应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2025, 62(5): 1228−1238. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2025.111

二十一世纪中国二化螟研究进展与展望*

罗光华[1**] 卓富彦[2] 徐晴玉[1] 鞠佳菲[1] 鲍海波[1] 张熠珲[2] 方继朝[1***]

（1. 江苏省农业科学院植物保护研究所，南京 210014；2. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘 要 水稻是我国最重要的口粮作物，二化螟 *Chilo suppressalis* 是水稻上最重要的常发性害虫之一，绿色高效防控二化螟对于保障我国水稻安全生产和粮食安全具有重要意义。二化螟极端异步化发育，田间多龄期并存、多世代重叠，无明显防控适期，难以有效防控；此外，生产中缺乏对二化螟具有明显抗性的水稻品种。因此，二化螟呈现周期性暴发态势。本文对 21 世纪我国二化螟的发生动态、研究历程、发展阶段、重要研究成果以及未来展望进行了梳理和总结，重点阐述了稻作制度、水稻品种、抗药性、防控技术研发与应用等方面对二化螟种群动态变化及发生为害的影响，对构建我国二化螟可持续治理模式具有重要参考作用。

关键词 二化螟；发生动态；品种抗性；绿色防控技术；影响因素

A review of research on *Chilo suppressalis* in China since the year 2000: Progress and future prospects

LUO Guang-Hua[1**] ZHUO Fu-Yan[2] XU Qing-Yu[1] JU Jia-Fei[1]
BAO Hai-Bo[1] ZHANG Yi-Yang[2] FANG Ji-Chao[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. National Agricultural Technology Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract The rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*, is one of the most destructive insect pests affecting rice production in China. Achieving efficient and environmentally sustainable control of *C. suppressalis* is, therefore, critical for ensuring national food security. This pest exhibits highly asynchronous development, leading to the simultaneous presence of multiple larval instars and overlapping generations in the field. The consequent lack of distinct temporal windows for targeted intervention complicates effective management. Moreover, efforts to develop rice varieties with high levels of resistance to *C. suppressalis* have so far been unsuccessful. Consequently, periodic outbreaks of this pest continue to occur. This review comprehensively summarizes advances in research, key findings and research perspectives on *C. suppressalis* in China since the year 2000. Emphasis is placed on the impact of rice cultivars, cropping systems, the evolution of insecticide resistance, the development and implementation of control technologies, and the population dynamics and damage caused by *C. suppressalis*. This review provides valuable insights for developing sustainable management strategies for *C. suppressalis* in China.

Key words *Chilo suppressalis*; occurrence dynamics; cultivar resistance; green pest control technology; influencing factors

二化螟 *Chilo suppressalis* 属鳞翅目 Lepidoptera 螟蛾总科 Pyraloidea 草螟科 Crambidae，是水稻上最重要的常发性、本地性害虫，寡食性，寄主植物还包括茭白、玉米、麦类、甘蔗等（洪晓月，2017）。该害虫在我国各个稻区均有发生；其中长江流域及以南稻区发生较重，尤以江西、湖南、浙江等单双混栽稻区发生最为严重。2020 年被首批列入我国《一类农作物病虫害名录》（农业农村部公告第 333 号）。

水稻全生育期均能遭受二化螟为害。二化螟

*资助项目 Supported projects：国家水稻产业技术体系项目（CARS-01）；国家重点研发计划项目（2024YFD1400900）

**第一作者 First author，E-mail：ghluo@jaas.ac.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fangjc@jaas.ac.cn

收稿日期 Received：2025-07-30；接受日期 Accepted：2025-08-24

以幼虫取食为害，成虫不造成为害。其中，在秧苗期为害造成枯鞘症状，在分蘖期为害造成枯心症状，在抽穗期为害造成枯孕穗和白穗症状，在成熟期为害造成虫伤株（洪晓月，2017；Luo *et al.*，2021）。二化螟以幼虫越冬，越冬龄期差异较大，低、中、高龄期均有；越冬场所较多，除了稻桩、稻草之外，还在茭白、苜蓿、菖蒲、香根草、杂草丛等处越冬。二化螟幼虫生长发育具有明显的异步化现象。首先，同一块卵块孵化的个体，完成化蛹时个体间的历期始终相差 25 d 以上；其次，化蛹龄期存在明显分化，5、6、7 龄及以上均可化蛹。而二化螟生长发育的异步化是其田间世代重叠现象形成的重要原因之一（Luo *et al.*，2016；Zhang *et al.*，2024）。灯下天天见蛾，无明显防控适期，为获得较好防控效果，只能增加施药次数，由此导致二化螟的抗药性较快形成且迅速升高。因此，我国二化螟的发生为害始终存在且呈现周期性暴发态势。

21 世纪以来，我国水稻二化螟的发生大致经历了三个阶段（全国农业技术推广服务中心汇总数据）（图 1）。第一阶段是 2000-2009 年，该时期二化螟的发生从 2000 年开始逐渐上升，到 2005 年达到最高峰，然后逐渐下降，至 2009 年前后处于发生低谷期。第二阶段是 2010-2019 年，该时期二化螟的发生从 2010 年又开始逐渐上升，到 2013 年前后达到高峰期，这个阶段的上升幅度比第一阶段明显减弱；之后又逐渐下降至 2019 年前后进入发生低谷期。第三阶段从 2020 年开始至今，该时期二化螟的发生又进入缓慢上升的态势，直到 2024 年仍旧处于上升趋势中，但这一阶段的上升幅度比前一阶段进一步减弱。从二化螟发生的这三个阶段可以看出，尽管出现了 3 次波浪起伏，但起伏的强度越来越弱，显示 21 世纪以来我国农业科技进步在二化螟治理上发挥重要作用并且取得较大成功。本文围绕二化螟的研究历程、发展阶段、重要研究成果以及未来发展方向进行梳理，阐述二化螟相关的研究开展。

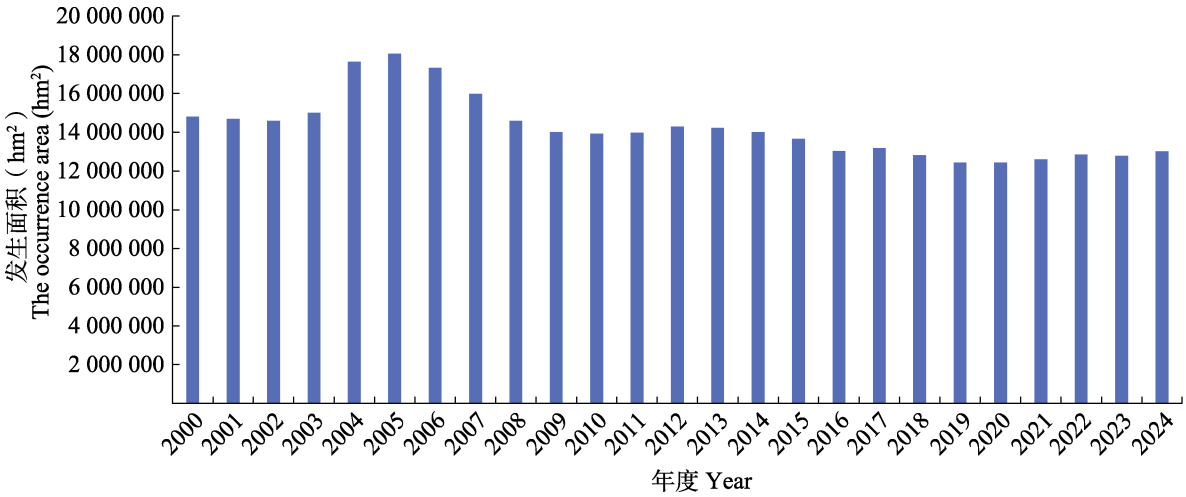

图 1　全国水稻二化螟为害发生面积

Fig. 1　The occurrence area of rice damaged by the rice striped stem borer in China

