

分类号：Q96

授予学位单位代码：10434

U D C：

密 级：

研究 生 学 号：B2008069

山東農業大學

博士 学位 论文

泰山松材线虫病、美国白蛾风险分析评估与预警技术研究

Risk Assessment and Early Warning Research on
Bursaphelenchus xylophilus and *Hyphantria cunea* in Mt. Tai

研 究 生：申卫星

学 科 专 业：农业昆虫与害虫防治

研 究 方 向：昆虫化学生态与害虫综合治理

学 院：植物保护学院

指 导 教 师：黄大卫 教授

2012年6月15日

论文提交日期: 2012年5月

论文答辩日期: 2012年6月

学位授予日期: 2012年6月

学科门类: 农学

答辩委员会主席: 刘同先 教授

Shandong Agricultural University

Ph.D.DISSERTATION

Risk Assessment and Early Warning
Research On *Bursaphelenchus xylophilus*
and *Hyphantria cunea* in Mount. Tai

Department: Department of Plant Protection

Major: Relation Between Insects and Plants

Ph.D.Candidate: Shen Weixing

Supervisor: Prof. Dawei Huang

June 2012

关于学位论文原创性和使用授权的声明

本人所呈交的学位论文，是在导师指导下，独立进行科学研究所取得的成果。对在论文研究期间给予指导、帮助和做出重要贡献的个人或集体，均在文中明确说明。本声明的法律责任由本人承担。

本人完全了解山东农业大学有关保留和使用学位论文的规定，同意学校保留和按要求向国家有关部门或机构送交论文纸质本和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权山东农业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文，同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》并向社会公众提供信息服务。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名: 申卫东

导 师 签 名: 王大伟

日 期: 2012.6.15

符 号 说 明

PRA : Pest Risk Analysis, 有害生物风险分析

GI: Growth index, 增长指数

CS: Cold stress, 冷逆境指数

HS: Heat stress, 热逆境指数

DS: Dry stress, 干逆境指数

WS: Wet stress, 湿逆境指数

EI: Ecoclimatic index, 生态气候指数

TI: Temperature index, 温度指标

目 录

中文摘要	I
Abstract	11
1 前 言	12
1.1 泰山风景区的自然概况	12
1.2 我国松材线虫病和美国白蛾的发生现状	13
1.3 松材线虫病和美国白蛾的风险分析与评估研究进展	14
1.3.1 有害生物风险分析的概念	15
1.3.2 有害生物风险分析的基本步骤	15
1.3.3 目前有害生物风险分析的主要方法、技术和分析软件	15
1.3.4 松材线虫病的风险性分析与评估	17
1.3.5 美国白蛾的风险性分析与评估	19
1.4 松材线虫病和美国白蛾预警技术研究进展	19
1.5 本研究的必要性、重要性	20
1.6 本研究的主要内容	21
2. 材料与方法	22
2.1 松材线虫病对泰山风景区的风险分析与评估	22
2.1.1 入侵和定殖泰山风景区的可能性风险分析与评估	22
2.1.2 松材线虫病入侵泰山风景区的危害度评估	25
2.2 美国白蛾对泰山风景区的风险分析与评估	31
2.2.1 美国白蛾入侵泰山风景区的风险评估研究思路	32
2.2.2 美国白蛾入侵泰山风景区的风险评估体系的确立	32
2.2.3 美国白蛾入侵泰山风景区的可能性评估	32
3 结果与分析	34
3.1 松材线虫病对泰山风景区的风险分析评估及预警技术	34
3.1.1 松材线虫病入侵泰山风景区的可能性评估	34
3.1.2 松材线虫病定殖泰山风景区的可能性分析	36
3.1.3 松材线虫入侵泰山风景区的危害度评估	40
3.1.4 松材线虫病入侵泰山风景区的风险性评估	49

3.1.5 不同松褐天牛引诱方法对松材线虫病预警技术研究.....	51
3.2 美国白蛾对泰山风景区的风险分析与评估.....	52
3.2.1 美国白蛾传入泰山风景区的可能性分析.....	52
3.2.2 美国白蛾定殖泰山风景区的可能性分析.....	53
3.2.3 美国白蛾入侵泰山风景区的危害度评估.....	56
3.3 泰山松材线虫病和美国白蛾的风险管理措施和建议.....	70
3.3.1 预防措施.....	70
3.3.2 应急预案.....	72
3.3.3 灾后重建.....	73
4 讨 论	74
4.1 松材线虫病入侵泰山的可能性.....	74
4.2 松材线虫入侵泰山风景区的危害度评估.....	74
4.3 不同松褐天牛引诱方法对松材线虫病预警技术研究.....	75
4.4 美国白蛾入侵泰山的可能性.....	75
4.5 美国白蛾入侵泰山风景区的危害度评估.....	75
4.6 泰山松材线虫病和美国白蛾的风险管理措施和建议.....	76
5 结 论	77
5.1 结论	77
5.1.1 松材线虫病入侵泰山风景区的可能性和危害性.....	77
5.1.2 不同引诱方法诱捕松褐天牛是松材线虫病的预警配套技术一个重要手段.....	77
5.1.3 美国白蛾入侵泰山的可能性和危害性.....	77
5.2 创新点	78
参考文献	79
附 录	85
附表 1 Climex 软件使用的 54826 台站气象数据	85
附表 2 Climex 软件使用的 54827 台站气象数据	87
附表 3 @risk 软件使用的 54827 台站气象数据	89
致 谢	90
攻读博士学位期间发表论文情况.....	91

中文摘要

泰山集世界自然遗产、文化遗产、世界地质公园、全国文明风景旅游区、国家 5A 级旅游名胜区为一体，被誉为“中华国山”，其自然景观、生态景观特色鲜明，政治、社会、生态价值不可估量。

本研究基于重大林业有害生物对泰山的威胁和我国重大林业有害生物预警技术研究的现状，选择对泰山最有威胁的松材线虫病和美国白蛾作为研究对象，以泰山整个森林生态系统为研究尺度，在系统调查松材线虫病传播媒体——松褐天牛在泰山的分布范围、虫口密度、消长动态；泰山周边及景区人员、物资等有危险因素的流动情况；主要松林树种——油松对松材线虫病的感病性和寄主分布等多项内容的基础上，对松材线虫病和美国白蛾在泰山发生的风险进行了风险评估，研究表明：松材线虫病近期不能通过自然传播的形式入侵泰山风景区，可以通过人为传播入侵泰山风景区。油松也是松材线虫病的感病树种。从温度、寄主、媒介昆虫等方面分析，泰山风景区海拔 400 米以下的低海拔松林为松材线虫的适生区，入侵和定殖的可能性为高度，具有高度风险性；海拔 400—700 米的区域，随着海拔的升高，气候条件（温度）逐渐不适合松材线虫的生存，但是也有风险；而在海拔 800 米以上区域，由于受低温的影响，松材线虫则无法生存，属于安全范围。低海拔地区主要是指天烛峰、巴山、桃花峪、玉泉寺、桃花源、竹林寺、樱桃园和长城岭等管理区。不同的引诱方法对松褐天牛的引诱的数量有显著差异，其中引诱剂活立木法引诱效果最佳，防治效果可以达到 70%。美国白蛾可以通过自然传播和人为传播等入侵泰山；泰山风景区的生态环境条件适合美国白蛾的生长发育，并能在泰山全境发生和危害；泰山的海拔最高处（1553.0 米）处，1 年至少可以完成 1 代；低海拔和中海拔地区 1 年可以完成 2—3 代、2 代或 1—2 代。

根据以上研究提出了“预防为主”的风险管理策略和措施，主要包括预防措施、应急预案、灾后恢复三个方面的内容。预防措施主要是包括（1）运用“64321”检疫思路，防止松材线虫病和美国白蛾的传入风景区；“64321”检疫思路是指把住桃花峪等 6 个进山路口，做好一年 4 次的执法检查，搞好森防站、门票处和管理区的 3 方合作，落实机防和人防 2 个措施，争取 1 项检疫站建设（2）降低媒介昆虫的种群密度和泰山景区周边美国白蛾的种群密度；（3）应用媒介昆虫虫体加强松材线虫病监测预警、预报等。

关键词：泰山；松材线虫；美国白蛾；风险；预防

Risk Assessment and Early Warning Research on *Bursaphelenchus xylophilus* and *Hyphantria cunea* in Mt. Tai

Abstract

Mount Tai is the World Natural and Cultural Heritage, the World Geopark, the National Civilized Scenic Area and the 5A Scenic Spot, so it is praised as the “Chinese Capital Mountain”. Its natural and ecological landscape are distinctive, the political, social and ecological values are inestimable.

This study selected the *Bursaphelenchus xylophilus* and *Hyphantria cunea*(Drury) which were mostly threatened forestry of Mount Tai as the subject, and based on the present situation of serious pests for Mount Tai and the research of the early warning technology on serious forestry pests of China. This research was taken the whole forestry system of Mount Tai as the research scale, did the systematic investigation on various items, for example, the distribution, pests density and dynamics of *Monochamus alternatus* on Mount Tai; dangerous mobility status of people in and around Mount Tai scenic spot; susceptibility to *B. xylophilus* and distribution of Chinese pine. The research indicated that *B. xylophilus* could not invade Mount Tai scenic spot physically but by artificial factor.

Chinese pine was susceptible to *B. xylophilus*. From the aspects of temperature, parasitic and media insect etc., we analyze that the lower altitudes below 400 meters on Mount Tai scenic spot was suitable for *B. xylophilus*, the possibility of invading and colonization are higher, risk value is high grade too. In the area of elevation of 400 to 700 meters, the climatic conditions are not suitable for *B. xylophilus* by the increasingly height, but the risk also exists. However in the area above the height of 800 meters, *B. xylophilus* could not alive because of the lower temperature, the risk is zero. The lower elevation area include Heaven Candle Peak, Bashan, Peach Garden, YuquanTemple, Bamboo Forest Temple, Cherry Orchard and the Great Wall Ridge Scenic Spots. The number was tremendous difference by different measures of inducing *Monochamus alternatus* Hope, among which attractant and living tree was the most

effective with the result of 70%.

The *H. cunea* could spread naturally and artificially on Mount Tai. The ecological condition are very suitable for the growth of *H. cunea*, they could occupied all the mountain; at 1553.0 m, *H. cunea* could complete one generation in one year at least, 2-3 generations, two generations or 1-2 generations could be completed in lower and intermediate altitudes in one year.

Based on the above studies, this paper suggests the riskiness management strategies and measures mainly of putting prevention first were raised, including preventive measures, emergency preplans and disaster management. Preventive measures mainly included: (1) Preventing of *B. xylophilus* and *H. cunea* to import to scenic spot by "64321" quarantine thinking."6" is holding 6 entrances of Mount tai,for example Taohuayu etc."4" is completing 4 quarantine inspection a year."3" is 3 department working together."2" is doing well mechanical and artificial control."1" is building a quarantine station. (2) Reduction of the population density of the vector insects and *H. cunea* in peripheral zone of scenic spot (3) Enhancing the monitoring and early warning system to *B. xylophilus* by using vector insects.

Key words: Mount Tai; *Bursaphelengus xylophilus*; *Hyphantria cunea*; risk; prevention

1 前 言

1.1 泰山风景区的自然概况

泰山位于山东省的中部，拔起于鲁中低山丘陵之上，横亘于济南、泰安两市之间。地理坐标为东经 $116^{\circ}58'-117^{\circ}10'$ ，北纬 $36^{\circ}12'-36^{\circ}22'$ ，北、西分别与济南市的历城区、长清区为邻，东、南分别与泰安市的泰山区、岱岳区接壤，总面积 11892hm^2 。

泰山地处暖温带气候区，位于我国暖温带的中心地区，植被属暖温带落叶阔叶林区域，植物区系属于华北植物区系，是以温带落叶阔叶林为主的植物区系。泰山包括森林、灌丛、灌草丛、草甸、湿地等生态系统。森林生态系统主要包括针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林等；灌丛生态系统主要有胡枝子、连翘、绣线菊、杜鹃灌丛等；灌草丛生态系统主要是荆条-酸枣-黄背草和绣线菊-连翘-薹草等；草甸生态系统主要有结缕草等；湿地生态系统主要有胡枝子-结缕草群丛、杨树-芦苇、芦苇群丛等。

泰山风景区近 50% 的森林为松林，其中其油松天然次生林是我国暖温带天然针叶林的典型代表，是中国特有植物的种质资源库。温性针叶林是泰山植被构成的主要部分，也是最具代表性的植被类型，总面积 6300hm^2 ，占森林植被总面积的 66.4%。按比例大小依次为油松林、侧柏林、赤松林、黑松林、华山松林和白皮松林；暖温带落叶阔叶林主要包括麻栎林、刺槐林、元宝槭林、杂木林、果树林等 5 个群系，总面积 3150hm^2 ，占森林面积的 33.2%；泰山中上部，土层瘠薄、坡度陡，生长着以落叶灌木为主的植物群落，面积约 299.5 hm^2 ，灌木种类组成因海拔高度而有差异，以海拔 1000m 为界，海拔 1000m 以下分布黄荆灌丛、胡枝子灌丛 2 个群系；海拔 1000m 以上分布绣线菊灌丛、连翘灌丛、湖北海棠灌丛 3 个群系。

1.2 我国松材线虫病和美国白蛾的发生现状

松材线虫病(*Bursaphelengus xylophilus*)已经成为对我国森林危害最大的生物灾害，对我国的松林资源、自然景观和生态环境造成严重破坏和灾难，严重威胁着我国的国土安全和生态安全，成为我国林业健康持续发展的“心腹大患”。

1982 年，我国在江苏南京市首次发现该病害，至 20 世纪 80 年代末 90 年代初，在安徽马鞍山、广东深圳、山东长岛等地相继发现了松材线虫病的发生。近年来，松材线

虫病在我国大陆的扩散蔓延呈现加速的趋势，而且在南方松林中大距离跳跃式间隔分布，至2001年底，江苏、浙江、安徽、山东、广东、湖北、上海、广西、重庆等9省（市、自治区）发生松材线虫病，县级发生区每隔5年翻一番，全国松材线虫病县级发生区81个，发生面积84千公顷。而截至2011年底，松材线虫病已蔓延至15个省（市、自治区）、181个县市区，主要包括浙江、安徽、广东、江苏、山东、湖北、重庆，江西、湖南、贵州，广西、福建、四川、云南及台湾。松材线虫病已对我国南方5亿亩松林和黄山、九寨沟、西双版纳等许多重要风景名胜区形成了合拢包围之势，对国土生态安全构成严重威胁。目前，该病发生面积已超过120万亩，造成死树 2×10^7 株。该病传播蔓延迅速，病程短，病死率高，严重影响我国松林生态系统安全，成为我国林业建设和生态建设的最重要的危险性森林重大生物灾害（张星耀等，2003；万方浩等，2005；国家林业局，2012）。

山东省自1990年在烟台长岛县发现松材线虫病以来，目前在胶东半岛呈蔓延之势，不断出现新疫点。据调查，2005年，在青岛市浮山发现新的疫点，发生面积13.3hm²，病死松树592株。2007年荣成市发生松材线虫病，面积达1万亩，病死松树50000株；2008年青岛崂山区又传入疫情，面积0.2万亩，病死松树4000株；2009年文登市又发生新疫情，面积0.2万亩，病死松树2586株；2010年淄博鲁山发生松材线虫病疫情；2011年全省共投入资金3400万元，砍伐病死树1.8万亩，5.7万株。目前，山东省已经有5个地市、6个县（市、区）、15个乡镇（办事处、林场）发生，发生面积2万多亩，病死松树34.2万株，防控松材线虫病的形势十分严峻。（王新花等，2004；秦绪兵等，2006）

美国白蛾（*Hyphantria cunea* Drury）属于鳞翅目Lepidoptera 灯蛾科Arctiidae，原产于北美洲，广泛分布在北纬19-55°的广大地区，包括墨西哥、美国、加拿大。二战期间，这种害虫随军用物资通过交通工具由美国传播到欧洲的多个国家和亚洲的日本。1940年首先在欧洲的匈牙利发现，后逐渐蔓延扩散开来，现已广泛分布于除北欧以外的几乎所有欧洲国家，包括匈牙利、俄罗斯、波兰、罗马尼亚、奥地利、德国、意大利、法国、西班牙等，在亚洲已从日本传播至朝鲜半岛和中国，美国白蛾具有食性杂（可危害寄主植物多达49科108属300多种农林植物种）、食量大、繁殖能力强、适生区域广、传播速度快、危害严重等特点，严重危害了我国林木、果树、花卉及农作物的健康生长，是目前国内最具有危险性的入侵物种之一，我国自1979年首次在辽宁丹东市发现美国白蛾以来，目前已在河北、山东、安徽、上海、天津、北京等地严重发生，造成了重大的

经济损失和生态损失，防控美国白蛾的扩展蔓延的任务艰巨（秦绪兵等，2000；杨忠岐等，2004；褚栋等，2009）。

山东省于1982年在荣成市首次发现，尽管疫区广大干部群众投入了大量的人力物力除治，仍然没有遏制该入侵物种的进一步扩散蔓延，1998年底已蔓延至烟台、威海、东营3个市的13个县市区，为害植物60多种约1713万株，2005年已蔓延至山东9市44县，危害面积超过 $3\times10^4\text{hm}^2$ 。2007年传入济南、泰安等市，当年8月份在长清、天桥、历城、槐荫四区的沿黄生态林都遭到了美国白蛾的危害（杨宝山等，2008）。在泰安肥城的3个乡镇发生了美国白蛾，2008年底，泰安市6个县（市、区）以及市高新区、泰城园林、徂徕山林场、泰山林科院发生美国白蛾疫情，涉及80个乡镇（办事处）、6个国有场圃，发生面积共计4.5万亩，2009年泰山景区周边地区的泰佛路、天烛峰—牛山口、武岳路（武庄—牛山口）、双马路（104—马套—马场）、农业观光路（红门—上梨园）、环山路（红门—樱桃园）、万灵南路和万灵北路等周边交通要道、停车场和饭店等场所共发现101个疫点。2010年全省普遍采用了飞机防治美国白蛾，很多地区的疫情得到了有效控制。截止目前，山东省除枣庄地区未发现美国白蛾危害外，其他16个地（市）均有美国白蛾的发生和危害。（秦绪兵等，2000a, 2000b；褚栋等，2009）

1.3 松材线虫病和美国白蛾的风险分析评估与评估研究进展

国内外有害生物预警技术研究大都是从有害生物造成的风险分析开始研究的，有害生物的风险分析一般可以分为定性分析和定量分析。随着人们对有害生物风险分析和预警技术认识和研究的逐渐深化，有害生物的风险和预警技术研究逐渐由定性研究向定量研究转化，进行有害生物风险和预警技术研究的指标也不断补充和完善，研究手段不断更新和完善，研究结果越来越准确和可靠。

