中国作物害虫灯光诱控发展七十年*

王飞凤[1, 2**] 黄求应[3] 朱 芬[3] 雷朝亮[3] 王小平[3] 桑 文[1***]

（1. 华南农业大学植物保护学院，广州 510640；2. 重庆师范大学生命科学学院，重庆 401331；
3. 华中农业大学植物科学技术学院，武汉 430070）

摘 要 害虫灯光诱控技术是一种利用昆虫趋光特性进行物理防治的方法。随着农药残留问题日益严重、农产品出口壁垒加剧以及绿色农业发展的需求增长，该技术的研发与推广得到了显著推动。本文系统回顾了过去 70 年来我国害虫灯光诱控技术的研究与应用历程，总结了相关的理论研究成果，并梳理了该领域产品和技术的迭代创新情况。未来，灯光诱控技术仍需进一步深化昆虫趋光机制研究，以优化产品设计、降低成本和提升防治效果，同时完善“灯光诱控+”协同模式与应用规范，为农业绿色可持续发展提供有力支撑。

关键词 绿色防控；害虫物理防治；趋光性；杀虫灯；灯光诱控技术

Seventy-year development of light-trap technology for crop pest control in China

WANG Fei-Feng[1, 2**] HUANG Qiu-Ying[3] ZHU Fen[3] LEI Chao-Liang[3]
WANG Xiao-Ping[3] SANG Wen[1***]

(1. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China;
2. College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract The light-trap technology for pest control is a physical prevention and control method that utilizes the phototaxis of insects. Driven by the prominent issue of pesticide residues, the intensification of agricultural product export barriers, and the development demand for organic agriculture, the research, development and promotion of light-trap technology have been advanced. This paper systematically reviews the 70-year development of pest light-trap technology in China, summarizes the theoretical research guiding the technology, and sorts out the iterative innovation of light-trap products and the technology. In the future, it is necessary for the light-trap technology to deepen the research on insect phototaxis mechanisms to optimize product design, focus on increasing trapping efficiency and reducing costs, and refine the “light-trap +” synergistic model as well as application standards, so as to provide support for eco-friendly and sustainable development of agriculture.

Key words sustainable control; pest physical control; phototaxis; light trap; trapping technology of light

害虫防治是保障农业生产和维护生态平衡的重要措施。灯光诱控技术作为一种关键的物理防治手段，利用昆虫对特定光源的趋性，实现对害虫的诱集与杀灭。早在 2000 多年前，我国古代劳动人民就已经发现并开始利用昆虫的趋光行为。据记载，唐玄宗开元四年（公元 716 年），河南等地发生大规模蝗灾，宰相姚崇提出采用夜间设火诱捕、掘坑焚埋等科学方法治理蝗灾，取得显著成效，成为历史上最早有明确记录的利用昆虫趋光性进行害虫防治的案例。近年来，由于农药残留问题日益突出、农产品出口壁垒加强以及有机农业快速发展，我国学者加大了对绿色害

*资助项目 Supported projects：“十四五”国家重点研发计划（2023YFD1400700）；广东省自然科学基金（2023A1515030219）
**第一作者 First author，E-mail：wff1013634299@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：sangwen@scau.edu.cn
收稿日期 Received：2025-08-02；接受日期 Accepted：2025-08-23

虫防治技术的研究力度。灯光诱控技术的发展与国家农业政策的演进和科技进步密不可分。自2006 年我国提出“公共植保、绿色植保”理念以来，开始大力示范和推广以生态控制、理化诱控和生物防治为核心的绿色防控技术。以减少化学农药使用为目标，绿色防控技术的研发与应用取得了显著进展，其中基于昆虫趋光性原理开发的诱虫灯——“光诱”技术，作为一项重要手段，得到了广泛的应用和推广（杨普云等，2018）。

自建国以来，我国灯光诱控技术在理论基础研究、产品研发创新与应用技术开发等方面取得了长足进步，为农业可持续发展作出了重要贡献。杀虫灯通过光谱变频等技术突破传统限制，能够有效诱杀害虫、切断其繁殖链，在减少农药使用、保障农产品质量安全、推动生态农业发展的同时，兼具经济效益与生态社会效益，包括促进作物增产、恢复生态平衡以及降低环境与健康风险（雷朝亮，2019）。2005 年，农业农村部在《全国农作物重大病虫害防治预案》中明确提出可选用高压汞灯、频振式杀虫灯等设备诱杀成虫，以降低虫口基数、减轻幼虫防治压力。2010 年起，农业农村部将“害虫灯光诱杀技术”列入《农业主导品种和主推技术》，作为主推技术应用于水稻、小麦、棉花、玉米、杂粮、蔬菜、果树、中药材、烟草等作物上超过 150 种害虫的防治。截至 2016 年，以灯光诱控为核心的水稻、棉花、柑橘、蔬菜、玉米、茶叶、花生、甘蔗等作物害虫综合防控技术体系，已在 20 多个省（自治区、直辖市）大面积示范推广，累计应用面积超过 1.3×10^7 公顷次，经济、社会和生态效益显著（农办议〔2016〕40 号）。2023 年，农业农村部联合工业和信息化部、生态环境部发文，明确提出将加大对农用诱虫灯等绿色防控技术产品的研发与推广支持，推动农作物病虫害绿色防控技术的大规模应用，进一步促进农业绿色发展（农办案〔2023〕220 号）。纵观 70 年的发展历程，灯光诱控技术实现了从初步应用、理论探索到大规模实践推广的不断深化。系统梳理其发展脉络，不仅有助于总结历史经验，也将为未来的技术创新与应用拓展奠定坚实基础。

1　灯光诱控理论基础研究

我国灯光诱控技术的早期理论体系主要建立在国际经典的昆虫光感知与行为学理论基础上。例如，国外学者发现昆虫复眼中存在三类感光细胞，分别对紫外线、蓝光和绿光敏感（Menzel and Blakers，1976），这一发现为诱虫光源的波长选择提供了关键依据。此外，昆虫的正趋光性被用于害虫诱捕（Jander，1963），以及不同虫种对光的有效波长和强度存在差异（Coombe，1981；Hardie，1989）等理论，共同为该技术的应用奠定了科学基础。基于这些国际理论，我国在建国初期开始尝试在不同地区推广灯光诱控技术。与此同时，国内学者逐步开展对昆虫趋光行为的系统性研究，为灯具研发与技术优化提供了精准的科学指导。这些努力不仅为我国灯光诱控技术的应用与创新注入了核心动力，也推动该技术从早期的简易工具应用逐步走向智能化与精准化的现代技术体系，成为农业绿色防控中的重要支撑手段。

1.1　应用探索起步阶段

20 世纪 50 年代，我国灯光诱控技术及其理论研究处于初步探索阶段。该时期的理论支撑主要借鉴国际已有研究成果。夏季夜晚常见飞蛾聚集于灯光周围的现象，被理解为昆虫的趋光性行为，其机制在于昆虫复眼视网膜中的色素吸收光能后发生化学反应，刺激视神经产生冲动并传递至神经中枢，进而调控运动器官，最终驱使昆虫飞向光源。这一机理为利用灯光诱杀害虫提供了理论依据（草金，1965）。基于对昆虫趋光行为的初步认识，我国开始在实际生产中尝试应用灯光诱控技术。有电地区普遍采用白炽灯进行诱虫，无电地区则使用煤油灯作为替代工具。部分区域还通过发动群众、大规模布设光源的“万家灯火”方式，成功诱杀了大量害虫，取得了显著防治效果（武予清等，2009）。

