昆虫检测识别技术研究进展 ——形态鉴定、分子检测与多模态智能识别*

张 柳[1**] 葛 阳[2] 陈 克[1] 李红卫[1] 于艳雪[1***]

（1. 中国质量检验检测科学研究院植物安全与质量研究所，北京 100176；
2. 中国中医科学院中药资源中心，道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室，北京 100700）

摘 要 精准的物种鉴定是害虫监测防治及生物资源开发利用的基础，对害虫的早期预警和精准防控尤为关键。本文系统综述了目前昆虫检测识别技术的研究进展，从经典形态鉴定、分子生物学检测，到基于图像、气味与声学检测等多模态信息智能识别的范式演进。传统形态鉴定构成整个技术链的基石，为后续基因、图像、化学和声音信号的特异性采集提供分类学基准，精准、便携、快速的检测鉴定方法逐渐成为现今的研发重点。在实际应用中，单一模态检测技术的固有局限性难以满足高效防控需求，催生多技术融合路径。未来研究应聚焦多模态标准化数据库建设、便携式现场装备研发及融合算法的可解释性提升，以期构建高效、精准、可部署的智能识别系统，为延缓重大害虫传播扩散与精准防控提供技术支撑。

关键词 昆虫；图像识别；分子检测；仿生嗅觉检测技术；声学检测技术；人工智能

Advances in insect detection and identification technologies —morphological identification, molecular detection, and multimodal intelligent recognition

ZHANG Liu[1**] GE Yang[2] CHEN Ke[1] LI Hong-Wei[1] YU Yan-Xue[1***]

(1. Institute of Plant Safety and Quality, Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing, Beijing 100176, China;
2. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

Abstract Accurate species identification serves as the foundation for pest monitoring and management, as well as for the development and utilization of biological resources. It is particularly critical for the early warning and precise control of insect pests. This review systematically summarizes current progress in research on insect detection and identification technology, from classical morphological identification and molecular biological detection, to the paradigm evolution of multimodal intelligent recognition based on image, odor and acoustic information. Traditional morphological identification constitutes the cornerstone of the entire technical chain, providing a taxonomic benchmark for the specific collection of subsequent genetic, image, chemical and acoustic signals. Accurate, portable, and rapid, detection and identification methods have become a key focus of research and development. In practical applications, the inherent limitations of single-modal detection techniques make it difficult to meet the demands of efficient prevention and control, thus giving rise to the path of multi-technology integration. Future research should focus on establishing multimodal standardized databases, developing portable field equipment, and improving the interpretability of fusion algorithms. These advances are expected to produce efficient, accurate, and deployable, intelligent identification systems, thereby providing essential technical support for curbing the spread of major pests and improving the precision of management strategies.

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金青年项目（32501386）；国家重点研发计划项目（2025YFC2609100）；北京市科学技术协会青年人才托举工程项目资助

**第一作者和通讯作者 First author and corresponding author，E-mail：zhangliucau@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yuyx@caiq.org.cn

收稿日期 Received：2026-06-22；接受日期 Accepted：2026-08-05

Key words　insects; image recognition; molecular identification; biomimetic olfactory detection technology; acoustic detection technology; artificial intelligence

昆虫作为地球上多样性最丰富的动物类群，与农业生产、生态系统、人类健康密切相关。害虫作为农业、林业及公共卫生领域的主要生物灾害之一，其暴发往往具有突发性、隐蔽性和毁灭性。一旦害虫种群密度达到经济阈值，传统的化学防治手段不仅难以在短期内遏制其传播扩散，还易引发“3R”问题（残留、抗性、再猖獗），造成生态环境破坏与经济损失（Diagne *et al.*，2021；Roy *et al.*，2023）。因此，亟须研发精准、低成本、高效的害虫检测鉴定技术，构建“早发现、早预警、准识别”的检测监测体系，助力害虫可持续治理。

传统的人工踏查与形态鉴定方法已难以满足当前海关检疫、农林作物保护对害虫种类鉴定的时效性和准确性需求（钟勇等，2019；Li *et al.*，2024）。近年来，随着分子生物学、计算机视觉、人工智能和微电子机械系统技术的飞速发展，昆虫检测识别技术正从依赖专家经验的单一形态判别，向智能化、痕量化和多维协同的方向演进。

本文综述了目前害虫精准检测识别技术的研究和应用现状，系统梳理了包括形态鉴定、分子生物学检测、图像识别、声音与嗅觉识别在内的核心技术路径，探讨了各类技术的原理、适用场景及优缺点。在此基础上，提出了快筛精查、表里互证的多模态数据融合技术作为突破单一技术瓶颈关键手段，旨在为延缓重大害虫的传播扩散与实施区域性精准防控提供理论依据与技术支撑。

1　基于昆虫形态学的检测鉴定技术

传统的形态学鉴定方法主要依靠对昆虫外部形态特征的观察或解剖分析。该方法简单直观，但是通常依赖于成虫（一般为某一性别个体）的外部形态特征，且高度依赖鉴定人员的经验水平。该方法严重受限于获得昆虫样本虫态和完整性等，如实蝇类害虫成虫形态特征易于相互区分，但是口岸检疫截获样本以缺乏可靠的形态鉴定特征的幼虫为主，需要花费大量时间和精力饲养到成虫鉴定(钟勇等，2019)；再如野外诱捕到的蛾类昆虫样本多为混杂种类，且多数样本肢体残缺不全，直接影响目标昆虫形态特征的完整性，即使是经验丰富的专业人员也难以准确识别（王雅娜等，2024）。因此，传统形态学检测鉴定技术在实际应用中具有较大的局限性，在现场检测中尤为明显。

2　基于分子生物学的检测鉴定技术

相较于形态鉴定，基于分子生物学的检测鉴定技术克服了对昆虫样本虫态的限制和对专家经验的依赖，且需要少量的样本即可进行分析，不仅能够快速准确地鉴定非成虫样本和残缺样本，还可以辅助判断新种/隐种。在种级分子生物学检测鉴定中，通常选用长度适中、保守程度高、富含信息位点且核苷酸变异速率较快的序列作为物种特异性靶基因，常用的靶标基因包括核糖体内源转录间隔区 1（Internal transcribed spacer 1，ITS1）和内源转录间隔区 2（ITS2），以及线粒体 DNA 细胞色素 C 氧化酶亚基Ⅰ（Cytochrome C oxidase subunit I，COⅠ）、亚基Ⅱ（COⅡ）和亚基Ⅲ（COⅢ）等（姚若楠等，2025）。传统的分子鉴定技术主要以聚合酶链式反应（Polymerase chain reaction，PCR）为核心，如常规 PCR、实时荧光定量 PCR（Real-time fluorescent quantitative PCR，qPCR）、数字 PCR（Droplet digital PCR，ddPCR）、物种特异性 PCR（Sequence-specific PCR，SS-PCR）检测技术和 DNA 条形码等，这些技术已经被广泛应用于昆虫分类鉴定。DNA 条形码技术通过分析标准化 DNA 短片段的序列变异来实现物种鉴定，COⅠ基因片段是目前广泛接受的昆虫标准 DNA 条形码，其优点在于通用引物适用性广，序列信息唯一（Hebert *et al.*，2003；何叶艳等，2025；孙星

星等，2025；肖萌等，2025）。李佳瑾等（2026）通过测序获得纹蓟马科 4 属 12 种的 CO Ⅰ序列和 28S rRNA 序列各 37 条，研究结果显示 CO Ⅰ基因和 28S 联合序列可作为纹蓟马科昆虫鉴定的有效 DNA 条形码。qPCR 检测是在 PCR 体系中加入荧光标记物，扩增过程中实时监测荧光信号，能实现精确定量，灵敏度通常比常规 PCR 高。张桂芬等（2013）基于 SS-PCR 技术，针对番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 的 CO Ⅰ基因设计了一对特异性引物，能够实现对单粒卵、单根触等微量样品或组织残体中 DNA 的扩增与检测。然而这些鉴定方法普遍需要极大且价格昂贵的精密仪器，对操作环境要求严格，结果判定也需要借助成像系统或序列比对实现，动辄耗时数小时甚至更长时间，难以满足海关口岸或田间地头现场快速检测的需求。因此一系列新型分子生物学鉴定技术应运而生。

等温扩增技术在恒温条件下实现了核酸的高效扩增，有效避免了复杂热循环仪器的限制，具有用时短、反应快且操作简便的特点，如重组酶聚合酶扩增（Recombinase polymerase amplification，RPA）、重组酶介导等温核酸扩增（Recombinase aided amplification，RAA）、多酶恒温快速扩增（Multienzyme isothermal rapid amplification，MIRA）、环介导等温扩增（Loop-mediated isothermal amplification，LAMP）等均用于昆虫分子鉴定。等温扩增产物检测结果的判定，除了传统的琼脂糖凝胶电泳检测、实时荧光定量检测外，通过结合 CRISPR/Cas12a（Clustered regularly interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated protein 12a）检测、侧向层析试纸条（Lateral flow dipstick/strip，LFD/LFS）、加入染料等实现现场快速可视化检测，同时提升检测灵敏度。不同的分子检测技术可以集成或相互结合使用，交叉分析来提高疑似阳性样品检测结果的可靠性，最大程度确保结果的有效性。

