

中国森林昆虫学研究进展与展望^{*}

戴歆祎^{**} 党英侨 王小艺^{***}

(中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091)

摘 要 中国森林昆虫学发展至今已有超过 100 年的历史, 随着分子生物学技术、计算机信息技术、空间遥感技术等新技术的不断发展, 中国森林昆虫学的研究在各分支方向都取得了令人瞩目的成就。本文从森林昆虫的分类学、系统发育学、生物地理学、生物学、生态学及害虫防治等方面总结了我国森林昆虫学近 10 年的研究新进展和成就, 并对未来中国森林昆虫学的发展趋势进行了展望。

关键词 分类学; 系统发育学; 生物地理学; 生物学; 共生微生物; 生态学; 森林害虫

Research progress and prospects of forest entomology in China

DAI Xin-Yi^{**} DANG Ying-Qiao WANG Xiao-Yi^{***}

(Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration,
Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract The development of forest entomology in China has been more than 100 years, and with the continuous development of new technologies such as molecular biotechnology, computer information technology, and space remote sensing technology, researches on forest insects in China have made remarkable achievements in every branch. Here we summarized the research progress and achievements of forest entomology in China over the past 10 years in terms of taxonomy, phylogeny, biogeography, biology, ecology, and pest control of forest insects. In addition, the developmental trends of forest entomology research in China in the future are also prospected in this article.

Key words taxonomy; phylogeny; biogeography; biology; symbiotic microorganism; ecology; forest insect pests

森林昆虫学既是林业科学的分支, 也是昆虫学的分支, 它具有在复杂的森林生态系统中开展昆虫研究的特殊性。森林昆虫学涉及森林昆虫的分类学、系统发育学、生物地理学、生物学、生态学, 以及森林害虫的管理策略和技术方法。森林昆虫学的研究内容广泛, 包括昆虫分类鉴定、地理分布、生活史、习性行为、共生微生物、种群动态的影响因子以及害虫种群调控技术等。森林昆虫学的发展离不开对遥感技术、网络信息技术、人工智能、生物技术等现代科学技术的应用。森林昆虫学的研究目的是通过调节林内或林产品中昆虫的活动, 实现人类经济社会的可持续发展, 同时保护森林生态系统, 维持人与自然的动

态平衡。中国森林昆虫学论文的发表最早可以追溯到 1920 年左右(李孟楼, 2015), 距今已有 100 多年的历史。进入 21 世纪后, 森林昆虫学飞速发展, 在理论和应用方面都有了长足的进步。本文从森林昆虫的分类学、系统发育及生物地理学、生物学、生态学、害虫防治等方面简述了中国近 10 年来森林昆虫学的进展和成就。

1 森林昆虫的分类学

1.1 分类鉴定方法

准确的物种分类是森林昆虫学的基础研究之一, 也是害虫管理的重要组成部分。传统上,

^{*}资助项目 Supported project: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XBZD-10)

^{**}第一作者 First author, E-mail: 1849911039@qq.com

^{***}通讯作者 Corresponding author, E-mail: xywang@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2025-02-24; 接受日期 Accepted: 2025-08-27

研究人员主要通过形态学特征进行昆虫分类。但随着研究的深入,形态学分类方法面临一些挑战。首先,部分昆虫的外部形态特征非常复杂且易变,使得分类工作具有较大的困难(Wei *et al.*, 2010)。此外,昆虫的物种复合体、隐种及近缘种等问题,也使得传统的形态学方法无法准确应对(Chesters *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2025)。

随着分子生物技术和计算机技术的迅速发展,昆虫分类鉴定方法得到了显著改进。例如,通过利用微卫星标记和 DNA 条形码技术,对昆虫基因水平进行分析,显著提高了鉴定的效率与准确性(湛安然, 2021)。除分子生物学方法外,化学分类学也可作为一种有效的补充手段。通过研究昆虫的信息素和表皮碳氢化合物的种间差异,对于物种分类尤其是对近缘种的鉴定具有很好的应用前景(李群臣等, 2019)。此外,经典的数值分类学和支序分类学方法依然在昆虫分类中占据重要地位,这些方法通过统计学和进化关系的分析,为昆虫分类提供了更多支持(秦雨瑶, 2023)。利用现代化技术对昆虫形态特征进行数字化处理(蔡小娜等, 2019),或者采用扫描电镜技术观察昆虫体表和体内细微结构(薛爽等, 2021)等,也为传统形态学分类方法提供了有力补充,优化了分类研究的精度与效率。

1.2 森林昆虫的新种和新纪录种

以昆虫 8 个目的中文名称分别与“新种”和“新记录种”作为关键词输入中国知网 <https://kns.cnki.net/kns8s/>,并以昆虫 8 个目的拉丁名、“China”分别与“new species”和“new record species”作为关键词在 <https://zoobank.org/> 搜索所有发表的文章,发现从 20 世纪 50 年代至今,中国发表昆虫新种的文章约 7 000 余篇,约 35 000 个新种;发表新纪录种的文章约 1 000 余篇,约 2 000 个新记录种,其中包括大量的森林昆虫。如 Yang 等(2013)报道了膜翅目一新种 *Cerchysiella raddeii*,该容性内寄生蜂是栗山天牛 *Massicus raddei* 在自然界中的主要天敌。Zhang 等(2021)描述了在榆树死树上采集到的树皮小蠹一新种 *Scolytus jiulianshanensis*。Li 等

(2012)在黑龙江发现了螳螂科 *Epiophlebiidae* 的新种 *Epiophlebia sinensis*,这种昆虫生活在针叶林和落叶阔叶林中的冷溪流附近,可作为评估水质的指标。重要的森林害虫新纪录种有刺槐突瓣细蛾 *Chrysaster ostensackenella*(樊婷婷等, 2019)、长林小蠹 *Hylurgus ligniperda*(任利利等, 2021)、桉树叶瘿球角姬小蜂 *Ophelimus maskelli*(杨忠岐等, 2023)等。

2 森林昆虫的系统发育学与生物地理学

森林昆虫的系统发育学研究在 20 世纪主要基于形态学数据(刘金林, 2023),但随着现代分子生物学技术的迅猛发展,尤其是线粒体基因组学的应用极大地推动了系统发育学的发展,为深入理解昆虫的进化关系提供了新的视角和强有力的工具。程晓甜等(2014)对重大检疫性害虫枣实蝇 *Carpomya vesuviana* 不同地理种群的线粒体 *Cytb* 基因序列进行分析,明确了枣实蝇不同地理种群之间的亲缘关系,为该虫的快速鉴定奠定了基础。根据桉树枝瘿姬小蜂 *Leptocybe invasa* 的线粒体 *CO I* 基因序列对其 14 个地理种群进行的隐种鉴定,为该入侵害虫的防控管理提供了科学依据(彭欣等, 2021)。小圆胸小蠹 *Euwallacea fornicatus* 物种复合体的特点增加了评估其潜在风险的困难,而基于线粒体和核糖体基因数据使用 ABGD、bGMYC、mPTP 和 BP&P 方法对其在中国的物种及进化枝进行划分,揭示了该物种的分布模式和遗传多样性(Wang *et al.*, 2022b)。

20 世纪 80 年代末期,科学家将线粒体组学及溯祖理论应用于生物地理学。此后,中国森林昆虫的生物地理学得到了快速发展。毛蚜亚科 Chaitophorinae 的两个族 Chaitophorini 和 Siphini 分别以落叶乔木和草本植物为食,基于这两个昆虫族的 *CO I*、*CO II*、*Cytb* 和 *EF-1 α* 基因数据、地理分布及寄主数据,利用系统发育重建、分子钟测年法、祖先分布模型及特征评估和多样化速率计算研究毛蚜亚科的系统发育和宏进化,发现