1　研究历程

进入 21 世纪，我国水稻二化螟研究经历了从发生为害应对到系统治理的逐步转变。根据研究重心与防控策略的演变，大致可划分为三个时期。

1.1　第一时期：问题凸显与基础探索期（2000-2009 年）

这一阶段的研究重点聚焦二化螟种群发生加重原因探究和早期抗药性监测等，为后续二化螟有效治理奠定基础。

全国二化螟发生面积数据分析显示，21 世

纪初我国二化螟的发生为害正处于上升过程中，至 2005 年达到峰值，该阶段总体发生都处于历史高位。面对二化螟大发生的严峻形势，研究集中在大发生原因探索方面，研究普遍认为稻作制度变革是二化螟种群暴发的核心驱动力（辛文和张志涛，2001；杨荣明等，2004；徐红星等，2019；孙肖雨等，2024）。从 20 世纪末至 21 世纪初这一时期，长江中下游及其以南地区，单双季稻混栽面积不断扩大。在该稻作模式下，越冬幼虫羽化后的成虫（越冬代），不同时间点羽化出来的二化螟均能找到合适的寄主水稻产卵，由此导致田间种群数量累积快速增加；同时，单双季稻混栽显著增加了二化螟世代过渡的桥梁田，较大提升了二化螟转代发生和种群扩大的效率（沈建新等，2001；舒平平等，2011；卓富彦等，2024；潘伟等，2025）。

水稻品种对二化螟的发生及为害程度同样具有重要影响。报道表明，二化螟在杂交籼稻上的发生明显重于常规稻，其中常规粳稻上二化螟的发生总体偏轻（刁春友等，2001；Ju *et al.*，2024；潘伟等，2025）。具体表现，如二化螟在杂交稻上的侵入成功率和存活率均高于常规粳稻；杂交稻上二化螟雌蛾的产卵量明显高于常规粳稻；诱虫灯诱集的二化螟蛾量与杂交稻种植面积的比例成明显正相关（王传全等，1997；辛文和张志涛，2001）。进一步的研究揭示，杂交籼稻相比常规粳稻，茎秆粗壮、叶鞘疏松、稻秆髓腔空隙大、维管束间距大、薄壁细胞多且含硅量少、淀粉含量高、可溶性糖多等，这些特征均利于二化螟的发生（谭荫初，1987；黄绍华和刘琴乐，1997；辛文和张志涛，2001）。此外，单就粳稻而言，茎秆粗大型粳稻上二化螟的发生为害程度也明显重于非茎秆粗大型粳稻。如种植武运粳 7 号、泗优 422、86 优 8 号等粗秆粳稻的稻田，田间一代二化螟造成的枯鞘率和单位面积（667 m^2）活虫数均显著高于非粗秆粳稻；并且，田间二化螟的发生量及为害程度与粗秆粳稻品种的种植面积成明显正相关性（刁春友等，2001；Ju *et al.*，2024）。

化学药剂是二化螟防控的最重要措施，药剂的防效变化对二化螟的发生及种群变化具有重要影响。该阶段的常用药剂主要包括沙蚕毒素类杀虫剂（杀虫单、杀虫双等）、有机磷类杀虫剂（三唑磷、毒死蜱等）等。室内生物测定和田间防效试验显示，较多地区的二化螟种群对多种常用药剂产生不同程度抗性，且防效明显下降（李秀峰等，2001；韩招久等，2002；李权生等，2002；He *et al.*，2007）。由于主要药剂对二化螟的防效逐渐降低，同时新化学药剂尚未开发成功，因此除化学药剂之外的新防控技术也在不断探索。如转基因技术（转 Bt 基因）在棉花等作物上成功应用后，研究人员也在水稻上开展了转 Bt 基因抗螟育种研究（吴刚等，2001；Wang *et al.*，2002；Han *et al.*，2006）。受限于当时的研究水平、知识产权以及口粮安全等因素，21 世纪初我国转基因抗螟水稻的研究正处于初期发展阶段。

1.2 第二时期：技术突破与机制深化期（2010-2019 年）

这一阶段，研究重心转向二化螟抗药性机制解析与新防控技术研发等，为二化螟的高效防控提供重要科技支撑。

双酰胺类药剂氯虫苯甲酰胺于 2008 年在国内正式登记用于防控二化螟，由于其高活性、低毒性、长持效性、内吸性等特点，很快在各稻区特别是二化螟重发生区广泛使用。仅 2-3 年后，浙江、江西、湖北等地二化螟种群即出现低至中等水平抗性（抗性倍数 5-10 倍）；2013-2015 年间，浙江、江西、湖南等地二化螟种群对氯虫苯甲酰胺已达到高水平抗性。此外，二化螟对于其他药剂，如三唑磷、甲维盐、杀虫双等的抗性水平也进一步提高（Su *et al.*，2014a，2014b；Huang *et al.*，2017）。为深入解析二化螟对诸多药剂产生高水平抗性的机制，广大研究人员从不同维度开展研究。一方面，继续跟踪监测二化螟不同地理种群对相关药剂的抗性水平，为相应地区的防控药剂选择提供参考；另一方面，基于转录组学、代谢组学、生物信息学、生理学、分子生物学等技术和方法解析二化螟对各种药剂抗性形成的

生理生化及分子机制等，从而显著提升二化螟的抗性治理水平（Chang *et al.*，2014；Wei *et al.*，2019；Xu *et al.*，2019）。

实践证明，单纯依靠化学药剂防治无法实现对二化螟的可持续防控，必须配合其他防控技术开展综合防控。因此，新的二化螟防控技术如理化诱控、生物防治等在这一时期更为深入地研究且应用更加广泛。比如性信息素诱捕技术、香根草诱控技术、寄生蜂应用技术等（谌江华等，2011；张帅等，2011；杜永均等，2013；司兆胜等，2014；鲁艳辉等，2017）。与此同时，转基因抗螟育种研究领域快速发展，围绕转 Bt 基因抗螟虫品种的创制、非靶标生物的影响、安全性评价等开展了深入研究（李志毅等，2012；Wang *et al.*，2014；徐雪亮等，2017；Jiao *et al.*，2018），在这一时期，我国掌握了水稻转基因抗螟育种主动权，为二化螟的高效防控储备了重要核心技术。