2.1 RPA 检测技术

RPA 主要是利用 T4 噬菌体的重组酶 uvsX、单链 DNA 结合蛋白 gp32 和链置换 DNA 聚合酶，实现等温条件下目标片段的指数扩增，具有反应温度低（37-42 ℃），引物设计简单，且冻干试剂可实现商业化应用的优点（Piepenburg *et al.*，2006）。TwistAmp®检测试剂盒（TwistDx Inc，英国）是目前应用最广泛的商业化产品，配合探针检测系统，37 ℃等温条件下反应 15 min 即可实现单分子水平核酸检出，结合侧向层析试纸条（LFD/LFS）或荧光信号判读，实现可视化的快速检测（Zetsche *et al.*，2015）。如 RPA 探针检测系统结合 SYBR green 染料，在 39 ℃条件下可实现对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的可视化快速检测，灵敏度达 100 fg/μL（Channappa *et al.*，2025）。又如 RPA 结合 LFD 试纸条检测，对苹果小吉丁虫 *Agrilus mali* 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 分别在 38 和 39 ℃条件下扩增，即可实现两种害虫的可视化快速检测（Li *et al.*，2023；Rich *et al.*，2023）。

CRISPR-Cas 基因编辑技术能够识别并切割外来 DNA。近年来，RPA-CRISPR/Cas 检测技术迅速发展，显著提升了检测灵敏度（Shashank *et al.*，2024）。以 RPA-CRISPR/Cas12a 法检测木瓜秀粉蚧 *Paracoccus marginatus* 为例，采用 FQ reporter 在 UV 光下观察和 LFD 试纸条两种可视化方式，从其他 10 种近似种中准确鉴定出木瓜秀粉蚧，RPA-CRISPR/Cas12a 荧光显色法用时 60 min，RPA-CRISPR/Cas12a-LFD 法用时 40 min，同时结合 5 min 内 DNA 快提技术，将整个检测过程用时控制在 45-65 min（Chen *et al.*，2025）。Shashank 等（2024）开发了一种基于 RPA-CRISPR-Cas12a 的多靶标一管法检测体系，可同时针对番茄潜叶蛾、番茄茎麦蛾 *Keiferia lycopersicella* 和藜沟须麦蛾 *Scrobipalpa atriplicella* 进行快速鉴定。该方法在同一反应管内即可完成 CO Ⅰ基因靶片段扩增与 Cas12a 介导的切割，总检测时长缩短至 1 h 内，一管法 DNA 检出下限达 10^{-7} ng/μL，显著优于 RT-PCR 检测法（≥0.01 ng/μL）和 ddPCR 检测法（0.001 ng/μL）(Zink *et al.*，2020，2022)，可满

足番茄潜叶蛾的现场快速检测鉴定需求。但 RPA 检测中易形成气溶胶污染，可能造成偶发性假阳性结果，且单个样品的检测费用偏高（姚若楠等，2025）。

2.2　RAA 和 MIRA 检测技术

RAA 和 MIRA 检测技术与 RPA 技术类似，都是利用来源细菌重组酶实现扩增。RAA 技术是利用细菌/真菌来源的重组酶，具有更好的稳定性和适应性，MIRA 则是更进一步的升级，多酶协同反应速度更快（赵松等，2018；Heng *et al.*，2023）。RAA 和 MIRA 可结合 LFD/LFS 实现可视化检测。Cao 等（2024）基于 CO Ⅰ基因开发了番茄潜叶蛾 RAA-LFS 田间可视化快速检测法，免除复杂 DNA 提取步骤，通过对样本简单研磨、常温裂解即可检测卵、幼虫、蛹和成虫。该方法可区分番茄潜叶蛾和 26 种近缘种，检测时间缩短至 25 min，灵敏度达 32.00 fg/μL，可满足口岸及基层人员的植检植保需求，但约 30.00 元/样本的成本较高，限制了其广泛推广。研究显示结合 DNA 快提技术（约 5 min），RPA-CRISPR/Cas12a 荧光检测系统和 MIRA-LFD 检测系统均为番石榴果实蝇的快速鉴定提供了有效的解决方案，灵敏度达 0.1 ng/μL，MIRA-LFD 检测成本相对较高，但是检测更便捷。MIRA-LFD 系统下 37 ℃、10 min 内实现目标物种的可视化快速精确鉴定，而 RPA-CRISPR/Cas12a 荧光检测系统 37 ℃，30 min 内完成鉴定（Li *et al.*，2024）。

2.3　LAMP 检测技术

LAMP 反应可在 60-65 ℃恒温条件下进行，利用 Bst DNA 聚合酶的自动链置换特性，通过 4-6 条引物实现目标基因核酸序列的高效扩增 (Becherer *et al.*，2020)。通过在 LAMP 反应体系中添加显色染料，依据反应液的颜色变化定性判定检测结果，常用染料有钙黄绿素（橙黄色变为草绿色）、甲酚红（红色变黄色）、SYBR green Ⅰ（橙色变黄绿色）、羟基萘酚蓝（Hydroxynaphthol blue，HNB）（紫罗兰变天蓝色）等，其中，SYBR green Ⅰ和 HNB 的反应灵敏度更高（贾晓曼等，2018）。

Wang 等（2021b）建立了斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* 的 LAMP 检测方法，以甲酚红为染料，利用 DNA 聚合反应时质子产生、pH 下降而使阳性样品的反应液从初始的红色变为黄色，裸眼即可快速判断结果，无需 UV 光下观察，该方法结合 DNA 快速粗提法可将总鉴定时间控制在 90 min 以内，灵敏度达到 1.0 ng/μL。瓜实蝇 *Bactrocera cucurbitae* LAMP 快速可视化分子检测方法利用 HNB 显色，灵敏度为 1.65 ng/μL，结合 DNA 快速粗提法可在 80 min 内完成现场检测（钟勇等，2019）。同样利用 HNB 显色，Rizzo 等（2021）建立了苹果异胫小卷蛾 *Thaumatotibia leucotreta* LAMP 快速可视化分子检测方法，特异性区分苹果异胫小卷蛾和 25 种对照昆虫，检测灵敏度为 0.128 pg/μL。

综上所述，目前已经在鳞翅目、鞘翅目、双翅目、同翅目等多类昆虫上实现分子现场快速检测，我们将这些新型可视化分子生物学昆虫检测鉴定技术总结于表 1。

3　多模态智能识别鉴定技术

随着计算机技术与人工智能的不断进步，一系列基于机器学习的多模态智能识别与鉴定技术迅速发展。特别是深度学习方法的高速演进，显著推动了害虫检测精度的提升。本部分从计算机视觉、仿生嗅觉、声音等多个维度对害虫智能识别鉴定技术的发展现状进行了总结。

3.1　基于人工智能的昆虫图像识别技术

害虫图像识别主要基于计算机视觉与深度学习技术，并常结合物联网实现系统化部署与远程监控。卷积神经网络法（Convolutional neural networks，CNN）作为深度学习的代表方法，其自学习机制有效提高了害虫检测精度（崔晓辰和雷一东，2024）。通过图像采集设备获取环境中的害虫图像，并借助算法自动完成害虫的种类识别、数量统计与定位分析，从而实现对虫害的自

表 1　新型可视化分子生物学检测鉴定技术在昆虫领域的应用

Table 1　Application of novel visual molecular biology detection and identification technology in the field of entomology

检测技术 Detection technique	靶标序列 Target sequence	靶标物种 Target species	灵敏度 Sensitivity	可视化方式 Visualization method	参考文献 Reference
RPA	核酸基因组信号肽基因 Genomics signal peptide gene	草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*	100.000 fg/μL	SYBR green Ⅰ 染料 SYBR green I dyes	Channappa *et al*., 2025
RPA-CRISPR/Cas12a	线粒体 CO Ⅰ 基因 Mitochondrial CO Ⅰ	番石榴果实蝇 *Bactrocera correcta*	0.100 ng/μL	FQ reporter，UV 光下观察 FQ reporter, UV light observation	Li *et al*., 2024
	核基因组 28S rDNA Nuclear genome 28S rDNA	木瓜秀粉蚧 *Paracoccus marginatus*	/	FQ reporter，UV 光下观察；LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 FQ reporter, UV light observation; interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	Chen *et al*., 2025
	线粒体 CO Ⅰ 基因 Mitochondrial CO Ⅰ	番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta*	120.000 fmol/L（两步法 Two-pot）；10^{-7} ng/μL（一管法 One-pot）	FQ reporter，UV 光下观察；LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 FQ reporter, UV light observation; interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	Shashank *et al*., 2024
	线粒体 CO Ⅰ 基因 Mitochondrial CO Ⅰ	美国白蛾 *Hyphantria cunea*	0.100 ng/μL	FQ reporter，UV 光下观察	王雅娜等, 2024
RPA-LFD	核基因组 ITS1 区 Nuclear ribosomal internal transcribed spacer 1, ITS1 region	棉铃虫 *Helicoverpa armigera*	10.000 pg	LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 FQ reporter, UV light observation; Interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	Rich *et al*., 2023
	核基因组 ITS1 区 Nuclear ITS1 region	苹果小吉丁虫 *Agrilus mali*	0.010 ng	LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 Interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	Li *et al*., 2023
RAA-LFS	线粒体 CO Ⅰ 基因 Mitochondrial CO Ⅰ	番茄潜叶蛾 *T. absoluta*	32.000 fg/μL	LFS 试纸条，C 线和 T 线判读 Interpretation of C-line and T-line signals on the LFS	Cao *et al*., 2024
MIRA-LFD	线粒体 COB 基因 Mitochondrial COB	杧果小条实蝇 *Ceratitis cosyra*	1.000 ng/μL	LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 Interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	李堃玥等, 2025

续表 1 (Table 1 continued)

