

# 我国森林害虫遗传防治研究进展

赖福胜<sup>1</sup>,陈元生<sup>2\*</sup>,罗惠文<sup>1</sup>,黄燕洪<sup>1</sup>

(1. 赣州市林业有害生物防治检疫局,江西 赣州 341000; 2. 江西环境工程职业学院,江西 赣州 341000)

**摘要:** 遗传防治是一种新近发展起来的害虫防治方法,其防治效果好、专一性强、安全性高,具有化学防治无可比拟的优点。阐述了辐射不育、化学不育、杂交不育、不育基因生物工程、有害基因生物工程等遗传防治技术在控制森林害虫方面的研究进展,并对今后森林害虫遗传防治研究工作进行展望。

**关键词:** 森林害虫; 遗传防治; 辐射不育; 化学不育; 杂交不育; 不育基因

**中图分类号:** S763.306.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2013)03-0001-05

## Progress on Genetic Control of Forest Pests in China

LAI Fu-sheng<sup>1</sup>, CHEN Yuan-sheng<sup>2\*</sup>, LUO Hui-wen<sup>1</sup>, HUANG Yan-hong<sup>1</sup>

(1. Forest Pest Control and Quarantine Bureau of Ganzhou, Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Genetic control is a newly developed pest control method, and is highly valued with its outstanding advantages of good control effect, strong specificity and high security. The research progress of the genetic technical measures in control of forest pests, such as radiation sterility, chemical infertility, hybrid sterility, infertility genetic bio-engineering, harmful genetic bio-engineering is described in this paper and the development trends of genetic control of forest pests are also discussed.

**Key words:** forest pests; genetic control; radiation sterility; chemical infertility; hybrid sterility; sterility gene

遗传防治是利用遗传学原理进行害虫防治,即利用物理(辐射)、化学和遗传等手段对害虫进行处理,改变或取代其遗传物质,降低其潜在的生殖能力。这是新近发展起来的一种害虫防治方法,不同于直接杀死当代害虫的传统化学药剂防治,它是将不育的或携带有害基因的雄虫释放到野生种群中,其与正常的野生雌虫交配后,使雌虫不能产生子代或者使有害基因在群体中传播引起致死,从而导致害虫种群在几个世代内迅速下降,甚至灭绝<sup>[1-2]</sup>。这种害虫防治方法不污染环境,不杀伤天敌,害虫也不产生抗性,效果较迅速,属于生物防治范畴。

目前,我国森林害虫发生面积达 900 万  $\text{hm}^2$ ,害虫种类多达 5 000 多种,主要森林害虫(200 余种)

危害重,有些森林害虫防治十分困难,如桑天牛(*Apriona germari*)、光肩星天牛(*Anoplophora glabripennis*)、松褐天牛(*Monochamus alternatus*)、马尾松毛虫(*Dendrolimus punctatus*)、美国白蛾(*Hyphantria cunea*)、舞毒蛾(*Lymantria dispar*)等,至今尚未找到十分理想的防治方法。当前化学防治仍然是森林害虫防治的主要手段,但单纯的化学防治难以解决上述问题,且化学防治具有对人畜不安全、害虫易产生抗药性等缺陷,因此,国内外许多单位正致力于研究诸如生物制剂、引诱剂、不育剂和遗传绝育等防治方法,其中遗传防治以防治效果好、专一性强、安全性高等突出优点而备受世界各国重视。近十几年来,我国的森林害虫遗传防治

收稿日期:2012-07-27

基金项目:江西环境工程职业学院科技孵化项目(2012-6)

作者简介:赖福胜(1968-),男,江西信丰人,高级工程师,主要从事林业有害生物防治研究。E-mail: gzs1fs@163.com

\* 通讯作者:陈元生(1967-),男,江西信丰人,副教授,博士,主要从事昆虫生物学及害虫防治研究。E-mail: cys0061@163.com

研究已有很大进展。森林害虫的遗传防治包括辐射不育、化学不育、遗传不育(杂交不育、胞质不亲和性及染色体易位)、基因工程等几个方面,为此,从这几方面对我国森林害虫遗传防治的研究进展进行综述,旨在为今后森林害虫遗传防治方法的进一步研究、开发及推广应用提供参考。

