

中国昆虫资源研究 60 年进展

姜轶杰¹ 石志辉¹ 张 杰¹ 朱 芬^{1*} 雷朝亮^{2*}

(1. 华中农业大学植物科学技术学院, 昆虫资源利用与害虫可持续治理湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学昆虫资源研究所, 武汉 430070)

摘要: 昆虫资源多样性丰富, 具有较高的研究与开发利用价值。该文对 1961 年至今中国近 60 年昆虫资源的理论形成、发展阶段、研究重点和论文发表情况进行总结和分析, 归纳昆虫本体利用、行为利用和产物利用的发展状况, 并对昆虫基因组学和害虫防治等方面研究进展进行概述, 根据昆虫多样性下降问题对未来昆虫资源发展进行展望, 以期提高人们对昆虫资源的研究与保护意识。

关键词: 昆虫资源; 文献计量分析; 发展阶段; 特色发展

Research advances in insect resources during the past 60 years in China

Jiang Yijie¹ Shi Zhihui¹ Zhang Jie¹ Zhu Fen^{1*} Lei Chaoliang^{2*}

(1. Hubei Insect Resources Utilization and Sustainable Pest Management Key Laboratory, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 2. Institute of Insect Resources,

Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei Province, China)

Abstract: Insect resources are rich and diverse, which had high value for development and utilization. This review summarized the research advances in insect resources in China over the past 60 years, expounded the formation and development of the theories relating to insect resources, analyzed the development stages, research focuses and publications. We also summarized the research progresses in insect genomics and pest control. Considering the decline of insect diversity, the prospects for development of insect resources in the future were predicted in order to improve human awareness in research and protection of insect resources.

Key words: insect resources; bibliometric analysis; development stage; characteristic development

昆虫资源学是一门古老的昆虫应用科学, 其基本概念从最初的资源昆虫学发展至当今的昆虫资源学, 使得这门学科有了更广泛的研究领域和发展空间, 对昆虫资源的研究与利用起到积极的推动作用。对蜜蜂 *Apis* spp. (杨冠煌, 2002)、黄粉虫 *Tenebrio molitor* (陈彤和王克, 1997)、家蝇 *Musca domestica* (雷朝亮等, 2002)、五倍子蚜虫 *Rhus* spp. (陈晓鸣, 1999)、紫胶虫 *Laccifer lacca* (陈智勇和陈晓鸣, 2010)、胭脂虫 *Dactylopius coccus* (郑华等, 2009) 等

研究已步入产业化轨道, 取得了积极的社会影响。我国幅员辽阔、生态环境多样, 昆虫种类繁多、数量巨大, 为我国昆虫资源的研发利用提供了优越条件。新中国成立以来, 我国对昆虫资源研究从早期的初步探索逐渐转入深度研究阶段, 发展速度不断加快, 取得了多方面进展。本文总结了近 60 年来我国昆虫资源理论形成、产业化发展及发展特色, 旨在总结过去的同时, 分析未来昆虫资源发展方向及产业发展前景, 希望为从事昆虫资源的研究工作者

基金项目: 国家自然科学基金(31872306)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhufen@mail.hzau.edu.cn, ioir@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2021-12-02

提供研究思路和灵感。

1 昆虫资源学的理论形成与昆虫资源的产业化发展

1.1 昆虫资源学理论的形成与发展

过去,人们把能够直接或间接利用,能产生直接经济效益的有益昆虫称为资源昆虫,特别是关于家蚕 *Bombyx mori*、蜜蜂、五倍子、紫胶虫、白蜡虫 *Ericerus pela* 等昆虫的研究与利用,并初步形成了昆虫学研究的一个分支。随着研究深入,人们发现传统资源昆虫的定义只关注了昆虫所带来的现实价值,没有将昆虫资源的潜在价值涵盖进去;只关注有益昆虫,忽略了其他类群。其实益害是相对的,很多植食性昆虫常被人们开发利用,它们相对植物而言是害虫,但对人类来说却是宝贵的资源。雷朝亮等(1995)以生物多样性为基础,正式提出了昆虫资源的概念,认为昆虫资源学是研究昆虫本体利用、行为利用、产物利用和基因利用的理论与实践的一门学科,在资源昆虫的基础上将昆虫的现实价值和潜在价值全部纳入其中。昆虫资源强调昆虫本身所具有的全部价值,无论其对人类是否有益,它都是宝贵的生物资源。与资源昆虫相比,昆虫资源对昆虫与资源的关系更加明确,具有更广泛、完善和科学的内容与形式(雷朝亮等,1995)。生物多样性是昆虫资源重要的理论基础,物种是构成生物群落的基本单元,也是生态系统结构和功能的组成单位。不同物种集合在同一群落之中,维持着群落生态稳定。各物种都具有其独特的遗传物质,丰富的遗传多样性为生物进化及适应环境变化提供基础,使生物与生态环境形成统一整体(谢寿安等,2001)。

资源昆虫学的发展促进了人类社会进步,将昆虫的应用拓展到人类衣食住行、高新技术和工业发展等社会建设之中,带来了巨大的经济、生态和社会效益。昆虫资源学的形成丰富了人们对资源昆虫的理解,将昆虫资源所具有的现实和潜在价值全部纳入研究范围内,促进了昆虫资源的开发与利用,推动了昆虫产业的形成与发展。

1.2 中国昆虫资源研究60年所经历的发展阶段

1.2.1 探索阶段(1961—1979年)

20世纪60年代到70年代,我国对昆虫资源的研究相对较少,经过文献查阅,仅发表中文论文14篇、英文论文5篇。中国昆虫学会为庆祝成立20周年,在1963年进行农业、林业、医学、牧野等多方面

的昆虫资源论文征求,促进了我国昆虫资源发展初期的学术交流。刘崇乐(1965)介绍了紫胶虫的饲养以及紫胶在工业、药用等方面的用途;尤其傲(1966)对广西壮族自治区花坪林区的蜜蜂、五倍子蚜和白蜡虫的寄主植物、生长繁殖期和天敌捕食等方面进行了详细的调查和研究,总结了该地区主要的昆虫资源;祝汝佐和何俊华(1978)介绍了寄生性天敌昆虫的研究内容;马世骏(1979)和钦俊德(1979)分别对昆虫生态学、昆虫毒理学和昆虫病理学30年研究内容进行了总结;幸兴球(1979)对昆虫体内提取的杀虫微生物进行了研究。英文论文仅在1978年和1979年发表5篇,且只有7位作者,研究方向主要包括生物多样性保护、昆虫学、环境科学与生态学。

同期国外对昆虫资源的研究明显多于国内,共检索到3236篇论文,研究方向主要集中于环境生态科学、生物多样性、动物学和昆虫学等方面。我国昆虫资源研究初期处于探索阶段,论文发表数量较少,没有较为系统的理论作为支持,研究人员相对较少,同时也受到经济条件的限制,一定程度上制约了我国对昆虫资源的研究。

1.2.2 初步发展阶段(1980—1993年)

从1980年开始,我国对昆虫资源的研究逐渐深入,发表论文数量逐年上升,共发表中文论文246篇。这一阶段拓宽了昆虫资源研究所涉及领域,包括昆虫资源开发利用、昆虫区系分析、天敌昆虫资源调查、昆虫病毒研究及应用、昆虫群落分析和昆虫蛋白开发利用等。英文文献共检索到65篇,其中被引量较高的论文研究内容分别为大兴安岭地区小蠹科 *Scolytidae* 昆虫的最佳竞争密度、2个新蜜蜂种类记述以及中国南部地区蚊科 *Culicidae* 种类记述。研究重点仍然集中在环境生态科学、昆虫学等学科领域。经费投入的增加为昆虫资源研究提供了重要保障,王国亮等(1989)在国家科技公关计划基金支持下对苦皮藤中提取的昆虫拒食剂进行研究;黄复生和张学忠(1990)在国家自然科学基金的支持下对昆仑山喀喇昆仑地区的昆虫区系开展调查。与发展初期相比,我国发展过渡阶段对昆虫资源的研究力度大幅提升,共增加333位作者,越来越多的研究人员加入到了昆虫资源研究中。科学基金的设立为研究人员提供了极大的支持与保障。1989年,中国科学引文数据库建立(杨廷郊等,1989),为我国研究人员进行文献检索、计量分析等工作带来了便捷,