此后，基于 330-400 nm 波长的紫外线对多种昆虫具有最强吸引力的研究结论，可发射 360 nm 紫外光的黑光灯逐渐成为虫情测报与灯光诱杀

的核心工具，显著促进了灯光诱控技术在农业重要害虫防治中的应用（曹赤阳，1958；许明霞，1959；桂承明等，1964）。然而，黑光灯的“广谱诱杀”特性也带来问题。例如，1958-1961 年邯郸地区的黑光灯诱集数据显示，天敌昆虫占诱虫总量的 30.2%，某些时段甚至超过 50.0%（马仲实，1965）。由于当时对昆虫趋光行为机制理解尚浅，早期灯具在诱杀害虫的同时，对非靶标昆虫（包括天敌）的误杀率较高，反映出理论指导的不足。与此同时，气候条件、灯具高度、开关灯时间等操作因素也开始被纳入技术考量（崔向东，1968），为后期灯光诱控技术的优化研究指明了方向。值得注意的是，自 60 年代起，昆虫科技工作者已开展昆虫复眼结构及电生理方面的研究，如发现粘虫 *Mythimna separata* 复眼的光敏感性随暗适应时间延长而增强，并初步揭示其信号传递机制，但这些成果尚未应用于灯光诱控的实际操作中（陈元光和钦俊德，1963；刘育民等，1966）。

1.2 理论快速发展阶段

20 世纪 70 年代后，随着昆虫生态学和生理学的学科发展，我国灯光诱控理论研究也进入了快速发展期，为灯光诱控技术提供了重要支撑。昆虫科技工作者在长期使用短波黑光灯与长波白炽灯诱虫的过程中发现，某些年份或代次中，害虫在灯下不出现高峰或峰期推迟，难以有效指导虫情验证、预测预报及大田防治（刘立春，1993，1994）。这一现象也推动了我国学者开展诱虫光源的改进与创新研究。

昆虫趋光行为的经典假说多源于国外研究，主要包括光定向假说（Atkins，1980）、生物天线假说（Callahan，1965）和光干扰假说（Robinson，1952；Verheijen，1960）。自 1972 年起，我国学者开始系统研究夜蛾的趋光行为，提出该行为至少包括“从远距离飞向灯周”和“接近光源后扑灯”两个阶段，并指出扑灯是由于强光干扰了昆虫靠近后的视觉与行为响应（陈宁生，1979），这一发现改变了以往认为昆虫单纯被亮光吸引的观点。以棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和烟青虫 *Heliocoverpa assulta* 为对象的研究进一步表明，暗适应时间、昼夜节律、成虫日龄、光源波长和光照强度均影响趋光率（丁岩钦等，1974；丁岩钦，1978）。这些因素成为后续昆虫趋光行为研究的重点，其中光源波长与光强更是灯光诱控产品改进与创新的关键方向。

将 350 nm 紫外光与不同可见光组合后，发现其对烟青虫的诱集效果存在增效或干扰作用，为复合光源的设计提供了依据（丁岩钦，1978）。三化螟 *Tryporyza incertulas* 对 550 nm 绿光的电生理反应强于 370 nm 紫外光，但田间黑光灯诱虫量更高，研究提出其扑灯行为涉及绿光远距离引诱与紫外光近距离干扰飞行的双因素机制（胡少波和林耀平，1982），与陈宁生（1979）关于趋光行为的主张一致，验证了复合光源的合理性。粘虫复眼对紫外光区的最大敏感性随光强增强从 358 nm 移至 400 nm（陈德茂等，1987）；三化螟的敏感光频需在低光强下响应，550 nm+370 nm 低强度复合光管更利于诱集（胡少波和林耀平，1982），为双波灯研发提供了理论指导。这些研究显著提升了灯光诱控的精准性，推动其由“盲目诱杀”转向“靶向诱集”，直接促进了高效杀虫灯的研制，如江苏沿江地区农业科学研究所的低功率双波灯、吉林省农业科学院的高压汞灯双波灯、江苏师范学院的镓钴灯，以及河南佳多科工贸有限责任公司的频振式杀虫灯等，大幅提高了诱控效率，使该技术从辅助手段逐步发展为绿色防控的核心组成部分（河南汤阴佳多科工贸公司物理治虫研究所，1993；刘立春，1993；唐济民等，1995）。

1.3 多元化发展阶段

21 世纪前后，生物技术发展迅速，推动灯光诱控的理论研究突破传统框架，进入多维度、跨学科的多元化发展阶段。这一时期，理论探索不再局限于光源与昆虫两者之间，而是同时结合生态调控需求形成系统性认知，为智能化灯具研发和精准化技术应用提供了全新的理论支撑。

国内众多植物保护团队聚焦于靶标害虫的趋光行为，以提升灯光诱杀效率，相关研究多集

中于不同昆虫的敏感光谱、光照强度、性别(Kim *et al.*, 2018a; 张亚南等, 2023; Chen *et al.*, 2024; 宁恒亨等, 2024) 以及环境因子 (Yang *et al.*, 2014; 高宇等, 2017; 米娜等, 2019) 等方面, 成果发表于国内外期刊, 为面向不同靶标害虫和作物生态系统优化灯光诱控技术提供了依据。以棉铃虫防控为例, 灯光诱杀效果显著优于性诱剂和杨树枝把, 高压汞灯效果优于双波灯, 有效诱杀半径达 80-160 m (魏国树等, 2001); 室内试验中 380 nm 波长光源诱虫量高于双波灯, 而田间则以双波灯效果更佳, 表明扩大光谱范围有利于提高田间诱捕效率 (顾国华等, 2004); 棉铃虫在持续光照下复眼维持昼眼状态或由夜眼转为昼眼, 不易受干扰扑灯, 因此建议天黑 30 min 后开灯, 并间隔停灯 30-60 min 可提升诱虫效果 (靖湘峰等, 2005)。

同时, 多种重要农业害虫的敏感光谱及适宜诱捕方式也得到明确。研究表明, 520 nm 绿光对粘虫的诱捕效果显著优于 430、485 和 560 nm 的单波长或随机组合光源 (Kim *et al.*, 2018a); 通过室内外试验筛选出 385 与 420 nm 的茶园专用光源, 在维持对茶尺蠖 *Ectropis obliqua* 和小贯小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 较高诱捕率的同时, 显著降低了天敌误杀率 (Bian *et al.*, 2018)。昆虫趋光行为还受光照强度与偏振性的影响: 棉铃虫、二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 和茶尺蠖的趋光率-光强响应曲线呈“S”型, 趋光率随光强升高而增加, 在较高光强区域下降 (魏国树等, 2000; 蔡侠, 2014; 杨心月, 2015); 草地螟 *Loxostege sticticalis* 则呈“J”型, 趋光率随光强增强持续上升, 且在强光区增幅更大 (江幸福等, 2010); 铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* 偏好非偏振光, 而麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* 更趋向线偏振光 (蒋月丽, 2014; 蒋月丽等, 2016)。这些研究明确了不同害虫的趋光特性, 为开发特异性诱控设备及优化田间光环境参数提供了精准依据。