毛蚜亚科从亚洲到欧洲的扩散进程,从杨树到柳树的寄主转移共同促进了毛蚜亚科的分化(Liu *et al.*, 2022)。分布于中国西南山脉和华南地区的油桐尺蠖 *Biston suppressaria* 在自然山脉的物理分隔下,其 mtDNA 表现出高度的遗传分化,油桐尺蠖 4 次分化的时间与“青藏高原运动”的 3 个阶段及“昆黄运动”的时间一致(Cheng *et al.*, 2016)。对不同地理分布的寒蝉 *Hyalessa maculaticollis* 进行形态学观察、线粒体和细胞核的 DNA 分析以及雄性发音器的对比,揭示出寒蝉种内丰富的形态变异与其高水平的遗传分化一致,寒蝉的种内分化主要分为中国谱系和日本谱系,这种分化与冰川时期东海陆桥充当寒蝉的扩散通道、更新世的气候振荡以及东亚的地形结构所带来的影响是不可分割的(Liu *et al.*, 2018)。

3 森林昆虫的生物学

了解各种森林昆虫的生物学,对于更好地管理林区、监测和防控森林害虫极为重要。栗山天牛补充营养的方式与其他天牛不同,雄成虫在寄主树皮上咬出伤口再吮吸从伤口处流出的汁液,这种特点为开发其植物源引诱剂提供了思路(郑雅楠等, 2014)。刘卫敏等(2015)发现日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* 在中国 3 个气候区均为 1 年 2 代,其一般于 3-5 月初出蛰,10-12 月开始越冬。春尺蠖 *Apocheima cinerarius* 幼虫从 4 龄起食叶量激增,5 龄进入暴食期,以蛹越冬和越冬,成虫多在 20:00 至次日 8:00 羽化,雄成虫具有强趋光性(卿薇等, 2016)。

对寄生性天敌生物学的深入研究有利于更好地繁育、释放天敌,从而降低防治害虫的成本,提高防治的持久性和效率。调查多种天牛的天敌花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 的越冬习性及耐寒能力有助于确定释放花绒寄甲的合适位置,提高其野外防治的存活率(高尚坤等, 2016)。与寄生于茶翅蛾 *Halyomorpha halys* 的未受精卵相比,寄生于茶翅蛾受精卵的茶翅蛾沟卵蜂 *Trissolcus japonicus* 所需的发育时间更长、羽化量更少、雌性后代的比例更小(Yang *et al.*, 2018)。

4 森林昆虫的共生微生物

昆虫与微生物具有广泛而多样的联系,昆虫的微生物共生体能够提高宿主的存活率和繁殖力,保护宿主免受天敌的侵害,甚至促进物种的形成(Shao *et al.*, 2024)。细菌是最为常见的昆虫内共生体,昆虫体内的共生细菌主要有 *Wolbachia*、*Rickettsia*、*Cardinium* 3 类。据估计,约 51% 的昆虫可感染 *Wolbachia* (Shao *et al.*, 2024), *Wolbachia* 主要分布在昆虫的生殖系统中,影响宿主的生殖。例如感染 *Wolbachia* 的雌性昆虫与未感染的雌性昆虫交配时,会使雌虫因细胞质不相容而导致其体内的幼虫胚胎死亡(Wang *et al.*, 2022a)。*Wolbachia* 也会诱导昆虫的生殖模式变为产雌孤雌生殖(Xiao *et al.*, 2024)。*Wolbachia* 诱导松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 产生雌单性生殖模式,可以促使该寄生蜂以较低数量和更高效率寄生目标害虫(Liu *et al.*, 2019)。昆虫的内共生真菌较为罕见(Shao *et al.*, 2024),钩蛾蛾属 *Thitarodes* 昆虫的未受精卵中检测出了内共生真菌 *Purpureocillium* sp., 这种菌可能是通过子房传播给后代的(Liang *et al.*, 2019)。昆虫的病毒内共生体通过卵子和精子在宿主种群中迅速传播,并对其宿主产生复杂的影响(Shao *et al.*, 2024)。蝶蛹金小蜂 *Pteromalus puparum* 的一种内共生负链 RNA 病毒会诱导蝶蛹金小蜂子代的雌性数量减少,但该病毒也会延长其宿主的寿命(Wang *et al.*, 2017)。

昆虫的体外共生微生物,特别是肠道细菌和真菌微生物群落,因其显著影响宿主的营养吸收、代谢过程以及行为免疫反应,已成为当前研究的前沿领域(Shao *et al.*, 2024)。Bai 等(2023)发现榆紫叶甲 *Ambrostoma quadriimpressum* 的肠道细菌会使谷胱甘肽 *S*-转移酶(Glutathione *S*-transferases, GST)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)的活性上调从而降解高效氯氰菊酯,这为昆虫耐药性的研究提供了更多的数据支撑。钩蛾蛾属昆虫的肠道真菌可以产生有经济价值的抗生素及其他次生代谢物,使其在土壤中高含量矿

的胁迫下存活 (Liang *et al.*, 2019)。

5 森林昆虫的生态学

5.1 森林昆虫种群的空间分布

森林昆虫空间分布格局的解析,是深入理解其行为及生物学特征不可或缺的基础。当前研究实践中,传统生物学统计与地统计学方法是揭示昆虫空间分布特征的主要手段。基于长白山固定地与样带取样的系统调查结果显示,该区域天牛物种丰富度呈现北坡最高、西坡次之、南坡最低的空间格局;从垂直梯度来看,随着海拔升高、植被类型由低海拔的阔叶红松林逐渐过渡到高山苔原带,天牛物种数呈下降趋势,同时区系组成也发生明显变化:古北区系天牛的比例逐渐升高,而跨古北-东洋区系和东亚区系天牛则逐渐降低(高文韬等, 2014)。针对油松林生态系统,通过利用地统计学分析方法揭示褐梗天牛 *Arhopalus rusticus* 的分布格局,发现幼虫在林地中主要呈聚集分布,成虫则表现为随机分布(陈潜等, 2018)。进一步地,武承旭等(2022)应用传统聚集指标结合地统计学手段,探究了横坑切梢小蠹 *Tomicus minor*、云南切梢小蠹 *T. yunnanensis* 和短毛切梢小蠹 *T. brevipilosus* 在云南松树冠上的空间分布,为这 3 种小蠹的种群动态变化的预测预报提供了理论信息。

5.2 环境对森林昆虫的影响

全球范围内,极端高温等异常环境导致昆虫死亡的案例正呈增长趋势(Ma *et al.*, 2021)。气温上升会增强捕食性昆虫的觅食活动,使不同捕食者的遭遇率增大,这可能会增加它们的互相干扰从而增大竞争强度。在高温情况下,异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 对于猎物桃蚜 *Myzus persicae* 的干扰竞争有所增强(Yu *et al.*, 2023)。气候异常同样可能带来降水和湿度的变化,而降水和湿度可直接或间接影响昆虫的生命活动。绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 的种群数量通常在暴雨后增加,实验发现高湿环境能够显著提高该虫卵和若虫的存活率,延长成虫

寿命,并提高雌虫繁殖力(Lu and Wu, 2011)。温湿度常常相互影响、共同作用于昆虫。研究发现高温高湿有利于椰子织蛾 *Opisina arenosella* 的繁殖,在此条件下,其种群世代历期和种群倍增时间都较短(李优佳, 2021)。光对昆虫起着信号传递的功能,能够在不同程度上调节并控制昆虫的生长发育及行为。研究发现低强度光和短日照光周期条件显著诱导了白蜡吉丁肿腿蜂 *Sclerodermus pupariae* 翅的发育(Wang *et al.*, 2016)。风会影响昆虫的扩散和分布,低纬度地区的食蚜蝇种群可以借助由南向北运行的暖气流迁飞到达远距离的异地(高博雅, 2021)。

不同昆虫种群在生态系统中处于不同的营养级,彼此之间也会形成复杂多样的关系。周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* 和麦蛾柔茧蜂 *Habrobracon hebetor* 通过寄生椰子织蛾,对椰子织蛾的种群数量起到了一定的抑制作用(李优佳, 2021)。在自然界漫长的进化历程中,昆虫与植物之间建立了复杂而多样的互作关系。植物对植食性昆虫的防御基于大量的次生代谢物,作为利他素的一些次生代谢物会吸引天敌,如草蛉会根据利他素来寻找猎物的栖息地(Aldrich and Zhang, 2016)。面对植物的防御机制,昆虫也有相应的对策。香樟齿喙象 *Pagiophloeus tsushimanus* 利用细胞色素 P450 介导的代谢抗性和角质层蛋白介导的穿透抗性,应对其寄主植物香樟的次生代谢物带来的不利影响,从而成功在香樟树上定殖(Li *et al.*, 2023)。

