我国林业重大害虫松毛虫的灾害研究进展*

曾菊平[1,2**] 戈 峰[2***] 苏建伟[2] 何 忠[2]

(1. 武汉生物工程学院园林系 武汉 430415; 2. 中国科学院动物研究所 北京 100101)

Researches on the occurrences of major forest insect pests of pine caterpillar *Dendrolimus* spp. in China. ZENG Ju-Ping[1,2**], GE Feng[2***], SU Jian-Wei[2], HE Zhong[2] (1. *Department of Landscape Architecture, Wuhan Bioengineering Institute*, Wuhan 430415, China; 2. *Institude of Zoology, Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100101, China)

Abstract *Dendrolimus* spp., important defoliators of coniferous forest, are widely distributed in China. 27 species have been recorded, including 6 that frequently have outbreaks that damage more than two million hm^2 of pine forests every year. Research on *Dendrolimus* spp. is important to develop tactics and related technologies for the integrated pest management (ab. IPM) of this pest. Recently, progress has been made, especially on key-factor analysis, research and utilization of sex-pheromones, identification of volatile-compounds and their impacts on the orientation behavior of parasitic wasps and flies, and satellite remote sensing for *Dendrolimus* spp. This paper systematically reviews outbreaks and occurrence of *Dendrolimus* spp., as well as some new survey and forecasting techniques. Further studies should focus more on the biology and ecology of some non-outbreak species of *Dendrolimus* spp. since this information will shed light on the outbreak mechanisms of the pest species.

Key words *Dendrolimus* spp., coniferous forest, outbreak and occurrence, mechanism

摘 要 我国松毛虫种类丰富,已报道27种,其中6种频繁暴发,年危害松林面积达200万hm^2以上、经济损失数亿元。松毛虫灾害研究可以为综合治理松毛虫提供重要的理论依据与相关技术。近年来,我国在影响松毛虫种群发生的关键性因子分析、性信息素的研究与开发利用、松树挥发性物质的成分鉴定及其对寄生蜂或寄生蝇的定位作用、卫星遥感监测技术等方面的研究取得了较大进步,但缺少系统性的归纳总结。为此,文章就近些年来我国在松毛虫灾害机制与暴发机理研究、治理现状与技术措施等方面进行综述,展望今后我国松毛虫治理研究工作的重要方向和趋势。

关键词 松毛虫,针叶林,暴发危害,机理

全世界松毛虫属 *Dendrolimus* (鳞翅目:枯叶蛾科)昆虫共有30余种,我国分布有27种,是松毛虫种类最丰富的国家[1]。松毛虫是危害森林的重大害虫,主要分布在亚欧大陆[2~7],尤其以欧洲东部、亚洲中部及东部等地区分布较集中(表1)。在中国[1,8]、俄罗斯[9,10]、日本[11]、德国[7,12]、波兰[2~4]等针叶林都有过大面积暴发危害的报道。而由于气候环境条件与暴发区相似性较高,松毛虫尤其是落叶松毛虫和欧洲松毛虫,对北美森林已存在一定的潜在入侵危害性[13]。

松毛虫主要危害松、柏、杉类等重要森林树种[1],如松(*Pinus* spp.)、落叶松(*Larix* spp.)、云杉(*Picea* spp.)、冷杉(*Abies* spp.)、刺柏(*Juniperus* spp.)等(表1)。松毛虫大面积暴发成灾时,松林"如遭无烟火灾"一样,针叶全部被啃光,只留"被烧"的树干,阻碍林木生长,甚者成片死亡,严重威胁森林生态安全及林业可持续发展,并间接影响到以松林为主的林产化

* 资助项目:"973"计划(项目编号:2006CB102006)。

** E-mail: zenjuping51666@163.com

*** 通讯作者, E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期:2009-10-13,修回日期:2009-12-27

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

工、制浆造纸、人造板、松香等产业的发展[1,8,14]。另外,大发生时松毛虫毒毛易使人致病(如关节肿大)、致残、致盲等[1,8,15,16]。因此,松毛虫一直是我国森林保护、林业产业发展的重点防治对象。至今,有关松毛虫的暴发危害及其灾变机理的综述性文章很少、不全面,故此,本文就近些年来我国在松毛虫灾害机制、暴发机理、治理现状与技术措施等方面进行全面综述,并展望今后松毛虫治理研究工作的重要方向和趋势,为其综合治理提供参考资料。