不同害虫的灯光诱捕节律存在显著差异, 例如褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 的高峰期为 20:00-21:00, 二化螟 *Chilo suppressalis* 为 21:00-00:00 等 (桑文等, 2018)。基于此特性, 可通过区分害虫与天敌的夜间活动时间差异优化诱捕策略。田间应用表明, 采用益虫友好型策略 (20:00-22:00 + 2:00-4:00) 相比传统全夜段诱捕 (20:00-04:00) 可降低 46%的天敌误杀率, 并节省 50%的用电量 (Ma and Ma, 2012)。尽管该策略导致鞘翅目和鳞翅目害虫诱捕量分别减少 28.9%和 24.5%, 仍表现出显著综合优势 (Ma and Ma, 2012)。此外, 研究还发现, 锥形灯配合风吸式诱捕装置可提高靶标害虫诱捕效率, 同时减少非靶标昆虫捕获率 (Bian *et al.*, 2018)。上述研究从害虫行为节律、策略优化与设备组合等方面, 为灯光诱控技术的精准化提供了关键理论支撑, 在提升靶标害虫诱捕效率的同时, 显著降低对天敌等非靶标昆虫的伤害。

华中农业大学雷朝亮教授团队基于多年实验室研究与田间观察, 提出“光胁迫假说” (桑文等, 2016)。该假说突破传统认知, 认为趋光性昆虫并非真正喜光, 多数夜行性昆虫白天静息且避光, 夜间受人工光源刺激后产生应激反应 (即光胁迫), 最终因持续兴奋扑灯甚至死亡。相关研究仍在不断完善该理论 (Kim *et al.*, 2018b; Huang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023)。这一理论已逐步与植保实践相结合。近年来发现, 灯光诱控不仅可通过诱杀害虫实现控害, 夜间光照还会对昆虫生理产生多方面负面影响, 与光胁迫假说理念一致, 并已指导多项应用。例如, 黄光照射显著抑制甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的产卵行为并缩短成虫寿命 (蒋月丽等, 2020a, 2020b, 2025), 在小白菜田和茶园中防控效果良好, 且对非靶标昆虫和天敌无显著影响 (蒋月丽等, 2023, 2024); 夜间持续黄光与白光处理可降低荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* 的交配率和繁殖力, 其中白光效果更优 (全林发等, 2021), 荔枝园挂置白光灯后害虫数量、果实着卵量和蛀果率均显著下降 (李文景等, 2021)。黄绿光干扰铜绿丽金龟和暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* 的羽化, 并显著抑制其取食与交配 (Jiang *et al.*, 2023); 40-120 lx 黄光显

著缩短灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 成虫寿命，抑制其羽化与产卵（乔利等，2022）。这些研究为灯光诱控技术开辟了新方向，表明未来可通过提升诱捕效率与利用光源对害虫的“干扰效应”拓宽防控途径。

总之，灯光诱控理论研究从早期借鉴国际经典理论，逐步发展出本土化、多维度的原创体系，不仅促进了多种诱虫灯的研发，使其从辅助防治手段逐渐成为农业绿色防控的核心技术之一，也为农业可持续发展提供了重要支撑。

2 灯光诱控产品创新

自诱虫灯发明以来，其结构形式丰富多样。发展至今，现代诱虫灯通常包含以下核心组件：供电部件、诱虫光源、杀虫部件、集虫部件、保护部件、支撑部件及控制系统。70 年来，随着理论研究的深入与技术手段的进步，各部件不断迭代升级，推动了产品从简易工具向智能设备的跨越，促进了灯光诱控技术的持续完善。

早期的灯光诱控产品以实现基本诱杀功能为核心，结构较为简单，主要包括供电部件、诱虫光源、杀虫部件和集虫部件。实际应用中多采用交流电供电，诱虫光源主要为 360 nm 左右的黑光灯或长波白炽灯，杀虫与集虫部件则多使用毒瓶、水盆，或挡板加集虫漏斗、高压电网等形式（曹赤阳，1958；徐立凡，1964）。以黑光灯为代表的早期产品在 1973 年全国黑光诱虫灯经验交流会上得到总结，据浙江等 12 个省（自治区、直辖市）的不完全统计，当时应用数量约达 90 万盏（陈宁生和罗敬业，1979）。此后，江苏沿江地区农业科学研究所研制的低功率双波诱虫灯和吉林省农业科学院研制的高压汞灯双波灯，在黑光灯基础上将光源升级为可同时发射长、短两列光波，通过互补效应显著提高了诱虫效率（刘立春，1993，1994）。

20 世纪 90 年代，河南佳多科工贸有限责任公司成功研制出频振式杀虫灯，改进了电击式杀虫灯的结构，通过光波诱集与频振高压电网结合击杀害虫。其规模化生产与推广显著推动了灯光诱控技术成为害虫防控的核心措施之一。1993 年，在全国产棉区棉铃虫防治现场会上，河北省将该灯列为防治棉铃虫的重要措施（河南汤阴佳多科工贸公司物理治虫研究所，1993）；1999 年，该技术被列入农业部全国农技中心推广技术，广泛应用于北方棉铃虫和甜菜夜蛾的防治，极大促进了灯光诱杀技术的发展（赵树英，2002）。河南佳多与全国农业技术推广服务中心等单位共同完成的“农业害虫监测系统及灯光诱控技术研发与应用”项目获 2006 年度国家科技进步二等奖，显著推动了我国植保测报预警技术的发展，达到国际先进水平（闻贵，2007）。2009 年，国家标准《植物保护机械 频振式杀虫灯》（GB/T 24689.2-2009）发布，为频振式杀虫灯的生产与检测提供了统一规范，进一步促进其标准化和规模化应用，巩固了其在绿色防控中的核心地位。华中农业大学与佳多科工贸有限责任公司等合作系统分析了灯下昆虫种类组成，评估了灯光诱杀的生态安全性，明确了 40 多种农业害虫的趋光行为与上灯节律，筛选出适配不同农田生态系统的特异性光源，研制出可发射 20 种波长、分时段针对不同昆虫的 JDPS-BD 系列诱控设备，以及带时控功能的 JDPS-SD 新型杀虫灯。该技术累计推广面积超 1.3×10^7 公顷次，与同类技术相比杀虫效果提高 30%，天敌上灯率降低 50%以上，单灯节电 50%以上。以水稻产区为例，可减少施药 15-20 次/ hm^2，节省用工 6 人次，经济、社会和生态效益显著（张长禹等，2015；我国昆虫不育技术发展战略研究项目组，2016）。