## 1 辐射不育

辐射不育是利用  $\gamma$  或 X 射线等辐射源照射害虫,破坏其生殖腺,使之不育,而后因地制宜地将大量不育雄虫投放到该种昆虫的野外种群中,造成野外雌虫产的卵不能孵化或虽能孵化但因胚胎发育不良造成死亡,最终达到彻底根除该种害虫的目的<sup>[3]</sup>。自 20 世纪 50 年代辐射技术广泛用于昆虫学领域以来,我国运用辐射不育技术防治森林害虫已有 50 余年的历史,但进展缓慢,其中研究最早和应用较成功的例子是马尾松毛虫,主要采用的辐射源是  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线。

马尾松毛虫的辐射不育。彭趋贤等<sup>[4]</sup>报道,采用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线照射马尾松毛虫雄蛹(发育后期)能取得良好效果,主要表现在子代卵的不孵化、孵化幼虫在初龄死亡或下代丧失生殖能力等三方面。照射剂量在 210.1~252.1 Gy 时,其子代卵不孵化率可达 85% 以上,孵化部分的幼虫死亡率达 70%,成活部分也几乎全部丧失生殖能力。江西省森林病虫害防治试验站对越冬代及第 1 代马尾松毛虫进行试验,结果显示,照射后的雄蛾在活动、交尾等习性方面与正常雄蛾无显著差异<sup>[5]</sup>。赵恒元<sup>[6]</sup>进行林间释放不育虫体试验,结果显示,试验林区的虫口数量比对照林区低了 18.4 倍,照射过的雌、雄虫在林间均起到了压低虫口数量的作用。何丽华等<sup>[7]</sup>对人工饲养的马尾松毛虫老熟蛹采用 10~80 Gy 剂量的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐射,结果显示,辐射老熟蛹对成虫寿命和产卵量影响不明显,辐射后的雌成虫与正常雄成虫交尾所产卵的孵化率随着辐射剂量的加大而明显降低,经 80 Gy 以下剂量辐照的雄成虫与正常雌成虫交尾所产卵的孵化率随着辐照剂量的加大无明显下降。

松褐天牛的辐射不育。据报道<sup>[8-9]</sup>,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐射可以使松褐天牛不育,其中雄虫较雌虫对辐射更敏感,松褐天牛的全不育剂量为 40 Gy,该辐射剂量较低,既可导致松褐天牛全不育,又不影响其生命力和交尾竞争能力,因此,该剂量是松褐天牛的适宜辐射剂量。牟建军等<sup>[10]</sup>利用 40 Gy  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对松褐天牛进行辐照处理,结果表明,经处理过的松褐天牛雌、雄虫生育力显著下降,在和未经辐照处理的

松褐天牛雌、雄虫的生殖竞争中,能降低未经辐照处理松褐天牛生育卵的孵化率,即交配行为表现出激烈性内竞争行为,从而证明释放辐照松褐天牛不育虫来降低林间松褐天牛种群数量,达到防止松材线虫病扩散和蔓延是切实可行的。对雌虫辐射的防治效果比对雄虫辐射更为显著,其防治效果分别为 35.62% 和 32.83%,辐射不育雌、雄虫的最佳释放比例均为健康雌、雄虫的 2 倍左右<sup>[8]</sup>。