表 1 国内外松毛虫的暴发种类、分布与寄主

种类	分布国家	危害植物	文献来源
欧洲松毛虫 *D. pini*	英国、法国、德国、俄罗斯、波兰、捷克、挪威、荷兰、白俄罗斯、意大利、摩洛哥、瑞典、格鲁吉亚、西班牙、匈牙利、瑞士、芬兰、奥地利、斯洛伐克、丹麦	冷杉 *Abies* spp.,雪松 *Cedrus* spp. 刺柏 *Juniperus* spp.,落叶松 *Larix* spp. 云杉 *Picea* spp.,松树 *Pinus* spp. 黄杉 *Pseudotsuga* spp.	[6,7,17 ~ 20]
落叶松毛虫 *D. superans* 别名:西伯利亚松毛虫 *D. sibiricus*	中国、俄罗斯、韩国、蒙古、日本、朝鲜、哈萨克斯坦、波兰	雪松 *Cedrus* spp.,冷杉 *Abies* spp. 铁杉 *Tsuga* spp.,云杉 *Picea* spp. 松树 *Pinus* spp.,落叶松 *Larix* spp.	[21 ~ 26]
巴基斯坦松毛虫 *D. benderi*	印度、巴基斯坦	—	[1,27]
赤松毛虫 *D. spectabilis*	中国、朝鲜、韩国、日本	油松 *P. tabulaeformis* 赤松 *P. densiflora*	[1,11]
马尾松毛虫 *D. punctatus*	中国、越南	马尾松 *P. massoniana*	[1]
油松毛虫 *D. tabulaeformis*	中国	油松 *P. tabulaeformis* 黑松 *P. thunbergii* 马尾松 *P. massoniana* 华山松 *P. armandii* 白皮松 *P. bungeana*	[1]
思茅松毛虫 *D. kikuchii*	中国	云南松 *P. yunnanensis* 思茅松 *P. langhianensis* 马尾松 *P. massoniana* 黄山松 *P. taiwanensis* 华山松 *P. armandii* 云南油松 *Keteleeria evelyniana*	[1]
云南松毛虫 *D. houi*	中国	云南松 *P. yunnanensis* 思茅松 *P. langhianensis* 侧柏 *Biota orientalis* 柳杉 *Cryptomeria fortunei*	[1]

1 我国林业重大害虫松毛虫的灾害发生现状

松毛虫遍布我国 28 个省、市、自治区,据不完全统计,年危害面积达 200 万 hm^2 以上,林木损失 180 ~ 360 万 m^3,薪林收入损失数亿元[1,8]。国内,频繁暴发主要有 6 种,分别为马尾松毛虫 *D. punctatus*、油松毛虫 *D. tabulaeformis*、赤松毛虫 *D. spectabilis*、云南松毛虫 *D. houi*、落叶松毛虫 *D. superans* 和思茅松毛虫 *D. kikuchii*[1,8,28],对应分别划分为马尾松毛虫危害区(含思茅松毛虫)、油松毛虫危害区、赤松毛虫危害区、落叶松毛虫危害区和云南松毛虫危害区等成灾区(图 1)[8]。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