尽管杀虫灯具备减少农药使用、保障农产品安全等优势，其应用局限性仍持续推动该行业的创新发展（雷朝亮，2019）。据 2020 年不完全统计，我国拥有杀虫灯相关企业近 180 家，研发或生产的杀虫灯与虫情测报灯产品超过 700 种，企业数量与规模迅速扩大，产品类型也趋于多样化和复杂化（王蔑等，2020）。近 20 年来，供电方式从交流电逐步发展为蓄电池和太阳能供能；杀虫方式涌现出风吸式、粘连式、激光式及复合式等多种类型；发光二极管因其节能、寿命长和可发射窄谱光等优点，成为主流诱虫光源。除基本诱杀结构外，现代智能诱虫灯还增加了天敌保

护、自动清虫以及智能控制管理系统。目前代表性产品如风吸式太阳能诱虫灯，以深圳市富巍盛科技有限公司生产的智能型太阳能杀虫灯为例，无需外接电源、适应多种地形，支持按需选择波长精准诱杀，科学调控光源范围与亮度，采用弱光高效太阳能板充电，具备雨控防雷等多重防护，使用安全节能低压，为农林害虫防控提供了新方案（赵季秋，2012）。

风吸式诱虫灯基于风机产生负压气流，无需昆虫接触灯具，绕飞过程中即被吸入集虫瓶，并可利用害虫植食性与天敌肉食性差异，保障天敌存活，而使害虫因饥饿、产卵障碍或被捕食死亡（何超等，2013）。田间试验表明，风吸式诱虫灯对主要害虫的诱捕量高于频振式杀虫灯（何超等，2013；张舒等，2021），其天敌诱集率仅为频振灯的 0.89 倍（张舒等，2021），且天敌存活率超过 80%（何超等，2013）。2015 年后，华中农业大学与湖南本业绿色防控科技股份有限公司等单位合作，开发出集成专用光源、天敌逃逸装置和物联网远程控制系统的节能智能风吸陷阱式诱虫灯。该系列产品已在湖北、湖南、河南、广西等 20 余省份的水稻、玉米和果树等作物中应用超 5 300 万 hm^2，新增利润 68.7 亿元，防控效果达 70%以上，有效推进农药减量、农业增效与农民增收，经济、社会及生态效益显著（黄求应，2021）。

当前市面上的杀虫灯主要基于电击式和风吸式两种类型，逐步发展出具备自动清虫倒虫、害虫智能识别，以及光控、雨控、时控智能切换功能的产品。较新型号产品还内置通讯模块，支持通过软件联网远程管理，部分产品还配备防盗报警与异常状态预警功能（李凯亮等，2019）。国家标准《植物保护器械　杀虫灯》（GB/T 24689.2-2017）和团体标准《太阳能杀虫灯》（T/CAAMM 20-2018）明确了以太阳能光伏系统供电的杀虫灯的安全与技术要求，从生产源头规范了其性能参数与质量标准，为田间科学布灯与精准诱控奠定了基础，推动灯光诱控技术向更规范、高效的方向发展。灯光诱控产品的演进本质上是各核心组件在理论指导下的持续优化：从早期注重“诱杀功能”，到中期追求“精准高效”，再到当前强调“智能生态”，每一阶段的发展都使害虫灯光诱控技术更契合农业需求与生态保护要求。

3　灯光诱控应用技术开发

1973 年召开的全国黑光诱虫灯经验交流会明确将黑光灯列为害虫综合防治的有效措施之一，指出灯光诱捕既可用于虫情监测，也可用于害虫防治（陈宁生和罗敬业，1979）。杀虫灯的效果受灯具功率、捕杀装置、光源距离、波长、天气条件及昆虫生理状态等多种因素影响（陈德鑫等，2017）。随着农业生产需求与技术体系的进步，灯光诱控技术的应用模式持续演进：从单机独立使用逐步发展为多技术协同的综合防控模式，最终形成规范化、科学化的应用体系，成为农药减量替代的核心技术之一。

早期灯光诱控技术以“独立作战”为主要特征，应用场景局限于直接诱杀趋光性害虫，模式较为粗放。单独使用诱虫灯常导致防治效果区域差异显著，通常被归因于设灯密度不足或开灯时间不够等设备相关因素（张荣等，1991；杨桂华等，1998）。为提高诱捕效果，通常采用集中连片布灯方式，通过在大面积农田中密集设置形成广域诱捕区，虽在一定程度上增加了害虫诱捕量（杨桂华等，1998），但其效果受多种田间因素影响，“独立作战”的弊端也逐渐显现。此外，早期应用中灯具高度、布设密度等关键参数缺乏统一标准，还存在能耗高、成本大、对天敌和中性昆虫误杀严重等问题，难以兼顾防治效率与生态平衡。

随着综合防治理念的普及，灯光诱控技术逐步与其他防治手段相结合，形成多元化的“杀虫灯+”应用模式，其中以全国农业技术推广服务中心杨普云等（2010）提出的系列集成技术最具代表性。不同区域、不同作物的主要害虫存在差异，同一作物在不同环境中受生态因子的影响，虫害发生情况也不尽相同。为提高杀虫灯的应用效果，需因地制宜、因作物而异，集成以杀虫灯为核心的绿色防控技术模式（杨普云和赵中华，

2012）。针对不同防控对象，以技术产品为主线，将杀虫灯与其它防控方法有机结合，目前已集成多种“杀虫灯+”技术模式，如杀虫灯+性诱剂、杀虫灯+天敌（赤眼蜂）、杀虫灯+生物农药（白僵菌、苏云金芽孢杆菌、棉铃虫核型多角体病毒等）、杀虫灯+诱虫板、杀虫灯+防虫网等（杨普云等，2014）。这些技术模式在水稻、棉花、蔬菜、玉米、林果、茶叶、烟草、草地等作物主要害虫防控中推广应用，综合防效可达 90%左右（杨普云等，2014；张跃进，2016），有效突破了单一技术的局限，使灯光诱控从“独立作战”转变为绿色防控体系的核心组成部分。

不仅如此，随着绿色农业发展战略的深入实施，灯光诱控技术逐步迈入标准化应用阶段。国家和地方相继出台多项技术标准，进一步确立了该技术在绿色防控体系中的重要地位。各省市针对不同地区及作物害虫，制定了相应的杀虫灯使用技术规范，内容涵盖灯具选型、布设区域、设置密度、悬挂高度、开灯时间及害虫清理等方面的具体准则。例如，唐山市 2015 年发布《杀虫灯防治美国白蛾技术规程》（DB1302/T 413-2015），吉林省同年推出《菜田诱虫灯使用技术规范》（DB22/T 2281-2015）；2019 年上海市发布《蔬菜病虫害绿色防控技术规范 第 2 部分：杀虫灯》（DB31/T 1190.2-2019）；2021 年中国茶叶学会制定《茶园杀虫灯使用技术规程》（T/CTSS 25-2021）；2025 年广东省出台《柑橘园诱虫灯使用技术规范》（DB44/T 2637-2025）。此外，农业农村部于 2020 年发布行业标准《农用诱虫灯应用技术规范》（NY/T 3697-2020），为水稻、棉花、茶树、花生和蔬菜等多种作物提供了规范的安装指导，包括靶标害虫的敏感波长和推荐开灯时段。这些标准面向相对稳定的农田环境或特定靶标害虫，有助于提升诱控效率。