检测技术 Detection techniques	靶标序列 Target sequence	靶标物种 Target species	灵敏度 Sensitivity	可视化方式 Visualization method	参考文献 Reference
MIRA-LFD	线粒体 CO Ⅰ基因 Mitochondrial CO Ⅰ	番石榴果实蝇 *B. correcta*	0.100 ng/μL	LFD 试纸条，C 线和 T 线判读 Interpretation of C-line and T-line signals on the LFD	Li *et al.*, 2024
LAMP	核酸基因组信号肽基因 Genomics signal peptide gene	草地贪夜蛾 *S. frugiperda*	100.000 fg/μL	HBN 染料 HBN dye	Channappa *et al.*, 2025
	线粒体基因组 CO Ⅱ/CO Ⅲ区域 Mitochondrial genome CO Ⅱ/CO Ⅲ region	灰翅夜蛾属昆虫 Genus S*podoptera*	甜菜夜蛾 *S. exigua*：1.000 ng；草地贪夜蛾 *S. frugiperda*：1.000 pg；斜纹夜蛾 *S. litura* 和棉灰翅夜蛾 *S. littoralis*：1.000 pg	显色染料(甲酚红)可见光观察、SYBR Green 荧光染色，UV 光下观察 Visible light observation of the chromogenic dye (Cresol red), and UV light observation of SYBR Green fluorescent staining	Nam *et al.*, 2021
	核基因组 ITS1-5.8S-ITS2 rDNA 区域 Nuclear ITS1-5.8S-ITS2 rDNA region	苹果异胫小卷蛾 *Thaumatotibia leucotreta*	0.128 pg/μL	HBN 染料 HBN dye	Rizzo *et al.*, 2021
	线粒体基因组特异性区域 Mitochondrial genome specific regions	黑尾叶蝉 *Nephotettix cincticeps*，二点黑尾叶蝉 *Nephotettix virescens*	1.000 ng	显色染料（甲酚红） Chromogenic dye (Cresol red)	Jeong *et al.*, 2025
	线粒体 CO Ⅰ基因 Mitochondrial CO Ⅰ	瓜实蝇 *Bactrocera cucurbitae*	1.650 ng/μL	HBN 染料 HBN dye	钟勇等，2019
	线粒体 CO Ⅰ基因 Mitochondrial CO Ⅰ	斑翅果蝇 *Drosophila suzukii*	1.000 ng/μL	显色染料（甲酚红） Chromogenic dye (Cresol red)	Wang *et al.*, 2021b
	线粒体 CO Ⅰ基因、核 CAD 基因 Mitochondrial CO Ⅰ, Nuclear CAD region	南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis*	CO Ⅰ：1 000 拷贝(copies)/μL； CAD 基因：100 拷贝(copies)/μL	显色染料（甲酚红） Chromogenic dye (Cresol red)	Zhu *et al.*, 2023

PRA：重组酶聚合酶扩增 Recombinase polymerase amplification；RPA-CRISPR/Cas12a：重组酶聚合酶扩增-成簇规律间隔短回文重复序列/CRISPR 相关蛋白 12a Recombinase polymerase amplification-Clustered regularly interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated protein 12a；PRA-LFD：重组酶聚合酶扩增-侧流层析试纸条 Recombinase polymerase amplification - Lateral flow dipstick；RAA-LFS；重组酶介导等温核酸扩增-侧流层析试纸条 Recombinase aided amplification- Lateral flow strip；MIRA-LFD：多酶恒温快速扩增-侧流层析试纸条 Multienzyme isothermal rapid amplification- Lateral flow dipstick；LAMP：环介导等温扩增 Loop-mediated isothermal amplification. CO Ⅰ为线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基Ⅰ基因(Cytochrome c oxidase subunit Ⅰ)的缩写，部分文献中亦写作 cox1 或 COX1，本表统一使用 CO Ⅰ。CO Ⅰ denotes the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene; it is also written as cox1 or COX1 in some literature. CO Ⅰ is used uniformly in this table.

动化、精准化与实时化监测（冯健昭，2018）。除了直接识别昆虫照片外，还支持拍摄受虫害植株及典型为害状的照片，并将图像上传至分析平台，经模型自动处理后即可输出害虫种类、数量及分类信息，从而大幅提高田间检测与识别的效率（Singh *et al.*，2018）。例如，Mkonyi 等（2020）采用 3 种架构模型，对包含健康与受侵染番茄叶片的 2 145 张图像数据集进行训练，结合 CNN 模型可在番茄生长早期阶段即可检测出番茄潜叶蛾，识别准确率达 91.9%。相较于人工监测存在的耗时费力、主观误差大、实时性不足等局限，害虫图像识别技术能够快速捕捉虫害发生初期的细微迹象，为仓储环境（粮食、烟草、中药材等）以及农林业生产中的虫害防控提供可靠的数据支撑（LeCun *et al.*，2015；Zhu *et al.*，2022）。

在实际应用中，害虫图像识别已落地多款实用化监测系统，覆盖多类场景。烟草行业率先实现规模化应用，搭载图像识别的智能虫情监测装置可自动采集粘虫板图像，通过无线网络将数据传输至后台，精准识别烟草甲 *Lasioderma serricorne*、棉铃虫、烟青虫 *Helicoverpa assulta* 等害虫（刘迦南，2019；陈世雄，2026）；粮食仓储领域，基于粘虫板的害虫自动检测设备可部署于平房仓、浅圆仓，对米象 *Sitophilus oryzae*、赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 等储粮害虫实现全天候监测（兰安迪，2024）。这些落地实例均实现了自动诱捕-图像采集-无线传输-智能识别的全流程闭环，成为虫害监测的主流应用方案。

当前害虫图像识别的应用依托完整的软硬件系统与优化的深度学习算法协同实现。系统层面，硬件以嵌入式芯片、高清自动对焦摄像头、无线通信模块为核心，搭配粘虫板诱捕模块与电源管理模块，适配仓储环境的无线部署与长续航需求；软件分为嵌入式端控制程序与上位机管理平台，前者负责图像采集与传输，后者实现数据管理、结果展示与预警（Chiwamba *et al.*，2019）。算法层面，以 YOLOv5 为代表的单阶段目标检测算法在害虫图像识别任务中应用较为广泛（Hakim *et al.*，2025；Zhu *et al.*，2025）。针对仓储害虫体型微小、在图像中像素占比偏低的检测难题，现有研究常通过图分块推理等预处理方法提升小目标可见性，并结合 SIoU 等改进损失函数优化模型收敛性能，有助于提升模型对微小害虫目标的检测精度（兰安迪，2024）。在光照不均、背景干扰较多的实际场景中，Faster R-CNN（Faster region-based convolutional neural network）等两阶段方法常用于复杂场景精度优化研究，能够较好兼顾复杂环境下害虫识别的准确率与鲁棒性（Ramalingam *et al.*，2020）。依托针对性构建的害虫专属数据集完成模型训练与优化后，上述算法可有效实现多类仓储害虫的种类判别与数量统计，在一定程度上满足仓储虫情自动化监测的需求，结合目标追踪技术可进一步量化害虫活动轨迹与行为特征，为虫害发生规律分析提供补充。我们将目前的研究进展总结于表 2。

尽管害虫图像识别已实现规模化落地，但仍存在关键技术瓶颈：仓储害虫体型微小，易受光照、遮挡、粘虫板污渍干扰，小目标漏检、误检问题突出；现有数据集多采集于实验室环境，对田间、实仓复杂场景的泛化适应性不足；端侧设备的算力-功耗平衡与多设备协同管理仍有优化空间。针对上述问题，未来害虫图像识别研究主要将向轻量化、泛化化、一体化发展，多集中在以下几个方向：（1）轻量化算法可实现端侧实时识别，降低服务器依赖；（2）多场景、多虫种数据集的完善将提升复杂环境适配能力；（3）结合大数据、物联网与多传感技术，实现虫害趋势预测与智能防控联动。最终，构建全流程智能化虫情监测防控体系，为农业与仓储行业的绿色高效发展提供技术保障。

3.2 基于仿生嗅觉的昆虫检测鉴定技术

昆虫的嗅觉系统能够灵敏、特异地检测和识别复杂环境中痕量的气味分子，如性信息素和植物挥发物，从而完成定位寄主、寻找配偶、产卵、躲避天敌等生命活动（Zhou *et al.*，2022；张旭

表 2　基于人工智能的昆虫图像识别方法分析

Table 2　Analysis of insect image recognition methods based on artificial intelligence

技术层级 Technical level	代表方法/模型 Representative method/model	优势 Advantage	局限 Limitation	文献 Reference
传统机器学习 Traditional machine learning	逻辑回归 Logistic regression, 支持向量机 Support vector machine (SVM), K 近邻 K-nearest neighbors (KNN), 随机森林等 Random forest *et al.*	计算开销低，小样本稳定 Low computational cost and stable with small sample sizes	强依赖人工，大数据集准确率常不高 Heavily dependent on manual annotation, accuracy often unsatisfactory on large datasets	Heo *et al.*, 2010; Salifu *et al.*, 2022
单阶段检测 One-stage detectors	单次多框检测器 Single shot multibox detector (SSD), YOLO 算法 You only look once	实时性强，部署简单 Strong real-time performance and easy deployment	小目标性能较弱 Weak performance on small objects	Hakim *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025
两阶段目标检测 Two-stage detectors	更快速的区域卷积神经网络 Faster region-based convolutional neural network (Faster R-CNN), 掩膜区域卷积神经网络 Mask region-based convolutional neural network (Mask R-CNN)	精度高，适合复杂背景 High accuracy and suitable for complex backgrounds	速度较慢，不适合实时系统 Relatively slow, not suitable for real-time systems	Majewski *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2025
CNN-transformer 视觉模型 CNN-transformer visual models	视觉变换器 Vision transformer (ViT), 移位窗口变换器 Shifted window transformer (Swin transformer), CNN- transformer 混合模型 CNN-Transformer hybrid model	全局建模能力强，擅长捕捉图片不同部分之间关系 Strong global modeling capability, excels at capturing relationships between different parts of an image	依赖大数据，结构复杂，计算成本高 Relies on large datasets, complex architecture, and high computational cost	Peng and Wang, 2022; Zeng *et al.*, 2024
目标跟踪、行为分析和姿态估计 Object tracking, behaviour analysis and pose estimation	AROBA 自主观测系统 Autonomous robotic observation and behavioural analysis, Fast lock-on 追踪 Fast lock-on tracking	可量化行为轨迹 Capable of quantifying behavioral trajectories	依赖基准标记，对遮挡敏感 Relies on fiducial markers, sensitive to occlusion	Ulrich *et al.*, 2024; Vo-Doan *et al.*, 2024