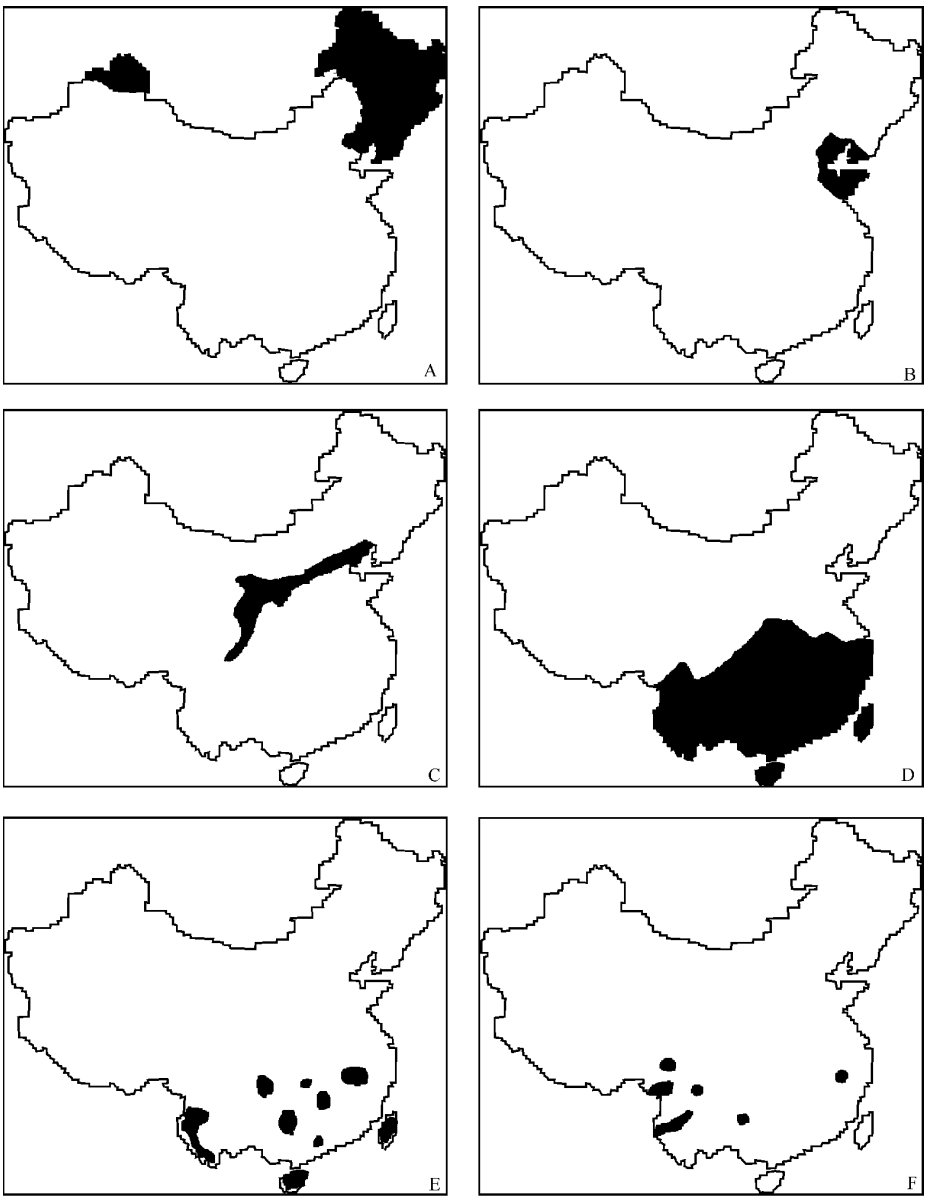

图 1　中国 6 种松毛虫暴发种的分布与主要危害区域(改自文献[1,8])

A. **落叶松毛虫** *D. superans*　B. **赤松毛虫** *D. spectabilis*　C. **油松毛虫** *D. tabulaeformis*
D. **马尾松毛虫** *D. punctatus*　E. **思茅松毛虫** *D. kikuchii*　F. **云南松毛虫** *D. houi*

松毛虫成灾主要表现为大面积、周期性暴发 2 个特征。以上 6 种主要暴发种类以马尾松毛虫成灾最严重,其余依次为落叶松毛虫、油松毛虫、赤松毛虫、云南松毛虫和思茅松毛虫[28]。马尾松毛虫暴发周期一般为 3 ~ 5 年,油松毛虫、赤松毛虫则 6 ~ 10 年暴发 1 次,落叶松毛虫 10 ~ 20 年左右[1,8,27]。如近 50 年来马尾松毛虫在福建省平均 3. 69 年出现一次高峰,危害面积逐年上升,近 20 年来年均发生近 8 万 hm^2,每年造成直接经济损失 3 200 万元以上[11]。近些年在地方政府高度重视和松毛虫综合防治的大力开展下,暴发面积稳中有降,但松毛虫发生面积仍占主要害虫发生面积的 50% 以上,仍是当地的头号林业害虫[14]。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 松毛虫的灾变机制研究

经国家“六五”、“七五”、“九五”松毛虫攻关项目和自然科学基金重点项目等一系列研究后,其暴发危害的生物学、生态学基础,以及其发生危害规律和防治技术研究等方面已取得了长足的进步[1,8]。近年来,研究工作主要集中于探讨种群暴发、崩溃机制、性信息素鉴定合成与应用,“松树-松毛虫-寄生蜂”化学通讯系统、监测与预测预报技术、生态控制等方面进行。

2.1 影响松毛虫种群暴发与崩溃的关键因子分析

影响松毛虫种群灾变的重要因子主要为气候、天敌和立地类型及林分结构等[1,8,27]。气候因子主要包括温度、湿度、降水和光、风及其综合作用等,其作用方式各异,但在自然界却是在相互作用的综合状态下发生[27]。温度是影响松毛虫种群动态最重要的气候因子。首先,温度直接影响松毛虫的生长发育速度与种群生活史对策,如南方的马尾松毛虫每年可发生 4~5 代,而北方的落叶松毛虫每年仅发生 1 代、甚至 2 年 1 代[1];北方种群通常在 9 月份甚至 8 月底开始进入滞育发育状态,而南方(如海南)种群则可能全年发生而不滞育。因此,南方气温偏高有利于松毛虫发生,使其暴发成灾周期短、突发性强。另外,松毛虫在高温干旱年份高代分化率高,猖獗暴发可能性大。如马尾松毛虫 2、3 代分布区若遇 7~8 月份高温干旱,其 3 代的分化比率会明显增大[29~31],导致秋季大发生。其次,温度变动严重干扰松毛虫越冬代的存活。暖冬利于松毛虫越冬代的存活,则来年春季暴发的可能性高[1,13]。而越冬前期的骤然降温及长期的低温对越冬种群则是致命的,因未经低温驯化的幼虫耐寒能力较差,而低温驯化后的幼虫经长时间的低温暴露,死亡率也大幅上升[32,33]。另外,温度因子对湿度、光周期的作用具有干扰效应。高温干扰松毛虫的短光周效应,使诱导滞育率明显下降;低温则促进短光周效应,使临界光周值显著升高[31,34~36]。例如,北方油松毛虫种群临界光周值为 14.5 h[33,36~39],而南方马尾松毛虫为 13.5 h[33,38,40,41],南方热带马尾松毛虫种群几乎全年发生[1],基本不滞育,所以潜在暴发性就高。

