化学生态学前沿》由高等教育出版社出版；2013 年，陈宗懋主编的《茶树害虫化学生态学》由上海科学技术出版社出版；2016 年，孔垂华等编著的《植物化感（相生相克）作用》由高等教育出版社出版；2023 年，闫凤鸣主编的《生态学透视：化学生态学》由河南科学技术出版社出版，王琛柱和娄永根主编的《昆虫与植物的相互作用》由科学出版社出版。

在学科建设方面，一些高等院校和科研院所如中国科学院大学、浙江大学、南京农业大学、华中农业大学、河南农业大学等也把化学生态学作为研究生培养的课程；对于本科生，则多以专题讲座或作为生态学、昆虫学等课程中的一个章节的形式进行学习。

学术交流与合作是推动化学生态学可持续发展的重要力量。目前，中国昆虫学会与中国生态学会均已成立化学生态学专业委员会。中国生态学会主办的化学生态学学术研讨会已成功举办十四届，而中国昆虫学会首届化学生态学学术研讨会也于 2024 年 8 月初在河南开封顺利召开。

在国际交流层面，我国多位学者活跃于国际化学生态学会及亚太化学生态学会（Asia-Pacific Association of Chemical Ecologists, APACE）等学术组织，不仅作为会员积极参与，更有学者在其中担任重要职务。我国化学生态学科研人员定期出席这些机构主办的学术会议，并多次受邀作学术报告，展示了国内研究进展。同时，国内多家科研单位与高校也多次成功在华主办相关国际学术会议，为领域内学者搭建高水准交流平台。此外，国际学术交流和合作形式日趋多元，涵盖学者互访、研究生联合培养以及国际合作科研项目等多种模式。通过多层次、宽渠道的交流与合作，我国化学生态学研究的国际影响力显著提升，学科发展也获得了持续动力。

5 我国昆虫化学生态学产品研发及田间应用

昆虫化学生态学的发展终究是揭示自然界的奥秘，并推动人与环境的和谐共生。我国在该领域的应用研究位居国际前列，特别是在昆虫信息素和植物次生物质的提取合成、配方优化和田间应用方面成果显著，为农林卫生害虫的绿色防控做出了重要贡献。进入 21 世纪以来，我国在昆虫信息素、食诱剂、植物源活性物质的系列产品研发，以及诱芯和诱捕器的关键设计技术上取得多项创新，成功培育了初具规模的相关产业，实现了从基础研究到产业化应用的跨越。

5.1 化学生态学产品类型

经过数十年发展，我国昆虫化学生态学产品已形成门类齐全、以信息素类产品为主导的产业格局，为农林害虫绿色防控提供了重要的技术支撑。目前主要产品类型包括：（1）害虫监测预警类产品：主要由信息素诱芯、诱捕器及自动计数监测系统等构成。其核心原理是利用昆虫信息素（主要为性信息素）诱捕昆虫，实现对害虫发生期、发生量和分布范围的动态监测。（2）害虫绿色防控类产品：通过大量诱杀或交配干扰（迷向）直接降低田间害虫种群数量。诱杀类产品通常将信息素、植物源引诱物（如植物挥发性物质或甜味物质）或者它们的混合物与诱捕器结合使用，如甲基丁香酚对橘小实蝇雄虫引诱效果较好（宫庆涛等, 2023）。（3）天敌昆虫行为调控产品：利用虫害诱导植物挥发物或害虫自身释放的信息素（如蚜虫报警信息素），吸引天敌昆虫聚集至害虫发生区域，增强自然控害效果。（4）通过释放害虫厌恶的气味物质，使其远离需保护的作物或场所。例如利用樟脑等挥发性成分驱避储粮害虫。（5）协同增效类产品：将信息素与生物农药、化学农药或物理防治手段结合使用，以实现协同增效的诱杀效果。如中捷四方生物科技股份有限公司（中捷四方）开发的小菜蛾和二化螟“光诱-信息素”复合诱捕器，集成了性信息素诱捕雄虫与灯光诱捕雌雄成虫的双重优势；（6）植物次生代谢物质产品：主要通过这些物质对害虫的驱避、拒食、毒杀、抑制生长发育等方式发挥作用。例如，印楝素、鱼藤酮、苦参碱等生物产品已经在我国害虫防治中广泛应用。

5.2　产品技术核心

在化学生态学产品的研发与应用领域，得益于国家标准的规范引导与产业实践的持续创新，我国已构建了完善的化学生态学产品剂型体系，并掌握了诸多具备自主知识产权的核心技术成果。