凤等，2024；Zhang *et al.*，2025）。研究发现昆虫通常存在与种群关联的特征气味分子，因此发展特征气味分子高灵敏、高特异性、快速识别技术可以有效检测害虫。传统气体传感器（金属氧化物半导体、电化学、光学型等）凭借技术成熟、易于集成等优势，已广泛应用于环境监测与食品安全领域（Martínez *et al.*，2025；雷宇通等，2026），但普遍存在高交叉灵敏度与选择性差等性能瓶颈（Liu *et al.*, 2025），在灵敏度和特异性方面还不能与生物的嗅觉系统相媲美。

仿生嗅觉传感技术是害虫甄测的新方向。通过整合昆虫嗅觉系统的天然识别元件与物理化学换能器，突破了传统传感器的性能瓶颈，其中因嗅觉受体（Odorant receptors，ORs）、气味结合蛋白（Odorant-binding proteins, OBPs）等种类丰富、稳定性好且灵敏度高，成为识别元件的研究热点（Pelosi *et al.*，2018；Venthur and Zhou，2018；Bohbot and Vernick，2020）。目前，对仿生嗅觉的研究主要有电阻型传感器、导电聚合物传感器、化学电容型传感器、电位型气敏传感器等。浙江大学团队通过物理吸附和层层自组装的方法将昆虫 OBPs 固定于叉指电极表面研制电化学阻抗生物传感器，实现了对中华蜜蜂 *Apis cerana* 和橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 特征气味的检测（Lu *et al.*, 2014, 2017）。Bonazza 等（2021）将家蚕 *Bombyx mori* 性信息素结合蛋白 BmorPBP1 修饰于场效应晶体管的还原氧化石墨烯表面上构建传感器，该传感器在多种非目标干扰气味分子（如芳樟醇、香叶醇等）存在时，仍能以微摩尔级的良好亲和力和高特异性识别性信息素蚕蛾醇和蚕蛾醛。近年来，新材料、合成生物学技术的发展为仿生嗅觉传感器技术的研发带来新变革。Ma 等（2023b）开发一种基于美国白蛾 *Hyphantria cunea* 嗅觉受体衍生肽（Odorant receptor-derived peptides，ORPs）的化学电阻生物传感器，可高灵敏地检测害虫诱导植物挥发物 β-罗勒烯，检测限低至约 5.56 μg/m^3 及单头幼虫取食释放量，为美国白蛾幼虫早期发生的实时监测提供新的技术路线。随后，该团队又开发了一种基于信息素结合蛋白衍生肽（Pheromone binding protein-derived peptide，PBPP）和单壁碳纳米管的化学电阻生物传感器，能够高灵敏、高选择性地实时检测美国白蛾的性信息素（可检测少至 5 头活体雌蛾的释放量），未来有望替代传统诱捕器实现该害虫的低成本、自动化实时监测（Ma *et al.*，2026）。Wang 等（2026）利用草地贪夜蛾性信息素结合蛋白 SfruPBP1 作为识别元件，构建可特异性检测 3 种主要性信息素的电化学阻抗生物传感器，其线性检测范围为 10^{-9}-10^{-5} mol/L，为未来开展田间雌性草地贪夜蛾动态实时监测奠定基础。本文对当前基于仿生嗅觉的昆虫检测鉴定技术的研究进展进行了归纳，详见表 3。

尽管优势突出，仿生嗅觉传感器的发展仍面临诸多挑战，现有的生物传感器长期稳定性不足、重复性差、生物元件在体外易失活等制约其商业化应用。如电化学阻抗生物传感器需交流电测量，虽然一定程度上抗干扰能力强，但是专业电化学工作站昂贵且体积大，测量耗时长，电阻型生物传感器等直流电测量设备便宜便携易于集成，但是输出直流信号抗环境干扰性差。此外，现有气味分子数据库（ZINC、PubChem、Drugbank、Pherobase 等）主要用于药物研发和化合物信息查询等，用于昆虫鉴定的“化学指纹”数据库发展慢，导致基于仿生嗅觉的害虫甄测技术智能化不足。于艳雪等（2025）开发了昆虫气味分子数据库，首次系统梳理了 23 种重要害虫的特异气味分子（即“化学指纹”），同时建立了昆虫-OBPs-气味分子三者的对应关系，为建立以识别特异“化学指纹”新型甄别平台提供数据支撑。随着合成生物学、纳米材料科学与人工智能技术的深度交叉融合，将为昆虫嗅觉机理传感器带来突破性进展。未来，通过基因工程改造生物元件提高对目标信息素亲和力，将生物元件与石墨烯、碳纳米管等纳米材料复合增强信号放大效率，结合云端 AI 算法实现实时数据处理与智能分析，进而推动生物传感器在害虫实时检测识别等场景的实际应用。

表 3　基于仿生嗅觉的昆虫检测鉴定技术

Table 3　Insect detection and identification technology based on bionic olfactory

检测技术 Detecting technique	生物识别元件 Bio-recognition element	检测气味类型 Detection of odor type	靶标昆虫 Target insects	灵敏度 Sensitivity	参考文献 Reference
电化学阻抗谱 Electrochemical impedance spectroscopy, EIS	气味结合蛋白 OBP（SfruPBP1）	性信息素 Sex pheromone	草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*	线性检测范围 Linear detection range: 10^{-9}-10^{-5} mol/L	Wang *et al*., 2026
	气味结合蛋白 OBP（EoblPBP2）	性信息素 Sex pheromone	茶尺蠖 *Ectropis obliqua*	线性检测范 Linear detection range: 10^{-7}-10^{-4} mol/L	Tang *et al*., 2025
	气味结合蛋白 OBP（Acer-ASP1）	蜂王信息（对羟基苯甲酸甲酯和 4-羟基-3-甲氧苯基乙醇） Queen pheromone [methyl p-hydroxy-benzoate (HOB) and vanillyl alcohol (HVA)]	中华蜜蜂 *Apis cerana*	线性检测范围 Linear detection range: 10^{-7}-10^{-4} mol/L	Zhang *et al*., 2021
	气味结合蛋白 OBP（Acer-ASP2）	报警信息素（乙酸异戊酯）Alarm pheromone (isopentyl acetate, IPA)	中华蜜蜂 *A. cerana*	线性检测范围 Linear detection range: 10^{-9}-10^{-4} mol/L	Yao *et al*., 2015
	气味结合蛋白 OBP（Acer-ASP2）	蜂王信息素（对羟基苯甲酸甲酯），报警信息素（乙酸异戊酯） 花香挥发物（芳樟醇、香叶醇、β-紫罗兰酮等） Queen pheromone [methyl p-hydroxy- benzoate (HOB)], Alarm pheromone (isopentyl acetate, IPA), floral volatiles (linalool, geraniol and β-ionone, etc.)	中华蜜蜂 *A. cerana*	对有效配体的线性检测范围 Linear detection range for effective ligands：10^{-6}-10^{-3} mol/L	Lu *et al*., 2014
	化学感受蛋 CSP（Ac-ASP3）	工蜂信息素（香叶醇），报警信息素（异戊酸乙酯），花香挥发物（苯乙醛）Worker bee pheromone (geraniol), alarm pheromone (isoamyl acetate), floral odor (phenyl acetaldehyde)	中华蜜蜂 *A. cerana*	对有效配体的线性检测范围 Linear detection range for effective ligands: 10^{-7}-10^{-4} mol/L	Liu *et al*., 2013

续表 3 (Table 3 continued)

检测技术 Detecting technique	生物识别元件 Bio-recognition element	检测气味类型 Detection of odor type	靶标昆虫 Target insects	灵敏度 Sensitivity	参考文献 Reference
化学电阻器 Chemiresistor	气味受体 HcunOR31 的衍生肽（Odorant receptor-derived peptide, ORP） ORP1 和 ORP3	虫害诱导植物挥发物（β-罗勒烯）Herbivore induced plant volatiles (β-ocimene)	美国白蛾 *Hyphantria cunea*	ORP1 传感器检出限约 55.61 μg/m^3，响应区间为约 55.61- 2 780.50 μg/m^3；ORP3 传感器检出限约 5.56 μg/m^3，响应区间约 5.56-556.10 μg/m^3。The ORP1 sensor has a detection limit of approx. 55.61 μg/m^3 and a response range of approx. 55.61-2 780.50 μg/m^3. The ORP3 sensor features a detection limit of approx. 5.56 μg/m^3 and a response range of approx. 5.56-556.10 μg/m^3	Ma *et al*., 2023b
	性信息素结合蛋白衍生肽（Pheromone-binding proteins-derived peptide, PBPP）PBPP2 和 PBPP6	性信息素（SP1：(9*Z*,12*Z*)-十八碳二烯醛，SP3：(3*Z*,6*Z*)-顺-9,10-环氧-3,6-二十一碳二烯，SP4：(1,3*Z*,6*Z*)-顺-9,10-环氧-3,6-二十一碳二烯）Sex pheromone [SP1: (9*Z*,12*Z*)-ctadecadienal, SP3: (3*Z*,6*Z*)-*cis*-9, 10-epoxy-3,6-henicosadiene, SP4: (1,3*Z*,6*Z*)-*cis*-9,10-epoxy-3,6-henicosa-triene]	美国白蛾 *H. cunea*	PBPP2 传感器对 SP4 的线性检测范围为约 124.29-6 214.50 μg/m^3；PBPP6 传感器对 SP1 的线性检测范围为约 5 397-53 970 μg/m^3；PBPP6 传感器对 SP3 的线性检测范围为约 1 251.10-62 555 μg/m^3。The PBPP2 sensor has a linear detection range of approx. 124.29-6 214.50 μg/m^3 for SP4; The PBPP6 sensor exhibits linear ranges of approx. 5 397-53 970 μg/m^3 for SP1 and approx. 1 251.10-62 555 μg/m^3 for SP3	Ma *et al*., 2026