松毛虫暴发的物质基础是松树和松林[28,42]。首先,松林的组分、结构与松毛虫暴发密切相关。取食单一松林的马尾松毛虫幼虫的发育速率、化蛹率、羽化率、产卵量,食物利用率、转化率和消耗率等方面显著优于取食混交林的种群,其死亡率也显著低于后者[43]。因而,松毛虫(如马尾松毛虫)在干燥型纯种松林及 10 年生幼林中最易暴发成灾[1,27],而在混交林(尤其是针阔混交林)中较少暴发[1,27,43]。其次,松针质量及其抗性干扰松毛虫种群暴发。马尾松毛虫取食老叶时成活率明显高于新叶,这与老叶中 10 种必须氨基酸含量更高有关[44]。湿地松的针叶内 β-蒎烯含量明显高于马尾松针,对马尾松毛虫表现出明显抗性[43],使取食湿地松等的马尾松毛虫种群趋势指数(I 指数)明显下降[45]。另外,松树受松毛虫危害后会启动其诱导化学防御,针叶内化学成分随之发生变化,产生抗性,进而干扰松毛虫种群发生[46,47],且中度受害林抗性表现最强[48]。取食抗性松针后马尾松毛虫体内解毒酶活性提高,发育历期延长、体重降低、死亡率增加、生殖力下降[49]。因此,松毛虫暴发成灾后的种群快速崩溃可能与松树受害后的诱导抗性的产生有关。

2.2 松毛虫暴发机制分析

一般而言,害虫暴发与下列 5 个方面的变化有关:(1)有利的环境;(2)更多的高产卵量基因型;(3)更多抗天敌基因型;(4)适应型和协同型的增加;(5)种群迁入和短期的环境和遗传波动[50]。就松毛虫而言,其种群暴发成灾的机制主要有两类,一是种群的内在机制或遗传特性[28],即该种群是否具备暴发种群的特征,如种群的基数大、种群的适合度高、种群的生活史对策等;另一类则是外在机制,即外在条件是否具有正向作用,如气候适宜、食料丰富、天敌少或失控等。松毛虫暴发种多数具有寄主

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

范围广(表 1)、产卵量高等特点[28],即与种群暴发的内在机制有关。但成灾最严重的马尾松毛虫寄主范围相对狭小,且产卵量不高,其暴发成灾更多与南方大面积的单一林分,及高温干燥的气候有关,即暴发的外在机制作用更明显[28]。

马尾松毛虫暴发成灾具有周期性和突发性两重性,其暴发成灾除了与遗传特性有关外,大面积马尾松纯林的存在则为其暴发提供了适宜的寄主食物。纯林食料丰富,其他植被稀少,生物群落简单,天敌相对少,林地温、湿度对松毛虫的生长发育有利,种群容易大发生[27]。许多报道也显示,松毛虫暴发首先发生在纯林,之后向周边扩展[1,8]。在具备物质基础后,松毛虫的暴发成灾还需高温干旱或由环境噪音引起的混沌动态作为启动因子[28]。松毛虫在暴发的上升期受到正密度相关作用的驱使,而在下降期和潜伏期主要是因为受到松树诱导抗性、严重失叶和天敌所引起的负密度相关作用[28]。

3　松毛虫灾害控制技术研究

3.1　监测与预测预报技术研究

害虫预测预报是害虫管理的重要组成部分,也是有效防控害虫发生发展的依据[51]。准确监测到松毛虫早期灾害点,及时采取有效防治措施,能将其危害损失降到最低限度[52]。松毛虫的虫情、灾情传统监测技术包括线路踏查、标注地调查、灯诱等,根据空间分布类型和运用相应抽样方法,积累灾情第一手资料,并分析其发生规律[53]。随着我国松毛虫性信息素组分鉴定、结构分析、比例确定及生物或人工合成研究的深入开展[54~59],松毛虫性信息素的田间试验及诱芯技术开发得到了长足发展[60~63]。性信息素监测技术具有灵敏度高、专一性强、无毒、无污染、使用方便和操作简单等优点[64],已成为我国监测松毛虫发生的重要方法。同时,应用卫星(如陆地卫星 TM 和气象卫星 NOAA / AVHRR 等)技术的发展与精度的提高,有力地推动了森林病虫害遥感监测技术的研究与应用,该技术较好地解决了林区面积大、人员少的监测难题,使测报结果更科学、可靠[52]。但 TM 图像成像周期长(16 d 左右),易受云层厚的影响,使得气象卫星遥感对轻度灾害难以准确地定量监测等[52,65],是限制卫星遥感技术发展的关键。

我国害虫的预测预报工作已经从经验预测,经传统的实验预测和统计预测,而逐渐过渡到信息预测阶段[51]。松毛虫预测预报目前主要以统计和信息预测预报为主。其中,统计预测方法研究有回归分析、马尔可夫链、灰色系统分析等;信息预测方法研究有地理信息系统[66]、综合管理系统、决策专家系统等。另外,在非线性科学取得重大发展背景下,将传统的动力理论、统计理论与混沌理论和一些新的数学计算技术相结合,正形成一些新的害虫预测预报途径,如基于人工神经网络(ANN)的松毛虫发生量、发生面积的测报研究等[67]。