1.3　第三时期：高效治理与绿色转型期（2020-至今）

受水稻种植结构变化（双季稻、再生稻面积占比增加；单双混栽面积占比增加）、气候变暖、二化螟对主要防控药剂如氯虫苯甲酰胺的抗性水平进一步升高且范围逐步扩大，我国二化螟种群进入新的暴发周期。从 2020 年开始，全国水稻二化螟的发生面积呈现逐年缓慢上升趋势。这一阶段，对二化螟的治理进一步向更科学合理且绿色高效的方向转变。逐步推进实施“生态调控、理化诱控与交配干扰、生防技术应用、高效低毒化学药剂科学运用”的绿色防控技术体系。从 2020 年前后开始，我国持续加大推进作物病虫害绿色防控覆盖率（卓富彦等，2024，2025）。单水稻而言，病虫害绿色防控覆盖率从 2021 年的 49.%提高至 2024 年的 61.1%。二化螟作为水稻重要害虫，绿色防控技术的应用覆盖率也明显提升（卓富彦等，2025）。

防控技术的绿色转型主要体现包括，1）稻田生态调控技术从单季作物应用逐步拓展稻麦（油）等农田周年轮作系统应用；2）二化螟诱捕技术从单纯诱杀逐步发展到交配干扰与诱杀协同应用；3）生物农药使用、寄生蜂人工释放等生防技术应用进一步推进；4）绿色高效化学药剂占据主导地位，科学用药水平显著提升（卓富彦等，2025）。多数地区二化螟对常用药剂产生较高水平抗性背景下，该阶段的研究重点聚焦新药剂、新配方、新剂型研发，防控技术的防效提升研究和技术集成应用研发与示范等，逐步提升二化螟的高效治理与绿色防控水平。

2　发展阶段

根据二化螟相关研究的经费、人员等投入情况变化以及研究水平的提升等，21 世纪以来我国二化螟研究大致经历了三个发展阶段。

2.1　第一阶段：稳步发展阶段

1999 年 6 月，国务院召开了第三次全国教育工作会议并颁布《关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》。从此以后，我国高等教育进入跨越式发展阶段，高校招生规模逐年增加，高等教育由“精英化”转向“大众化”教育时代（杨明等，2023）。21 世纪初期，植物保护专业的招生规模和研究生培养规模逐年扩大，为我国农业科研的发展注入了新动能（李保同和汤丽梅，2001；韩春霞，2005；罗开平等，2013）。二化螟作为水稻上的重大害虫，在 21 世纪初逐年加重，对于二化螟的基础理论和防控技术研究等，相关人力资源和科研项目资金等也在逐步增加。在人力资源和经费支持的双重利好下，我国水稻二化螟的相关研究步入稳步发展阶段。

2.2　第二阶段：快速发展阶段

随着国家公益性行业（农业）科研专项（2006 年）、“转基因生物新品种培育”国家科技重大专项（2010 年）的先后启动，我国二化螟的研究步入快速发展阶段。在公益性行业（农业）科研专项实施周期内，先后有 2 个项目直接针对以二化螟为主要研究对象的蛀秆害虫开展研究与技术应用示范等，专项分别是“水稻螟虫防控技术研究（2008 年）”和“南方多食性蛀秆螟虫区域

综合防控技术研究与示范（2013 年）”。在“转基因生物新品种培育”国家科技重大专项实施周期内，水稻抗螟转基因品种创制被列为重要突破方向。在上述重大科研项目等的持续支持下，二化螟的基础理论研究、应用基础研究、防控新技术及产品研发等都获得快速发展。

2.3 第三阶段：高质量发展阶段

在多渠道的资金支持和人力资源投入下，经过十多年的快速发展，二化螟的研究及治理水平取得全面提升。然而从 2020 年前后开始，全国水稻二化螟的发生面积再次转入上升态势。在这一背景下，促成了政策层面、研究层面等的思索和转变。对水稻二化螟而言，如何解决其高效可持续治理是核心目标。围绕核心目标，开展技术研究、产品研发、机理解析等，即开展解决实际问题的高质量研究，进而获得问题解决后的更高质量发展。以单一靶标二化螟为研究对象的国家重点研发计划项目“二化螟灾变机制与可持续防控技术研究（2024 年）”，设立的项目目标和考核指标重点是防控新技术产品、发明专利以及国家和行业标准等，正是当前高质量发展要求的具体体现。在高质量发展时期，对二化螟的相关研究提出了更高的要求。

3 重要研究成果

3.1 二化螟抗药性机制研究

双酰胺类药剂氯虫苯甲酰胺是近十多年来防控二化螟的重要药剂之一。关于二化螟对其抗性机制的研究既有广度又有深度。第一、代谢抗性机制解析方面，二化螟细胞色素 P450 单加氧酶（Cytochrome P450 monooxygenases，P450s）的上调表达显著提升了其对氯虫苯甲酰胺的抗性水平，*CYP6CV5*、*CYP9A68*、*CYP32A12* 等多个 P450s 家族的基因均介导了二化螟对氯虫苯甲酰胺的代谢抗性（Xu *et al.*，2019；徐鹿等，2023）；尿苷二磷酸糖基转移酶（Uridine diphosphate glycosyltransferases，UGTs）作为一类多功能解毒代谢酶，也被证明参与二化螟对氯虫苯甲酰胺的代谢抗性（Zhao *et al.*，2019）；三磷酸腺苷结合盒（Adenosine triphosphate binding cassette，ABC）转运蛋白，重要功能之一是将外源有毒物质排出细胞，相关研究表明二化螟的 *CsABCC8*、*CsABCG1C*、*CsABCH1* 等基因参与了二化螟对氯虫苯甲酰胺的代谢抗性（Meng *et al.*，2020b）。第二、靶标抗性机制解析方面，鱼尼丁受体（Ryanodine receptor，RyR）是氯虫苯甲酰胺的作用靶标。RyR 蛋白的关键氨基酸突变导致二化螟对该药剂的敏感性降低，造成药剂防效下降，从而表现出明显的抗药性（Sun *et al.*，2018；Huang *et al.*，2020；徐鹿等，2023）。如采自江西南昌的二化螟种群，其 RyR 蛋白包含 Y4667D、I4758M 和 Y4891F 共 3 个突变，突变频率分别为 13.90%、69.40%和 5.55%，该种群对氯虫苯甲酰胺的抗性倍数达到 500 倍以上的极高抗水平（Huang *et al.*，2020）。目前，二化螟 RyR 蛋白上已经累计发现近 10 个与氯虫苯甲酰胺抗性相关的氨基酸突变（徐鹿等，2023）。

