美国白蛾专栏

美国白蛾绿色防控研究进展*

陶萌萌[1,2**] 马庆辉[3] 孟昭军[1,2***] 严善春[1,2]

（1. 东北林业大学林学院，哈尔滨 150040；2. 东北林业大学林学院森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，哈尔滨 150040；3. 辽宁省沙地治理与利用研究所，阜新 123000）

摘 要 美国白蛾寄主多、分布广，且危害严重、防控困难，已严重影响到我国林业健康发展。目前，对于美国白蛾的防控主要以化学和生物防治为主，包括利用性信息素诱集美国白蛾、监测其种群动态，同时结合人工、物理防治来进行防控，其持续有效防控一直是研究的重点。本文主要综述了当前我国美国白蛾的分布现状、防治存在的问题及生态防控手段的研究进展与应用，并对转基因不育昆虫技术、昆虫 RNA 干扰及 *Bt* 转基因抗虫树种等新型防控技术的研究进展进行了介绍，对美国白蛾防治的未来发展趋势进行了展望，为美国白蛾有效防控提供借鉴。

关键词 美国白蛾；生物防治；绿色防控；RNA 干扰

Progress in the sustainable control of *Hyphantria cunea*

TAO Meng-Meng[1,2**] MA Qing-Hui[3] MENG Zhao-Jun[1,2***] YAN Shan-Chun[1,2]

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Liaoning Institute of Sand Management and Utilization, Fuxin 123000, China)

Abstract *Hyphantria cunea* has many hosts, a broad distribution, caused serious economic damage, is difficult to control, and has seriously affected the development of forestry in China. Control of this pest mainly relies on a combination of chemical and biological methods, including the use of sex pheromones traps and monitoring population dynamics in combination with chemical and biological control. However, developing more sustainable and effective methods for controlling of *H. cunea* has always been a focus of research on this species. This paper reviews the current distribution of *H. cunea* in China, problems in the prevention and control of this pest, and progress in the application of ecological control. It also introduces new control technologies, such as genetically-modified sterile insect technology, RNAi and *Bt* transgenic insect-resistant tree species. Finally, it forecasts the future trends in the development of *H. cunea* control methods

Key words *Hyphantria cunea*; biological control; sustainable control; RNA interference

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 又名秋幕毛虫、网幕毛虫，属于鳞翅目 Lepidoptera、目夜蛾科 Erebidae（韩辉林，2019），是一种可危害多种阔叶树的重大入侵性食叶害虫。美国白蛾原产于美国北部，后蔓延到匈牙利等 20 多个国家，于北纬 19°-55°N 地区广泛分布，其寄主多、繁殖量大、适应性强，被列为国际检疫害虫（李素霞等，2013）；1945 年其扩散到亚洲，从日本蔓延至韩国(1957 年)、朝鲜(1961 年)及中国(1979 年)。截至 2021 年，美国白蛾在我国发生面积已

*资助项目 Supported projects：国家“十三五”重点研发计划项目（2018YFC1200400）

**第一作者 First author，E-mail：3070365731@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：mengzj2018@nefu.edu.cn

收稿日期 Received：2022-10-14；接受日期 Accepted：2022-12-06

达 73.14 万 hm^2（赫传杰等，2022），目前已扩散至北京、天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、安徽、山东、河南、湖北、上海（2018 年新增）、陕西（2018 年新增）和浙江（2021 年新增）14 个省（自治区、直辖市），611 个县级地区，其中江苏省南京市玄武区、镇江高新技术产业开发区，浙江省嘉兴市嘉善县、平湖市均为 2021 年以来美国白蛾新发生的县级行政区（国家林业和草原局，2022）。

美国白蛾主要发生在城市郊区及乡镇周边，雌蛾产卵于寄主植物的叶片背面，幼虫共 6-7 个龄期，以蛹在树皮裂缝或石块下等缝隙处越冬（季荣等，2003；路丽平，2022）。其年发生世代与温度和光照有关（王少博等，2020）。据记载，美国白蛾在我国有 300 多种寄主植物，且不同地区美国白蛾的取食偏好不同（蔡东章，2019），其对寄主植物具有调节取食选择和解毒代谢的能力（李路莎等，2018），证明美国白蛾有极强的适生潜力。近年来，美国白蛾的发生对林业生态建设造成严重干扰，我国对美国白蛾防治进行了近 40 多年的研究和探索，尽管各种防治措施已愈发完善，但防控依旧存在问题，如频繁的药剂防治导致美国白蛾产生抗药性（罗立平等，2018），致使防治难度越来越大。因此，对美国白蛾的防治应从严防死守向绿色持续防控转变，从当地生态角度出发，开发有效的、持续的防治措施，管控美国白蛾种群的发生和蔓延。

1 美国白蛾防控存在的问题

针对这种分布范围广、寄主种类多的有害昆虫，尽管当地林业管理部门从前期的虫情监测，到爆发初期快速抑制种群数量增长，有明显降低其所造成的经济损失（罗立平等，2018），但美国白蛾的防控依旧存在问题。目前防控美国白蛾主要以飞机喷洒无公害化学药剂为主，大面积喷药防治时，难免受到建筑物、天线或其他障碍物的影响，易发生喷药不均匀或遗漏喷药等技术问题，致使防治效果不佳，同时对居民生活也会造成影响（邱立新等，2022）；而采取地面喷药或人工清除等方式防治，又因为美国白蛾寄主植物较高，树冠层中分布过于分散，导致防治不彻底，1-4 龄期幼虫主要在“网幕”内群集取食，进而阻碍药物触杀效果（卞忠玲等，2023）。目前应用于美国白蛾的各类防治技术仍需要进一步完善，例如美国白蛾性信息素研究已取得一些成绩，可以有效诱捕雄性美国白蛾，国内已突破自主合成技术壁垒，但仍存在合成成本较高、产率低、反应条件苛刻等问题，制约着美国白蛾性信息素应用发展（原超楠等，2022）。此外，各类预防措施、防控技术的推广力度不足，一些地区基层防治机构不健全，各项责任制还未落实到位，群众对于美国白蛾的危害性了解甚少，应向群众普及美国白蛾相关知识，充分调动广大群众积极参与这项长期而艰巨的防控任务（赫传杰等，2022）。