续表 3 (Table 3 continued)

检测技术 Detecting technique	生物识别元件 Bio-recognition element	检测气味类型 Detection of odor type	靶标昆虫 Target insects	灵敏度 Sensitivity	参考文献 Reference
化学电阻器 Chemiresistor	性信息素受体衍生肽 Sex pheromone receptor-derived peptides (SPRPs) SPRP1, SPRP2, SPRP3	性信息素 Sex pheromone：(*Z*)-11-hexadecenal (*Z*11-16:Ald), (*Z*)-9-hexadecenal (*Z*9-16:Ald), (*Z*)-9-tetradecenal (*Z*9-14:Ald), (*Z*)-9-hexadecen-1-ol (*Z*9-16:OH)	棉铃虫 *Helicoverpa armigera*	SPRP1 对 *Z*11-16:Ald 的检测范围为约 97.31-97 310 μg/m^3；SPRP2 对 *Z*11-16:Ald 的检测范围约 973.10-9 731 μg/m^3；SPRP3 对 *Z*9-16:Ald、*Z*9-14:Ald 和 *Z*9-16:OH 的检测范围分别为约 973.10-97 310 μg/m^3、约 858.60-8 586 μg/m^3 和 9 813-98 130 μg/m^3。The SPRP1 sensor offers a detection range of approx. 97.31-97 310 μg/m^3 for *Z*11-16:Ald; The SPRP2 sensor provides a detection range of approx. 973.10 -9 731 μg/m^3 for *Z*11-16:Ald; The SPRP3 sensor exhibits detection ranges of approx. 973.10- 97 310 μg/m^3 for Z9-16:Ald, approx. 858.60-8 586 μg/m^3 for Z9-14:Ald, and approx. 9 813- 98 130 μg/m^3 for *Z*9-16:OH	Wang *et al*., 2023
	气味受体 LmigOR35 衍生肽段 ORP2 和 ORP3	聚集信息素：4-乙烯基苯甲醚 Aggregation pheromone: 4-vinylanisole	飞蝗 *Locusta migratoria*	ORP2 传感器的响应区间为约 54.77-547.70 μg/m^3，ORP3 传感器的响应区间为约 5.48-547.70 μg/m^3。The ORP2 sensor offers a detection range of approx. 54.77-547.70 μg/m^3, the ORP3 sensor provides a detection range of approx. 5.48-547.70 μg/m^3	Ma *et al*., 2023a
场效应晶体管 Field effect transistor，FET	嗅觉受体 AmOR11 的纳米囊泡	蜂王上颚信息素：9-氧代-2-癸烯酸（9-ODA） Queen mandibular gland pheromone：9-oxo-2-decenoic acid (9-ODA)	西方蜜蜂 *Apis mellifera*	液相环境：检测限低至 10^{-18} mol/L； 气相环境：检测限低至约 0.062 5 μg/m^3。 Liquid phase: Detection limit as low as 1 amol/L; Gas phase: Detection limit as low as approx. 0.062 5 μg/m^3	Lee *et al*., 2026
	气味结合蛋白 OBP（BmorPBP1）	性信息素：蚕蛾醇和蚕蛾醛 Sex pheromone: Bombykol and bombykal	家蚕 *Bombyx mori*	解离常数 Dissociation constant K_d<10 μmol/L	Bonazza *et al*., 2021

续表 3 (Table 3 continued)

检测技术 Detecting technique	生物识别元件 Bio-recognition element	检测气味类型 Detection of odor type	靶标昆虫 Target insects	灵敏度 Sensitivity	参考文献 Reference
还原氧化石墨烯场效应晶体管 Reduced graphene oxide field-effect transistor (rGO-FET)	气味结合蛋白 OBP（OBP14）	蜜蜂气味物质：高香草酸 Honeybee olfactory cue: Homovanillic acid	西方蜜蜂 *A. mellifera*	解离常数 Dissociation constant K_d = 7.1 μmol/L	Reiner-Rozman *et al.*, 2016
便携式触角电位 Portable electroantennography (pEAG)	雄蛾触角 Male moth antennae	性信息素：蚕蛾醇 Sex pheromone: Bombykol	家蚕 *B. mori*	滤纸载药量检测范围为 1-1 000 ng The loading dosage range on filter paper is 1-1 000 ng	Terutsuki *et al.*, 2021
	雄蛾触角 Male moth antennae	苹浅褐卷叶蛾性信息素 *E. postvittana* sex pheromone：(*E*)-11-十四碳烯乙酸酯 [(*E*)-11-tetradecenyl acetate (*E*11-14:Ac) 与 (*E*,*E*)-9,11-十四碳二烯乙酸酯 [(*E*,*E*)-9,11-tetradecadienyl acetate (*E*9,*E*11-14:Ac)] 比例 (ratio) 20 : 1；小地老虎性信息 *A. ipsilon* sex pheromone：(*Z*)-7-十二碳烯乙酸酯 [(*Z*)-7-dodecenyl acetate (*Z*7-12:Ac)]；舞毒蛾性信息素 *L. dispar* sex pheromone：(7*R*,8*S*)-顺-7,8-环氧-2-甲基十八烷 (+)-disparlure	苹浅褐卷蛾 *Epiphyas postvittana*，小地老虎 *Agrotis ipsilon*，舞毒蛾 *Lymantria dispar*	苹果浅褐卷叶蛾 *E. postvittana*：~100 ng；小地老虎 *A. ipsilon*：~100 ng；舞毒蛾 *L. dispar*：~0.1 ng	Pawson *et al.*, 2020
计时电流法 Chronoamperometr	气味受体 OR（BmOR1）	性信息素：蚕蛾醇 Sex pheromone: Bombykol	家蚕 *B. mori*	10^{-19}-10^{-14} mol/L	Lu *et al.*, 2019

部分文献的传感器灵敏度以 ppm/ppb 等单位表示，本表中气相体系按理想气体方程近似换算为国际标准单位 mg/m³。该换算值仅为参考估算，非精确真值，原始定量基准仍以参考文献中的 ppm/ppb 为准。The sensor sensitivity in some literatures is expressed in units such as ppm or ppb. In this table, the gas-phase data are approximately converted to the international standard unit (mg/m³) based on the ideal gas equation. This converted value is for reference and estimation purposes only and is not an exact true value; the original quantitative benchmark remains the ppm/ppb values reported in the cited references.

3.3　基于声学的昆虫检测鉴定技术

与气味检测相似，昆虫声学检测技术也具有无损、快速、实时检测的优点，该技术的研究与应用主要集中于隐蔽性林业害虫检测领域，为早期预警和精准防控提供技术支持（汤怡静等，2025）。昆虫声学检测的目标是害虫生命活动中（取食、爬行等）产生的特定频率与强度的声学信号，通过传感器接收声信号，并对相应信号进行处理分析，最终判定害虫发生与活动情况。已有研究利用光纤分布式声学传感器（Optical fiber distributed acoustic sensor，optical fiber DAS）建立了一种稳健的红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* 早期检测方法，该传感系统可识别棕榈树内约 12 日龄幼虫的存在。该研究使用光纤分布式声学传感系统采集棕榈树内部幼虫取食信号，并利用采集的实验时域和频域数据训练神经网络，结果显示全连接人工神经网络（Artificial neural network，ANN）和解卷积神经网络 CNN 能够高效识别健康和受侵染棕榈树，并在适当噪声条件下获得较高的分类准确率（ANN 基于时域数据为 99.9%，CNN 基于频谱数据为 99.7%），该系统有潜力实现数千万棵棕榈树的 24 h 实时监测（Ashry *et al.*，2020；Wang *et al.*，2021a）。Ekramirad 等（2020）采用压电传感器对苹果内部被苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 危害的果实进行无损检测，结果显示该技术可精准识别藏匿于果内的幼虫，并测得其取食频率为 1.0-2.3 次/s，为果实虫害的早期诊断提供了有效手段。此外，研究人员构建了 InsectSound1000 数据集，包含超过 169 000 条标注过的 12 种昆虫的声音样本，可用于训练数据需求量大的深度学习模型（Branding *et al.*，2024）。常菲菲等（2025）对谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 和花斑皮蠹 *Trogoderma variabile* 不同发育阶段取食花生和玉米的声音进行参数分析，发现通过虫声峰值和脉冲数可以区分 2 种皮蠹的种类和虫态，通过频率峰值可以完成 2 种皮蠹成虫种类的区分。虽然，基于声学的昆虫检测鉴定技术近年进展显著，但是复杂环境噪声干扰、种间声纹特征重叠、硬件处理能力局限等问题仍制约技术规模化应用。未来研究应在提高声波信号质量和识别精度，提升复杂声学流的解析能力，推动硬件与数据处理算法的优化与升级等多方面着重发力（汤怡静等，2025）。

