我国小麦蚜虫研究的主要进展与展望*

谭晓玲** 张 勇 范 佳 陈巨莲***

（中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193）

摘 要 小麦是我国最主要的粮食作物，小麦蚜虫的研究与防控对于保障国家粮食安全意义重大。本文对21世纪以来的25年间我国小麦蚜虫研究进展进行了回顾与展望，从气候变化下的小麦蚜虫生物学与生态学、小麦-蚜虫-天敌-共生菌-虫传病毒的互作机制，麦蚜预测预报、小麦抗虫性利用、生态调控、物理防控、生物防治、纳米农药及RNA农药的研发应用、化学防治等关键技术，小麦蚜虫绿色防控技术体系创新等几个方面综述了我国从21世纪以来在小麦蚜虫研究方面取得的一系列进展，形成黄淮海等麦蚜区域防控技术体系创新及应用。最后，从我国小麦蚜虫防控技术手段创新及小麦产业发展需求出发，对今后麦蚜防控研究与实践进行了展望。

关键词 农田生态系统；气候变化；小麦-蚜虫-天敌-共生菌互作；绿色防控

Major progress and prospect of wheat aphid research in China

TAN Xiao-Ling** ZHANG Yong FAN Jia CHEN Ju-Lian***

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract Wheat is the most important grain crop in China. Research on wheat aphids and their management is, therefore, of great importance to national food security. This paper reviews major progress in research on wheat aphids in China over the past 25 years. It summarizes the achievements made in this field, including biological and ecological studies of wheat aphids in regions undergoing climate change, interactions between wheat aphids and their natural enemies and endosymbionts and vectored plant viruses, key monitoring and control technologies, including the prediction and forecasting of wheat aphid outbreaks, the utilization of wheat's defensive mechanisms, ecological regulation, physical control, biological control, chemical control and developing environmentally-friendly control technology systems; e.g. in the Huang-Huai-Hai wheat-growing region. Finally, based on innovations in wheat aphid control technology and the current state of the wheat industry in China, prospects for future research and wheat aphid control in China are discussed.

Key words agroecosystem; climate change; wheat-aphid-natural enemy-endosymbiont interaction; pest green control

小麦是我国第三大粮食作物，也是受害虫危害最严重的农作物之一。小麦蚜虫（简称麦蚜）是目前我国小麦生产上首要虫害。20世纪50-60年代，我国麦蚜危害较轻，年发生面积一般在190-460万 hm^2；70年代以后，麦蚜由间歇性严重发生变为常发性主要害虫，发生面积呈不断上升趋势，成为我国小麦作物重大害虫之一；自1990年以来，麦蚜年发生面积迅速上升，由1972年的342万 hm^2 上升到1999年的1 838万 hm^2。一般年份蚜虫为害可使小麦减产 5.1%-16.5%，大发生年份小麦减产40%以上。麦蚜成为小麦病虫害重大种类，上升为我国小麦虫害的首位，2020 年列入我国《一类农作物病虫害名录》，2023 年名录修订而 3 种麦蚜仍然位列其中。麦

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划项目（2023YFD1400800），国家自然科学基金（32172415）

**第一作者 First author，E-mail：tanxiaoling@caas.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：chenjulian@caas.cn

收稿日期 Received：2025-08-01；接受日期 Accepted：2025-09-11

蚜自 1986-1990 年“国家七五科技攻关”开始列入‘小麦主要病虫害综合防治技术研究’专题、“十一五（2006-2010）”以来加强统防统治、“十三五（2016-2020）”以来加强绿色防控技术集成应用。据统计，1991-2022 年期间每五年计划年均麦蚜防治面积 1 447.9-2 122.3 万 hm^2（图 1：A）、年均挽回小麦产量损失达 358.4-581.8 万吨（图 1：B）。本文就进入 21 世纪以来的 20 余年我国麦蚜暴发危害规律、基础研究及防控关键技术进展进行总结与回顾，并对今后的重点工作进行展望与分析，以期为麦蚜研究与治理提供参考。

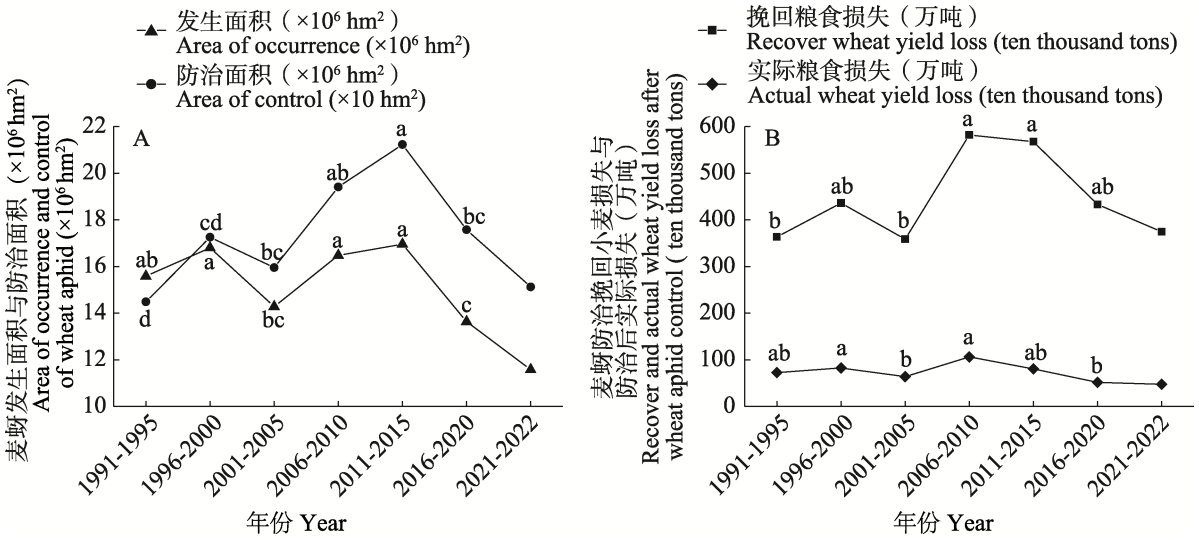

图 1　1991-2022 年麦蚜发生危害及防治情况

Fig. 1　Statistics of occurrence, damage and control of wheat aphid during 1991 to 2022

A. 麦蚜发生面积与防治面积；B. 麦蚜防治挽回小麦损失与防治后实际损失。

A. Area of occurrence and control of wheat aphid; B. Recover and actual wheat yield loss after wheat aphid control.

采用每个 5 年计划期间麦蚜的年均值进行单因素方差分析及邓肯氏显著性比较。图中不同字母表示 $P<0.05$ 的显著性差异水平。数据来源：全国农技中心《全国植保专业统计资料》，国家统计局网站 http://data.stats.gov.cn.

The annual average values of wheat aphids during each five-year plan were analyzed using one-way ANOVA and Duncan's method for significance comparison. Different letters indicate statistical difference at $P<0.05$.

Data source: National Agricultural Technology Center's "National Plant Protection Statistical Data", available on the National Bureau of Statistics website (http://data.stats.gov.cn).

1　小麦蚜虫生物学与生态学研究

1.1　全球气候变暖背景下小麦蚜虫生态响应机制

全球气候变暖通过温度升高、CO_2 浓度升高等多途径，影响农田生态系统食物网的结构与功能。全球平均气温预计本世纪末将升高 1.5-4.5 ℃（戈峰等，2010；Pachauri *et al.*，2014）。随着全球气候变暖日趋加剧，对小麦蚜虫种群动态和分布的影响也更加明显。气候变暖有利于麦蚜的生长繁殖、为害范围扩大并持久为害，同时直接影响到小麦产量。气候变暖对现有防治方法产生负面影响，其增加害虫竞争能力及对农药的抗性，导致对害虫的控制不足而加重了作物产量损失（Bajwa *et al.*，2020）。中国农业科学院植物保护研究所小麦害虫组团队多年来在黄淮海麦区田间采用红外辐射加热器模拟气候变暖开展相关研究，通过“Bottom-up”和“Top-down”两条营养关系途径解析麦蚜种群对气候变暖的响应及麦田生态系统多营养级互作关系。田间红外增温 2 ℃研究结果显示，小麦物候提前 9-12 d，生物量及千粒重增 30%-59%；蚜虫种群数量、净增殖率与内禀增长率显著升高，世代历期

与倍增时间缩短；天敌寄生率下降，导致蚜虫暴发风险增大（韩宗礼等，2018；Han *et al.*，2019）。同时多年的田间模拟温度升高 2 ℃，显著缩短了麦长管蚜 *Sitobion avenae* 若蚜总发育历期、增加了麦长管蚜和禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 的发育繁殖速度、显著增加河北廊坊和河南原阳地区小麦的生物量和千粒重。气候变暖通过降低小麦的水杨酸（Salicylic acid, SA）和茉莉酸（Jasmonic acid, JA）防御途径的相关基因和防御酶苯丙氨酸解氨酶（Phenylalnine ammonialyase，PAL）、β-1,3-葡聚糖酶（β-1,3-glucanase, GLU）和多酚氧化酶（Polyphenol oxidase，PPO）的表达和活性而导致小麦抗虫性降低。模拟气候变暖显著增加了麦长管蚜取食时间、显著增加其种群数量、繁殖代数、净增殖率和内禀增长率，缩短了发育持续时间、世代跨度和种群倍增时间，从而促进麦蚜种群增长（Han *et al.*，2019；Wang *et al.*，2021）。温度升高对麦蚜种群动态的影响受小麦发生物候期的影响（Dong，2013）。此外，高纬度和低纬度地区麦蚜对气候变化影响不同。研究发现，北方如廊坊、泰安和银川 3 个地理种群的若虫发育时间均显著短于南方如武汉、苏州和昆明等地理种群，而不同温度下北方地理种群的成虫寿命均显著长于南方地理种群（Sun *et al.*，2022）。气候变暖可以影响两种麦蚜在小麦上的生态位，提升麦长管蚜与禾谷缢管蚜的种群增长率、缩短若虫历期并扩大生态位重叠，驱动两种蚜虫在小麦上部叶片的竞争加剧；禾谷缢管蚜的种群增加降低了麦长管蚜在升温下的生态位宽度，其中不同部位蚜虫数量与植物水势呈显著负相关。研究表明，即使是反映气候变化的相对较小的温度升高也可能会干扰两个物种的相互作用，特别是通过植物介导的影响，但对作物生产力的影响难以预测（Li *et al.*，2023b，2025）。气候变化会对物种间的相互作用产生复杂影响，破坏物种相互关系稳态（王甦等，2010；Miao *et al.*，2022；Wang *et al.*，2024），通过瓢虫肠道残留物 DNA 分析，明确了气候变暖下麦蚜的主要捕食性天敌-异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 的数量没有增加，但异色瓢虫肠道内含物降低约 25%，其肠道对麦长管蚜的降解速度提高 1.5 倍。升温条件下异色瓢虫对麦长管蚜、禾谷缢管蚜和麦二叉蚜 *Schizaphis graminu*m 混合猎物的总捕食率提高 1.4 倍，对 3 种麦蚜的代谢速率明显提高。由此可见，升温条件下，没有增加异色瓢虫数量、提升其对麦蚜的捕食能力和肠道代谢速率，但是这些变化不能抵消温度升高导致田间麦蚜种群数量的大幅度增长（Wang *et al.*，2024）。此外，温度升高对异色瓢虫的飞行与运动能力也产生了影响（韩宗礼等，2017）。因此，气候变暖可能破坏天敌和害虫的同步性、削弱了生物防治效果、大幅增加虫害暴发几率（Wang *et al.*，2024）。同时，气候变暖导致很多昆虫随气流等由南向北扩散（武予清等，2014）。除了常规增加温度的影响，短期高温可导致蚜虫种群骤增后崩溃，但长期高温抑制其生存（Ma *et al.*，2025）。

二氧化碳（CO_2）浓度升高是全球气候变化的主要驱动因素之一，它会导致气温升高以及降水模式的改变，从而扩大干旱区域的面积（Ryan *et al*，2015）。开展升高 CO_2 浓度对作物与昆虫相互作用的影响研究至关重要。有研究表明，高 CO_2 与 60%土壤持水量条件下促进麦蚜种群增长。在 550 μL/L CO_2 时，因小麦水分/营养物增加而抗虫物质增加，蚜虫密度与叶片营养正相关、而与抗虫物质负相关，预测未来半干旱区蚜害风险加剧（张钧等，2022）。CO_2 升高和干旱胁迫对小麦的营养品质和抗虫性影响研究表明，在小麦中，CO_2 升高可以缓解干旱胁迫引起的低水分含量，CO_2 升高和干旱都促进了可溶性糖的积累。然而，对氨基酸含量则相反——因 CO_2 升高而降低，而因干旱而增加。此外，升高 CO_2 下调了 JA 介导的防御，但上调了 SA 介导的防御。干旱增强了脱落酸的积累（Abscisic acid, ABA），促进了 JA 介导防御。对于蚜虫来说，无论是在 CO_2 升高或干旱的情况下，其取食均可诱导小麦防御激素介导抗虫性，致使在 CO_2 与干旱复合胁迫下蚜虫危害程度与常态相当，未来虫害风险将维持动态平衡（Xie *et al.*，2022）。大

气 CO_2 与温度升高重塑麦蚜种间竞争格局，需面向未来气候情景优化抗性品种布局。在开放式气室试验表明：650 μL/L CO_2 和升温 0.6 ℃使麦长管蚜种群下降、而禾谷缢管蚜与麦二叉蚜上升，并加剧三者空间生态位重叠；CO_2 显著增加小麦产量，可部分抵消升温的轻微减产效应（Wang *et al.*，2018）。高 CO_2 下寄生蜂对蚜虫寄生率显著提升，但 750 mL/L 时羽化率降低 10%。瓢虫发育不受影响。两种天敌均强烈偏好取食高 CO_2 小麦上的蚜虫，推测高 CO_2 环境将增强寄生蜂生物防治效能（Chen *et al.*，2007）。