桑天牛、光肩星天牛等杨树天牛的辐射不育。杨树天牛成虫寿命长(一般 1 个月以上),具有较强扩散能力和多次交尾现象,利于采用不育防治。马怀云等<sup>[11]</sup>开展了  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对桑天牛雄成虫的辐射不育试验,发现辐射可使桑天牛雄虫不育,可育率明显降低,仅为 9%,且子代幼虫无一成活,雌虫对辐照较敏感。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对桑天牛雄虫取食、活力、寿命、交尾及孵化幼虫均有明显影响,雄虫不育剂量的上限为 163.2 Gy<sup>[12]</sup>。而对于不育成虫与野生桑天牛在交尾竞争能力上的差异,不育虫的释放比例、次数及方法等还需进一步研究<sup>[11]</sup>。据报道<sup>[13-15]</sup>,采用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐射光肩星天牛雌成虫,可对其产卵行为产生显著影响,辐射还可诱导雄成虫不育,其适宜辐照量为 97 Gy,剂量率为 970 Gy/min。研究表明,光肩星天牛羽化后 7~10 d 是较为适合的辐照时期<sup>[16-17]</sup>。辐照的野生雄虫比辐照的实验室饲养雄虫具有更强的交尾竞争能力,可以取得更好的防治效果,但野生雄虫需要更高的辐照剂量率<sup>[17]</sup>,研究表明,田间释放比为 5:1 时可压低光肩星天牛野生虫口数量<sup>[17-18]</sup>。刘晓辉等<sup>[16]</sup>试验表明,释放的辐照光肩星天牛有效地抑制了试验林中正常光肩星天牛种群的繁殖。

美国白蛾的辐射不育。马沛沛<sup>[19]</sup>研究了辐照后美国白蛾的各项生理指标,认为  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照虫态以化蛹后 7~8 d 的老熟蛹为好,其羽化率为 76.00%,卵的不育率随辐照剂量的升高而升高,不育辐照剂量以 400 Gy 为宜。

## 2 化学不育

化学不育是将某些化学物质(不育剂)施用于昆虫,造成昆虫不育,不育昆虫与正常昆虫交配后产下的卵为不育卵,从而达到减少或消灭害虫的目的。化学不育比辐射不育更为优越,因为化学不育防治无需大量饲养、释放不育虫<sup>[1,20]</sup>,只需将不育剂直接施于田间,即达到防治害虫的目的。化学不育剂的种类很多,有数百种,但目前用于森林害虫防治的不育剂主要有灭幼脉、噻替派、CS II、六磷胺、喜树

碱等。

灭幼脲是一种昆虫几丁质合成抑制剂(苯甲酸基脲类衍生物)。灭幼脲对成虫的不育作用,实质上是对子代卵孵化的抑制作用,其经雌虫传递进入子代卵内的时期为卵黄沉积期,尤其是卵黄沉积盛期,主要影响胚胎发育期间几丁质的合成,抑制体壁和气管系统的形成,从而使卵不能孵化或使幼虫死于卵壳内<sup>[21-22]</sup>。灭幼脲作为成虫不育剂使用时,适用于在成虫期进行卵子发生的昆虫,施药时间应在卵黄发生之前<sup>[23]</sup>。灭幼脲对成虫的不育作用已在双翅目、鳞翅目、鞘翅目、直翅目等多种昆虫中得到证实。应用灭幼脲防治森林害虫,除了直接用于杀死害虫获得明显防治效果外,也可作为不育剂使用,在松褐天牛<sup>[21]</sup>、云斑天牛(*Batocera horsfieldi*)<sup>[23]</sup>、桑天牛<sup>[24-25]</sup>、栗山天牛(*Massicus raddei*)<sup>[26]</sup>、美国白蛾<sup>[27]</sup>、杨干象(*Cryptorhynchus lapathi*)<sup>[28]</sup>等害虫防治中也取得了较好效果。

采用噻替派对松褐天牛初羽化成虫、美国白蛾幼虫分别进行处理,结果它们的产卵量均显著下降,但对成虫的寿命、交尾竞争力等无显著影响<sup>[19]</sup>。噻替派可导致雄性荔枝蜡象(*Tessaratoma papillosa*)不育,田间释放试验表明,当不育雄虫、正常雄虫和正常雌虫比例为8:1:1时,可导致卵不孵化率达94%以上<sup>[29]</sup>。湖南林业科学研究所等应用噻替派处理马尾松毛虫雄蛾后,使其与正常雌蛾交尾,具有明显不育效果,在药剂质量浓度30~50 mg/mL范围内,不育效果随质量浓度增大而升高,交配率随质量浓度增大、接触时间增长而降低<sup>[30]</sup>。