1.3.1 有害生物风险分析的概念

依据联合国粮农组织出版的《国际植物检疫措施标准第5号：植物检疫术语表》中对有害生物风险分析(Pest Risk Analysis, 简称 PRA)的定义为：“评价生物学或其它科学、经济学证据，确定某种有害生物是否予以管制以及管制所采取的植物卫生措施力度的过程”，主要包括有害生物风险评价(Pest Risk Assessment)、有害生物风险管理(Pest Risk Management)和风险交流(Risk Communication)三个组成部分（李学磊，2005）。

1.3.2 有害生物风险分析的基本步骤

针对风险性评估，总结目前的评估步骤如下（丁德贵，2006；刘海军，2006）：

(1) 风险源的分析：鉴别风险的来源、范围、特性以及与其行为或现象相关的不确定性。这是管理的起点，在很大程度上界定了风险的本质特征。

(2) 风险受体的分析：受体即风险承受者，在风险分析中指可能受到来自风险源干扰的不利作用的组成部分。

(3) 风险的量化与度量：利用主观或客观的概率，评估产生错误的可能性；模拟风险源与其可能产生的影响之间的关系；评估出各种可供选择的风险概率值。

(4) 风险评估：是以上风险分析过程和风险管理之间的衔接步骤。

(5) 风险等级的划分：在风险评估的基础上，将风险划为不同级别，包括：高度风险、中度风险、低度风险及不存在风险。

接受和规避：这一步代表风险决策。它针对每一种决策，对所有的成本、效益和风险进行评估，包括各种不同决策之间的成本核算，可能导致的社会经济、环境或政治问题，以及目前的决策对今后的选择可能产生的影响，即得出风险的可接受程度，相应也可以得出风险的不可接受程度。

(6) 风险管理：这一步代表在风险接受和规避基础上的“执行”的过程。简单的说，就是一套用来处理风险的方法

1.3.3 目前有害生物风险分析的主要方法、技术和分析软件

目前用于有害生物风险分析的方法和技术以及相应的分析系统软件很多，Monte Carlo模拟方法、气候相似距方法、CLIMEX（系统模拟模型、多指标综合评价方法、WhyWhere系统、GARP（Genetic Algorithm for Rule-set Prediction Modeling System）模型系统和地理信息系统(GIS)（贾文明等，2005）、ArcView GIS(王峰等，2007)、DIVA-GIS软件中的ENFA模型(葛泉卿等，2006)和BIOCLIM生态位模型(胥勇等，2008)、MAXENT（曾辉等，2008；赵文娟等，2009；王颖等，2009，）、DOMAIN、Maxent生态位模型、地理信息系统和GARP等方法结合等（WANG Yun-sheng *et al.*, 2007；王运生等，2007；李建中等，2008；徐进等，2008），不同方法、技术和软件均有不同的优缺点，目前林业有害生物风险分析开始应用CLIMEX系统模拟模型、多指标综合评价方法、ArcView GIS（王峰等，2007）、DIVA-GIS/软件中的BIOCLIM生态位模型、@risk软件（汤宛地，

2008)、GARP (周国梁等, 2007; 李红梅等, 2005; 刘静远等, 2008)、Maxent生态位模型与地理信息系统结合方法(刘洪霞等, 2009; 冯益明等, 2009b)。本课题主要应用CLIMEX系统模拟模型和@risk软件进行泰山的风险分析。

1.3.3.1 CLIMEX 软件

CLIMEX 是一个动态模拟模型, 是通过物种在已知地理分布区域的气候参数来预测物种潜在分布区的软件。CLIMEX 最初的版本发布于 1985 年, 1995 年推出了 1.0 版, 1999 年发布了最新版, 即 CLIMEX for Windows 1.1。它包括了世界上大约 2500 个地区的气象数据和某些物种对气候条件的要求。CLIMEX 可根据某物种的已知地理分布及相对丰盛度来估计该物种所需的气候条件, 或者可以直接使用物种生长发育的生物学参数, 对物种的分布区进行预测。许多变温动物的分布区被认为主要由气候决定。CLIMEX 的模型组建中有两个假设: 第一: 气候是决定许多物种地理分布和相对丰盛度的最重要的因素。第二: 该物种在一年内经历两个时期, 即适合其种群增长和不适合甚至危及其生存的时期。CLIMEX 可根据某物种的已知地理分布及相对丰盛度来估计该物种所需的气候条件, 或者可以直接使用物种生长发育的生物学数据。利用上面两种中的任何一种, CLIMEX 都能够运算出每周和每年的增长指数 (Growth index, GI, 近似于内禀增长率)。然后利用物种的生物学参数或已知分布区计算出种群在不适宜季节的四个逆境指数, 即冷逆境指数 (Cold stress, CS)、热逆境指数 (Heat stress, HS)、干逆境指数 (Dry stress, DS)、湿逆境指数 (Wet stress, WS)。增长指数 GI 和逆境指数再综合为生态气候指数 (Eco-climatic index, EI), EI 描述该物种对某一地区的综合适合度, CLIMEX 可以用于检疫、生物防治、有害生物风险分析、害虫管理和流行病的预测等 (宋红敏等, 2004a; 2004b)。

CLIMEX已经用于几十种有害生物的适生区研究, 如Baker R. H et al., (2000)分析并预测了马铃薯叶甲 (*Leptinoatarsa decemlineata*) 和地中海实蝇 (*Ceratitis capitata*) 的适生性分布, Macleod A et al (2002)预测了亚洲长角天牛 (*Anoplophora glabripenniszai*) 在欧洲的适生区; 侯柏华等 (2005) 利用CLIMEX软件对桔小实蝇在中国的适生区进行了预测; 宋红敏 (2004a) 也运用CLIMEX软件预测了松褐天牛在全球的适生区。林伟用CLIMEX 分析预测了美国白蛾 (林伟, 1991) 和苹果蠹蛾 (*Cydia pomonella*) (林伟, 1994)、梁宏斌等 (1999) 对麦双尾蚜 (*Diuraphis noxia*)、毛志农等 (1997) 对稻水象 (*Lissorhoptrus oryzophilus*)、张清芬等 (2002)对日本金龟子 (*Popillia japonica*) 等在我

国的潜在分布区进行了分析和预测。此外CLIMEX 还可用于研究全球气候变化对物种分布的影响(Anderson R. P. *et al.*,2003)。

1.3.3.2 @risk 软件

@risk 软件是目前世界上广泛应用的风险分析软件。其原理是基于概率风险性分析的方法。它是 Microsoft Excel 的扩充模块，与 Excel 的数据完全兼容。只要通过@risk 内建三个步骤，就可以依靠 Monte Carlo（蒙特卡罗）模拟技术完成精确度极高的风险评估。并且可以用报表、长方图、累积分配曲线、区块以及线性图等将结果分析呈现。其原理是将可能影响结果产生的因子作为条件输入，经过大量的运算，随机产生所有可能出现的结果，通过对结果所出现的概率，进行风险性评价，同时，软件也可以确认每个影响因子对结果产生的影响灵敏度。该软件可以完全实现对风险性评估的定量分析。

赵志晶等（2005）应用该软件分析由苍蝇传播引起大肠杆菌感染爆发的评估模型，建立 Monte Carlo 模拟。其结果与爆发调查数据基本吻合，并通过模型分析可知苍蝇排泄物中的含菌量和苍蝇的数量是影响人群感染危险性的因素；USDA 在 1998 年曾经对于中国进口美国磨粉小麦的小麦矮腥黑穗病（TCK）进行的风险性分析是应用该软件实现各项功能的典型成功案例（陈克等，2002）。汤宛地（2008）利用@risk 软件完成了松材线虫入侵黄山风景区的风险性评估。

1.3.4 松材线虫病的风险性分析与评估

松材线虫病传入我国以来，我国众多学者从不同层面和不同程度上对松材线虫病的研究进行了探索。宋玉双(1989)等对松材线虫在我国适生性进行了分析。该研究认为，年平均气温高于 10℃以上的区域为松材线虫病的适生区，年平均气温 14℃以上的地区为松材线虫病的易发生区。王卫东（2004）、吕全等（2005）通过对全国 639 台站松材线虫病发生的适生性多种生态因子进行综合分析，对中国松材线虫适生性进行分析，并划分出不同区域的松材线虫发生的可能性及风险等级，该分析结果没有涉及寄主种类和分布特点，主要依据松材线虫的生物学及生态学特性而预测的。高天裕(1987)从感病寄主的分布、松材线虫的适生条件和媒介昆虫的分布等方面进行了松材线虫病在我国适生性分析，分析认为，我国与日本相似，在世界植被区被划为“中国-日本植物区系”，我国大部分地区很适合松材线虫病的发生。金昊(1993)和冯士明（2000）分别通过对病原松材线虫的生物学特性、寄主的感病性及分布、环境条件以及媒介昆虫的种类及分布，分

析了松材线虫病在云南的适生性及发生的可能性，并从检疫执法和预防技术上，提出了管理对策。冯益明等（2009a）在前人对影响松材线虫以及媒介昆虫生长发育因素研究的基础上，应用模糊综合评判、地理信息系统、地统计学等理论与方法，综合分析影响松材线虫病定殖的4个基本条件(即寄主植物、松材线虫病原、媒介昆虫和环境条件)直观、定量和较为准确地获得松材线虫病在我国的潜在适生分布范围以及在云南省具体的潜在分布区域，为我国松材线虫病检疫及其防治决策的制定提供了科学依据，周汝良等（2008）应用地理信息系统以90 m×90 m为最小面积单元，也对云南省松材线虫的适生区进行了精细化评估，按高度适生、适生、中度适生、不适当4个水平，给出了全云南省每一个栅格单元水平上的适生性分布地图，为基层单位的病虫害防治提供精细化的空间数据，胥勇等（2008）应用DIVA-GIS软件中的生态位模型BIOCLIM预测了松材线虫在云南省的地理分布图，建议划定云南省北纬23°以北与北纬26°以南之间地区为主要防护区；史东平（1997）、魏初奖（1997）等也分别就松材线虫病对江西和福建的潜在危险性及检疫对策进行了初步的分析，并注意到了人为活动和贸易往来对传播松材线虫病的重要影响；王明旭（2007）基于松材线虫的法学特性和生物学特性，在湖南省建立了以管理系统和技术系统为主要内容的松材线虫早期预警系统，通过建立和实施松材线虫早期预警系统，延缓了松材线虫侵入的时间，控制了疫情的发展，达到了发生面积和枯死数量双下降的控制目标，疫区枯死松树下降率达90%以上；李莉（2004）对松材线虫病入侵陕西的风险进行了定量分析，认为松材线虫病对陕西省而言属于特别危险的林业有害生物，提出应加强监测、检疫和除治管理，防止传入陕西省并造成扩散危害；黄海勇（2005）等对松材线虫入侵贵州的风险进行了分析。汤宛地（2008）也完成了松材线虫入侵黄山风景区的风险性评估。

1.3.5 美国白蛾的风险性分析与评估

有关美国白蛾风险分析的资料较少，林伟（1991）应用CLIMEX分析预测了美国白蛾(*Hyphantria cunea*)在中国的潜在分布区；李淑贤等（2009）利用GARP生态位模型也预测美国白蛾在中国的适生区，并应用信息扩散模糊数学方法，对河北省部分地区美国白蛾进行危险性评估。结果表明：美国白蛾发生灾害风险评估值随着灾害指数的增大而减小，美国白蛾在中国的适生区分布范围：21.20°N-46.33°N, 97.80°E-132.11°E和36.81°N-41.8°N, 76.00°E-94.66°E(新疆的部分地区)；刘海军等（2005）参照国际上有害生物风险分析方法，结合北京地区城市林业特点，提出北京地区重大外来有害生物风

险量化评估体系，并应用该评价体系进行了美国白蛾对北京地区的风险评价，认为美国白蛾是具高度风险的森林有害生物，实践证明该评价结果与实际相符，近年来美国白蛾已在北京及周边地区开始扩展蔓延；蒋星华(2008)也参照国际上有害生物风险评估指标体系，结合金华市检疫实际，并听取有关专家意见，首次在金华市对其进行风险分析。结果表明：金华市为美国白蛾的生态适生区和易暴发流行区，美国白蛾为金华市高度危险的外来林业有害生物，为防控美国白蛾在金华的发生危害提供了理论依据。而其它省区研究较少。

1.4 松材线虫病和美国白蛾预警技术研究进展

预警技术是在上述大量风险分析评估研究的基础上而进行的风险管理技术体系的研究、配套、组装和制定，是一个复杂的系统工程。

王德青等（2010）从基础设施、检疫检查、监测普查、营造林措施、防治松墨天牛和技术培训等多个方面提出了构建豫西南松材线虫病监测预警体系的总体规划和设想。Fernandez、JM Solla（2004），张志诚（2006）等综合考虑了寄主的感病性，7月的平均温度，当地的媒介昆虫的情况，运用GIS技术分别对西班牙的Extremadura省和广东省松材线虫病发生和扩散的风险做了评估。但是利用3S（RS、GIS、GPS）预测、监测松材线虫病发生成本高，价格昂贵，存在时间滞后性，GIS用于对病虫害的扩散蔓延模拟及建立模型的研究不多，大多的模型具有很强的地域性，不能推广应用。

有关松材线虫病和美国白蛾预警技术研究和实施不仅需要考虑有害生物自身的生物学、生态学特性、周边地区有害生物发生和危害的程度及防控水平，还需要与当地政治、经济、公民的素质、有害生物防控的水平、有害生物宣传力度等多因子密切相关，目前，我国松材线虫病和美国白蛾的预警技术研究各地差别较大，尚需根据当地实际情况提出切实可行的预警技术体系。

1.5 本研究的必要性、重要性

泰山集世界自然遗产、文化遗产、世界地质公园、全国文明风景旅游区、国家5A级旅游名胜区于一体。自古以来，泰山就被认为是发育万物的神山和圣山，象征着万物更新、生机勃勃，代表着天地厚德，不仅是封建帝王顶礼膜拜的圣地，也是名人雅士抒情赞颂的名山，历史文化博大精深，自然景观雄伟壮丽，融自然科学、美学和历史文化

价值于一体，被誉为中华文化史的缩影，是中华民族的象征，中华民族的精神家园，其政治、社会、生态价值不可估量。

泰山森林是世界自然遗产和文化遗产的完美结合体，泰山森林已经在历史长河中深深地和泰山的文化融合在一起了，耳熟能详的“齐鲁青未了”已经传唱了上千年，人民心中早已存在了泰山郁郁葱葱的形象；“泰山顶上一青松”更是阐述了一个人不畏艰难险阻的气概；泰山还有 23 棵古树列入世界自然遗产名录，其中的“姊妹松”同“旭日东升”等泰山四大奇观被人们采用了“蒙太奇”的手法（有意涵的时空、人、地拼贴剪辑手法）集中在第五套人民币的背景上。泰山“望人松”更是风姿卓越、热情洋溢迎接每一个游客，以其独特的姿态成为泰山的标志之一。因此，泰山的森林价值已经超越了其本身的价值，而被赋予了中国的传统文化的色彩。

泰山地处南北交界处，交通发达，物流通量和人流交换频繁、毗邻的安徽省、江苏省等地松材线虫病已严重发生；更为严重的是山东省的胶东地区近年来也发生了松材线虫病，而青岛等地到泰山的直线距离不足 300 公里，淄博鲁山林场距泰山风景区直线距离为 100 公里。泰山风景区近 50% 的森林为松林，其中其油松天然次生林是我国暖温带天然针叶林的典型代表，是中国特有植物的种质资源库。

泰山周边的苗圃产业检疫管理不到位，为松材线虫病传入提供了有利条件。泰山东麓的大津口乡有林地面积 5.2 万亩，450 多家苗圃，据初步统计仅松树大苗（胸径 15CM 以上）就有接近 22 万棵；苗圃内的松树、苗木贸易往来于全国各省市，有三分之一的松树来自邻近的江苏，甚至是烟台等疫区，这些苗木贸易基本上没有经过植物检疫。

松材线虫病的媒介昆虫松褐天牛和褐幽天牛在泰山风景区普遍发生，为松材线虫病的在泰山的发生奠定了扩展蔓延的基础。美国白蛾作为外来危险有害生物，目前虽然尚未在泰山风景区发生，但美国白蛾已在泰安城区大量发生，泰山山城一体的特点决定了美国白蛾极易在景区扩展蔓延，因此，研究重大林业有害生物——松材线虫病和美国白蛾入侵泰山的可能性、风险性及危害程度，提出有效的风险预警和风险管理技术，为实现泰山森林健康发展和森林生态、景观安全提供技术支撑则是十分必要和重要。

1.6 本研究的主要内容

基于泰山重大林业外来有害生物发生及我国重大林业有害生物预警技术研究的现状，本课题紧紧围绕对泰山生态安全和景观最有威胁的松材线虫病和美国白蛾为研究对象，以泰山风景区整个森林系统为研究尺度，在系统调查美国白蛾和松材线虫病传播媒

介在泰山的分布范围、虫口密度、消长动态、泰山周边及景区人员、物资等有危险因素的流动情况、主要松林树种对松材线虫病的感病性测定、松材线虫和美国白蛾重大外来林业有害生物寄主分布等多因子调查研究的基础上，重点对松材线虫病和美国白蛾在泰山发生的风险进行评估，划分泰山松林松材线虫病等外来有害生物潜在发生危险等级，确定预防监测重点区域。并开展了生物信息素用于诱捕松材线虫媒体昆虫监测试验，为防止松材线虫病和美国白蛾的入侵泰山，保护泰山森林生态系统可持续健康发展提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1 松材线虫病对泰山风景区的风险分析评估与预警技术

2.1.1 入侵和定殖泰山风景区的可能性风险分析与评估

泰山松材线虫病的风险技术研究主要包括松材线虫入侵泰山的风险评估体系的建立、风险性评估、风险管理技术及其它配套技术研究。研究松材线虫入侵泰山的可能性（入侵可能性和定殖可能性）、危害度及造成的风险，提出适合泰山风景区的风险管理和预警策略和具体管理及预警技术。

2.1.1.1 松材线虫病入侵泰山风景区的风险性分析与评估的技术路线

参照汤宛地（2008）及目前松材线虫病风险分析的研究结果，结合泰山景区的特点，从松材线虫在泰山入侵可能性、入侵后的危害程度、入侵后风险性和风险管理措施等4个方面拟定松材线虫病入侵泰山风景区的风险性评估体系的技术路线（图2—1）。