二化螟对其他药剂的抗性机制也有研究报道（官道杰等，2024）。如 Wang 等（2025）研究发现二化螟体内 *CYP6SN2* 基因发生扩增，形成的新基因 *CYP6SN2vB* 显著提升了二化螟对阿维菌素的抗性。乙酰胆碱酯酶（Acetylcholinesterase，AChE）是有机磷和氨基甲酸酯类药剂的作用靶标，Jiang 等（2009）发现二化螟的 1 号乙酰胆碱酯酶 AChE1 中的 A314S 点突变能够导致二化螟对三唑磷产生数百倍的抗性，且二化螟种群中该突变的频率与抗性水平呈显著正相关。

3.2 二化螟理化诱控机制研究

香根草诱集作为二化螟理化诱控技术的重要组成部分，在生产上已运用多年。二化螟雌成虫对香根草具有产卵选择偏好，但幼虫在香根草上并不能完成发育，到高龄时几乎完全死亡（Li *et al.*，2025；Lu *et al.*，2025）。Lu 等（2005）研究发现，杜烯、樟脑、α-雪松烯、植酮是香根草引发二化螟触角反应的主要挥发性化合物，他们协同介导对二化螟雌蛾的产卵吸引行为。Li

等（2025）研究发现，香根草中倍半萜类化合物雪松醇等占总挥发物含量的 12.15%，对二化螟雌蛾具有明显的吸引作用。香根草体内萜类合成通路基因家族显著扩张，其中 *VzAACT1* 和 *VzFPPS1* 两个基因在香根草茎部高表达，从而提高了萜类化合物的前体物质法尼基焦磷酸酯（Farnesyl pyrophosphate，FPP）的含量；进一步研究发现，香根草特有基因 *VzTPS9* 负责将 FPP 转化为雪松醇，由此揭示了香根草吸引二化螟雌蛾产卵的分子机制。

此外，基于性信息素的交配干扰技术也是二化螟理化诱控技术体系的重要组成部分。研究显示，在高密度成虫种群条件下，通过人为释放高浓度的气雾型性信息素，二化螟的交配率降低了 31%，产卵总数减少了 45.5%。交配干扰技术具有较明显的控虫效果，可作为二化螟综合防控过程中的重要辅助措施（Zhang *et al.*，2025）。

3.3　二化螟防控新技术研究

苏云金芽孢杆菌（*Bacillus thuringiensis*，Bt）分泌的 Cry 和 Vip3 晶体蛋白对多种害虫具有高效杀虫活性，被广泛用于创制转 Bt 基因抗虫作物和 Bt 生物农药。其中，Cry1 类蛋白家族的 Cry1Ab、Cry1Ac 等成员对鳞翅目害虫的致死活性较高，转 Bt 基因抗螟水稻多数使用的是 Cry1 类蛋白（吴刚等，2001；Han *et al.*，2006；徐雪亮等，2017；Wang *et al.*，2014，2023）。伴随着转 Bt 基因抗虫作物（转 Cry 类）的持续种植和 Bt 药剂的持续使用，已有害虫对 Cry 类蛋白逐渐产生了抗性。目前，害虫对 Vip3 类蛋白的抗性尚未有报道，且 Vip3 类蛋白和 Cry 类蛋白无交互抗性（Wang *et al.*，2023）。研究发现，Cry9A 和 Vip3A 蛋白联合使用具有协同增效作用（Wang *et al.*，2018）。在二化螟中肠中的研究显示，与单独处理相比，联合处理 Cry9A 和 Vip3A 蛋白会更快、更严重地损伤二化螟中肠，证明协同使用这两类 Bt 毒素蛋白具有更高效的杀螟效果（Wang *et al.*，2018，2023）。

近年来，RNA 干扰（RNA interference，RNAi）作为一种可行的害虫防控新技术受到较大关注。其中，植物介导的 RNA 干扰是一种新兴的植物保护技术，通过改造植物以表达对靶标害虫具有特异干扰作用的双链 RNA（double-stranded RNA，dsRNA），从而在目标害虫体内触发 RNAi 效应以达到防控害虫的目的（Gordon and Waterhouse，2007；Mezzetti *et al.*，2020）。Mao 等（2022）研究发现，将二化螟的小热激蛋白基因（*CssHsp*）的 ds*CssHsp* 导入到水稻植株中，构建特异表达 ds*CssHsp* 的转基因稻株。利用转基因稻株进行饲喂生测，发现 3 个水稻转基因系（DS10、DS35、DS36）对二化螟试虫具有显著的负面影响。饲喂 8 d 后，取食这 3 个水稻转基因系的二化螟死亡率均超过 60%；到化蛹阶段，死亡率达到 90%以上，且仅有少数试虫个体羽化。

3.4　二化螟与水稻互作研究

二化螟取食水稻势必引起水稻自身的防御反应，茉莉酸（Jasmonic acid，JA）作为重要的植物防御激素之一，在应对二化螟为害过程中发挥重要作用。这一过程中，JA 激素合成及信号转导通路上众多关键基因参与其中（Yao *et al.*，2023；Danso Ofori *et al.*，2025）。与之相对，二化螟在取食水稻过程中，为了抑制水稻自身的防御反应，同样进化出反防御措施。最近的研究表明，二化螟口腔分泌物中含有的很多物质参与对水稻的反防御作用（Xue *et al.*，2023；Yu *et al.*，2024）。Yu 等（2025）从二化螟口腔分泌物中鉴定到了一种铁稳态蛋白 CsFer1（具有 Fe^{2+} 结合能力和铁氧化酶活性），该蛋白在调节植物铁稳态中发挥着关键作用。深入研究显示，CsFer1 有助于在二化螟侵染下维持水稻的铁稳态，抑制 H_2O_2 和茉莉酸积累，最终削弱水稻对二化螟的抗性。由此表明，二化螟 CsFer1 作为一种效应子，参与水稻-二化螟相互作用中铁稳态和脂质过氧化相关植物防御的调节。

如前所述，二化螟在籼稻上的为害总体重于粳稻（王传全等，1997；刁春友等，2001；辛文和张志涛，2001；Ju *et al.*，2024；潘伟等，2025）。基于转录组、代谢组、遗传分析以及生物测定等，

发现粳稻和籼稻对二化螟的防御反应存在明显差异。二化螟取食后，粳稻诱导茉莉酸甲酯（methyl jasmonate，MeJA）和维生素 B1（vitamin B1，VB1）的积累模式与籼稻明显不同。MeJA 和 VB1 共同通过影响二化螟保幼激素水平进而影响二化螟的发育；此外，MeJA 和 VB1 合成途径中的关键生物合成基因（分别为 *OsJMT* 和 *OsTH1*）在粳稻和籼稻中存在不同的遗传变异，也有助于形成粳、籼稻对于二化螟的抗性差异。在籼稻中，二化螟成功躲避 MeJA 防御途径，并利用 VB1 相关途径以促进自身发育。该研究结果揭示了粳、籼稻之间应对二化螟为害的差异机制（Ju *et al.*，2024）。