2 美国白蛾生态防控

森林害虫生态防控（Ecological control of forest pest, ECFP）的内涵是由森林系统内部功能出发，在充分了解森林系统结构和功能的前提下，掌握各种益、害生物种群的生长发育规律，全面考虑各项措施的控制效果、相互关系、连锁反应及对林木生长发育的影响（梁军和张星耀，2004），根据林下生物种群和森林之间互相协调的规律，实现持续控制有害生物生长发育的目的，有效提高森林生态系统的经济效益。即其是从生态系统内部入手，以生态化的模式进行控制，防治成本相对较低，经济效益高，控制范围大，防治后副作用小（杜国莲，2017）。采用的具体措施主要是物理防治和生物防治，以及利用植物源杀虫剂或仿生农药防控等，将这些防治措施与营林措施相协调，综合使用各种生态调控手段，尽可能地减少化肥、农药等的使用；将有害生物防治贯穿于森林经营的各个方面，将防治变成控制、对抗变为利用，促进林业健康发展（梁军和张星耀，2004）。

2.1 利用人工物理防治方法防控美国白蛾

对于尚未形成大规划灾害性地区，挖越冬蛹、诱捕成虫及第一代幼虫期剪除网幕均为很适

用的措施（刘枫和李群，2022）。美国白蛾幼虫初期结成的网幕一般为浅褐色或黑色，目标明显，利用高枝剪剪下网幕，集中烧毁可以起到显著防治效果。美国白蛾老熟幼虫有下树寻找隐蔽处化蛹的习性，可在树干距地面 1 m 处用稻草或干草围住树干，诱集老熟幼虫在稻草或干草内化蛹；在化蛹结束后，解除围在树干上的草片，集中烧毁，防治效果明显（罗帅，2021）。此外，可以利用美国白蛾诱捕器（万霞等，2021）、频振式杀虫灯及人工捕捉等防控美国白蛾。

2.2　利用生物防治方法防控美国白蛾

生物防治是利用了生物与生物之间的相互关系来应对有害生物，不会污染环境，是害虫持续防控最优策略。在野外环境下，通过释放天敌昆虫和喷洒生防微生物制剂，既可以有效控制当代美国白蛾的发生，又能抑制下一代的种群数量，并取得良好的防治效果。这种方法可以维持生物多样性，保护整个生态系统的自然平衡，达到长期持续控制美国白蛾的目的（Yang *et al.*，2008）。当前国内外对美国白蛾防治的研究方向都开始偏重于生物防治，例如 Sullivan 等（2010）在土耳其黑海中部的榛子种植园中发现一种本地美国白蛾蛹寄生蜂，寄生率达到 14.9%；Zibaee 等（2013）在不同寄主植物上使用球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 防治美国白蛾效果明显。Travis（2005）研究发现，受美洲天幕毛虫 *Malacasoma americanum* 危害的黑樱桃 *Prunus serotina* 影响美国白蛾对其选择偏好，从而减轻了美国白蛾的危害，但具体实施措施有待进一步研究。

2.2.1　寄生性和捕食性天敌的研究与应用　美国白蛾寄生性天敌主要包括寄生蜂类和寄生蝇类（赵旭东等, 2022）。1981-1982 年，辽宁省丹东地区的美国白蛾天敌种类调查发现 1 种卵寄生性天敌，2 种幼虫期寄生性天敌（舒超然和于长义，1985）；而 1996-1997 年大连市美国白蛾寄生天敌调查发现 1 种幼虫期寄生昆虫和 8 种蛹期寄生昆虫（杨秀卿等，2001）。2004-2006 年，秦皇岛市调查发现幼虫期捕食性天敌 2 种，寄生性天敌 2 种；蛹期捕食性天敌 2 种，寄生性天敌 12 种（乔秀荣，2007）。2017-2019 年，沈阳地区调查发现 14 种寄生性天敌昆虫，包括 8 种寄生蜂和 6 种寄生蝇（陈沉等，2020）。

1981-1982 年，辽宁省丹东地区发现美国白蛾的捕食性天敌有 30 多种，包括 20 多种蜘蛛、3 种蝽、3 种瓢虫，还有各种鸟类、两栖类（舒超然和于长义，1985）。2007 年在秦皇岛发现的捕食性天敌种类 19 种，其中卵期捕食性天敌 1 种，幼虫期捕食性天敌 2 种，蛹期捕食性天敌 2 种，其他为成虫期捕食性天敌（乔秀荣，2007）。2017-2019 年，沈阳地区调查发现 19 种美国白蛾捕食性天敌，包括 7 种捕食性昆虫和 12 种蜘蛛，其中对美国白蛾卵和幼虫有较强捕食能力为三突伊氏蛛 *Ebrechtella tricuspidata*、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和丽草蛉 *Chrysopa formosa*（陈沉等，2020）。

尽管美国白蛾的寄生性天敌昆虫众多，但是可以进行大量人工养殖且引入当地生境进行天敌防治的种类并不多。白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* 是杨忠岐教授 1989 年在美国白蛾蛹中发现的新物种，放蜂区的虫蛹寄生率高达 80%以上（杨忠岐等，2005）；此蜂当前主要通过人工繁育，在山东省烟台、河北省秦皇岛、辽宁省大连等地进行大面积推广使用，已取得显著的防治效果（郑雅楠等，2012）。日本追寄蝇 *Exorita japonica* 为幼虫-蛹跨期寄生性天敌（史永善，1981），一年发生 3-4 代，完成一个世代仅需 16-17 d，且研究发现其蛹有较强的耐低温能力，可以大量饲养并低温保存（Seo *et al.*，2021），具有良好的生防应用前景。

2.2.2　生防微生物的研究与应用　生防微生物主要包括自然界中存在的细菌、真菌、病毒等，通过筛选或基因工程培育为人们所用。在众多生防微生物中核型多角体病毒（Nucleopolyhedrovirus，NPV）、苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis*（*Bt*）和球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 等生物制剂在防治美国白蛾方面已经得到了广泛的应用。

核型多角体病毒是一种杆状病毒，直径为 0.5-1.5 μm，1979 年在美国白蛾幼虫体内首次发

现，致病能力非常强，对美国白蛾的致死率达80%以上，对 4-5 龄的幼虫有直接致死的能力，非常适用于美国白蛾的绿色防治（赵海燕等，2012）。但核型多角体病毒制剂见效慢，且高温天气和阴雨都会影响其稳定性（殷灿等，2015）。然而随着人们对核型多角体病毒研究的深入，通过基因重组、复配、改造等方式对其进行改良，核型多角体病毒杀虫剂各项指标已经逐渐完善。张文颖等（2022）选用 HycuNPV 与 *Bt* 复配进行林间药效防治美国白蛾第 1 代和第 3 代幼虫，研究发现相比单一 HycuNPV，复配的致死速度明显更快，且对第一代幼虫的防治效果更好。