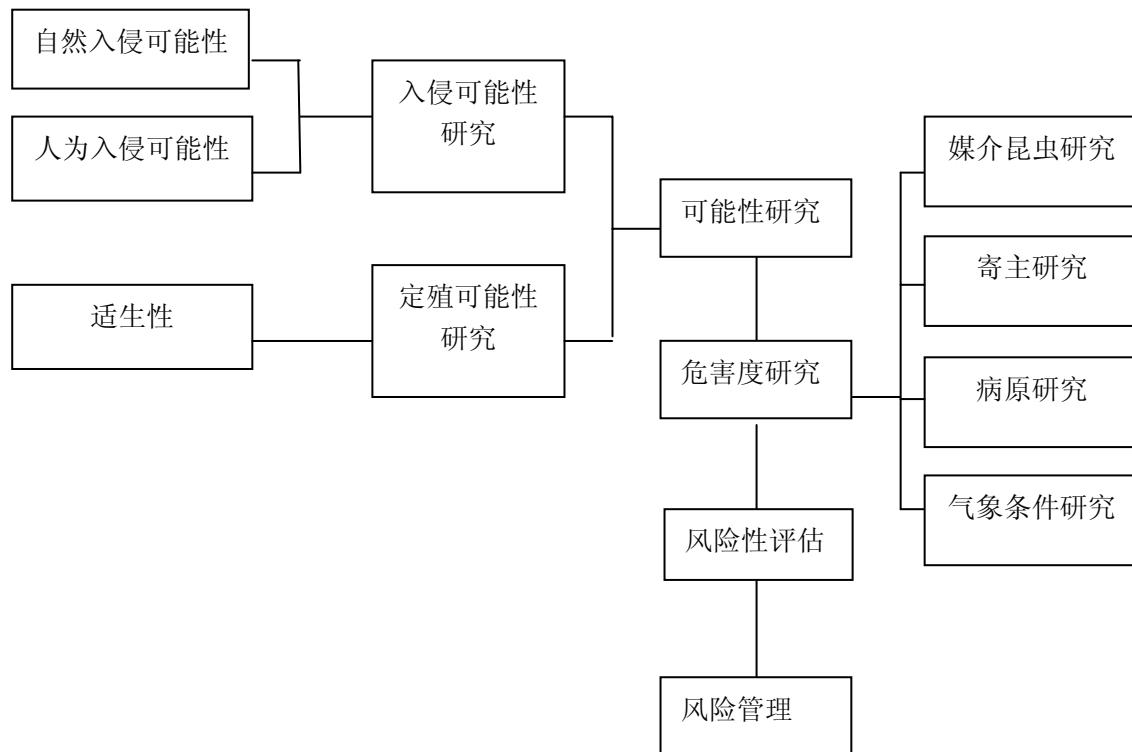


图 2-1 松材线虫入侵泰山风景区风险性评估体系路线

Fig.2-1 Risk assessment system analysis of *B. xylophilus* invading Mount Tai

2.1.1.2 风险评估体系指标的确立及构建

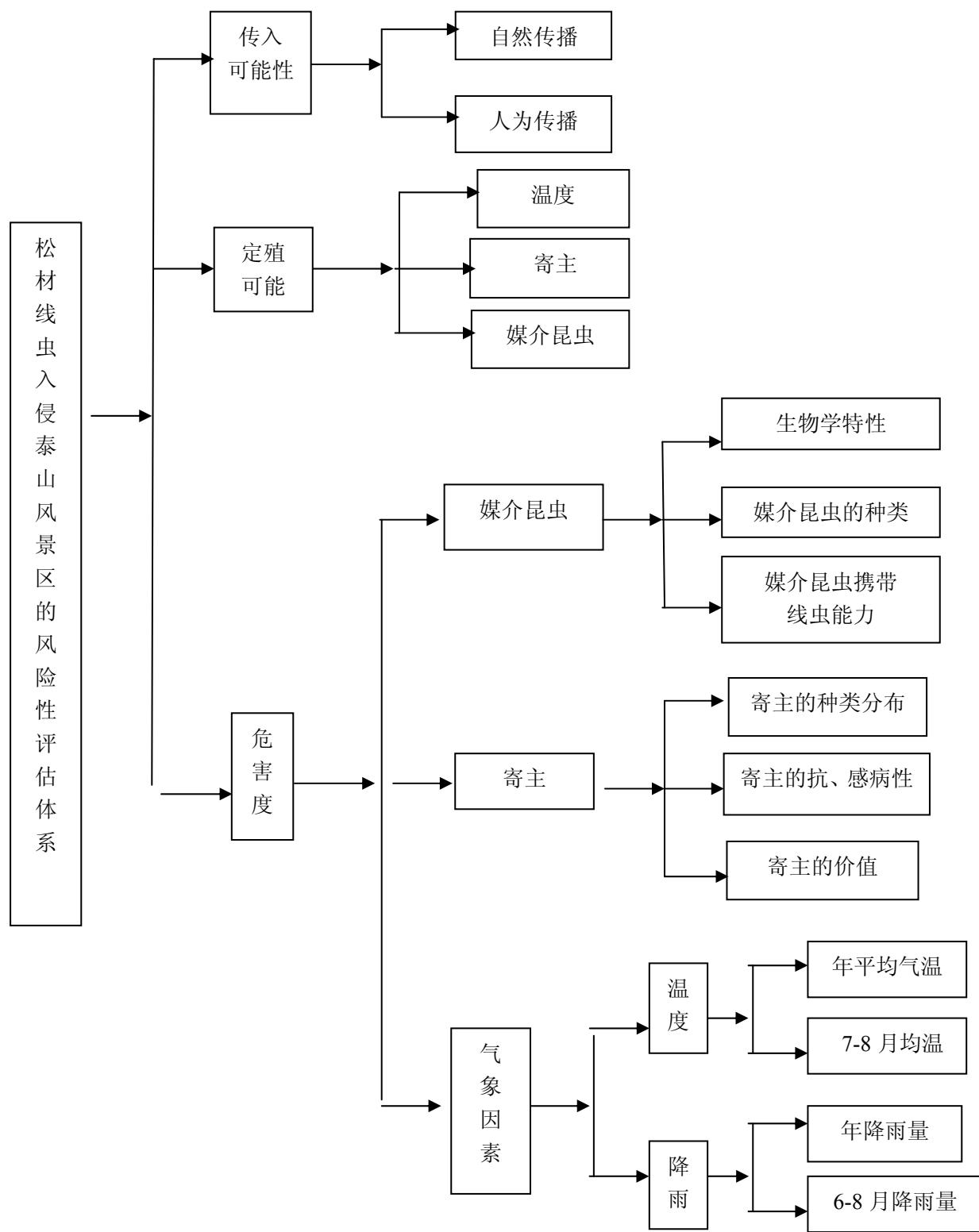


图 2-2 松材线虫入侵泰山风景区风险性评估体系
Fig.2-2 Risk assessment system of *B.xylophilus* invading Mount Tai

风险评估体系包括三个方面内容，一是传入的可能性（possibility），即松材线虫病有多大可能传入泰山风景区；二是危害度(damage)，即松材线虫病入侵泰山风景区后将可能造成的危害；三是风险管理(management)措施，即对待可能产生风险的防范及灾害发生时的处理方法(见图 2-2)。评估的内容主要包括环境条件、寄主、媒介昆虫和传播途径 4 个方面（张兴耀等，2003）。

2.1.1.3 不同数据的来源

泰山景区不同海拔高度的两个气象台站 54826（海拔 1553.7 米）和 54827（海拔 128.6 米）所观测的 2001-2009 年的逐年温度、相对湿度、年降雨量均来自泰安市气象站（具体数据见附件 1-2）；其它海拔高度的逐年温度、相对湿度、年降雨量数据通过每海拔升高 100 米温度降低 0.6℃ 推算获得，其它数据均来自泰山森防站。

2.1.1.4 数据处理方法

CLIMEX 的安装很简单，在控制面板中选择/ 添加和删除程序，直接运行 setup. exe，便可顺利安装。CLIMEX 对计算机配置的要求也较低，486 DX66 MHZ、VGA 和 SVGA 显卡、10M 硬盘、MS Windows 3.1 或 Windows95 平台均可满足需要。

CLIMEX for Windows 1.1 可以根据需要导入自己的参数文件和数据文件，然后按照软件程序进行相应的处理。CLIMEX 输出结果很容易导入字处理、数据库、电子表格等软件。可以同时显示图(graph)、表(table)、地图(map)。

2.1.2 松材线虫病入侵泰山风景区的危害度评估

根据入侵和定殖可能性分析结果，确定泰山那些地区为松材线虫的适生区，适生区内一旦传入和定殖，将造成危害，那么松材线虫病到底在泰山风景区能造成多大的损失呢？这是泰山风景区松材线虫病入侵风险性评估中的一项重要环节。对于危害度的评估，将有助于我们提高认识，增强对该病的应对性，以便及时提出切实可行的预警和管理措施。

结合泰山风景区的自然分布状况，对泰山风景区松材线虫病入侵的危害度研究包括定性分析和定量研究两个部分。

定性分析是指通过文献资料总结和试验方法，分析可能影响松材线虫病在泰山风景区产生危害的各个因子，然后对各个因子的影响度进行总结和分析。危害度定性分析主

要包括寄主种类及分布情况（种类、面积、垂直分布、不同区域）；寄主抗病性（寄主健康状况、油松感病性和松材线虫在油松体内的分布动态、寄主树种的价值）；主要媒介昆虫的种类、生物学、分布调查；气候条件（降雨量和温度）。

定量分析是指在定性分析的基础上，对各个因子的危害度进行定量赋值，然后通过@risk 软件对各项因子的危害度进行分析，得到危害度的量化数值。

2.1.2.1 松材线虫病对泰山风景区危害度定量分析

（1）松材线虫对油松的致病性测定及在油松体内的扩散动态

松苗来源 2008 年 9 月，选取 1 年生和 10 年生的泰山油松各 20 株运往山东长岛，在长岛选取周围没有黑松和传播媒介、地势平坦的苗圃地进行栽植和缓苗，其上遮盖防虫网以避免其他害虫的干扰。

松材线虫来源：2009 年 4 月底在山东长岛北长山采集黑松木段，带回当地实验室劈碎后用贝尔曼漏斗法分离松材线虫，24 小时后离心收集线虫并统计数量，待用。

松材线虫对油松的致病性测定：将经过半年栽植而保持健康生长的油松苗于 2009 年 5 月 1 日采用人工皮接法（杨宝君等，2003），即用消过毒的解剖刀在黑松苗茎中部的一侧切开长约 0.5 cm 的伤口，伤口深达木质部，撕开韧皮部，在伤口处夹入一小团脱脂棉球，然后用透明胶布将树皮和棉球包裹好（见图 2-3）。最后用微量进样器对棉球注入接种量为 1000、2000、5000 条线虫·株松苗⁻¹的不同浓度的线虫悬浮液，每个处理接种 6-9 株，对照注无菌水。于 2009 年 7 月 30 日观察苗木的感病情况并统计发病率。



图 2-3 松材线虫接种方法-皮接法

Fig. 2-3 Inoculating methods of pine nematodes-skin inoculating method

松材线虫在油松体内的扩散动态：对于 1 年生的油松，从地平处截断，然后选取接种点上下 10cm 的茎干部后剪碎，用贝尔曼漏斗法分离线虫，24 小时后取漏斗最下部一滴 (50 μ l)，计算线虫数量；而十年生的油松，选取接种点上下各 20cm 长的茎干部后剪碎，线虫分离和统计方法同上，分析松材线虫在树体内的扩散动态。

(2) 泰山松材线虫的主要寄主种类、分布和价值调查

以泰山整个风景区的松林生态系统为研究对象，通过查阅文献资料和实地调查方法及引诱剂方法，调查松材线虫的主要寄主种类及分布、数量和价值。

(3) 泰山松材线虫病的主要媒介昆虫种类、生物学、分布调查

试验林分概况：南天门林区高海拔油松纯林，平均林龄 48 年，海拔 1100-1400 米；中天门、红门、玉泉寺等林区为中海拔油松纯林，平均林龄 43 年，海拔 600-900 米；竹林、桃花峪等林区低海拔油松纯林，平均林龄 41 年，海拔 300-600 米；天烛峰林区的中海拔油松赤松混交林，平均林龄 41 年，海拔 600-800 米。

实验方法：采用引诱剂实验并结合其他常规的方法定点、定期采集不同虫种、虫态的虫体，研究使用由浙江省森防检疫站和中国林科院亚林所研制的蛀干类害虫引诱剂，规格 300g/瓶。室内进行数量统计和虫种鉴定及部分重要虫种的生物学特性观察，研究其生活史。

2.1.2.2 松材线虫病对泰山风景区危害度定性分析

(1) 危害度分析标准

将危害度设置为 D0，参考汤宛地（2008）的风险性评估方法，结合泰山风景区媒介昆虫的基本情况（种类、生活史、种群密度、携带能力）、寄主植物的基本情况（分布、感病性、价值）、降雨量（年均降雨量、6—8 月降雨量）、温度（年平均温度、年平均气温）等数据，采用二级指标分级评判进行赋分，对松材线虫病入侵泰山风景区的赋分标准设置如下：（表 2—1）

表 2-1 松材线虫病入侵危害度定量评估赋分区间

Table 2-1 Quantitative assessment about damage degree of *B.xylophilus*

项目	权重	分项	评判标准	分值区间
Project	Weighing	Subentry	Standard of classification	Interval
媒介昆虫	0.15	媒介昆虫的种类 I_{11}	≥ 3 种	2.01-3.00
			2 种	1.01-2.00
			1 种	0.01-1.00
		无媒介昆虫	0	
I_1	0.15	媒介昆虫生活史 I_{12}	1 年 2 代以上	2.01-3.00
			1 年 1 代	1.01-2.00
			2-3 年 1 代	0.01-1.00
		分布广	2.01-3.00	
I_{13}	0.15	媒介昆虫种群密度 I_{13}	分布面积中等	1.01-2.00
			分布面积小	0.01-1.00
			无分布	0
		携带率大、携带能力强	2.01-3.00	
I_{14}	0.15	媒介昆虫携带松材线虫能力	携带率较大、携带能力较强	1.01-2.00
			携带率小、携带能力弱	0.01-1.00
			分布面积广	2.01-3.00
		寄主植物的分布 I_{21}	分布面积中等	1.01-2.00
I_2	0.15	寄主的感病性 I_{22}	分布面积小	0.01-1.00
			无分布	0
			容易感病	2.01-3.00
		自然生境中能够感病	1.01-2.00	
寄主植物	0.15	I_{23}	不感病	0.01-1.00
			经济价值高、社会影响大	2.01-3.00
			经济价值一般、社会影响一般	1.01-2.00
		经济价值低、社会影响小	0.01-1.00	

	年均降雨量<1548.6mm	2.01-3.00
	1548.6 mm≤年均降雨量	1.01-2.00
	年均降雨量 I ₃₁	<2304.5mm
		2304.5mm≤年均降雨量
0.3		0.01-2.00
		<3306.6mm
降雨量 I ₃	年均降雨量>3306.6mm	0
		6-8 月降雨量<235mm
	6-8 月降雨量 I ₃₂	2.01-3.00
		235mm≤6-8 月降雨量<968.8mm
		968.8mm≤6-8 月降雨量
		0.01-1.00
		<2150.3mm
	6-8 月降雨量>2150.3mm	0
		年平均温度≥14℃
	年平均温度 I ₄₁	2.01-3.00
0.4		12℃≤年均温度<14℃
		10℃≤年均温度<12℃
温度 I ₄	年均温度<10℃	0
		6-8 月平均温度≥25℃
	6-8 月平均气温 I ₄₂	2.01-3.00
		18℃≤6-8 月平均温度<25℃
		6-8 月平均气温<18℃
		0.01-1.00

其中：

$$I_1 = (I_{11} \times I_{12} \times I_{13} \times I_{14})^{1/4}$$

$$I_2 = (I_{21} \times I_{22} \times I_{23})^{1/3}$$

$$I_3 = (I_{31} + I_{32})/2$$

$$I_4 = (I_{41} + I_{42})/2$$

$$D0 = 0.15I_1 + 0.15I_2 + 0.30I_3 + 0.30I_4$$

(2)各因子赋分情况

在综合定性分析的原则基础上，对泰山景区的各项因子进行赋分，其各项因子赋分结果如下：

(i)媒介昆虫(I₁)

媒介昆虫种类 (I_{11})

泰山风景区内媒介昆虫种类为 2 种，其中松褐天牛为最主要的媒介昆虫，因此，按照赋分原则， I_{11} 取值为 2。

媒介昆虫生活史 (I_{12})

泰山风景区内大部分地区天牛为一年一代，因此，按照赋分原则， I_{12} 为随机函数，其区间为 1.01-2.00。

媒介昆虫分布 (I_{13})

泰山风景区低海拔松林内均发现有媒介昆虫，其分布范围广，按照赋分原则， I_{13} 为随机函数，其区间为 2.01-3.00。

媒介昆虫携带松材线虫的能力 (I_{14})

松褐天牛携带松材线虫的能力强，其携带率大，按照赋分原则， I_{14} 为随机函数，其区间为 2.01-2.50。

(ii) 寄主植物 (I_2)

寄主植物的分布 (I_{21})

泰山风景区内的寄主植物分布较广，按照赋分原则， I_2 为随机函数，其区间为 1.50-2.00

寄主植物的感病性 (I_{22})

泰山风景区内大部分松林为油松、赤松、黑松，均为感病树种，按照赋分原则， I_{22} 为随机函数，其区间为 2.50-3.00。

寄主植物的价值 (I_{23})

泰山风景区内的松树具有非常巨大的经济价值和社会影响力，按照赋分原则， I_{23} 为三角函数，其区间为 2.50-3.00，期望值为 3.00。

(iii) 降雨量 (I_3)

年平均降雨量 (I_{31})

54827 台站观测 2001-2009 年的降雨量情况为 288.0mm-1057.2mm，其平均值为 729.8mm，将平均值设置为期望值，根据其实际降雨量与赋分区间临界值的线性回归方程，可得 I_{31} 为三角函数，区间为 2.32-2.81，期望值为 2.51。

6-8 月降雨量 (I_{32})

54827 台站观测 2001-2009 年 6-8 月份降雨量的变化范围为 143.7-818.1mm，平均值为 496.5mm。属于两个赋分区间，因此其分值也跨度两个区间，其平均值为期望值，根据实际降雨量与赋分区间临界值的线性回归方程，可得 I_{32} 为三角函数，区间为 1.20-2.39，期望值为 1.62。

(iv) 温度 (I_4)

年平均温度 (I_{41})

54827 台站观测 2001-2009 年平均温度为 13.22℃-14.98℃，平均值为 13.97℃，根据实际温度与赋分区间临界值的线性回归方程，可得 I_{41} 为三角函数，区间为 1.61-2.49，期望值为 2.00。

6-8 月平均温度 (I_{42})

54827 台站观测 2001-2009 年 6-8 月平均温度在 24.67-26.47℃，平均值 25.52℃ 因此，根据实际温度与赋分区间临界值的线性回归方程，可得 I_{42} 为三角函数，区间为其与赋分区间临界值的比例及参考风险信息交流的结果，可得 I_{42} 为三角函数，区间为 1.95-2.21，期望值为 2.07。