也促进了昆虫资源与其他学科的联系和交流,对这一阶段的发展起到重要的推动作用。

1.2.3 快速发展阶段(1994—2007年)

超过130篇论文以多样性为基础对昆虫资源进行研究,这与雷朝亮等(1995)所提出的昆虫资源理论有着密不可分的关系,研究人员对我国众多地区的昆虫区系及地理分布和昆虫多样性进行了初步探究与调查,为我国生物多样性调查、保护和发展打下坚实的基础。在深化改革和全面建成小康社会的背景下,国家对昆虫资源研究的支持明显提高,共有19类科学基金投入到研究中,为科学研究提供了强有力的支撑。有关开发利用的研究相比于前2个阶段有明显的提升,昆虫产物、本体利用以及昆虫产业化发展在一定程度上也促进了我国经济发展,加快我国经济转变和社会繁荣。快速发展阶段共发表中文论文2 086篇、英文论文407篇,从2001年开始,年论文发表量均超过140篇,研究作者增加至2 500人以上,研究内容涉及食用昆虫、药用昆虫、天敌昆虫、昆虫蛋白、生物防治和开发利用等多个方面。我国生态环境多种多样,赋予了昆虫丰富的多样性,我国昆虫种类约有15万~300万种,但目前已知种类只有25%左右(尤民生,1997),虽然我国对昆虫资源的研究逐渐深入,但昆虫种群数量繁多、种类丰富,还有许多尚未探索的部分值得深入研究。

1.2.4 持续发展阶段(2008年至今)

经过近60年的探索与积累,我国昆虫资源的研究进入持续发展阶段,中文论文年发表量超过400篇、英文论文年发表量为380余篇。随着中国特色社会主义建设和特色经济稳定发展,文化建设也受到人们广泛关注,检索到的5 290篇论文中3 191篇是学位论文,博士研究生比例相比于上一阶段增加了3倍左右,硕士研究生增加了4倍左右,越来越多的新生力量加入到昆虫资源研究中。全球化发展趋势推动了国际间的学术交流,国内外同行之间的合作联系增多,开拓了更为广阔的科学视野,研究思路也能够延伸到更多层次,便于进行更科学、合理的研究设计与创新。科技进步为科学发展带来便利,科学技术不断创新,极大的缩短了研究所需时间,在线数据库的建立使得文献查阅更加便捷。此阶段众多研究中,昆虫资源初步探究、昆虫多样性发展、昆虫群落分析、生物防治、昆虫区系分析等方面仍然是热门研究内容。随着分子生物学的发展,分子水平的研究

逐渐增加,昆虫基因组的研究提高了人们对种群遗传和生物进化的理解,为揭示昆虫遗传规律和种群变动提供了重要的数据信息(彭露等,2015);昆虫基因组数据库的建立与积累为挖掘功能基因、农业害虫防治等方面打下了坚实的基础;化学感受蛋白基因功能的研究与挖掘对生物防治具有重要意义;微卫星标记、DNA条形码等技术成为昆虫种群鉴定、揭示遗传规律变化和多样性调查等研究的主要方法。分子水平的深入研究,不仅提高了我国的科技力量,还进一步促进了我国对昆虫基因多样性的利用、发展与保护。

在CNKI和Web of Science数据库上对我国近60年有关昆虫资源的文献进行检索,并利用计量分析软件进行分析。其中,CNKI数据库共检索到7 563篇文献,Web of Science数据库共检索到5 449篇文献。

我国近60年中英文文献年度发表趋势如图1所示,1961—1993年我国发表中文论文总体较少,增长速度比较缓慢;1994年开始,文献发表量开始快速上升,到2007年时,年度文章发表量达到444篇;2008年至今,年度文献发表量较为稳定,均大于300篇。英文文献发表量从2000年开始逐步增长,2009年进入迅速增长阶段,2019年文献发表量最多,达643篇。

CNKI数据库共检索出作者9 295人,陈晓鸣、刘玉升、雷朝亮等发表文章数量较多;Web of Science数据库共检索出作者20 731人,其中Zhang Yalin发表文章数量最多,为70篇。CNKI数据库中文文献作者关系网络如图2所示,作者网络人数最多为21人,大部分为2~6人,表明昆虫资源研究多为团队协作,独立研究人员较少。

1.3 昆虫资源的产业化发展

经过60多年的研究与发展,昆虫资源产业化进程逐步加快,传统昆虫产业发展较为稳定,处于主导地位。例如,四川省柞蚕*Antherea pernyi*年养殖收入可达2.5万~3万元,同时促进了柞林种植发展,为山区农民致富的主要途径(杨彪等,2014);湖北省自20世纪80年代以来,走上了五倍子产业化发展道路,五峰赤诚生物科技有限公司年产单宁酸1 500 t、没食子酸500 t,产品远销海外,被认定为国家高新技术企业(张品德等,2019);平湖市2020年蜂王浆产量36.4 t,蜂蜜产量121 t,蜂业产值957.48万元(张华伟,2021)。近年来,食用或饲用昆虫产业、清洁昆虫产业、传粉昆虫产业、药用昆虫产业、昆虫生

态旅游业和天敌昆虫产业等新产业不断增加。观赏昆虫是旅游业开发的重要项目,如哥斯达黎加的蝴蝶农场,泰国的蝴蝶园、云南省的思美蝴蝶博物馆、上海市的大自然野昆虫馆,为当地旅游业带来了巨大的经济效益(王兴娥和赵永田,2019)。利用蜜蜂对大豆进行传粉,可使大豆杂交育种传粉效率大幅提高(王洪岩,2020)。欧盟委员会于2021年6月发布法规,批准了干黄粉虫作为新资源食品投放市场。随着高新科技不断融入,昆虫资源的利用层面

及利用方式越来越广,从传统产业的本体利用及人工养殖逐渐扩展到昆虫生理、昆虫机能、昆虫行为等多方面应用,开拓了农业、医学、旅游业、工业等多个领域(王小云等,2019)。昆虫资源要实现产业化,还需加强基础和技术研究,将其从理论有效转化为产业,并以科技化、收益化、综合化作为产业化目标。此外,还要引导正确的产业化发展观念,注重昆虫资源多样性的保护,实现可持续发展。