3.5 二化螟发育调控机制研究

昆虫的生长发育主要受蜕皮激素和保幼激素的协同作用共同调控，对二化螟生长发育调控的研究也主要集中在这两个激素通路上（Sun *et al.*，2017；Tang *et al.*，2020；Kuang *et al.*，2023；Chen *et al.*，2024；Gong *et al.*，2025）。如前所述，二化螟个体发育存在明显的异步化，导致对其难以有效防控，解析二化螟异步化调控机制，对于二化螟的高效防控具有重要意义（Luo *et al.*，2016；Zhang *et al.*，2024）。最新的研究表明，敲减或敲除二化螟 *broad-complex*（*BrC*）基因后，其个体的化蛹期显著延后且幼虫发育历期显著延长，由此表明 *BrC* 基因对二化螟的异步化发育具有重要影响（Zhang *et al.*，2024）。此外，很多药剂的亚致死剂量对二化螟的生长发育具有显著的影响，推测化学药剂的使用对田间二化螟的异步化发育形成具有潜在影响（Huang *et al.*，2016；Xu *et al.*，2017；Meng *et al.*，2020a）。

4 展望

对于二化螟的成灾机制解析和可持续防控技术研究相关的学科和技术等的交叉融合必定是未来的发展方向。大数据时代，海量生物基因数据分析与挖掘需要更强大的工具。人工智能（Artificial intelligence，AI）的快速发展，恰好能够解决这一问题。利用 AI 赋能生物信息学，从而更高效的完成数据分析和潜在靶标基因预测和提取。比如，快速预测二化螟抗药性基因突变位点、推测二化螟抗药性演变规律等。

昆虫肠道微生物或内共生菌等对宿主自身的生长发育以及对宿主的药剂耐受性等具有重要影响。因此，微生物组学与合成生物学的交叉融合，对二化螟的有效防控具有重要积极作用。比如，在解析二化螟肠道微生物的基础上，通过工程菌改造，将二化螟特异致死基因的 dsRNA 表达系统导入工程菌中，再递送至二化螟体内，实现对二化螟的专一性防控。

二化螟的高效防控，化学药剂的科学使用、高效利用是极其重要的环节。通过与材料学的交叉融合，研发更高效的药剂剂型，实现更优的防控效果，对于延长药剂使用寿命有重要作用。比如，开发纳米载体缓释型药剂或者性信息素产品，延长田间药剂防效或诱捕实效。

精准监测预警对于二化螟的及时、高效防控具有重要作用。未来，田间物联网设备（智能虫情监测设备等）、无人机多光谱巡检（为害特征早期识别）和昆虫雷达、卫星遥感（广域范围为害监测）构成立体监测网，实现田间虫情动态实时感知，进而开展科学高效防控。

针对不同水稻种植区，分区域解析二化螟种群发生主导因子及其内在机制，因地制宜地研发针对性的防控技术，形成适合不同稻区的二化螟综合防控技术模式，最终推动全国二化螟绿色高效可持续治理。

参考文献 (References)

Chang C, Cheng X, Huang XY, Dai SM, 2014. Amino acid substitutions of acetylcholinesterase associated with carbofuran resistance in *Chilo suppressalis*. *Pest Management Science*, 70(12): 1930–1935.

Chen JH, Chai WG, Sun MM, Chen RX, 2011. Trapping effects of different lures and traps on *Chilo suppressalis* and *Cnaphalocrocis medinalis*. *China Rice*, 17(5): 47–48. [谌江华, 柴伟纲, 孙梅梅, 陈若霞, 2011. 不同诱芯与诱捕器对水稻二化螟和稻纵卷叶螟的诱捕效果. 中国稻米, 17(5): 47–48.]

Chen SY, Sun YJ, Kuang SJ, Tang Y, Ding WB, He HL, Xue J, Gao Q, Gao HS, Li YZ, Qiu L, 2024. Transcription factor E93

regulates vitellogenesis via the vitelline membrane protein 26Ab gene in *Chilo suppressalis*. *Molecular Biology Reports*, 52(1): 41.

Danso Ofori A, Su W, Zheng TD, Datsomor O, Titriku JK, Xiang X, Kandhro AG, Ahmed MI, Mawuli EW, Awuah RT, Zheng AP, 2025. Jasmonic acid (JA) signaling pathway in rice defense against *Chilo suppressalis* infestation. *Rice*, 18(1): 7.

Diao CY, Wang MT, Zhu YQ, Gong LG, Zhang NH, 2001. The reasons of the increase of rice stalk borer in paddy field and the approaches of controlling strategies in south Jiangsu Province. *Plant Protection Technology and Extension*, 21(1): 7–9. [刁春友, 王茂涛, 朱叶芹, 龚林根, 张念环, 2001. 苏南稻区二化螟上升原因及对策探讨. 植保技术与推广, 21(1): 7–9.]

Du YJ, Guo R, Han QR, 2013. Application technology of insect sex pheromone for controlling *Chilo suppressalis* and *Cnaphalocrocis medinalis*. *China Plant Protection*, 33(11): 40–42, 39. [杜永均, 郭荣, 韩清瑞, 2013. 利用昆虫性信息素防治水稻二化螟和稻纵卷叶螟应用技术. 中国植保导刊, 33(11): 40–42, 39.]

Gong YW, Sun YJ, Kuang SJ, Ding WB, He HL, Gao Q, Gao HS, Li YZ, Qiu L, 2025. 20-Hydroxyecdysone regulates pupal fatty acid metabolism, maintaining lipid metabolic homeostasis in *Chilo suppressalis*. *Insect Science*, Doi: 10.1111/1744-7917.70053.

Gordon KH, Waterhouse PM, 2007. RNAi for insect-proof plants. *Nature Biotechnology*, 25(11): 1231–1232.

Guan DJ, Wang JJ, Meng XK, 2024. Research advances in insecticide resistance and mechanisms of *Chilo suppressalis* in China. *Journal of Jilin Agricultural University*, 46(4): 523–530. [官道杰, 王建军, 孟祥坤, 2024. 我国二化螟抗药性发展及其抗性机制研究进展. 吉林农业大学学报, 46(4): 523–530.]

Han CX, 2005. Studies on plant protection talents training in agricultural universities on condition of market economy. Master dissertation. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University. [韩春霞, 2005. 市场经济条件下农业高校植物保护专业人才培养研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Han LZ, Wu KM, Peng YF, Wang F, Guo YY, 2006. Evaluation of transgenic rice expressing Cry1Ac and CpTi against *Chilo suppressalis* and intrapopulation variation in susceptibility to Cry1Ac. *Environmental Entomology*, 35(5): 1453–1459.

Han ZJ, Han ZJ, Chen CK, Wang YC, Hu SM, 2002. Monitoring of rice stem borer, *Chilo suppressalis*, resistance to monosultap and methamidophos, and dynamics. *Acta Phytophylacica Sinica*, 29(1): 93–94. [韩招久, 韩召军, 陈长琨, 王荫长, 胡仕孟, 2002. 二化螟对杀虫单和甲胺磷抗性监测及田间抗性动态. 植物保护学报, 29(1): 93–94.]