灯光诱控应用技术的发展历程反映了农业技术从单一化走向集成化、从经验化迈向标准化的演进脉络。其核心目标始终围绕提升控害效率、降低生态风险，并响应农业绿色转型的需求。该技术不仅实现了自身效能的跨越——从广谱诱杀转向靶向精准调控，从依赖经验发展为规范应用，更在农药减量、农田生态保护与农产品质量安全方面发挥了关键作用。

4 展望

未来灯光诱控技术的发展仍需立足于农业生产实际需求，在现有理论与应用基础上持续推进。在基础研究层面，应深入解析昆虫趋光行为的生理与分子机制，尤其关注不同靶标害虫对光胁迫的特异性响应规律，为精准设计光源波长、强度与节律提供更深入的理论支撑。在技术创新方面，需聚焦于提升设备效能与降低成本，包括改进光源材料以延长寿命、提高智能化水平，并加快研发如自动清虫装置等智能部件，以及针对特定害虫行为习性开发专用灯具，例如防治茶园叶蝉、粉虱等小型刺吸式害虫的便携节能型杀虫灯。同时，应结合不同作物生态区的虫害特点，增强“灯光诱控+”技术模式的区域适用性，并提升其与其他绿色防控技术的兼容性。在应用规范层面，需进一步细化不同作物与害虫的用灯标准，依托田间监测数据动态优化布灯密度与运行参数，提高技术应用的稳定性和可操作性。通过理论、技术与应用体系的协同进步，灯光诱控技术将在农药减量与生态保护中发挥更重要的作用，为农业绿色可持续发展提供坚实支撑。

参考文献 (References)

Atkins MD, 1980. Introduction to Insect Behaviour. New York: Collier Macmillan Ltd. 31–33.

Bian L, Cai XM, Luo ZX, Li ZQ, Chen ZM, 2018. Decreased capture of natural enemies of pests in light traps with light-emitting diode technology. *Annals of Applied Biology*, 173(3): 251–260.

Cai X, 2014. Study on the phototaxis of several tea pests. Master dissertation. Hangzhou: China Jiliang University. [蔡侠, 2014. 几种茶树害虫的趋光性研究. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量学院.]

Callahan PS, 1965. Intermediate and far infrared sensing of nocturnal insects. Part I. Evidences for a far infrared (FIR) electromagnetic theory of communication and sensing in moths and its relationship to the limiting biosphere of the corn earworm. *Annals of the Entomological Society of America*, 58(5): 727–745.

Cao CY, 1958. The effectiveness of black light fluorescent lamps in

trapping *Pectinophora gossypiella* and other cotton pests. *Entomological Knowledge*, 4(3): 128–131. [曹赤阳, 1958. 黑光萤光灯诱集棉红铃虫及其他棉虫的效果. 昆虫知识, 4(3): 128–131.]

Cao J, 1965. Moths fly towards the “black light”. *Popular Science*, 1965(5): 28. [草金, 1965. 飞蛾扑“黑光”. 科学大众, 1965(5): 28.]

Chen DM, Wang BQ, Wu ZN, 1987. The UV sensitive peak of the compound eyes of insects shifts with light intensity. *Chinese Science Bulletin*, 1987(6): 463–466. [陈德茂, 王必前, 吴载宁, 1987. 昆虫复眼紫外光敏感峰随光强度位移. 科学通报, 1987(6): 463–466.]

Chen DX, Wen LZ, Wang FL, 2017. The Application of Phototaxis of Insects and Insecticidal Lamp on Tobacco. Beijing: Science Press. 163–219. [陈德鑫, 文礼章, 王凤龙, 2017. 昆虫趋光性与杀虫灯在烟草中的应用. 北京: 科学出版社. 163–219.]

Chen NS, 1979. The essence, laws, and navigation principles of the phototactic behavior of noctuid moths. *Entomological Knowledge*, 16(5): 193–200. [陈宁生, 1979. 夜蛾趋光行为的本质、规律和导航原理. 昆虫知识, 16(5): 193–200.]

Chen NS, Luo JY, 1979. Comprehensive Pest Control in China. Beijing: Science Press. 103–122. [陈宁生, 罗敬业, 1979. 中国主要害虫综合防治. 北京: 科学出版社. 103–122.]

Chen YG, Qin JD, 1963. An electrophysiological study on the dark adaptation of the compound eye of the armyworm moth, *Leucania separata* Walker (Noctuidae: Lepidoptera). *Acta Entomologica Sinica*, 6(1): 1–9. [陈元光, 钦俊德, 1963. 粘虫 *Leucania separata* Walker 成虫复眼暗适应的电生理研究. 昆虫学报, 6(1): 1–9.]

Chen Z, Fu W, Zhang CF, Li HM, Zhang JJ, Lou DJ, Guo KF, 2024. Behavioral responses of *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) to different monochromatic lights and light intensities. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(3): 805–810.

Coombe PE, 1981. Wavelength specific behaviour of the whitefly *Trialewodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of Comparative Physiology*, 144(1): 83–90.

Cui XD, Xia LY, Yang L, Zheng B, He SY, Wang BJ, Zhu HD, 1968. New method for preventing and controlling forest pests: Black light lamp. *Forest Science and Technology*, 1968(12): 10–12. [崔向东, 夏礼煜, 杨力, 郑波, 何淑燕, 王秉钧, 朱洪德, 1968. 防治林木害虫新方法——黑光灯. 林业实用技术, 1968(12): 10–12.]

Ding YQ, 1978. Studies on the phototactic behaviour of noctuid moths: Responses of *Heliothis assulta* to two monocharomatic lights and intensities of light. *Acta Entomologica Sinica*, 21(1): 1–6. [丁岩钦, 1978. 夜蛾趋光特性的研究: 烟青虫成虫对双色光与光强度的反应. 昆虫学报, 21(1): 1–6.]

Ding YQ, Gao WZ, Li DM, 1974. Study on the phototactic behaviour of nocturnal moths: The response of *Heliothis armigera* (Hübner) and *Heliothis assulta* Guenee to different monochromatic light. *Acta Entomologica Sinica*, 17(3): 307–317. [丁岩钦, 高慰曾, 李典谟, 1974. 夜蛾趋光特性的研究:棉铃虫和烟青虫成虫对单色光的反应. 昆虫学报, 17(3): 307–317.]

Gao Y, Liu YC, Shi SS, Xu W, Hou XJ, 2017. Progress in research and application of phototaxis and chromatics tropism of Thysanoptera pests. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 33(6): 1427–1434. [高宇, 刘延超, 史树森, 徐伟, 侯向洁, 2017. 缨翅目害虫趋光性及趋色性研究应用进展. 江苏农业学报, 33(6): 1427–1434.]

Gu GH, Chen XB, Han J, Ge H, Chen HX, 2004. Study on phototaxis action of moth of cotton bollworm. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 11(3): 32–36. [顾国华, 陈小波, 韩娟, 葛红, 陈惠祥, 2004. 棉铃虫成虫趋光行为研究. 天津农学院学报, 11(3): 32–36.]