6 森林害虫的防治

6.1 森林害虫的监测预报

森林害虫的早期监测与精准预报是有效防治的前提。然而,传统诱捕与实地调查方法不仅耗时费力,且对隐蔽性强的蛀干类害虫监测能力有限。近年来,随着高分辨率遥感技术的发展和无人机平台的普及,集成高光谱成像、激光雷达(LiDAR)、热成像等多传感器数据的虫害遥感监测体系逐步建立,为害虫入侵过程的早期识别提供了有力技术支撑(Luo *et al.*, 2023)。

与此同时,声学监测技术也取得了突破性进展。例如,刘璇昕等(2021)开发的基于卷积神经网络的识别模型,能够在野外复杂声场中识别蛀干害虫取食声;刘圣煌等(2020)则通过小波包分解技术,提取了不同天牛幼虫的蛀干振动特征,为林间虫情监测提供了新手段。此外,面向基层林业人员的智能识别工具也在不断发展。苏佳杰等(2023)构建了基于深度注意力机制的图像识别模型,并嵌入移动终端平台,能够提高林间虫害识别与响应效率。

全球气候变暖正持续重塑昆虫地理分布格局,驱动其向高纬度、极地及新区域扩展。基于生态位模型的潜在适生区预测已成为预警与干预的核心手段。此类模型整合气候因子、发生记录及寄主信息,能够在区域尺度上评估虫害的潜在扩散路径与风险区域(Zhao *et al.*, 2024)。CLIMEX 模型预测表明,美国白蛾 *Hyphantria cunea* 的潜在适生区在升温背景下将由低纬度向中高纬度迁移,温度是限制其扩散的主导因子(Ge *et al.*, 2019)。进一步结合自然与人为因子的 MaxEnt 建模研究发现,全球物流贸易推动美国白蛾在大洋洲等地的适生区显著扩大(Hu *et al.*, 2025)。除外来食叶害虫外,蛀干害虫如红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 及其共生真菌长梗细帚霉 *Leptographium procerum* 的适生区变化也受到关注。该“虫-菌复合体”在中国油松林中已造成严重危害,预测结果显示未来其适生区将北移并扩大,虫菌重叠区亦将显著增多(Zhou *et al.*, 2024)。在中国,松材线虫由松墨天牛 *Monochamus alternatus* 与云杉花墨天牛 *M. saltuarius* 等媒介昆虫携带传播,MaxEnt 模型模拟显示其当前主要分布于中、东、南部,未来在气候变暖驱动下适生区将向西北推进,其媒介昆虫亦呈协同扩散趋势。此外,人为因素如交通运输被证实显著加剧松材线虫病的扩散风险,凸显在强化自然防控基础上亟需加强人为传播路径的监测与管理(Gao *et al.*, 2024)。Dang 等(2021)在预测白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* 潜在适生区时,将其易感寄主植物的地理分布纳入 MaxEnt 模型。研究结果表明,该害虫的潜在

分布范围可能扩展至 71.23°N-55.96°S,凸显了寄主分布在模型预测中的重要作用。外来刺吸性害虫刺槐叶瘿蚊 *Obolodiplosis robinia* 已在中国刺槐林及城市绿地中广泛定殖。赵佳强和石娟(2019)基于中国 52 个虫害点位,结合参数优化的 MaxEnt 模型与 CCSM4 气候数据,模拟了刺槐叶瘿蚊在当前及未来气候情景下的适生区格局。发现目前该虫的适生范围已覆盖除青藏高原、海南和台湾外的中国大部分地区,未来在气候变暖背景下,其潜在分布区将持续向西北方向拓展。除 CLIMEX、MaxEnt 外,贝叶斯加性回归树(BARTs)等回归模型也显示出良好的适用性,已被用于模拟小火蚁 *Wasmannia auropunctata* 在中国南方的潜在分布(Wang *et al.*, 2024)。总体而言,基于生态位模型的适生区预测为重大林业有害生物的风险评估与区域化防控提供了关键支撑。未来应聚焦高适宜性风险区域,尽早采取检疫监测与综合防控措施,以遏制害虫扩散,维护森林生态系统稳定。

6.2 森林害虫的化学生态学防治

在森林害虫绿色防控研究中,通过利用调控昆虫行为的化学物质实现“以虫控虫”或“以植物控虫”,是构建可持续森林健康管理体系的重要板块。植物挥发物不仅影响植食性昆虫对寄主的选择,还能在害虫和天敌间构建复杂的信号网络。以红皮云杉为例,其树干释放的单萜类化合物对云杉八齿小蠹 *Ips typographus* 表现出明显的驱避作用,却可吸引该小蠹天敌红胸郭公甲 *Thanasimus substriatus*, 展现出“驱害引敌”的双重潜力(方加兴等, 2023)。除寄主自身的化感物质外,部分非寄主植物的叶片粗提物同样具备对害虫的忌避和毒杀效果。例如,种植含非寄主植物的混交林可干扰悬铃木方翅网蝽 *Corythucha ciliata* 的定殖过程,或将非寄主植物中的有效成分喷施于寄主植物表面,以干扰该害虫的取食行为(战鑫等, 2022)。

昆虫在生命活动中释放的信息素是其重要的化学交流方式,而基于信息素的技术已成为害虫精准诱控的重要手段。桃红颈天牛 *Aromia*

bungii 和光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 的人工合成信息素已被报道,并在林间试验中表现出一定的诱捕活性,为这二者的监测防控提供了可能性 (Zou *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020)。然而,与木蠹蛾类、墨天牛类和梢斑螟类害虫相比,这两种天牛的信息素野外引诱效果仍不够稳定,尚需在组分配比和装置应用方面进一步优化。沙棘木蠹蛾 *Eogystia hippophaecolus* 的性信息素组分已被解析并实现合成,在野外诱捕中取得良好效果;同时配合沙棘木蠹蛾幼虫虫口密度调查,可进一步推算虫龄结构和种群动态,为虫情预警和阈值制定提供支持 (高成龙等, 2017)。Ma 等 (2018) 在广州开展林间试验时,将松墨天牛雄虫释放的聚集信息素与植物源挥发物 α -蒎烯和 β -蒎烯混合作为诱芯,并将诱捕器悬挂于离地 1.5 m 高度,有效提升了诱捕效率。需要注意的是,当诱捕器设置于林缘外 100 m 区域时,诱虫量明显下降,表明该虫扩散能力有限,这一特性为设置空间隔离带提供了参考。信息素技术也被应用于危害嫩梢、球果等部位的鳞翅目害虫,特别是梢斑螟属 *Dioryctria* 害虫的监测与防控体系中。已有研究解析了多种梢斑螟性信息素组分,结合人工合成及诱捕器设计,开发出种类专一、诱效稳定的诱芯产品,广泛用于林区虫情调查与防控窗口期判定。以微红梢斑螟 *D. rubella* 为例,将性信息素成分明确、合成比例精确匹配的诱芯装载于三角形诱捕器后,在林地环境下表现出稳定可靠的诱捕能力,验证了信息素技术在鳞翅目害虫防控中的实际价值与适用前景 (宋玉双等, 2020; 张涛等, 2023)。

6.3 森林害虫的生物防治

生物防治是有效控制森林害虫的一种重要手段,具有对环境友好、对隐蔽性害虫防治效果较好的优点。生物防治的内容包括天敌昆虫的利用、病原微生物的利用及捕食性鸟类的利用等。当前应用上较为成熟的天敌包括赤眼蜂、蠋蝽 *Arma custos*、瓢虫等 (Zang *et al.*, 2021)。降低天敌的繁育成本、提高天敌在林间的防治效率,是推广天敌生物防治的关键。小花蝽属 *Orius* 的