在昆虫信息素剂型方面，根据 2018 年 5 月 1 日起实施的国家标准《农药剂型名称及代码》（GB/T 19378-2017），可将调控昆虫行为的农药剂型主要分为挥散芯剂型、气雾剂剂型、微胶囊剂型和滴蜡等剂型。其中，挥散芯剂型应用最为常见，通常以聚合物材料为载体，通过分子扩散释放有效成分，主要以诱芯、缓释块、缓释管、缓释袋等具体形式起作用。其中，信息素诱芯又可细分为橡胶塞诱芯、硅胶管诱芯、可降解诱芯、塑料毛细管诱芯以及迷向管/迷向丝诱芯等不同类别。

目前我国市场上昆虫化学生态学诱捕器产品非常丰富，基本覆盖了主要农林害虫的防控，使用者可以根据害虫种类、使用场景、便利程度选择。可根据使用过程是否用水把诱捕器分为湿式、干式和粘胶式等。按捕获后害虫的被困方式可分为粘胶式、水盆式、杀虫剂重杀式、电网触杀式等。根据诱捕器的形状，可分为桶型诱捕器、三角型诱捕器、漏斗式诱捕器等。而在实际操作中需要根据昆虫的种类和生物学习性等设置不同类型的诱芯和诱捕器（如三角形、船型等），以及调整诱芯数量和悬挂高度等参数以提高诱捕效果（张新平等, 2011）。例如，钟罩形状的诱捕器，内部设有防逃逸倒漏斗和椭圆导板，可以提高螟蛾类害虫的诱捕效率（张红岩等, 2025）。三角形诱捕器在桃小食心虫 *Carposina niponensis* 的诱捕试验中表现优于其他类型，桶型诱捕器对草地贪夜蛾雄蛾的诱虫效果为最佳。以豆野螟 *Maruca vitrata* 成虫性信息素为引诱剂的诱捕器中三角型诱捕器、桶型诱捕器和船型诱捕器效果较好，以性信息素与糖醋液组合为引诱剂的诱捕器中桶型诱捕器诱捕效果显著优于其他各类诱捕装置（陈利民等, 2025）。

5.3　规模化应用与防控体系构建

以昆虫信息素为核心的化学生态学技术已成为我国农林业害虫绿色防控体系的重要组成部分，并形成了一系列可推广的标准化技术方案，在多种农林害虫绿色防控体系发挥了核心作用。例如，为了阻截及防控苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 在国内的发生，我国建立了“西、北、东”三条疫情阻截防线。其中一个重要措施是在不连片的果园中采用性信息素和专用诱捕器诱杀成虫，对连片大面积果园，则布设性信息素散发器进行迷向防治，干扰成虫交配，降低种群数量，这些措施有力的阻断了苹果蠹蛾在国内的蔓延。

此外，昆虫信息素在松墨天牛 *Monochamus alternatus*、玉米螟 *Pyrausta nubilalis*、棉铃虫、二化螟、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、小菜蛾、番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*、草地贪夜蛾、美国白蛾 *Hyphantria cunea* 、暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela*、橘小实蝇和梨小食心虫 *Grapholitha molesta* 等农果林上害虫的防控过程中均取得了显著的成效（封云涛等, 2013; 鞠倩等, 2014; 崔艮中等, 2023; 苏楠等, 2025; 闫凤鸣等, 2025）。

5.4　产业化发展与未来挑战

得益于我国化学生态学理论研究的深化、应用实践的拓展以及专业人才队伍的建设，催生了以中捷四方为代表的系列化学生态学相关高科技企业。它们的良性发展，是我国大力推动高校和科研院所科学研究成果产业化的生动例证，也深刻反映了我国农林植物保护事业中“市场需求”与“技术创新”双轮驱动的内在发展逻辑。

尽管我国化学生态学在产品研发与技术应用方面已取得一定成果，但仍面临诸多深层次挑战。具体包括：一是在基础研究层面，亟待发掘新的信号分子，夯实理论根基；二是在技术应用层面，需加快剂型与施用装置的智能化、精准化革新，推动范式转型；三是在标准化建设方面，应建立适应不同产品和场景的技术规程，提升技术推广的规范性与适用性。此外，国家产业层面也需在产业政策上予以倾斜，加强对化学生态学相关科研与企业推广的支持，从而推动以绿色防控为核心的化学生态学产业实现快速、良性、可持续发展。

6 总结与展望

进入 21 世纪以来，我国化学生态学研究和成果应用出现了令人惊喜的变化，成果呈井喷式涌现，呈现如下特点：（1）由于组学技术的发展，越来越多的化学生态学研究涉及到多组学技术、分子生物学和生物技术的应用，对于生物之间化学联系规律的解析更加全面、深入和系统；（2）人工智能、大数据等也在化学生态学领域应用，为快速、准确定位活性化学物质或结合蛋白提供了有效工具；（3）化学生态学互作方面的研究，从 20 世纪的植物与昆虫、植物之间（化感）的二级互作，到植物-昆虫-天敌和植物-介体-病毒三级营养互作，到 21 世纪的多营养级、地上地下生物互作的研究；（4）生物学、生态学领域的非化学生态学专家，开始从化学生态学发现的问题入手（如蚊虫叮咬、蝗虫聚集等），寻找灵感和突破口，利用多学科技术和化学生态学技术，阐明化学生态机理，并取得高水平成果。