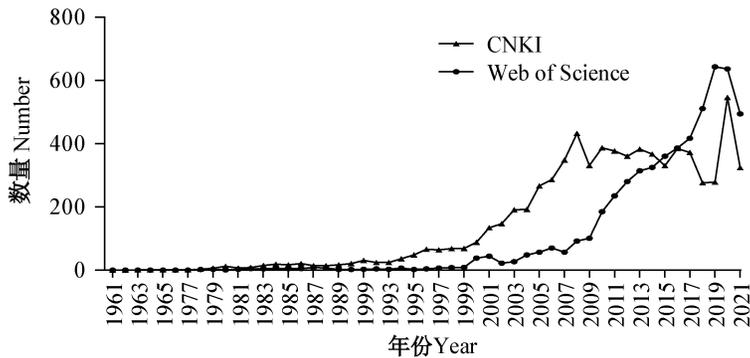


图1 中国昆虫资源研究文献年度发表量

Fig. 1 Annual publications on insect resources in China

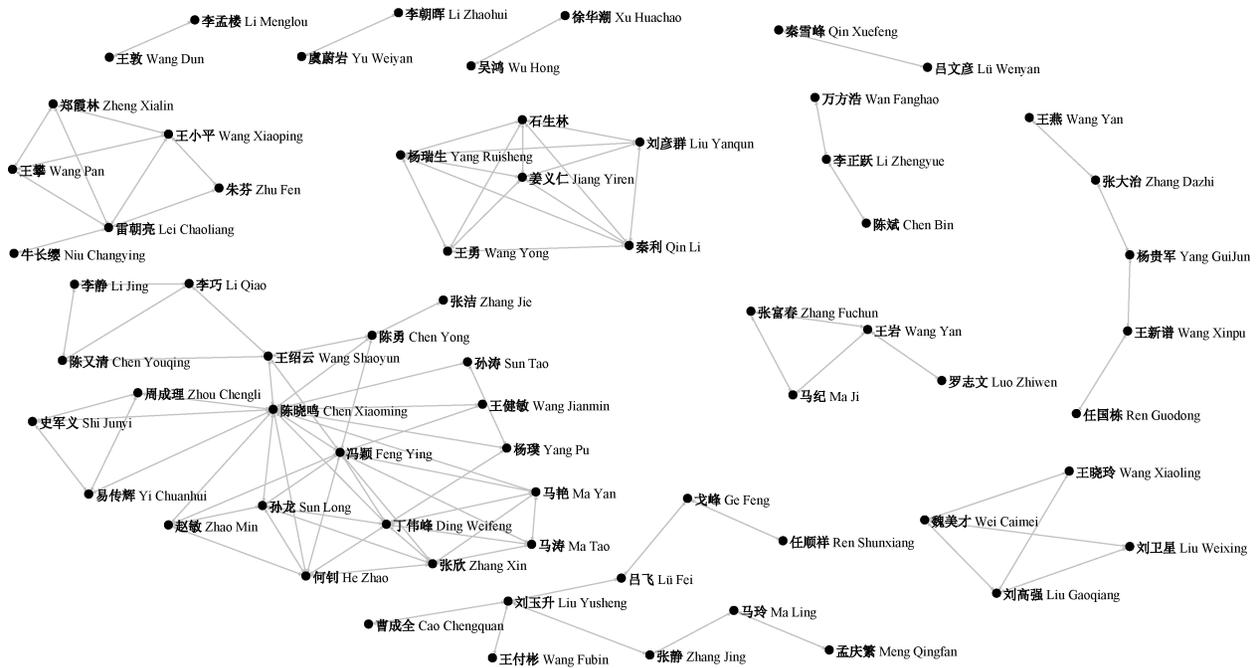


图2 CNKI数据库昆虫资源研究作者关系网

Fig. 2 The author network of insect resources in the CNKI database

2 昆虫资源的发展特色

2.1 昆虫本体利用

昆虫体内干蛋白质含量高,可达到50%以上(魏美才和刘高强,2001),且富含多种氨基酸(叶兴

乾等,1998),脂肪含量和热值较高,是牛肉、小麦、玉米等常见食物的1倍左右(Ramos-Elorduy & Pino, 1990),并且富含锌、铁等矿物质和维生素等营养物质(乔太生等,1992),具有较高的食用或饲用开发价值。从20世纪80年代开始,我国逐渐加强对食用昆

虫的开发工作,其中昆虫蛋白是开发利用的热点。昆虫抗冻蛋白可用于改善冷冻食品品质,抑制其在冷冻储存和运输过程中重结晶化(Feeney & Yeh, 1998),还可以作为人或动物组织器官和细胞系的冰冻保护剂(Fletcher et al., 1999);昆虫增效蛋白能够明显提高生物杀虫剂对害虫的致死效果,可通过基因重组等技术手段增强或放大其防治效果(陈浩涛等,2003);昆虫抗菌肽可以辅助医疗,用于治疗肝炎、肾炎、肿瘤及艾滋等疾病(余海忠和刘法彬,2006)。目前,我国食用昆虫的开发主要集中于鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和直翅目昆虫,约占全部食用昆虫的80%(Feng et al., 2018),并被制成面包、罐头和虫酒等各式各样的产品(苟梦星等,2020),越来越多的消费者也开始转变对昆虫食品的认知,逐渐接受昆虫制品,但昆虫本身会携带细菌、病毒等病原体,因此在生产与开发过程中需要格外注重食品安全问题。

昆虫可以作为动物性饲料蛋白源用于畜禽养殖,郭宝忠(2001)对比了添加蚕蛹粉和未添加蚕蛹粉的饲料对蛋鸡产蛋率的影响,结果表明蚕蛹粉可显著提高蛋鸡产蛋率;常斌等(2007)在清远鸡日粮中添加家蝇幼虫和蛹,发现其对鸡肉风味和氨基酸含量有明显提升作用;周琼等(2009)在肉鸡饲料中添加美洲大蠊 *Periplaneta americana* 粉,发现肉鸡免疫功能和抗氧化能力明显提高,肠道功能得到改善,促进肉鸡生长;任顺等(2020)利用黄粉虫粉代替鱼粉加入到锦鲤饲料中进行饲喂,使锦鲤增重率和肝体比明显提高。大量试验结果表明,用昆虫代替或部分代替饲料进行禽畜饲喂可以带来良好的效果,具有较高的经济效益,未来饲用昆虫的发展可与禽畜养殖场相结合,利用禽畜粪便或农作物废料对饲用昆虫进行规模化养殖,不仅能解决畜禽饲料问题,还能够处理养殖所产生的废弃物,具有广阔的开发前景。

2.2 昆虫行为利用

随着我国城镇化进程加快及人民消费水平的提高,有机废弃物产生量逐渐上升,不仅占用人类的生活环境,还会造成污染。利用昆虫腐生行为进行有机废弃物处理能够达到减量化、无害化的效果。例如,华中农业大学从20世纪80年代,开始进行利用黄粉虫、家蝇、大头金蝇 *Chrysomya megacephala*、亮斑扁角水虻 *Hermetia illucens* 转化分解畜禽粪污、秸秆、餐厨垃圾等废弃物的研究(黄光伟等,2013;王小云,2018),这些昆虫转化废弃物不仅能够减少废弃

物的总量,还能收获昆虫蛋白资源和生物有机肥等产物(高俏等,2016;王小云等,2016)。经家蝇幼虫处理后的禽畜粪便,其总质量可减少约20%~50%(李逵等,2017);利用亮斑扁角水虻处理禽畜粪便能减少粪便积累,降低粪便中有害微生物残留量和重金属富集,餐厨垃圾经亮斑扁角水虻处理也可降低残留量,实现无害化、资源化等目标(张杰等,2019)。杨金禄等(2010)利用黄粉虫对麦麸、果皮、碎米、酒糟、马铃薯渣、猪粪和鸡粪等多种废弃物进行转化分解,结果表明黄粉虫均可对其进行处理,且酒糟、鸡粪等物质对黄粉虫饲养效果较好,成本较低。山东农业大学杨柳等(2020)报道了8种不同废弃物对白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 生长发育的影响,结果表明白星花金龟在这8种不同废弃物繁育基质中均能完成正常生活史,其幼虫可用于转化农业有机废弃物;另外,郭鸿钦等(2020)还发现黄粉虫可取食聚乙烯、聚苯乙烯和聚丙烯等多种材质塑料,且对聚苯乙烯的降解效果最佳;大麦虫 *Zophobas atratus* 和蜡螟 *Galleria mellonella* 也可用于塑料降解。

早在1956年,我国就开始具有捕食行为或寄生行为的天敌昆虫进行研究与利用,如利用赤眼蜂来防治甘蔗螟虫(蒲螯龙等,1956)。在“七五”和“八五”期间,我国生物防治科技工作受到国家的重视,列入国家科技攻关计划,在植保工作“预防为主,综合防治”方针指导下,充分发挥天敌昆虫在自然界中控制有害生物的作用,促进生态平衡(叶正楚和王韧,1992)。从20世纪80年代初开始,国内外对应用天敌昆虫进行生物防治的研究逐渐深入,我国生物防治得到较快发展,人工繁育赤眼蜂、大草蛉 *Chrysopa pallens*、东亚小花螞 *Orius sauteri*、捕食性天敌瓢虫的技术突破,大面积释放赤眼蜂等成果涌现(杨怀文,2015)。我国利用捕食性天敌富氏凹头蚁 *Formica fukaii* 对林木害虫松阿扁蜂 *Acantholyda posticalis* 进行生物防治,使得每巢内松阿扁蜂的幼虫虫口减退率和成虫减退率均达到50%以上(侯爱菊等,1991);利用寄生性天敌大螟钝唇姬蜂 *Eriborus terebrans* 防治油茶卡织蛾 *Casmara patrona*,对油茶卡织蛾幼虫自然寄生率可达11%(萧铁光等,1992)。20世纪90年代开始,国内外对天敌昆虫从简单的利用逐渐转变为深层次的研究探索。我国调查研究国内昆虫种质资源并且建立数据库,保存了35种天敌昆虫,对23种天敌昆虫生物学特性深刻了解,获取生物学特性数据3500多个(邱宝利等,