2.1.2.3 松材线虫病入侵泰山风景区风险性评估

根据我国《进出境植物和植物产品有害生物风险分析技术要求》(SN/T 16011-2005)中的风险事件的可能性定性评估和风险评价方法，利用合并描述可能性规则的矩阵和风险评价矩阵对松材线虫病入侵泰山风景区的风险性在不同海拔下进行评估。

2.1.2.4 不同松褐天牛引诱方法对松材线虫病预警技术研究

结合松材线虫病入侵泰山风险评估的结果，从降雨量、温度、媒介昆虫的生活史和种群密度对结果的贡献值大小，寻找可控因素。温度和降雨量等环境条件受大气环境条件的影响不易受人为调控，而媒介昆虫可通过监测和诱杀来明确其数量变动规律及科学防控，松材线虫病扩展蔓延的重要途径就是媒介昆虫的传播和危害，因此，开展传播媒介的监测是松材线虫病预警配套技术研究的一个重要方面，找寻科学有效的媒介昆虫的引诱技术是提高松材线虫病预警技术研究的重要内容。

(1) 试验地的设置

试验地设在泰山不同海拔地区的红门管理区和中天门管理区、南天门管理区。试验

林地为38年生的赤松和油松。

(2)材料

浙江省森防检疫站和中国林科院亚林所研制的蛀干类引诱剂和林间衰弱松树，健康松树和枯死松树。

(3)试验方法

(i) 引诱剂活立木法（记为(1)）。在林间选择生长势弱的活立木，在离地面30-50cm处向阳面砍三刀，刀口砍入木质部且与树干成30度夹角，用注射器注射引诱剂，注满为止，每亩地处理10株。

(ii) 假植木法（记为(2)） 将6月份新采伐的立木每10根一捆，每15亩一个点靠在健康的树上作假植状。

(iii) 引诱剂假植木法（记为(3)） 将引诱剂按(1)的方法注射入假植木上。

(iv) 枯立木（记为(4)） 在林中找到已枯死的松树，按(1)的方法砍三刀，实验前进行检查，确保无松褐天牛幼虫

(v) 活立木（记为(5)） 在林中取2-3株活立木，用刀按(1)的方法砍三刀，系上红绳作标记，作为对照。

2.2 美国白蛾对泰山风景区的风险分析与评估

随着美国白蛾在山东省乃至泰安市城区的扩展蔓延，美国白蛾入侵泰山风景区的风险不断加大，为明确美国白蛾对泰山风景区的入侵风险和危害程度，本研究在国内外美国白蛾风险分析研究成果的基础上，重点对美国白蛾入侵泰山的风险和危害度进行了分析，在此基础上，提出了泰山美国白蛾的风险管理技术，为防控美国白蛾在泰山风景区的扩展蔓延提供了理论依据。

2.2.1 美国白蛾入侵泰山风景区的风险评估研究思路

在调查山东同类已发生美国白蛾地域受害树种种类、危害程度及泰山风景区阔叶树种种类和分布的基础上，结合泰山气候条件研究美国白蛾入侵和定殖泰山风景区的可能性；在目前国内外美国白蛾危害树种记录资料的基础上，明确泰山美国白蛾可能危害的区域、危害的程度及风险，研究不同海拔美国白蛾危害的可能性，明确美国白蛾在泰山危害所能达到的海拔高度，为防控提供基本数据。

2.2.2 美国白蛾入侵泰山风景区的风险评估体系的确立

风险评估体系包括三个方面内容，一是传入的可能性（possibility），即美国白蛾有多大可能传入泰山风景区；二是危害度(damage)，即松材线虫病入侵泰山风景区后将可能造成危害；三是风险管理(management)措施，即对待可能产生风险的防范及灾害发生时的处理方法(见图 2-4)。评估的内容主要包括环境条件、寄主、媒介昆虫和传播途径 4 个方面（张兴耀等，2003）。

2.2.3 美国白蛾入侵泰山风景区的可能性评估

美国白蛾入侵泰山风景区的可能性评估主要包括传入的可能性和定殖的可能性研究两个方面。

参照目前美国白蛾的生物学、传播特性和在国内的分布特点，结合泰山的地理生态环境和气象条件，采用普查和定点、定期调查相结合的方法，评判美国白蛾入侵泰山风景区的可能性。

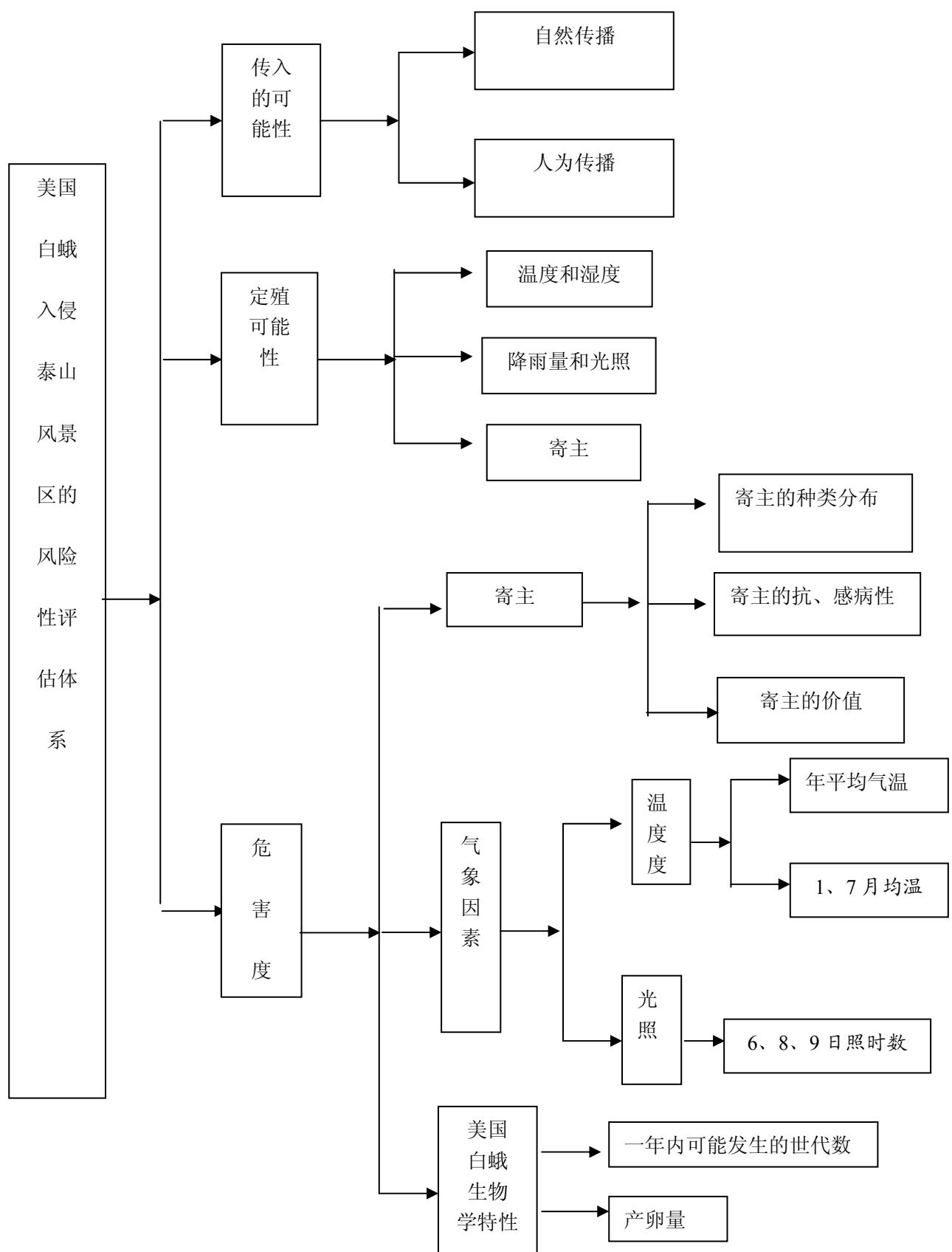


图 2-4 美国白蛾入侵泰山风景区风险性评估体系

Fig.2-4 Risk assessment system of American white moth invading Mount Tai

3 结果与分析

3.1 松材线虫病对泰山风景区的风险分析评估及预警技术

3.1.1 松材线虫病入侵泰山风景区的可能性评估

入侵的可能性评估主要包括自然入侵和人为途径入侵的可能性两个方面。

3.1.1.1 松材线虫病自然入侵泰山风景区的可能性

自然入侵是指松材线虫病通过自然因素的作用，传播进入泰山风景区的过程。其主要原因是由于风景区周边疫区的松材线虫经过媒介昆虫的携带，迁飞进入泰山风景区并定殖。松材线虫病通过自然传播的方式入侵必须满足以下 4 个条件：一是周边地区要有该病的疫区；二是需要有传播媒介进行迁飞传播；三是泰山风景区应当有该病害的寄主；四是泰山风景区气候条件适合其生存。通过分析研究认为：松材线虫的传播主要靠媒介昆虫天牛，其中又以松褐天牛最为广泛。经调查，松褐天牛的最远迁飞距离为 3.3 km（杨宝君等，2003），而山东松材线虫发生面积较大烟台长岛和新发生的疫区荣城市和文登市距泰安都在 500 公里以上（见图 3-1），媒介天牛不可能通过自然迁飞把松材线虫传入泰山景区。发生松材线虫的南方地区与泰安的距离也远远大于天牛的迁飞距离，因此，松材线虫病不可能通过自然途径传入泰山风景区。



图 3-1 泰山风景区周边疫区示意图

Fig.3-1 Infected areas around Mount Tai

3.1.1.2 人为途径入侵泰山风景区的可能性

人为传播是指松材线虫病在人为作用条件下，传播进入泰山风景区的过程。其主要原因是带有松材线虫的木材或木制品被人为携带入泰山风景区，再通过媒介昆虫传播在风景区扩散蔓延。通过对 2005-2008 年来自全国不同地区的进入泰山的木材进行检疫，其结果见表 2-1。

从表中可见，2005-2008 年中，在去向泰山的木材检疫记录中每年都有线虫检出记录。随着经济贸易往来的不断扩大和苗木花卉资源的迅速增加，植物检疫工作缺乏有效的监管监督。泰山周边的苗圃（花圃）数量发展迅速，特别是位于景区之内的大津口乡有林地面积 5.2 万亩，400 多家苗圃，几乎家家苗圃都有松树，每年进 15CM 以上大苗的持有量均在 20 万株以上；苗圃内的松树、苗木贸易往来于全国各省市，其中有三分之二的松树是来自于邻近的江苏等发生地。因此，松材线虫病通过人为因素传入泰山风景区的可能性很高。

表 3-1 泰山木材检疫 2005-2008 年汇总

Table3-1 Collection of Mount. Tai wood quarantine,2005-2008

木材来源						
年度	检疫木材数量 (立方米)	泰安	南方(江苏、福建等)	北方(黑龙江、吉林、 俄罗斯等)	木材 去向	备注
Times	Quarantine timber amount (m ³)	Tai'an	South(Jiangsu ,Fujian)	North(Hei longjiang,Jilin,Russia)	Destination	Remarks
2005	17676				泰山	处理 52 立方米带疫 材料，4 起疫情
2006	3525	20	1325	200	泰山	处理 25 立方米带疫 材料
2007	438	38	100	300	泰山	2 起线虫记录
2008	248	28	70	150	泰山	3 起线虫记录

3.1.2 松材线虫病定殖泰山风景区的可能性分析

3.1.2.1 温度

松材线虫病的发生与环境条件有着密切的关系，各种气象因素中气温是主导因素（张星耀等，2003），它直接影响着松材线虫的生长发育及病害的发生和发展，松材线虫的生活史需要一定的积温保证其发育，Mamiya（1985）报道松材线虫低于10℃不能发育，在28℃以上增殖会受到抑制。在33℃以上不能繁殖，并认为一个地区的年平均气温可作为该地区松材线虫病发生的重要指标，如日本发病最严重的南部地区，年平均温度在15-17℃以上；而日本北部，年平均温度在10-12℃以下，发病轻微。在我国宋玉双（1989）等分析，松材线虫生长繁殖最适宜温度为25℃。松材线虫在年平均气温高于14℃的地区普遍发生，年平均气温在10-12℃地区能够被侵染但不造成危害。

利用CLIMEX软件，首先结合泰山地区海拔不同的两个气象台站54826（海拔1553.7米）和54827（海拔128.6米）观测的逐年温度、相对湿度、年降雨量（见附表1、附表2），对松材线虫在泰山地区的适生性进行预测。该软件用EI描述该物种对某一地区的综合适合度，EI大于30时，表示该地区非常适合物种生存。EI由生长指数和胁迫指数综合而成。因为在各气象因素中，气温是主导因素，因此本课题主要预测温度对松材线虫定殖的影响。在CLIMEX的预测结果中，用于反映温度因素的因子有TI（温度指标）、CS（冷胁迫指数）、HS（热胁迫指数），由于泰山地区的月均温均小于高温对松材线虫的胁迫开始温度30℃，因此，在温度因子中，又以TI和CS为主要参考因素。

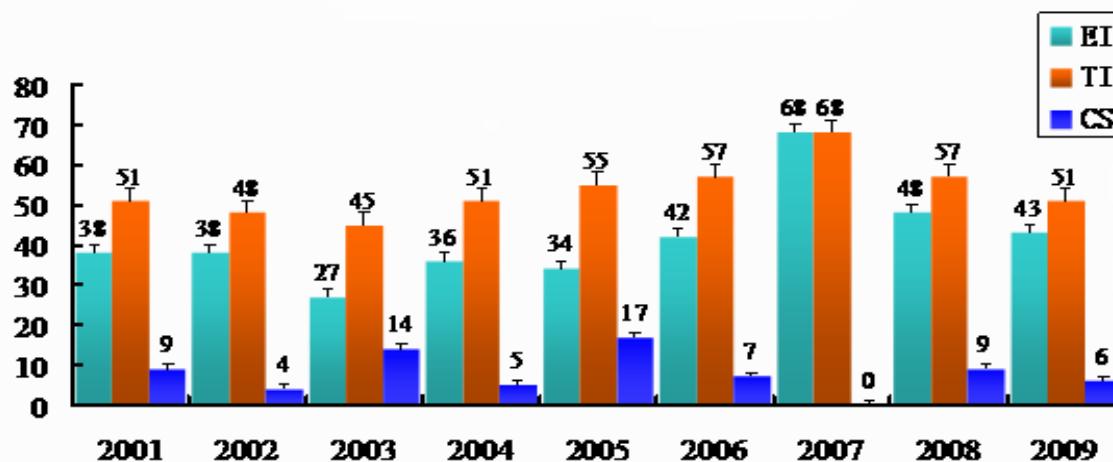


图3-2：54827台站2001-2009年EI/TI/CS月变化图

Fig.3-2 EI/TI/CS variation,54827 station during 2001-2009

表 3-2 54827 台站 EI/TI/CS/HS 变化表
Table3-2 EI/TI/CS value variation of 54827 station

年份 Times	EI	TI	CS
	Ecoclimatic Index	Temperature Index	Cold Stress
2001	38	51	9
2002	38	48	4
2003	27	45	14
2004	36	51	5
2005	34	55	17
2006	42	57	7
2007	68	68	0
2008	48	57	9
2009	43	51	6
均值	41.6	53.7	8.89

温度指数 TI 描述日温对物种的影响，取值范围为 0-100。当 TI=100 时种群增长最快，当 TI=0 时，种群增长为 0。CS 描述低温对物种的胁迫效应，当胁迫指数大于 100，表示环境严酷以至于物种无法生存。 54827 台站（海拔 128.6 米）区域松材线虫的适生性分析结果见图 3-2、和表 3-2。

从图 3-2 和表 3-2 表明，泰山低海拔地区 2001-2009 年 EI 的平均值为 41.6，适合松材线虫的生长，TI 年平均值 53.7，CS 年平均值仅有 8.89，可见该地的气温条件适合松材线虫的定殖。

王卫东（2004）应用模糊数学综合评判的方法，根据年均温、降雨量、6-8 月平均气温、海拔和一年中 25℃ 以上的天数五项因子，预测了松材线虫在中国的适生区，其中泰安为松材线虫的较适宜生长区。张海军（2008）也运用模糊数学综合评判的方法出了相同的结论。与本文结论基本一致。

台站 54826（海拔 1533.7 米）区域松材线虫的适生性分析结果见图 3-3 和表 3-3。

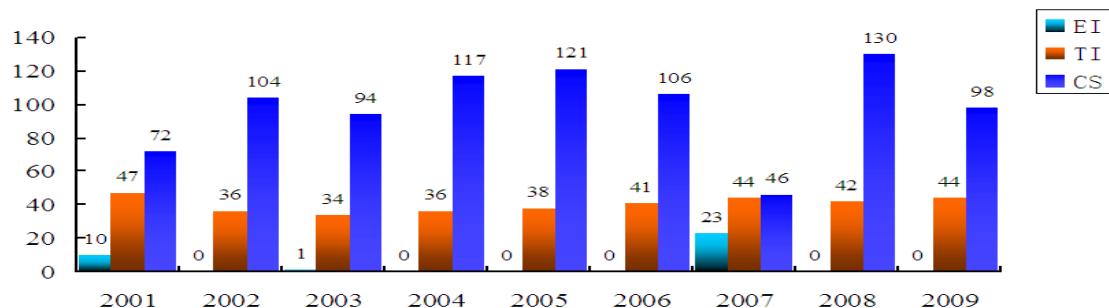


图 3-3 54826 台站 2001-2009 年 EI/TI/CS 月变化图

Fig.3-3 EI/TI/CS variation,54827 station during 2001-2009

表 3-3 54826 台站 EI/TI/CS 年变化值
Table3-3 EI/TI/CS value variation,54826 station

海拔 Elevation	EI Ecoclimatic Index	TI Temperature Index	CS Cold Stress
2001	10	47	72
2002	0	36	104
2003	1	34	94
2004	0	36	117
2005	0	38	121
2006	0	41	106
2007	23	44	46
2008	0	42	130
2009	0	44	98
均值	3.78	40.2	98.7

图 3-3 和表 3-3 表明，在泰山高海拔地区，2001-2009 年的 EI 年平均值只有 3.78，可见该地不适合松材线虫的定殖，2001-2009 年的 CS 平均值为 98.7，接近 100，证明冷胁迫足以致使松材线虫无法生存。

表 3-4 不同海拔高度 2001-2009 年 EI/TI/CS 平均变化表
Table 3-4 EI/TI/CS value variation in different elevation height

海拔 Elevation	EI Ecoclimatic Index	TI Temperature Index	CS Cold Stress
300	32	36	9
400	30	39	21
500	21	40	47
600	19	46	57
700	8	46	83
800	0	42	128
900	0	49	156