展望未来，化学生态学在我国有着广阔发展道路和应用前景。根据学科理论和应用发展现状，兹提出以下几个方面的方向，供同行参考：

第一，学科理论和技术的整合。化学生态学研究经历数十年的发展，特别是 21 世纪以来，学科的理论和应用成果日新月异，研究手段越来越丰富，研究内容越来越深入，但也面临“数据碎片化”的挑战。我国科技工作者应该充分发挥生态学的综合优势，利用我国传统哲学的系统观和整体观，从宏观的角度，总结和探索化学生态学研究成果的一般规律和通用路径，用于指导学科发展和未来应用。

第二，传统技术和新技术的综合应用。昆虫化学生态学，应与时俱进，利用好层出不穷的新方法、新技术，特别是大数据、人工智能、合成生物学等，更加深入和系统研究化学生态学的理论和应用。在害虫防控技术应用方面，应重点发展智慧植保技术。化学生态学技术可以与昆虫测报相关的技术结合，如信息素与灯诱相结合的智能测报技术、信息素诱捕与昆虫种类自动识别鉴定技术等。同时，可以研发适合无人机施用的食诱剂、信息素产品。此外，还可以探索利用生物技术转化微生物或植物，使之较大规模生产信息化学物质。

第三，成果的应用和推广。除了昆虫信息素，植物和其他生物次生物质和活性物质的应用很少，还需要更多成果的推广。高校、科研单位与高科技企业的合作模式还不深入，科研单位与企业的合作模式应从简单的“项目委托”，向共同定义问题、共同投入资源、共同享受成果的“创新共同体”转型。如中捷四方生物（化学）信息物质研究院设立了开放基金申请，资助化学生态学领域的自由创新研究，这种合作模式为我国主要化学生态科研工作者主要依靠政府资助项目的科学自由研究提供了一个创新的合作形式，最终形成需求牵引与技术推动并进的良性发展格局。

参考文献 (References)

Barbier M, 1976. Introduction to Chemical Ecology. New York: Longman Inc. 128.

Baudino S, Lucas C, Smadja C, 2016. Omics in chemical ecology// Bagnères AG, Hossaert-Mckey M (eds.). Chemical Ecology. New Jersey: John Wiley & Son. 117–137.

Chang HT, Cassau S, Krieger J, Guo XJ, Knaden M, Kang L, Hansson BS, 2023. A chemical defense deters cannibalism in migratory locusts. *Science*, 380(6644): 537–543.

Chen LM, He TJ, Zhou DY, Wu QQ, Zhang JM, Zhang HX, Lyu YB, Wu QC, 2025. Effects of different lures and traps on the capture efficacy for *Maruca vitrata* and other arthropods. *Journal of Environmental Entomology*, 47(1): 1–12. [陈利民, 何天骏, 周大云, 吴倩倩, 章金明, 张海霞, 吕要斌, 吴全聪, 2025. 不同诱捕装置对豆野螟及其他节肢动物的诱捕效果. 环境昆虫学报, 47(1): 1–12.]

Chen QY, Chang HT, Ma BW, Guo MB, Cao S, Li B, Wang XQ, Berg B, Chu X, Zhang TT, Hansson BS, Liu Y, Wang GR, 2025. Carbon dioxide drives oviposition in *Helicoverpa armigera*. *National Science Review*, https://doi.org/10.1093/nsr/ nwaf270

Chen Y, Wang PC, Zhang SS, Yang J, Li GC, Huang LQ, Wang CZ, 2022. Functional analysis of a bitter gustatory receptor highly expressed in the larval maxillary galea of *Helicoverpa armigera*. *PLoS Genetics*, 18(10): e1010455.

Cheng CH, Wickham JD, Chen L, Xu DD, Lu M, Sun JH, 2018. Bacterial microbiota protect an invasive bark beetle from a pine

defensive compound. *Microbiome*, 6(1): 132.

Cui GZ, Zhu JJ, 2016. Pheromone-based pest management in China: Past, present, and future prospects. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 557–570.

Cui GZ, Li FL, Xue JG, Wang JW, Zhang CS, Zhang D, Lü KF, Ma Y, Wang L, 2023. Progress in research on the application of insect pheromone technology in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(2): 534–553. [崔艮中, 李粉莲, 薛建光, 王俊文, 张从顺, 张迪, 吕凯飞, 马燕, 王琳, 2023. 我国昆虫信息素应用技术的概况及研究展望. 应用昆虫学报, 60(2): 534–553.]