昆虫可作为捕食性天敌用于介壳虫、蓟马、粉虱、螨虫等多种害虫的防治。Ren 等 (2022) 报道以冷冻的鳞翅目幼虫作为小花蝽的食料,可降低大规模饲养小花蝽的成本。将花绒寄甲的卵释放在林间的伐倒死树上可用于大规模防治松墨天牛越冬后的幼虫和蛹 (张彦龙等, 2014)。将昆虫病原真菌与捕食性螨结合防治西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的幼虫和成虫均取得较好的效果 (Zhang *et al.*, 2021)。球孢白僵菌对红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 的致死率高,接种球孢白僵菌会改变红脂大小蠹幼虫的肠道微生物群落,如提高欧文氏菌的丰度。球孢白僵菌和欧文氏菌协同作用可加速红脂大小蠹幼虫的死亡 (Xu *et al.*, 2019)。异小杆线虫属 *Heterorhabditis* 和斯氏线虫属 *Steinernema* 的线虫是防治地下害虫的生物制剂 (Wu and Duncan, 2022)。王晓丽等 (2016) 发现,利用茉莉酸诱导青杨产生抗性,再用舞毒蛾核多角体病毒 (LdNPV) 处理舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫,对舞毒蛾生长发育的抑制效果比单独使用 LdNPV 更好。通过悬挂人工鸟巢进行益鸟招引,可以提高食虫鸟类对森林害虫的防治效果。

6.4 森林害虫的物理防治

在害虫管理领域,使用简易机械工具,如草把、铁丝和石块等直接捕杀或诱杀害虫的传统物理防治技术一直占据着重要地位。随着现代物理技术的不断进步,辐射不育、超声波杀虫和微波杀虫等新技术不断出现。对昆虫的视觉感知能力及生活习性的深入调查,使得传统的诱杀法和捕杀法效率大大提高。Chen 等 (2010) 发现在距地面 1.5-2.0 m 处悬挂黑色或红色的窗口诱捕器对松重齿小蠹 *Ips duplicatus* 的诱捕效果较好。秋季修剪被苹小吉丁 *Agrilus mali* 取食的野生苹果林的枝干,可以杀死枝干中的吉丁幼虫 (Zhang *et al.*, 2024)。采用 ^{60}Co 射线辐照桑天牛 *Apriona germari*, 可使桑天牛的繁殖能力显著下降 (唐燕平等, 2014)。对舞毒蛾的卵块进行微波辐照,可降低虫卵的孵化率,甚至使虫卵全部死亡 (李景奎和戚大伟, 2007)。

6.5 森林害虫的化学防治

化学农药的大量使用引起了严重的环境污染,并加速了害虫抗药性的出现。因此,改善化学药剂的使用方法,开发植物源农药、昆虫生长调节剂等对环境友好、对害虫专一性高的新农药,是现今化学防治的重要课题。依兰花油中的乙酸戊烯酯和乙酸苄酯可吸引红火蚁 *Solenopsis invicta* 有翅雄蚁和雌蚁,在低浓度时这两种成分也可以引诱挖洞的工蚁,因此可开发为红火蚁的引诱剂 (Du *et al.*, 2021)。苯甲酰脲类化合物可以抑制昆虫几丁质的合成,对于小蠹虫科和天牛科害虫的防治效果较好 (赵悦成等, 2023)。农药混剂的使用可以减少单剂的用药量,延缓害虫对单剂抗药性的发展。如与单剂相比, Bt 和灭幼脲的混剂可以显著抑制美国白蛾 4 龄幼虫的活性,进而削弱其取食能力 (徐明等, 2015)。使用化学不育技术可以从根本上防治害虫,如有研究表明不育胺和六磷胺对红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* 具有较好的不育效应 (李庆等, 2021)。

7 展望

近年来,随着理论深化与技术革新,中国森林昆虫学在多个研究领域均取得显著进展。分类学方面,尽管中国森林昆虫的系统调查起步较晚,新中国成立后才逐步开展大规模种类普查,但通过实地调查,研究人员已采集大量标本,为新属新种的发现奠定了坚实基础 (杨星科和赵建铭, 2000)。当前分类鉴定仍以形态特征为主,然而高通量测序等分子生物学手段的广泛应用,极大提升了对近缘种、亚种及隐种的识别能力,弥补了形态学鉴定的不足。尽管如此,森林昆虫的分类工作仍面临一些挑战,包括分类体系不统一、大量同种异名未修订、昆虫标本采集不足等问题 (周娟, 2023)。森林昆虫的系统发育研究最初也是基于形态学分析,自 20 世纪 90 年代起,随着蛋白质和 DNA 测序技术的发展,关于昆虫系统发育的研究论文数量快速增加。当前,线粒体基因组学是国内研究昆虫系统发育的主要手

段,它因基因数据易获取且有助于构建系统发育树而被广泛应用。然而,线粒体基因组分析仍存在一些问题,如第三密码子位置的选择可能影响系统发育分析结果、线粒体基因的组成和突变倚倚导致的系统误差难以避免,以及其不适用于昆虫的高级分类 (Mao *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2016)。未来的研究应进一步融合分子生物学技术与传统形态学方法,特别是在高通量测序技术和基因组学不断发展的背景下,如何结合这些新技术与形态学特征进行准确的昆虫种群分类和鉴定将是一个重要方向。此外,昆虫系统发育研究还应避免线粒体基因组数据带来的潜在误差,未来可考虑多组学联合分析,并重视分析模型的选择,寻找更可靠的系统发育树构建方法将是下一步的研究重点。

20 世纪以来,中国森林昆虫的生物地理学在昆虫区系和地理分布等方面开展了详细研究,随着多元统计学等数学工具的发展,解决了以往难以对海量昆虫地理分布数据处理分析的难题;同时分子生物技术的应用,促使将昆虫的系统发育与地理分布结合起来,探究昆虫的起源、分化与扩散成为现今昆虫生物地理学研究的主流方向 (宗靖淞, 2022)。未来研究应结合环境变化和气候变迁等因素,深入探讨昆虫的地理隔离、适应性演化,尤其是害虫对新寄主的适应机制及其遗传基础 (刘雲祥, 2020)。此外,如何将分子生物学技术与古环境学、地质事件等学科更好地结合,将是未来生物地理学研究亟待解决的科学问题。

森林昆虫的共生微生物是近年来的研究热点,目前,对昆虫共生微生物的种类、分布、传播模式及其与昆虫的相互关系都有研究;但学者们对昆虫共生微生物的研究主要针对昆虫的肠道微生物,而忽略了对其他共生微生物的研究。由于许多微生物难以体外培养,增加了解析这些微生物功能的挑战。同时,共生微生物如何与其寄主生物学相协调,这一问题也需要进一步研究 (Luan, 2024)。

中国森林昆虫的生态学过去主要研究害虫在林间的发生规律、种群和空间动态等,现今多

研究森林生态系统中各个营养级与昆虫之间的相互作用,以及环境因子对昆虫生态学行为的影响 (Fei *et al.*, 2023)。这些研究往往忽视了食物网的复杂性和多维度因素的影响。未来的研究应从更系统的视角出发,考虑多层次、多维度的生态学因素,深入理解不同营养级之间的相互作用。随着全球气候变化的加剧,昆虫种群动态、空间分布及其与气候的关系将成为未来研究的热点 (Fei *et al.*, 2023)。

在森林昆虫生物学研究不断深入的背景下,中国森林害虫防治工作取得了显著进展,逐步制定了较为完善的系统化防控策略。国家重点研发计划和国家林草局“揭榜挂帅”项目为研究提供了顶层设计和持续支撑,在“机制解析-监测技术-防控方法-应用示范”各环节形成了协同推进的研发格局。自 2017 年以来,多项重大科研项目围绕人工林灾害防控、外来入侵生物扩张机制、生物防控关键技术及病虫演替规律等方向展开,推动了中国森林害虫治理体系的科学升级。如“十三五”时期先后启动了“人工林重大灾害的成灾机理和调控机制”、“人工林重大灾害防控关键技术研究”和“森林生态系统重要生物危害因子综合防控关键技术研究”等项目,为阐明森林病虫害发生演变规律、探索多因子互作机制和集成防控技术奠定了基础。“十四五”以来,“重大林草入侵生物扩张蔓延机制与高效防控技术研究”、“重大外来入侵物种适应性演化与进化机制研究”、“防护林病虫害演替规律与全程绿色防控技术体系集成示范”以及“商品林病虫害演替规律与全程绿色防控技术体系集成示范”等项目陆续实施,重点攻关外来物种适应性进化、重大病虫害灾变机制、智能化监测预警、人工林与商品林的绿色防控模式等核心问题。特别是 2024 年启动的“森林生态系统入侵病虫持久型主动防御技术体系与产品研究”,标志着中国森林病虫害治理逐步迈向主动预警与干预的新阶段。在“揭榜挂帅”项目中,“松材线虫病灾变机制与可持续防控技术研究”项目中研发的喷洒制剂“联邦 1 号”,能够同时靶标松材线虫及其媒介昆虫,实现病原与传播环节的同步干预,体现了