3.2　防控技术研究

在松毛虫综合治理中,化学防治以其高效、低毒、低残留药剂的开发及使用为主,如灭幼脲类特异性杀虫剂、阿维菌素抗生素类药剂等,一些新型环保生物制剂,如森得保、绿得保、苦·烟乳油、楝·烟乳油等已广泛运用,并且更为注重混合药剂的使用,配比得当则药效更强。如灭幼脲类和阿维菌素混剂[68]、绿得保(苏云金杆菌和阿维菌素复合粉剂)[69]、苦参烟碱和阿维菌素混合防治落叶松毛虫效果比单一用药更好等。生物防治松毛虫的真菌杀虫剂仍以白僵菌 *Beaureria bassiana* 为主,每年防治松毛虫面积达 50 万 hm^2[70],另外,绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 与白僵菌搭配使用也初见成效[71]。当前产量最大的微生物杀虫剂苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis*(Bt 剂)在我国松毛虫防治中较为有效。松毛虫病毒杀虫剂的研究与利用大都集中在 CPV 方面,如在 CPV 的形态及核酸分类、组织病理、免疫学、复制方式、提纯及加工工艺、安全试验及林间防治等方面研究较多,我国每年利用 CPV 防治松毛虫总面积在 6.67 万 hm^2 以上[53]。另外,开发杀虫植物,提取、利用植物源杀虫剂也已成为松毛虫防治研究的一

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

个新方向[72]。

在我国,松毛虫的综合防治已逐步提高到以林业可持续发展为目的,以协调社会、经济、资源、环境等方面为准则,以环境及森林资源保护为目标,以生态学原理为基础来处理松毛虫防治策略,逐渐走向生态控制[51]。对"松树 - 松毛虫 - 天敌"三级营养结构系统的化学通讯关系的研究已取得重大进展,如寄生蜂的定位机制、松毛虫的产卵选择行为、松林间的通讯防疫系统等。从三级营养层面来研究"植物 - 害虫 - 天敌"的通讯机制,有利于深入了解松树的上行控制作用与天敌的下行控制作用[73]在化学通讯层面对松毛虫种群发生与消长的作用机制,为松毛虫生态调控提供新思路,如通过人工释放挥发性化学物质,启动松林的化学通讯防御系统,增强松林的免疫能力等。另外,通过封山育林、抚育管理及林地补植等林业措施,能很好改善松林生态环境,提高天敌种类和数量,发挥其自然控制作用,降低松毛虫的暴发成灾的可能性。

4 松毛虫灾害研究展望

松毛虫的灾害研究在其他一些方面也进展较快。例如,松毛虫性信息素组分、结构鉴定、比例及人工合成等是近些年国内外的研究重点,我国在这方面的研究取得了重大成就。到目前为止,已对近 10 种松毛虫的性信息素进行了研究,且相当一部分已经进入田间试用甚至推广运用阶段。如利用落叶松毛虫性诱剂成功监测到落叶松毛虫已经从西伯利亚东部向西扩散到俄罗斯中部森林地区[23];利用性诱剂能很好地用于监测落叶松毛虫或欧洲松毛虫的外来入侵[74]。"松树 - 马尾松毛虫 - 寄生蜂或蝇"三级营养结构的化学通讯关系研究近些年来进展也较为迅速[75~82],如受害后松树挥发性物质的变化及其对松毛虫、寄生天敌的影响[77,79,82],挥发性物质对松毛虫产卵选择行为的影响,寄生蜂定位寄主的活性组分研究,松树间化学通讯与松林防疫系统功能研究,松树挥发性物质与幼虫取食选择的研究[83]等。

随着我国经济总体水平明显抬升,对林木原料的需求与日俱增。以松林为主的林产化工、制浆造纸、人造板、松香等林产工业发展迅速,为缓解林木原料需求的压力,提高植被对温室气体的吸收量,减缓气候变暖的趋势,国家相关的林业计划顺次出台,人工林的建设倍受重视,如人工松林。这无形中为以松树为主要食料的松毛虫提供了丰富的物质基础,因此,松毛虫的暴发成灾机制研究具有重要的现实意义。当前,仅少数暴发种的种群发生与消长机制、相关作用因子等研究较多,而非暴发种的基础生物学、生态学资料则十分欠缺[28],松毛虫的暴发机制由于缺少基础资料而难以形成系统性、规律性的研究结果。目前的研究只对马尾松毛虫的暴发机理有过较为深入的探讨[28],故这方面的研究工作仍任重而道远。

松毛虫的防控技术是综合治理松毛虫的重要措施,在研究中可以从两方面着手:一是松树对松毛虫的上行控制研究,如松树的抗性机制与分子机理、抗性品种的开发等;二是天敌对松毛虫的下行控制研究,如以"松树 - 松毛虫 - 寄生蜂或蝇"三级营养系统为研究对象,研究该系统的化学通讯关系、机制,开发诱导活性强的化学通讯组分物质,在充分利用自然生态系统调控作用的过程中,探讨天敌控制的新思路。松毛虫的监测与预报是防治工作的重点,以美国为首的发达国家已将航空录像技术作为监测重大森林病虫害的主要手段,这在我国仍刚起步,因而航天遥感与航空遥感协调使用与开发应用是我国近期松毛虫遥感监测技术发展的重要方向。

参 考 文 献

1 候陶谦. 中国松毛虫. 北京:科学出版社. 1987.

2 Leśniak A. Certain tropical and intrapopulation conditions of the pine moth (*Dendrolimus pini* L.) outbreaks. *Ekologia Polska*, 1976, **24**:565 ~ 576.