气候变化不仅直接通过升温、CO_2 升高等因素影响作物产量，更与病虫害生物入侵密切关联，农业生态系统的脆弱性使得微小扰动或可触发系统性崩溃（Li *et al.*，2024）。因此，气候变化对麦蚜影响机制有待于深入开展，通过大数据分析和预测模型的建立、结合不同生态区域气候特点，解析麦蚜种群动态趋势，对指导麦蚜区域性绿色防控策略的制定将具有重要意义。

1.2 小麦抗虫性及蚜虫唾液效应子介导小麦对蚜虫防御反应

培育和利用抗蚜品种是麦蚜各类防治措施中最为经济有效的策略。21 世纪初我国研究制定的农业行业标准《小麦抗病虫性评价技术规范 第 7 部分：小麦抗蚜虫评价技术规范》（NYT 1443.7-2007）成为小麦田间抗蚜鉴定的重要参考方法；2025 年制订并实施国家标准《小麦抗病虫性评价技术规程 第 7 部分：蚜虫》（GB/T 45211.7-2025），进一步规范了我国小麦抗蚜性评价技术。同时室内苗期鉴定和田间成株期鉴定相关结合的小麦抗蚜性综合鉴定方法对小麦品种全生育抗蚜性评价更为全面可靠。目前，室内抗蚜鉴定方法主要有生命表参数法、室内蚜量比值法、蚜虫刺吸电位图谱（Electrical penetration graph, EPG）监测蚜虫取食行为参数法（李贤庆，2006；徐昭焕，2011；曹贺贺，2014；刘新伦等，2014）。白金峰（2021）筛选出中扬 12-24、豫农 059915 等 11 个对麦长管蚜具有稳定抗性的小麦品种。刘晓蓓等（2024）挖掘到抗蚜水平稳定的小麦品种：济麦 21、舜麦 1718、众麦 2 号、邯麦 6172、丰舞 981。

植物为应对昆虫取食为害进化形成一系列防御策略，这也是解析其抗虫机制基础。植物形态特征如表面蜡质、腺毛和刚毛等形成抵御害虫的第一道屏障。研究发现小麦叶片的蜡质成分及化学物含量可影响小麦抗蚜性（刘勇等，2007；王美芳等，2008），绒毛长度及密度与小麦抗蚜性呈显著正相关（王雨等，2014）；化学防御是植物对昆虫防御体系重要组成部分，包括营养物质、植物次生代谢物等。有研究表明小麦总蛋白、缬氨酸等营养物质含量与其抗蚜水平呈负相关，但可溶性糖含量与其呈正相关（郭萧等，2010；张廷伟等，2010；刘芳华等，2017；Liu *et al.*，2020；Xie *et al.*，2020）。与抗蚜相关的小麦次生代谢物主要包括酚类、苯并恶唑嗪酮类、生物碱等。小麦叶片及麦穗的总酚含量、儿茶素、槲皮素与丁布等物质与小麦抗蚜性相关（陈巨莲等，2002；李贤庆，2006）。

植物激素如水杨酸（SA）、茉莉酸（JA）、乙烯（Ethylene, ET）、脱落酸（ABA）在植物免疫应答中发挥极其重要的作用（Erb *et al.*，2012；Kang *et al.*，2018a，2018b）。研究发现麦长管蚜及麦二叉蚜为害主要诱导 SA 介导的小麦防御信号途径，并引起胼胝质及 H_2O_2 积累（Zhang *et al.*，2019）。病原菌与寄主植物之间存在复杂的动态互作关系，Jones 和 Dangl（2006）曾提出了“Z 字模型”（Zig-zag model）解释病原菌与植物间此消彼长的互作关系。目前，许多研究发现此模型也适用于解释蚜虫-植物间的互作关系：蚜虫可通过口针将唾液蛋白分泌到植物体内进而调节植物防御反应（袁亮等，2015；董玉妹等，2021；都慧和王晓伟，2022）。研究发现注射麦长管蚜水状唾液可导致小麦 SA 防御信号途径相关基因如 *PAL*、*PR1* 表达量升高，影响蚜虫正常取食及生长繁殖，证实了麦蚜唾液蛋白直接参与诱导小麦防御反应（Zhang *et al.*，2017a）。通过组学与免疫反应联合分析，鉴定获得 114 种麦长管蚜唾液蛋白（Zhang *et al.*，2017b，2021），其中唾液蛋白 SmCSP4 作为激

发子与小麦转录因子 TaWRKY76 互作进抑制其转录激活活性，导致 SA 降解酶 DMR6 基因表达下降、使得 SA 含量增加，进而诱导下游防御信号途径并提高小麦抗蚜性（Zhang *et al.*，2023b）。蚜虫唾液蛋白也存在一些效应子可抑制植物防御反应。麦二叉蚜唾液蛋白 Sg2204 可抑制小麦防御反应，促进麦蚜的寄主适应性，该蛋白作为效应子在不同蚜虫中具有功能保守性（Zhang *et al.*，2022）。麦长管蚜唾液蛋白 Sm13498、SaFer1 可抑制小鼠凋亡蛋白 BAX 及病原菌激发子 INF1 诱导的细胞死亡，沉默 *SaFer1* 后蚜虫的繁殖力显著降低、取食受阻、小麦叶片中 LOX、PAL、FAD7 等防御通路关键基因表达量显著上调（付裕等，2021；胡戈洋和刘德广，2025）。麦长管蚜唾液蛋白 Sm10、SmC002、Sm9723、Cyclin-dependent kinase -like（CDK）可抑制小麦胼胝质、H_2O_2 积累以及 SA、JA 防御信号途径，表明以上唾液蛋白作为效应子在抑制寄主的防御反应、提高蚜虫适合度中具有重要作用（Zhang *et al.*，2022，2024b；Fu *et al.*，2023）。

1.3　小麦-蚜虫-天敌化学通讯

信息化合物对小麦-蚜虫-天敌化学通讯及调控机制。挥发性信息化合物（Volatile infochemicals）是三营养级中信息传递的重要媒介，我国在 21 世纪初开始研究活性挥发物在小麦-蚜虫-天敌互作的化学通讯功能及作用机制，并取得了重要进展，为麦蚜防控推拉策略及气传诱导防御的发展奠定良好基础。

从麦蚜的不选择抗性的小麦 KOK-1679 及虫害诱导小麦挥发物（Herbivore induced plant volatiles, HIPVs）指纹谱中分离及嗅觉行为鉴定出 3 种 HIPVs：6-甲基-5-庚烯-2-酮、6-甲基- 5-庚烯-2-醇和水杨酸甲酯（MeSA）对麦长管蚜和禾谷缢管蚜具有强驱拒作用，反-2-己烯醛对麦长管蚜、禾谷缢管蚜的无翅蚜具有强吸引作用，反-3-己酰醋酸酯对禾谷缢管蚜有翅蚜吸引作用最强（刘勇等, 2003）。上述 3 种 HIPVs 和 2-莰烯等小麦挥发物对 4 种捕食性天敌和寄生性天敌具有引诱作用、2-壬烯醛对烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 具有强引诱活性，由此表明麦蚜生境信息化合物为天敌昆虫寄主定位和生境选择提供了重要嗅觉线索（刘勇等，2005；Zhou *et al.*，2013；Jiang *et al.*，2024）。此外，在小麦与其他作物间作的生态系统中，大蒜的大蒜素（GE）具有显著驱避麦蚜和引用天敌活性（Zhou *et al.*，2013，2016）；蛇床草的邻二乙苯和对二乙苯显著吸引异色瓢虫成虫（Cai *et al.*，2020）。在麦田生态系统中，有些虫害诱导小麦挥发物不仅具有驱避蚜虫、引诱天敌即“推拉”双重效应，还具有对邻近小麦的免疫调控作用。Li 等（2024）报道，小麦外施 MeSA 显著抑制了麦蚜生长发育及寄主选择偏好、吸引短翅蚜小蜂 *Aphelinus asychis*、促使健康小麦释放更多 MeSA，还触发了小麦植株防御反应、诱导防御激素 SA 水平及抗虫化合物如丁布和黄酮类物质的浓度显著上升。因此，利用 MeSA 具有的“推拉+免疫”三重功效，在小麦蚜虫绿色防控集成应用将具有广阔前景。

昆虫信息素为另一类重要的信息化合物，其中蚜虫报警信息素研究报道最多。蚜虫报警信息素的主要成分是一种倍半萜烯（E）-β-法尼烯（EBF）。EBF 不仅能驱避麦蚜、还诱发有翅比例升高（Fan *et al.*，2015，2017），EBF 对天敌如草蛉、食蚜蝇、瓢虫、蚜茧蜂（燕麦蚜茧蜂 *Aphidius avenae*、烟蚜茧蜂）均有一定的引诱作用（Cui *et al.*，2012；Zhou *et al.*，2013；王璐等，2018）。EBF 不仅在蚜虫体内合成，还在多种植物如母菊 *Matricaria chamomilla*、黄花蒿 *Artemisia annua* 中检测到。目前普遍认为 EBF 是植食昆虫（包括鳞翅目昆虫和蚜虫）取食诱导植物挥发物组分（Wang *et al.*，2025）。对禾谷缢管蚜 EBF 生物合成及调控机制研究发现，通过脂肪酸代谢并受激素的调节，即受保幼激素抑制、受 20-羟基蜕皮激素促进（Sun *et al.*，2024）。植物倍半萜烯生物合成的关键酶是法呢基焦磷酸合酶（Farnesyl diphosphate synthase，FPS），在小麦 2 叶期当受蚜虫为害，或用 JA、MeSA、HIPVs 等挥发性化合物处理时，其 *fps* 同源转录本增加（Zhao *et al.*，2009），从小麦中鉴定出

两个 *fps* 同源异构体，并解析了其在倍半萜烯合成和对麦蚜防御的功能（Zhang *et al.*，2015）；利用小麦植株 Rubisco 小亚基（rbcS）的叶绿体转运肽（Chloroplast transit peptide, CTP）、以黄花蒿 EBF 合酶基因 *AaβFS1* 为目标，建立叶绿体表达 *CTP+AaβFS1* 转基因植物株系，能释放 EBF 含量高达 19.25 ng/d（Wang *et al.*，2015c）。

麦蚜-蚜茧蜂对挥发性信息化合物反应的生理基础。麦蚜触角的嗅觉感受器官主要有原生感觉圈（Primary rhinaria）和次生感觉圈（Secondary rhinaria）。原生感觉圈存在于若蚜和成蚜中，而次生感觉圈只存在于成蚜中，且有翅蚜居多。麦长管蚜触角在显微镜下观察显示，有翅成蚜次生感觉圈 7-13 个、无翅成蚜 1-5 个（Xue *et al*，2016）。有翅蚜对 EBF 及小麦挥发物更敏感与其次生感觉圈数量多密切相关（Fan *et al.*，2024，2025）。烟蚜茧蜂雌蜂的特异识别 EBF 的气味结合蛋白 AgifOBP6 在其触角的板形感器、腔锥感器、毛形感器都有分布（Jiang，2023）。

麦蚜及寄生蜂嗅觉分子机制研究进展显著。通过全基因组测序、构建触角转录组文库及采用 2 代、3 代测序技术，麦长管蚜和烟蚜茧蜂等化学感受相关基因被全覆盖鉴定，嗅觉相关蛋白识别信息化合物的生理功能得到深入研究。麦长管蚜成蚜触角中鉴定到 23 个气味受体（Odorant receptors, ORs）与 1 个共受体（Co-receptor, ORco），13 个气味分子结合蛋白（Odorant binding protein, OBPs）和 5 个化学感受蛋白（Chemosensory protein, CSPs）（Xue *et al.*，2016；Fan *et al.*，2017）。在烟蚜茧蜂成虫触角中鉴定出 14 个 OBPs（Jiang *et al.*，2022），9 个 CSPs（Jiang *et al.*，2024）。经体外功能研究揭示了麦蚜感知 EBF 嗅觉通路及分子机制：OR5 和 Orco 是麦蚜识别 EBF 的特异受体（Fan *et al.*，2015，2024），OBP3（Qiao *et al.*，2009）、OBP7（Sun *et al.*，2012；Zhong *et al.*，2012；Fan *et al.*，2017）和 OBP9（Jiang，2023）均与 EBF 结合。Jiang 等（2024）研究表明，当外施纳克级（4 ng）EBF 可显著提高烟蚜茧蜂对麦长管蚜有翅蚜的寄生率。经系统进化、分子对接及嗅觉功能等结构与功能分析表明，烟蚜茧蜂 EBF 结合蛋白 AgifOBP6 与蚜虫 EBF 结合蛋白 OBP3/7/9 均不具同源性，表明两个物种间识别 EBF 的蛋白具有功能趋同进化特点（Jiang，2023；Jiang *et al.*，2024）。最近研究表明，短翅蚜小蜂 OBP4 介导了对 MeSA 嗅觉识别（Li *et al.*，2024c）。

1.4 共生菌介导麦蚜与小麦互作

我国小麦蚜虫体内共生菌种类鉴定等研究起步于 21 世纪初，利用 *Wolbachia* 表面蛋白 *wsp* 基因通用引物在麦长管蚜北京种群中鉴定出 *Wolbachia*（龚鹏等，2002）。采用 16S rRNA 的 PCR 检测，对全国各小麦主产区采集的麦长管蚜 17 个地理种群、禾谷缢管蚜 32 个地理种群的共生菌种类进行系统鉴定。普遍认为，麦蚜共生菌包括 1 个初级共生菌 *Buchnera aphidicola* 和 7 个次级共生菌 *Serratia symbiotica*、*Hamiltonella defensa*、*Regiella insecticola*、*Rickettsia*、*Spiroplasma*、*Wolbachia* 和 *Arsenophonus*（Li *et al.*，2018a；Guo *et al.*，2017，2019）。此外，麦长管蚜中还有其他几种次级共生菌的报道（Li *et al.*，2014，2016）。