将媒介昆虫纳入防控体系的战略意义。“三北工程攻坚战关键技术研发”项目则面向防护林区的重大生物胁迫,重点突破蛀干害虫的灾变机制解析与精准防控,计划通过多源大数据与天空地一体化监测预警手段,构建适应区域性差异的害虫生态调控技术体系,并在西北和东北典型区域建立规模化示范基地。这些研究内容不仅回应了中国森林重大病虫害综合治理的紧迫需求,也体现了国家层面对森林健康保障“可防、可控、可治”的战略导向。科技成果方面亦屡获国家级奖励,如 2017 年“中国松材线虫病流行规律与防控新技术”、2018 年“灌木林虫灾发生机制与生态调控技术”及“林业病虫害防治高效施药关键技术与装备创制及产业化”等项目均获国家科技进步二等奖。这些成果充分展现了中国在森林害虫防控领域的持续创新能力。

在取得丰硕成果的同时,仍需深入反思现有不足,把握未来发展关键方向。目前,遥感技术虽已可用于监测树木受害后的症状表现,但对致害昆虫种类的精准识别尚未实现,树木病变特征与致害因子之间的系统关联研究仍显薄弱。同时,实现受害树木早期症状的高精度识别,有赖于更高灵敏度传感器的研发 (Luo *et al.*, 2023)。生态位建模技术已广泛应用于林业有害生物的风险评估与预警系统中,但其在整合天敌调控、栖息地破碎化和人为干预等非气候因子方面仍存在局限,且在入侵初期样本不足的情境下,模型训练往往难以达到理想精度。此外,气候数据源的差异性及其空间分辨率的选取也对预测结果的可靠性构成挑战。因此,亟需整合多源数据、构建多维变量体系,并加强模型不确定性量化分析,以增强其实用性与决策支撑价值 (Ge *et al.*, 2019; 赵佳强和石娟, 2019; Gao *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2025)。

在监测与防控技术方面,基于半化学品的行为调控策略正获得越来越广泛的应用。一些商品化诱剂已投入实用,但其释放周期短、携带装置不便等问题,仍在一定程度上限制了其在大尺度防控中的推广。未来需要深入解析信息素与植物挥发物的协同作用机制,优化释放系统设计,并

建立诱捕数据与真实种群密度之间的定量关系, 从而提升诱捕的精准性与监测实效 (Ma *et al.*, 2018)。同时, 大量潜在信息素与寄主植物挥发物尚未被鉴定, 严重制约了推拉策略在林业中的广泛应用 (Zou *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020)。在生物防治方面, 还需加大对高效天敌资源的筛选与生态适应性评估, 提升生防制剂的规模化生产与成本控制能力, 以增强其在害虫防控中的减灾效果。总之, 未来中国森林昆虫研究应在强化基础研究的同时, 更加注重跨学科融合与技术集成, 推动从机理研究到精准治理的转变, 构建系统化、智能化、可持续的森林昆虫防控新范式。

参考文献 (References)

- Aldrich JR, Zhang QH, 2016. Chemical ecology of Neuroptera. *Annual Review of Entomology*, 61: 197–218.
- Bai L, Cai XL, Li MY, Wang FX, Zou CS, Zhang JS, Xie MY, Qi FH, Jing TZ, 2023. Countering beta-cypermethrin: Partitioning roles of the insect gut and its bacteria. *Journal of Pest Science*, 96(3): 1243–1255.
- Cai XN, Zhang RN, Li Y, Li J, Huang DZ, 2019. Application of landmarks on digital classification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 41(1): 106–112. [蔡小娜, 张若楠, 李阳, 李晶, 黄大庄, 2019. 地标点法在夜蛾昆虫数字化分类中的应用研究. 环境昆虫学报, 41(1): 106–112.]
- Chen GF, Zhang QH, Wang YJ, Liu GT, Zhou XM, Niu JF, Schlyter F, 2010. Catching *Ips duplicatus* (Sahlberg) (Coleoptera: Scolytidae) with pheromone-baited traps: Optimal trap type, colour, height and distance to infestation. *Pest Management Science*, 66(2): 213–219.
- Chen Q, Xu ZC, Zhang LS, Lu PF, Zhang YF, 2018. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Arhopalus rusticus* larvae and adults. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 975–983. [陈潜, 许志春, 张连生, 陆鹏飞, 张永福, 2018. 褐梗天牛幼虫和成虫空间分布的地统计学研究. 生态学报, 38(3): 975–983.]
- Cheng R, Jiang N, Xue DY, Li XX, Ban XS, Han HX, 2016. The evolutionary history of *Biston suppressaria* (Guenée) (Lepidoptera: Geometridae) related to complex topography and geological history. *Systematic Entomology*, 41(4): 732–743.
- Cheng R, Luo AR, Orr M, Ge DY, Hou ZE, Qu YH, Guo BC, Zhang F, Sha ZL, Zhao Z, Wang MQ, Shi XY, Han HX, Zhou QS, Li YN, Liu XY, Shao C, Zhang AB, Zhou X, Zhu CD, 2025. Cryptic diversity begets challenges and opportunities in biodiversity research. *Integrative Zoology*, 20(1): 33–49.
- Cheng XT, Adil-Sattar, Zhang W, Li XQ, 2014. Sequence analysis of mitochondrial *Cytb* gene of four geographic populations of *Carpomya vesuviana*. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(3): 144–150. [程晓甜, 阿地力·沙塔尔, 张伟, 李新泉, 2014. 枣实蝇 4 个地理种群的线粒体 *Cytb* 基因序列分析. 林业科学, 50(3): 144–150.]
- Chesters D, Wang Y, Yu F, Bai M, Zhang TX, Hu HY, Zhu CD, Li CD, Zhang YZ, 2012. The integrative taxonomic approach reveals host specific species in an encyrtid parasitoid species complex. *PLoS ONE*, 7(5): e37655.
- Dang YQ, Zhang YL, Wang XY, Xin B, Quinn NF, Duan JJ, 2021. Retrospective analysis of factors affecting the distribution of an invasive wood-boring insect using native range data: The importance of host plants. *Journal of Pest Science*, 94(3): 981–990.
- Du YZ, Zhou AM, Chen J, 2021. Olfactory and behavioral responses of red imported fire ants, *Solenopsis invicta*, to ylang ylang oil and its components. *Journal of Pest Science*, 94(3): 1031–1044.
- Fan TT, Gao SK, Meng FL, Yin HZ, Li C, Wang QH, Zhou CG, 2019. Prediction of suitable distribution regions of a new invasive pest: *Chrysaster ostensackenella* (Lepidoptera: Gracillariidae) in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(6): 86–95. [樊婷婷, 高尚坤, 孟凡玲, 尹红增, 李超, 王庆华, 周成刚, 2019. 外来入侵新害虫刺槐突瓣细蛾在中国的适生区预测. 林业科学, 55(6): 86–95.]
- Fang JX, Wang Y, Deng M, Yu CM, Liu F, Zhang SF, Zhang Z, Kong XB, 2023. Toxicity and behavioral regulatory effects of monoterpenes in *Picea koraiensis* to the bark beetle *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 59(4): 132–138. [方加兴, 王越, 邓梅, 于春梅, 刘福, 张苏芳, 张真, 孔祥波, 2023. 红皮云杉主要单萜烯对云杉八齿小蠹的毒性及行为调控作用. 林业科学, 59(4): 132–138.]
- Fei MH, Gols R, Harvey JA, 2023. The biology and ecology of parasitoid wasps of predatory arthropods. *Annual Review of Entomology*, 68: 109–128.
- Gao BY, 2021. Ecosystem functions and orientation strategies of high-flying insects. Doctor dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [高博雅, 2021. 空中虫群的生态功能及定向策略. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Gao SK, Zhang YL, Tang YL, Yang ZQ, Wang XY, Lu JF, Wang J, Situ CN, Fu FY, 2016. Overwintering characteristics and cold-hardiness of biotype of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothriidae) on *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 52(3): 68–74. [高尚坤, 张彦龙, 唐艳龙, 杨志岐, 王小艺, 路纪芳,