苏云金杆菌是 1987 年在烟草中首次被发现，已经作为一种细菌低毒杀虫剂广泛应用于农林害虫防治领域，具有无残留、无公害、适应性强等特点，有很高应用价值（刘云鹏等，2019）。商荣秀（2016）在野外条件下使用 *Bt* 仿生制剂进行美国白蛾的飞机防治，虫口减退率达 97%以上。汤全正等（1991）和闫志利等（1999）筛选出的金云 1 号和 *Bt* 869 菌株对美国白蛾进行毒理研究，结果表明这两个菌株对 3 龄美国白蛾幼虫 24 h 的死亡率达 86.8%和 70%。刘子欢等（2015）发现白蛾幼虫被低浓度的 *Bt* 处理后有利于白蛾周氏啮小蜂寄生，表明 2 种生防措施具有协同增效作用。

球孢白僵菌是真菌性杀虫剂，由于较高的温湿度可以促进真菌的发育，可以在美国白蛾第 2 代发生期后（7 月后）施用，对美国白蛾进行长期稳定的控制，具有很高的生防潜力（Zibaee *et al.*, 2013；张龙娃等，2016）。李会平等（2015）研究发现虫生真菌对美国白蛾的致病性最高，处理 7 d 后，菌株 BH01 对美国白蛾的防治效果达 88.84%。

2.2.3 昆虫行为调控技术的研究与应用 随着对昆虫和植物之间关系的深入研究，昆虫行为调控技术已经在害虫防治方面已经展现出了非常强的应用潜力。昆虫行为调控技术就是将人工合成的特异性信息素释放到自然环境中，调控昆虫取食、寄主植物选择、交尾等行为（Bai *et al.*, 2020）。当前已研发出了直接诱杀成虫、干扰成虫交配，从而减少靶标害虫的后代种群数量等多种防治方法，将成为害虫绿色防治的新途径。

性信息素应用于虫情监测、害虫检疫方面（王留洋等，2022），也应用于大量地诱杀雄蛾，导致雌雄比例严重失调，减少交配机率（朱丽虹等，1998）。刘晓砚等（2001）利用美国白蛾性信息素在防治区、未防治区、新发生区和老发生区进行人工诱捕，发现在第 1 代与第 2 代发生期的诱捕数量成正相关，且引诱剂的诱集半径为 40-70 m，40 m 内诱捕率为 100%。

随着基因测序、组学功能分析和触角电生理技术的发展，可以从嗅觉基因角度反推出寄主植物作用于害虫的特征性气味分子（唐睿等，2012），通过人为干扰昆虫触角对特征性气味分子的识别，从而影响昆虫对植物的选择（钱韦等，2017）。李娜（2020）通过鉴定 11 种植物中对美国白蛾触角有活性的挥发性物质，得出 2,4-二甲基-1-庚烯是美国白蛾识别寄主植物的关键性成分，而 4-甲基庚烷在美国白蛾识别非寄主植物起关键作用。雌性美国白蛾对桑树 *Morus alba* 挥发物 β-罗勒烯和顺-2-戊烯醇比雄性更敏感，且 β-罗勒烯可以诱导美国白蛾交尾和产卵，产卵量是其他组的 4.5 倍（Tang *et al.*, 2012）。虽然植物挥发物对美国白蛾寄主行为有非常显著的趋性作用，但大多数是在室内条件下完成的，在室外环境中应用活性挥发物趋性作用调控美国白蛾种群还需要更多的实践（Zhang *et al.*, 2019）。

2.3 利用植物源杀虫剂或仿生农药防控美国白蛾

在美国白蛾种群大发生时期，为了快速降低虫口数量，一般采取飞机喷药进行大面积防治，防治效果显著。但使用有机合成的高毒化学农药不仅会杀害非靶标生物，还会诱导害虫产生抗药性，因此促使人们对研制新型高效低毒农药进行探索，特别是植物源杀虫剂或仿生农药，植物源杀虫剂具有高效、低毒、安全、无抗药性等特点（刘枫和李群，2022）。曾文豪等（2020）选用 0.3%苦参碱水剂、20%虫酰肼悬浮剂、0.5%印楝素乳油 3 种仿生药剂，在林场开展美国白蛾幼虫喷雾防治试验，校正死亡率均在 94%以上，能有

效杀死美国白蛾的幼虫，且交替用药，可避免害虫产生抗药性，有效增强对美国白蛾的毒杀作用。后续的林间药效研究发现，相比于 25%灭幼脲乳油和 20%虫酰肼悬浮剂，0.5%的印楝素乳油和 0.3%苦参碱乳油防治时间短，速效好（赵玉清等，2020）。

3　新型防控技术的研究进展

3.1　转基因不育昆虫的研究

近年利用遗传调控技术对生物入侵性害虫进行无公害防治是非常热门的话题。遗传调控是指筛选出与害虫自身生长发育相关的关键性基因后，通过基因敲除将其变成可遗传的突变体，再通过性别控制、遗传转化，使雄虫成为携带导致后代雌虫发育异常或发育不良的遗传复合体（徐汉虹等，2020）。当有缺陷的雄虫在自然界扩散后，借助种群的遗传能力，可以减少自然种群中雌虫的数量，实现昆虫种群的逐年下降（李芝倩等，2017；Alphey and Bonsall，2018）。李小卫（2020）筛选出美国白蛾种群遗传调控靶基因 *Hcdsx* 和 *Hcser*2，并且建立了 CRISPR/Cas9 介导的 *Hcdsx* 基因可遗传突变体和 Piggy Bac 介导的转基因 *Hcser2* RNAi 品系，验证了遗传调控技术在调控美国白蛾种群的可行性。Liu 等（2017）也利用 CRISPR/Cas9 技术对美国白蛾关键性发育基因 *wnt-1* 基因进行高效编辑，导致了较高的胚胎死亡率；在遗传突变体中有 32.9%的胚胎和幼虫发育异常，继代培养后获得体节融合、附肢缺失等多种表型，说明这种可遗传型特殊位点能够有效发挥作用，对其他非模式昆虫也有很好的应用前景。这种方法的优点是只在目标种群的遗传扩散中发挥作用，不会对其他的物种造成威胁，也不会造成环境污染。