麦蚜体内共生菌种类与丰度受多种环境因素影响。我国不同麦区的蚜虫共生菌群落结构、优势菌属相对丰度呈显著差异，海拔和气压是最大影响的因素、其次是湿度、降雨和温度（Wang *et al.*，2022a）。蚜虫不同地理种群的共生菌种类构成存在明显差异（Li *et al.*，2018a；Hu *et al.*，2020），优势共生菌种类还随季节而改变，且具温度依赖性特点（Liu *et al.*，2019）。麦蚜室内种群随饲养时间推进其 3 个优势共生菌感染率下降：其中 *R. insecticola* 和 *H. defensa* 丰度分别在饲养 9 个月、11 个月明显下降，但 *S. symbiotica* 在 14 个月没有变化（Luo *et al.*，2016）。

内共生菌在麦蚜、植物与环境的互作关系中具有重要的作用，主要表现如下：

调控麦蚜的营养代谢。Li 等（2023a，2023b）通过高通量测序获得荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* 中 *Buchnera* 基因组信息，并与蚜虫基因组的关联分析，首次发现 *Buchnera* 介导宿主

蚜虫的必需氨基酸合成通路，且存在代谢接力过程：*Buchnera* 基因组中缺失了必需氨基酸，如缬氨酸（Val）、亮氨酸（Leu）和异亮氨酸（Ile）合成途径最后一步所需的支链氨基酸转移酶基因（Branched-chain amino acid aminotransferase, *ilvE*）、异亮氨酸合成通路第一步苏氨酸脱水酶基因（Threonine dehydratase, *ilvA*），但都存在于蚜虫基因组中，在蚜虫菌胞中特异表达。采用 RNAi 敲降 *ilvE*、*ilvA* 表达后显著降低蚜虫体重、*Buchnera* 菌群丰度，提高蚜虫死亡率。因此，这些营养代谢接力关键基因可作为防控蚜虫的潜在 RNAi 靶点（Li *et al.*，2023a，2023b）。

调节麦蚜对寄主植物的适应性。次级共生菌 *H. defensa* 介导麦蚜反寄主植物防御，带菌蚜虫在抗蚜小麦上适应性明显增强，还在蚜虫个体间能水平传播（Li *et al.*，2018b，2019）。相反，*R. insecticola* 对宿主蚜虫适应度有负面影响、显著降低感染的麦长管蚜在 25 和 28 ℃下的内禀增长力（Liu *et al.*，2019）。*Rickettsia* 介导麦蚜对大麦黄矮病毒（Barley yellow dwarf virus, BYDV)的传毒效率，利用抗生素去除该共生菌，蚜虫传毒效率明显下降（Yu *et al.*，2022）。从麦长管蚜唾液蛋白质中鉴定一个来源于 *Buchnera* 的高丰度小分子蛋白 GroES，作为激发子诱导小麦活性氧积累和胼胝质沉积、激活 SA、JA 防御途径关键基因表达和激素水平，抑制蚜虫繁殖力（Li *et al.*，2022）。

介导麦蚜抗药性及耐热性。麦蚜内共生菌在调控宿主抗药性方面也发挥重要作用。麦长管蚜内共生菌 *Buchnera*、*H. defensa*、*Candidatus regiella* 的丰度与其抗药性呈正相关（李迁等，2016；王超等，2022）。感染 *H. defensa* 麦蚜种群通过提高蚜虫解毒能力来降低蚜虫对化学农药的敏感性（Li *et al.*，2021）。麦蚜不同共生细菌及微生物菌群互作对协助宿主抵抗杀虫剂的程度存在差异（Wang *et al.*，2022a）。共生菌还赋予麦蚜耐热性（Majeed *et al.*，2022）。

1.5　麦蚜作为传毒媒介对小麦的危害

麦蚜对小麦的危害不仅直接刺吸其汁液，还作为病毒传播媒介，引发小麦病毒病流行。麦蚜作为传毒媒介对小麦危害具有“隐蔽性、暴发性、毁灭性”特点：病毒侵入初期症状不明显，易被忽视，一旦田间显症，造成大面积流行，且目前病毒病防控无特效药剂、难以控制，导致小麦产量锐减、品质下降（如籽粒蛋白质含量降低）。麦蚜传播的麦类病毒病以大麦黄矮病（BYDV）和小麦丛矮病最为常见且危害严重，二者均会导致小麦生长发育异常、产量大幅下降。因此，在小麦病毒病流行麦区，防治麦蚜的核心目的之一，就是切断病毒的传播链条，降低病毒病的流行风险。不同地区麦蚜带毒率及病毒株系存在显著差异，采用高灵敏度 RT-PCR 技术检测我国主要麦区蚜虫携带 BYDV-GAV 病毒比率，发现山西、甘肃、青海、陕西等重病区麦蚜带毒率高达 56.0%-91.5%，而河北、河南非重病区带毒率仅为 2.5%-33.0%（杨菲等，2012）。通过对田间小麦、BYDV 及媒介蚜虫麦长管蚜的三者互作研究发现，带毒蚜虫可加速种群增长并加重减产，而抗蚜品种通过抑制蚜虫种群数量影响病毒传播与产量损失（Liu *et al.*，2014）。感染 BYDV 的小麦会通过增加特定挥发性物质（反-2-己烯醛或癸醛）的含量来吸引无毒的有翅蚜虫，同时促使带毒蚜虫选择健康植株，从而优化其传播效率，表明田间病毒与蚜虫存在相互促进的关系，也为理解病毒-介体-植物互作及开展综合防控提供了新依据（Hu *et al.*，2022）。通过分析取食 BYDV-GAV 感染小麦的蚜虫体内酶活性变化，发现病毒可特异性诱导非介体禾谷缢管蚜的酸性磷酸酶（Acid phosphatase，ACP）活性显著上升，并抑制超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）等关键酶活性，而对介体麦长管蚜的酶活性无直接影响（仝则乾等，2019）。通过将源自桃蚜 *Myzus persicae* 的内共生菌 *R. insecticola* 转染禾谷缢管蚜，结果表明能提高新宿主的适应力，还可显著抑制蚜虫传播 BYDV，该转染菌株有望作为抑制病毒传播的新型生物防治策略加以应用（Yu *et al.*，2025）。

针对麦蚜传播的小麦病毒病的特点，防治核心是有效防治传毒媒介麦蚜、切断传播途径、减

少病毒源并增强小麦抗性。

2 小麦蚜虫防控关键技术研发

2.1 预测预报技术

麦蚜是小麦上全国性测报对象，自 20 世纪 90 年代以来麦蚜由次要害虫转变为主要害虫，成为小麦生产上成灾频率和危害损失最严重的害虫。21 世纪初，随着对麦蚜发生规律认识的不断深入，发生期与发生量预测等技术方法不断成熟，系统调查、大田调查和天敌调查等相关程序趋于规范、预测精度明显提高，制定形成了小麦蚜虫测报调查规范（NY/T 612-2002)农业行业标准。

麦蚜具有世代历期短、孤雌生殖、迁飞习性，不同小麦种植区麦蚜优势种类存在差异，种群动态变化受气候条件、寄主植物、栽培条件和天敌等多种因素的影响。因此，各地研究制定了麦蚜测报技术标准。王纯枝等（2020）根据 1958-2015 年我国北方地区 8 个主产省（直辖市）麦蚜分省发生面积和发生程度资料、601 个气象站点相应逐日气象资料和农业气象站小麦发育期资料，采用相关分析、主成分分析和逐步回归等方法，结合麦蚜适宜生理气象指标和华北、黄淮小麦生育期特点，筛选影响麦蚜年发生程度的关键气象因子，构建分区域的麦蚜气象适宜度预报模型。筛选出影响华北麦蚜年发生程度的 8 个关键气象因子（分别为上年冬季平均气温、当年 3 月温雨系数、3 月最高气温≥25 ℃的日数、3 月下旬日照时数、4 月上旬平均气温、4 月下旬最高气温≥28 ℃的日数、4 月大雨日数和 5 月上旬空气相对湿度介于 40%-80%范围的日数）；影响黄淮小麦蚜虫年发生程度的 6 个关键气象因子（分别为上年冬季平均气温、当年 1 月下旬降水量、3 月上旬空气相对湿度大于 80%的日数、3 月平均气温、4 月温雨系数和 4 月下旬无雨日数）。建立的华北、黄淮模型回代检验等级准确率分别为 91.2%和 95.1%。该模型适用于从气象角度对华北、黄淮及江淮地区麦蚜发生等级进行监测和预报（王纯枝等，2020）。司丽丽等（2022）基于前期麦蚜预警、预报指标模型体系，应用 C/S 模式，采用 GIS、VS2008、Microsoft visual studio 2008 等相关技术，建立了河北省麦蚜预警预报气象服务系统，实现了麦蚜达到防治指标的自动预警和发生程度的中期预测，并提供了麦蚜防治方案（司丽丽等，2022）。

2.2 小麦抗虫性利用技术

对小麦抗蚜基因进行分子定位，可实现抗蚜性状精准选择，有效节省抗性品种育种时间，并为进一步克隆抗蚜基因及解析抗虫机理奠定基础。利用简单重复序列（Simple sequence repeat, SSR）分子标记技术，从小麦正科 1 号鉴定了一个抗蚜基因 *DnY*，定位于 7DS 上，与 *Xwms350*、*Xgwm437*、*Xgwm4* 紧密连锁，其中 *Xgwm44* 与 *DnY* 的遗传距离为 3.29 cM（付晶等，2008）；从高抗麦长管蚜的小麦品系 XN98-10-35 的 7DL 染色体上定位了与抗蚜基因 *Sa1* 连锁的 4 个 SSR 标记 *Xgwm350*、*Xbarc70*、*Xwmc702* 和 *XCfd46*（王春平，2011），还鉴定另一个抗蚜基因 *Sa2* 也定位在 7D 染色体上（Wang *et al.*，2015a）；从硬粒小麦品种 C273 发现并命名了抗麦长管蚜基因 *RA-1*，并经连锁分析该基因定位于 6AL 上与 5 个已知位点连锁（Liu *et al.*，2012）。近年来，通过全基因组关联分析（GWAS）与 QTL 作图等技术方法在小麦 3A 染色体 34.52-37.50 Mb 区间发现小麦抗蚜的稳定位点 *qSa-3A*，在该区间内筛选出 10 个候选基因、可编码 NBS-LRR 抗病蛋白和细胞色素 P450（Zhao *et al.*，2023）。由此可见，麦长管蚜抗性基因主要定位于小麦染色体 3A、6A 和 7D 上，这些抗性基因定位、连锁标记及单倍型研究，对推进分子标记辅助抗蚜育种（Molecular marker-assisted selection，MAS）具有重要意义。

2.3 生态调控技术

在农业害虫综合防治（Integrated pest management，IPM）的基础上，20 世纪 90 年代提出害虫生态调控的概念，之后对害虫生态调控的概念、方法、手段等进行了更系统深入的研究

（戈峰，2001；陆宴辉等，2017）。害虫生态调控从农田生态系统出发，优化作物布局、采用抗病虫品种、改善水肥管理等栽培措施，结合作物间套作、天敌诱集带等功能植物利用、农田耕作制度等生物多样性及自然天敌保护利用等调控技术，涵养和保护天敌昆虫及有益微生物，增强其自然控害能力和作物抗病虫能力及作物自身的营养代谢生长能力。从 21 世纪初以来，研究人员开展了大量的麦蚜生态调控技术研究与应用实践，下面从小麦与其他植物合理布局、挥发性信息化合物控害保益等方面取得主要进展进行概述。

2.3.1　小麦与其他植物合理布局的麦蚜生态调控技术。农田景观布局变化对小麦害虫多样性以及麦蚜和天敌的发生与转移等具有不同程度的影响（张永生等，2018；尤士骏等，2019）。景观结构影响麦蚜迁入麦田的时间，复杂农业景观下麦蚜迁入时间晚于单一连片种植的农业景观（赵紫华等，2010）。棉麦间作条带种植有利于麦田瓢虫向棉田迁移控制棉蚜 *Aphis gossypii*。非作物生境受到人为干扰较少，在作物收获时可以维持天敌种群。因此，麦田边缘种植合适的非作物使天敌在田间重新分布，可提高对麦蚜生物防治水平。

小麦与其他作物合理布局可增加麦田的生物多样性，减少防控麦蚜的农药用量。植物多样性的增加可以通过由低营养级水平驱动的“Bottom-up”作用和由高营养级水平驱动的“Top-down”作用，达到害虫生态调控目的。这种调控一方面通过对麦蚜和相关天敌等的行为进行调控，另一方面通过对植物的营养和抗性调控，从而达到调控麦蚜目的（谭晓玲等，2021）。研究显示，小麦与豌豆、油菜、大蒜等间作或邻作有利于主要天敌向麦田转移，对麦蚜防控效果显著，并能提高小麦的产量和生物量（王万磊等，2008；周海波等 2009；费晓东等，2011）。小麦与豌豆、大蒜等间作模式对蚜虫控制及天敌引诱作用存在差异，同时还研究探索了最佳间作比例。非寄主植物的气味对寄主植物气味起掩盖作用，干扰蚜虫寄主定位，从而达到防治蚜虫的目的（王万磊等，2008；解海翠等，2012）。小麦与荷兰豆间作显著提升捕食性天敌数量及昆虫群落整体稳定性，其效果优于小麦与油菜间作及单作麦田，其中小麦套种荷兰豆田的麦蚜亚群落稳定性最佳，而单作麦田的捕食性天敌亚群落稳定性最高（李素娟等，2007）。目前，麦田间作成熟的种植模式：小麦与豌豆间作以 8∶2 行比（周海波等，2009）、小麦与油菜间作以 10% 的油菜条带（费晓东等，2011）、小麦与蛇床草间作以小麦（30 m）-蛇床草（1 m）（戈峰等，2025），均具有良好的控害保益的效果。