4　总结与展望

本文综述了昆虫检测识别技术从经典的形态鉴定到分子生物学检测，再到基于图像、嗅觉、声音等多模态信息的智能识别的发展。传统形态鉴定作为技术链的基石与先导，是后续所有特异性信息（基因、图像、气味、声音）采集的前提——只有在形态层面确认靶标，才能保证训练样本标注的准确性和现场信号的靶向性，避免系统性偏差。为满足害虫早期预警和精准高效防控的迫切需求，研发精准、便携、快速的检测鉴定技术/方法，必将成为今后的主攻方向。新型可视化分子生物学昆虫检测鉴定技术可满足以上需求，但是实际应用中也会受限于抽样不足，无法获取实体样本，造成漏检；图像识别和嗅觉、声学技术拓展了感知维度，却分别受制于环境光照、化学信息和噪声干扰。同时，这些基于机器学习的智能识别鉴定技术还存在本底训练数据积累不足，共享渠道/平台不畅的问题。

单一模态的局限性必将催生多技术融合（图 1）。其中，图像、声音、嗅觉传感检测作为一线筛查工具，可实现对大量样本无损快检，适合大范围初筛；分子鉴定技术作为二线确认工具，依靠高特异性基因序列精准鉴定，能有效验证初筛结果。二者形成快筛精查、表里互证的协同逻辑，从而避免单一模态带来的假阳性或信息不完整，为复杂样本分析提供立体解决方案。同时图像、声音、嗅觉传感检测技术还能助力实现智能监测，同步补充时空分布数据，进一步丰富决策依据。未来研究应着力于多模态标准化数据库建设、轻量化现场装备研发以及融合算法的可解释性提升，构建高效、精准、可部署的智能识别系统。

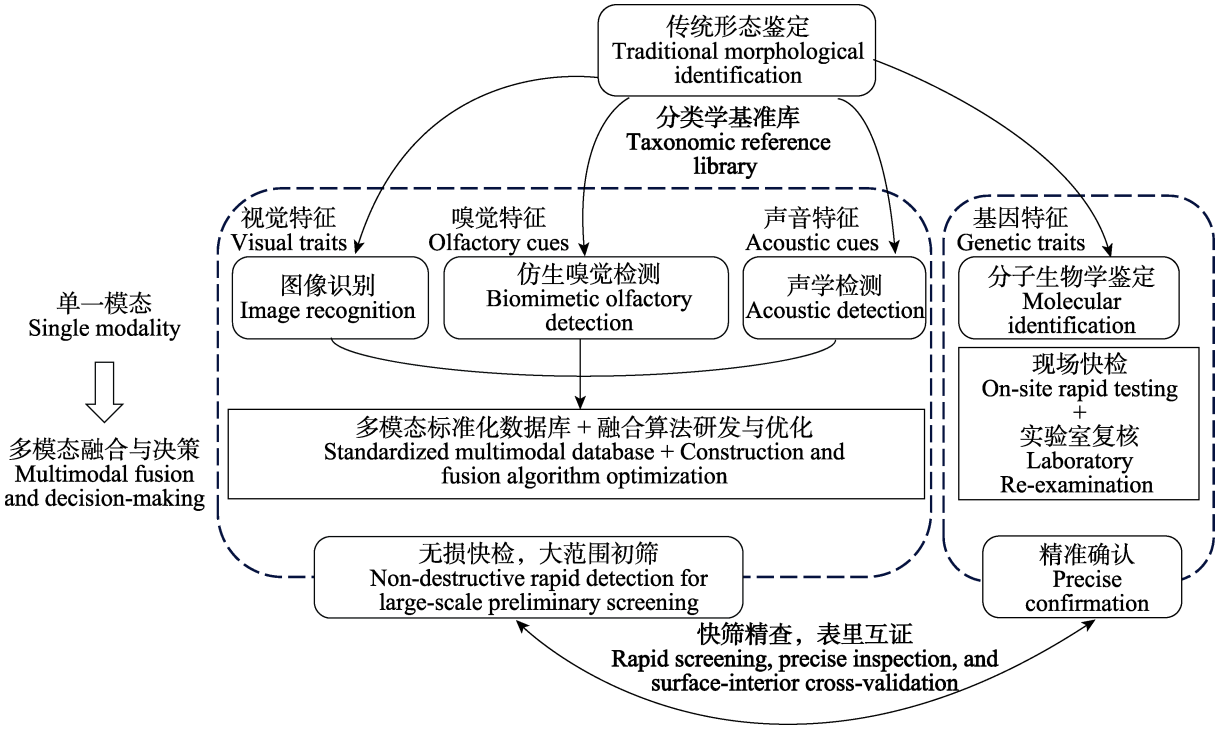

图 1　昆虫检测识别技术的多模态融合模式图

Fig. 1　Multimodal fusion model diagram of insect detection and identification technology

参考文献 (References)

Ashry I, Mao Y, Al-Fehaid Y, Al-Shawaf A, Al-Bagshi M, Al-Brahim S, Ng TK, Ooi BS, 2020. Early detection of red palm weevil using distributed optical sensor. *Scientific Reports*, 10(1): 3155.

Becherer L, Borst N, Bakheit M, Frischmann S, Zengerle R, von Stetten F, 2020. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP): Review and classification of methods for sequence-specific detection. *Analytical Methods*, 12(6): 717–746.

Bohbot JD, Vernick S, 2020. The emergence of insect odorant receptor-based biosensors. *Biosensors*, 10(3): 26.

Bonazza C, Zhu J, Hasler R, Mastrogiacomo R, Pelosi P, Knoll W, 2021. Responses of the pheromone-binding protein of the silk moth *Bombyx mori* on a graphene biosensor match binding constants in solution. *Sensors*, 21(15): 5120.

Branding J, von Hörsten D, Böckmann E, Wegener JK, Hartung E, 2024. InsectSound1000: An insect sound dataset for deep learning based acoustic insect recognition. *Scientific Data*, 11(1): 475.

Cao Y, Yao R, Wang Y, Huang C, Zhang Y, Liu W, Li J, Lin L, Tan L, Yan F, Zhang G, Song X, 2024. Unlocking precision: Advancing rapid field molecular identification of *Tuta absoluta* across its life cycle using locked nucleic acid strategies. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 416: 136059.

Chang FF, Yang XJ, Lu YJ, Zheng SZ, Miao SY, Lou DF, 2025. Bioacoustic detection of *Trogoderma granarium* and *Trogoderma variabile* in bulk stored peanut and corn. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(2): 349–360. [常菲菲, 杨晓军, 鲁玉杰, 郑斯竹, 苗世远, 娄定风, 2025. 散装花生和玉米中谷斑皮蠹和花斑皮蠹的声音识别方法. 应用昆虫学报, 62(2): 349–360.]

Channappa M, Thiruvengadam V, Shivakumar N, Thammayya SK, Nayyar N, Muthugounder M, Ramasamy GG, Syamala RR, Kukreti A, Karthik CM, Selvamani S, Pathak J, Jha GK, Sushil SN, 2025. Recombinase polymerase amplification assay for sensitive and rapid detection of invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Scientific Reports*, 15(1): 12458.

Chen SX, 2026. Design of an intelligent tobacco beetle trapping and monitoring device based on microcontroller. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 47(3): 112–115. [陈世雄, 2026. 基于单片机的烟草甲智能诱捕与监测设备设计. 中南农业科技, 47(3): 112–115.]

Chen YT, Shi MZ, Chen Y, Zhao JW, Yang XJ, Fu JW, Desneux N, Li JY, 2025. Rapid and equipment-free identification of papaya mealybug *Paracoccus marginatus* based on RPA-CRISPR/

Cas12a. *Pest Management Science*, 81(1): 230–239.

Chiwamba SH, Phiri J, Nkunika POY, Sikasote C, Kabemba MM, Moonga MN, 2019. Automated fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*, J.E. Smith) pheromone trap based on machine learning. *Journal of Computer Science*, 15(12): 1759–1779.

Cui XC, Lei YD, 2024. Research progress in deep-learning-based intelligent forest pest detection methods. *World Forestry Research*, 37(4): 53–57. [崔晓辰, 雷一东, 2024. 基于深度学习的林业害虫智能化检测方法研究进展. 世界林业研究, 37(4): 53–57.]

Diagne C, Leroy B, Vaissière AC, Gozlan RE, Roiz D, Jarić I, Salles JM, Bradshaw CJA, Courchamp F, 2021. High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature*, 592(7855): 571–576.

Ekramirad N, Parrish CA, Villanueva RT, Donohue KD, Adedeji AA, 2020. Low frequency signal patterns for codling moth larvae activity in apples// American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting. St. Joseph, Michigan: 2001028.

Feng JZ, 2018. Research on the key technologies of pest monitoring based on internet of things. Doctor dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [冯健昭, 2018. 基于物联网的害虫监测关键技术研究. 博士学位论文. 广州: 华南农业大学.]

Guan B, Wu Y, Zhu J, Kong J, Dong W, 2025. GC-faster RCNN: The object detection algorithm for agricultural pests based on improved hybrid attention mechanism. *Plants*, 14(7): 1106.

Hakim A, Srivastava AK, Hamza A, Owais M, Habib-ur-Rahman M, Qadri S, Qayyum MA, Khan FZA, Gaiser T, 2025. Yolo-pest: An optimized YoloV8x for detection of small insect pests using smart traps. *Scientific Reports*, 15(1): 14029.

He YY, Wang W, Liang HB, Ge SQ, 2025. Progress of DNA barcoding research in Coleoptera. *Journal of Environmental Entomology*, 47(5): 1–30. [何叶艳, 王维, 梁红斌, 葛斯琴, 2025. 鞘翅目昆虫 DNA 条形码研究进展. 环境昆虫学报, 47(5): 1–30.]

Hebert PDN, Cywinska A, Ball SL, De Waard JR, 2003. Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 270(1512): 313–321.

Heng PF, Shi B, Li DM, Ou H, He Y, Zhou LL, 2023. Rapid visualization molecular fluorescence detection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* using the multiplex MIRA-qPCR method. *Biotechnology Journal*, 18(12): 2300200.