3.2　昆虫 RNA 干扰的研究

RNA 干扰（RNAi）是利用外源双链 RNA（dsRNA）干扰使生物重要功能性基因转录后不表达的分子生物学现象（陈忠斌等，2002）。王越等（2019a）将带有 *HcChi-L4440* 表达载体的大肠杆菌菌液持续喂养美国白蛾幼虫，观察到靶标基因 *HcChi* 的相对表达量明显下降 76.7%-90.3%，幼虫生长发育迟缓，且体重增长量与对照组相比显著降低 40.7%，成功验证了 RNAi 用于美国白蛾防控的可行性。而后通过研究发现了一种与鳞翅目昆虫同源性高，且在美国白蛾各发育阶段和幼虫各组织均有表达的系统性基因 *HcSID*-1，经过 RNAi 后可以明显降低其表达水平，并影响其他靶标基因的表达（王越等，2019b）。殷晶晶（2020）通过克隆获得神经肽 *NPF* 和短神经肽 *sNPF* 及受体基因 cDNA 的基因全长，利用 RNAi 技术进行基因功能研究，利用 dsRNA 可有效沉默 *HcNPF* 和 *HcNPFR* 基因，且在 96 h 沉默效率最高，分别为 32.75%和 88.64%；与对照组相比，幼虫取食量分别下降 31.75%和 17.55%，体重累计增长率降低了 31.89%和 13.54%；雌蛾产卵量比对照组分别降低 70.86%和 59.87%，可以明显影响美国白蛾的正常发育。

美国白蛾在幼虫阶段丝腺非常发达，在 1-4 龄期间幼虫会释放大量的丝线形成网幕，起到良好的保护作用，但对我们进行喷药防治是极其不利的，药剂无法直接接触到害虫，而起不到应有的毒杀作用，但可以通过 RNAi 或遗传调控对丝蛋白基因进行沉默或敲除，可以显著降低防治难度（Kim *et al.*，2011）。利用 RNAi 可以准确干扰害虫某个特定基因，且这种方法已经在多种昆虫上证实可以导致害虫发育不良致死或重要功能缺失（陈学新，2010），具有极强的针对性，依靠 RNAi 对美国白蛾进行害虫防治是一种非常有前景的绿色防控方法。

3.3　*Bt* 转基因抗虫树种防控美国白蛾研究

利用转基因技术将外源杀虫基因转化到目标植物中并进行表达，可以使植物具有抗虫性，而其中相比于其他类型的转基因抗虫树种，*Bt* 转基因抗虫植物对害虫具有更强的毒力作用。*Bt* 转基因抗虫植物即通过研究 *Bt* 毒蛋白基因的特性，将其修饰改造后转入植物中表达，使植物具有抵抗特异害虫的能力（宋相杰，2017）。*Bt* 毒素对昆虫、线虫及其他特定的物种常表现出特

异的毒性（杨艳等，2014）。Ding 等（2017）使用转 *Bt* 基因 *Cry1Ah3* 和 *Cry9Aa3* 及 *Cry1Ac-SCK* 组合基因的山杨 *Populus davidiana* 叶片对美国白蛾和舞毒蛾进行抗虫效果测定，结果为转 *Cry1Ah3* 和 *Cry1Ac-SCK* 组合基因的山杨叶片上的幼虫平均死亡率分别为 97%和 91%，而 *Cry9Aa3* 转基因品系的死亡率为 49%。孙伟博等（2020）使用转 *Bt* 基因南林 895 杨（*Populus*× *euramericana* ‘Nanlin895’）对美国白蛾进行抗虫效果测定，美国白蛾幼虫取食 12 d 后，校正死亡率为 37.5%-68.9%。王璞等（2020）利用转 *Bt* 基因‘南林 895’杨 12 个株系扦插苗饲虫研究表明 12 个转基因株系对美国白蛾均有一定的杀虫活性，株系 A-5-0 对美国白蛾的 18 d 校正死亡率为 65.6%，且对美国白蛾幼虫的取食和生长有明显的抑制作用。当前对 *Bt* 转基因的研究不仅仅是将单个 *Bt* 基因导入植物中表达，而是将多个基因同时导入植物中，可以同时使植物具有抗虫、抗草、抗旱和促进生长等能力。

4 总结与展望

综上所述，未来在美国白蛾绿色防控方面还需要做好以下几点：1）建立完善美国白蛾监测系统。可以通过全球定位系统、CLIMEX（Ge *et al*., 2018）或遥感技术，及时准确的获得美国白蛾发生为害区域、面积及扩散基础信息（Wang *et al*., 2016）；2）目前已完成美国白蛾的全基因组测序。今后进一步在筛选靶标基因，研发高效运载体系，开发实施技术等方面深入研究，为探索基于 RNAi 的美国白蛾遗传调控方法铺平道路。（张苏芳等, 2022；赵旭东等, 2022）；3）加强关于美国白蛾对寄主植物的嗅觉识别机制的研究，深入对寄主植物挥发物的筛选和功能鉴定，通过具有引诱作用的植物挥发物制备诱捕器诱芯，与性信息素共同应用于美国白蛾的绿色防控（杨斌等，2020；王冰等，2021）；4）推动害虫天敌人工养殖产业的发展，既可以创造巨大的生态价值，也可以促进当地的经济发展，有利于社会的发展与持续有效地防治害虫（魏建荣等，2004）。此外深入研究美国白蛾的天敌组成类群是未来的主要研究方向，特别是研究天敌复合体的结构、内部互作关系和生态对策等方面（孙守慧等，2021）；5）未来可以深入研究如何协调新型分子调控技术和传统害虫防治技术（张苏芳等，2022），完善美国白蛾的防治措施，提高其防治效果。

参考文献 (References)

Alphey N, Bonsall MB, 2018. Genetics-based methods for agricultural insect pest management: Genetic control of agricultural pest insects. *Agricultural and Forest Entomology*, 20(2): 131–140.

Bai PH, Wang HM, Liu BS, Li M, Tang R, 2020. Botanical volatiles selection in mediating electrophysiological responses and reproductive behaviors for the fall webworm moth *Hyphantria cunea*. *Frontiers in Physiology*, 11: 486.

Bian ZL, Liu Z, Wang XM, Zhao LQ, 2023. Effects of larval densityon the life history paramentersof fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepiodoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, accepted. [卞忠玲, 刘郑, 王馨玫, 赵吕权, 2023. 幼虫密度对美国白蛾生活史参数的影响. 环境昆虫学报, 已接受.]