Dong SH, Sun AL, Tan K, Nieh JC, 2022. Identification of giant hornet *Vespa mandarinia* queen sex pheromone components. *Current Biology*, 32(5): R211–R212.

Du JW, 1988. Insect Pheromones and Applications. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 221. [杜家纬, 1988. 昆虫信息素及其应用. 上海: 上海科学技术出版社. 221.]

Feng YT, Yu Q, Liu ZF, Gao Y, Zhang RX, Shi GC, Fan RJ, 2013. Research on the field application of sex pheromones of the oriental fruit moth. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1559–1563. [封云涛, 庾琴, 刘中芳, 高越, 张润祥, 史高川, 范仁俊, 2013. 梨小食心虫性信息素田间应用技术研究. 应用昆虫学报, 50(6): 1559–1563.]

Gao H, Bai L, Jiang YM, Huang W, Wang LL, Li SG, Zhu GD, Wang DQ, Huang ZH, Li XS, Cao J, Jiang LB, Jacobs-Lorena M, Zhan S, Wang SB, 2021. A natural symbiotic bacterium drives mosquito refractoriness to *Plasmodium* infection via secretion of an antimalarial lipase. *Nature Microbiology*, 6(6): 806–817.

Gao H, Jiang YM, Wang LH, Wang GD, Hu W, Dong L, Wang S, 2023. Outer membrane vesicles from a mosquito commensal mediate targeted killing of Plasmodium parasites via the phosphatidylcholine scavenging pathway. *Nature Communications*, 14(1): 5157.

Gong QT, Zheng XM, Xu JL, Guo HW, Zhu TF, Wang ZD, Zhang KP, Niu QL, Zhang AN, 2023. Efficacy of different baits and traps against *Bactrocera dorsalis* and cost evaluation. *Plant Protection*, 49(4): 318–327. [宫庆涛, 郑晓明, 徐加琳, 郭红伟, 朱腾飞, 王振铎, 张坤鹏, 牛庆霖, 张安宁, 2023. 不同诱杀剂和诱捕器防治橘小实蝇效果及成本评价. 植物保护, 49(4): 318–327.]

Guo H, Mo BT, Li GC, Li ZL, Huang LQ, Sun YL, Dong JF, Smith DP, Wang CZ, 2022. Sex pheromone communication in an insect parasitoid, *Campoletis chlorideae* Uchida. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(49): e2215442119.

Guo MB, Du LX, Chen QY, Feng YL, Zhang J, Zhang XX, Tian K, Cao S, Huang TY, Jacquin-Joly E, Wang GR, Liu Y, 2021. Odorant receptors for detecting flowering plant cues are functionally conserved across moths and butterflies. *Molecular Biology and Evolution*, 38(4): 1413–1427.

Guo XJ, Gao L, Li SW, Gao J, Wang YY, Lv J, Wei JY, Yang J, Ke H, Ding Q, Yang J, Guo FS, Zhang HW, Lei XG, Kang L, 2025. Decoding 4-vinylanisole biosynthesis and pivotal enzymes in locusts. *Nature*, 644(8076): 420–429.

Guo XJ, Kang L, 2025. Phenotypic plasticity in locusts: Trade-off between migration and reproduction. *Annual Review of Entomology*, 70: 23–44.

Guo XJ, Yu QQ, Chen DF, Wei JN, Yang PC, Yu J, Wang XH, Kang L, 2020. 4-Vinylanisole is an aggregation pheromone in locusts. *Nature*, 584(7822): 584–588.

Heiling S, Li JC, Halitschke R, Paetz C, Baldwin IT, 2022. The downside of metabolic diversity: Postingestive rearrangements by specialized insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(24): e2122808119.

Huang W, Siemann E, Wheeler GS, Zou JW, Carrillo J, Ding JQ, 2010. Resource allocation to defence and growth are driven by different responses to generalist and specialist herbivory in an invasive plant. *Journal of Ecology*, 98(5): 1157–1167.

Huang W, Siemann E, Xiao L, Yang XF, Ding JQ, 2014. Species-specific defence responses facilitate conspecifics and inhibit heterospecifics in above-belowground herbivore interactions. *Nature Communications*, 5: 4851.

Huang XZ, Xiao YT, Köllner TG, Jing WX, Kou JF, Chen JY, Liu DF, Gu SH, Wu JX, Zhang YJ, Guo YY, 2018. The terpene synthase gene family in *Gossypium hirsutum* harbors a linalool synthase GhTPS12 implicated in direct defence responses against herbivores. *Plant*, *Cell & Environment*, 41(1): 261–274.

Jiang NJ, Mo BT, Guo H, Yang J, Tang R, Wang CZ, 2022. Revisiting the sex pheromone of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, a new invasive pest in south China. *Insect Science*, 29(3): 865–878.