2005)。除此之外,还对天敌昆虫物种丰度受生长环境的影响、对寄主或栖息地选择的信息化学物质(魏建荣等,2007)进行了深入研究。分子生物技术的发展为生物防治定量评价提供了便捷,利用酶联吸附反应、DNA条形码和高通量测序等技术对防治效果进行定量评价,可以清楚反映生物防治的控害效果,利于筛选最佳防治手段(段雪莹等,2021)。“十四五”期间,我国还设立了“重大病虫害防控综合技术研发与示范”重点专项,旨在保障农林生产和农产品质量安全,并为绿色农业发展提供科技支撑(张凯等,2022)。天敌昆虫是重要的生物资源,也是生物防治中重要的防治手段,不仅能够减少化学农药对环境的污染,还能够保持生态平衡,长期防治效果显著,是我国植物保护领域中重要的研究内容。

自然界中昆虫种类繁多,昆虫行为仿生和形态仿生是仿生学研究的重要对象。研究初期对于昆虫的仿生大都集中于模仿昆虫体壁或翅的表面形态来改进结构,如通过研究甲虫体表很少粘附土壤的现象,发现了非光滑表面减粘脱附机制并以此开发仿生推土板、不粘锅等减粘脱附仿生产品(Ren et al., 1998)。自20世纪末期,从微型飞行器概念提出到飞行器不断微型化的进步,昆虫为人类的飞天梦插上了翅膀(Shyy et al., 1999)。传统飞机的形态和空气动力学并不适用于微型飞行器,昆虫经过了亿年的进化,其近乎完美的形态和运动方式是研究微型飞行器的天然老师,科学家模仿铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* 设计了一款仿生机翼(Sun et al., 2021)。随着技术的不断发展,通过仿生昆虫得到的多样化性能材料也越来越多。对蜉蝣目昆虫复眼防雾结构的研究为微米级防雾功能表面的设计提供了新思路(曹焱焱,2014)。南方豆天蛾 *Clanis bilineata* 幼虫体壁出色的抗弯稳定性为充气薄膜管的改进提供了灵感(陈东辉等,2017)。通过地熊蜂 *Bombus terrestris*、黑蚱蝉 *Cryptotympana atrata*、黄蜻 *Pantala flavescens* 翅的仿生开发出了具有抑菌性的仿生膜(王誉茜,2018)。李帅伟(2020)对意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 翅翼和蜂针力学性能和微观结构的研究有利于扑翼飞行器和无痛微针的开发。目前,人类对昆虫仿生的研究还在探索,昆虫经过数亿年进化形成了各式各样的微妙结构,如果人类可以将其中的奥秘一一破解并加以应用,便会为人类的生活带来极大的便利。

2.3 昆虫产物利用

紫胶虫分泌的紫胶具有清热解毒的功效,临床

上可用于治疗麻疹、斑疹、晕血等疾病,紫胶还具有防潮、防腐、绝缘等优良特性,被广泛用于药物食品包衣、军工原料涂饰剂、绝缘物质制作、填充剂制作等方面,紫胶树脂还具有优良的热塑性和粘结性,可用于玻璃、金属等制品粘合(凌明亮和黄仁术,2004)。白蜡具有熔点高、硬度好、成型精密度高、防潮防腐等特性,是机械制造、精密仪器加工中良好的铸模材料;医学中也会将白蜡用于伤口止血愈合(陈小平,2007)。蚕丝是一种性能优越的天然纤维,常用于纺织衣物,还能制成人工肌腱、韧带等接骨材料,天然蚕丝可制成蚕丝织物面膜、丝素化妆品,加工成丝粉还可用作高级涂料添加剂;蚕沙具有清热祛风、镇静安神等功效,可用于沙枕制作;蚕沙中的叶绿素及其衍生物可参与人体血红蛋白的合成,能够促进伤口愈合(陈纪鹏,2009)。斑蝥素主要提取于芫菁体内,能够诱导癌细胞凋亡、干扰癌细胞周期,具有抗癌效果,但因其具有毒性成分,一般应用于临床医学。因此,开发斑蝥素新型衍生物是目前主要的发展方向,通过深入研究其分子机理来开发毒性低的抗肿瘤药物,可使斑蝥素类药物在临床治疗中发挥更大作用(娄田田,2012)。蜂蜜具有补中益气、清热解毒、安心养神等功效,在医药保健上应用广泛。蜂胶能够清除细胞内活性氧、抑制胶原等胞外基质,起到降脂、抗老化等效果;蜂胶中的黄酮类及酯类物质具有抗肿瘤的功效(胡佑志,2018)。五倍子是五倍子蚜虫通过取食刺激寄主植物叶组织细胞而产生的虫瘿,其主要成分是单宁酸,通过加工可提取得到单宁酸、没食子酸、胶性没食子酸等多种化工产品,在医药、食品、纺织、化工、电子等众多行业中均有广泛应用。我国五倍子年生产量占世界总产量95%以上,已建立起较为成熟的五倍子全产业链利用技术,是我国经济发展的重要途径(张亮亮,2020)。

2.4 昆虫基因组学研究

不同种类昆虫生物学特性差异各不相同,其基因组组成多样性丰富,因此,代表性昆虫基因组信息是分子水平研究的重要基础,随着果蝇基因组测序完成(Adams et al., 2000),昆虫研究进入到了基因组时代。2003年,中国西南农业大学和中国科学院基因组研究所在高强度的工作下,完成了中国家蚕基因组框架图绘制,覆盖率达家蚕基因组的95%以上,经基因注释得到16 948个完整基因、7 285个断片基因(向仲怀,2003)。Robinson et al.(2013)提出了i5k计划,旨在对5 000种节肢动物的基因进行测

序和分析,各国学者积极响应此全球性计划。2013年,福建农林大学完成了小菜蛾 *Plutella xylostella* 的基因组分析(You et al., 2013);中国科学院动物研究所于2013年完成了榕小蜂基因组测定,并揭示了转性共性和雌雄异形等分子机制(Xiao et al., 2013);2014年,浙江大学对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 及其体内2种共生菌代谢互补基因组进行了研究分析(Bao et al., 2014);同年,中国科学院动物研究所完成了飞蝗 *Locusta migratoria* 基因组的测定(Wang et al., 2014)。随着测序技术的提高及测序成本的下降,越来越多的昆虫基因组研究加入到计划之中,虽然i5k计划没有按照预期完成,但基因组的研究为昆虫资源发掘带来了新的视角,将其引入更深的层次之中。

昆虫转录组测序能够获得低表达量基因、未知编码或未编码RNA的种类,广泛应用于昆虫生长发育及抗性基因挖掘、昆虫与其他生物互作研究、行为生态学研究及分子标记开发等方面。昆虫生活史周期短,生长发育迅速,导致其各个生长发育阶段对食物量需求巨大,长期使用化学农药会导致抗药性快速发展,挖掘昆虫生长发育相关基因和抗性基因不仅能够了解其变态机制,还可为害虫防治提供新思路(Chen et al., 2010)。张海静等(2012)对刺吸式昆虫诱导寄主植物产生防御反应进行了研究;王丹(2015)对机械损伤、茶尺蠖 *Ectropis oblique hypulina* 为害和未处理的叶片转录组测序信息进行比对,揭示了茶树对茶尺蠖的抗性分子机制;康志伟(2019)研究了烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 识别寄主豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 的分子机理,鉴定得到若干个嗅觉结合蛋白、化学感受蛋白、嗅觉受体和味觉受体。昆虫与其他生物存在普遍的互作现象,通过基因组学对互作机制进行研究对了解昆虫与寄主互作关系及有害生物防治具有重要意义。此外,转录组学研究对单核苷酸多态性和微卫星等分子标记位点开发也具有重要的遗传学意义。组学是昆虫资源21世纪的研究热点,不仅为研究提供了重要的基因数据,还为研究人员带来新的研究思路。目前,昆虫资源组学研究处于变革阶段,新时代的研究人员正在接触大量的组学系统理论,随着科技进步,昆虫资源研究也将逐步进入组学时代(李飞, 2021)。