Cai DZ, 2019. Study on feeding preference of *Hyphantria cunea* Drury larvae. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(22): 63–64. [蔡东章, 2019. 美国白蛾幼虫取食选择性研究. 现代农业科技, 2019(22): 63–64.]

Chen C, Song LW, Zuo TT, Wang Y, Nan JK, Sun SH, 2020. Natural enemy complex of *Hyphantria cunea* (Drury) in Shenyang area. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(3): 353–360. [陈沉, 宋丽文, 左彤彤, 王悦, 南俊科, 孙守慧, 2020. 沈阳地区美国白蛾的天敌复合体. 中国生物防治学报, 36(3): 353–360.]

Chen XX, 2010. Recent progress, existing problems and prospects in biological control of insect pests in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(4): 615–625. [陈学新, 2010. 21 世纪我国害虫生物防治研究的进展、问题与展望. 昆虫知识, 47(4): 615–625.]

Chen ZB, Yu LC, Wang SQ, 2002. Recent advances on the RNA interference. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 18(5): 525–528. [陈忠斌, 于乐成, 王升启, 2002. RNA 干扰作用(RNAi)研究进展. 中国生物化学与分子生物学报, 18(5): 525–528.].

Ding LP, Chen YJ, Wei XL, Ni M, Zhang JW, Wang HZ, Zhu Z, Wei JH, 2017. Laboratory evaluation of transgenic *Populus davidiana*× *Populus bolleana* expressing Cry1Ac + SCK, Cry1Ah3, and Cry9Aa3 genes against gypsy moth and fall webworm. *PLoS*

ONE, 12(6): e0178754.

Du GL, 2017. Application of ecological control technologies and measures for forest pests. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2017(1): 104, 106. [杜国莲, 2017. 森林有害生物生态控制技术及措施的应用. 农业科技与信息, 2017 (1): 104, 106.]

Ge XZ, He SY, Zhu CY, 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.

Han HL, 2019. Progress of taxonomy of Erebidae (part), Euteliidae, Nolidae and Noctuidae (Lepidoptera) in the Northeast China. *Journal of Environmental Entomology,* 41(6): 1181–1195. [韩辉林, 2019. 中国东北目夜蛾科(部分)、尾夜蛾科、瘤蛾科和夜蛾科(鳞翅目)分类学研究进展. 环境昆虫学报, 41(6): 1181–1195.]

He CJ, Li JZ, Wang Y, Chen YF, Liu F, 2022. The occurrence of *Hyphantria cunea* in the United States and the trend forecast in 2022. *Forest Pest and Disease*, 41(1): 46–48. [赫传杰, 李加正, 王越, 陈怡帆, 刘枫, 2022. 美国白蛾发生情况及 2022 年趋势预测. 中国森林病虫, 41(1): 46–48.]

Ji R, Xie BY, Li HX, Gao ZX, Li DM, 2003. Research progress on the invasive species-*Hyphantria cunea*. *Entomological Knowledge*, 40(1): 13–18. [季荣, 谢宝瑜, 李欣海, 高增祥, 李典谟, 2003. 外来入侵种——美国白蛾的研究进展. 昆虫知识, 40(1): 13–18.]

Kim IY, kim HJ, know YM, Kang YJ, Lee IH, Jin BR, Han YS, Kim I, Cheon HM, Ha NG, Seo SJ, 2011. RNA interference mediated knockdown of apolipophorin-Ⅲ leads to knockdown of manganese superoxide dismutase in *Hyphantria cunea*. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A*, 159(3): 303–312.

Li HP, Huang QX, Wang J, Li W, 2015. Potential of entomopathogen *Beauveria bassiana* for controlling fall webworm *Hyphantria cunea*. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(9): 65–70. [李会平, 黄秋娴, 王婧, 李雯, 2015. 应用白僵菌防治美国白蛾的潜力(英文). 林业科学, 51(9): 65–70.]

Li LS, Yuan YF, Wu L, Chen M, 2018. Effects of host plants on the feeding behavior and detoxification enzyme activities in *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 61(2): 232–239. [李路莎, 袁郁斐, 武磊, 陈敏, 2018. 不同寄主植物对美国白蛾幼虫取食行为及解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 61(2): 232–239.]

Li N, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Hyphantria cunea* to several volatiles from 11 plants. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [李娜, 2020. 美国白蛾对 11 种植物的挥发物的电生理及行为反应. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Li SX, Zhang J, Zhang B, Zhang CG, Liu F, 2013. The distribution, damage and control of fall webworm (*Hyphantria cunea*). *World Pesticides*, 35(3): 41–46. [李素霞, 张杰, 张斌, 张灿光, 刘峰, 2013. 美国白蛾(*Hyphandria cunea*)分布、危害及防治研究进展. 世界农药, 35(3): 41–46.]

Li XW, 2020. Genetic regulation of hyphantria cunea using genome editing and transgenic technolog. Master dissertation. Shaanxi: Northwest A & F University. [李小卫, 2020. 基于基因组编辑和转基因技术的美国白蛾种群遗传调控研究. 硕士学位论文. 陕西: 西北农林科技大学.]

Li ZQ, Chen K, Yang FY, Huang YP, 2017. Application of genetic regulation technique for invasive pest management. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(8): 836–844. [李芝倩, 陈凯, 杨芳颖, 黄勇平, 2017. 适用于入侵害虫治理的遗传调控技术. 中国科学院院刊, 32(8): 836–844.]

Liang J, Zhang XY, 2004. The techniques and practice of forest pest ecological control. *Forest Pest and Disease*, 23(6): 1–8. [梁军, 张星耀, 2004. 森林有害生物的生态控制技术与措施. 中国森林病虫, 23(6): 1–8.]

Liu F, Li Q, 2022. Occurrence, forest control status and prospect of fall-webworm (*Hyphantria cunea* Drury)in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 53(5): 630–640. [刘枫, 李群, 2022. 美国白蛾在中国发生情况、林间防治现状及展望. 沈阳农业大学学报, 53(5): 630–640.]

Liu HH, Liu Q, Zhou XG, Huang YP, Zhang Z, 2017. Genome editing of *wnt-1*, a gene associated with segmentation, via *CRISPR/Cas9* in the pine caterpillar moth, *Dendrolimus punctatus*. *Frontiers in Physiology*, 7: 666.