Jiang NJ, Tang R, Guo H, Ning C, Li JC, Wu H, Huang LQ, Wang CZ, 2020. Olfactory coding of intra- and interspecific pheromonal messages by the male *Mythimna separata* in north China. *Biochemistry and Molecular Biology*, 125: 103439.

Jiang YM, Gao H, Wang LH, Hu WQ, Wang GD, Wang SB, 2023. Quorum sensing-activated phenylalanine metabolism drives OMV biogenesis to enhance mosquito commensal colonization resistance to *Plasmodium*. *Cell Host & Microbe*, 31(10): 1655–1667.

Ju Q, Li X, Jiang XJ, Zhao ZQ, Jiang XG, Ni WL, Qu MJ, 2014. Characterization of female sex-pheromone in *Holotrichia parallela* (Coleoptera, Scarabaeidae, Melolonthinae) of Qingdao population and their application in the field. *Journal of Plant Protection*, 41(2): 197–202. [鞠倩, 李晓, 姜晓静, 赵志强, 蒋相国, 倪皖莉, 曲明静, 2014. 青岛地区暗黑鳃金龟性信息素鉴定及田间应用技术. 植物保护学报, 41(2): 197–202.]

Li JJ, Liu Y, Wang GR, Yan FM, 2022. Chemical ecology in the era omics: New missions of a traditional interdiscipline. *Acta Enomologica Sinica*, 65(3): 257–260. [李静静, 刘杨, 王桂荣, 闫凤鸣, 2022. 组学时代的化学生态学: 传统交叉学科的现代使命. 昆虫学报, 65(3): 257–260.]

Li LL, Xiao YJ, Wang BH, Zhuang YQ, Chen YM, Lu J, Lou YG, Li R, 2024. A frameshift mutation in *JAZ10* resolves the growth versus defense dilemma in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(52): e2413564121.

Li Q, Zhang YF, Zhang TM, Wan JH, Zhang YD, Yang H, Huang Y, Xu C, Li G, Lu HM, 2023. iORbase: A database for the prediction of the structures and functions of insect olfactory receptors. *Insect Science*, 30(5): 1245–1254.

Li RT, Huang LQ, Dong JF, Wang CZ, 2020. A moth odorant receptor highly expressed in the ovipositor is involved in detecting host-plant volatiles. *eLife*, 9: e53706.

Li Y, Zhang Y, Wang YY, Li X, Zhou L, Yang J, Guo LP, 2022. Metabolites and chemometric study of Perilla (*Perilla frutescens*) from different varieties and geographical origins. *Journal of Food Science*, 87(12): 5240–5251.

Liu FH, Wickham JD, Cao QJ, Lu M, Sun JH, 2020a. An invasive beetle-fungus complex is maintained by fungal nutritional-compensation mediated by bacterial volatiles. *The ISME Journal*, 14(11): 2829–2842.

Liu FH, Ye FY, Yang YW, Kang ZW, Liu Y, Chen W, Wang SG, Kou HR, Kang L, Sun JH, 2024. Gut bacteria are essential for development of an invasive bark beetle by regulating glucose transport. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(33): e2410889121.

Liu QS, Hu XY, Su SL, Ning YS, Peng YF, Ye GY, Lou YG, Turlings TCJ, Li YH, 2021. Cooperative herbivory between two important pests of rice. *Nature Communications*,12(1): 6772.

Liu QS, Turlings TCJ, Li YH, 2023. Can herbivores sharing the same host plant be mutualists? *Trends in Ecology & Evolution*, 38(6): 509–511.

Liu XL, Zhang J, Yan Q, Miao CL, Han WK, Hou W, Yang K, Hansson BS, Peng YC, Guo JM, Xu H, Wang CZ, Dong SL, Knaden M, 2020b. The molecular basis of host selection in a crucifer-specialized moth. *Current Biology*, 30(22): 4476–4482.

Lu HP, Luo T, Fu HW, Wang L, Tan YY, Huang JZ, Wang Q, Ye GY, Gatehouse AMR, Lou YG, Shu QY, 2018. Resistance of rice to insect pests mediated by suppression of serotonin biosynthesis. *Nature Plants*, 4(6): 338–344.

Lu K, Cheng YB, Li YM, Li WR, Song YY, Zeng RS, Sun ZX, 2021. The KNRL nuclear receptor controls hydrolase-mediated vitellin breakdown during embryogenesis in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Insect Science*, 28(6): 1633–1650.

Lu M, Hulcr J, Sun JH, 2016. The role of symbiotic microbes in insect invasions. *Annual Review of Ecology*, *Evolution*, *and Systematics*, 47: 487–505.