3 Leśniak A. Forest stand and site conditions of a pine moth (*Dendrolimus pini* L.) outbreaks. *Ekologia Polska*, 1976, **24**:549 ~ 563.

4 Leśniak A. Climatic and meteorological conditions of the pine moth (*Dendrolimus pini* L.) outbreaks. *Ekologia Polska*

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1976,**24**:515 ~ 547.

5 Sukovata L., Andrzej K., Jaroszynska J., *et al*. Duration of the life cycle of the pine moth *Dendrolimus pini* L. (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Entomol. Rev.*, 1987, **67**(5):61 ~ 66.

6 Pszczolkowski M. A., Smagghe G. Effect of 20-hydroxyecdysone agonist, tebufenozide, on pre-and post-diapause larvae of *Dendrolimus pini*. *J. Appl. Entomol.*, 1999,**123**(3):151 ~ 157.

7 Ciesla W. M. 2004. EXFOR Database Pest Report: *Dendrolimus pini*. USDA Forest Service. Available on-line at: http://spfnic. fs. fed. us/exfor/data/pestreports. cfm? Pestidval = 158 & lang display = english. Accessed 18 October 2006.

8 **陈昌洁. 松毛虫综合管理. 北京:中国林业出版社**. 1990.

9 Vaschuk L. N., Shvidenko A. Z. Dynamics of forests of Irkutsk region (Dinamika lesnykh prostranstv Irkutskoj oblasti). Irkutsk: Irkutsk Printing House, 2006. 392.

10 Andrey S. Conservation and management of animal populations in the Russinan forest management system. *Ann. Zool. Fennici.*, 2000, **37**: 299 ~ 306.

11 Atsushi K. Population fluctuations and natural mortalities of the pine-moth, *Dendrolimus spectabilis*. *Res. Popul. Ecol.*, 1965, **7**: 23 ~ 34.

12 European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO), Data Sheets on Quarantine Pests: *Dendrolimus sibiricus* and *Dendrolimus superans*. 2006. Available on-line at: http://www. eppo. org/QUARANTINE/insects/Dendrolimus _ sibiricus/DSDEN DSP. pdf. Accessed 1 September 2007.

13 Venette R. C. Arthropods: Moths, In: Venette R. C. (ed.). Pine Commodity-based Survey Reference. CAPS (Cooperative Agricultural Pest Survey), 2008. 124 ~ 134.

14 **谢大洋. 福建马尾松毛虫发生特点及主要因子分析. 中国森林病虫**,2003,**22**(3):12 ~ 14.

15 **萧刚柔. 中国森林昆虫(第 2 版). 北京:中国林业出版社**,1992.

16 **王寅威,姜素贞. 松毛虫所致眼部损伤的研究. 眼外伤职业眼病杂志**,1999,**21**(3):187 ~ 188.

17 Winokur L. Phenology and development in *Dendrolimus pini* a preliminary study. *Entomol. Gazette*, 1991, **42**:243 ~ 250.

18 Kolk A., Starzyk J. R. Pine moth (*Dendrolimus pini* L.), Atlas skodliwych owadów lesnych (The atlas of forest insect pests). Warsaw:Multico Warszawa, 1996.

19 Diaz J. H. The evolving global epidemiology, syndromic classification, management, and prevention of caterpillar envenoming. *Am. J. Trop. Med. Hygiene*, 2005, **72**:347 ~ 357.

20 CAB, Crop Protection Compendium. CAB International, 2005. Available on-line at: http://www. cabicompendium. org / cpc. Accessed 1 October 2006.

21 Zhang B. C. Index of Economically Important Lepidoptera. CAB International, Wallingford, UK. 1994.

22 Canadian Food Inspection Agency (CFIA), *Dendrolimus superans* (Butler)-Siberian silk moth. 2001. Available on-line at http://www. inspection. gc. ca/english/sci/surv/data/densupe. shtml. Accessed 21June 2005.

23 Gninenko Y. I., Orlinskii A. D. *Dendrolimus sibiricus* in the coniferous forests of European Russia at the beginning of the twenty-first century. *Bul. OEPP/EPPO Bul.*, 2002, **32**: 481 ~ 483.

24 Baranchikov Y. N., Kirichenko N. I. Feeding and growth of the Siberian moth *Dendrolimus superans sibiricus* larvae during summer diapause. *Zool. Zhurn.*, 2002,**81**:1 345 ~ 1 349.

25 CAB, Crop protection compendium: global module. Commonwealth Agricultural Bureau International. Wallingford, UK. 2003.

26 European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO), Data Sheets on Forest Pests: *Dendrolimus sibiricus*. 2005. Available on-line at http://www. eppo. org/QUARANTINE/insects/Dendrolimus_sibiricus/ DENDSI_ds. pdf. Accessed 2 June 2005.

27 **韩瑞东,何忠,戈峰. 影响松毛虫种群动态的因素. 昆虫知识**,2004,**41**(6): 504 ~ 511.

28 **张真,李典谟. 马尾松毛虫暴发机制分析. 林业科学**,2008,**44**(1): 140 ~ 150.