He YP, Gao CF, Cao MZ, Chen WM, Huang LQ, Zhou WJ, Liu XG, Shen JL, Zhu YC, 2007. Survey of susceptibilities to monosultap, triazophos, fipronil, and abamectin in *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Journal of Economic Entomology*, 100(6): 1854–1861.

Hong XY, 2017. Agricultural Entomology. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press. 77. [洪晓月, 2017. 农业昆虫学. 第三版. 北京: 中国农业出版社. 77.]

Huang JM, Rao C, Wang S, He LF, Zhao SQ, Zhou LQ, Zhao YX, Yang FX, Gao CF, Wu SF, 2020. Multiple target-site mutations occurring in lepidopterans confer resistance to diamide insecticides. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 121: 103367.

Huang L, Lu MX, Han GJ, Du YZ, Wang JJ, 2016. Sublethal effects of chlorantraniliprole on development, reproduction and vitellogenin gene (CsVg) expression in the rice stem borer, *Chilo suppressalis*. *Pest Management Science*, 72(12): 2280–2286.

Huang SH, Liu QL, 1997. Study on the damage characteristics of the third generation *Chilo suppressalis* to late hybrid rice in northern Hunan. *Entomological Knowledge*, 34(6): 321–323. [黄绍华, 刘琴乐, 1997. 湘北第三代二化螟对杂交晚稻危害特点的研究. 昆虫知识, 34(6): 321–323.]

Huang SJ, Chen Q, Qin WJ, Sun Y, Qin HG, 2017. Resistance monitoring of four insecticides and a description of an artificial diet incorporation method for *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Journal of Economic Entomology*, 110(6): 2554–2561.

Jiang XJ, Qu MJ, Denholm I, Fang JC, Jiang WH, Han ZJ, 2009. Mutation in acetylcholinesterase1 associated with triazophos resistance in rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Biochemical and Biophysical Research Communication*s, 378(2): 269–272.

Jiao YY, Hu XY, Peng YF, Wu KM, Romeis J, Li YH, 2018. Bt rice plants may protect neighbouring non-Bt rice plants against the striped stem borer, *Chilo suppressalis*. *Proceedings of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 285(1883): 20181283.

Ju JF, Yang L, Shen C, Li JC, Hoffmann AA, Huang YX, Zhu F, Ji R, Luo GH, Fang JC, 2024. Defence and nutrition synergistically contribute to the distinct tolerance of rice subspecies to the stem borer, *Chilo suppressalis*. *Plant*, *Cell & Environment*, 47(7): 2426–2442.

Kuang SJ, Tang Y, Gao Q, He HL, Ding WB, Xue J, Li YZ, Qiu L, 2023. Identification of potential target transcription factor genes regulated by Krüppel homolog 1 in *Chilo suppressalis*

(Lepidoptera: Crambidae). *Journal of Entomological Science*, 58(3): 318–334.

Li BT, Yang LM, 2001. Sustainable plant protection and quality education for plant protection professionals. *Plant Protection Technology and Extension*, 21(2): 41–42. [李保同, 汤丽梅, 2001. 可持续植保与植保专业人才素质教育. 植保技术与推广, 21(2): 41–42.]

Li Q, He K, Lu YH, He BB, Zheng XS, Lu ZX, Li F, Xu HX, 2025. A vetiver-specific terpene synthase VzTPS9 contributes to the high attractiveness of vetiver to rice stem borer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(20): e2424863122.

Li QS, Xu JC, Wang PC, Zhan LG, Huang JQ, Ji ZZ, 2002. Resistance determination of *Chilo suppressalis* in the Yangtze River region. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 30(6): 928. [李权生, 徐进才, 汪朋春, 詹李根, 黄结桥, 计壮志, 2002. 沿江地区水稻二化螟的抗药性测定. 安徽农业科学, 30(6): 928.]

Li XF, Han ZJ, Chen CK, Li GQ, Wang YC, 2001. Monitoring for resistance of rice stem borer (*Chilo suppressalis* Walker) to 4 conventional insecticides. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 24(1): 43–46. [李秀峰, 韩召军, 陈长琨, 李国清, 王荫长, 2001. 二化螟对杀虫单等 4 种杀虫剂的抗药性. 南京农业大学学报, 24(1): 43–46.]

Li ZY, Sui H, Xu YB, Han LZ, Chen FJ, 2012. Effects of insect-resistant transgenic Bt rice with a fused Cry1Ab+Cry1Ac gene on population dynamics of the stem borers, *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*, occurring in paddyfield. *Acta Ecologica Sinica*, 32(6): 1783–1789. [李志毅, 隋贺, 徐艳博, 韩兰芝, 陈法军, 2012. 转 Cry1Ab 和 Cry1Ac 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响. 生态学报, 32(6): 1783–1789.]

Lu QH, Zhang PP, Wei JH, Luan XP, Wang JX, Yan Q, Dong SL, Zhang J, 2025. Decoding the olfactory deception: Molecular basis into *Chilo suppressalis*' recognition of the lethal trap plant *Vetiveria zizanioides*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(25): 15935–15949.

Lu YH, Bai Q, Zheng XS, Lü ZX, 2017. Selective tropism of different geographical populations of *Chilo suppressalis* to the trapping vetiver grass, *Vetiveria zizanioiaes*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 44(6): 968–972. [鲁艳辉, 白琪, 郑许松, 吕仲贤, 2017. 不同地理种群二化螟对诱集植物香根草的选择趋性比较. 植物保护学报, 44(6): 968–972.]

Luo GH, Luo ZX, Zhang ZL, Sun Y, Lu MH, Shu ZL, Tian ZH, Hoffmann AA, Fang JC, 2021. The response to flooding of two overwintering rice stem borers likely accounts for their changing impacts. *Journal of Pest Science*, 94(2): 451–461.

Luo GH, Yao J, Yang Q, Zhang ZC, Hoffmann AA, Fang JC, 2016. Variability in development of the striped rice borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae), due to instar number and last instar duration. *Scientific Reports*, 6: 35231.

Luo KP, Zhang RQ, Wang HW, 2013. Impact of NSFC-projects application policies. *Science of Science and Management of Science and Technology*, 34(11): 3–9. [罗开平, 张人千, 王惠文, 2013. 国家自然科学基金项目申请政策的影响分析. 科学学与科学技术管理, 34(11): 3–9.]

Mao C, Zhu XP, Wang PP, Sun YJ, Huang RL, Zhao MC, Joe Hull J, Lin YJ, Zhou F, Chen H, Ma WH, 2022. Transgenic double-stranded RNA rice, a potential strategy for controlling striped stem borer (*Chilo suppressalis*). *Pest Management Science*, 78(2): 785–792.

Meng XK, Yang XM, Wu ZL, Shen QW, Miao LJ, Zheng Y, Qian K, Wang JJ, 2020a. Identification and transcriptional response of ATP-binding cassette transporters to chlorantraniliprole in the rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*. *Pest Management Science*, 76(11): 3626–3635.