Gui CM, Wang SM, Wang PA, 1964. Preliminary report on the population of farmland pests trapped and killed by black light lamp. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 1964(3): 61. [桂承明, 王世民, 王品安, 1964. 黑光灯诱杀农田害虫种群数量初报. 吉林农业科学, 1964(3): 61.]

Hardie J, 1989. Spectral specificity for targeted flight in the black bean aphid, *Aphis fabae*. *Journal of Insect Physiology*, 35(8): 619–626.

He C, Fang BH, Zhang YZ, Qing XG, 2013. Comparison of pest-controlling effect in rice fields between fan-inhaling lamps and frequency trembler grid lamps. *Hybrid Rice*, 28(3): 58–63. [何超, 方宝华, 张玉烛, 青先国, 2013. 扇吸式诱虫灯与频振式杀虫灯对稻田防虫效果比较.杂交水稻, 28(3): 58–63.]

Henan Jiaduo Science industry and trade Co., Ltd., 1993. Development and application effect of Jiaduo frequency trembler grid lamps. *China Cotton*, 20(6): 41–42. [河南汤阴佳多科工贸公司物理治虫研究所, 1993. 佳多频振式杀虫灯的研制及应用效果. 中国棉花, 20(6): 41–42.]

Hu SB, Lin YP, 1982. Electrophysiological study on the light frequency selectivity of *Tryporyza incertulas* (Walker) moths. *Genomics and Applied Biology*, 1(1): 102–109. [胡少波, 林耀平, 1982. 三化螟蛾光频选择性的电生理研究. 广西科学院学报, 1(1): 102–109.]

Huang QY, 2021. Research and application of wind-suction trap special insect trapping lamp series products. Hubei Province. Huazhong Agricultural University, 2021-03-26. [黄求应. 风吸陷阱式专用诱虫灯系列产品的研发及应用. 湖北省, 华中农业大学. 2021-03-26.]

Huang ZJ, He L, Sang W, Wang LJ, Huang QY, Lei CL, 2021. Potential role of lysine succinylation in the response of moths to artificial light at night stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220: 112334.

Li KL, Shu L, Huang K, Sun YH, Yang F, Zhang Y, Huo ZQ, Wang

YF, Wang XY, Lu QL, Zhang YC, 2019. Research and prospect of solar insecticidal lamps Internet of Things. *Smart Agriculture*, 1(3): 13–28. [李凯亮, 舒磊, 黄凯, 孙元昊, 杨帆, 张宇, 霍志强, 王彦飞, 王心怡, 卢巧玲, 张亚成, 2019. 太阳能杀虫灯物联网研究现状与展望.智慧农业, 1(3): 13–28.]

Jander R, 1963. Insect orientation. *Annual Review of Entomology*, 8: 95–114.

Jiang XF, Zhang ZZ, Luo LZ, 2010. Phototaxis of the beet webworm *Loxostege sticticalis* to different wavelengths and light intensity. *Plant Protection*, 36(6): 69–73. [江幸福, 张总泽, 罗礼智, 2010. 草地螟成虫对不同光波和光强的趋光性. 植物保护, 36(6): 69–73.]

Jiang YL, 2014. Sensitivity and behavioral response mechanism of *Anomala corpulenta* Motschulsky to light signal. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [蒋月丽, 2014. 铜绿丽金龟对光信号的感受和行为响应机制研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Jiang YL, Gao XG, Lu RJ, Zhou GT, Li T, Gong ZJ, Mei SQ, Lu CT, Wu YQ, 2023. Control effect of yellow light on moth pests and its effect onnon target insects and natural enemies in pakchoi field. *Journal of Environmental Entomology*, 45(1): 246–252. [蒋月丽, 高新国, 鲁瑞杰, 周国涛, 李彤, 巩中军, 梅诗琼, 鲁传涛, 武予清, 2023. 黄光灯对小白菜田蛾类害虫的防控效果及对非靶标昆虫和天敌的影响. 环境昆虫学报, 45(1): 246–252.]

Jiang YL, Guo P, Li T, Hao CQ, Miao J, Gong ZJ, Duan Y, Liu QH, Wu YQ, 2020a. Interference effect study on reproductive behavior and adult longevity of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) on different yellow light intensity. *Journal of Environmental Entomology*, 42(5): 1230–1234. [蒋月丽, 郭培, 李彤, 郝超群, 苗进, 巩中军, 段云, 刘启航, 武予清, 2020a. 黄光光照强度对甜菜夜蛾成虫生殖行为和寿命的干扰效果. 环境昆虫学报, 42(5): 1230–1234.]

Jiang YL, Guo P, Li T, Li GP, Wang XQ, Wu YQ, 2020b. Effects of yellow and green light on the reproduction and adult longevity of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*(Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Protection*, 47(4): 902–903. [蒋月丽, 郭培, 李彤, 李国平, 王雪琴, 武予清, 2020b. 黄光和绿光照射对草地贪夜蛾成虫生殖和寿命的影响. 植物保护学报, 47(4): 902–903.]

Jiang YL, Huang QY, Wei GS, Gong ZJ, Li T, Miao J, Lu RJ, Mei SQ, Wang XQ, Duan Y, Wu YQ, Lu CT, 2023. Effects of yellow and green light stress on emergence, feeding and mating of *Anomala corpulenta* Motschulsky and *Holotrichia parallela* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeidae). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(1): 81–87.

Jiang YL, Li T, Cao Q, Wang ZS, Gong ZJ, Miao J, Li HH, Wu YQ, Lu CT, 2025. Effect of yellow light irradiation on the oviposition and longevity of *Spodoptera litura* Fabricius adult. *Journal of Environmental Entomology*, 47(3): 948–954. [蒋月丽, 李彤, 曹琼, 王振声, 巩中军, 苗进, 李好海, 武予清, 鲁传涛, 2025. 黄光照射对斜纹夜蛾成虫产卵和寿命的影响. 环境昆虫学报, 47(3): 948–954.]

Jiang YL, Li T, Gong ZJ, Duan Y, Miao J, Wu YQ, 2016. Phototaxis of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) adults to linearly polarized light. *Acta Entomologica Sinica*, 59(7): 797–800. [蒋月丽, 李彤, 巩中军, 段云, 苗进, 武予清, 2016. 麦红吸浆虫成虫对线偏振光的趋性. 昆虫学报, 59(7): 797–800.]

Jiang YL, Zhou GT, Zhang H, Lu CG, Wang ZS, Qiao L, Wu YQ, 2024. Evaluation of the control effect of yellow light on major moth pests in tea gardens. *China Plant Protection*, 44(3): 63–68. [蒋月丽, 周国涛, 张桦, 卢春光, 王振声, 乔利, 武予清, 2024. 防蛾灯对茶园主要蛾类害虫的防控效果评估. 中国植保导刊, 44(3): 63–68.]