Lu M, Wingfield MJ, Gillette NE, Mori SR, Sun JH, 2010. Complex interactions among host pines and fungi vectored by an invasive bark beetle. *New Phytologist*, 187(3): 859–866.

Ma BW, Chang HT, Guo MB, Ai D, Wang JY, Chen R, Liu XL, Ren BZ, Hansson BS, Wang GR, 2025. Yeast-derived volatiles orchestrate an insect-yeast mutualism with oriental armyworm moths. *Nature Communication*, 16(1): 1479.

Malook SU, Qi JF, Hettenhausen C, Xu YX, Zhang CP, Zhang JX, Lu CK, Li J, Wang L, Wu JQ, 2019. The oriental armyworm (*Mythimna separata*) feeding induces systemic defence responses within and between maize leaves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. *Series B*, *Biological Sciences*, 374(1767): 20180307.

Pan HS, Xiu CL, Williams L, Lu YH, 2021. Plant volatiles modulate seasonal dynamics between hosts of the polyphagous mirid bug *Apolygus lucorum*. *Journal of Chemical Ecology*, 47(1): 87–98.

Qi JF, Sun GL, Wang L, Zhao CX, Hettenhausen C, Schuman MC, Baldwin IT, Li J, Song J, Liu ZD, Xu GW, Lu X, Wu JQ, 2016. Oral secretions from *Mythimna separata* insects specifically induce defence responses in maize as revealed by high-dimensional biological data. *Plant*, *Cell & Environment*, 39(8): 1749–1766.]

Qin JD, 1987. Insect-plant Relationships: On Interactions and Evolutions of Plant-insect Interactions. Beijing: Science Press. 227. [钦俊德, 1987. 昆虫与植物的关系: 论昆虫与植物的相互作用及其演化. 北京: 科学出版社. 227.]

Qiu CL, Li W, Wang LN, Wang SC, Falert S, Wang C, Yu SY, Abdelkhalek ST, Lu J, Lin YJ, Wang MQ, 2025. Limonene enhances rice plant resistance to a piercing-sucking herbivore and rice pathogens. *Plant Biotechnology Journal*, 23(1): 84–96.

Seybold SJ, 2004. The eighth day of discovery: Molecular biology comes to chemical ecology. *Journal of Chemical Ecology*, 30(12):

2327–2333

Su N, Wang J, Zhang DX, Zheng WF, Yang LL, Jing XY, Li J, Liu HX, 2025. Effect of trap type and setting method on the trapping effect of *Tuta absoluta*. *China Plant Protection*, 45(5): 53–55, 66. [苏楠, 王俊, 张东霞, 郑卫锋, 杨丽莉, 荆小院, 李捷, 刘红霞, 2025. 诱捕器类型及设置方式诱捕番茄潜叶蛾效果研究. 中国植保导刊, 45(5): 53–55, 66.]

Sun JH, Lu M, Gillette NE, Wingfield MJ, 2013. Red turpentine beetle: Innocuous native becomes invasive tree killer in China. *Annual Review of Entomology*, 58: 293–311.

Sun JH, Miao ZW, Zhang Z, Zhang ZN, Gillette NE, 2004. Red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Scolytidae), response to host semiochemicals in China. *Environmental Entomology*, 33(2): 206–212.

Sun X, Siemann E, Liu Z, Wang QY, Wang DL, Huang W, Zhang CJ, Ding JQ, 2019. Root-feeding larvae increase their performance by inducing leaf volatiles that attract above-ground conspecific adults. *Journal of Ecology*, 107(6): 2713–2723.

Sun X, Sun YM, Ma L, Liu Z, Zhang CJ, Huang W, Siemann E, Ding JQ, 2022. Linking aboveground and belowground interactions via herbivore-induced plant volatiles. *Entomologia Generalis*, 42(3): 421–429.

Sun YL, Dong JF, Ning C, Ding PP, Huang LQ, Sun JG, Wang CZ, 2018. An odorant receptor mediates the attractiveness of *cis*-jasmone-jasmone to *Campoletis chlorideae*, the endoparasitoid of *Helicoverpa armigera*. *Insect Molecular Biology*, 28(1): 23–34.

Tan YS, Mo BT, Li GC, Guo YR, Zhang JZ, Wang CZ, 2025. HarmGR13 mediates myo-inositol taste perception in *Helicoverpa armigera* larvae. *PLoS Genetics*, 21(6): e1011744.

Tian ZQ, Wang YY, Sun T, Hu XY, Hao WT, Zhao T, Wang YN, Zhang L, Jiang XF, Turlings TCJ, Li YH, 2025. An egg parasitoid assesses host egg quality from afar using oviposition-induced plant volatiles. *Current Biology*, 35(13): 3001–3010.e4.