Meng XK, Zhang N, Yang XM, Miao LJ, Jiang H, Ji CH, Xu BB, Qian K, Wang JJ, 2020b. Sublethal effects of chlorantraniliprole on molting hormone levels and mRNA expressions of three Halloween genes in the rice stem borer, *Chilo suppressalis*. *Chemosphere*, 238: 124676.

Mezzetti B, Smagghe G, Arpaia S, Christiaens O, Dietz-Pfeilstetter A, Jones H, Kostov K, Sabbadini S, Opsahl-Sorteberg HG, Ventura V, Taning CNT, Sweet J, 2020. RNAi: What is its position in agriculture? *Journal of Pest Science*, 93(4): 1125–1130.

Pan W, Feng YF, Qi ZH, Cai JJ, Wang ZZ, 2025. Research on the evolutionary pattern of the population size of *Chilo suppressalis* in the coastal rice area of Zhejiang. *Acta Agriculturae Shanghai*, 41(2): 77–82. [潘伟, 冯贻富, 綦再华, 蔡建军, 王治舟, 2025. 浙江沿海稻区二化螟种群数量演变规律研究. 上海农业学报, 41(2): 77–82.]

Shen JX, Zhang HQ, Zhang HK, Zhou ZH, Dong GK, 2001. Relationship between farming system reform and occurrence of *Chilo suppressalis* and corresponding countermeasures. *Hubei Plant Protection*, 2001(3): 21–23. [沈建新, 张惠琴, 张洪坤, 周泽华, 董国堃, 2001. 耕作制度变革与水稻二化螟发生的关系及相应对策. 湖北植保, 2001(3): 21–23.]

Shu PP, Yao YJ, Zhu XJ, Zeng XJ, 2011. Occurrence, damage and chemical control of *Chilo suppressalis* in Jiangxi during past

sixty years. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 23(7): 129–132. [舒平平, 姚英娟, 朱雪晶, 曾小军, 2011. 建国以来江西二化螟的发生、危害及药剂防治回顾. 江西农业学报, 23(7): 129–132.]

Si ZS, Chen JG, Song XD, Gong XY, Zhao YF, Zhai HW, 2014. Control effect of *Trichogramma japonicum* on *Chilo suppressalis* in rice. *China Rice*, 20(4): 98–100. [司兆胜, 陈继光, 宋显东, 宫香余, 赵云峰, 翟宏伟, 2014. 稻螟赤眼蜂防治水稻二化螟效果初探. 中国稻米, 20(4): 98–100.]

Su JY, Zhang ZZ, Wu M, Gao CF, 2014a. Changes in insecticide resistance of the rice striped stem borer (Lepidoptera: Crambidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(1): 333–341.

Su JY, Zhang ZZ, Wu M, Gao CF, 2014b. Geographic susceptibility of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Crambidae), to chlorantraniliprole in China. *Pest Management Science*, 70(6): 989–995.

Sun XY, Dai DJ, Fang H, Chen H, 2024. Effects of regional rice cropping structure changes on the occurrence of the population of *Chilo suppressalis*. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 65(11): 2645–2649. [孙肖雨, 戴德江, 方辉, 陈红, 2024. 区域稻作结构变化对二化螟种群发生的影响. 浙江农业科学, 65(11): 2645–2649.]

Sun Y, Huang SJ, Wang SP, Guo DH, Ge C, Xiao HM, Jie WC, Yang QP, Teng XL, Li F, 2017. Large-scale identification of differentially expressed genes during pupa development reveals solute carrier gene is essential for pupal pigmentation in *Chilo suppressalis*. *Journal of Insect Physiology*, 98: 117–125.

Sun Y, Xu L, Chen Q, Qin WJ, Huang SJ, Jiang Y, Qin HG, 2018. Chlorantraniliprole resistance and its biochemical and new molecular target mechanisms in laboratory and field strains of *Chilo suppressalis* (Walker). *Pest Management Science*, 74(6): 1416–1423.

Tan YC, 1987. Preliminary study on borers in hybrid rice. *Entomological Knowledge*, 24(5): 311–314. [谭荫初, 1987. 杂交水稻中的螟虫初步研究. 昆虫知识, 24(5): 311–314.]

Tang Y, He H, Qu X, Cai Y, Ding W, Qiu L, Li Y, 2020. RNA interference-mediated knockdown of the transcription factor Krüppel homologue 1 suppresses vitellogenesis in *Chilo suppressalis*. *Insect Molecular Biology*, 29(2): 183–192.

Wang CQ, Wang X, Shi W, Sun S, 1997. Studies on the dynamics of *Chilo suppressalis* in paddy fields of Guichi. *Journal of Anhui Agricultural University*, 24(4): 336–339. [王传全, 王翔, 施文, 孙舜, 1997. 贵池市水稻二化螟发生动态分析. 安徽农业大学学报, 24(4): 336–339.]

Wang S, Xie Y, Liu C, Liu JW, Guo FR, Qiao ST, Xing YJ, Wu SF, Bass C, Gao CF, 2025. Adaptive neofunctionalization of ancestral CYP6SN2vB following duplication contributes to abamectin resistance in *Chilo suppressalis* Walker. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 182: 104357.

Wang YN, Zhang L, Li YH, Liu YM, Han LZ, Zhu Z, Wang F, Peng YF, 2014. Expression of Cry1Ab protein in a marker-free transgenic Bt rice line and its efficacy in controlling a target pest, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Environmental Entomology*, 43(2): 528–536.

Wang ZH, Shu QY, Ye GY, Cui HR, Wu DX, Altosaar I, Xia YW, 2002. Genetic analysis of resistance of Bt rice to stripe stem borer (*Chilo suppressalis*). *Euphytica*, 123(3): 379–386.

Wang ZY, Fang LF, Zhou ZS, Pacheco S, Gómez I, Song FP, Soberón M, Zhang J, Bravo A, 2018. Specific binding between Bacillus thuringiensis Cry9Aa and Vip3Aa toxins synergizes their toxicity against Asiatic rice borer (*Chilo suppressalis*). *The Journal of Biological Chemistry*, 293(29): 11447–11458.

Wang ZY, Yang WQ, Yin CL, Ma WH, Liao M, Li F, Zhang J, 2023. Cry9A and Vip3A protein-induced transcriptional changes correspond to their synergistic damage to the midgut of *Chilo suppressalis*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 196: 105596.

Wei YB, Yan R, Zhou QL, Qiao LY, Zhu GN, Chen ML, 2019. Monitoring and mechanisms of chlorantraniliprole resistance in *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) in China. *Journal of Economic Entomology*, 112(3): 1348–1353.

Wu G, Cui HR, Shu QY, Ye GY, Xie XB, Xia YW, Gao MW, Altosaar I, 2001. Expression patterns of cry1Ab gene in progenies of “kemingdao” and the resistance to striped stem borer. *Scientia Agricultura Sinica*, 34(5): 496–501. [吴刚, 崔海瑞, 舒庆尧, 叶恭银, 谢小波, 夏英武, 高明尉, Illimar Altosaar, 2001. “克螟稻”后代 cry1Ab 基因表达特性及其对二化螟抗性的研究. 中国农业科学, 34(5): 496–501.]