- 王健, 司徒春南, 付甫永, 2016. 花绒寄甲松褐天牛生物型的越冬特性及耐寒性. *林业科学*, 52(3): 68–74.]
- Gao CL, Du KM, Wang SM, Zhang LS, Ma YB, Lu PF, Luo YQ, 2017. Population dynamics of *Eogystia hippophaecolus* in Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 971–977. [高成龙, 杜凯名, 王胜梅, 张连生, 马云波, 陆鹏飞, 骆有庆, 2017. 沙棘木蠹蛾成虫种群发生动态与性诱剂诱捕监测技术. *应用昆虫学报*, 54(6): 971–977.]
- Gao RH, Liu L, Fan SM, Zheng WF, Liu RY, Zhang ZW, Huang RF, Zhao LJ, Shi J, 2024. Occurrence and potential diffusion of pine wilt disease mediated by insect vectors in China under climate change. *Pest Management Science*, 80(12): 6068–6081.
- Gao WT, Chen YB, Meng QF, 2014. Faunal composition and vertical distribution characteristics of Cerambycidae in Changbai Mountain reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(9): 89–96. [高文韬, 陈玉宝, 孟庆繁, 2014. 长白山自然保护区天牛科昆虫区系及其垂直分布特点. *林业科学*, 50(9): 89–96.]
- Ge XZ, He SY, Zhu CY, Wang T, Xu ZC, Zong SX, 2019. Projecting the current and future potential global distribution of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) using CLIMEX. *Pest Management Science*, 75(1): 160–169.
- Hu HC, Zhou HW, Li YX, Li YZ, Yan YB, Yang J, Chen J, Chen YM, Cui D, 2025. The involvement of human factors brings new findings for predicting global suitability habitat for *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae). *Ecology and Evolution*, 15(5): e71421.
- Li JK, Nel A, Zhang XP, Fleck G, Gao MX, Lin L, Zhou J, 2012. A third species of the relict family Epiophlebiidae discovered in China (Odonata: Epiproctophora). *Systematic Entomology*, 37(2): 408–412.
- Li JK, Qi DW, 2007. Influence of electromagnetic radiation on the hatchability of gypsy moth. *Forest Pest and Disease*, 26(2): 9–11. [李景奎, 戚大伟, 2007. 电磁辐射对舞毒蛾卵孵化率的影响. *中国森林病虫*, 26(2): 9–11.]
- Li YJ, 2021. Invasion origin of *Opisina arenosella* Walker and effect of temperature and relative humidity the population dynamics. Master dissertation. Haikou: Hainan University. [李优佳, 2021. 椰子织蛾入侵来源及温湿度、天敌对其种群动态影响. 硕士学位论文. 海口: 海南大学.]
- Li ML, 2015. Forest Conservation Discipline Development Footprint. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University Press. 17. [李孟楼, 2015. 森林保护学科发展足迹. 杨凌: 西北农林科技大学出版社. 17.]
- Li Q, Li ZX, Lü ZJ, Zhong BZ, Huang SC, Gao X, 2021. Sterility test about two kinds of chemosterilants to *Rhynchophorus ferrugineus* adult. *Forest Pest and Disease*, 40(6): 18–23. [李庆, 李朝绪, 吕朝军, 钟宝珠, 黄山春, 高熹, 2021. 两种不育剂对红棕象甲成虫的不育效果. *中国森林病虫*, 40(6): 18–23.]
- Li QC, Shi QX, Lei YY, Lin T, Qi GJ, He YR, Lü LH, 2019. Advances on research and techniques for insect cuticular hydrocarbons analysis and their practice in chemical taxonomy in China. *Journal of Environmental Entomology*, 41(1): 62–69. [李群臣, 石庆型, 雷妍圆, 林涛, 齐国君, 何余容, 吕利华, 2019. 中国昆虫表皮碳氢化合物与昆虫化学分类学的研究进展. *环境昆虫学报*, 41(1): 62–69.]
- Li SY, Li H, Wang JT, Chen C, Hao DJ, 2023. Hormetic response and co-expression of cytochrome *P450* and cuticular protein reveal the tolerance to host-specific terpenoid defences in an emerging insect pest, *Pagiophloeus tsushimanus* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Pest Science*, 96(1): 141–160.
- Liang Y, Hong YH, Mai ZH, Zhu QJ, Guo LX, 2019. Internal and external microbial community of the *Thitarodes* moth, the host of *Ophiocordyceps sinensis*. *Microorganisms*, 7(11): 517.
- Liu JL, 2023. The phylogeny and female reproductive traits evolution of blattodea based on transcriptomics data. Doctor dissertation. Chongqing: Southwest University. [刘金林, 2023. 基于转录组数据的蜚蠊目系统发育与雌性生殖特征演化. 博士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Liu QQ, Zhou JC, Zhang C, Ning SF, Duan LJ, Dong H, 2019. Co-occurrence of thelytokous and bisexual *Trichogramma dendrolimi* Matsumura (Hymenoptera: Trichogrammatidae) in a natural population. *Scientific Reports*, 9(1): 17480.
- Liu SH, Yang JT, Cui JX, 2020. Characteristics and identification of wavelet packet of wood boring vibration by three longicorn larvae. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(12): 91–100. [刘圣煌, 杨江天, 崔建新, 2020. 3 种天牛幼虫蛀食振动小波包特征及其识别. *林业科学*, 56(12): 91–100.]
- Liu TY, Chen J, Zhu XC, Li CL, Jiang LY, Wiecezorek K, Qiao GX, 2022. Molecular phylogeny and macroevolution of Chaitophorinae aphids (Insecta: Hemiptera: Aphididae). *Systematic Entomology*, 47(2): 303–314.
- Liu WM, Xie YP, Xue JL, Zhang YF, Tian F, Yang Q, Wu J, Tang XJ, Geng YL, Zhang YW, Zhao CS, 2015. Morphology, behavior and natural enemies of *Matsucoccus matsumurae* (Homoptera: Matsucoccidae) during development. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(7): 69–83. [刘卫敏, 谢映平, 薛皎亮, 张艳峰, 田芬, 杨铃, 吴俊, 唐喜军, 耿以龙, 张英伟, 赵常胜, 2015. 日本松干蚧 (同题目: 松干蚧科) 发育过程中形态、习性及天敌. *林业科学*, 51(7): 69–83.]
- Liu XX, Sun Y, Cui J, Jiang Q, Chen ZB, Luo YQ, 2021. Early