Liu XY, Shen XF, Bai XJ, Fu PY, 2001. Application of sex pheromone of *Hyphantria cunea* in gardens. *Forest Pest and Disease*, (S1): 51. [刘晓砚, 沈学丰, 白雪婧, 富鹏远, 2001. 美国白蛾性信息素在园林上的应用. 中国森林病虫, (S1): 51.]

Liu YP, Zhang XT, Xie CX, Zhu H, 2019. Synergistic test of *Bt* strain with high virulence of *Hyphantria cunea*. *Journal of Anhui Agricultural University*, 46(5): 870–875. [刘云鹏, 张啸天, 解春霞, 朱虹, 2019. 美国白蛾高毒 *Bt* 菌株复配增效试验. 安徽农业大学学报, 46(5): 870–875.]

Liu ZH, Lu XJ, Li RJ, Liu TY, Guo W, Li BG, 2015. Effects of sublethal concentration of *Bt* on development of *Hyphantria cunea* and the parasitic wasp *Chouioia cunea* Yang. *Journal of Plant Protection*, 42(2): 278–282. [刘子欢, 陆秀君, 李瑞军, 刘廷辉, 郭巍, 李保国, 2015. 苏云金杆菌亚致死浓度对美国白蛾及其寄生蜂生长发育的影响. 植物保护学报, 42(2):

278–282.]

Lu LP, 2022. The harm and control measures of *Hyphantria cunea*. *Special Economic Animal and Plants*, 25(1): 53–54. [路丽平, 2022. 美国白蛾的危害及防治措施. 特种经济动植物, 25(1): 53–54.]

Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Cao LM, 2018. Research progress in the management of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 721–735. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 曹亮明, 2018. 美国白蛾防控技术研究进展. 环境昆虫学报, 40(4): 721–735.]

Luo S, 2021. Integrated control technology of *Hyphantria cunea*. *Forestry and Ecology*, 2021(9): 38–39. [罗帅, 2021. 美国白蛾综合防控技术. 林业与生态, 2021(9): 38–39.]

National Forestry and Grassland Administration (no. 5 of 2022), 2022. 2022 *Hyphantria cunea* epidemic area in the United States. http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20220318/110715854 936547.html. [国家林业和草原局（2022 年第 5 号）, 2022. 2022 年美国白蛾疫区. http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20220318/110715854 936547.html.]

Qiu LX, Lu XL, Lin X, Wen XY, Fan SQ, Shi Y, Chang GB, 2022. Discussion on the prevention and process of *Hyphantria cunea* in Chian and strategies in the new period. *Forest Pest and Disease*, 41(6): 1–7. [邱立新, 卢修亮, 林晓, 温玄烨, 范世奇, 时勇, 常国彬, 2022. 我国美国白蛾防控历程与新时期策略探讨. 中国森林病虫, 41(6): 1–7.]

Qian W, Qu J, Kang L, 2017. Decoding mechanisms of bio-interactions for targeted management of agricultural pests. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(8): 805–813, 800. [钱韦, 曲静, 康乐, 2017. 生物信息流操纵: 作物病虫害导向性防控的新科学. 中国科学院院刊, 32(8): 805–813, 800.]

Qiao XR, 2007. Investigation on the natural enemies of *Hyphantria cunea* in Qinhuangdao. *Forest Pest and Disease*, 26(3): 30–31, 34. [乔秀荣, 2007. 秦皇岛市美国白蛾天敌调查研究. 中国森林病虫, 26(3): 30–31, 34.]

Seo M, Seo BY, Lee GS, Cho JR, 2021. Effect of cold storage on the viability of *Exorista japonica* (Townsend) (Diptera: *Tachinidae*) pupae of an important parasitoid of noctuid larvae. *Crop Protection*, 141(4): 105425.

Shang RX, 2016. A review about qihe county plane spraying *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) prevention and control of *Hyphantria cunea*. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2016(5): 58–59, 71. [商荣秀, 2016. 飞机喷洒苏云金杆菌(*Bt*)防治美国白蛾效果调研. 河北林业科技, 2016 (5): 58–59, 71.]

Shi YS, 1981. The natural enemy of the *Hyphantria cunea* - *Exorista japonica*. *Acta Entomologica Sinica*, 24 (3): 342. [史永善, 1981. 美国白蛾的天敌——日本追寄蝇. 昆虫学报, 24 (3): 342.]

Shu CR, Yu CY, 1985. Investigation of the natural enemies of the *Hyphantria cunea*. *Journal of Environmental Entomology*, 1985(2): 91–94, 99. [舒超然, 于长义, 1985. 美国白蛾天敌的调查. 昆虫天敌, 1985(2): 91–94, 99.]

Song XJ, 2017. Research progress of *Bt* transgenic insect-resistant plants. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 47(2): 55–56, 59. [宋相杰, 2017. *Bt* 转基因抗虫植物的研究进展. 青海畜牧兽医杂志, 47(2): 55–56, 59.]

Sullivan GT, Karaca I, Ozmansullivan SK, Kolarov J, 2010. Ichneumonid (*Hymenoptera*) parasitoids of overwintering *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae) pupae in hazelnut plantations of the central Black Sea region of Turkey. *Zootaxa*, 2608(1): 63–68.

Sun SH, Nan JK, Yang LY, Song LW, Zuo TT, Wang Y, Li S, 2021. Research progress on natural enemies of the *Hyphantria cunea* (Drury). *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1331–1347. [孙守慧, 南俊科, 杨丽元, 宋丽文, 左彤彤, 王悦, 李硕, 2021. 美国白蛾天敌研究进展. 环境昆虫学报, 43(6): 1331–1347.]

Sun WB, Wang P, Yang ZK, Li HY, Zhu GQ, 2020. Study on the insect resistance of *Bt* transgenic poplar Nanlin 895 to *Hyphantria cunea*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 40(7): 107–118. [孙伟博, 王璞, 杨梓堃, 李红岩, 诸葛强, 2020. 转 *Bt* 基因南林 895 杨对美国白蛾抗虫性研究. 中南林业科技大学学报, 40(7): 107–118.]

Tang R, Zhang JP, Zhang ZN, 2012. Electrophysiological and behavioral responses of male fall webworm moths (*Hyphantria cunea*) to herbivory-induced mulberry (*Morus alba*) leaf volatiles. *PLoS ONE*, 7(11) e49256.