Xin W, Zhang ZT, 2001. Research progress on population dynamics and management of *Chilo suppressalis*. *Entomological Knowledge*, 38(4): 241–246. [辛文, 张志涛, 2001. 二化螟种群动态及管理研究进展. 昆虫知识, 38(4): 241–246.]

Xu BB, Qian K, Zhang N, Miao LJ, Cai JX, Lu MX, Du YZ, Wang JJ, 2017. Sublethal effects of chlorantraniliprole on juvenile hormone levels and mRNA expression of *JHAMT* and FPPS genes in the rice stem borer, *Chilo suppressalis*. *Pest Management Science*, 73(10): 2111–2117.

Xu HX, Yang YJ, Zheng XS, Tian JC, Lu YH, Cheng JA, Lü ZX, 2019. Research on the management of rice insect pests in China since the 21 century: Advances and future prospects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1163–1177. [徐红星, 杨

亚军, 郑许松, 田俊策, 鲁艳辉, 程家安, 吕仲贤, 2019. 二十一世纪以来我国水稻害虫治理成就与展望. 应用昆虫学报, 56(6): 1163–1177.]

Xu L, Sun Y, Liu BS, Xu DJ, Xu GC, Zhao J, Zhang YN, Zhang YL, Huang SJ, Wu SF, Gao CF, 2023. Research progress in molecular mechanisms of resistance to diamide insecticides in *Chilo suppressalis*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 25(2): 257–266. [徐鹿, 孙杨, 刘宝生, 徐德进, 徐广春, 赵钧, 张亚楠, 张月亮, 黄水金, 吴顺凡, 高聪芬, 2023. 二化螟对双酰胺类杀虫剂抗性的分子机制研究进展. 农药学学报, 25(2): 257–266.]

Xu L, Zhao J, Sun Y, Xu DJ, Xu GC, Xu XL, Zhang YL, Huang SJ, Han ZJ, Gu ZY, 2019. Constitutive overexpression of cytochrome P450 monooxygenase genes contributes to chlorantraniliprole resistance in *Chilo suppressalis* (Walker). *Pest Management Science*, 75(3): 718–725.

Xu XL, Wang FS, Liu ZR, Yao YJ, Ji XY, Jiang JX, 2017. Impacts of transgenic cry1Ab/cry1Ac rice Ganlü 1 on *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée and *Chilo suppressalis* (Walker) and their arthropod predators under field conditions. *Journal of Plant Protection*, 44(1): 1–7. [徐雪亮, 王奋山, 刘子荣, 姚英娟, 季香云, 蒋杰贤, 2017. 转 cry1Ab/cry1Ac 基因水稻赣绿 1 号对田间稻纵卷叶螟和二化螟及其捕食性天敌的影响. 植物保护学报, 44(1): 1–7.]

Xue RR, Li Q, Guo RQ, Yan H, Ju XY, Liao L, Zeng RS, Song YY, Wang J, 2023. Rice defense responses orchestrated by oral bacteria of the rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*. *Rice*, 16(1): 1.

Yang M, Han LX, Zhang XB, Liu JJ, Li B, 2023. Analysis on the development of postgraduate education in China from 2001 to 2020. *Journal of Higher Education Research*, 9(14): 21–25. [杨明, 韩龙祥, 张学博, 刘佳佳, 李波, 2023. 2001-2020 年我国研究生教育发展状况分析. 高教学刊, 9(14): 21–25.]

Yang RM, Fang JC, Zhu YQ, Diao CY, 2004. New characteristics and control measures of rice borers in Jiangsu Province. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 32(1): 52–54. [杨荣明, 方继朝, 朱叶芹, 刁春友, 2004. 江苏省水稻螟虫发生的新特点及治理措施. 江苏农业科学, 32(1): 52–54.]

Yao CC, Du LX, Liu QS, Hu XY, Ye WF, Turlings TCJ, Li YH, 2023. Stemborer-induced rice plant volatiles boost direct and indirect resistance in neighboring plants. *New Phytologist*, 237(6): 2375–2387.

Yu S, Gong L, Han YC, Yang L, Li J, Hoffmann AA, Luo GH, Yuan GR, Fang JC, Ji R, 2024. Oral secretions from striped stem borer (*Chilo suppressalis*) induce defenses in rice. *Pest Management Science*, 80(12): 6437–6449.

Yu S, Li S, Li J, Wang CY, Yang L, Li J, Meng Y, Tan XY, Jing MF, Luo GH, Fang JC, Ji R, 2025. Ferritin from striped stem borer (*Chilo suppressalis*) oral secretion acts as an effector helping to maintain iron homoeostasis and impair defenses in rice. *Plant, Cell & Environment*, 48(5): 3735–3749.

Zhang D, Qu LL, Song L, Li JZ, Zhang WM, Meng W, Guo QS, Du YJ, 2025. Mating disruption of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) with novel aerosol dispensers in rice field. *Pest Management Science*, 81(8): 4904–4912.

Zhang S, Li YP, Shao ZR, Guo JQ, 2011. Monitoring and management of insecticide resistance of *Chilo suppressalis* in China. *Plant Protection*, 37(2): 141–144. [张帅, 李永平, 邵振润, 郭井泉, 2011. 水稻二化螟抗药性监测及防控对策. 植物保护, 37(2): 141–144.]

Zhang ZL, Xu QY, Zhang R, Shen C, Bao HB, Luo GH, Fang JC, 2024. The irregular developmental duration mainly caused by the broad-complex in *Chilo suppressalis*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 204: 106090.

Zhao J, Xu L, Sun Y, Song PP, Han ZJ, 2019. UDP-glycosyltransferase genes in the striped rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker), and their contribution to chlorantraniliprole resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5): 1064.

Zhuo FY, Chen XX, Xia YX, Fu Q, Wang S, Xu HX, Hu F, Zhang J, 2024. The occurrence characteristics of rice diseases and insect pests and the integration of green control technology in China from 2013 to 2022. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(5): 1207–1213. [卓富彦, 陈学新, 夏玉先, 傅强, 王甦, 徐红星, 胡飞, 张杰, 2024. 2013-2022 年我国水稻病虫害发生特点与绿色防控技术集成. 中国生物防治学报, 40(5): 1207–1213.]

Zhuo FY, Zhang YY, Guo YW, Liu H, E WD, 2025. Occurrence patterns of rice diseases and pests and integrated innovation of green control technologies in China during the 14th Five-Year Plan period. *China Rice*, 31(4): 9–12. [卓富彦, 张熠玛, 郭永旺, 刘慧, 鄂文弟, 2025. “十四五”期间我国水稻病虫害发生规律演变与绿色防控技术集成创新. 中国稻米, 31(4): 9–12.]