2.5 昆虫资源与害虫防治

昆虫微生物、病毒的应用是近年来绿色防控技术研究热点。我国从20世纪50年代开始开展昆虫杆状病毒毒株采集、鉴定及生物学特性等研究工作;

70年代初,先后在湖北、河南、河北等省开展利用多角体病毒防治松毛虫的应用研究;80年代初期,已研究报道了包括多角体病毒、颗粒病毒等90余种昆虫病毒(蔡秀玉和丁翠, 1983),但能够用于害虫防治的病毒种类有限,主要集中于杆状病毒、颗粒病毒、多角体病毒和虹彩病毒等昆虫病毒,且存在杀虫谱窄、杀虫速度缓慢等问题(孙修炼和胡志红, 2006)。随着分子生物技术的快速发展,病毒分子研究受到广泛关注,研究人员通过修饰病毒基因、插入外源基因、异源病毒重组等方法来增强病毒毒力,扩大病毒杀虫谱(孙兴鲁等, 2011)。纳米材料能够快速进入细胞,基于此特性,开发纳米载体也是增强昆虫病毒毒力,加强防治效果的优良手段(郑洋, 2018)。部分微生物对昆虫表现为致病、致死行为,例如,苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* 可引发败血症,使害虫因败血症和饥饿而死亡(巩鹏涛等, 2018);白僵菌以其孢子从害虫皮肤侵入使其染病,可应用于防治鳞翅目、鞘翅目、同翅目等多种害虫(阙生全等, 2019)。昆虫体内微生物多样性丰富,占昆虫生物量的1%~10%(王渭霞等, 2021)。杀虫微生物基因资源开发研究、利用基因转移重组微生物等方面也是近年来我国的研究热点。

3 展望

昆虫资源是宝贵的生物资源,随着昆虫资源调查的普及与深入,已知昆虫种类大幅增加,越来越多的未知昆虫资源会被挖掘,昆虫区系分类、生物学和行为学等研究为以后的研究打下坚实基础。昆虫资源学现有理论从建立到发展只经历了20余年,仍需要加强其理论基础探索,并注重与其他学科交叉联系,进行多层次、多角度的发展,为各类昆虫研究积累经验,提供理论支持。Sánchez-Bayo & Wyckhuys (2019)认为,目前昆虫多样性已经受到严重威胁,世界范围内昆虫多样性正在急剧下降,甚至在未来几十年内,会有约40%的昆虫物种灭绝。昆虫是生态系统重要的组成部分,目前各项研究都是基于昆虫多样性所开展,若滥用昆虫资源将会导致昆虫多样性下降以及生态平衡被破坏,因此,昆虫资源开发过程中不光要注重研究成果和开发利用,还应该注重昆虫资源多样性的保护,不能因追求短期、单一的经济效益而忽略其多层次的内涵,进行多层次的综合开发才是进行昆虫资源研究、保护昆虫资源多样性的合理手段。

参考文献 (References)

- Adams MD, Celniker SE, Holt RA, Evans CA, Gocayne JD, Amanatides PG, Scherer SE, Li PW, Hoskins RA, Galle RF, et al. 2000. The genome sequence of *Drosophila melanogaster*. *Science*, 287(5461): 2185–2195
- Bao YY, Qin X, Yu B, Chen LB, Wang ZC, Zhang CX. 2014. Genomic insights into the serine protease gene family and expression profile analysis in the planthopper, *Nilaparvata lugens*. *BioMed Genomics*, 15(1): 507
- Cai XY, Ding C. 1983. List of known insect viruses in China (Continued). *Microbiology China*, 10(5): 240–241 (in Chinese) [蔡秀玉, 丁翠. 我国已知昆虫病毒名录(续). *微生物学通报*, 10(5): 240–241]
- Cao YY. 2014. The anti-fog structure design and mechanism research of Ephemeroptera insect compound eyes. Master thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese) [曹焱焱. 2014. 蜉蝣目昆虫复眼防雾结构设计及机理研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学]
- Chang B, Han RC, Cao L, Liu XL, Liu XF. 2007. Effect of *Musca domestica* maggot and pupae as feed additives on the quality and flavor of Qingyuan chickens. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(6): 882–886 (in Chinese) [常斌, 韩日畴, 曹莉, 刘秀玲, 刘小芬. 2007. 家蝇作为饲料添加剂对清远良种鸡肉质和风味的影响. *昆虫知识*, 44(6): 882–886]
- Chen DH, Liu W, Lü JH, Chang ZY, Tong J. 2017. Bending characteristics of inflatable tube bioinspired from *Clanis bilineata* larva. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 48(7): 399–404 (in Chinese) [陈东辉, 刘伟, 吕建华, 常志勇, 佟金. 2017. 仿豆天蛾幼虫充气薄膜管弯曲特性研究. *农业机械学报*, 48(7): 399–404]
- Chen HT, Pan XY, Yuan ZM, Tan JC. 2003. The debilitation of recombinant enhancin on cotton bollworm. *Journal of Hunan Agricultural University*, 29(4): 308–310 (in Chinese) [陈浩涛, 潘雪义, 袁哲明, 谭济才. 2003. 重组增效蛋白对棉铃虫的弱化作用. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 29(4): 308–310]
- Chen JP. 2009. Textual research of Cansha. *Drug Standards of China*, 10(3): 173–174 (in Chinese) [陈纪鹏. 2009. 蚕沙的考证. *中国药品标准*, 10(3): 173–174]
- Chen S, Yang PC, Feng J, Wei YY, Ma ZY, Kang L. 2010. De novo analysis of transcriptome dynamics in the migratory locust during the development of phase traits. *PLoS ONE*, 5(12): e15633
- Chen T, Wang K. 1997. Processing method of *Tenebrio molitor* snack. *Journal of Northwest A&F University*, 25(4): 85–59 (in Chinese) [陈彤, 王克. 1997. 黄粉虫等昆虫的营养价值与食用性研究. *西北农业大学学报*, 25(4): 85–89]
- Chen XM. 1999. The present situation and prospects of utilization of resource insects in China. *World Forestry Research*, (1): 47–52 (in Chinese) [陈晓鸣. 1999. 中国资源昆虫利用现状及前景. *世界林业研究*, (1): 47–52]
- Chen XP. Advance in researches on the white wax scale. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 28(1): 50–52, 55 (in Chinese) [陈小平. 2007. 白蜡虫的研究进展. *四川林业科技*, 28(1): 50–52, 55]
- Chen ZY, Chen XM. 2010. Analysis of eco-efficiency on different lac cultivate patterns. *Forestry Economics*, (11): 70–73 (in Chinese) [陈智勇, 陈晓鸣. 2010. 不同紫胶种植模式的生态效益评估. *林业经济*, (11): 70–73]
- Duan XY, Wang YD, Zhang NZ, Gao F, Zhao ZH. 2021. Research advances in evaluation methods of predator's control of insect pests. *Journal of Plant Protection*, 48(2): 275–288 (in Chinese) [段雪莹, 王祎丹, 张乃钊, 高峰, 赵紫华. 2021. 捕食性天敌控害能力评价方法进展. *植物保护学报*, 48(2): 275–288]
- Feeney RE, Yeh Y. 1998. Antifreeze proteins: current status and possible food uses. *Trends in Food Science & Technology*, 9(3): 102–106
- Feng Y, Chen XM, Zhao M, He Z, Sun L, Wang CY, Ding WF. 2018. Edible insects in China: utilization and prospects. *Insect Science*, 25(2): 184–198
- Fletcher GL, Goddard SV, Wu YL. 1999. Antifreeze proteins and their genes: from basic research to business opportunity. *Chemtech*, 30: 17–28
- Gao Q, Liu XK, Li K, Lei CL, Zhu F. 2016. Research progress in the development of high value-added products of *Hermetia illucens*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(34): 102–104 (in Chinese) [高俏, 刘馨榕, 李逵, 雷朝亮, 朱芬. 2016. 亮斑扁角水虻高附加值产品开发的研究进展. *安徽农业科学*, 44(34): 102–104]
- Gong PT, Wu ZQ, Zhou Y, Fang XJ. 2018. *Bacillus thuringiensis*-a hundred years' legend of magical bacteria. *Genomics and Applied Biology*, 37(4): 1531–1538 (in Chinese) [巩鹏涛, 吴仲琦, 周燕, 方宣钧. 2018. 苏云金芽孢杆菌-神奇细菌的百年传奇. *基因组学与应用生物学*, 37(4): 1531–1538]
- Gou MX, Li JJ, Guo XQ, Wang L. Research on the preparation of cricket protein bread. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 56(5): 30–35 (in Chinese) [苟梦星, 李俊杰, 郭晓琴, 王岚. 2020. 蟋蟀蛋白面包的研制. *食品与发酵科技*, 56(5): 30–35]
- Guo BZ. 2001. How much do you know about undeveloped protein feed? *Rural Science and Technology in China*, (8): 33 (in Chinese) [郭宝忠. 2001. 尚未开发的蛋白质饲料知多少? (一). *中国农村科技*, (8): 33]
- Guo HQ, Luo LP, Yang YH, Wang YM, Lu YL, Zhao X, Hu XM. Research progress on plastic degradation by worms. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 26(6): 1546–1553 (in Chinese) [郭鸿钦, 罗丽萍, 杨宇航, 王宇萌, 陆遥力, 赵鑫, 胡筱敏. 2020. 利用昆虫取食降解塑料研究进展. *应用与环境生物学报*, 26(6): 1546–1553]
- Hou AJ, Lou W, Yan DL, Dai YW, Tian JQ, Kong QY. Study on biological control of pine flat leaf wasp. *Shelter Forest Technology*, (2): 46–52 (in Chinese) [侯爱菊, 娄巍, 阎敦良, 戴玉伟, 田金权, 孔庆玉. 1991. 松扁叶蜂生物防治研究. *防护林科技*, (2): 46–52]
- Hu YZ. 2018. Health care effect of honey. *Journal of Bee*, 38(12): 32 (in Chinese) [胡佑志. 2018. 蜂蜜的保健养生功效. *蜜蜂杂志*, 38(12): 32]