在农田生态系统中，功能植物能够诱集害虫，或者吸引天敌，提高天敌的控害功能，增加作物产量等生态系统服务。功能植物从对害虫的调控来说一般包括诱集植物、驱避植物、屏障植物等，从对天敌的调控来说包括虫源植物，银行植物等。在麦田边缘条带种植紫花苜蓿或黑麦草等牧草，能够为麦蚜的天敌瓢虫提供替代食物，刈割牧草可以助迁瓢虫进入麦田（Dong *et al.*，2012）。

2.3.2　利用挥发性信息化合物控害保益的“推-拉”技术　挥发性信息化合物在害虫综合治理中的应用。小麦受虫害诱导的挥发物（HIPVs）中水杨酸甲酯、6-甲基-5-庚烯-2-酮、6-甲基-5-庚烯-2-醇，以及大蒜中的大蒜素等具有驱避蚜虫和引诱天敌的双重作用，因此可以作为麦田蚜虫行为调控的推拉技术（Zhou *et al.*，2013；范佳等，2014）；由于植物挥发物易挥发、活性不稳定，通过海藻酸钠介质制作缓释技术，可达到延长释放的效果（刘勇等，2014；Zhou *et al.*，2016）。燕麦蚜茧蜂和烟蚜茧蜂是麦田寄生蜂优势种，浓度 0.1μg/μL 的 EBF 对两种蚜茧蜂雌蜂都有显著吸引作用。一定浓度（0.001-1.000 μg/μL）的蚜虫性外激素（Nepetalactone, NEP）对烟蚜茧蜂雌蜂具有显著的趋向反应。因此，EBF 和 NEP 可以作为麦田寄生性天敌的寄主搜寻和定位的化学线索（王璐等，2018）。EBF 和 MeSA 作为典型蚜虫驱避剂，已在麦蚜绿色防控技术集成与示范应用。科研人员还借鉴 MeSA 和 EBF 的化学结构及活性特点，采用计算机辅助分子设计技

术合成一系列水杨酸香叶酯类衍生物、EBF 类似物，发现了一系列具有“推拉”双重作用、且对蜜蜂安全的新型绿色蚜虫控制剂（Sun *et al.*，2012；Qin *et al.*，2020；Yang *et al.*，2023）。

小麦-油菜间作系统，结合 MeSA 释放，能使麦长管蚜种群趋于均匀分布，且增加天敌种群数量、使天敌提前 7-10 d 迁入麦田，对麦蚜起到明显的协同控害作用（董洁等，2012；Xu *et al.*，2018）。目前，利用小麦与功能植物（油菜、豌豆、蚕豆及蛇床草等）间作，结合 MeSA 缓释器助迁天敌，成为麦田生态调控的重要措施（Zhou *et al.*，2016；谭晓玲等，2021）。例如，在黄淮海麦区，采用小麦间作豌豆 + 释放 MeSA、配合自走式喷雾机施药，实现三重增效：麦蚜/红蜘蛛下降 60%，瓢虫增加 40%、僵蚜增加 35%，小麦增产 15%，但需要规避器械喷药对寄生蜂等的非靶向伤害（谭晓玲等，2021）。

2.4 物理诱控技术

物理诱控技术是利用害虫的生理习性（如趋光性、趋色性、趋化性等），通过物理装置实现对害虫的监测、诱捕或干扰，从而降低害虫种群数量的绿色防控技术。在小麦害虫防控中，该技术因环保、低残留、对天敌安全等特点，在综合防治体系中具有一定潜力。例如在小麦田悬挂黄色粘虫板或蓝色粘虫板，麦蚜（如麦长管蚜、麦二叉蚜）的有翅成虫对黄色敏感，黄板可有效诱捕迁移的有翅蚜，减少其在田间的定殖和繁殖。综合使用黄板、诱虫灯、糖醋液能降低麦蚜种群数量，但采用该防治措施同时诱杀寄生性天敌、使捕食性天敌的群落稳定性较差（邓菲等，2014）。

2.5 生物防治技术

麦蚜天敌的资源丰富、种类多至几十种。主要有蚜茧蜂、瓢虫、食蚜蝇、草蛉、蜘蛛、蝽和微生物类的蚜霉菌等几大类。在小麦开始返青时就能对麦蚜起着重要的抑制作用。此外，可以通过人工释放瓢虫、草蛉、寄生蜂等方式来控制蚜虫。在蚜虫数量快速上升、蚜虫数量较多时释放瓢虫成虫，释放数量应当根据田间的具体蚜虫数量而定（曹雅忠等，2006）。一些寄生蜂、寄生蝇在羽化后常需补充营养而取食花蜜，因此，在麦田周围可以种植一些蜜源植物，像豌豆，油菜及菊科等开花植物，有利于天敌昆虫的繁衍。在蚜虫天敌盛发期，尽可能在麦田少施或不施广谱性化学杀虫剂，避免杀伤天敌。返青期肥水施用要避开瓢虫产卵盛期，保护瓢虫卵和幼虫。改进施药机械和技术，扩大天敌的利用面积和防治效果，发挥天敌的控害作用。重要的虫源植物如豌豆、油菜、蛇床草、荞麦 *Fagopyrum sagittatum*、甘草 *Agastache foeniculum* 等能够为麦蚜寄生蜂提供碳水化合物，从而增加寄生蜂的寿命和产卵量（Bugg，1994；Nafziger，2011）。在麦田间作豌豆或者在边缘种植蛇床草，可助增天敌瓢虫种群提前迁入麦田控害，能够显著维持和增加农田生态系统的天敌控害作用（杨泉峰等，2018；谭晓玲等 2021）。研究证明，小麦品种 AK58 可以作为大量函养烟蚜茧蜂的银行植物（Pan *et al.*，2014）。针对天敌昆虫自然种群对田间害虫防控时的滞后效应，通过人工释放烟蚜茧蜂显著降低了麦长管蚜第二个发生高峰期（冬小麦灌浆期），使蚜量下降 42.50%（蒋骏等，2025）。进一步筛选对烟蚜茧蜂具有引诱活性小麦挥发物 2-壬烯醛，对烟蚜茧蜂引诱剂的开发具有重要意义（Jiang *et al.*，2024）。

2.6 纳米农药与 RNA 农药

近年来，纳米农药的研发与应用快速发展，纳米农药可提高药物渗透性、传导性和稳定性，同时降低化学农药残留和对环境的污染。使用纳米生物农药——6%烟碱微胶囊包载缓释剂对麦蚜具有良好的防效与速效性，在施药 1 d 后的平均防效均在 83%以上，显著高于未纳米化农药，且对小麦生长无负面影响（刘月悦，2014）。RNA 农药被誉为农药史上第 3 次革命，是新型绿色农药创制领域的热点。通过显微注射及饲喂双链 RNA（dsRNA）已挖掘麦蚜唾液蛋白 C002、漆酶 Laccase1、CYP6DC1、CYP380C47、ilvE、ilvA、miR-263 等功能基因或沉默致死基因，为

麦蚜 RNA 农药研发提供了丰富靶点（Wang *et al.*，2015a；Zhang *et al.*，2018；Wang *et al.*，2022b；Li *et al.*，2023a，2023b；吴林源等，2024）。但 dsRNA 在体外环境中不稳定，易被 RNA 降解酶、紫外光和高温降解，难以有效地导入靶标生物体内，严重限制了可喷洒核酸农药的实际应用效果。基于纳米材料的 RNA 农药纳米递送系统在有害生物防治方面应用潜力巨大，其作为 dsRNA 载体可以增强 dsRNA 在环境中的稳定性和进入目标生物组织或细胞的能力，进而提高靶向递送效率，是解决核酸农药外源施用难的有效手段（Yan *et al.*，2020）。通过星型聚合物纳米材料 SPc 介导的 dsRNA 递送系统分别导入 dsSg2204、miR-184 可导致麦长管蚜死亡率显著增加（Zhang *et al.*，2022，2024a），为开发稳定高效的麦蚜 dsRNA 农药提供了新策略。

此外，通过基因工程培育表达靶向昆虫特异性基因的 dsRNA 转基因植物，已被证明是一种利用植物介导的RNAi技术实现害虫防治的环保替代方案。Zhang 等（2023a）鉴定并表征唾液蛋白编码基因 SmDSR33，构建了稳定表达 SmDSR33-dsRNA 的转基因小麦株系，通过小麦介导的 RNAi 技术实现对麦蚜 SmDSR33 的靶向沉默，且在麦蚜中具有持久性和跨代传递特性。由此看出，SmDSR33 可作为麦蚜防治的有效 RNAi 靶点，通过小麦植株介导的 RNAi 沉默与取食相关的重要唾液蛋白基因，可以作为一种有效的控制麦蚜策略。

2.7　化学防治技术

长期以来，我国麦蚜以化学防治为主。新烟碱类杀虫剂因其独特的作用机理、环境兼容性好目前成为防治麦蚜的首选农药（王建军等，2001）。但是，化学农药的持续、大量的使用对麦蚜造成了很高的抗性选择压，加之麦蚜繁殖量大、世代重叠严重，很容易对常用杀虫剂产生了不同程度的抗药性（彭丽年等，2000；成惠珍等，2004；邱高辉，2007；李亚萍等，2017；黄彦娜，2018；李晓倩等，2018；龚培盼等，2021）。2020 年，全国农业技术推广服务中心颁发的全国农业有害生物抗性监测报告显示，部分麦长管蚜种群对吡虫啉处于低至高水平抗性（抗性倍数 6.5-166.0 倍），禾谷缢管蚜对氟啶虫胺腈处于敏感至中等水平抗性（抗性倍数 2.0-11.0 倍）（全国农业技术推广服务中心，2021）。2024 年麦长管蚜、禾谷缢管蚜部分种群对氟啶虫胺腈、吡虫啉已上升为中等至高水平抗性，其抗性水平均高于 2023 年（任宗杰等，2025）。目前，国内在麦蚜抗药机制方面也取得相关重要进展，研究发现麦蚜体内的解毒酶如细胞色素 P450 单加氧酶、羧酸酯酶及谷胱甘肽 *S*-转移酶活性增强以及 M918L 突变是麦蚜产生抗药性的重要原因（邱高辉等，2007；张蒙，2016；龚培盼，2020）。

3　小麦蚜虫绿色防控技术体系创新

3.1　黄淮海麦区技术体系创新及应用

黄淮海主麦区作为我国小麦核心产区，针对耕作制度和气候变化下蚜虫发生的特点，通过集成智能监测、生物防治、生态调控等关键技术，构建了“作物间作+挥发物释放”的麦蚜“推-拉”技术，在麦田间作豌豆、油菜等植物，吸引瓢虫、寄生蜂等天敌，蚜虫种群数量降低 30%-50%。同时结合挥发物 EBF 和 MeSA 的释放，通过吡虫啉、噻虫嗪等小麦拌种，结合关键小麦生育期的无人机精准施药“一喷三防”技术，形成小麦蚜虫绿色综合防控的配套技术体系，生产上推广应用平均降低化学农药用量 30%。

3.2　小麦蚜虫研究的主要成果奖励情况

21 世纪以来，在小麦蚜虫灾变规律、遥感监测关键技术、抗性麦蚜精准化控技术、小麦黄化矮缩类病害的致病机理、区域性综合治理及绿色防控技术体系等方面的研究取得在主要成果如下：

小麦蚜虫灾变规律与绿色防控技术。中国农业科学院植物保护研究所陈巨莲团队针对麦蚜种群暴发与灾变关键因素的关系，揭示了小麦-蚜虫-天敌协同进化分子生态机制；研发了麦蚜精准预测模型、驱避剂缓释的行为操作技术、增

强麦田生物多样性的抗虫品种布局、小麦与豌豆、油菜间作生态调控技术等关键防控技术，建立小麦抗蚜性评价技术标准，构建了“以精准预测、抗蚜品种布局、推拉技术和生态调控为主，结合药剂拌种及化学防治”的小麦蚜虫绿色防控配套技术体系，在小麦主产区大面积推广。荣获 2018-2019 年度神农中华农业科技奖科学研究类成果三等奖。

作物病虫害遥感监测关键技术研究与应用。河南农业大学乔红波团队针对作物病虫害监测的迫切需求，开展病虫害多源、多尺度遥感测报技术和小麦病虫害测报大数据平台构建技术，筛选麦蚜、白粉病、全蚀病、赤霉病等病虫害光谱敏感波段、明晰对应病虫害的光谱响应机理，构建病虫害为害程度与光谱的关系模型，建立“星-天-地”病虫害智能监测技术体系及遥感监测系统和装置，构建了小麦病虫害测报服务大数据平台，为病虫害绿色防控提供信息支撑及推广体系。荣获 2020 年河南省科学技术进步二等奖。

抗性麦蚜精准化控技术体系。中国农业大学高希武团队依据靶标生物-剂量反应的特性，优选适合的农药品种、确定最佳施药剂量、阐明抗药性机理、探明合适的用药时期等方面展开了系统的关键技术及应用研究。在小麦主产区大面积推广应用，取得了较好的经济效益和显著的社会效益。该研究作为农业害虫抗药性治理的成功案例，荣获 2020-2021 年度神农中华农业科技奖科学研究类成果一等奖。