Heo G, Klette R, Woo YW, Kim KB, Kim NH, 2010. Fuzzy support vector machine with a fuzzy nearest neighbor classifier for insect footprint classification// Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems. Barcelona, Spain: 1–6.

Jeong M, Khan M, Rahman MM, Kabir M, Choi N, Jeon J, Kim J, 2025. Integrated diagnostic approach using qPCR, ddPCR and lamp-based molecular tools for two leafhopper species identification (*Nephotettix cincticeps* and *Nephotettix virescens*). *Journal of Applied Entomology*, 149(3): 417–429.

Jia XM, Zhai H, Zhang Y, Ma YN, Li XJ, 2018. Research progress in dyes and additives for LAMP technology. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 30(12): 60–65. [贾晓曼, 翟浩, 张勇, 马亚男, 李晓军, 2018. LAMP 技术的染料、辅助剂的研究进展. 江西农业学报, 30(12): 60–65.]

Lan AD, 2024. Research and implementation of pest trapping and automatic detection device. Master dissertation. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications. [兰安迪, 2024. 害虫诱捕及自动检测装置研究与实现. 硕士学位论文. 北京: 北京邮电大学.]

LeCun Y, Bengio Y, Hinton G, 2015. Deep learning. *Nature*, 521(7553): 436–444.

Lee SE, Lee D, Choi Y, Hong S, Kwon HW, 2026. Functional nanovesicle-embedded hydrogel biosensors for the real-time monitoring of queen mandibular pheromone in both aqueous and gaseous environments. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 18(24): 25791–25805.

Lei YT, Qin XC, Hu XY, Zhou J, Zhang W, Yang ZC, 2026. Development of an electrochemical gas sensor for carbon dioxide detection. *Environmental Science and Technology*, 39(2): 64–68, 74. [雷宇通, 秦新春, 胡欣悦, 周剑, 张炜, 杨仲超, 2026. 用于 CO_2 检测的电化学气体传感器构建. 环境科技, 39(2): 64–68, 74.]

Li CJ, Sun HQ, Zhao WX, Wang XY, Lin RZ, Yao YX, 2023. Rapid assay using recombinase polymerase amplification and lateral flow dipstick for identifying *Agrilus mali* (Coleoptera: Buprestidae), a serious wood-boring beetle of the western Tianshan Mountains in China. *Journal of Economic Entomology*, 116(6): 1969–1981.

Li JJ, Liu H, Lin T, Wei H, Zhang H, Li Y, 2026. Phylogenetic analysis of Aeolothripidae (Thysanoptera: Terebrantia) based on DNA barcoding. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (*Natural Science Edition*), https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202512042. [李佳瑾, 刘惠, 林涛, 魏辉, 张宏瑞, 李亚金, 2026. 基于 DNA 条形码的纹蓟马科昆虫(缨翅目：锥尾亚目）系统发育分析. 福建农林大学学报(自然科学版), https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202512042.]

Li KY, Li WS, Li ZH, 2025. Visual identification of *Ceratitis cosyra*

based on multienzyme isothermal rapid amplification combined with lateral flow dipstick assay. *Plant Quarantine*, 39(4): 45–51. [李堃玥, 李维松, 李志红, 2025. 基于多酶恒温快速扩增-侧流层析试纸条介导的杧果小条实蝇可视化鉴定方法. 植物检疫, 39(4): 45–51.]

Li WS, Cai B, Chen RR, Cui JC, Wang H, Li ZH, 2024. Application of recombinase polymerase amplification with CRISPR/Cas12a and multienzyme isothermal rapid amplification with lateral flow dipstick assay for *Bactrocera correcta*. *Pest Management Science*, 80(7): 3317–3325.

Liu JN, 2019. Research on classification of main insect pests of Noctuidae based on image recognition. Master dissertation. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power. [刘迦南, 2019. 基于图像识别的烟草夜蛾科主要害虫分类研究. 硕士学位论文. 郑州: 华北水利水电大学.]

Liu J, Sun J, Zhu L, Zhang J, Yang X, Zhang Y, Yan W, 2025. Advancements and strategies for selectivity enhancement in chemiresistive gas sensors. *Nanomaterials*, 15(9): 1381.

Liu Q, Wang H, Li H, Zhang J, Zhuang S, Zhang F, Hsia KJ, Wang P, 2013. Impedance sensing and molecular modeling of an olfactory biosensor based on chemosensory proteins of honeybee. *Biosensors and Bioelectronics*, 40(1): 174–179.

Lu D, Xu Q, Pang G, 2019. A bombykol electrochemical receptor sensor and its kinetics. *Bioelectrochemistry*, 128: 263–273.

Lu YL, Li HL, Zhuang SL, Zhang DM, Zhang Q, Zhou J, Dong SY, Liu QJ, Wang P, 2014. Olfactory biosensor using odorant-binding proteins from honeybee: Ligands of floral odors and pheromones detection by electrochemical impedance. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 193: 420–427.

Lu YL, Yao Y, Li S, Zhang Q, Liu QJ, 2017. Olfactory biosensor based on odorant-binding proteins of *Bactrocera dorsalis* with electrochemical impedance sensing for pest management. *Sensor Review*, 37(4): 396–403.

Ma W, Wang Z, Jiang D, Wei J, Yan J, Chen R, Qin G, Yan S, 2023a. An odorant receptor-derived peptide biosensor for monitoring the migratory locust *Locusta migratoria* by recognizing the aggregation pheromone 4-vinylanisole. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 375: 132881.

Ma WC, Wang Z, Yang QM, Qin GX, Wang GR, Jiang D, Yan SC, 2023b. An odorant receptor-derived peptide biosensor for monitoring the occurrence of *Hyphantria cunea* larvae by recognizing herbivore-induced plant volatile. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 381: 133432.

Ma W, Yang L, Liu W, Yu Q, Jiang D, Wang Z, Yan S, 2026. A pheromone binding protein-derived peptide biosensor for detecting sex pheromones of the insect pest *Hyphantria cunea* with pest monitoring potential. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 462: 140048.

Majewski P, Zapotoczny P, Lampa P, Burduk R, Reiner J, 2022. Multipurpose monitoring system for edible insect breeding based on machine learning. *Scientific Reports*, 12(1): 10568.

Martínez A, Hernández A, Arroyo P, Lozano J, Córdoba MG, Martín A, 2025. Early detection of *Monilinia laxa* in yellow-fleshed peach using a non-destructive E-nose approach. *Foods*, 14(8): 1245.

Mkonyi L, Rubanga D, Richard M, Zekeya N, Sawahiko S, Maiseli B, Machuve D, 2020. Early identification of *Tuta absoluta* in tomato plants using deep learning. *Scientific African*, 10: e590.

Nam HY, Kim JH, Lee SH, Heckel DG, Kim J, 2021. Development of a LAMP-based molecular species diagnosis method for four major agricultural pests in the genus *Spodoptera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Insects*, 12(10): 895.

Pawson SM, Kerr JL, O'Connor BC, Lucas P, Martinez D, Allison JD, Strand TM, 2020. Light-weight portable electroantennography device as a future field-based tool for applied chemical ecology. *Journal of Chemical Ecology*, 46(6): 557–566.

Pelosi P, Zhu J, Knoll W, 2018. Odorant-binding proteins as sensing elements for odour monitoring. *Sensors*, 18(10): 3284.

Peng Y, Wang Y, 2022. CNN and transformer framework for insect pest classification. *Ecological Informatics*, 72: 101846.

Piepenburg O, Williams CH, Stemple DL, Armes NA, 2006. DNA detection using recombination proteins. *PLoS Biology*, 4(7): e204.

Ramalingam B, Mohan RE, Pookkuttath S, Gómez BF, Borusu CSCS, Teng TW, Tamilselvam YK, 2020. Remote insects trap monitoring system using deep learning framework and IoT. *Sensors*, 20(18): 5280.

Reiner-Rozman C, Kotlowski C, Knoll W, 2016. Electronic biosensing with functionalized rGO FETs. *Biosensors*, 6(1): 17.

Rich M, Noh E, Wang HH, Greene J, Gilligan T, Reay-Jones F, Turnbull M, Zink F, 2023. Field-based recombinase polymerase amplification and lab-based qPCR assays for detection of *Helicoverpa armigera*. *Journal of Economic Entomology*, 116(3): 973–982.

Rizzo D, Da Lio D, Bartolini L, Cappellini G, Bruscoli T, Salemi C, Aronadio A, Del Nista D, Pennacchio F, Boersma N, Rossi E, Sacchetti P, 2021. Development of three molecular diagnostic tools for the identification of the false codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 114(4): 1796–1807.

Roy HE, Pauchard A, Stoett P, Renard Truong T, 2023. The thematic assessment report on invasive alien species and their control. Bonn, Germany: IPBES secretariat.

Salifu D, Ibrahim EA, Tonnang HE, 2022. Leveraging machine learning tools and algorithms for analysis of fruit fly morphometrics. *Scientific Reports*, 12(1): 7208.

Shashank PR, Parker BM, Rananaware SR, Plotkin D, Couch C, Yang LG, Nguyen LT, Prasannakumar NR, Braswell WE, Jain PK, Kawahara AY, 2024. CRISPR-based diagnostics detects invasive insect pests. *Molecular Ecology Resources*, 24(1): e13881.

Singh AK, Ganapathysubramanian B, Sarkar S, Sarkar A, 2018. Deep learning for plant stress phenotyping: Trends and future perspectives. *Trends in Plant Science*, 23(10): 883–898.

Sun XX, Jiang YJ, Wang F, Zhang LS, 2025. Research progress and prospect of DNA barcoding in parasitoid wasps. *Chinese Journal of Biological Control*, 41(2): 473–491. [孙星星, 蒋颖洁, 王凡, 张礼生, 2025. 寄生蜂 DNA 条形码研究进展与展望. 中国生物防治学报, 41(2): 473–491.]