唐桦等<sup>[31-32]</sup>用自行研制的CSⅡ化学不育剂(可湿性粉剂)对光肩星天牛、山楂叶螨(*Tetranychus viennensis*)进行林间喷雾防治试验,结果表明,利用该不育剂可得到理想的不育效果,其中不育剂20倍液在天牛成虫羽化盛期进行林间喷雾,天牛卵及初孵幼虫的校正总不育率达72.08%。CSⅡ对美国白蛾、松褐天牛也具有一定的不育效应<sup>[19]</sup>。唐桦等<sup>[33]</sup>采用注药法将六磷胺注入树干内,结果发现,六磷胺可在树干内上下输导,并能残留约1个月,致使当年羽化出的光肩星天牛成虫表现出明显的不育效应,当注药量为40 mL/株时,其卵未孵化率、孵化后的致畸死亡率及校正后的总死亡率分别为80.0%、8.4%和86.5%。喜树碱对松褐天牛也具有一定的不育效应<sup>[19]</sup>。

化学不育剂与食物引诱剂、性引诱剂、光或声音等物理引诱剂结合应用可增强其效果<sup>[1]</sup>。周石涓等<sup>[34]</sup>分别将性诱剂和噻替派以及性诱剂和喜树碱

结合使用,对马尾松毛虫进行雄蛾诱捕率和不育效果测定,获得比较好的结果。

### 3 遗传不育

遗传不育是通过遗传机制的作用而达到后代不育,主要包括胞质不亲和性、染色体易位及杂交不育3种情况。前2种情况均未见在森林害虫防治中开展研究与应用,这里主要介绍杂交不育。

杂交不育是指亲缘关系较近的2种昆虫之间杂交,因染色体不能配对而产生雄性不育的杂种一代( $F_1$ ),但由于杂种优势的存在,其竞争配偶的能力很强,远远强过由辐射和化学不育剂处理的不育雄虫,因此,通过大量释放这种杂种雄虫能够有效地逐步消灭其亲本种群。马尾松毛虫、油松毛虫(*D. tabulaeformis*)、赤松毛虫(*D. spectabilis*)、落叶松毛虫(*D. superans*)亲缘关系较近,相互间都可以进行杂交<sup>[35-36]</sup>,松毛虫种间杂交的 $F_1$ 代常显示出一定的“杂交”优势,落叶松毛虫与马尾松毛虫、赤松毛虫和油松毛虫之间表现出一定程度的生殖隔离, $F_1$ 代自交未能产生 $F_2$ 代<sup>[36]</sup>。文山松毛虫(*D. punctatus wenshangnensis*)与马尾松毛虫杂交,其杂种也表现出一定的杂种优势, $F_1$ 代与雌性马尾松毛虫回交得到的子代生命力较弱<sup>[37]</sup>。这些结果都为利用杂交不育来防治松毛虫提供了可能,有待于深入研究。

### 4 基因工程

害虫遗传防治是转基因昆虫应用的一个重要领域。利用昆虫基因自身的表达产物来消灭和控制害虫是害虫遗传防治的重要组成部分,其中利用的基因包括性不育基因、毒素基因、抗性基因、神经多肽激素基因等。