黄淮海麦区蚜虫灾变规律与综合防控关键技术。河南省农业科学院植物保护研究所武予清团队依据黄淮海麦区麦蚜主要迁飞路线及其灾变规律，建立了以吸虫塔为主要手段的监测预警系统，创建了基于“诱集保育天敌，信息素助迁”为核心的小麦蚜虫生物防治技术体系，筛选了新烟碱类杀虫剂拌种及新型高效防治药剂。集成了以“拌种压低基数，诱集保育天敌，种群迁飞监测，农药应急防控”为核心的综合防控技术模式，并在黄淮海麦区进行了大面积应用。荣获 2023 年河南省科学技术进步二等奖。

小麦黄化矮缩类病害的致病机理及综合防控技术研究与应用。西北农林科技大学吴云峰团队探明了小麦黄化矮缩类病害的昆虫传播机制。首次发现麦蚜在小麦寄主上传播病毒的动力学因素，揭示蚜虫受小麦挥发物己烯醛吸引取食，将黄矮病毒传给健康小麦，病毒累积、又抑制己烯醛合成，驱使病株上的蚜虫迁移到健康小麦群体上传毒，实现病毒传播扩散；研究揭示了麦蚜传毒识别蛋白（GroEL 和 P50），与 GAV 株系互作是蚜虫介体传播病毒的根本原因。荣获 2023 年度陕西省科技进步一等奖。

4 展望

监测预警方面：整合卫星遥感（如高分卫星植被指数）、无人机多光谱传感器，通过深度学习算法构建多源数据融合的 AI 时空动态预测模型。实现智能监测与预测技术的精准化升级。

前沿技术方面：加强小麦蚜虫防控的纳米农药、RNA 农药的技术研发与产业化应用，增强对蚜虫靶标精准防控、天敌昆虫安全的措施；加强防控麦蚜的 Bt 等微生物制剂、生物农药的研发与应用。

绿色防控技术方面：1）在小麦-蚜虫-天敌互作分子生态机制的取得重要进展基础上，以麦蚜、天敌等嗅觉受体 OR/Orco、气味结合蛋白 OBP/化学感受蛋白 CSP 为靶点，利用 Alphafold 在线程序构建三维模型、通过分子对接、高通量筛选、嗅觉行为鉴定等技术，获得对麦蚜和天敌具有“推拉”双重功效的信号化合物；2）深入开展小麦虫害诱导抗性机制及蚜虫唾液核心效应子研究，开发小麦抗蚜基因、植物诱抗剂及作用效果研究；3）将蚜虫报警激素等信息素与植物虫害活性挥发物形成组合物，研发高效的蚜虫驱避剂和天敌引诱剂，以增强行为调控、生态调控、生物防治的生态协调增效功能。4）优化小麦与豆科、菊科作物的间作模式，结合天敌栖境，构建“Banker-plant”系统。5）平衡施肥方面：平衡施肥既可改善土壤结构、提高养分利用率、增加作物抗性，又可提高作物高产优质目的（Wang *et al.*，2021）。在小麦生长期施用硅肥，

不仅促进植物的生长发育、提高产量和品质，还起到了抗蚜的作用（闫甲等，2019；Wang *et al.*，2023；Tan *et al.*，2025）。

共生菌及土壤微生物的利用：随着分子生物学技术的不断发展，共生菌及土壤微生物介导的蚜虫-植物互作关系逐渐被揭示（姜亚楠等，2024）。利用组学技术深入解析蚜虫内共生菌及根际微生物等与麦蚜互作关系，及小麦和蚜虫体内表达差异基因及来源于共生菌的高丰度蛋白，可为参与蚜虫-植物互作的候选效应子的筛选和鉴定、丰富抗蚜基因来源，以及利用共生菌蛋白和有益的微生物研发植物免疫诱导剂和抗蚜分子育种提供理论支撑。此外，蚜虫次级共生菌被证实可以通过植物介导水平传播，研究探讨提高防御性次级共生菌对蚜虫感染率，可为基于共生菌研发“以菌防蚜”的蚜虫绿色防控技术提供新思路。

参考文献 (References)

Bai JF, 2021. Resistance identification of wheat germplasm resources to *Aphis avenae*. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [白金峰, 2021. 小麦种质资源的麦长管蚜抗性鉴定. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Bajwa AA, Farooq M, Al-Sadi AM, Nawaz A, Jabran K, Siddique KHM, 2020. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137: 105304.

Bugg RL, Waddington C, 1994. Using cover crops to manage arthropod pests of orchards-a review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 50: 11–28.

Cai ZP, Ouyang F, Su JW, Zhang XR, Liu CL, Xiao YL, Zhang JP, Ge F, 2020. Attraction of adult *Harmonia axyridis* to volatiles of the insectary plant *Cnidium monnieri*. *Biological Control*, 143: 104189.

Cao HH, 2014. Constitutive and induced defenses of wheat against *Sitobion avenae*. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [曹贺贺, 2014. 小麦对麦长管蚜的组成抗性和诱导抗性研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Cao YZ, Yin J, Li KB, Zhang KC, Li XQ, 2006. Prelimanry study on the reasons for wheat aphids the continuous rampant outbreak and management. *Plant Protection*, 32(5): 72–75. [曹雅忠, 尹姣, 李克斌, 张克诚, 李贤庆, 2006. 小麦蚜虫不断猖獗原因及控制对策的探讨. 植物保护, 32(5): 72–75.]

Chen FJ, Wu G, Parajulee MN, Ge F, 2007. Impact of elevated CO_2 on the third trophic level: A predator *Harmonia axyridis* and a parasitoid *Aphidius picipes*. *Biocontrol Science and Technology*, 17(3): 313–324.

Chen JL, Ni HX, Sun JR, 2002. The resistance threshold and interactions of several plant secondary metabolites to wheat aphids. *Journal of Plant Protection*, 29(1): 7–12. [陈巨莲, 倪汉祥, 孙京瑞, 2002. 主要次生物质对麦蚜的抗性阈值及交互作用. 植物保护学报, 29(1): 7–12.]

Cheng HZ, Zheng SY, Guo YR, Zhao SZ, Wang P, 2004. Studies on resistance of wheat aphids to several pesticides. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 33(6): 50–51. [成惠珍, 郑淑英, 郭玉荣, 赵淑贞, 王鹏, 2004. 麦蚜对几种药剂的抗性. 河南农业科学, 33(6): 50–51.]

Cui LL, Francis F, Heuskin S, Lognay G, Liu YJ, Dong J, Chen JL, Song XM, Liu Y, 2012. The functional significance of E-β-farnesene: Does it influence the populations of aphid natural enemies in the fields. *Biological Control*, 60(2): 108–112.

Deng F, Li Z, Yin CY, Li HL, Liu XX, Zhao ZW, 2014. Effects of different wheat aphid control methods on the arthropod community in wheat fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 369–374. [邓菲, 栗治, 尹春燕, 李辉利, 刘小侠, 赵章武, 2014. 麦蚜的不同防治方法对麦田节肢动物功能团的影响. 应用昆虫学报, 51(2): 369–374.]

Dong J, Liu YJ, Li PL, Lin FJ, Chen JL, Liu Y, 2012. Ecological effects of wheat-oilseed rape intercropping combined with methyl salicylate release on *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(10): 2843–2848. [董洁, 刘英杰, 李佩玲, 林芳静, 陈巨莲, 刘勇, 2012. 间作与 MeSA 释放对麦长管蚜及其优势天敌的生态效应. 应用生态学报, 23(10): 2843–2848.]

Dong YM, Zhang MQ, Shen H, Huang XG, Yang YX, Li JF, Zhang WD, Shen DY, Jing MF, Dou DL, Xia A, 2021. Research advances of salivary effectors and elicitors in herbivorous insects. *Acta Entomologica Sinica*, 64(8): 982–997. [董玉妹, 张美倩, 沈慧, 黄兴革, 杨玉霞, 李继芬, 张文丹, 沈丹宇, 景茂峰, 窦道龙, 夏爱, 2021. 植食性昆虫唾液效应子和激发子的研究进展. 昆虫学报, 64(8): 982–997.]

Dong ZK, Gao FJ, Zhang RZ, 2012. Use of ryegrass strips to enhance biological control of aphids by ladybirds in wheat fields. *Insect Science*, 19(4): 529–534.

Dong ZK, Hou RX, Ouyang Z, Zhang RZ, 2013. Tritrophic interaction influenced by warming and tillage: A field study on winter wheat, aphids and parasitoids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181: 144–148.

Du H, Wang XW, 2022. Regulation of insect-plant interactions by

herbivorous insect saliva. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 184–197. [都慧, 王晓伟, 2022. 植食性昆虫唾液调控昆虫-植物互作的研究进展. 植物保护学报, 49(1): 184–197.]

Erb M, Meldau S, Howe GA, 2012. Role of phytohormones in insect-specific plant reactions. *Trends in Plant Science*, 17(5): 250–259.

Fan J, Jiang X, Li Q, Yu MM, Zhang SY, Xue WX, Francis F, Su CQ, Aradottir GI, Liu YX, Zhang Y, Chen JL, 2025. The morphology and molecular mechanisms of enhanced olfaction in the grain aphid *Sitobion miscanthi*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 289: 138475.

Fan J, Liu Y, Zeng JG, Guo M, Sun JR, Cheng P, Chen JL, 2014. Advancement of new prevent and control technologies for aphids in wheat and vegetable. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1413–1434. [范佳, 刘勇, 曾建国, 郭梅, 孙京瑞, 程辟, 陈巨莲, 2014. 小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1413–1434.]

Fan J, Xue WX, Duan HX, Jiang X, Zhang Y, Yu WJ, Jiang SS, Sun JR, Chen JL, 2017. Identification of an intraspecific alarm pheromone and two conserved odorant-binding proteins associated with (*E*)-β-farnesene perception in aphid *Rhopalosiphum padi*. *Journal of Insect Physiology*, 101: 151–160.

Fan J, Wang B, Zhang TJ, Yu MM, Wang MY, Zhang SY, Su CQ, Xu JY, Jiang X, Zhang Q, Wang GR, Chen JL, 2024. The role of OR5, which is highly expressed in the winged grain aphid *Sitobion miscanthi*, in specific recognition of EBF. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 173: 104180.

Fan J, Zhang Y, Francis F, Cheng DF, Sun JR, Chen JL, 2015. Orco mediates olfactory behaviors and winged morph differentiation induced by alarm pheromone in the grain aphid, *Sitobion avenae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 64: 16–24.

Fang JC, Piao YF, Sun JZ, Du ZW, 1998. Action mechanism and application techniques of imidacloprid as an insecticide against rice plant hoppers and other crop pests. *Journal of Southwest University* (*Natural Science Edition*), 20(5): 478–488. [方继朝, 朴永范, 孙建中, 杜正文, 1998. 吡虫啉防治稻飞虱等害虫的毒理和技术研究. 西南大学学报(自然科学版), 20(5): 478–488.]

Fei XD, Li C, Zhang QW, Zhao ZW, 2011. The effects of wheat planted adjacent to rape on natural enemy population dynamics and wheat production. *Plant Protection*, 37(6): 186–190. [费晓东, 李川, 张青文, 赵章武, 2011. 油菜-小麦邻作模式对麦蚜主要天敌种群动态以及小麦生产的影响. 植物保护, 37(6): 186–190.]

Fu J, Zhang SH, Wen SM, Yang XJ, 2008. SSR markers linked to a wheat aphids resistance gene. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 31(5): 1–4. [付晶, 张树华, 温树敏, 杨学举, 2008. 用SSR分子标记定位普通小麦品种正科1号中的抗麦蚜基因. 河北农业大学学报, 31(5): 1–4.]

Fu Y, Liu XB, Wang Q, Liu H, Cheng YM, Li HM, Zhang Y, Chen JL, 2023. Two salivary proteins Sm10 and SmC002 from grain aphid *Sitobion miscanthi* modulate wheat defense and enhance aphid performance. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1104275.

Fu Y, Wang Q, Zhang Y, Chen JL, 2021. Cloning and functional analysis of salivary protein gene Sm13498 of the grain aphid, *Sitobion miscanthi* (Hemiptera: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 64(9): 1009–1019. [付裕, 王倩, 张勇, 陈巨莲, 2021. 获草谷网蚜唾液蛋白基因 Sm13498 的克隆及功能分析. 昆虫学报, 64(9): 1009–1019.]

Ge F, 2001. The principles, methods and practices of regional ecological regulation and management of pests. *Entomological Knowledge*, 38(5): 337–341. [戈峰, 2001. 害虫区域性生态调控的理论、方法及实践. 昆虫知识, 38(5): 337–341.]

Ge F, Chen FJ, Wu G, Sun YC, 2010. Insects Response to Elevated Atmospheric CO_2 Concentration. Beijing: Science Press. 212. [戈峰, 陈法军, 吴刚, 孙玉诚, 2010. 昆虫对大气 CO_2浓度升高的响应. 北京: 科学出版社. 212.]

Ge F, Liang XY, Zhang XR, Li Z, Ju Q, Ouyang F, Yang QF, Cai ZP, Su WW, Han GD, 2025. Ecologically based pest management mechanisms and practical applications of the functional plant *Cnidium monnieri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(3): 559–566. [戈峰, 梁潇以, 张兴瑞, 李卓, 鞠倩, 欧阳芳, 杨泉峰, 蔡志平, 苏文雯, 韩国栋, 2025. 功能植物蛇床草生态控害作用及其应用. 应用昆虫学报, 62(3): 559–566.]