29 **陈博尧,查光济,王安实. 马尾松毛虫三代分化率与气象因子相关性研究. 林业科学**,1988,**24**(2): 177 ~ 184.

30 **张真,李典谟,查光济. 马尾松毛虫 2、3 代分化和干旱对种群时间动态的影响. 昆虫学报**,2002,**45**(4): 471 ~ 476.

31 **何忠,韩瑞东,刘向辉,等. 环境温度对马尾松毛虫发育与存活的影响. 应用生态学报**,2006,**17**(3): 483 ~ 488.

32 Han R. D., Ge F., Yardim E. N., *et al*. The effect of low temperatures on diapause and non-diapause larvae of the pine caterpillar, *Dendrolimus tabulaeformic*. Tsai *et* Liu (Lepidoptera: Lasiocampidae) *Appl. Entomol. Zool.*, 2005, **40**(3): 429 ~ 435.

33 Zeng J. P., Ge F., Su J. W., *et al*. The effect of temperature on the diapause and coldhardiness of *Dendrolimus tabulaeformis*. *Eur. J. Entomol.*, 2008, **105**: 599 ~ 606.

34 **贾凤友,李兆麟. 松毛虫光周滞育的研究. 林业科学研究**,1991, **4**(1): 69 ~ 71.

35 **李兆麟,贾凤友,何忠,等. 温度对马尾松毛虫光周滞育**

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的影响. 林业科学研究,1995,**8**(4):413~416.

36 曾菊平. 松毛虫 *Dendrolimus* sp. 的滞育特性与越冬代耐寒性研究. 博士学位论文. 北京:中国科学院研究生院,2008.

37 李兆麟,贾凤友. 油松毛虫的光周期反应. 昆虫学报,1989,**32**(4):410~417.

38 李兆麟,贾凤友,何忠,等. 马尾松毛虫幼虫生长发育的光周效应. 林业科学研究,1993,**6**(3):276~280.

39 Han R. D., Xue F. S., He Z., *et al*. Diapause induction and clock mechanism in the pine caterpillar *Dendrolimus tabulaeformis*. *J. Appl. Entomol.*, 2005, **129**(2): 105~109.

40 李兆麟,贾凤友,侯无危,等. 马尾松毛虫的光周期反应. 昆虫学报,1994,**37**(1):31~37.

41 Huang L. L., Xue F. S., Wang G. H., *et al*. Photoperiodic response of diapause induction in the pine caterpillar, *Dendrolimus punctatus*. *Entomol. Exp. Appl.*, 2005, **117**: 127~133.

42 刘兴平,王国红,刘向辉,等. 不同林相的松针对马尾松毛虫生长发育的影响. 昆虫学报,2003,**46**(6):720~726.

43 王国红,刘兴平,戈峰,等. 不同松林内马尾松毛虫种群动态的特征. 生态学杂志,2005,**24**(4):355~359.

44 何忠,曹红珍,曾菊平,等. 马尾松毛虫对马尾松和湿地松的选择与适应研究. 昆虫学报,2007,**50**(2):125~135.

45 苏星,仪向东,邓常发. 取食不同松针对马尾松毛虫的影响. 林业科学,1983,**12**:49~57.

46 戈峰,李典谟,邱业先,等. 松树受害后一些化学物质含量的变化及其对马尾松毛虫种群参数的影响. 昆虫学报,1997,**40**(4):337~342.

47 李镇宇,陈华盛,袁小环,等. 油松对赤松毛虫的诱导化学防御. 林业科学,1998,**34**(2):43~48.

48 张丽丽,李镇宇,李海林,等. 不同受害油松对油松毛虫幼虫生长发育的影响. 北京林业大学学报,2005,**27**(6):83~88.

49 戈峰,李镇宇,谢映平,等. 我国主要松树诱导抗虫性的一些规律比较. 北京林业大学学报,2002,**24**(3):61~65.

50 Berryman A. A. The theory and classification of outbreaks. In: Barbosa P., Schuhz J., (eds.). Insect Outbreak. New York: Academic Press,1987.

51 马飞,程遐年. 害虫预测预报研究进展. 安徽农业大学学报,2001,**28**(1):92~97.

52 武红敢,石进. 松毛虫灾害的 TM 影像监测技术. 遥感学报,2004,**8**(2):172~177.

53 李天生. 松毛虫监测与防治方法研究进展. 昆虫知识,2000,**37**(2):122~128.

54 中国科学院动物研究所昆虫外激素组. 中国科学院吉林应用化学研究所松毛虫外激素组. 江西省森林病虫害防治试验站昆虫组. 马尾松毛虫性外激素的触角电位(EAG)活性组分 E5. E7-12:OH 的分离、鉴定与合成. 科学通报,1979,**21**: 1 004~1 008.

55 赵成华,李群,郭星宇,等. 马尾松毛虫性引诱外激素的新成分:化学结构鉴定和田间试验. 昆虫学报,1993,**36**(2):247~250.

56 Kong X. B., Zhao C. H., Gao W. Idenitfication of sex pheromones of four economically important species in genus *Dendrolimus*. *Chinese Sci. Bull.*, 2001, **46**(24): 2 077~2 081.