利用雌性不育基因(female sterilizing genes,简称FS基因)生物工程来控制害虫,即利用基因工程重组技术将一个显性FS基因插入到雄虫基因组中,然后释放携带有FS基因的雄虫,其与林间雌虫交尾后,FS基因只能在子代雌虫中表达而造成雌虫不育,但子代雄虫中FS基因不表达因而可正常发育并和林间雌虫正常交尾,也就是说FS基因可通过雄虫遗传且对雌虫致死,最终达到控制害虫数量的目的<sup>[38-39]</sup>。具有这种FS基因的雄虫与经化学不育剂或辐射处理的雄虫不同,其生命力未减弱,因而在林间完全可以与野生雄虫竞争,而且应用这种方法进行遗传防治,不需要每代都释放不育雄虫<sup>[39]</sup>。

真正利用昆虫基因自身的表达产物来消灭和控

制害虫还只是设想或处在起步阶段。有人提出另一种遗传防治害虫的新设想,即武装转座子-靶标昆虫防治策略(transposons with armed cassettes-targeted insect control strategy,简称 TAC-TICS)。首先构建 TAC 基因结构,其由转座子与条件表达的危害昆虫的基因组成,然后将这一结构转入靶标害虫,之后将获得的转基因害虫释放于环境。这种转座子能通过交配遗传,在害虫种群密度低的时候,有害基因并不表达,而是借助转座子可移动的本性,通过转基因昆虫与自然种群的个体交配,在后代中迅速扩增蔓延,直至种群的绝大多数都带有 TAC 基因结构。在靶标害虫暴发的年份,通过释放诱导因子激活潜在的有害基因,使害虫死亡或丧失危害能力,而诱导因子对食物链中其他生物没有影响<sup>[40]</sup>。

利用昆虫有害基因来控制害虫。昆虫有害基因是指昆虫群体中存在一种对其本身有害的基因突变,而且有可能在其后代中导致死亡<sup>[41]</sup>。其中最具有应用前景的是显性条件致死基因突变,包括温度敏感致死突变、不能滞育的突变。温度敏感致死突变是基因的突变,在许可的温度条件下并不表现,害虫能正常生长发育,而在限定的温度条件(如超出某一值)下致死突变基因便发生作用,造成害虫死亡<sup>[41]</sup>。应用时可将这类害虫在适合的温度条件下大量饲养并释放,待致死条件来临时,即可使害虫种群数量大为减少或消失<sup>[1]</sup>。将无滞育地区的和必须滞育越冬地区的同种不同品系的昆虫进行杂交,可能得到不滞育突变型,这种不滞育突变型昆虫与滞育型昆虫交配产生的后代也是不滞育的。应用时可将这类不滞育突变型昆虫大量饲养,释放于必须滞育的越冬地区,造成此昆虫自然种群因不能越冬而死亡。

## 5 展望

森林害虫的遗传防治虽是一种新近发展起来的害虫防治方法,但已有一些成功的实例,它能导致害虫种群基本消灭或更替,具有化学防治无可比拟的优点,显示了其广阔的发展前景。但遗传防治也有其自身的局限性,并且目前研究中还存在一些问题,如①必须大量人工饲养、释放不育虫,释放数量要超过靶标害虫的数倍甚至数十倍,并要求林间的虫口数量保持在相当低的水平,方能有明显的效果;②目前的遗传防治多是释放经放射或不育剂处理的不育雄虫,因此在昆虫饲养时、释放前必须大量除去或杀死雌虫,手续繁杂,工作量大;③现有的化学不育剂还不够理想,选择性不强,有些还有“三致”作用;④现应用的不育雄虫技术只是单个不育因子在起作

用。要解决这些不足之处,今后应注重开展以下研究与应用。

(1) 应把害虫遗传防治作为综合防治的重要组成部分加以研究,先采用其他防治方法压低虫口密度后,再释放不育虫,研究  $\gamma$  射线产生不育性的作用机制并研究不育虫释放比例、次数及方法等。如果在释放松毛虫不育虫同时释放卵寄生蜂,就可以利用林间大量的不孵化卵,创造卵寄生蜂的良好繁衍条件,这样遗传防治与天敌控制相结合,将能取得更理想的持续控制效果。