Gong P, Shen ZR, Li ZH, 2002. PCR-based detection of *Wolbachia* infected in natural populations of wheat aphids in China. *Entomological Knowledge*, 39(3): 188–190. [龚鹏, 沈佐锐, 李志红, 2002. 我国麦蚜体内的沃尔巴克氏体(*Wolbachia*)的检测. 昆虫知识, 39(3): 188–190.]

Gong PP, 2020. Resistance monitoring and resistance mechanism to beta-cypermethrin in wheat aphids. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [龚培盼, 2020. 麦蚜抗药性监测及其对高效氯氰菊酯抗性机理研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Gong PP, Li XA, Wang C, Li XR, Zhang YH, Li JH, Zhu X, 2021. Research advances in pyrethroid insecticide resistance in wheat aphids. *Plant Protection*, 47(1): 8–14. [龚培盼, 李新安, 王超, 李祥瑞, 张云慧, 李建洪, 朱勋, 2021. 麦蚜对拟除虫菊酯类杀虫剂抗性研究进展. 植物保护, 47(1): 8–14.]

Guo JQ, Hatt S, He KL, Chen JL, Francis F, Wang ZY, 2017. Nine facultative endosymbionts in aphids. A review. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(3): 794–801.

Guo JQ, Liu XW, Poncelet N, He KL, Francis F, Wang ZY, 2019. Detection and geographic distribution of seven facultative endosymbionts in two *Rhopalosiphum* aphid species. *Microbiology Open*, 8(8): e00817.

Guo X, Li KB, Yin J, Cao YZ, 2010. Relationship between *Macrosiphum avenae* population dynamics and free amino acid in wheat. *China Plant Protection*, 30(4): 5–9. [郭萧, 李克斌, 尹姣, 曹雅忠, 2010. 麦长管蚜种群消长与小麦植株游离氨基酸的关系. 中国植保导刊, 30(4): 5–9.]

Han ZL, Tan XL, Wang Y, Xu QX, Zhang Y, Harwood JD, Chen JL, 2019. Effects of simulated climate warming on the population dynamics of *Sitobion avenae* (Fabricius) and its parasitoids in wheat fields. *Pest Management Science*, 75(12): 3252–3259.

Han ZL, Tan XL, Chen JL, 2017. Study of behavior responsive mechanism of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) to environmental temperature variations. *Chinese Journal of Biological Control*, 33(4): 433–441. [韩宗礼, 谭晓玲, 陈巨莲, 2017. 环境温度变化对异色瓢虫的飞行与运动能力的影响. 中国生物防治学报, 33(4): 433–441.]

Han ZL, Tan XL, Fan J, Sun JR, Chen JL, 2018. Impact of simulated warming on the population dynamics of grain aphid *Sitobion avenae* and bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi* across latitudes. *Journal of Plant Protection*, 45(3): 592–598. [韩宗礼, 谭晓玲, 范佳, 孙京瑞, 陈巨莲, 2018. 模拟气候变暖对不同纬度带麦长管蚜和禾谷缢管蚜种群动态的影响. 植物保护学报, 45(3): 592–598.]

Hu GY, Liu DG, 2025. Functional analyses of the salivary ferritin SaFer1 in *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 68(5): 555–568. [胡戈洋, 刘德广, 2025. 麦长管蚜唾液铁蛋白 SaFer1 功能研究. 昆虫学报, 68(5): 555–568.]

Hu ZQ, Su D, Li DD, Tong ZQ, Zhang C, Zhang GS, Zhao HY, Luo C, 2020. Diversity of secondary endosymbionts among different geographical populations of the grain aphid, *Sitobion avenae* (Fabricius) (Hemiptera: Aphididae) in China. *Entomologia Generalis*, 40(3): 253–262.

Hu ZQ, Chai RR, Liu X, Dong Y, Su D, Desneux N, Tan XL, Luo C, 2022. Barley yellow dwarf virus-infected wheat plant modulated selection behavior of vector aphids. *Journal of Pest Science*, 95(3): 1273–1285

Huang YN, 2018. Insecticide resistance monitoring and symbionts detection in *Rhopalosiphum padi* field populations from Guanzhong area of Shanxi Province. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [黄彦娜, 2018. 陕西关中地区禾谷缢管蚜抗药性监测及共生菌检测. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Jiang J, Xue JY, Yu MM, Jiang X, Cheng YM, Wang HJ, Liu YX, Dou W, Fan J, Chen JL, 2024. Molecular characterization of chemosensory protein (CSP) genes and the involvement of AgifCSP5 in the perception of host location in the aphid parasitoid *Aphidius gifuensis*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6392): 1–19.

Jiang J, Xu QX, Jiang X, Cheng YM, Gu ZH, Zhang Y, Liu YX, Qin YG, Dou W, Fan J, Chen JL, 2025. Effects of *Aphidius gifuensis* release on wheat aphids and its natural enemies population dynamics in wheat fields. *Chinese Journal of Biological Control*, https://link.cnki.net/urlid/11.5973.S.20250514.0931.002. [蒋骏, 徐庆宣, 蒋欣, 程雨蒙, 顾子豪, 张勇, 刘彦霞, 秦耀果, 豆威, 范佳, 陈巨莲, 2025. 麦田释放烟蚜茧蜂对麦蚜及天敌种群动态的影响. 中国生物防治学报, https://link.cnki.net/urlid/11.5973.S.20250514.0931.002.]

Jiang X, Qin YG, Jiang J, Xu Y, Francis F, Fan J, Chen JL, 2022. Spatial expression analysis of odorant binding proteins in both sexes of the aphid parasitoid *Aphidius gifuensis* and their ligand binding properties. *Frontiers in Physiology*, 13: 877133.

Jiang X, 2023. Functional investigation of odorant-binding proteins in *Aphidius gifuensis* and its host *Sitobion miscanthi* revealed convergent evolution. Doctor dissertation. Beigium: Liege Unversity.

Jiang YN, Qi FJ, Li WW, Chen JL, TAN XL, 2024. The increasing temperature accelerated the population growth of *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae* by wheat rhizosphere microorganisms. *Scientia Agricultura Sinica*, 57(20): 4045–4056. [姜亚楠, 亓方剑, 李维维, 陈巨莲, 谭晓玲, 2024. 温度升高下的小麦根际微生物可加快禾谷缢管蚜和麦长管蚜的种群增长. 中国农业科学, 57(20): 4045–4056.]

Jones JDG, Dangl JL, 2006. The plant immune system. *Nature*, 444(7117): 323–329.

Kang ZW, Liu FH, Pang RP, Yu WB, Tan XL, Zheng ZQ, Tian HG, Liu TX, 2018a. The identification and expression analysis of candidate chemosensory genes in the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi* (L.). *Bulletin of Entomological Research*, 108(5): 645–657.

Kang ZW, Liu FH, Tan XL, Zhang ZF, Zhu JY, Tian HG, Liu TX, 2018b. Infection of powdery mildew reduces the fitness of grain aphids (*Sitobion avenae*) through restricted nutrition and induced defense response in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 9: 778.

Li Q, Sun JX, Qin YG, Fan J, Zhang Y, Tan XL, Hou ML, Chen JL, 2021. Reduced insecticide susceptibility of the wheat aphid *Sitobion miscanthi* after infection by the secondary bacterial symbiont *Hamiltonella defensa*. *Pest Management Science*, 77(4): 1936–1944.

Li Q, Fan J, Sun JR, Wang MQ, Francis F, Chen JL, 2016. Research progress in the interactions among the plants, insects and endosymbionts. *Journal of Plant Protection*, 43(6): 881–891. [李迁, 范佳, 孙京瑞, 王满囷, Frederic Francis, 陈巨莲, 2016. 昆虫内共生菌-昆虫-植物互作关系研究进展. 植物保护学报, 43(6): 881–891.]

Li Q, Fan J, Sun JX, Wang MQ, Chen JL, 2018a. Effect of the secondary symbiont *Hamiltonella defensa* on fitness and relative abundance of *Buchnera aphidicola* of wheat aphid, *Sitobion miscanthi*. *Frontiers in Microbiology*, 9: 582.

Li Q, Fan J, Sun JX, Wang MQ, Chen JL, 2018b. Plant-mediated horizontal transmission of *Hamiltonella defensa* in the wheat aphid *Sitobion miscanthi*. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 66(51): 13367–13377.

Li Q, Fan J, Sun JX, Zhang Y, Hou ML, Chen JL, 2019. Anti-plant defense response strategies mediated by the secondary symbiont *Hamiltonella defensa* in the wheat aphid *Sitobion miscanthi*. *Frontiers in Microbiology*, 10: 2419.

Li Q, Fu Y, Liu XB, Sun JX, Hou ML, Zhang Y, Chen JL, 2022. Activation of wheat defense response by *Buchnera aphidicola*-derived small chaperone protein GroES in wheat aphid saliva. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 70(4): 1058–1067.

Li Q, Fan J, Chen Y, Hou ML, Chen JL, 2023a. ilvE as a potential RNAi target to inhibit amino acid synthesis to control the wheat aphid *Sitobion miscanthi*. *Entomologia Generalis*, 43(1): 177–185.

Li Q, Cheng Y, Fan J, Chen JL, 2023b. Metabolic relay gene of aphid and primary symbiont as RNAi target loci for aphid control. *Frontiers in Plant Science*, 13: 1092638.

Li SJ, Liu AZ, Ru TQ, Wu YQ, Han S, 2007. Effects of different intercropping models on wheat aphids and their predator communities. *Acta Agriculturae Boreali-Simica*, 22(1): 141–144. [李素娟, 刘爱芝, 茹桃勤, 武予清, 韩松, 2007. 小麦与不同作物间作模式对麦蚜及主要捕食性天敌群落的影响. 华北农学报, 22(1): 141–144.]

Li T, Xiao JH, Wu YQ, Huang DW, 2014. Diversity of bacterial symbionts in populations of *Sitobion miscanthi* (Hemiptera: Aphididae) in China. *Environmental Entomology*, 43(3): 605–611.

Li T, Wu XJ, Jiang YL, Zhang L, Duan Y, Miao J, Gong ZJ, Wu YQ, 2016. The genetic diversity of SMLS (*Sitobion miscanthi* L type symbiont) and its effect on the fitness, mitochondrial DNA diversity and *Buchnera aphidicola* dynamic of wheat aphid, *Sitobion miscanthi* (Hemiptera: Aphididae). *Molecular Ecology*, 25(13): 3142–3151.

Li WW, Wang Y, Jaworski CC, Cheng YM, Miao J, Chen JL, Tan XL, 2024b. Effects of experimental warming on competition between *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae* mediated by plant water content. *Journal of Pest Science*, 97(3): 1623–1632.

Li WW, Yan J,Yang JQ, Zhang YH, Tan XL, 2025. Niche width and interspecific competition of wheat aphids *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae* are increased by simulated warming. *Entomologia Generalis*, 45(1): 117–126.

Li XQ, 2006. Resistance mechanism of wheat varieties to wheat aphid *Macrosiphum miscanthi*. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Agricultural University. [李贤庆, 2006. 不同小麦品种(系)对麦长管蚜 *Macrosiphum miscanthi* 抗性机制的研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学.]

Li XQ, Zhang YX, Xie P, Gao XW, 2018. Monitoring of the resistance of two species of wheat aphids to insecticides. *Barley and Cereal Sciences*, 35: 61. [李晓倩, 张亚鑫, 解平, 高希武, 2018. 两种麦蚜对杀虫药剂的抗性监测. 大麦与谷类科学, 35: 61.]

Li YP, Zhang YH, Zhu X, Li XR, Cheng DF, 2017. Research progress on the resistance of wheat aphids to imidacloprid. The Proceedings for 12th National Member Representative Conference of the Chinese Society for Plant Protection and the 2017 Academic Annual Conference. Changsha: 129–135. [李亚萍, 张云慧, 朱勋, 李祥瑞, 程登发, 2017. 麦蚜对吡虫啉抗性的研究进展. 中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会论文集. 长沙: 129–135.]

Li ZX, Jing SZ, Wang D, Song ZC, An BY, Wang SG, Liu FH, Di N, Aradottir GI, Sun JH, Tan XL, Qu C, Kang ZW, 2024c. Plant volatile methyl salicylate primes wheat defense against the grain aphid by altering the syndissertation of defense metabolites. *Plant Cell & Environment*, https://doi.org/10.1111/pce.15351.

Liu FH, Kang ZW, Hu XS, Zhang ZF, Liu TX, 2017. Effects of foliage nutrients of different wheat cultivars on the grain aphid, *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Plant Protection*, 44(2): 305–311. [刘芳华, 康志伟, 胡想顺, 张战凤, 刘同先, 2017. 小麦叶片营养物质与抗麦长管蚜的相关性分析. 植物保护学报, 44(2): 305–311.]

Liu FH, Kang ZW, Tan XL, Fan YL, Tian HG, Liu TX, 2020. Physiology and defense responses of wheat to the infestation of

different cereal aphids. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(6): 1464–1474.

Liu XB, Zhang YM, Frédéric F, Cheng YM, Zhang Y, Chen JL, 2024. Comprehensive aphid resistance evaluation of wheat varieties at seedling and adult stages in Huang-Huai-Hai region of China. *Journal of Plant Protection*, 51(6): 1427–1437. [刘晓蓓, 张雨濛, Francis Frédéric, 程雨蒙, 张勇, 陈巨莲, 2024. 黄淮海麦区小麦品种苗期与成株期对蚜虫抗性综合鉴定. 植物保护学报, 51(6): 1427–1437.]

Liu XD, Lei HX, Chen FF, 2019. Infection pattern and negative effects of a facultative endosymbiont on its insect host are environment-dependent. *Scientific Reports*, 9: 4013.