Jing XF, Luo F, Zhu F, Huang QY, Lei CL, 2005. Effects of different light source and dark-adapted time on phototactic behavior of cotton bollworms (*Helicoverpa armigera*). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(3): 586–588. [靖湘峰, 罗峰, 朱芬, 黄求应, 雷朝亮, 2005. 不同光源和暗适应时间对棉铃虫蛾趋光行为的影响. 应用生态学报, 16(3): 586–588.]

Kim KN, Song HS, Li CS, Huang QY, Lei CL, 2018a. Effect of several factors on the phototactic response of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 21(3): 952–957.

Kim KN, Yun CN, Sin UC, Huang ZJ, Huang QY, Lei CL, 2018b. Green light and light stress in moth: Influence on antioxidant enzymes in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35): 35176–35183.

Lei CL, 2019. Insecticidal lamps industry should be innovated and developed. *Hubei Plant Protection*, 2019(6):1–3. [雷朝亮, 2019. 杀虫灯行业应该创新发展. 湖北植保, 2019(6): 1–3.]

Li WJ, Quan LF, Dong YZ, Yao Q, Xu S, Chen BX, 2021. Effects of white LED light on reproduction of *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae) and its field application. *Journal of Fruit Science*, 38(8): 1349–1358. [李文景, 全林发, 董易之, 姚琼, 徐淑, 陈炳旭, 2021. LED 白光对荔枝蒂蛀虫繁殖的影响及其田间防控效果研究. 果树学报, 38(8): 1349–1358.]

Liu LC, 1993. Development and application of the new light source dual-wave lamp. *Plant Protection*, 19(6): 37–38. [刘立春, 1993. 新光源双波灯的研制与应用. 植物保护, 19(6): 37–38.]

Liu LC, 1994. Research progress and application overview of insect trapping lights. *Journal of Biosafety*, 3(1): 75–78. [刘立春, 1994. 诱虫灯的研究进展及应用概况. 华东昆虫学报, 3(1): 75–78.]

Liu YM, Li CY, Chen DM, 1966. Electroretinogram of the superposition compound eye retina of insects. *Chinese Science*

Bulletin, 11(8): 361–363. [刘育民, 李朝义, 陈德茂, 1966. 昆虫重迭象复眼的视网膜电图. 科学通报, 11(8): 361–363.]

Ma G, Ma CS, 2012. Differences in the nocturnal flight activity of insect pests and beneficial predatory insects recorded by light traps: Possible use of a beneficial-friendly trapping strategy for controlling insect pests. *European Journal of Entomology*, 109(3): 395–401.

Ma ZS, 1965. Observation on the trapping effect of black light lamps on natural enemy insects. *Plant Protection*, 1965(2): 66. [马仲实, 1965. 黑光灯对天敌昆虫诱集作用的观察. 植物保护, 1965(2): 66.]

Menzel R, Blakers M, 1976. Colour receptors in the bee eye: Morphology and spectral sensitivity. *Journal of Comparative Physiology*, 108(1): 11–13.

Mi N, Zhang QK, Wang HH, Wu SY, Lei ZR, 2019. The phototaxis behavior of *Thrips tabaci* and trapping effect of different wavelength sticky cards in the field. *Scientia Agricultura Sinica*, 52(10): 1721–1732. [米娜, 张起恺, 王海鸿, 吴圣勇, 雷仲仁, 2019. 烟蓟马趋光规律及不同波长色板田间诱捕效果. 中国农业科学, 52(10): 1721–1732.]

Ning HH, Wang CZ, Hao WY, Jin HF, Li F, Wu SY, 2024. Structure of Asian bean thrips *Megalurothrips usitatus* compound eye, phototaxis behavior and expression regularity of opsin gene. *Journal of Plant Protection*, 51(6): 1403–1412. [宁恒亨, 王朝政, 蒿文勇, 金海峰, 李芬, 吴少英, 2024. 普通大蓟马复眼结构、趋光行为及视蛋白基因表达规律. 植物保护学报, 51(6): 1403–1412.]

Qiao L, Zhang MM, Gong ZJ, Geng SB, Hong F, Yin J, Wu YQ, 2022. Effects of yellow LED light of different intensity on the development and reproduction of *Ectropis grisescens* Warren. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(4): 785–793. [乔利, 张苗苗, 巩中军, 耿书宝, 洪枫, 尹健, 武予清, 2022. 不同光强 LED 黄光对灰茶尺蠖发育和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 59(4): 785–793.]

Quan LF, Li WJ, Wang FY, Chi YY, Dong YZ, Chen BX, 2021. The photo behavioral and reproductive responses of *Conopomorpha sinensis* adults to LED light. *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1581–1588. [全林发, 李文景, 王凤英, 池艳艳, 董易之, 陈炳旭, 2021. 荔枝蒂蛀虫成虫对 LED 光的趋性及其繁殖响应特征. 环境昆虫学报, 43(6): 1581–1588.]

Research Project Group on the Development Strategy of Insect Sterilization Technology in China, 2016. Development Strategy of Physical Trapping and Killing Technology for Agricultural Pests// Development Strategy of Eco-friendly Prevention and Control of Agricultural Pests in China. Beijing: Science Press. 91–103. [我国昆虫不育技术发展战略研究项目组, 2016. 农业害虫物理诱杀技术发展战略//中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社. 91–103.]

Robinson HS, 1952. On the behaviour of night-flying insects in the neighbourhood of a bright source of light. *Proceedings of The Royal Entomological Society of London Series A, General Entomology*, 27(1/3): 13–21.

Sang W, Cai FY, Wang XP, Zhang S, Huang QY, Zhu F, Guo SH, Lei CL, 2018. Application status and prospects of insect trapping lamp in fields. *China Plant Protection*, 38(10): 26–30, 68 [桑文, 蔡夫业, 王小平, 张舒, 黄求应, 朱芬, 郭墅濠, 雷朝亮, 2018. 农用诱虫灯田间应用现状与展望. 中国植保导刊, 38(10): 26–30, 68.]

Sang W, Zhu ZH, Lei CL, 2016. Review of phototaxis in insects and an introduction to the light stress hypothesis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 913–918. [桑文, 朱智慧, 雷朝亮, 2016. 昆虫趋光行为的光胁迫假说. 应用昆虫学报, 53(5): 913–918.]

Tang JM, Zhao SY, Yu ZW, 1995. Discussion on the large area application of Jiaduo frequency trembler grid lamps to kill cotton bollworm and other pests. *China Cotton*, 22(3): 40. [唐济民, 赵树英, 于志文, 1995. 佳多频振式杀虫灯诱杀棉铃虫等害虫大面积应用探讨. 中国棉花, 22(3): 40.]

Verheijen FJ, 1960. The mechanisms of the trapping effect of artificial light sources upon animals. *Archives Néerlandaises de Zoologie*, 13(1): 1–107.

Wang FF, Wang MH, Zhang MK, Qin P, Cuthbertson AGS, Lei CL, Qiu BL, Yu L, Sang W, 2023. Blue light stimulates light stress and phototactic behavior when received in the brain of *Diaphorina citri*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 251: 114519.