(2) 加强有效的非“三致”化学不育剂及其作用机制、施药时间、施药地点和对昆虫生活习性的影响研究,研究不育剂与食物引诱剂、性引诱剂、光或声音等物理引诱剂的配合应用技术,使害虫自动产生化学不育。

(3) 简化有利于推广的释放技术,研究雌雄虫同时照射的最适剂量、同时释放的可行性。如马尾松毛虫雌性对  $\gamma$  射线很敏感,如能雌雄虫一起照射,同时释放,将可简化防治利用的手续。或者通过基因工程技术来控制害虫的性别,如将一种热休克蛋白基因的启动子插在决定雄虫的显性基因之前,就可以在该虫胚胎发育时,用高温处理虫卵,使该启动子启动雄性基因表达,那么所有个体都将发育成为雄虫,这样将可大大简化昆虫饲养的除雌手续、降低成本。

(4) 在单个不育因子的基础上,加强建立多因子的综合品系用于防治。如将胞质不亲和性和雄性连锁易位结合为综合系,或者通过“遗传合成”使易位品系的染色体上带有隐性致死因子和条件致死因子,使得释放品系在不同时期和害虫的不同发育阶段都能起到降低群体密度的作用,从而大大提高防治效果<sup>[41]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 伍建芬. 害虫的遗传防治[J]. 山西林业科技, 1979(2): 81-84.
- [2] 缪建吾. 基础知识讲座: 蚊虫的遗传防治[J]. 四川动物, 1983(4): 40-43.
- [3] 王建斌. 辐射不育技术在害虫防治中的应用[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(增刊): 33-35.
- [4] 彭趋贤, 邱宗谓, 罗嘉梁, 等.  $\gamma$  射线对松毛虫的不育效应及其防治应用的初步研究[J]. 昆虫知识, 1965(1): 1-5.
- [5] 江西省森林病虫害防治试验站. 钴-60  $\gamma$  射线对松毛虫不育效应的试验[J]. 农业科技通讯, 1974(1): 15-17.