- recognition of feeding sound of trunk borers based on artificial intelligence. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(10): 93–101. [刘璇昕, 孙钰, 崔剑, 蒋琦, 陈志泊, 骆有庆, 2021. 钻蛀性害虫取食声音的人工智能早期识别. 林业科学, 57(10): 93–101.]
- Liu YX, 2020. Phylogeography of four Cicada species from China and adaptive evolution of *Subpsaltria yangi*. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [刘云祥, 2020. 四种中国蝉科昆虫谱系地理学研究暨枯蝉适应性进化研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Liu YX, Qiu Y, Wang X, Yang H, Hayashi M, Wei C, 2018. Morphological variation, genetic differentiation and phylogeography of the East Asia cicada *Hyalessa maculaticollis* (Hemiptera: Cicadidae). *Systematic Entomology*, 43(2): 308–329.
- Lu YH, Wu KM, 2011. Effect of relative humidity on population growth of *Apolygus lucorum* (Heteroptera: Miridae). *Applied Entomology and Zoology*, 46(3): 421–427.
- Luan JB, 2024. Insect bacteriocytes: Adaptation, development, and evolution. *Annual Review of Entomology*, 69: 81–98.
- Luo YQ, Huang HG, Roques A, 2023. Early monitoring of forest wood-boring pests with remote sensing. *Annual Review of Entomology*, 68: 277–298.
- Ma CS, Ma G, Pincebourde S, 2021. Survive a warming climate: Insect responses to extreme high temperatures. *Annual Review of Entomology*, 66: 163–184.
- Ma T, Shi XH, Shen J, Wang C, Zhang SN, Lu XL, Sun ZH, Chen XY, Wang CL, Xie WL, Wen XJ, 2018. Field evaluation of commercial attractants and trap placement for monitoring pine sawyer beetle, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in Guangdong, China. *Journal of Economic Entomology*, 111(1): 239–246.
- Mao M, Gibson T, Dowton M, 2015. Higher-level phylogeny of the Hymenoptera inferred from mitochondrial genomes. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 84: 34–43.
- Peng X, Wang HT, Guo CH, Yang ZD, Zhou J, Wang X, Ding ZR, 2021. EST-SSR development and cryptic species identification of the invasive gall-causing pest *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 57(9): 140–151. [彭欣, 王瀚棠, 郭春晖, 杨振德, 周静, 王雪, 丁芷柔, 2021. 入侵性致瘿害虫桉树枝瘿姬小蜂 (膜翅目: 姬小蜂科) EST-SSR 开发及隐种鉴定. 林业科学, 57(9): 140–151.]
- Qin YY, 2023. The male and female reproductive systems and molecular phylogeny of Chlaeniini from China (Coleoptera, Carabidae). Master dissertation. Baoding: Hebei University. [秦雨瑶, 2023. 中国青步甲族雌雄生殖系统及分子系统学研究. 硕士学位论文. 保定: 河北大学.]
- Qing W, Adil-Sattar, Yan WB, 2016. Bionomics of *Apocheima cinerarius* Erschoff. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 174–184. [卿薇, 阿地力·沙塔尔, 闫文兵, 2016. 春尺蠖生物学特性研究. 应用昆虫学报, 53(1): 174–184.]
- Ren LL, Tao J, Wu HW, Zong SX, Wang CZ, Hua D, Shi J, Liu YZ, Luo YQ, 2021. The first discovery and infective characteristics of a major invasive pest *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Scolytidae) in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(5): 140–150. [任利利, 陶静, 武海卫, 宗世祥, 王传珍, 华德, 石娟, 刘漪舟, 骆有庆, 2021. 重大害虫长林小蠹入侵我国的首次发现与侵染特征. 林业科学, 57(5): 140–150.]
- Ren XY, Huang J, Li XW, Zhang JM, Zhang ZJ, Chen LM, Hafeez M, Zhou SX, Lu YB, 2022. Frozen lepidopteran larvae as promising alternative factitious prey for rearing of *Orius* species. *Entomologia Generalis*, 42(6): 959–966.
- Shao YQ, Mason CJ, Felton GW, 2024. Toward an integrated understanding of the Lepidoptera microbiome. *Annual Review of Entomology*, 69: 117–137.
- Song F, Li H, Jiang P, Zhou XG, Liu JP, Sun CH, Vogler AP, Cai WZ, 2016. Capturing the phylogeny of holometabola with mitochondrial genome data and Bayesian site-heterogeneous mixture models. *Genome Biology and Evolution*, 8(5): 1411–1426.
- Song YS, Li J, Zhou YT, Zhang TD, 2020. Advances in research and control of *Dioryctria* pests in China. *Forest Pest and Disease*, 39(6): 29–41. [宋玉双, 李娟, 周艳涛, 张天栋, 2020. 我国梢斑螟属害虫研究及防治进展. 中国森林病虫, 39(6): 29–41.]
- Su JJ, Zhang ZY, Xu JJ, Li B, Lü J, Yao Q, 2023. Forest pest identification method based on a deep bilinear transformation attention mechanism network. *Scientia Silvae Sinicae*, 59(2): 121–128. [苏佳杰, 张哲宇, 徐嘉俊, 李彬, 吕军, 姚青, 2023. 基于深度双线性转换注意力机制网络的林业有害生物识别方法. 林业科学, 59(2): 121–128.]
- Tang YP, Fang GF, Su YD, Ding YZ, Zhang T, Xie F, Wang TS, 2014. Control of *Apriona germari* by radiation sterility technology. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(9): 180–183. [唐燕平, 方国飞, 苏远达, 丁玉洲, 张铁, 谢菲, 王同生, 2014. 应用辐射不育技术防治杨树虫害桑天牛. 林业科学, 50(9): 180–183.]
- Wang F, Fang Q, Wang BB, Yan ZC, Hong J, Bao YM, Kuhn JH, Werren JH, Song QS, Ye GY, 2017. A novel negative-stranded RNA virus mediates sex ratio in its parasitoid host. *PLoS Pathogens*, 13(3): e1006201.
- Wang HF, Xiao YJ, Chen X, Zhang MW, Sun GX, Wang F, Wang L, Zhang HX, Zhang XY, Yang X, Li WL, Wei Y, Yao DQ, Zhang B, Li J, Cui W, Wang FH, Chen C, Shen W, Su D, Bai F, Huang JH,

- Ye S, Zhang L, Ji XY, Wang W, Wang ZF, Hochstrasser M, Yang HT, 2022a. Crystal structures of *Wolbachia* CidA and CidB reveal determinants of bacteria-induced cytoplasmic incompatibility and rescue. *Nature Communications*, 13(1): 1608.
- Wang HR, Sui X, Wang XY, Xiao JH, Gao X, Wang HB, 2024. Invasion alert for *Wasmannia auropunctata*: A potential distribution in Southern China and associated invasion risk to urban, rural, agricultural, and forest lands. *Journal of Pest Science*, 97(2): 597–612.
- Wang XL, Li HP, Jia CY, Duan LQ, 2016. Effects of induced resistance of *Populus cathayana* by jasmonic acid and LdNPV on nutritional utilization of *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 52(10): 96–101. [王晓丽, 李海平, 贾程宇, 段立清, 2016. 茉莉酸诱导青杨抗性及其核型多角体病毒对舞毒蛾幼虫食物利用的影响. 林业科学, 52(10): 96–101.]
- Wang XY, Wei K, Yang ZQ, Jennings DE, Duan JJ, 2016. Effects of biotic and abiotic factors on phenotypic partitioning of wing morphology and development in *Sclerodermus pupariae* (Hymenoptera: Bethyilidae). *Scientific Reports*, 6: 26408.
- Wang YJ, Lu JM, Sun RH, Gomez DF, Hulcr J, Li YZ, Li Y, Gao L, 2022b. Uncovering hidden diversity within the *Euwallacea fornicatus* species complex in China. *Entomologia Generalis*, 42(4): 631–639.
- Wei C, Webb MD, Zhang YL, 2010. A review of the morphologically diverse leafhopper subfamily Stegelytrinae (Hemiptera: Cicadellidae) with description of new taxa. *Systematic Entomology*, 35(1): 19–58.
- Wu CX, Zang LP, Zhang SF, Kong XB, Liu F, Zhang Z, Li Y, Xu FL, Huang GY, 2020. Spatial distribution patterns of three sympatric *Tomicus* species initially infesting *Pinus yunnanensis* trunks. *Acta Ecologica Sinica*, 40(11): 3646–3655. [武承旭, 臧丽鹏, 张苏芳, 孔祥波, 刘福, 张真, 李猷, 徐芳玲, 黄桂英, 2020. 云南松三种同域共存切梢小蠹梢转干期的空间分布格局. 生态学报, 40(11): 3646–3655.]
- Wu SY, Duncan LW, 2022. Entomopathogenic nematode species combinations alter rates of dispersal, host encounter and insecticidal efficiency. *Journal of Pest Science*, 95(3): 1111–1119.
- Xiao ZT, Xu X, Liang QL, Zhu CY, He XY, Hu RL, He YR, Wang DS, 2024. *Wolbachia* titers are related to sex determination of *Trichogramma pretiosum*. *Journal of Pest Science*, 97(4): 1879–1888.
- Xu LT, Deng JD, Zhou FY, Cheng CH, Zhang LW, Zhang J, Lu M, 2019. Gut microbiota in an invasive bark beetle infected by a pathogenic fungus accelerates beetle mortality. *Journal of Pest Science*, 92(1): 343–351.
- Xu M, Xu FY, Wu XQ, 2015. Effects of the mixture of bt and chlorbenzuron on the activity of midgut proteinase, haemolymph proteins on 4th instar larvae of *Hyphantria cunea*. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(11): 137–144. [徐明, 徐福元, 吴小芹, 2015. Bt+灭幼脉混剂对美国白蛾幼虫中肠蛋白酶、血淋巴蛋白的影响. 林业科学, 51(11): 137–144.]
- Xu T, Hansen L, Cha DH, Hao DJ, Zhang LW, Teale SA, 2020. Identification of a female-produced pheromone in a destructive invasive species: Asian longhorn beetle, *Anoplophora glabripennis*. *Journal of Pest Science*, 93(4): 1321–1332.
- Xue S, Zhang YC, Gao SS, Wang JS, Zhang KP, 2021. Ultramorphology of female *Andricus moriokae* (Hymenoptera: Cynipidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 57(8): 112–120. [薛爽, 张元臣, 高姗姗, 王景顺, 张坤朋, 2021. 盛冈纹瘿蜂(膜翅目: 瘿蜂科)雌虫的超微形态. 林业科学, 57(8): 112–120.]
- Yang SY, Zhan HX, Zhang F, Babendreier D, Zhong YZ, Lou QZ, Zhong Y, Zhang JP, 2018. Development and fecundity of *Trissolcus japonicus* on fertilized and unfertilized eggs of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*. *Journal of Pest Science*, 91(4): 1335–1343.
- Yang XK, Zhao JM, 2000. Fifty years of insect taxonomy research in China. *Entomological Knowledge*, 37(1): 1–11. [杨星科, 赵建铭, 2000. 中国昆虫分类研究的五十年. 昆虫知识, 37(1): 1–11.]
- Yang ZQ, Cao LM, Wang XY, Liu HH, Wu YJ, Jiang XJ, Luo J, 2023. An important invasive pest of *Eucalyptus* trees, *Ophelimus maskelli* (Ashmead) (Hymenoptera: Eulophidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 59(8): 85–89. [杨忠岐, 曹亮明, 王小艺, 刘慧慧, 吴耀军, 蒋学建, 罗缉, 2023. 一种重要的桉树外来入侵害虫: 桉树叶瘿球角姬小蜂(膜翅目: 姬小蜂科). 林业科学, 59(8): 85–89.]
- Yang ZQ, Tang H, Wang XY, Wei JR, Zhao HB, 2013. A new species of *Cerchysiella* (Hymenoptera: Encyrtidae) parasitic in larva of chestnut trunk borer (Coleoptera: Cerambycidae) from China with notes on its biology. *Journal of Natural History*, 47(3/4): 129–138.
- Yu XL, Zhang YJ, Zuo JF, Luo X, Zhang L, Danzeng ZM, Wang B, Xia PL, Zhang SZ, Liu TX, Feng Y, 2023. Rising temperatures affect the interspecific interference competition between *Harmonia axyridis* and *Propylea japonica*, and their predation rate on *Myzus persicae*. *Journal of Pest Science*, 96(2): 695–709.
- Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status, and