Tang R, Su MW, Zhang ZN, 2012. Electroantennogram responses of an invasive species fall webworm (*Hyphantria cunea)* to host volatile compounds. *Chinese Science Bulletin*, 57(25): 2380–2389. [唐睿, 苏茂文, 张钟宁, 2012. 重大林业入侵害虫美国白蛾对植物次生挥发物质的触角电位活性. 科学通报, 57(25): 2380–2389.]

Tang QZ, Pan HS, Zhao HL, Qi K, Ye WQ, 1991. Study on control of *Hyphantria cunea* by *Bacillus thuringiensis* 869 strain. *Forest Pest and Disease*, 1991(1): 16-19. [汤全正, 潘洪胜, 赵惠林, 戚凯, 叶维青, 1991. 苏云金杆菌 869 菌株防治美国白蛾的研究. 森林病虫通讯, 1991(1): 16–19.]

Travis HJ, 2005. The effect of eastern tent caterpillar (*Malacasoma americanum*) infestation on fall webworm (*Hyphantria cunea*) selection of black cherry (*Prunus serotina*) as a host tree. *The American Midland Naturalist*, 153(2): 270–275.

Wan X, Deng JY, Wang YP, 2021. Effects of different trap types and fluorescent tubes at different bands on capture of *Hyphantria cunea(*Drury). *Plant Protection*, 47(1): 103–107. [万霞, 邓建宇, 王义平, 2021. 不同诱捕器和不同波段 LED 灯对美国白蛾的引诱效果. 植物保护, 47(1): 103–107.]

Wang B, Li HM, Cao HQ, Wang GR, 2021. Mechanisms and applications of plant-herbivore-natural enemy tritrophic interactions mediated by volatile organic compounds. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(8): 1653–1672. [王冰, 李慧敏 , 操海群, 王桂荣, 2021. 挥发性化合物介导的植物-植食性昆虫-天敌三级营养级互作机制及应用. 中国农业科学, 54(8): 1653–1672.]

Wang CB, Qiao YY, Wu HG, Chang YF, Shi MY, 2016. Empowering fall webworm surveillance with mobile phone-based community monitoring: A case study in northern China. *Journal of Forestry Research*, 27(6): 1407–1414.

Wang LY, Yang CX, Guo BB, She DM, Mei XD, Yang XL, Ning J, 2022. Research progress and application prospects on insect sex pheromone. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 24(5): 997–1016.[王留洋, 杨超霞, 郭兵博, 折冬梅, 梅向东, 杨新玲, 宁君, 2022. 昆虫性信息素研究进展与应用前景. 农药学学报, 24(5): 997–1016.]

Wang P, Guo TB, Wei H, Sun WB, Zhu GQ, 2020. Analysis of insect resistance of Bt-transgenic poplar(NL-895) to *Hyphantria cunea* and *Micromelalopha troglodyte*. *Molecular Plant Breeding*, 18(14): 4645–4656. [王璞, 郭同斌, 魏辉, 孙伟博, 诸葛强, 2020. 转 Bt 基因‘南林 895’杨对美国白蛾和杨小舟蛾抗虫性分析. 分子植物育种, 18(14): 4645–4656.]

Wang SB, Zhou Z, Chen YM, Wang YZ, Zhang YA, Qu JL, 2020. Diapause of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) induced by photoperiod and temperature. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(4): 121–127. [王少博, 周洲, 陈怡萌, 王玉珠, 张永安, 曲良建, 2020. 光周期和温度诱导美国白蛾滞育. 林业科学, 56(4): 121–127.]

Wang Y, Zhang SF, Xu Y, Fang JX, Kong XB, Liu F, Zhang Z, 2019a. Construction of the expression vector and RNAi mediated by bacteria expressed dsRNA of chitinase gene from *Hyphantria cunea*. *Forest Research*, 32(2): 1–8. [王越, 张苏芳, 徐瑶, 方加兴, 孔祥波, 刘福, 张真, 2019a. 美国白蛾几丁质酶细菌表达的 RNA 干扰载体构建及其介导的 RNA 干扰. 林业科学研究, 32(2): 1–8.]

Wang Y, Zhang SF, Xu Y, Liu F, Kong XB, Zhang Z, 2019b. Cloning and expression profiles of HcSID-1 gene and its function verification in *Hyphantria cunea* larvae. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(10): 48–56. [王越, 张苏芳, 徐瑶, 刘福, 孔祥波, 张真, 2019b. 美国白蛾 HcSID-1 基因的克隆、表达模式分析及其在幼虫中的功能验证. 林业科学, 55(10): 48–56.]

Wei JR, Wang CZ, Qu HR, Yang ZQ, Shao LS, 2004. Study on biological control of *Hyphantria cunea* by insect natural enemy. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(2): 90–95. [魏建荣, 王传珍, 曲花荣, 杨忠岐, 邵凌松, 2004. 天敌昆虫对美国白蛾的生物控制研究. 林业科学, 40(2): 90–95.]

Xu HH, Wang JL, Wei JQ, Zhu J, Lin F, 2020. Insect population genetic regulation and reproductive characteristic interference and their prospects on controlling *Spodoptera frugiperda*. *Journal of South China Agricultural University*, 41(1): 1–8. [徐汉虹, 王佳丽, 韦加奇, 朱剑, 林菲, 2020. 昆虫种群遗传调控和生殖特性干扰及其在草地贪夜蛾防控中的应用前景. 华南农业大学学报, 41(1): 1–8.]

Yuan CN, Yang YX, Bian QH, Ma XD, Wang M, Zhong JC, 2022. Progress on the synthesis of sex pheromones of *Hyphantria cunea*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 24(4): 659–670. [原超楠, 杨宇雄, 边庆花, 马晓东, 王敏, 钟江春, 2022. 美国白蛾性信息素的合成研究进展. 农药学学报, 24(4): 659–670.]

Yan ZL, Zhao CM, Han LP, 1999. Efficacy test of the new *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) in the control of the *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 18(4): 22–24. [闫志利, 赵成民, 韩丽萍, 1999. 新型苏云金杆菌(*Bt*)防治美国白蛾药效试验. 森林病虫通讯, 18(4): 22–24.]

Yang B, Liu Y, Wang B, Wang GR, 2020. Olfaction-based behaviorally manipulated technology of pest insects: Research progress, opportunities and challenges. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 34(4): 441–446. [杨斌, 刘杨, 王冰, 王桂荣, 2020. 害虫嗅觉行为调控技术的研究现状、机遇与挑战. 中国科学基金, 34(4): 441–446.]