- Huang FS, Zhang XZ. 1990. The insect fauna of the Karakorum-Kunlun Mountains, China. *Journal of Natural Resources*, 5(4): 365–375 (in Chinese) [黄复生, 张学忠. 1990. 喀喇昆仑-昆仑山昆虫区系. *自然资源学报*, 5(4): 365–375]
- Huang GW, Long K, Zhu F, Lei CL. 2013. The research progress and utilization prospect of maggot in low carbon husbandry's development. *Hubei Agricultural Sciences*, 52(14): 3233–3237 (in Chinese) [黄光伟, 龙坤, 朱芬, 雷朝亮. 2013. 蝇蛆在低碳畜牧业中的应用现状和前景. *湖北农业科学*, 52(14): 3233–3237]
- Kang ZW. 2019. Behavior and molecular mechanism of the interaction between the pea aphid and *Aphidius gifuensis*. PhD thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [康志伟. 2019. 烟蚜茧蜂与豌豆蚜互作的行为与分子机制研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Lei CL, Wang J, Wu GH. 2002. Feeding technology of fly maggots. *Animals Breeding and Feed*, (2): 50–51 (in Chinese) [雷朝亮, 王健, 吴国华. 2002. 蝇蛆的饲养技术. *养殖与饲料*, (2): 50–51]
- Lei CL, Zhong CZ, Zong BL. 1995. Tentative ideas on the research and utilization of insect resources. *Entomological Knowledge*, (5): 291–293 (in Chinese) [雷朝亮, 钟昌珍, 宗良炳. 1995. 关于昆虫资源研究利用之设想. *昆虫知识*, (5): 291–293]
- Li F. 2021. The omics way of thinking: more than data and tools. *Journal of Plant Protection*, 48(6): 1195–1198 (in Chinese) [李飞. 2021. 组学, 是数据, 是工具, 更是新的思路. *植物保护学报*, 48(6): 1195–1198]
- Li K, Yang QZ, Lei CL, Zhu F. 2017. Status and prospects of the transformation of organic wastes by insects in China. *Journal of Environmental Entomology*, 39(2): 453–459 (in Chinese) [李逵, 杨启志, 雷朝亮, 朱芬. 2017. 我国利用昆虫转化有机废弃物的发展现状及前景. *环境昆虫学报*, 39(2): 453–459]
- Li SW. 2020. Investigation on mechanical properties of honeybee wing and sting based on nanoindentation. Master thesis. Beijing: Beijing University of Technology (in Chinese) [李帅伟. 2020. 基于纳米压痕技术的蜜蜂翅翼和蜂针力学性能研究. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学]
- Ling ML, Huang RS. 2004. Ecological stocking and processing technology of lac insect. *Forest By-Product and Speciality in China*, (2): 37–38 (in Chinese) [凌明亮, 黄仁术. 2004. 紫胶虫的生态放养与加工技术. *中国林副特产*, (2): 37–38]
- Liu CL. 1965. Lac-avaluable insect resource. *Popular Science*, (9): 8–9 (in Chinese) [刘崇乐. 1965. 紫胶—宝贵的昆虫资源. *科学大众*, (9): 8–9]
- Lou TT, Du J, Chen XS, Li SW. Research progress on the antitumor mechanisms of cantharidin and its derivatives. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 8(10): 205–207 (in Chinese) [娄田田, 杜娟, 陈祥盛, 李尚伟. 2012. 斑蝥素及衍生物抗肿瘤机制的研究进展. *亚太传统医药*, 8(10): 205–207]
- Ma SJ. 1979. Insect ecology in the People's Republic of China. *Acta Entomologica Sinica*, 22(3): 257–266 (in Chinese) [马世骏. 1979. 中国昆虫生态学三十年. *昆虫学报*, 22(3): 257–266]
- Peng L, He WY, Xia XF, Xie M, Ke FS, You SJ, Huang YP, You MS. 2015. Prospects for the management of insect pests in the genomic era. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(1): 1–22 (in Chinese) [彭露, 何玮毅, 夏晓峰, 谢苗, 柯富士, 尤士骏, 黄宇萍, 尤民生. 2015. 基因组学时代害虫治理的研究进展及前景. *应用昆虫学报*, 52(1): 1–22]
- Pu ZL, Deng DA, Liu ZC, Hong FC, Mo YS. 1956. On the rearing of *Trichogramma evanescens* Westw. and its utilization for the control of sugar cane borers. *Acta Entomologica Sinica*, 6(1): 1–35 (in Chinese) [蒲螫龙, 邓德嵩, 刘忠诚, 洪福昌, 莫禹诗. 1956. 甘蔗螟虫卵赤眼蜂繁殖利用的研究. *昆虫学报*, 6(1): 1–35]
- Qiao TS, Tang HC, Liu JX, Li L. 1992. Analysis of nutritional components and protein evaluation of rice locust. *Insect Knowledge*, (2): 113–117 (in Chinese) [乔太生, 唐华澄, 刘景晔, 李力. 1992. 中华稻蝗的营养成分分析及其蛋白质评价. *昆虫知识*, (2): 113–117]
- Qin JD. 1979. Insect toxicology and insect pathology in the People's Republic of China. *Acta Entomologica Sinica*, 22(3): 249–256 (in Chinese) [钦俊德. 1979. 中国昆虫毒理学、昆虫病理学三十年. *昆虫学报*, 22(3): 249–256]
- Qiu BL, Ren SX, Wu JH, Xu ZF, He YR, Wang XM. 2005. Status of insect germplasm resources in China and its data bank construction. *Guangdong Agricultural Sciences*, (3): 5–7 (in Chinese) [邱宝利, 任顺祥, 吴建辉, 许再福, 何余容, 王兴民. 2005. 我国昆虫种质资源的现状及其资源数据库的建立. *广东农业科学*, (3): 5–7]
- Que SQ, Yu AL, Liu YJ, Tu YX, Wang XD, Xiong CY. 2019. Application research progress of *Beauveria*. *Forest Pest and Disease*, 38(2): 29–35 (in Chinese) [阙生全, 喻爱林, 刘亚军, 涂叶苟, 王小东, 熊彩云. 2019. 白僵菌应用研究进展. *中国森林病虫*, 38(2): 29–35]
- Ramos-Elorduy J, Pino JM. 1990. Contenido Calorico de Algunos Insectos Comestibles de Mexico. *Revta de la Sociedad Química de Mexico*, 34: 56–68
- Ren LQ, Wang YP, Li JQ, Tong J. 1998. Flexible unsmoothed cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance. *Chinese Science Bulletin*, 43: 166–169
- Ren S, Yang SY, Xu XY, Chen WT, Fang ZZ, Chen CX, Shi HY, Sun XL. 2020. Effect of *Tenebrio molitor* replacing fish meal on growth, digestive enzymes and body composition of *Cyprinus carpio haematopterus*. *Feed Research*, 43(11): 57–60 (in Chinese) [任顺, 杨树元, 徐晓燕, 陈婉婷, 方珍珍, 陈成勋, 石洪玥, 孙学亮. 2020. 黄粉虫代替鱼粉对锦鲤生长、消化酶及体成分的影响. *饲料研究*, 43(11): 57–60]
- Robinson GE, Hackett KJ, Purcell-Miramontes M, Brown SJ, Evans JD, Goldsmith MR, Lawson D, Okamoto J, Robertson HM, Schneider DJ. 2013. Creating a buzz about insect genomes. *Science*, 331(6023): 1386
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG. 2019. Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers. *Biological Conservation*, 232: 8–27
- Shyy W, Berg M, Ljungqvist D. 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5): 455–505