其它不同海拔的松材线虫定殖可能性分析，主要是根据 2001-2009 年每月的最高温度平均值和最低温度平均值做的统计结果。其实验结果见表 3-4。

表 3-4 表明，随着海拔的升高，EI 值逐渐减少，海拔在 300-400 米时其 EI 值比较接近 30，说明松材线虫在该海拔比较适合生存，海拔在 500-600 米时，其 EI 值在 19-21 之间，说明松材线虫在该海拔可以生存，而高于 700 米以上，其 EI 几乎为 0，说明在 700 米以上松材线虫不能生存。日本九州的云仙、雾岛两山上病害的分布发现，海拔 400 米以下，松材线虫病严重发生，此上至 700 米以下，有病害发生，高于此线以上，很少见到松材线虫病死树（张星耀，2003），本研究结果也符合此规律。

从上述结果分析中表明，泰山 400 米以下的低海拔地区的气候条件适合松材线虫的定殖。而 500-700 米，随着海拔的升高，气候条件（温度）逐渐不适合松材线虫病的生存，在高海拔 700 米以上地区，松材线虫则无法生存。

3.1.2.2 寄主植物

泰山广布着大量的油松，总面积达到 6.7 万亩，占整个松林面积的 82.0%。油松是泰山的乡土树种，望人松、姊妹松等古树名木都是油松。油松原产中国，自然分布范围广，辽宁、吉林、内蒙古、河北、河南、山西、陕西、山东、甘肃、宁夏、青海、四川北部等均有分布，零下 25℃ 的气温下均能生长。本研究表明油松为感病树种，因此泰山地区存在大量松材线虫的寄主植物。

3.1.2.3 媒介昆虫

泰山地区存在大量的松材线虫媒介昆虫褐幽天牛 (*Arhopalus rusticus* L.) 和松褐天牛 (*Monochamus alternatus* Hope) (具体实验结果见危害度部分)，且天牛危害一度爆发成灾，松材线虫病一旦传入，将有大量媒介昆虫将其向周围传播。

3.1.3 松材线虫入侵泰山风景区的危害度评估

从上述分析可知，泰山低海拔地区为松材线虫的适生区，一旦传入和定殖，将造成危害，到底在泰山风景区造成多大的损失？这是泰山风景区松材线虫病入侵风险性评估中的一项重要环节。

3.1.3.1 松材线虫入侵泰山风景区的危害度定性分析

为了给定量分析提供依据，首先将对风险性评估体系中危害度评估过程中的影响因子进行定性分析。

(1) 寄主植物

(i) 寄主植物的种类及分布情况

通过对泰山风景区内松林种类、分布情况进行了详细的调查和整理统计，统计结果如下：

泰山风景区寄主种类及面积。泰山森林面积达 9490hm^2 ，主要有油松、赤松、华山松。其中松林面积为 5413 hm^2 ，占总森林面积的 57%，油松面积 4460hm^2 ，占松林面积

的 82.0%；赤松总面积约 483.3hm^2 ，占松林面积的 8.9%；黑松林面积 187.2hm^2 ，占松林面积的 3.5%；华山松面积 89.5hm^2 ，占松林面积的 1.70%，白皮松面积很小，不足 1.3hm^2 ，占松林面积的 0.02%。

寄主在泰山风景区内的垂直分布情况。泰山油松林分布普遍，但主要分布在海拔 700 米以上；赤松分布海拔多在 800m 以下，个别地段（如桃花源）可达 1150m，但主要分布于海拔 700m 以下的泰山各林区少数地段上；黑松栽植海拔一般在 800m 以下，个别可达 1000m；华山松垂直分布于海拔 400-1500m，但主要分布在海拔 1000m 以上。白皮松主要分布在 370-430m 处。

寄主在风景区内不同地区的分布情况。油松在泰山分布十分广泛，是泰山的乡土树种，在泰山分布比较普遍，从山下零星栽植到高海拔地带，都有其分布，是泰山高海拔主要造林树种。除了灵岩寺外，其他林区均有大面积分布；赤松主要集中于天烛峰、巴山、桃花峪和玉泉寺，其他林区如樱桃园、桃花源、红门和竹林也有少量分布。黑松主要集中于桃花峪、樱桃园和长城岭造林；

华山松主要集中于天烛峰、桃花源、玉泉寺、桃花峪、竹林寺、红门和巴山也有少量栽植；白皮松面积很小，主要在桃花峪 370-430m 处集中成片，巴山有零星种植。

（ii）寄主的抗病性

泰山风景区内寄主的健康状况。泰山景区主要有油松林、赤松林、黑松林、华山松林和白皮松松林。这些松林多年来遭受赤松毛虫 (*Dendrolimus spectabilis* Butler)、松扁叶蜂 (*Acantholyda posticalis* Matsumura)、油松巢蛾(*Ocenerostoma pizliarellum* Zeller) 等叶部害虫、松褐天牛(*Monochamus alternatus* Hope)、松梢害虫、松纵坑切梢小蠹虫 (*Blastophagus piniperda* L.) 等蛀干和枝梢害虫、松树干枯病 (*Cenangium ferruginosum*) 及大气生态环境条件，这些有害生物在不同时期，不同区域严重发生，致使泰山松林健康低下；泰山赤松、黑松、华山松和白皮松均属于松材线虫的感病寄主，泰山面积最大的松林-油松林是否也为松材线虫的感病寄主，本研究就寄主抗/感病性进行了接种实验，获得了有意义的研究结果。

油松抗/感病性测定及松材线虫在树体内的分布动态。所有接种发病的油松，大多初表现为生长不良，叶色变黄色，后表现为针叶倒挂下垂，最后感病死亡油松的针叶变为红褐色，症状同自然感病的特征相同。实验结果见表 3-5。

表 3-5 松材线虫接种油松的致病性测定结果

Table 3-5 Pathogenicity of pine nematode to *Pinus tabuliformis*

树龄 Tree age	线虫数量/棵 Nematode population	发病情况 incidence			对照 Contrast	总计 Total	发病率 (%) Incidence rate(%)	分离线虫数量 (上/下) Nematode population
		死亡 Dead	未死 Live	生长正常 Normal growth				
1 年生	1000	1	4	0	2	6	100	125
	2000	3	3	0	2	8	100	163
	5000	3	2	0	1	6	100	177
	1000	1	1	2	2	6	50	95/6
10 年 生	2000	2	6	0	1	9	100	77/12
	5000	3	2	0	1	6	100	68/12

接种结果显示：1 年生松苗感病率 100%，随着接种数量的增加，松苗死亡率增加；10 生的松苗除接种量为 1000 条/棵的松苗发病率为 50% 外，其它均发病率为 100%。

线虫在树体内的分布动态分析表明，1 年生松苗内线虫存活数量明显多于 10 年生的松苗，10 年生松苗内接种点上下线虫的数量分布明显不同，接种点以上线虫数量明显高于接种以下，说明大多线虫接种后向顶部移动能力强。实验说明，泰山的油松易感染松材线虫病，为高感松材线虫病树种。

(iii) 寄主树种的价值

泰山松类树种主要有油松、赤松、黑松、华山松及少量的红松、白皮松，这些泰山松树是构成泰山自然景观的重要部分，以其独特的魅力和风格称奇；古树名木更是活着的文物，泰山景区有古树名木 18195 株，一级古树名木有 1821 株，有 24 株被联合国列入世界自然遗产名录。如望人松、姊妹松、五大夫松等，这些松林资源和古树名木是泰山风景资源的重要组成部分，是不可再生的宝贵财富。因此，一旦遭受松材线虫病的侵染和危害，将会对泰山景区产生重大的经济损失和生态损失，后果不堪设想。

(2) 泰山松材线虫病主要媒介昆虫种类、生物学、分布调查

(i) 主要媒介昆虫的种类

经过连续两年的林间引诱剂试验表明：松褐天牛 (*Monochamus alternatus* Hope) 和褐幽天牛 (*Arhopalus rusticus* (L.)) 是泰山松林的主要害虫，参考相关文献资料可知，

上述两种天牛均为松材线虫的媒介昆虫。

(ii) 媒介昆虫的生物学特性

松褐天牛的生活史。松褐天牛在泰山一年发生一代，主要以老熟幼虫在树干基部或大粗枝、伐根木质部的蛹室内越冬，并有少量未老熟幼虫(主要以3龄以下)在树皮下(或木质部浅表层)越冬。在泰山中天门，翌年3月下旬4月初越冬幼虫开始活动，5月初陆续化蛹，5月下旬为化蛹盛期，6月初可见成虫，6月下旬为出孔盛期，10月份仍可见成虫，成虫期可长达4个多月。详见生活史表 3-6。

表 3-6 泰山松褐天牛生活史表

Table 3-6 Diagram life cycle of *Monochamus alternatus* Hope in Mount. Tai

时间 (月)		11-3	4	5	6	7	8	9	10
虫态	Instars								
幼虫	(-) (-) (-)	---	---	---	---	---			
蛹		000	000	0					
成虫			△△△	△△△	△△△	△△△	△		
卵						
幼虫				---	---	---	---	-- (-)	

生活习性。卵：夏季6-7月份，平均温度在23℃左右，卵期为8天。卵的孵化率与树势强弱、天气状况有关，最高可达80%左右，最低只有30%。

幼虫：幼虫孵化后，先蛀食韧皮部和边材，形成不规则的浅平蛀道，大多数粪便和纤维状蛀屑堆积于蛀道内。3龄后开始向木质部蛀入，个别终生在边材危害，蛀道不规则，蛀孔呈扁圆形，蛀道长度与成虫产卵部位有关，部位高者，蛀道长可达30cm以上，部位低者蛀道短，最短只有5cm，幼虫自上向下基部取食，老熟时多集中于离地面1m以内及粗根部。

成虫：① 羽化：成虫羽化后从蛹室向外咬一直径约6-8mm的扁圆形羽化孔出来，昼夜皆能出羽化，但以夜间为多。

② 补充营养：成虫羽化出来后寻找当年生嫩枝进行补充营养，昼夜取食。

③ 交配与产卵：多数成虫补充营养1-2天后开始进行交配，多以下午16点后交配次数增加，多次交配，多次产卵，产卵时成虫先咬一唇形刻槽，将卵产于刻槽，一刻槽

产一粒卵个别 2-5 粒，有的不产卵，且有群集刻槽产卵的习性，有时一棵树上有多个成虫刻槽产卵，喜产卵于生长衰弱树及裸露的粗根、伐桩等。单雌产卵量百余粒。

(iii)媒介昆虫在泰山的分布

松褐天牛主要存在于海拔 1100m 以下的油松和赤松林中，而在海拔 1100-1500m 的油松林中没有发现；褐幽天牛在油松和赤松林中广泛存在。通过 2005 年、2006 年在泰山景区进行媒介昆虫诱捕试验结果见表 3-7 和 3-8。

表 3-7 2005 年各管理区诱捕天牛成虫数量统计表

Table 3-7 Trapping number of insect vectors in Taishan different scenic area in 2005

位置 Location	诱捕器数量 (个) Trapping amounts	诱捕天数 (天) Trapping days	天牛总量 (头) Alternatus amounts	松褐天牛 (头) <i>Monochamus alternatus</i>	褐幽天牛 (头) <i>Arthropalus rusticus</i>	天牛均量 (头/日/台) Average amounts
天烛峰	8	27	338	14	321	1.55
红门	5	26	226	12	214	1.74
南天门	5	27	47	0	144	1.07
中天门	6	26	121	1	120	0.78
竹林	2	26	35	2	33	0.67
玉泉寺	4	26	36	24	12	0.35
桃花峪	9	26	22	0	22	0.094
合计	39	184	919	53	866	0.128

表 3-8 2006 年各管理区诱捕天牛成虫数量统计表

Table 3-8 Trapping number of insect vectors in Taishan different scenic area in 2006

位置 Location	诱捕器数量 (个) Trapping amounts	诱捕天数 (天) Trapping days	天牛总量 (头) Alternatus amounts	松褐天牛 (头) <i>Monochamus alternatus</i>	褐幽天牛 (头) <i>Arthropalus rusticus</i>	天牛均量 (头/日/台) Average amounts
天烛峰	6	79	470	49	421	0.99
红门	8	54	347	218	129	0.80
南天门	11	58	346	0	346	0.54
中天门	6	57	242	141	102	0.71
竹林	6	82	236	66	170	0.48
玉泉寺	6	53	133	83	50	0.42
桃花峪	11	72	573	374	199	0.72
合计	54	455	2348	931	1417	0.096

表 3-7 和表 3-8 表明：在不同海拔高度的试验林分中，诱捕到的天牛成虫种类和数

量也不相同：褐幽天牛在不同海拔林区的试验林分中广泛存在，并且以中海拔高度的林分居多，其中红门林区诱捕量最大，其次是天烛峰和中天门；接着是低海拔高度的林分即竹林寺、桃花峪林区；最后是中海拔的玉泉寺。而松褐天牛仅在中、低海拔的油松、赤松林中存在，诱捕量以红门和桃花峪最多；接着依次是中天门，玉泉寺，竹林；但在高海拔的南天门林区的油松试验林中没有诱捕到松褐天牛，继续对天牛在不同景区的数量变动规律进行调查，试验结果见图 3-4。

图 3-4 表明：海拔不同的桃花峪、天烛峰和南天门等 3 个林区的天牛成虫出现的盛期是有差别的：低海拔的桃花峪林区天牛成虫高峰期是在 6 月 19 日—7 月 2 日；处在中海拔的天烛峰林区，其峰值的出现日期在 7 月 1 日—7 月 13 日；而高海拔的南天门林区，其高峰期则在 7 月 18 日—8 月 3 日。由此可见，高峰期的不同与试验林区的海拔高度有密切关系：即随着海拔高度的增高，与天牛的峰值相对应的日期也随着后延。这为确定不同林区的天牛成虫的最佳防治时间提供了有力的科学依据。

松材线虫病的发生和气候条件密切相关。温度和降雨量直接影响松材线虫病的爆发情况，适宜的温度和降雨量将更适合松材线虫和媒介昆虫的生长繁殖。

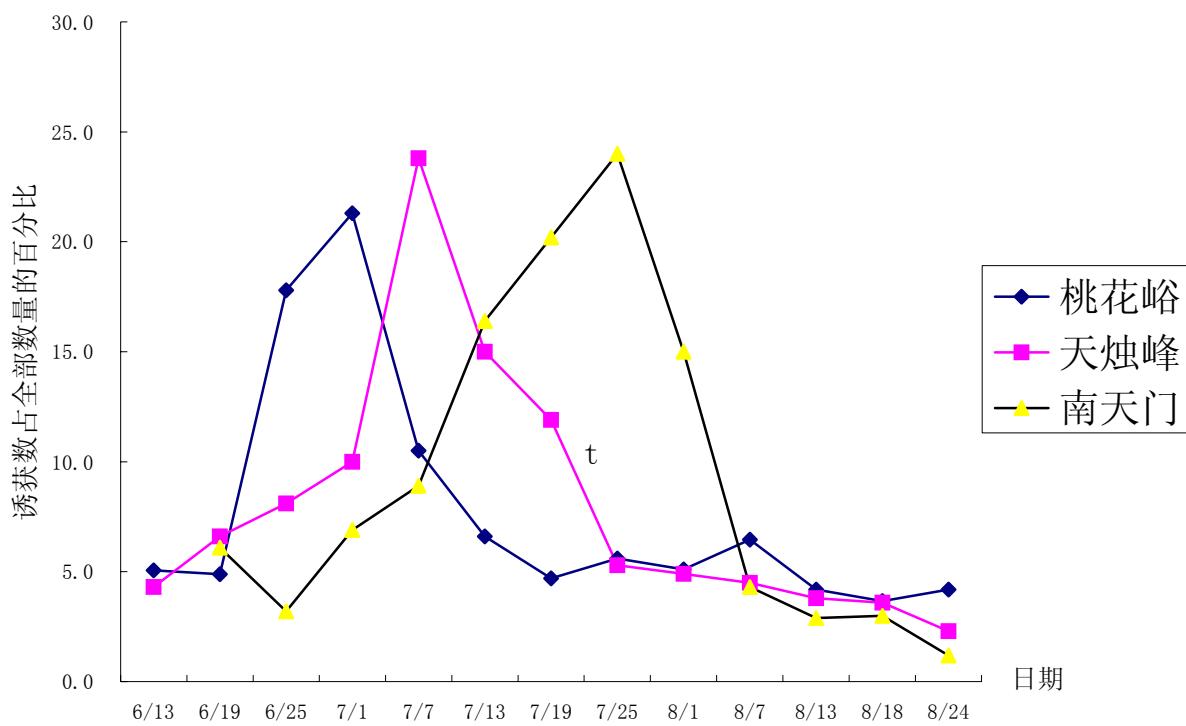


图3-4 桃花峪、天烛峰、南天门诱获天牛成虫数量变化曲线图
 Fig. 3-4 longbeetle adult quantity by inducing in Tao huayu, Tianzhufeng and Nan tian men zone

(3) 气候条件

由于上述定殖可能性分析中显示松材线虫不可能在高海拔地区生存（700米以上），因此，危害度分析中以54827台站数据为参考，进行低海拔地区的危害度相关影响因子的分析和评估。

(i) 2001-2009 年间泰山景区月均降雨量和 6-8 月降雨量分析

降雨量对松材线虫病的发生有着重要的影响。持续的干旱可以扩大松材线虫病的发生和危害。泰山景区2001-2009年54827台站每月降雨量见表3-9和图3-5。

表3-9和图3-5表明，泰山景区2001-2009年降雨量在288.0-1057.2mm之间，平均729.8mm；6-8月份降雨量在143.7-818.1mm，平均值为496.5mm。2001-2009年泰山6-8月份降雨量情况见附件3和图3-5。

表3-9 2001-2009年泰山风景区54827台站各月降雨量（mm）
Table 3-9 Month rainfall in Mount. Tai in 54827 station, 2001-2009 (mm)

年份 Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	35	3.6	4.9	1.3	0	4.7	0.1	4	9.7
2	22.6	0	4.7	24.3	14	7.8	2.1	4.8	12.1
3	3.2	3	25.5	1.5	0.5	0	46.7	17.7	25.7
4	13.2	21.3	113	14.7	51	23.5	14.7	57.7	45.2
5	0.1	83.8	33.3	51.4	95.2	77	113.2	44.7	42.8
6	138.2	46.6	32.9	138.8	103.9	130.5	73	24.8	71.3
7	198.1	72.3	257.7	320.1	264.9	109.1	235.8	273.3	239.4
8	125.2	24.8	164.9	317.9	184.9	143.9	179.2	107.6	131.2
9	16.6	20.3	204.7	126.9	189.4	56.4	33.6	67.3	34.9
10	8	7.4	110.9	10.4	69.6	5.3	38.3	20.4	12.9
11	5	0	62.2	27.2	5.4	13.2	12.4	4.9	21.3
12	8.9	10.8	12.1	4	3.8	10.4	16.5	0.3	6.2
合计	574.1	288.0	1057.2	1038.5	982.6	581.9	765.6	627.5	652.7
均值						729.8			