Wang B, Dong WY, Li HM, D'Onofrio C, Bai PH, Chen RP, Yang LL, Wu JN, Wang XQ, Wang B, Ai D, Knoll W, Pelosi P, Wang GR, 2022. Molecular basis of *(E)*-β-farnesene-mediated aphid location in the predator *Eupeodes corollae*. *Current Biology*, 32(5): 951–962.

Wang B, Jacquin-Joly E, Wang GR, 2025. The role of (*E*)-β-farnesene in tritrophic interactions: Biosynthesis, chemoreception, and evolution. *Annual Review of Entomology*, 70: 313–335.

Wang GD, Vega-Rodríguez J, Diabate A, Liu JN, Cui CL, Nignan C, Dong L, Li F, Ouedrago CO, Bandaogo AM, Sawadogo PS, Maiga H, Alves E Silva TL, Pascini TV, Wang SB, Jacobs-Lorena M, 2021. Clock genes and environmental cues coordinate *Anopheles* pheromone synthesis, swarming, and mating. *Science*, 371(6527): 411–415.

Wang WC, Cao DD, Men J, Wei JR, 2018. (*R*)-(+)-citronellal identified as a female-produced sex pheromone of *Aromia bungii* Faldermann (Coleoptera: Cerambycidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28(1): 77.

Wang WW, Zhou PY, Mo XC, Hu LF, Jin N, Chen X, Yu ZX, Meng JP, Erb M, Shang ZC, Gatehouse AMR, Wu J, Lou YG, 2020. Induction of defense in cereals by 4-fluorophenoxyacetic acid suppresses insect pest populations and increases crop yields in the field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(22): 12017–12028.

Wang YD, Qiu L, Wang B, Guan ZY, Dong Z, Zhang J, Cao S, Yang LL, Wang B, Gong Z, Zhang LW, Ma WH, Liu Z, Zhang DL, Wang GR, Yin P, 2024. Structural basis for odorant recognition of the insect odorant receptor OR-Orco heterocomplex. *Science*, 384(6703): 1453–1460.

Wu P, Sun P, Nie KX, Zhu YB, Shi MY, Xiao CG, Liu H, Liu QY, Zhao TY, Chen XG, Zhou HN, Wang PH, Cheng G, 2019. A gut commensal bacterium promotes mosquito permissiveness to arboviruses. *Cell Host & Microbe*, 25(1): 101–112.

Xia JX, Guo ZJ, Yang ZZ, Han HL, Wang SL, Xu HF, Yang X, Yang FS, Wu QJ, Xie W, Zhou XG, Dermauw W, Turlings TCJ, Zhang YJ, 2021. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins. *Cell*, 184(7): 1693–1705.

Xu H, Zhao JJ, Li FQ, Yan Q, Meng L, Li BP, 2021a. Chemical polymorphism regulates the attractiveness to nymphs in the bean bug *Riptortus pedestris*. *Journal of Pest Science*, 94(2): 463–472.

Xu T, Xu M, Lu YY, Zhang WQ, Sun JH, Zeng RS, Turlings TCJ, Chen L, 2021b. A trail pheromone mediates the mutualism between ants and aphids. *Current Biology*, 31(21): 4738–4747.

Xu T, Zhang N, Xu M, Glauser G, Turlings TCJ, Chen L, 2023. Revisiting the trail pheromone components of the red imported fire ant, Solenopsis invicta Buren. *Insect Science*, 30(1): 161–172.

Xue W, Lu XL, Zhang TM, Guo Y, Li YH, Li G, Xu C, Lu HM, 2025. Probing the optimal architecture and molecular mechanism of insect odorant receptor heteromeric channels. *Communications Biology*, 8(1): 1119.

Yan FM, Tang QB, Zhao XC. 2025. Chemical Ecology (the 3rd edition). Beijing: Science Press. 455. [闫凤鸣, 汤清波, 赵新成, 2025. 化学生态学(第三版). 北京: 科学出版社. 455.]

Yan WL, Wang SX, Liu JL, Zhai D, Lu H, Li JJ, Bai RE, Lei CY, Song LY, Zhao CC, Yan FM, 2024. Managing super pests: Interplay between pathogens and symbionts informs biocontrol of whiteflies. *Microorganisms*, 12(5): 887.

Yang FB, Zhang QH, Yao QX, Chen G, Tong H, Zhang JM, Li CR, Su Q, Zhang YJ, 2020a. Direct and indirect plant defenses induced by (*Z*)-3-hexenol in tomato against whitefly attack. *Journal of Pest Science*, 93(4): 1243–1254.

Yang J, Guo H, Jiang NJ, Tang R, Li GC, Huang LQ, van Loon JJA, Wang CZ, 2021. Identification of a gustatory receptor tuned to sinigrin in the cabbage butterfly *Pieris rapae*. *PLoS Genetics*, 17(7): e1009527.