Wang K, Gao Q, Li LL, Liu W, Lei CL, Wang XP, 2020. Current development status of agricultural insect-pest light trap in China. *Huazhong Entomological Research*, 16: 116–125. [王蔻, 高俏, 李玲玲, 刘文, 雷朝亮, 王小平, 2020. 我国农用杀虫灯生产现状分析. 华中昆虫研究, 16: 116–125.]

Wei GS, Zhang QW, Zhou MZ, 2001. Assessment of the control effects and effective radii of four kinds of traps for cotton fields. *Journal of Plant Protection*, 28(2): 157–162. [魏国树, 张青文, 周明牂, 2001. 四种诱集源对棉铃虫成虫的诱杀效果及有效半径比较. 植物保护学报, 28(2): 157–162.]

Wei GS, Zhang QW, Zhou MZ, Wu WG, 2000. Studies on the phototaxis of *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Biophysica Sinica*, 16(1): 89–95. [魏国树, 张青文, 周明牂, 吴卫国, 2000. 不同光波及光强度下棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)成虫的行为反应. 生物物理学报, 16(1): 89–95.]

Wen G, 2007. Warmly celebrate that the project “research, development and application of Jiaduo agricultural pest monitoring system and light trapping and control technology” has won the national science and technology progress award. *Plant Protection*, 33(2): 69. [闻贵, 2007. 热烈庆祝“佳多农业害虫监测系统及灯光诱控技术研发与应用”项目荣获国家科学技术

进步奖. 植物保护, 33(2): 69.]

Wu YQ, Duan Y, Jiang YL, 2009. Reviews on lighting for insect-pests control. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 38(9): 127–130. [武予清, 段云, 蒋月丽, 2009. 害虫的灯光防治研究与应用进展. 河南农业科学, 38(9): 127–130.]

Xu LF, 1964. Introduction to black light lamps. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 1964(4): 14–15. [徐立凡, 1964. 黑光灯介绍. 宁夏农业科学通讯, 1964(4): 14–15.]

Xu MX, 1959. Occurrence regularity and forecasting of the cotton bollworm. *China Cotton*, 1959(6): 17–20. [许明霞, 1959. 棉铃虫发生规律及预测预报. 棉花, 1959(6): 17–20.]

Yang GH, Li JP, Li MH, 1998. Investigation on the effect of large-scale application of insect-trapping lamps for controlling corn borer. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 23(1): 70–72. [杨桂华, 李建平, 李茂海, 1998. 大面积应用诱虫灯防治玉米螟效果的调查. 吉林农业科学, 23(1): 70–72.]

Yang HB, Hu G, Zhang G, Chen X, Zhu ZR, Liu S, Liang ZL, Zhang XX, Cheng XN, Zhai BP, 2014. Effect of light colours and weather conditions on captures of *Sogatella furcifera* (Horváth) and *Nilaparvata lugens* (Stål). *Journal of Applied Entomology*, 138(10): 743–753.

Yang PY, Liang JM, Li P, Wang Q, 2014. Integration and application of green prevention and control technologies for crop diseases and pests. *China Plant Protection*, 34(12): 65–68, 59. [杨普云, 梁俊敏, 李萍, 王强, 2014. 农作物病虫害绿色防控技术集成与应用. 中国植保导刊, 34(12): 65–68, 59.]

Yang PY, Wang K, Li JM, Li WX, Yin JM, 2018. Promoting green agricultural development through eliminating pesticide overuses in crop pest management. *Plant Protection*, 44(5): 95–100. [杨普云, 王凯, 厉建萌, 李文星, 尹俊梅, 2018. 以农药减量控害助力农业绿色发展. 植物保护, 44(5): 95–100.]

Yang PY, Xiong YK, Yin Z, Shan XN, 2010. Progress and prospect of demonstration work on sustainable control technologies. *China Plant Protection*, 30(4): 37–38. [杨普云, 熊延坤, 尹哲, 单绪南, 2010. 绿色防控技术示范工作进展与展望. 中国植保导刊, 30(4): 37–38.]

Yang PY, Zhao ZH, 2012. Guide to Sustainable Control Technologies for Crop Diseases and Pests. Beijing: China Agriculture Press. 1–210. [杨普云, 赵中华, 2012. 农作物病虫害绿色防控技术指南. 北京: 中国农业出版社. 1–210.]

Yang XY, 2015. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Athetis lepigone*. Master dissertation. Baoding: Agricultural University of Hebei. [杨心月, 2015. 二点委夜蛾成虫复眼显微结构及其趋光行为研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]

Zhang CY, Wang XP, Lei CL, 2015. Research progress and development trend of light trapping technology in China. Pest and disease sustainable control and agricultural product quality safety——proceedings of the 2015 academic annual meeting of the Chinese society of plant protection. Changchun: 293–298. [张长禹, 王小平, 雷朝亮, 2015. 灯光诱杀技术在我国的研究进展与发展趋势. 病虫害绿色防控与农产品质量安全——中国植物保护学会 2015 年学术年会论文集. 长春: 293–298.]

Zhang R, Wang YS, Yang GH, Li JP, Yue DR, Zhai J, Ma WJ, 1991. Survey report on the effect of large-scale application of insect-trapping lamps for controlling corn borer. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 16(3): 30–32. [张荣, 王蕴生, 杨桂华, 李建平, 岳德荣, 翟军, 马维军, 1991. 大面积应用诱虫灯防治玉米螟效果调查报告. 吉林农业科学, 16(3): 30–32.]

Zhang S, Huang JX, Lyu L, Chang XQ, Yang XL, Wang ZQ, Wang JG, 2021. Trapping effect of two different principles insect-pest lights trapon target pests and non-target insects in rice field. *Hubei Agricultural Sciences*, 60(22): 76–78, 91. [张舒, 黄家祥, 吕亮, 常向前, 杨小林, 王佐乾, 王家刚, 2021. 两种不同杀虫原理诱虫灯对稻田靶标害虫和非靶标昆虫的诱杀效果. 湖北农业科学, 60(22): 76–78, 91.]

Zhang YJ, 2016. Application of Frequency Trembler Grid Lamps// Development Strategy of Eco-friendly Prevention and Control of Agricultural Pests in China. Beijing: Science Press. 252–261. [张跃进, 2016. 频振式杀虫灯的应用//我国昆虫不育技术发展战略研究项目组. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社. 252–261.]

Zhang YN, Liu YX, Li MY, Yao MY, Wei GS, 2023. Effects of light source, sex and light processing time on phototaxis of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Plant Protection*, 50(4): 1010–1015. [张亚南, 刘雨欣, 李梦瑶, 姚梦语, 魏国树, 2023. 光源、性别及光处理时间对草地贪夜蛾趋光行为的影响. 植物保护学报, 50(4): 1010–1015.]

Zhao JQ, 2012. Development and application of light trapping technology for pest control. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2012(1): 67–68. [赵季秋, 2012. 灯光诱杀害虫技术的发展与应用. 辽宁农业科学, 2012(1): 67–68.]

Zhao SY, 2002. Development and application of Jiaduo frequency trembler grid lamps. *Forest Pest and Disease*, 21(S1): 6–8. [赵树英, 2002. 佳多频振式杀虫灯的开发与应用. 中国森林病虫, 21(S1): 6–8.]