- Sun JY, Yan YW, Li FD, Zhang ZJ. 2021. Generative design of bioinspired wings based on deployable hindwings of *Anomala corpulenta* Motschulsky. *Micron*, 151: 103150
- Sun XL, Hu ZH. 2006. Progress in study and application of the viral insecticides in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 8(6): 33–37 (in Chinese) [孙修炼, 胡志红. 2006. 我国昆虫病毒杀虫剂的研究与应用进展. *中国农业科技导报*, 8(6): 33–37]
- Sun XL, Huang YJ, Zhu J, Pu GQ. 2011. Research status and prospect of recombinant *Baculovirus* insecticides. *China Sericulture*, 32(4): 6–8 (in Chinese) [孙兴鲁, 黄艳君, 朱江, 浦冠勤. 2011. 重组杆状病毒杀虫剂的研究现状与展望. *中国蚕业*, 32(4): 6–8]
- Wang D. 2015. Exploring the molecular mechanisms underlying the resistance of *Camellia sinensis* to *Ectopis oblique* probed by transcriptomic comparisons. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [王丹. 2015. 基于转录组比较探究茶树对茶尺蠖抗性分子机制. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Wang GL, Nan P, Gong FJ, Jia WJ, Zhu XQ, Yuan X. 1989. New resource of insect antifeedant-preliminary studies on chemical constituents in fruit oil of *Celastrus angulatus*. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 7(3): 301–302 (in Chinese) [王国亮, 南蓬, 龚复俊, 贾卫疆, 朱信强, 袁晓. 1989. 昆虫拒食剂新资源——苦皮藤果油的化学成分研究初报. *武汉植物学研究*, (3): 301–302]
- Wang HY. 2020. Application of pollinators in soybean cross breeding. *Modern Agriculture Research*, 26(2): 85–86 (in Chinese) [王洪岩. 2020. 传粉昆虫在大豆杂交育种中的应用. *现代农业研究*, 26(2): 85–86]
- Wang WX, Zhu TH, Lai FX. 2021. Research advances in symbiotic microorganisms in insects and their functions. *Acta Entomologica Sinica*, 64(1): 121–140 (in Chinese) [王渭霞, 朱廷恒, 赖凤香. 2021. 昆虫共生微生物及其功能研究进展. *昆虫学报*, 64(1): 121–140]
- Wang XE, Zhao YT. 2019. Development and utilization of insect tourism and ornamental insect groups in Sichuan Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 47(24): 149–151, 154 (in Chinese) [王兴娥, 赵永田. 2019. 四川观赏昆虫类群及昆虫旅游开发利用. *安徽农业科学*, 47(24): 149–151, 154]
- Wang XH, Fang XD, Yang PC, Jiang XT, Jiang F, Zhao DJ, Li BL, Cui F, Wei JN, Ma C, et al. 2014. The locust genome provides insight into swarm formation and long-distance flight. *Nature Communications*, 5: 2957
- Wang XY. 2018. *Chrysomya megacephala*: location, efficiency and mechanism of bioconversion on swine manure. PhD thesis. Wuhan: Huazhong Agriculture University (in Chinese) [王小云. 2018. 大头金蝇产卵定位及转化分解猪粪的效率与机制研究. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学]
- Wang XY, Lei CL, Zhu F. 2019. Prospects and problems of insect resources industrialization. *Insect Research in Central China*, 15(1): 124–132 (in Chinese) [王小云, 雷朝亮, 朱芬. 2019. 昆虫资源产业化的前景与问题. *华中昆虫研究*, 15(1): 124–132]
- Wang XY, Li K, Zhu F, Lei CL. 2016. Progress in the integrated application of *Chrysomya megacephala* (Diptera: Calliphoridae). *Acta Entomologica Sinica*, 59(10): 1143–1150 (in Chinese) [王小云, 李逵, 朱芬, 雷朝亮. 2016. 大头金蝇的综合利用研究进展. *昆虫学报*, 59(10): 1143–1150]
- Wang YQ. 2018. Preparation and bacteriostatic property of biomimetic mate based on microstructure of insect wing surface. Master thesis. Changchun: Changchun Normal University (in Chinese) [王誉茜. 2018. 基于昆虫翅表面微观结构的仿生材料制备及其抑菌性研究. 硕士学位论文. 长春: 长春师范大学]
- Wei JR, Yang ZQ, Du JW. 2007. Semiochemicals used by natural enemies as host seeking signal. *Acta Ecologica Sinica*, 27(6): 2563–2573 (in Chinese) [魏建荣, 杨忠岐, 杜家纬. 2007. 天敌昆虫利用信息化学物质寻找寄主或猎物的研究进展. *生态学报*, 27(6): 2563–2573]
- Wei MC, Liu GQ. 2001. The research and exploitation of insect protein. *Journal of Central South Forestry University*, 21(2): 86–90 (in Chinese) [魏美才, 刘高强. 2001. 昆虫蛋白质资源的开发与研究进展. *中南林学院学报*, 21(2): 86–90]
- Xiang ZH. 2003. Silkworm genome project and the silk road in the 21th century in China. *Acta Sericologica Sinica*, 29(4): 321–322 (in Chinese) [向仲怀. 2003. 中国家蚕基因组与21世纪丝绸之路. *蚕业科学*, 29(4): 321–322]
- Xiao JH, Yue Z, Jia LY, Yang XH, Niu LH, Wang Z, Zhang P, Sun BF, He SM, Li Z, et al. 2013. Obligate mutualism within a host drives the extreme specialization of a fig wasp genome. *Genome Biology*, 14(12): R141
- Xiao TG, Song HY, Chen CM. 1992. Parasitic insects of larvae of *Casimara patrona*. *Journal of Hunan Agricultural University*, 18(2): 288–292 (in Chinese) [萧铁光, 宋慧英, 陈常铭. 1992. 茶蛀梗虫幼虫寄生性昆虫的调查. *湖南农学院学报*, 18(2): 288–292]
- Xie SA, Zhang YL, Yuan F, Lu SJ. 2001. Conservation and utilization of the insect diversity in China. *Journal of Northwest Forestry University*, 16(2): 50–53 (in Chinese) [谢寿安, 张雅林, 袁锋, 吕淑杰. 2001. 我国昆虫多样性的保护和利用. *西北林学院学报*, 16(2): 50–53]
- Xing XQ. Isolation methods of insect microorganisms. *Journal of Southern Agriculture*, (7): 33–36, 48 (in Chinese) [幸兴球. 1979. 谈谈昆虫微生物的分离方法. *广西农业科学*, (7): 33–36, 48]
- Yang B, Pan R, Yang YP. 2014. Investigation on the development of tussah industry in Sichuan. *Sichuan Sericulture*, 42(3): 1–3 (in Chinese) [杨彪, 潘荣, 杨远萍. 2014. 四川柞蚕产业发展情况调研. *四川蚕业*, 42(3): 1–3]
- Yang GH. 2002. A brief talk of the development of beekeeping in Tibet. *Journal of Bee*, (12): 26 (in Chinese) [杨冠煌. 2002. 浅谈西藏养蜂业的开发. *蜜蜂杂志*, (12): 26]
- Yang HW. 2015. Review in utilization of insect natural enemies during the period from 1985 to 2015 in China (Part 1). *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 603–612 (in Chinese) [杨怀文. 2015. 我国农业害虫天敌昆虫利用三十年回顾(上篇). *中国生物防治学报*, 31(5): 603–612]
- Yang JL, Shen XK, Jiang Z, Sun JH. 2010. Utilization and transforma-