Liu XF, Hu XS, Keller MA, Zhao HY, Wu YF, Liu TX, 2014. Tripartite interactions of Barley yellow dwarf virus, *Sitobion avenae* and wheat varieties. *PLoS ONE*, 9(9): e106639.

Liu XL, Wang CY, Wang YJ, Zhang H, Ji WQ, 2014. Screening and evaluation of different wheat varieties for resistance to English grain aphid *Sitobion avenae* at seedling and adult-plant stages. *Journal of Plant Protection*, 41(2): 216–224. [刘新伦, 王长有, 王亚娟, 张宏, 吉万全, 2014. 不同小麦品种资源苗期和成株期麦长管蚜抗性鉴定和分析. 植物保护学报, 41(2): 216–224.]

Liu XL, Yang XF, Wang CY, Wang YJ, Zhang H, Ji WQ, 2012. Molecular mapping of resistance gene to English grain aphid (*Sitobion avenae* F.) in *Triticum durum* wheat line C273. *Theoretical and Applied Genetics*, 124(2): 287–293.

Liu Y, Chen JL, Ni HX, 2003. Electroantennogram responses of *Sitobion avenae* and *Rhopalosiphum padi* to wheat plant volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 46(6): 679–683. [刘勇, 陈巨莲, 倪汉祥, 2003. 麦长管蚜和禾谷缢管蚜对小麦挥发物的触角电位反应. 昆虫学报, 46(6): 679–683.]

Liu Y, Guo GX, Chen JL, Ni HX, 2005. Behavioral and electrophysiological responses of four predatory insect species to semiochemicals of wheat. *Acta Entomologica Sinica*, 48(2): 161–165. [刘勇, 郭光喜, 陈巨莲, 倪汉祥, 2005. 瓢虫和草蛉对小麦挥发物组分的行为及电生理反应. 昆虫学报, 48(2):161–165.]

Liu Y, Chen JL, Cheng DF, 2007. Effects of wheat leaf surface waxes on the feeding of two wheat aphid species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(8): 1785–1788. [刘勇, 陈巨莲, 程登发, 2007. 不同小麦品种（系）叶片表面蜡质对两种麦蚜取食的影响. 应用生态学报, 18(8): 1785–1788.]

Liu Y, Zhao CQ, Zhu YF, 2014. Aphid behavior-regulator slow releasing agent and its preparation method. Chinese Invention Patent, CN201410353672.0. 2014-07-24 [刘勇, 赵春青, 朱英菲, 2014. 蚜虫行为调控缓释剂及其制备方法, 中国发明专利, 专利号 CN201410353672.0. 2014-07-24]

Lu YH, Zhao ZH, Cai XM, Cui L, Zhang HN, Xiao HJ, Li ZY, Zhang LS, Zeng J, 2017. Progresses on integrated pest management (IPM) of agricultural insect pest in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 349–363. [陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 崔丽, 张浩男, 肖海军, 李振宇, 张礼生, 曾娟, 2017. 我国农业害虫综合防治研究进展. 应用昆虫学报, 54(3): 349–363.]

Liu YY, 2014. Preparation and efficacy evaluation of nanometer biological pesticide-6% microencapsulation slow release formulation of nicotine. Master dissertation. Yaan: Sichuan Agricultural University. [刘月悦, 2014. 纳米生物农药-6%烟碱微胶囊包载缓释剂的制备与药效评价. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学.]

Luo C, Luo K, Hu ZQ, Tao YY, Zhao HY, 2016. The infection frequencies and dynamics of three secondary endosymbionts in the laboratory environments on *Sitobion avenae* (Fabricius) as determined by long PCR. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(2): 473–476.

Ma CS, Wang BX, Wang XJ, Lin QC, Zhang W, Yang XF, van Baaren J, Bebber DP, Eigenbrode SD, Zalucki MP, Zeng J, Ma G, 2025. Crop pest responses to global changes in climate and land management. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6: 264–283.

Majeed MZ, Sayed S, Bo Z, Raza A, Ma CS, 2022. Bacterial symbionts confer thermal tolerance to cereal aphids *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae*. *Insects*, 13(3): 231.

Miao J, Guo P, Zhang YH, Tan XL, Chen JL, Li YF, Wu YQ, 2022. Effect of high temperature and natural enemies on the interspecies competition between two wheat aphid species, *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion miscanthi*. *Journal of Economic Entomology*, 115(2): 539–544.

Nafziger JTD, Fadamiro HY, 2011. Suitability of some farmscaping plants as nectar sources for the parasitoid wasp, *Microplitis croceipes* (Hymenoptera: Braconidae): Effects on longevity and body nutrient. *Biological Control*, 56(3): 225-229.

National Agricultural Technology Extension Service Center, 2021. 2020 national monitoring results of agricultural pest resistance and scientific drug application suggestions. *China Plant Protection*, 41(2): 71–78. [全国农业技术推广服务中心, 2021. 2020 年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议. 中国植保导刊, 41(2): 71–78.]

Pan MZ, Cao HH, Liu TX, 2014. Effects of winter wheat cultivars on the life history traits and olfactory response of *Aphidius gifuensis*. *BioControl*, 59(5): 539–546.

Peng LN, Zhang XP, Ye JS, Zuo Y, 2000. Study of resistance to

insecticides in *Macrosiphum avenae* F. in Sichuan Province. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2(3): 13–18. [彭丽年, 张小平, 叶建生, 左燕, 2000. 四川省麦长管蚜 (*Macrosiphum avenae* F.) 的抗药性研究. 农药学学报, 2(3): 13–18.]

Qiao HL, Tuccori E, He XL, Gazzano A, Field L, Zhou JJ, Pelosi P, 2009. Discrimination of alarm pheromone (*E*)-β-farnesene by aphid odorant-binding proteins. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 39(5/6): 414–419.

Qin YG, Yang ZK, Song DL, Wang Q, Gu SH, Li WH, Duan HX, Zhou JJ, Yang XL, 2020. Bioactivities of synthetic salicylate-substituted carboxyl (*E*)-β-farnesene derivatives as ecofriendly agrochemicals and their binding mechanism with potential targets in aphid olfactory system. *Pest Management Science*, 76(7): 2465–2472.

Qiu GH, 2007. Imidacloprid resistance in *Sitobion avenae* (Fabricius) and the mechanisms. Doctor dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [邱高辉, 2007. 麦长管蚜对吡虫啉的抗性及其机理研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Ren ZJ, Wang YP, Qin M, Yang XX, Li YP, Yuan HZ, Zhang S, 2025. 2024 national monitoring, evaluation and management strategies for antimicrobial resistance of agricultural pests. *China Plant Protection*, 45(4): 76–84. [任宗杰, 王云鹏, 秦萌, 杨晓欣, 李永平, 袁会珠, 张帅, 2025. 2024 年全国农业有害生物抗药性监测评估与治理对策. 中国植保导刊, 45(4): 76–84.]

Ryan GD, Sylvester EV, Shelp BJ & Newman JA, 2015. Towards an understanding of how phloem amino acid composition shapes elevated CO2-induced changes in aphid population dynamics. *Ecologica lEntomology*, 40 (3): 247-257

Si LL, Guo LL, Yao SR, Xie WJ, Zhao L, 2022. Establishment of forecasting and early monitoring system on wheat aphid in Hebei province based on index and model. *Hubei Agricultural Sciences*, 61(8): 120–125. [司丽丽, 郭丽丽, 姚树然, 解文娟, 赵亮, 2022. 基于指标模型的河北省小麦蚜虫气象预警预测系统研究. 湖北农业科学, 61(8): 120–125.]

Sun CX, Qin YG, Chen JL, Li ZX, 2024. The biosyndissertation of alarm pheromone in the wheat aphid *Rhopalosiphum* padi is regulated by hormones via fatty acid metabolism. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(7): 2346–2361.

Sun JX, Tan XL, Li Q, Francis F, Chen JL, 2022. Effects of different temperatures on the development and reproduction of *Sitobion miscanthi* from six different regions in China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 794495.

Sun YF, De Biasio F, Qiao HL, Iovinella I, Yang SX, Ling Y, Riviello L, Battaglia D, Falabella P, Yang XL, Pelosi P, 2012. Two odorant-binding proteins mediate the behavioural response of aphids to the alarm pheromone (*E*)-β-farnesene and structural analogues. *PLoS ONE*, 7(3): e32759.

Tan XL, Yan J, Miao J, Sun JX, Chen JL, 2021. Effects of wheat-pea intercropping with volatile release combined with different device application on wheat pests and natural enemies in wheat field. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 904–913. [谭晓玲, 闫甲, 苗进, 孙靖轩, 陈巨莲, 2021. 小麦间作豌豆和挥发物释放结合不同器械施药对麦田害虫和天敌的影响. 中国生物防治学报, 37(5): 904–913.]

Tan XL, Zhang XY, Yang JQ, Yang XQ, Wang Y, 2025. Synergistic effect of hydroponic technology of silicon and nutrient solution on wheat growth and wheat aphid management. *Pest Management Science*, 81(9): 5950–5960.

Tong ZQ, Meng LQ, Su D, Zhang C, Hu ZQ, 2019. Changes in the activities of antioxidant enzymes and detoxification enzymes in vector aphid *Sitobion avenae*(Homoptera: Aphididae) and non-vector aphid *Rhopalosiphum padi*(Homoptera: Aphididae) feeding on wheat plants infected with barley yellow dwarf virus. *Acta Entomologica Sinica*, 62(12): 1392–1399. [仝则乾, 孟琳钦, 苏丹, 张弛, 胡祖庆, 2019. 取食感染大麦黄矮病毒的小麦后介体麦长管蚜和非介体禾谷缢管蚜体内抗氧化酶和解毒酶活性的变化. 昆虫学报, 62(12): 1392–1399.]

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 C, Li XN, Jin DC, Gong PP, Li QC, Zhang YH, Li XR, Deng Y, Cernava T, Zhu X, 2022a. Implications of environmentally shaped microbial communities for insecticide resistance in *Sitobion miscanthi*. *Environmental Research*, 215(2): 114409.

Wang CP, Luo K, Wang LM, Zhao HY, Zhang GS, 2015a. Molecular mapping of resistance gene to the English grain aphid, *Sitobion avenae*, in a Chinese wheat line XN98-10-35. *Molecular Breeding*, 35(11): 203.

Wang CP, 2011. Mapping of *Sa1* gene resistant to *Sitobion avenae* and expression analysis of candidate genes in wheat (*Triticum aestivum* L.). Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [王春平, 2011. 小麦抗麦长管蚜基因 Sa1 的定位及抗性候选基因的表达分析. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Wang CZ, Huo ZG, Zhang L, Guo AH, Huang C, Lu MH, 2020. Construction of forecasting model of meteorological suitability for wheat aphids in the northern China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(3): 280–289. [王纯枝, 霍治国, 张蕾, 郭安红, 黄冲, 陆明红, 2020. 北方地区小麦蚜虫气象适

宜度预报模型构建. 应用气象学报, 31(3): 280–289.]

Wang DH, Liu Q, Li X, Sun YW, Wang H, Xia LQ, 2015b. Double-stranded RNA in the biological control of grain aphid(*Sitobion avenae* F.). *Functional & Integrative Genomics*, 15(2): 211–223.

Wang GP, Yu XD, Fan J, Wang CS, Xia LQ, 2015c. Expressing an(E)-β-farnesene synthase in the chloroplast of tobacco affects the preference of green peach aphid and its parasitoid. *Journal of Integrative Plant Biology*, 57(9): 770–782.

Wang K, Zhao JN, Han ZJ, Chen MH, 2022b. Comparative transcriptome and RNA interference reveal CYP6DC1 and CYP380C47 related to lambda-cyhalothrin resistance in *Rhopalosiphum padi*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 183: 105088.

Wang L, Li LK, Song YY, Han T, Li Z, Wan GJ, Chen FJ, 2018. Elevated CO_2 and temperature alter specific‐species population dynamic and interspecific competition of three wheat aphids. *Journal of Applied Entomology*, 142(9): 863–872.

Wang L, Wang K, Dong J, Liu Y, 2018. Behavioral responses of *Aphidius avenae* Haliday and *A. gifuensis* Ashmead to the aphid pheromones (*E*)-β-farnesene and nepetalactone. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 223–229. [王璐, 王康, 董洁, 刘勇, 2018. 两种麦田蚜茧蜂对蚜虫外激素行为反应的比较研究. 应用昆虫学报, 55(2): 223–229.]

Wang JJ, Han ZJ, Wang YC, 2001. A review on the toxicology of new nicotinyl insecticides. *Journal of Plant Protection*, 28(2): 178–182. [王建军, 韩召军, 王荫长, 2001. 新烟碱类杀虫剂毒理学研究进展. 植物保护学报, 28(2): 178–182.]

Wang MF, Chen JL, Cheng DF, Yuan GH, 2008. The wax on the surface of wheat leaves and its relationship with the aphid resistance of varieties. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 14(3): 341–346. [王美芳, 陈巨莲, 程登发, 原国辉, 2008. 小麦叶片表面蜡质及其与品种抗蚜性的关系. 应用与环境生物学报, 14(3): 341–346.]

Wang S, Tan XL, Zhang F, 2010. Influence of kin relationship on cannibalism behavior of *Harmonia axyridis*(Coleoptera: Coccinellidae) fourth instar larvae in different temperature conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 30(19): 5396–5403. [王甦, 谭晓玲, 张帆, 2010. 不同温度条件下异色瓢虫四龄幼虫亲缘关系对自残行为的影响. 生态学报, 30(19): 5396–5403.]

Wang WL, Liu Y, Ji XL, Wang G, Zhou HB, 2008. Effects of wheat-oilseed rape or wheat-garlic intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(6): 1331–1336. [王万磊, 刘勇, 纪祥龙, 王光, 周海波, 2008.小麦间作大蒜或油菜对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. 应用生态学报, 19(6): 1331–1336.]