57 Zhao C. H., Li Q., Gao W. Stimulation of sex pheromone production by PBAN, like substance in the pine caterpillar moth, *Dendrolirnus punctatus*. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 2002, **49**(3):137~148.

58 Zhao C. H., Adlof R. O., Löfstedt C. Sex pheromone biosynthesis in the pine caterpillar moth *Dendrolimu punetatus*: pathways leading to Z_5-monoeneand 5.7-conjugateddiene components. *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 2004, **34**(3):261~271.

59 孔祥波,张真,王鸿斌,等. 松毛虫性信息素微量成分鉴定方法的研究. 色谱,2005,**23**(4):370~373.

60 孟宪佐,王怀敏. 油松毛虫性诱剂的合成与林间活性试验. 林业科学,1983,**19**(2):137~140.

61 高伟,赵成华,施再喜. 马尾松毛虫性信息素在不同类型诱芯中的稳定性. 昆虫学报,2001,**44**(2):213~220.

62 张爱兵,谭声江,高伟,等. 应用性外激素监测马尾松毛虫发生数量的初步研究. 昆虫知识,2001,**38**(3):211~214.

63 Zhang A. B., Wang Z. J., Tan S. J., *et al*. Monitoring the masson pine moth, *Dendrolirnus punctatus* with synthetics pheromone-baited flaps in Qianshan County, China. *Appl. Entomol. Zool.*, 2003, **38**(2): 177~186.

64 孔祥波,张真,王鸿斌,等. 枯叶蛾科昆虫性信息素的研究进展. 林业科学,2006,**42**(6):115~123.

65 张玉书,班显秀,陈鹏狮,等. 应用 NOAA/AVHRR 资料监测松毛虫危害研究初探. 应用生态学,2005,**16**(5):870~874.

66 武红智,陈改英. 基于 GIS 的马尾松毛虫灾害空间扩散规律分析. 遥感学报,2004,**8**(5):475~480.

67 陈绘画,朱寿燕,崔相富. 基于人工神经网络的马尾松毛虫发生量预测模型的研究. 林业科学研究,2003,**16**(2):159~165.

68 黄炳荣. 飞机喷洒阿维灭幼脲防治马尾松毛虫试验. 福建林业科技,2005,**32**(1):17~19.

69 林青兰. 3 种生物农药防治云南松毛虫试验. 浙江林学院学报,2005,**22**(1):70~72.

70 宋漳. 白僵菌分生孢子深层培养及其对马尾松毛虫的毒

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力. 应用与环境生物学报,2005,**11**(1):93 ~97.

71 宋漳,江英成,叶斌,等. 绿僵菌与白僵菌混合使用对马尾松毛虫的毒力. 福建农林大学学报(自然科学版),2006,**35**(3):254 ~257.

72 张国财,张宏浩,王威,等. 9 种植物粗提物防治落叶松毛虫的试验. 植物研究,2007,**27**(3):380 ~384.

73 巫厚长,章超,李正珊,等. 寄主植物—害虫—天敌三级营养层系统相互作用的上行控制. 中国农学通报,2006,**22**(8):414 ~418.

74 Erica E. D., French S., Venette R. C. Mini tisk assessment siberian silk moth, *Dendrolimus superans* Butler. *CAPS PRA*, 2005, **29**: 1 ~22.

75 赵成华,伍德明,闫云花. 马尾松针叶中挥发性成分的鉴定及其对马尾松毛虫的触角电位反应. 林业科学,1995,**31**(2):125 ~131.

76 赵成华,闫云花. 马尾松针叶中的挥发物质对马尾松毛虫产卵行为的影响. 林业科学,2003,**39**(6):91 ~93.

77 黄丽莉,刘兴平,韩瑞东,等. 松毛虫赤眼蜂对被害与未被害马尾松的趋性选择. 昆虫知识,2006,**43**(2):215 ~219.

78 刘玲,戈峰,苏建伟,等. 油松毛虫雌蛾对油松松针两种手性化合物的触角电位反应. 昆虫学报,2007,**50**(8):858 ~862.

79 徐延熙,孙绪艮,秦小薇,等. 被害马尾松 *Pinus massoniana* 针叶挥发性物质的提取、鉴定及蚕饰腹寄蝇 *Blepharipa zebina* 的电生理活性. 生态学报,2007,**27**(11):4 403 ~4 411.

80 严善春,刘英胜,王琪,等. 落叶松毛虫对兴安落叶松 6 种挥发物的触角电位反应. 林业科学,2007,**43**(7):55 ~60.

81 王立春,任琴,许志春,等. 茉莉酸甲酯对马尾松松针萜烯类挥发物及马尾松毛虫生长发育的影响. 北京林业大学学报,2008,**30**(1):79 ~84.

82 王勇,肖铁光,何忠,等. 马尾松树针叶挥发性化学物质对松毛虫赤眼蜂嗅觉及寄生行为的影响. 昆虫知识,2008,**45**(6):944 ~949.

83 Valerii I. Host-tree preferences of the pine moth and pine beauty moth larvae in relation to needle quality. Proceedings: Ecology, Survey and Management of Forest Insects, 2002. 98 ~106.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net