Yang K, Gong XL, Li GC, Huang LQ, Ning C, Wang CZ, 2020b. A gustatory receptor tuned to the steroid plant hormone brassinolide in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *eLife*, 9: e64114.

Yao CC, Zhao X, Hu XY, Rasmann S, Shen J, Turlings TCJ, Li YH, 2025. Planthopper-induced volatiles suppress rice plant defense by targeting Os4CL5-dependent phenolamide biosynthesis. *Current Biology*, 35(14): 3440–3450.e4.

Yao I, 2014. Costs and constraints in aphid-ant mutualism. *Ecological Research*, 29(3): 383–391.

Zhang CP, Li J, Li S, Ma CR, Liu H, Wang L, Qi JF, Wu JQ, 2021. ZmMPK6 and ethylene signalling negatively regulate the accumulation of anti-insect metabolites DIMBOA and DIMBOA-Glc in maize inbred line A188. *New Phytologist*, 229(4): 2273–2287.

Zhang H, Zhu YB, Liu ZW, Peng YM, Peng WY, Tong LQ, Wang JL, Liu QY, Wang PH, Cheng G, 2022. A volatile from the skin microbiota of flavivirus-infected hosts promotes mosquito attractiveness. *Cell*, 185(14): 2510–2522.

Zhang HY, Patima·Wumuerhan, Ma Z, Liang TY, Wuguzihan·Hasimujiang, Wang HQ, Lu Y, Fu WJ, Wang QF, Ma DY, 2025. Evaluation of the efficacy of sex pheromone lures and pheromone diffusers for the control of *Tuta absoluta* in Yili Region of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Journal of Environmental Entomology*, 47(1): 97–107. [张红岩, 帕提玛·乌木尔汗, 马召, 梁天宇, 吾古子汗·哈斯木江, 王惠卿, 芦屹, 付文君, 王青风, 马德英, 2025. 新疆伊犁地区不同性诱芯和性迷向剂防控番茄潜叶蛾效果评价. 环境昆虫学报, 47(1): 97–107.]

Zhang J, Liu W, Chang HT, Wang Q, Yuan JX, Liu LY, Liu CH, Zhang Y, Ru CJ, Yan SC, Hansson BS, Wang GR, 2024a. Methyl eugenol regulates mating behavior in oriental fruit flies by enhancing lek attractiveness. *National Science Review*, 12(3): nwae294.

Zhang LM, Wang DX, Shi PB, Li JZ, Niu JC, Chen JL, Wang G, Wu LJ, Chen L, Yang ZX, Li SS, Meng JX, Ruan FC, He YW, Zhao HL, Ren ZR, Wang Y, Liu Y, Shi XL, Wang YF, Liu QY, Li JH, Wang PH, Wang JL, Zhu YB, Cheng G, 2024b. A naturally isolated symbiotic bacterium suppresses flavivirus transmission by *Aedes* mosquitoes. *Science*, 384(6693): eadn9524.

Zhang RB, Wang B, Grossi G, Falabella P, Liu Y, Yan SC, Lu J, Xi JH, Wang GR, 2017. Molecular basis of alarm pheromone detection in aphids. *Current Biology*, 27(1): 55–61.

Zhang SS, Wang PC, Ning C, Yang K, Li GC, Cao LL, Huang LQ, Wang CZ, 2024c. The larva and adult of *Helicoverpa armigera* use different gustatory receptors to sense sucrose. *eLife*, 12: RP91711.

Zhang XP, Yue CY, Liu AH, Yang ML, Sheng CF, Alimu, Zhang JW, 2011. Trapping efficiency of *Cydia pomonella* L. and *Grapholitha molesta* Busck by different trapping methods. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 48(2): 306–310. [张新平, 岳朝阳, 刘爱华, 杨明禄, 盛承发, 阿里木, 张静文, 2011. 不同诱捕方法对苹果蠹蛾和梨小食心虫的诱捕效果. 新疆农业科学, 48(2): 306–310.]

Zhang ZJ, Zhang SS, Niu BL, Ji DF, Liu XJ, Li MW, Bai H, Palli SR, Wang CZ, Tan AJ, 2019. A determining factor for insect feeding preference in the silkworm, *Bombyx mori*. *PLoS Biology*, 17(2): e3000162.

Zhao JW, Chen AQ, Ryu J, Del Mármol J, 2024. Structural basis of odor sensing by insect heteromeric odorant receptors. *Science*, 384(6703): 1460–1467.

Zhao LL, Zhang XX, Wei YN, Zhou J, Zhang W, Qin PJ, Chinta S, Kong XB, Liu YP, Yu HY, Hu SN, Zou Z, Butcher RA, Sun JH, 2016. Ascarosides coordinate the dispersal of a plant-parasitic nematode with the metamorphosis of its vector beetle. *Nature Communications*, 7: 12341.