Wang XR, Li WW, Yan J, Wang Y, Zhang XY, Tan XL, Chen JL, 2023. Developmental, reproduction, and feeding preferences of the *Sitobion avenae* mediated by soil silicon application. *Plants*, 12(5): 989.

Wang Y, Jaworski CC, Zi HY, Chen JL, Desneux N, Tan XL, 2024. Increased ladybird predation and metabolism do not counterbalance increased field aphid population growth under experimental warming. *Functional Ecology*, 38(5): 1134–1145.

Wang Y, Wang J, Wu WQ, Zhao HY, Hu XS, Zhang GS, 2014. Correlations between physical characters of wheat leaf hairs in SEM and the biological parameters of grain aphid *Stiobion avenae*. *Journal of Plant Protection*, 41(4): 474–481. [王雨, 王舰, 吴问其, 赵惠燕, 胡想顺, 张改生, 2014. 扫描电镜下的小麦叶毛性状与麦长管蚜生物学参数相关性分析. 植物保护学报, 41(4): 474–481.]

Wang Y, Yan J, Sun JR, Shi WP, Harwood JD, Monticelli LS, Tan XL, Chen JL, 2021. Effects of field simulated warming on feeding behavior of *Sitobion avenae*(Fabricius) and host defense systems. *Entomologia Generalis*, 41(6): 567–578.

Wu LY, Yan Y, Wei GH, Zhu X, Li XR, Zhang YH, 2024. Effects of miR-263 interference on the life table parameters of the English grain aphid, *Sitobion avenae*(Hemiptera: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 67(2): 163–170. [吴林源, 闫艺, 魏国华, 朱勋, 李祥瑞,张云慧, 2024. miR-263 干扰对麦长管蚜生命表参数的影响. 昆虫学报, 67(2): 163–170.]

Wu YQ, Miao J, Gong ZJ, Duan Y, Jiang YL, Li T, 2014. Progress in research on the biology, ecology and control of the wheat blossom midge. *Acta Entomologica Sinica*, 51(6): 1450–1458. [武予清, 苗进, 巩中军, 段云, 蒋月丽, 李彤, 2014. 小麦吸浆虫的生物学、生态学及防治研究进展. 应用昆虫学报, 51(6): 1450–1458.]

Xie HC, Shi JQ, Shi FY, Xu HY, He KL, Wang ZY, 2020. Aphid fecundity and defenses in wheat exposed to a combination of heat and drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 71(9): 2713–2722.

Xie HC, Chen JL, Cheng DF, Zhou HB, Sun JR, Liu Y, Francis F, 2012. The function of ecological regulation to aphids in the wheat intercropping field. *Plant Protection*, 38(1): 50–54. [解海翠, 陈巨莲, 程登发, 周海波, 孙京瑞, 刘勇, Frederic Francis, 2012. 麦田间作对麦长管蚜的生态调控作用. 植物保护, 38(1): 50–54.]

Xie HC, Shi FY, Li JS, Yu MM, Yang XT, Li Y, Fan J, 2022. The reciprocal effect of elevated CO_2 and drought on wheat-aphid

interaction system. *Frontiers in Plant Scien*ce, 13: 853220.

Xu QX, Hatt S, Lopes T, Zhang Y, Bodson B, Chen JL, Francis F, 2018. A push–pull strategy to control aphids combines intercropping with semiochemical releases. *Journal of Pest Science*, 91(1): 93–103.

Xu ZH, 2011. Population differentiation of *Sitobion avenae* in China. Doctor dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [徐昭焕, 2011. 中国麦长管蚜的种群分化. 博士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]

Xue WX, Fan J, Zhang Y, Xu QX, Han ZL, Sun JR, Chen JL, 2016. Identification and expression analysis of candidate odorant-binding protein and chemosensory protein genes by antennal transcriptome of *Sitobion avenae*. *PLoS ONE*, 11(8): e0161839.

Yan J, Wang Y, Li Q, Wang Q, Tan XL, Chen JL, 2020. Effects of silicon application on the wheat and wheat aphids in the soil. *Journal of Plant Protection*, 47(6): 1228–1233. [闫甲, 王怡, 李迁, 王倩, 谭晓玲, 陈巨莲, 2020. 土壤施硅对小麦和麦蚜的影响. 植物保护学报, 47(6): 1228–1233.]

Yan S, Ren BY, Zeng B, Shen J, 2020. Improving RNAi efficiency for pest control in crop species. *Biotechniques*, 68(5): 283–290.

Yang F, Wu MS, Chen HM, Tian F, Qu L, Cao YZ, He CY, 2012. Difference in the proportion of aphids carrying barley yellow dwarf virus-GAV between different areas in China. *Plant Protection*, 38(2): 117–119. [杨菲, 吴茂森, 陈华民, 田芳, 曲玲, 曹雅忠, 何晨阳, 2012. 我国不同地区麦蚜携带BYDV-GAV 比率的差异. 植物保护, 38(2): 117–119.]

Yang Q, Umina PA, Wei SJ, Bass C, Yu WJ, Robinson KL, Gill A, Zhan DW, Ward SE, van Rooyen A, Hoffmann AA, 2023. Diversity and regional variation of endosymbionts in the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer). *Diversity*, 15(2): 206.

Yang ZK, Qu C, Pan SX, Liu Y, Shi Z, Luo C, Qin YG, Yang XL, 2023. Aphid-repellent, ladybug-attraction activities, and binding mechanism of methyl salicylate derivatives containing geraniol moiety. *Pest Management Science*, 79(2): 760–770.

You SJ, Zhang J, Li JY, Chen YT, Liu TS, Niu DS, You MS, 2019. Theory and practice of utilizing biodiversity to enhance pest control in agroecosystems. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1125–1147. [尤士骏, 张杰, 李金玉, 陈燕婷, 刘天生, 牛东升, 尤民生, 2019.利用生物多样性控制作物害虫的理论与实践. 应用昆虫学报, 56(6): 1125–1147.]

Yu WJ, Bosquée E, Fan J, Liu Y, Bragard C, Francis F, Chen JL, 2022. Proteomic and transcriptomic analysis for identification of endosymbiotic bacteria associated with BYDV transmission efficiency by *Sitobion miscanthi*. *Plants*, 11(23): 3352.

Yu WJ, Yang Q, Gill A, Chirgwin E, Gu XY, Joglekar C, Umina PA, Hoffmann AA, 2025. A persistent bacterial *Regiella* transinfection in the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi* increasing host fitness and decreasing plant virus transmission. *Pest Management Science*, 81(6): 2791–2799.

Yuan L, Guo HJ, Sun YC, Xiao TG, Ge F, 2015. Plant immunity responses to aphid. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(1): 23–31. [袁亮, 郭慧娟, 孙玉诚, 肖铁光, 戈峰, 2015. 蚜虫诱导的植物免疫反应. 应用昆虫学报, 52(1): 23–31.]

Zhang C, Wei GH, Wu LY, Zhang YH, Zhu X, Merchant A, Zhou XG, Liu XY, Li XR, 2024a. Utilizing star polycation nanocarrier for the delivery of miR-184 agomir and its impact on the life history traits of the English grain aphid, *Sitobion avenae*. *Insects*, 15(6): 459.

Zhang J, Yang HM, Lin JS, Wang GX, Wang YF, Wang J, 2022. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentrations on population dynamics of the wheat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.). *Acta Entomologica Sinica*, 45(4): 477–481. [张钧, 杨惠敏, 林久生, 王根轩, 王亚馥, 王静, 2002. 大气二氧化碳浓度变化对禾谷缢管蚜种群动态的影响. 昆虫学报, 45(4): 477–481.]

Zhang JH, Li HY, Zhong X, Tian JF, Segers A, Xia LQ, Francis F, 2023a. Silencing an aphid-specific gene *SmDSR33* for aphid control through plant-mediated RNAi in wheat. *Frontiers* in *Plant Science*, 13: 1100394.

Zhang M, 2016. Resistance of bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi* to imidacloprid and its mechanisms. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [张蒙, 2016. 禾谷缢管蚜对吡虫啉的抗性及其机理研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Zhang TW, Liu Q, Liu CZ, 2010. Physiological mechanism of resistance to *Rhopalosiphum padi* in wheat seedlings. *Guizhou Agricultural Sciences*, 38(8): 119–122. [张廷伟, 刘乾, 刘长仲, 2010. 小麦幼苗期抗禾谷缢管蚜的生理机制. 贵州农业科学, 38(8): 119–122.]

Zhang Y, Li ZX, Yu XD, Fan J, Pickett JA, Jones HD, Zhou JJ, Birkett MA, Caulfield J, Napier JA, Zhao GY, Cheng XG, Shi Y, Bruce TJA, Xia LQ, 2015. Molecular characterization of two isoforms of a farnesyl pyrophosphate synthase gene in wheat and their roles in sesquiterpene synthesis and inducible defence against aphid infestation. *New Phytologist*, 206(3): 1101–1115.

Zhang Y, Fan J, Francis F, Chen JL, 2017a. Watery saliva secreted by the grain aphid *Sitobion avenae* stimulates aphid resistance in wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(40): 8798–8805.

Zhang Y, Fan J, Sun JR, Francis F, Chen JL, 2017b. Transcriptome analysis of the salivary glands of the grain aphid, *Sitobion avenae*. *Scientific Reports*, 7(1):15911.

Zhang Y, Fu Y, Francis F, Liu XB, Chen JL, 2021. Insight into

watery saliva proteomes of the grain aphid, *Sitobion avenae*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 106(1): e21752.

Zhang Y, Fan J, Francis F, Chen JL, 2018. Molecular characterization and gene silencing of Laccase 1 in the grain aphid, *Sitobion avenae*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 97: e21446.

Zhang Y, Fu Y, Fan J, Li Q, Francis F, Chen JL, 2019. Comparative transcriptome and histological analyses of wheat in response to phytotoxic aphid *Schizaphis graminum* and non-phytotoxic aphid *Sitobion avenae* feeding. *BMC Plant Biology*, 19(1): 547.

Zhang Y, Fu Y, Liu XB, Francis F, Fan J, Liu H, Wang Q, Sun Y, Zhang YM, Chen JL, 2023b. SmCSP4 from aphid saliva stimulates salicylic acid-mediated defence responses in wheat by interacting with transcription factor TaWKRY76. *Plant Biotechnology Journal*, 21(11): 2389–2407.

Zhang Y, Liu XB, Francis F, Xie HC, Fan J, Wang Q, Liu H, Sun Y, Chen JL, 2022. The salivary effector protein Sg2204 in the greenbug *Schizaphis graminum* suppresses wheat defence and is essential for enabling aphid feeding on host plants. *Plant Biotechnology Journal*, 20(11): 2187–2201.

Zhang YM, Liu XB, Sun Y, Liu Y, Zhang Y, Ding TB, Chen JL, 2024b. Salivary protein cyclin-dependent kinase-like from grain aphid *Sitobion avenae* suppresses wheat defense response and enhances aphid adaptation. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9): 4579.

Zhang YS, Ouyang F, Men XY, Ge F, Yuan ZM, 2018. Effects of regional agricultural landscape pattern on the community of ladybeetles in wheat fields. *Acta Entomologica Sinica,* 61(4): 468–476. [张永生, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 袁哲明, 2018. 区域农田景观格局对麦田天敌瓢虫群落的影响. 昆虫学报, 61(4): 468–476.]

Zhao LY, Chen JL, Cheng DF, Sun JR, Liu Y, Tian Z, 2009. Biochemical and molecular characterizations of *Sitobion avenae*-induced wheat defense responses. *Crop Protection*, 28(5): 435–442.

Zhao Y, Yan XF, Zeng ZK, Zhao DH, Chen P, Wang YY, Chen F, Wang CP, 2023. Integrated genome-wide association study and QTL mapping reveal *qSa-3A* associated with English grain aphid, *Sitobion avenae*(Fabricius) resistance in wheat. *Pest Management Science*, 79(10): 3970–3978.

Zhao ZH, Shi Y, He DH, Hang J, Zhao YS, Wang Y, 2010. Population dynamics of wheat aphids in different agricultural landscapes. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6380–6388. [赵紫华, 石云, 贺达汉, 杭佳, 赵映书, 王颖, 2010. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. 生态学报, 30(23): 6380–6388.]

Zhong T, Yin J, Deng SS, Li KB, Cao YZ, 2012. Fluorescence competition assay for the assessment of green leaf volatiles and trans-β-farnesene bound to three odorant-binding proteins in the wheat aphid *Sitobion avenae* (Fabricius). *Journal of Insect Physiology*, 58(6): 771–781.

Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Sun JR, 2009. Effects of wheat-pea intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae* (Homoptera: Aphididae) and its main natural enemies. *Acta Entomologica Sinica*, 52(7): 775–782. [周海波, 陈巨莲, 程登发, 刘勇, 孙京瑞, 2009. 小麦间作豌豆对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. 昆虫学报, 52(7): 775–782.]

Zhou HB, Chen JL, Liu Y, Francis F, Haubruge E, Bragard C, Sun JR, Cheng DF, 2013. Influence of garlic intercropping or active emitted volatiles in releasers on aphid and related beneficial in wheat fields in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(3): 467–473.

Zhou HB, Chen LS, Liu Y, Chen JL, Francis F, 2016. Use of slow-release plant infochemicals to control aphids: A first investigation in a Belgian wheat field. *Scientific Reports*, 6: 31552.

Zuo YY, Peng X, Wang K, Lin FF, Li YT, Chen MH, 2016. Expression patterns, mutation detection and RNA interference of *Rhopalosiphum padi* voltage-gated sodium channel genes. *Scientific Reports*, 6: 30166.