Yang XQ, Wei JR, Yang ZQ, 2001. A survey on insect natural enemies of *Hyphantria cunea* in Dalian district, Liaoning province. *Chinese Journal of Biological Control*, 17(1): 40–42. [杨秀卿, 魏建荣, 杨忠岐, 2001. 大连地区美国白蛾寄生性天敌昆虫. 中国生物防治, 17(1): 40–42.]

Yang Y, Li YH, Cao FQ, Chen LS, Peng YF, 2014. Progress in the assessment of ecological effects of insect-resistant *Bt* crops on non-target of lepidopteran insects. *Journal of Biosafety*, 23(4): 224–237, 214. [杨艳, 李云河, 曹凤勤, 程立生, 彭于发, 2014. 转 *Bt* 基因抗虫作物对鳞翅目非靶标昆虫生态影响的研究进展. 生物安全学报, 23(4): 224–237, 214.]

Yang ZQ, Wang XY, Wang CZ, Qiao XR, Pang JJ, 2005. Studies on utilizing parasitoid *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae) for sustainable control of fall webworm. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(5): 72–80. [杨忠岐, 王小艺, 王传珍, 乔秀

荣, 庞建军, 2005. 白蛾周氏啮小蜂可持续控制美国白蛾的研究. 林业科学, 41(5): 72–80.]

Yang ZQ, Wang XY, Wei JR, Qu HR, Qiao XR, 2008. Survey of the native insect natural enemies of *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae) in China. *Bulletin of Entomological Research*, 98(3): 293–302.

Yin C, Liu D, Ren J, Lu XP, Qiao LQ, 2015. Effect of temperature on activity of *Hyphantria cunea* nuclear polyhedrosis virus (HcNPV). *Journal of Shandong Agricultural University*(*Natural Science Edition*), 46(3): 353–356. [殷灿, 刘笛, 任骥, 卢希平, 乔鲁芹, 2015. 温度对美国白蛾核型多角体病毒活性的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 46(3): 353–356.]

Yin JJ, 2020. Functional analysis of neuropeptide F and its receptor genes in *Hyphantria cunea* (Drury) based on RNAi technology. Master dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. [殷晶晶, 2020. 基于 RNAi 干扰美国白蛾神经肽 F 及其受体基因功能分析. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]

Zeng WH, Lv XJ, Zhao YQ, Min H, Huang F, Zhang XH, Min SF, 2020. Preliminary report on control the larvae of *Hyphantria cunea* with three kinds of bionic pesticide. *Hubei Forestry Science and Technology*, 49(5): 39–42. [曾文豪, 吕晓君, 赵玉清, 闵浩, 黄芳, 张新华, 闵水发, 2020. 3 种仿生药剂防治美国白蛾幼虫试验初报. 湖北林业科技, 49(5): 39–42.]

Zhang J, Fu LB, Cheng B, Sun SH, 2019. Morphological Characteristics of antennal sensilla in *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Erebidae). *Transactions of the American Entomological Society*, 145(3): 421–434.

Zhang LW, Kang K, Liu YJ, Zhang J, Sun L, Zhan C, Huang CC, Jiang LY, Ye KY, Ding DG, 2016. Evaluation of *Beauveria bassiana* isolates as potential agents for control of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae). *Acta Entomologica Sinica*, 59(1): 111–118. [张龙娃, 康克, 刘玉军, 张晶, 孙龙, 詹成, 黄长春, 蒋丽雅, 叶开云, 丁德贵, 2016. 美国白蛾高毒力球孢白僵菌菌株筛选. 昆虫学报, 59(1): 111–118.]

Zhang SF, Zhang R, Zhang Z, 2022. Molecular control technology of pest population and its research progress in forest pest control. *Forest Pest and Disease*, 41(5): 22–31. [张苏芳, 张荣, 张真, 2022. 害虫种群分子调控技术及在森林害虫防控研究中的进展. 中国森林病虫, 41(5): 22–31.]

Zhang WY, Min H, Wu SB, Zhang XH, Xia TJ, Min FS, 2022. Analysis of forest efficacy of re-compounded with HycuNPV and *Bacillus thuringiensis* on control of *Hyphantria cunea*. *Hubei Forestry Science and Technology*, 51(3): 17–21. [张文颖, 闵浩, 吴胜兵, 张新华, 夏庭君, 闵水发, 2022. HycuNPV 与 BT 复配防治美国白蛾林间药效分析. 湖北林业科技, 51(3): 17 –21.]

Zhao HY, Wang YS, Xiu YY, Chen SL, Li CY, 2012. Field efficacy test of *Hyphantria cunea* nucleopolyhedrovirus against larvae of *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 31(1): 38–39. [赵海燕, 王艳士, 修玉义, 陈树林, 李长友, 2012. 美国白蛾核型多角体病毒林间药效试验. 中国森林病虫, 31(1): 38–39.]

Zhao XD, Geng YS, Hao DJ, Dai LL, Sun SH, 2022. Research progress and prospect of the control technology of *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 41(5): 44–52. [赵旭东, 耿薏舒, 郝德君, 代鲁鲁, 孙守慧, 2022. 美国白蛾防控技术的研究进展及展望. 中国森林病虫, 41(5): 44–52.]

Zhao YQ, Zeng WH, Min H, Chen S, Zhu AH, 2020. Field test and screening of four biomimetic pesticides against *Hyphantria cunea*. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(23): 114–116, 122. [赵玉清, 曾文豪, 闵浩, 陈肆, 朱艾, 2020. 四种仿生农药对美国白蛾林间药效试验及筛选. 绿色科技, 2020(23): 114–116, 122.]

Zheng YN, Qi JY, Sun SH, Yang CZ, 2012. Advance in research of *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidade) and its biocontrol application in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 28(2): 275–281. [郑雅楠, 祁金玉, 孙守慧, 杨长成, 2012. 白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的研究和生物防治应用进展. 中国生物防治学报, 28(2): 275–281.]

Zhu LH, Jin CL, Qi K, 1998. Study on the application of artificially synthesized sex pheromone of *Hyphantria cunea*. *Entomological Knowledge*, 35(4): 225–227. [朱丽虹, 金传玲, 戚凯, 1998. 人工合成美国白蛾性信息素的应用研究. 昆虫知识, 35(4): 225–227.]

Zibaee I, Bandani AR, Sendi JJ, 2013. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* to fall webworm (*Hyphantria cunea*) (Lepidoptera: Arctiidae) on different host plants. *Plant Protection Science*, 49(4): 169–176.