- [6] 赵恒元.  $\gamma$ 射线照射引起松毛虫不育在防治上的应用[J]. 昆虫知识, 1984(6): 272.
- [7] 何丽华, 翁宏飏, 牛宝龙, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照对马尾松毛虫繁殖力的影响[J]. 中国森林病虫, 2009, 28(1): 25-26.
- [8] 牟建军, 张永安, 李孟楼, 等. 松墨天牛辐射不育的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 207-210.
- [9] 马沛沛, 张永安, 王登元, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线对松褐天牛生育力的影响[J]. 核农学报, 2008, 22(1): 101-104.
- [10] 牟建军, 吾中良, 陈卫平, 等. 松墨天牛辐射不育效应研究[J]. 中国森林病虫, 2009, 28(1): 13-15.
- [11] 马怀云, 崔应时, 彭镇华, 等. 桑天牛辐射不育的研究[J]. 中国森林病虫, 1999(3): 8-10.
- [12] 彭镇华, 王善武, 崔应时. 桑天牛成虫行为及雄虫辐射不育的研究[J]. 安徽农业大学学报, 1994(增刊): 50-53.
- [13] 唐桦, 刘益宁, 王学才, 等. 光肩星天牛雄性不育技术研究初报[J]. 森林病虫通讯, 1994(3): 19-21.
- [14] 陈美红, 谢吉平. 光肩星天牛雄性不育效应研究[J]. 核农学报, 2004, 18(1): 65-67.
- [15] 唐桦, 姜文胜, 陈梅红, 等. 光肩星天牛受辐雌成虫的不育性初步研究[J]. 中国森林病虫, 2001, 30(2): 10-11.
- [16] 刘晓辉, 李咏军, 张书勇, 等. 辐照对光肩星天牛交配能力的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(5): 402-404.
- [17] 李咏军, 刘晓辉, 王恩东, 等.  $^{60}\text{Co}$ 辐照对光肩星天牛雄虫繁殖生物学的影响[J]. 核农学报, 2006, 20(5): 441-443.
- [18] 路大光, 康文, 李咏军, 等. 利用昆虫辐射不育技术防治光肩星天牛的可行性[J]. 核农学报, 2001, 15(5): 302-307.
- [19] 马沛沛. 松褐天牛及美国白蛾不育技术的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [20] 王建斌. 化学不育技术在害虫防治中的研究进展[J]. 园艺与种苗, 2011(3): 121-123.
- [21] 嵇保中, 易双军, 刘曙雯, 等. 松墨天牛卵巢发育特点和灭幼脲对其不育效应的影响[J]. 植物保护, 1999, 25(5): 4-8.
- [22] 金凤. 绿色农药灭幼脲不育作用研究进展[J]. 南京农专学报, 2002, 18(2): 1-5.
- [23] 嵇保中, 刘曙雯, 居峰, 等. 灭幼脲对云斑天牛不育作用的效应期[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(2): 93-96.
- [24] 黄大庄, 张彦广, 阎浚杰, 等. 灭幼脲类杀虫剂对桑天牛成虫的作用及其机制[J]. 林业科学, 1998, 34(2): 115-120.
- [25] 唐进根, 嵇保中, 钱范俊. 灭幼脲对桑天牛成虫的生物活性[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(3): 31-34.
- [26] 姜静, 杨忠岐, 唐艳龙, 等. 三种仿生不育剂对栗山天牛成虫的不育效应[J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(1): 58-64.
- [27] 马沛沛, 张永安, 王登元, 等. 美国白蛾化学不育试验初报[J]. 林业科学研究, 2009, 22(3): 461-462.
- [28] 苗建才, 迟德富, 郝然喜. 灭幼脲对杨干象作用机制和防治的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(4): 325-332.
- [29] 林朝森, 赵善欢. 荔枝蜡象的化学不育试验[J]. 昆虫学报, 1983, 26(4): 379-387.
- [30] 湖南林业科学研究所, 广东农林学院林学系, 衡阳地区林科所. 噻替派对马尾松毛虫不育效果的初步试验[J]. 昆虫学报, 1976, 19(1): 112-114.
- [31] 唐桦, 康忠, 张煜明, 等. CSⅡ不育剂对光肩星天牛的小面积林间喷雾防治试验[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 69-71.
- [32] 唐桦, 郑哲民, 姜文胜, 等. CSⅡ不育剂林间喷雾防治山楂叶螨[J]. 植物保护, 2001, 27(2): 9-11.
- [33] 唐桦, 刘益宁, 张剑. 六磷胺在树干内的输导动态及其对光肩星天牛的不育效应[J]. 陕西师范大学学报, 1996, 24(2): 72-76.
- [34] 周石涓, 韩明德, 倪乐湘, 等. 性诱剂与植物不育剂-喜树碱结合应用防治松毛虫的效果初报[J]. 林业科学, 1980(3): 234-235.
- [35] 蔡邦华, 侯陶谦, 宋士美. 松毛虫的种间杂交及杂种生物学的初步观察[J]. 昆虫学报, 1985, 14(4): 347-359.
- [36] 赵清山, 邬文波, 吕国平, 等. 松毛虫种间杂交及其遗传规律的研究[J]. 林业科学, 1999, 35(4): 45-50.
- [37] 文定元, 蔡景杰. 松毛虫杂交试验研究初报[J]. 中南林学院学报, 1986, 6(2): 128-135.
- [38] 郑文惠, 龚和. 控制害虫的新设想-不育基因的生物工程[J]. 生命科学, 1990, 2(3): 109-111.
- [39] 刘秀华. 基因工程与森林虫害控制[J]. 林业实用技术, 1992(2): 32-33.
- [40] Pfeifer T A, Grigliatti T A. Future perspectives on insect pest management: Engineering the pest[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 1996, 67(2): 109-119.
- [41] 缪建吾. 基础知识讲座: 蚊虫的遗传防治[J]. 四川动物, 1984(2): 45-49.