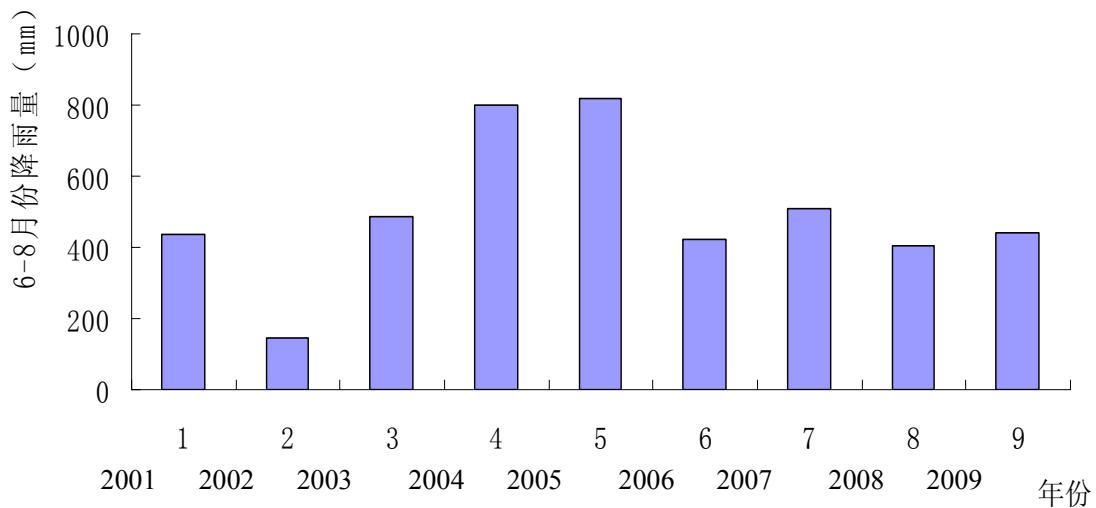


图 3-5 2001-2009 年泰山景区 6-8 月降雨量情况图

Fig.3-5 6-8 monthly rainfall in Mount. Tai, 2001-2009

(ii) 2001-2009 年间泰山景区月均温度和 6-8 月温度情况分析

温度的变化直接决定着松材线虫与媒介昆虫的活动情况，与灾害发生有密切联系。丁德贵（2006）研究表明，年均温度高于 14℃，夏季温度高于 25℃时，松材线虫病可能造成的危害最大。

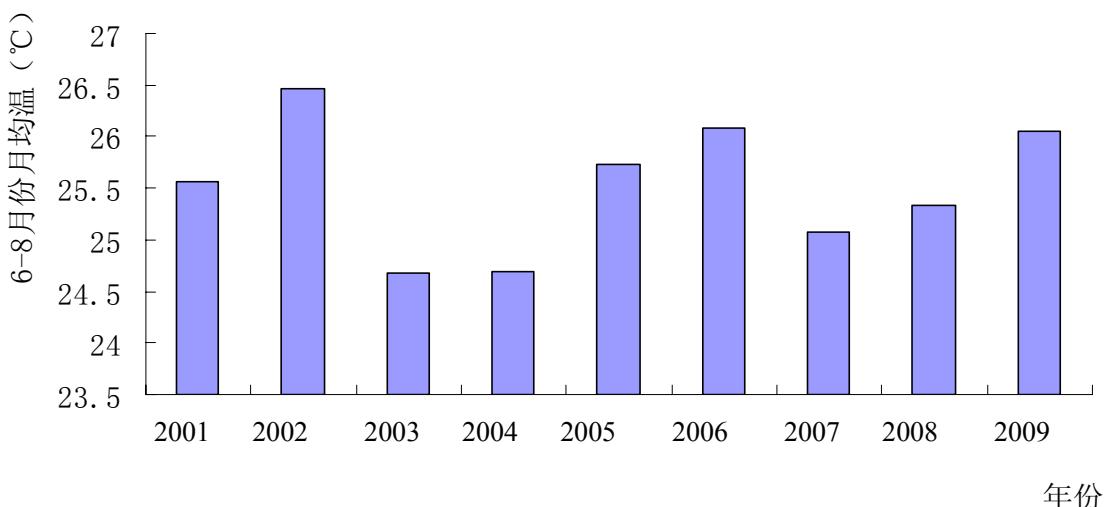


图 3-6 2001-2009 年泰山景区 6-8 月份 54827 台站月平均气温图

Fig.3-6 6-8 monthly average temperature in 54827 station of Mount. Tai, 2001-2009

表 3-10 2001-2009 年泰山景区 54827 台站月气温 (°C) 变化表

Table 3-10 Monthly temperature (°C) 54827 station in Mount Taishan, 2001-2009

年	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009	
月	MaxT	MinT																
1	2.3	-4.2	8.0	-4.6	4.4	-7.1	4.6	-6.0	4.0	-7.0	5.0	-3.6	5.7	-6.1	2.6	-5.8	5	-8.1
2	6.7	-1.9	11.9	-1.1	8.4	-2.8	11.3	-1.6	-11.1	-4.8	6.0	-3.1	11.9	0.3	6.5	-5.7	9.7	0.6
3	14.8	2.0	17.2	3.8	12.7	2.8	14.4	3.8	12.8	-0.2	15.8	3.6	13.9	3.6	15.6	3.0	13.9	3.0
4	20.3	7.9	20.8	9.2	6.4	9.8	22.2	10.2	22.9	10.2	21.8	9.6	21.2	9.0	20.4	9.0	21.8	8.8
5	28.8	14.9	25.4	13.7	25.5	14.9	25.4	13.9	25.7	13.9	25.9	14.8	28.1	15.7	26.6	15.1	26.7	14.4
6	31.4	18.6	31.4	19.9	30.3	18.4	28.9	18.0	32.6	19.9	31.7	20.2	29.9	19.5	29.1	19.0	32.9	20.2
7	30.3	22.4	33.4	22.1	29.3	20.8	30.5	22.6	30.7	22.8	30.8	23.2	29.7	21.8	30	22.6	30.7	21.7
8	30.1	19.8	31.6	20.9	30.1	22.1	29.2	21.3	29.8	21.3	31.2	22.4	30.6	22.6	30	21.3	29.7	21.1
9	26.8	15.8	28.4	16.0	25.5	16.5	27.3	16.3	26.6	16.3	26.5	15.9	27.9	16.6	26.3	16.1	25.7	15.8
10	22.3	10.7	21.4	8.5	20.2	10.3	21.8	8.7	20.8	10.4	24.4	13.5	20.1	10.8	21.9	9.8	23.6	9.6
11	14.7	1.3	12.5	0.6	14.5	4.8	15.9	4.7	16.1	3.4	16.5	5.0	14.3	1.8	13.7	1.6	9.1	-0.2
12	4.5	-3.8	6.0	-2.3	5.9	-3.2	7.8	-1.0	5.5	-5.9	6.6	-3.2	7.6	-2.2	6.6	-4.8	4.9	-3.9
月均	14.98		14.23		13.28		13.82		13.22		14.31		14.05		13.77		14.03	
总均	13.97								13.97									

泰山景区 2001-2009 年 54827 台站每月的温度变化见表 3-10。

表 3-10 和图 3-6 表明，泰山景区 2001 年-2009 年间，低海拔地区（54827 台站）年平均气温变化范围为 13.22-14.98°C，平均值为 13.97°C；6-8 月份其月均温变化范围为 24.67-26.47°C，平均值为 25.52°C。

3.1.3.2 松材线虫入侵泰山风景区的危害度定量分析结果

将各因子定量分析结果及危害度分析标准输入@risk 软件并进行运算，其结果如下：

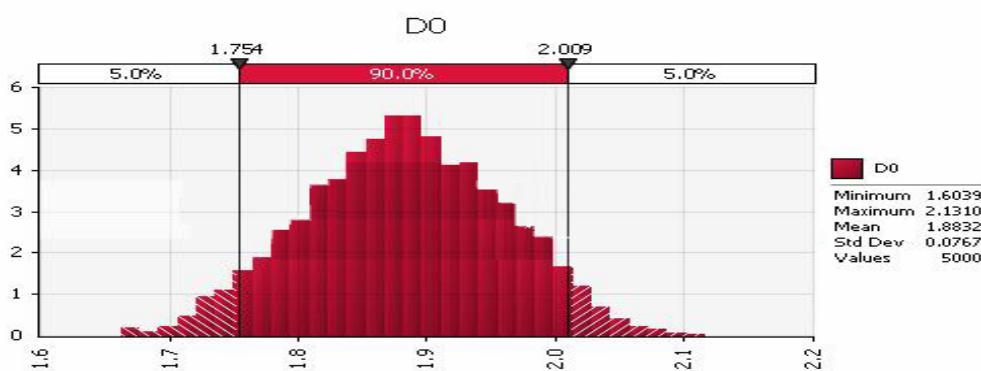


图 3-7 表明：在对松材线虫入侵低海拔地区（54827 台站）危害度评价中，有 90% 的区间在 1.754-2.009，期望值为 1.8832。

经过软件，进行进一步的运算分析，总结各因子对结果产生的贡献度大小如下：

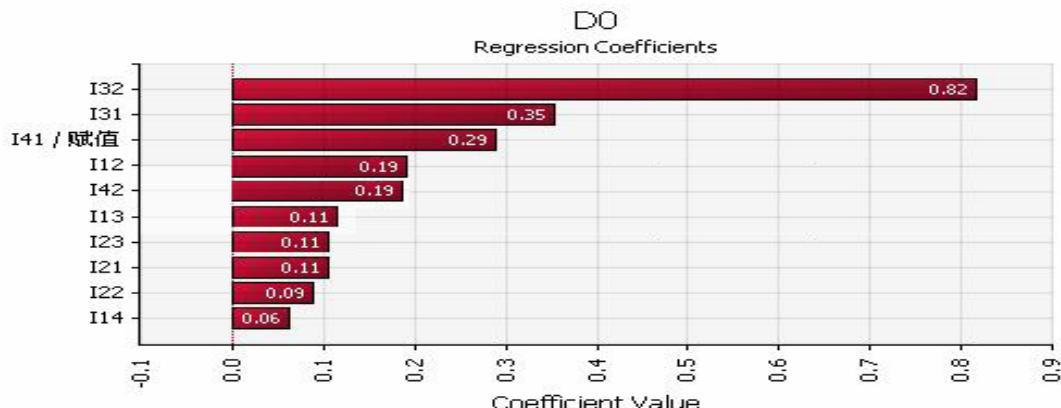


图 3-8 @risk 软件对松材线虫病入侵泰山景区危害度影响因子的敏感性分析

Fig.3-8 Sensitivity about damage degree influencing factors of *B.xylophilus* invading

图 3-8 表明：降雨量、温度对结果的贡献值较大，其次是媒介昆虫的生活史和种群密度。其主要原因是泰山地区年降雨量较小，松材线虫病的发生与降雨量呈负相关，干旱有利于病害的流行，而温度的高低直接影响了线虫的繁殖，该区域温度又恰适于松材线虫的生长。

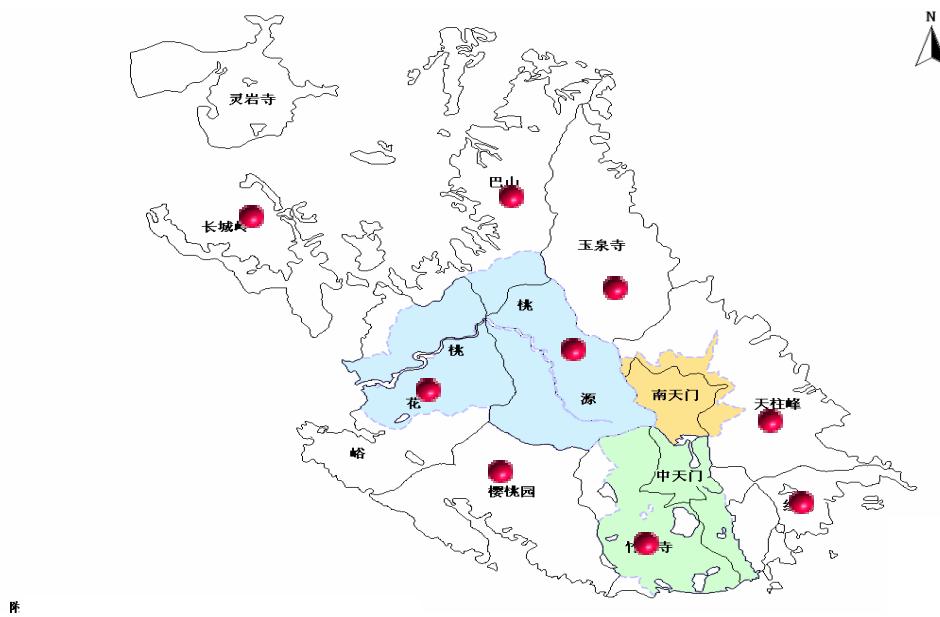


图 3-9 松材线虫在泰山不同海拔适宜发生范围分布图

Fig.3-9 Different Range of *B.xylophilus* on Mt. Tai

汇总泰山景区感病寄主的分布、媒介昆虫的分布和气候因子进行叠加，可以发现低

海拔地区的天烛峰、巴山、桃花峪、玉泉寺、桃花源、竹林寺、樱桃园和长城岭等风景区为松材线虫病最易发生的区域，应重点进行监控这些地区(图 3—9)。

3.1.4 松材线虫病入侵泰山风景区的风险性评估

在松材线虫病入侵泰山风景区可能性和危害度的分析基础上，对该病害入侵泰山风景区的风险性进行评估。

3.1.4.1 高海拔地区的松材线虫病入侵风险性评估

由于对于高海拔地区 54826 台站（海拔 1533.7 米），由于松材线虫入侵的可能性分析结果为不能生存，因此该地区的风险性评估结果为无风险。

3.1.4.2 低海拔地区的松材线虫病入侵风险性评估

下面是对低海拔地区 54827 台站（海拔 1533.7 米）的松材线虫入侵风险性评估。

根据我国《进出境植物和植物产品有害生物风险分析技术要求》（SN/T 16011-2005 中的风险事件的可能性定性评估和风险评价方法，利用合并描述可能性规则的矩阵和风险评价矩阵对松材线虫入侵泰山风景区的风险性进行评价。

(1) 可能性评价

从表 3-11 可能性分析中可以得出，松材线虫通过人为途径传入泰山风景区的可能性为高度，松材线虫在低海拔地区定殖的可能性为高度。根据合并描述可能性规则的矩阵，得出松材线虫入侵泰山风景区在低海拔地区的可能性为高。

表 3-11 合并描述可能性规则的矩阵
Table 3-11 Rule of probability merger

		传入可能性				
		Invading possibility				
定 殖 可 能 性	高	中	低	很低	极低	
	高	High	Middle	low	Small low	Very low
	中	中		低	很低	极低
	低	低		低	很低	极低
	很低				极低	极低
	极低					极低

3.4.2.2 风险性评价

结果见表 3-12。

表 3-12 风险评价矩阵
Table 3-12 Risk evaluation matrix

		入境、定殖和扩散的后果 Consequence of invasion, colonization and proliferation				
		极低 Very low	很低 Small low	低 Low	中 Middle	高 High
入境 定殖 扩散 的可能性	极低	极低的风险	极低的风险	极低的风险	极低的风险	很低的风险
	很低	极低的风险	极低的风险	极低的风险	很低的风险	低风险
	低	极低的风险	极低的风险	很低的风险	低风险	中风险
	中	极低的风险	很低的风险	低风险	中风险	高风险
	高	极低的风险	很低的风险	低风险	中风险	高风险

从上述危害度分析中可以得出松材线虫对泰山风景区低海拔地区的危害为中度危害，结合可能性评价，根据风险评价矩阵，可以得出松材线虫病入侵泰山的风险性属于高度风险。

3.1.5 不同松褐天牛引诱方法对松材线虫病预警技术研究

不同引诱方法的引诱效果见表 3-13，并进行方差分析，结果见表 3-14

表 3-13 和表 3-14 表明，不同的引诱方法诱捕的松褐天牛数量之间有显著性差异，为比较两两之间的差异，进一步进行了多重比较，结果见表 3-15。

通过以上多重比较分析，引诱剂活力木法（1）和假植木法（2）差异不显著；而引诱剂活立木法（1）和假植木法（2）分别对引诱剂假植木法（3）差异显著，可见，引诱剂假植木法（3）引诱松褐天牛效果最好，该方法可以较彻底的消灭虫源，使大量的松树免遭死亡的威胁，减少了下代松褐天牛的危害。利用假植木法（2）虽不如引诱剂假植木法（3）的方法引诱效果好，但经“t”检验，防治效果达 70% 以上，无污染，省工省力绿色环保，而且能节省引诱剂，只要有间伐任务，就可以在 4-6 月份设置饵木，据当地气候特点，成虫产卵末期以后，将饵木水泡或在安全的地方烧掉即可，该两种方法可以用于松材线虫媒介昆虫的监测和病害预警具体技术中。

通过诱集和除治松材线虫病的媒介昆虫，可以有效地减低媒介昆虫的数量。引诱剂假植木法是一种有效的引诱松褐天牛的方法。可以较彻底的消灭虫源，使大量的松树

免遭死亡的威胁，减少了下代松褐天牛的危害。

表 3-13 不同引诱方法引诱松褐天牛成虫产卵孵化的幼虫量比较

Table 3-13. The comparison adult producing eggs and hatch larva quantity between different attract methods for *Monochamus alternatus*

引诱方法 Trapping method	木质部幼虫数量 Larva amounts in xylem						T_i	X_i
	34	46	52	48	63	243		
(1) 引诱剂活力木法	34	46	52	48	63	243	48.6	
(2) 假植木法	60	36	38	45	50	229	45.8	
(3) 引诱剂假植木法	93	82	92	85	86	438	87.6	
(4) 活立木法	0	0	0	0	0	0	0	
(5) 枯立木法	0	0	0	0	0	0	0	
合计						910	36.4	

表 3-14 不同引诱方法对松褐天牛诱虫量的方差分析

Table 3-14 Analysis of variance of attract insects quantity between different attract methods for *Monochamus alternatus*

变异来源 source of variation	自由度 Degrees of freedom	平方和 (ss) Sum of squares	均方 Mean square	F
组间	4	27542.8	6885.7	$F_{0.05}=2.87$
组内 (误差)	20	905.2	45.26	$F_{0.10}=4.43$
	24	28448		

表 3-15 不同引诱方法诱虫量的多重比较

Table 3-15 Multicomparsion of attract insects quantity between different attract methods

组间 Groups	平均虫口 Average population	X_i-X_4	X_i-X_3	X_i-X_2
X_1	87.6	87.6**	41.8*	39**
X_2	48.6	48.6**	2.8	
X_3	45.8	45.8**		
X_4	0			
X_5	0			