Tang M, Zhang Y, Wang L, Zhang J, Cui H, Jacquin-Joly E, Li H, 2025. Dynamic detection of live female tea geometrid moths using an olfactory electrochemical impedance biosensor based on pheromone-binding protein. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 4(4): 100167.

Tang Y, Zheng M, Gao R, Xiao M, Liu J, Wang Y, Xiang C, 2025. Research progress of insect acoustic detection for cryptic pest. *Plant Quarantine*, 39(6): 1–6. [汤怡静, 郑铭森, 高瑞芳, 肖萌, 刘建, 汪莹, 向才玉, 2025. 昆虫声学检测技术在隐蔽性害虫领域的应用研究进展. 植物检疫, 39(6): 1–6.]

Terutsuki D, Uchida T, Fukui C, Sukekawa Y, Okamoto Y, Kanzaki R, 2021. Real-time odor concentration and direction recognition for efficient odor source localization using a small bio-hybrid drone. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, 339: 129770.

Ulrich J, Stefanec M, Rekabi-Bana F, Fedotoff LA, Rouček T, Gündeğer BY, Saadat M, Blaha J, Janota J, Hofstadler DN, Zampachu K, Keyvan EE, Erdem B, Sahin E, Alemdar H, Turgut AE, Arvin F, Schmickl T, Krajník T, 2024. Autonomous tracking of honey bee behaviors over long-term periods with cooperating robots. *Science Robotics*, 9(95): eadn6848.

Venthur H, Zhou JJ, 2018. Odorant receptors and odorant-binding proteins as insect pest control targets: A comparative analysis. *Frontiers in Physiology*, 9: 1163.

Vo-Doan TT, Titov VV, Harrap MJ, Lochner S, Straw AD, 2024. High-resolution outdoor videography of insects using fast lock-on tracking. *Science Robotics*, 9(95): eadm7689.

Wang B, Mao Y, Ashry I, Al-Fehaid Y, Al-Shawaf A, Ng TK, Yu C, Ooi BS, 2021a. Towards detecting red palm weevil using machine learning and fiber optic distributed acoustic sensing. *Sensors*, 21(5): 1592.

Wang LX, Zeng B, Huang JQ, Wu F, Chen HL, Liu Y, Li HL, 2026. Biosensors for specific detection of sex pheromone based on screen-printed electrodes and pheromone-binding protein 1 from the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Microchemical Journal*, 221: 116984.

Wang XX, Liu B, Zhang Y, Zhai YF, Ullah F, Li ZH, 2021b. A rapid LAMP-based colorimetric assay with quick DNA extraction for on-site identification of *Drosophila suzukii* Matsumura. *Journal of Applied Entomology*, 145(9): 922–928.

Wang YN, Yu YX, Tian Q, Zhang L, Li HW, Yang S, Zhai JF, 2024. New and rapid visual detection assay for *Hyphantria cunea* Drury based on recombinase polymerase amplification and CRISPR/Cas12a. *Journal of Environmental Entomology*, 46(5): 1051–1058. [王雅娜, 于艳雪, 田茜, 张柳, 李红卫, 杨硕, 翟俊峰, 2024. 基于 RPA-CRISPR/Cas12a 的美国白蛾可视化快速检测新方法. 环境昆虫学报, 46(5): 1051–1058.]

Wang Z, Ma W, Gao Z, Zhao Z, Du B, Wei J, Jiang D, Lan K, Chen R, Yan S, Qin G, 2023. Sex pheromone receptor-derived peptide biosensor for efficient monitoring of the cotton bollworm *Helicoverpa armigera*. *ACS Sensors*, 8(2): 363–371.

Xiao M, Deng KY, Gao RF, Wang LY, Xiang CY, Wang Y, Zheng MS, Zhang WF, Zhang HY, Yu DJ, 2025. Using DNA barcoding technology to identify of exotic ant species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(2): 484–493. [肖萌, 邓可音, 高瑞芳, 王砾阳, 向才玉, 汪莹, 郑铭森, 张伟锋, 张海燕, 余道坚, 2025. 基于 DNA 条形码技术的外来蚂蚁物种鉴定研究. 应用昆虫学报, 62(2): 484–493.]

Yao RN, Wang YS, Zhang GF, Tan L, 2025. Advances in identification techniques for *Tuta absoluta* (Meyrick), a notorious invasive agricultural insect pest. *Journal of Environmental Entomology*, 47(1): 12–21. [姚若楠, 王玉生, 张桂芬, 谭琳, 2025. 重大农业入侵害虫番茄潜叶蛾检测鉴定技术研究进展. 环境昆虫学报, 47(1): 12–21.]

Yao Y, Lu Y, Zhang Q, Zhang D, Zhuang S, Li H, Shan J, Liu Q, 2015. Biomimetic olfactory sensor for dynamically and conveniently monitoring ligands binding to odorant-binding proteins with impedance sensing. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(8): 5548–5560.

Yu YX, Zhang L, Zhai ZY, Li HW, Chen K, 2025. The construction and application of an invasive insect odorant molecule database. *Plant Quarantine*, 39(6): 7–11. [于艳雪, 张柳, 翟振宇, 李红

卫, 陈克, 2025. 入侵昆虫气味分子数据库的建设与应用. 植物检疫, 39(6): 7–11.]

Zeng M, Chen S, Liu H, Wang W, Xie J. 2024. HCFormer: A lightweight pest detection model combining CNN and ViT. *Agronomy*, 14(9): 1940.

Zetsche B, Gootenberg JS, Abudayyeh OO, Slaymaker IM, Makarova KS, Essletzbichler P, Volz SE, Joung J, van der Oost J, Regev A, Koonin EV, Zhang F, 2015. Cpf1 is a single RNA-guided endonuclease of a class 2 CRISPR-cas system. *Cell*, 163(3): 759–771.

Zhang GF, Liu WX, Guo JY, Zhang YB, Wan FH, 2013. Species-specific CO Ⅰ primers for rapid identification of *Tuta absoluta* (Meyrick), a significant, potential alien species. *Journal of Biosafety*, 22(2): 80–85. [张桂芬, 刘万学, 郭建洋, 张毅波, 万方浩, 2013. 重大潜在入侵害虫番茄潜叶蛾的SS-CO Ⅰ快速检测技术. 生物安全学报, 22(2): 80–85.]

Zhang JF, Wu F, Tang MZ, Chen DX, Tan J, Liu QJ, Li HL, 2021. Study on specific *Apis cerana* honeybee queen pheromone biosensor based on pheromone-binding protein ASP1. *IEEE Sensors Journal*, 21(16): 8855–8860.

Zhang L, Yang S, Xie J, Li H, Shi W, Pei J, Yu Y, Zhai J, 2025. Identification and functional disparity of pheromone-binding proteins from tomato leafminer *Tuta absoluta* in detection of sex pheromone components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(48): 25316–25328.

Zhang XF, Shen HY, Cao Q, Deng XY, Wang F, Guo LN, Wu M, Guo Y, 2024. Honeybee responses to volatile compounds from pear (Pyrus bretschneideri cv. Dangshansu) and rapeseed (*Brassica napus*) flowers. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(2): 295–315. [张旭凤, 申红英, 曹嵌, 邓晓银, 王锋, 郭丽娜, 武敏, 郭媛, 2024. 蜜蜂对梨和油菜花朵挥发性气味物质的响应研究. 应用昆虫学报, 61(2): 295–315.]

Zhao S, Li T, Yang K, Li W, Zhang JF, Guo LC, Liu YH, Dai Y, Ying QJ, Yang HT, 2018. Establishment of a recombinase-aided isothermal amplification technique to detect *Schistosoma japonicum* specific gene fragments. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 30(3): 273–277, 306. [赵松, 李婷, 杨坤, 李伟, 张键锋, 郭利川, 刘燕红, 戴洋, 应清界, 羊海涛, 2018. 重组酶介导的日本血吸虫特异性基因片段核酸等温扩增检测方法的建立. 中国血吸虫病防治杂志, 30(3): 273–277, 306.]

Zhou S, Jander G, Ort D, 2022. Molecular ecology of plant volatiles in interactions with insect herbivores. *Journal of Experimental Botany*, 73(2): 449–462.

Zhu X, Li D, Zheng Y, Ma Y, Yan X, Zhou Q, Wang Q, Zheng Y, 2025. A YOLO-based model for detecting stored-grain insects on surface of grain bulks. *Insects*, 16(2): 210.

Zhu X, Gopurenko D, Holloway JC, Duff JD, Malipatil MB, 2023. Two independent LAMP assays for rapid identification of the serpentine leafminer, *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard, 1926) (Diptera: Agromyzidae) in Australia. *Scientific Reports*, 13(1): 22286.

Zhu Y, Wang M, Yin X, Zhang J, Meijering E, Hu J, 2022. Deep learning in diverse intelligent sensor based systems. *Sensors*, 23(1): 62.

Zhong Y, Huang SP, Li YR, Ma FH, Liang K, Lan YW, He CW, 2019. Establishment of a visual LAMP for the rapid detection of *Bactrocera cucurbitae*. *Plant Quarantine*, 33(1): 35–38. [钟勇, 黄素萍, 李兼然, 马福欢, 梁琨, 蓝翊文, 何成伟, 2019. 瓜实蝇可视化 LAMP 快速分子检测方法. 植物检疫, 33(1): 35–38.]

Zink FA, Tembrock LR, Tim AE, Gilligan TM, 2020. A real-time PCR assay for rapid identification of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(3): 1479–1485.

Zink FA, Tembrock LR, Tim AE, Gilligan TM, 2022. A droplet digital PCR (ddPCR) assay to detect *Phthorimaea absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) in bulk trap samples. *Journal of Economic Entomology*, 115(6): 2125–2129.