- tion of organic waste by *Tenebrio molitor*. *Animals Breeding and Feed*, (12): 59–62 (in Chinese) [杨金禄, 沈晓昆, 姜哲, 孙剑华. 2010. 黄粉虫对有机废弃物的利用与转化. *养殖与饲料*, (12): 59–62]
- Yang L, Zhang GJ, Xu T, Zhang LJ, Li JL, Zhang S, Qiang S, Ma DY, Liu YS. 2020. The effects of different agricultural organic wastes on the biological characteristics of *Protaetia (Liocola) brevitarsis* (Lewis). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(4): 946–954 (in Chinese) [杨柳, 张广杰, 徐韬, 张连俊, 李金兰, 张帅, 羌松, 马德英, 刘玉升. 2020. 不同农业有机废弃物对白星花金龟生物学特性影响研究. *应用昆虫学报*, 57(4): 946–954]
- Yang TJ, Cui QL, Wang YG. 1989. Feasibility of establishing Chinese Science Citation Index Database (CSCI). *Information Science*, 10(6): 50–52 (in Chinese) [杨廷郊, 崔庆礼, 王永刚. 1989. 建立中国科学引文索引数据库(CSCI)的可行性探讨. *情报科学*, 10(6): 50–52]
- Ye XQ, Hu C, Wang X. 1998. Analysis of nutritional component of six species of insects of Lepidoptera. *Acta Nutrimenta Sinica*, (2): 109–113 (in Chinese) [叶兴乾, 胡萃, 王向. 1998. 六种鳞翅目昆虫的食用营养成分分析. *营养学报*, (2): 109–113]
- Ye ZC, Wang R. 1992. Progress in the biological control of agricultural insect pests in China. *Entomological Knowledge*, 29(3): 179–182 (in Chinese) [叶正楚, 王韧. 1992. 中国农业害虫生物防治概况与进展. *昆虫知识*, 29(3): 179–182]
- You MS, Yue Z, He WY, Yang XH, Yang G, Xie M, Zhan DL, Baxter SW, Vasseur L, Gurr GM, et al. 2013. A heterozygous moth genome provides insights into herbivory and detoxification. *Nature Genetics*, 45(2): 220–225
- You MS. 1997. Conservation and utilization of the insect diversity in China. *Biodiversity Science*, 5(2): 135–141 (in Chinese) [尤民生. 1997. 论我国昆虫多样性的保护与利用. *生物多样性*, 5(2): 135–141]
- You QJ. 1966. Preliminary report on insects of resource value in the forest region of Hwa-Ping, Kwangsi. *Acta Entomologica Sinica*, (2): 152–154 (in Chinese) [尤其傲. 1966. 广西花坪林区资源昆虫考察初报. *昆虫学报*, (2): 152–154]
- Yu HZ, Liu FB. 2006. Development and utilization of insect protein. *Chemistry & Bioengineering*, (7): 7–9 (in Chinese) [余海忠, 刘法彬. 2006. 昆虫蛋白的开发利用现状. *化学与生物工程*, (7): 7–9]
- Zhang HJ, Yan Y, Peng L, Guo JY, Wan FH. 2012. Plant defense responses induced by phloem-feeding insects. *Acta Entomologica Sinica*, 55(6): 736–748 (in Chinese) [张海静, 严盈, 彭露, 郭建洋, 万方浩. 2012. 韧皮部取食昆虫诱导的植物防御反应. *昆虫学报*, 55(6): 736–748]
- Zhang HW. 2021. Investigation report on bee industry in Pinghu City. *Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary Medicine*, 46(5): 21–23 (in Chinese) [张华伟. 2021. 平湖市蜜蜂产业调研报告. *浙江畜牧兽医*, 46(5): 21–23]
- Zhang J, Wen YT, Gao ZH, Lei CL, Zhu F. 2019. Progress in research on, and the utilization of, *Hermetia illucens*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(5): 997–1006 (in Chinese) [张杰, 温逸婷, 高正辉, 雷朝亮, 朱芬. 2019. 黑水虻的资源化利用研究现状. *应用昆虫学报*, 56(5): 997–1006]
- Zhang K, Chen YB, Zhang S, Yang LS. 2022. Review of research and development of synthesis technique for prevention and control of major diseases and insect pests in the Fourteenth Five-Year Plan. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 69–75 (in Chinese) [张凯, 陈彦宾, 张昭, 杨礼胜. 2022. “十四五”重大病虫害防控综合技术研发实施展望. *植物保护学报*, 49(1): 69–75]
- Zhang LL. 2020. Development status of Chinese gallnut industry in China. *Biomass Chemical Engineering*, 54(6): 1–5 (in Chinese) [张亮亮. 2020. 五倍子资源加工利用产业发展现状. *生物质化学工程*, 54(6): 1–5]
- Zhang PD, Cha YP, Chen JY, Song DY, Chen CQ. 2019. Case study on Chinese gallnut industry development in Hubei Province. *Hubei Forestry Science and Technology*, 48(5): 31–33, 53 (in Chinese) [张品德, 查玉平, 陈京元, 宋德应, 陈赤清. 2019. 湖北省五倍子产业发展调研报告. *湖北林业科技*, 48(5): 31–33, 53]
- Zheng H, Zhang H, Chen XM. 2009. Study on extraction technology of cochineal chitin. *Food Science*, 30(2): 107–109 (in Chinese) [郑华, 张弘, 陈晓鸣. 2009. 胭脂虫甲壳素的提取工艺研究. *食品科学*, 30(2): 107–109]
- Zheng Y. 2018. The nanocarrier-based novel strategy for pest control. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [郑洋. 2018. 基于纳米载体的害虫防治新策略. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Zhou Q, Li ZR, Liu J, Lin Q, Wang CK, Jiang X. 2009. Effect of *Periplaneta americana* meal on immunity and antioxidation of broilers. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 38(2): 175–180 (in Chinese) [周琼, 李忠荣, 刘景, 林虬, 王长康, 姜旭. 2009. 美洲大蠊对肉鸡免疫功能与抗氧化能力的影响. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 38(2): 175–180]
- Zhu RZ, He JH. 1978. Parasitism of natural enemy insects. *Entomological Knowledge*, (1): 25–28 (in Chinese) [祝汝佐, 何俊华. 1978. 寄生性天敌昆虫的寄生现象. *昆虫知识*, (1): 25–28]

(责任编辑:王璇)