3.2 美国白蛾对泰山风景区的风险分析与评估

3.2.1 美国白蛾传入泰山风景区的可能性分析

美国白蛾传入泰山风景区的可能性分析主要包括人为传入和自然传播的可能性分析两个方面。

李淑贤等(2009)等基于GARP生态位模型及信息扩散理论研究认为,美国白蛾在中国的适生区分布范围:21.20°N-46.33°N,97.80°E-132.11°E和36.81°N-41.8°S,76.00°E-94.66°E(新疆的部分地区),泰山风景区位于东经116°58'-117°10',北纬36°12'-36°22',位于中国美国白蛾的适生区。

泰山景区存在美国白蛾入侵的必然因素。泰山风景区车辆、游客、消费物品流动性大;周边地区景点、苗圃花卉众多;交通四通八达,山城一体,景区与泰安市仅一条环山路之隔(见图3-9);景观相融,植物资源相互交错;与目前美国白蛾发生严重的周边疫区接壤面积大,与疫区人员来往、苗木贸易、物资交流极为频繁;美国白蛾幼虫耐饥饿能力特别强,最多达到10天;冬季化蛹期长,能长达5个月“不吃不喝”,且在树皮缝、泥土及杂草丛荫蔽生存;成虫有很强的趋光性,能随着车、船做中等距离的迁移和长时间的旅行。这些为美国白蛾人为携带传播到泰山景区创造了必然条件。因此,美国白蛾人为传播入泰山景区的可能性很大。



图3-9 泰山景区与泰安市的地理位置关系图

Fig.3-9 The relationship of Mount. Tai areas and Taian city Location

(注: 其中红色线表示景区与市区的分界)

美国白蛾自然传播主要依靠成虫飞翔和老熟幼虫爬行，成虫一次飞翔距离在 100m 以内，同时美国白蛾具有极易繁殖定居和种群繁衍速度快的特点，据本研究 08-10 年调查，泰山风景区美国白蛾疫点主要在景区沿环山路地带，呈零星、点状发生，主要涉及到泰山区、岱岳区、园林局、济南市长清、历城区、88 医院和泰山林科院等六个区域，尽管没有成片发生，但这些区域与泰城和景区相连，而城区美国白蛾严重发生，极易使美国白蛾通过自身的飞翔而到达景区并扩展蔓延。

从上述分析可以看出，美国白蛾可以通过自然传播和人为传播等多种途径入侵泰山风景区，且目前已在泰山景区周围发生和定殖。因此，美国白蛾入侵泰山风景区的可能性极大，如果不及时采取措施，发生是必然的，防控美国白蛾的对泰山景区的危害，保护泰山珍贵的景观资源和保障生态安全，形势非常严峻。

3.2.2 美国白蛾定植泰山风景区的可能性分析

美国白蛾定植泰山风景区的可能性主要与风景区的温度、湿度，降雨量、光照和寄主密切相关，根据美国白蛾的生态学特性：平均温度 23-25℃、相对湿度 75%-80%，最适于卵的发育；平均温度 24-26℃、相对湿度 70%-80%，最适于幼虫发育；温度过高或过低均不利于美国白蛾发育，高温对美国白蛾发育有利。

3.2.2.1 美国白蛾定植泰山风景区的温度降雨量分析

通过对泰山风景区不同海拔的不同年份的温度、6-8月份温度、年降雨量和6-8月份的降雨量进行统计，泰山低海拔地区（126.8米）的年均温、6-8月份均温、年降雨量和6-8月份降雨量等结果见第二部分表3-10和图3-6，高海拔地区的(1553.0米)的上述气象因子数据见下表3-16。

表3-16 泰山景区高海拔（54826台站）地区2001-2009年年均温、降雨量和6-8月均温和降雨量

Table 3-16 Average temperatures and rainfalls for every year and 6-8months in 2001-2009

年份 Years	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	均值 Mean
01-09 年均温(℃)	6.15	6.63	5.80	6.37	5.81	6.88	6.85	6.05	6.54	6.34
01-09 年 6-8 月均温(℃)	17.4	17.3	16.3	16.5	17.5	17.8	17.3	16.6	17.6	17.1
01-09 年 降雨量 (mm)	772.8	628.6	1581	1588.3	1342	990.5	1004	1013.3	976.6	1099.7
01-09 年 6-8 月 降雨量 (mm)	566.1	321.3	684.8	1243.0	715.4	488	630.1	611.1	653.1	657.0

表3-16表明，泰山高海拔地区（54826台站）年均温在5.80- 6.88℃之间，平均值为6.34℃，温度较低，但6-8月均温在16.3- 17.8 ℃之间，均值为17.1℃左右，年降雨量在628.6-15 88.0mm之间，均值为1099.7mm，6-8月份降雨量在321.3-1243mm，平均值在657.0mm；低海拔地区（54827台站）年平均气温变化范围为13.22-14.98℃，平均值为13.97℃，6-8月份其月均温在24.67-26.47℃之间，平均值为25.52℃。年均降雨量在288.0-1057.2 mm 之间，平均730.5mm；6-8月份降雨量在143.7-818.1mm，平均值为496.5mm。

3.2.2.2 美国白蛾定殖泰山风景区的湿度分析

汇总泰山景区不同海拔2001-2009年每月湿度数据，将湿度>70%的月份进行统计，结果见表3-17。

表3-17表明，（1）高海拔地区的湿度明显高于低海拔地区；（2）每年湿度比较大的月份主要集中在6-9月份；（3）高海拔地区有时1月份或10月份的湿度也很高。

汇总表3-10、图3-6、表3-16和表3-17可以得出以下结论：低海拔地区温度、降雨量和湿度在6-8月均可满足美国白蛾卵和幼虫的生长发育，高海拔地区的美国白蛾生长发育会慢一些，除温度较低外，其它光照和寄主等因素均满足美国白蛾的生长和发育。

从美国白蛾生长发育所需的温度、降雨量、湿度等因素可以看出，泰山风景区的生态环境条件完全适合美国白蛾的定殖，因此，美国白蛾一旦入侵泰山，就可以快速定殖并繁衍。

表3-17 泰山景区不同海拔湿度表

Tab 3-17. Humidity in different elevation in Mount.Tai

54826 高海拔 (1553.0 米)			54827 低海拔 (126.8 米)		
54826 high elevation(1553.0m)			54827 low elevation(126.8m)		
年份 Years	月份 Month	湿度% Humidity level	年份 Years	月份 Month	湿度% Humidity level
2001	6	72.77	2001	1	71.61
2001	7	81.26	2001	2	74.25
2001	8	81.58	2001	7	80.10
2001	9	73.60	2001	8	78.52
2002	6	72.53	2001	9	72.07
2002	7	80.39	2002	7	71.13
2002	8	85.55	2002	8	77.90
2002	9	72.67	2002	9	74.93
2003	5	74.16	2002	12	71.45
2003	6	71.03	2003	7	81.87
2003	7	87.94	2003	8	82.42
2003	8	88.23	2003	9	80.40
2003	9	81.77	2003	10	70.39
2004	6	78.00	2004	6	70.73
2004	7	90.81	2004	7	82.94
2004	8	87.81	2004	8	82.74
2004	9	72.90	2004	9	74.83
2005	7	84.68	2004	11	70.33
2005	8	89.97	2005	7	76.71
2005	9	81.10	2005	8	73.32
2006	7	86.90	2005	9	72.07
2006	8	87.94	2006	7	79.81
2006	9	72.93	2006	8	80.74
2007	6	72.17	2006	9	73.67
2007	7	81.97	2006	10	73.45
2007	8	92.29	2007	7	79.94
2007	9	76.40	2007	8	83.03
2008	6	78.43	2007	9	75.67
2008	7	88.81	2007	10	72.00
2008	8	84.45	2008	7	82.71
2008	9	72.03	2008	8	79.52
2009	7	77.97	2008	9	76.27
2009	8	81.00	2008	10	72.68
2009	9	72.13	2009	7	76.26
			2009	8	79.32

3.2.3 美国白蛾入侵泰山风景区的危害度评估

美国白蛾入侵泰山风景区的危害度评估研究首先将风险性评估体系中危害度评估的影响因子进行定性分析，然后进行危害度评估。影响美国白蛾发生和危害的主要影响因子为主要寄主树种的种类、分布、价值及美国白蛾在泰山景区自身的生物学、生态学及环境条件是否满足种群的定殖、繁衍和危害的条件。

3.2.3.1 泰山风景区美国白蛾的主要寄主调查

(1) 国内美国白蛾的寄主种类及喜食性树种

美国白蛾食性杂，国内文献记载的寄主种类不尽相同，但几乎包括发生区栽培的所有林木、果树、蔬菜、农作物、园林花卉以及杂草等，能够危害 175-300 多种农林植物及野生植物。主要寄主种类有糖槭 (*Acer saccharum*)、元宝槭 (*A. truncatum*)、法桐 (*Platanus orientalis*)、梧桐 (*Firmiana simplex*)、白蜡 (*Fraxinus chinensis*)、美国白蜡树 (*F. americana*)、桑树 (*Morus alba*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、香椿 (*Toona sinensis*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、国槐 (*Sophora japonica*)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、毛泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、花曲柳 (*Fraxinus rhynchophylla*)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、榆树 (*Ulmus pumila*)、紫丁香 (*Syringa oblata*)、连翘 (*Forsythia suspensa*)、杨属 (*Populus* spp.)、柳树 (*Salix* spp.) 及板栗 (*Castanea mollissima*)、山楂 (*Crataegus pinnatifida*)、樱桃 (*Cerasus pseudocerasus*)、桃 (*Prunus persica*)、柿 (*Diospyros kaki*)、核桃楸 (*Juglans mandshurica*)、枣树 (*Ziziphus jujuba*)、葡萄 (*Vitis vinifera*)、文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*)、李属 (*Prunus* spp.)、梨属 (*Pyrus* spp.)、苹果属 (*Malus* spp.)、樱花属 (*Prunus* spp.) 等多种阔叶和灌木林木和果树；高粱 (*Sorghum bicolor*)、玉米 (*Zea mays*)、大豆 (*Glycine max*)、花生 (*Arachis hypogaea*)、向日葵 (*Helianthus annuus*)、南瓜 (*Cucurbita moschata*)、葫芦 (*Lagenaria siceraria*)、黄瓜 (*Cucumis sativus*)、茄子 (*Solanum melongena*)、辣椒 (*Capsicum frutescens*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*)、番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 等农作物。其中主要嗜食树种有糖槭 (*Acer saccharum*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、桑树 (*Morus alba*)、悬铃木 (*Platanus orientalis*)、白蜡 (*Fraxinus chinensis*)、泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、榆树 (*Ulmus* spp.)、花曲柳 (*Fraxinus rhynchophylla*)、山楂 (*Crataegus pinnatifida*)、杏 (*Armeniaca vulgaris*)、英国梧桐 (*Platanus*

acerifolia)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、樱桃 (*Cerasus pseudocerasus*)、桃 (*Prunus persica*)、胡桃楸 (*Juglans mandshurica*)、苹果 (*Malus pumila*)、梨、(*Pyrus spp.*) 葡萄 (*Vitis vinifera*)、杨树(*Populus spp.*)、柳树(*Salix spp.*)等。

(2) 泰山风景区美国白蛾的主要寄主种类、分布和抗性调查研究

由于美国白蛾主要危害阔叶树、灌木或草本植物，因此，本部分通过实地调查和结合历史资料查阅，主要调查了泰山风景区主要阔叶树种、灌木、或林下草本植物的种类及在泰山风景区的生态地理分布。

(i)泰山风景区内主要寄主种类、分布

泰山风景区阔叶林主要包括麻栎林、刺槐林、元宝槭林、杂木林、果树林等5个群系，总面积3150hm²，占森林面积的33.2%。

麻栎林。其中栎林的组成树种主要有麻栎、栓皮栎，面积约1466.7hm²，占森林面积的15.5%。分布最高海拔为1000m，在800m以下生长最佳，黄岭、竹林寺、玉泉寺、巴山、桃花源、桃花峪、三阳观、烈士祠、小罗汉崖等处分布较多，常与松类、侧柏、刺槐、山槐等混生。栎林下灌木以荆条 (*Vitex negundo var. heterophylla*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、多花胡枝子 (*Lespedeza floribunda*)、小花扁担杆 (*Grewia biloba*) 为主，林下草本植物主要有野古草 (*Arundinella hirta*)、鹅观草 (*Roegneria kamoji*)、黄花蒿 (*Artemisia annua*)、小花鬼针草 (*Bidens parviflora*)、荩草 (*Arthraxon hispidus*)、中华小苦荬 (*Ixeridium chinense*)、低矮薹草 (*Carex humilis*)、看麦娘 (*Alopecurus aequalis*)、狗尾草 (*Herba Setariae*)、鸡眼草 (*Kummerowia striata*)、紫花地丁 (*Viola philippica*)、龙葵 (*Solanum nigrum*) 等。

刺槐林。面积约767.9hm²。在泰山上分布较广，除长城岭无、灵岩寺和樱桃园仅有少量外，其他林区都有较大面积分布。垂直分布可达1000m，但以500-900m最为集中，生长好，且多为过熟林。刺槐林纯林居多，也有与松、栎等树种混生。林下灌木极少，草本植物较多。阴坡草本植物多为一些喜湿性植物，路边青 (*Geum aleppicum*)、水杨梅 (*Geum aleppicum*)、龙芽草 (*Agrimonia pilosa*)、半夏 (*Pinellia ternate*)、鸭跖草 (*Commelina comm*)、丛枝蓼 (*Polygonum posumbum*)、求米草 (*Oplismenus undulatifolius*)、鹅肠菜 (*Endarachne binghamiae*) 牛繁缕 (*Malachium aquaticum*) 等；阳坡草本植物有臭草 (*Melica scabrosa*)、疏花野青茅 (*Deyeuxia arundinaceae var. laxiflora*)、橘草 (*Cymbopogon goeringii*)、鹅观草 (*Roegneria kamoji*)、低矮薹草 (*Carex*

humilis) 等。

元宝槭林。本群系面积209.5 hm², 主要分布于巴山、桃花峪、天烛峰、玉泉寺、红门和樱桃园。垂直分布于1000m以下。林下灌木以荆条 (*Vitex negundo var. heterophylla*)、三裂绣线菊 (*Spiraea trilobata*)、大花溲疏 (*Deutzia grandiflora*) 为主, 草本植物主要有大披针薹草 (*Carex lanceolata*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、野古草 (*Arundinella hirta*)、中华卷柏 (*Selaginella sinensis*) 等。

杂木林。总面积299.2 hm², 主要树种有毛白杨 (*Populus tomentosa*)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)、辽东桤木 (*Alnus sibirica*)、日本桤木 (*Alnus japonica*)、赤杨 (*A. japonica*)、山槐 (*Albizia kalkora*)、黄连木 (*Pistacia chinensis*)、黄檗 (*Phellodendron amurense*)、栾树 (*Koelreuteria paniculata*)、椴树 (*Tilia tuan*)、花曲柳 (*Fraxinus rhynchophylla*) 大叶白蜡树 (*Fraxinus rhynchophylla*) 等。主要分布于桃花峪、红门、竹林寺、桃花源、南天门、巴山、天烛峰、玉泉寺等林区。

果树林。总面积406.7hm², 组成树种主要有板栗 (*Castanea mollissima*)、胡桃 (*Juglans regia*)、苹果 (*Malus pumila*)、柿树 (*Diospyros kaki*)、野杏 (*Prunus armeniaca var. ansu*) 等。主要分布于桃花峪、天烛峰、竹林、玉泉寺、巴山、红门、桃花源、樱桃园等林区。

(ii) 泰山风景区周边地区美国白蛾主要寄主种类调查

见表3-18。

上述调查并结合国内目前美国白蛾主要寄主的种类来看, 泰山风景区主要阔叶林带麻栎林、刺槐林、元宝槭林、杂木林、果树林及周边地区的主要寄主植物大多为美国白蛾的喜食树种, 每一林带及周边环境中的灌木、草本也有部分为美国白蛾取食, 因此, 泰山风景区及其周边地区存在大量易受美国白蛾侵害的寄主树种。

表3-18 泰山风景区周边主要寄主树种

Table 3-18 The main host species in Mount.Tai zone

植物类别 Plant category	植物名称(以出现频率多少为顺序) Plant names	
常绿乔木	桧柏(<i>Sabina chinensis</i>)、侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>)、油松(<i>Pinus tabulaefermis</i>)、雪松(<i>Cedrus deodara</i>)、白皮松(<i>Pinus bungeana</i>)、云杉(<i>Picea asperata</i>)、赤松(<i>Pinus densiflora</i>)、黑松(<i>Pinus thunbergii</i>)	
常绿灌木	小叶黄杨(<i>Buxus sinica</i> var. <i>parvifolia</i>)、大叶黄杨(<i>Buxus megistophylla</i>)、沙地柏(<i>Sabina vulgaris</i>)	
落叶乔木	槐树(<i>Sophora japonica</i>)、垂柳(<i>Salix babylonica</i>)、白蜡(<i>Fraxinus chinensis Roxb.</i>)、臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、毛白杨(<i>Populus tomentosa</i>)、栾树(<i>Koelreuteria paniculata</i>)、银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)、悬铃木(<i>Platanus hispanica</i>)、泡桐(<i>Paulownia fortunei</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、玉兰(<i>Magnolia denudata</i>)	
落叶灌木	月季(<i>Rosa chinensis</i>)、珍珠梅(<i>Sorbaria sorbifolia</i>)、金银木(<i>Lonicera maackii</i>)、丁香(<i>Syringa spp.</i>)、木槿(<i>Hibiscus syriacus</i>)、连翘(<i>Forsythia suspensa</i>)、黄刺玫(<i>Rosa xanthina</i>)、榆叶梅(<i>Amygdalus triloba</i>)、蔷薇(<i>Rosa multiflora</i>)、海棠(<i>Malus spp.</i>)	
其他	地锦(<i>Parthenocissus quinquefolia</i>)、宿根花卉、草坪(野牛草)(<i>Buchloe dactyloides</i>)	

(iii) 泰山周边疫点地区美国白蛾危害的寄主种类及数量调查

自从2008年美国白蛾在泰安市出现以来，为预警泰山景区美国白蛾的受害情况，于2008、2009、2010年连续三年对泰山景区及其周边地区美国白蛾进行危害的寄主树种数量进行了调查，结果见表3-19。

表3-19 泰山周边疫点美国白蛾寄主种类及数量调查

Table 3-19 Investigation on the hosts and quality of American white moth in circumjacent infectious focus of Mt.Tai