- perspectives. *Annual Review of Entomology*, 66: 463–484.
- Zhan AR, 2021. Rapid identification techniques for important invasive mealybug species and their close relatives. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [湛安然, 2021. 重要粉蚧入侵种及其近似种的快速鉴定技术研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.]
- Zhan X, Zhuang M, Li GH, Yin SY, 2022. Biological activity of crude extracts from leaves of seven non-host plants against *Corythucha ciliata* adults (Hemiptera: Tingidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 58(7): 156–162. [战鑫, 庄敏, 李国华, 尹淑艳, 2022. 7 种非悬铃木方翅网蝽寄主植物叶片粗提物对其成虫的生物活性. 林业科学, 58(7): 156–162.]
- Zhang L, Li Y, Smith SM, Wang JG, 2021. *Scolytus jiulianshanensis*, a new species of bark beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) from elm in China. *Zootaxa*, 5057(2): 295–300.
- Zhang P, Li YF, Wang T, Zhang X, Zhang YL, Xu H, Jashenko R, Dong ZK, Zalucki MP, Lu ZZ, 2024. Pruning can recover the health of wild apple forests attacked by the wood borer *Agrilus mali* in central Eurasia. *Entomologia Generalis*, 44(3): 545–552.
- Zhang T, Li HW, Qiu XJ, Zhang L, Shi WP, Yu YX, 2023. Screening and application of pheromone attractants to monitor and control *Dioryctria rubella* Hampson in forest. *Forest Pest and Disease*, 42(5): 7–13. [张涛, 李红卫, 仇学建, 张柳, 石旺鹏, 于艳雪, 2023. 微红梢斑螟引诱剂的林间筛选. 中国森林病虫, 42(5): 7–13.]
- Zhang XR, Wu SY, Reitz SR, Gao YL, 2021. Simultaneous application of entomopathogenic *Beauveria bassiana* granules and predatory mites *Stratiolaelaps scimitus* for control of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Pest Science*, 94(1): 119–127.
- Zhang YL, Yang ZQ, Zhang YN, Wang XY, Wu CJ, Ma SF, Lu ZG, 2014. Biocontrol of the overwinter *Monochamus alternatus* with *Dastarcus helophoroides*. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(3): 92–98. [张彦龙, 杨忠岐, 张翌楠, 王小艺, 吴成进, 马生福, 陆之贵, 2014. 利用花绒寄甲防治越冬后松褐天牛试验. 林业科学, 50(3): 92–98.]
- Zhao JQ, Shi J, 2019. Prediction of the potential geographical distribution of *Obolodiplosis robiniae* (Diptera: Cecidomyiidae) in China based on a novel maximum entropy model. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(2): 118–127. [赵佳强, 石娟, 2019. 基于新型最大熵模型预测刺槐叶瘿蚊(双翅目: 瘿蚊科)在中国的适生区. 林业科学, 55(2): 118–127.]
- Zhao YC, Li XP, Zhang KP, Zuo TT, Ding ZJ, Song LW, 2023. Application and mechanism of benzoylurea insecticides in forestry pest control. *Forest Pest and Disease*, 42(2): 39–45. [赵悦成, 李兴鹏, 张凯鹏, 左彤彤, 丁仲京, 宋丽文, 2023. 苯甲酰脲类杀虫剂作用机理及在林业害虫防治中的应用. 中国森林病虫, 42(2): 39–45.]
- Zhao ZH, Carey JR, Li ZH, 2024. The global epidemic of *Bactrocera* pests: Mixed-species invasions and risk assessment. *Annual Review of Entomology*, 69: 219–237.
- Zheng YN, Tang YL, Yang ZQ, Tang H, 2014. Characteristics of supplementary nutrition feeding of *Massicus raddei* (Coleoptera: Cerambycidae) adults and the main components of the fed-sap of host tree *Quercus mongolica*. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(12): 156–160. [郑雅楠, 唐艳龙, 杨忠岐, 唐桦, 2014. 栗山天牛成虫补充营养方式及所取食的寄主树液中的主要化学成分. 林业科学, 50(12): 156–160.]
- Zhou J, 2023. Systematic study of *Eupteryx* complex from China (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae: Typhlocybini). Doctor dissertation. YangLing: Northwest A&F University. [周娟, 2023. 中国蒿小叶蝉属团系统分类研究(半翅目: 叶蝉科: 小叶蝉亚科: 小叶蝉族). 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Zhou YT, Guo SW, Wang T, Zong SX, Ge XZ, 2024. Modeling the pest-pathogen threats in a warming world for the red turpentine beetle (*Dendroctonus valens*) and its symbiotic fungus (*Leptographium procerum*). *Pest Management Science*, 80(7): 3423–3435.
- Zong JS, 2022. Phylogenetic and biogeography of the genus *Diastramima* in China. Master dissertation. Shanghai: East China Normal University. [宗靖淞, 2022. 中国突灶螽属系统分类和生物地理学研究. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学.]
- Zou YF, Hansen L, Xu T, Teale SA, Hao DJ, Millar JG, 2019. Optimizing pheromone-based lures for the invasive red-necked longhorn beetle, *Aromia bungii*. *Journal of Pest Science*, 92(3): 1217–1225.