序号 Number	寄主树种 Host	2008 Percentage	2009 Percentage	2010 Percentage	百分比 (%) Percentage	平均 (%) Average
1	杏树	60	18.7	10	10.2	14.5
2	核桃	52	16.2	17	17.4	20.3
3	樱桃	42	13.1	6	6.2	5.0
4	法桐	26	8.1	12	12.3	3.0
5	杨树	22	6.9	8	8.2	4.7
6	泡桐	16	5.0	7	7.1	6.2
7	榆树	13	4.1	7	7.1	2.4
8	枸树	11	3.5	4	4.1	1.0
9	樱花	10	3.2	3	3.1	10.5
10	桑树	9	2.8	7	7.1	6.0
11	臭椿	8	2.5	1	1.0	2.2
12	桃树	8	2.5	1	1.0	5
13	紫叶李	6	1.9	4	4.1	18
14	黄栌	5	1.6	1	1.0	4
15	山楂	3	0.9	1	1.0	11

16	枰柳	3	0.9	2	2.0	20	4.0	2.3
17	国槐	3	0.9			0		0.3
18	连翘	2	0.6			0		0.2
19	柿子	2	0.6			8	1.6	0.7
20	梨树	2	0.6			0		0.2
21	扁豆	2	0.6			1	0.2	0.3
22	麻栎	2	0.6			0		0.2
23	火炬树	1	0.3	1	1.0	0		0.4
24	紫薇	1	0.3			1	0.2	0.2
25	白蜡	1	0.3			6	1.2	0.5
26	青檀	1	0.3			0		0.1
27	花椒	1	0.3			1	0.2	0.2
28	苹果	1	0.3			3	0.6	0.3
29	李子树	1	0.3			1	0.2	0.2
30	板栗	1	0.3			9	1.8	0.7
31	软枣树	1	0.3			2	0.4	0.2
32	丁香	1	0.3			0		0.1
33	红栌	1	0.3			0		0.1
34	辽东櫟	1	0.3			0		0.1
35	荆条	1	0.3			1	0.2	0.2
36	芝麻	1	0.3			0		0.1
37	刺槐			1	1.0	10	2.0	1.0
38	紫荆			1	1.0	1	0.2	0.4
39	栾树			4	4.1	0		1.3
40	柳树					3	0.6	0.2
41	榆叶梅					2	0.4	0.1
42	石榴					2	0.4	0.1
43	野葡萄					1	0.2	0.07
44	葡萄					1	0.2	0.07
45	杜仲					1	0.2	0.07
46	龙爪槐					1	0.2	0.07
47	女贞					1	0.2	0.07
48	木槿					1	0.2	0.07
49	无花果					1	0.2	0.07
50	茶树					1	0.2	0.07
51	海棠					1	0.2	0.07
52	北瓜					1	0.2	0.07
53	三叶草					2	0.4	0.1
	合计	321	100	98	100	502	100	100

由表 3-19 分别按照年度转换成饼图表 3-10、3-11、3-12，具体示意图如下：

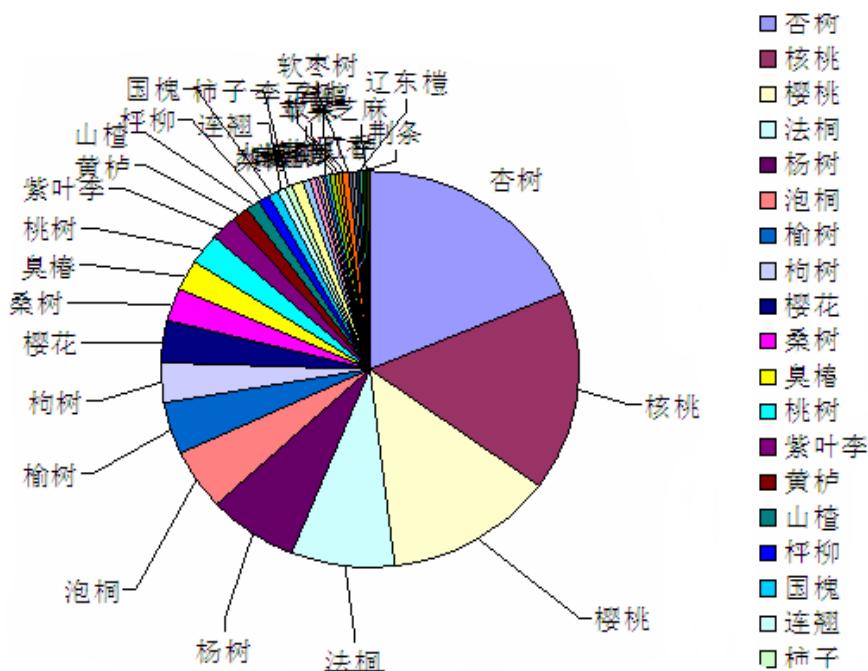


图 3-10 2008 年美国白蛾寄主树种数量百分比图

Fig.3-10 The percent of hosts trees of American white moth in 2008

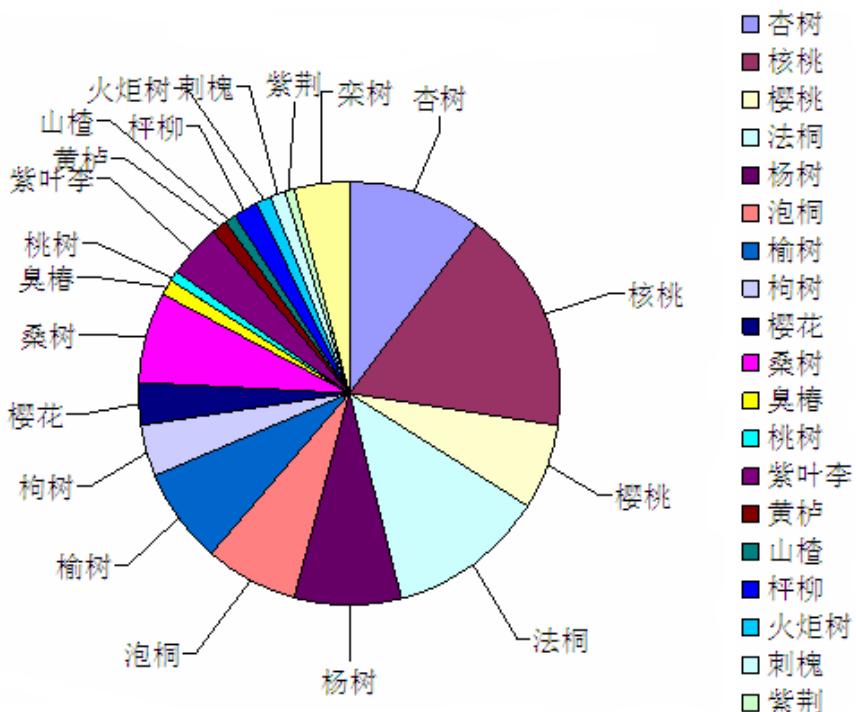


图 3-11 2009 年美国白蛾寄主树种数量百分比图

Fig.3-11 The percent of hosts trees of American white moth in 2009

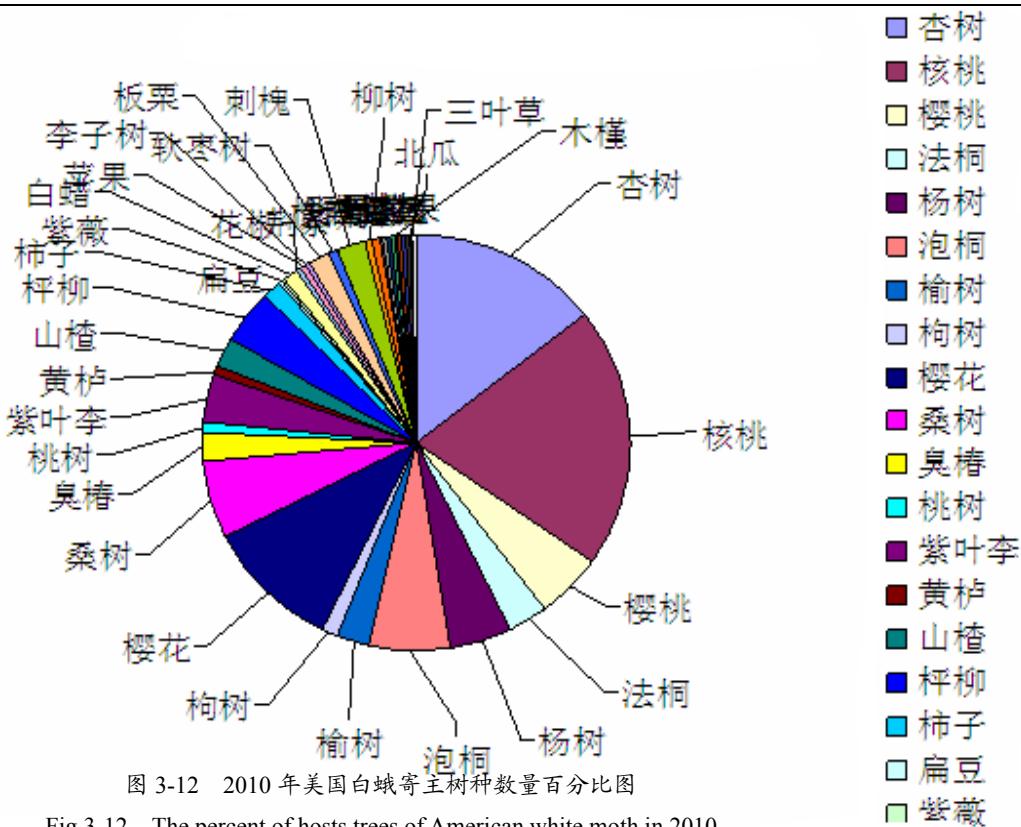


图 3-12 2010 年美国白蛾寄主树种数量百分比图

Fig.3-12 The percent of hosts trees of American white moth in 2010

以上图表表明，美国白蛾对泰山景区周边地区的寄主危害种类是广泛的，发现共有 53 个树种，921 棵阔叶树受到美国白蛾的危害。这些寄主也均属于目前国内报道的寄主种类范围内，但危害程度有差异。杏树、核桃、樱桃、法桐、杨树、泡桐、榆树、樱花、桑树、臭椿、桃树、紫叶李、黄栌、山楂、枰柳等 16 种树种数量占了全部树种数量的大部分，2008 年为 88.4%，2009 年为 88.8%，2010 年为 86.4%，它们是美国白蛾在泰山景区周围最为喜欢的阔叶树树种。从单一喜食树种来说，核桃数量最多，占 16-20% 左右，平均 18%；杏次之，占 10-18% 左右，平均 14.5%。其余树种数量百分比都低于 10%，依次为樱桃、法桐、杨树、泡桐、樱花、桑树、榆树、紫叶李、构树、枰柳、臭椿、桃树、山楂、黄栌。这些寄主除了乔木树种外，还有灌木（如荆条、构树、野葡萄等）、农作物（北瓜）以及草本植物（三叶草）。因此，美国白蛾对泰山的威胁是巨大的，除了纯阔叶林以外，针叶林的危险也不容小视，因为针叶林内生长着茂密的灌草植物，这些植物也能成为美国白蛾繁殖扩散的基地，一旦美国白蛾侵入泰山腹地，将给防控工作带来极大的难度。

从表 3-19 还表明，美国白蛾 2008 年的危害明显高于 2009 年，2010 年又发生猖獗，这是因为 2008 年美国白蛾刚刚在泰安出现，森防人员还没有充分的防控经验，2009 年由于全民重视、联防联治，特别是济南提出实现绿色全运会的目标，采用系列有效的防控措

施，使美国白蛾的虫口密度大大降低，为泰山提供了一个有利的外围环境。2010年，由于泰山周边县市扩散迅速，使得泰山防控美国白蛾的压力加大，从而虫口出现上升趋势。

3.2.3.2 美国白蛾的生物学特性

采用野外调查和封闭网室内人工喂养相结合的方法研究表明：美国白蛾在泰山低海拔区330米（泰山森防站）以下一年发生3代，以蛹越冬。次年4月下旬至5月上旬越冬代成虫羽化、产卵，幼虫5月中旬开始危害，6月上旬为盛期，延续至6月中旬，老熟幼虫从树上向下爬行至隐蔽场所化蛹，多集中在寄主树干老皮下的缝隙内，部分在树冠下的杂草枯枝落叶层中、石块下或土壤表层内。7月上旬当年第1代成虫出现，成虫期至7月下旬。第2代幼虫7月中下旬发生，7月下旬为盛期，8月份出现世代重叠现象。8月中旬当年第2代成虫开始羽化，第3代幼虫从9月上旬开始危害至10月中旬，10月上旬第3代幼虫陆续化蛹越冬。越冬蛹多在树皮缝、土石块下，房屋缝隙等处。越冬蛹期一直持续到次年4月，呈现出“一代少，二代多，三代猖獗”的特点，经调查，一只雌蛾一次可产卵600-800粒，最多可以达到1900粒。即使按照保守的600粒、存活60%计算，一年要繁殖三代，这意味着一只雌蛾一年要繁殖出3000万只后代，最多则会达到2亿只。因此，从美国白蛾生物学特性研究可以看出，美国白蛾一旦定殖于泰山景区，对泰山风景区的危害将非常严重。

3.2.3.3 气象条件

美国白蛾发生与危害与环境条件密切关系，参考金瑞华等（1991）美国白蛾适生性评价指标进行适生性等级划分，见表3-20。

表 3-20 美国白蛾适生性等级划分
Table 3-20 The suitability grade of American white moth

可能生存区级别 Possible survival district level	一级 Grade one	二级 Grade two	三级 Grade three	四级 Grade four
一年内日平均气温>15℃连续天数 (d)	>121 (一般 121-180)	91-120	81-90	60-80
7月平均气温 (℃)	>21.1 (一般 21.1-28)	19.1-21.0	18.1-19.0	17.0-18.0
1月平均气温 (℃)	4-8	-4--8	-4--16	-4--25
有效积温 (>10℃) (日度)	>4200 (一般 4200-4600)	1600-2300	900-1500	800-900
6月光照 (小时)	>14	>14	<14	<14
8月光照 (小时)	>14	<14	----	----
9月光照 (小时)	<14	----	----	----
一年内可能发生的世代数	2-3 代 (或>3 代)	1-2 代	1 代 (可以安全越冬)	1 代 (不能越冬)

(1) 泰山风景区一年内日平均气温>15℃连续天数调查

参考泰安市气象局不同海拔台站的气象数据，对泰山 2001-2009 年每日的温度进行统计，泰山风景区不同台站 2001-2009 年一年内日平均气温>15℃连续天数调查结果见表 3-21。

表 3-21 表明，低海拔地区（126.8 米）2001-2009 年一年内日平均气温>15℃连续天数在 156-200 天之间，平均 178 天，远远大于 121 天，也超过了 180 天，即使在海拔 926.8 米，其日平均气温>15℃连续天数可推算出其平均值在 128 天，大于 121 天，均处于表 3-20 中的第一级别，最高海拔地区（1553.0 米）在 56-101 天之间，平均为 84 天，也处于表 3-20 第三级别和第四级别之间。

表 3-21 2001-2009 年不同海拔一年内日平均气温 $>15^{\circ}\text{C}$ 连续天数调查表Table 3-21 The daily average temperature above 15°C continuous days investigation in different elevation from 2001-2009

海拔 (米) Elevation	时间 (年) Times									均值 Mean
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
126.8	186	171	169	156	183	183	173	180	200	178
326.8	167	163	146	168	162	181	172	170	189	169
526.8	151	140	145	148	161	176	155	162	171	157
626.8	151	140	143	138	149	175	148	159	164	152
726.8	140	124	143	148	131	160	154	152	151	145
926.8	131	121	128	124	122	126	127	139	133	128
1553.0	92	89	73	56	77	88	86	101	98	84

(2) 泰山风景区 1 月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$) 和 7 月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$) 的调查

表3-22不同海拔2001-2009年1月份平均温度及总均值

Table 3-22 The average temperature and total temperature mean value in January from different elevation during 2001-2009 years

海拔 (米) Elevation	时间 (年) Times									均值 Mean
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
126.8	-1.15	1.16	-2.1	-1.38	-2.15	0.02	-0.13	-1.6	-1.55	-0.99
326.8	-2.35	-0.04	-3.3	-2.58	-3.35	-1.18	-1.33	-2.8	-2.75	-2.19
526.8	-3.55	-1.24	-4.5	-3.78	-4.55	-2.38	-2.53	-4.0	-3.95	-3.39
626.8	-4.15	-1.84	-5.1	-4.38	-5.15	-2.98	-3.13	-4.6	-4.55	-3.99
726.8	-4.75	-2.44	-5.7	-4.98	-5.75	-3.58	-3.73	-5.2	-5.15	-4.59
926.8	-5.95	-3.64	-6.9	-6.18	-6.95	-4.78	-4.93	-6.4	-6.35	-5.79
1553.0	-7.8	-3.97	-7.61	-7.78	-8.68	-5.86	-6.32	-8.7	-9.10	-7.31

通过计算泰山不同海拔 1 月份和 7 月份气温数据，其平均数据见表 3-22 和 3-23。

表3-23 不同海拔2001-2009年7月份平均温度及总均值

Table 3-23 The average temperature and total temperature mean value in January from different elevation during 2001-2009

海拔 (米)	Times	时间									均值 Mean
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Elevation											
126.8	26.44	27.94	25.2	26.0	26.06	26.69	25.55	26.3	26.2	26.26	
326.8	25.24	26.74	24.0	24.8	24.86	25.49	24.35	25.1	25.0	25.06	
526.8	24.04	25.54	22.8	23.6	23.66	24.29	23.15	23.9	23.8	23.86	
626.8	23.44	24.94	22.2	23.0	23.06	23.69	22.55	23.3	23.2	23.26	
726.8	22.84	24.34	21.6	22.4	22.66	23.09	21.95	22.7	22.6	22.69	
926.8	21.64	23.12	20.4	21.2	21.46	21.89	20.75	21.5	21.4	21.48	
1553.0	18.74	18.85	17.16	17.94	18.45	18.60	17.75	17.8	18.1	18.15	

表 3-22 表明，一月份不同海拔、不同年份的温度在 1.16--8.68℃之间，平均在 -0.99--7.31℃，即使在 1553.0 米海拔最高的山顶其温度范围在-3.97--9.10℃，符合表 3-5 温度范围在-4--16℃第三级别这个范围，而其它低海拔地区符合表 3-5 温度范围在 4--8℃第一级别的温度范围；表 3-22 表明：7 月份海拔 726.8 米以下的温度在 21.6-27.94℃，其均值在 22.69-26.26℃，均在表 3-5 温度范围的第一级别>21.1℃的范畴；而处于海拔 926.8 米处，则温度范围在 20.40-23.12℃，平均值为 21.48℃，介于表 3-5 第一级别和第二级别之间；最高海拔 1553 米处的 7 月份温度范围在 17.16-18.85℃之间，平均值为 18.15，处于表 3-5 中第四级别之间，说明不同海拔高度 1 月份和 7 月份的温度可以满足美国白蛾对温度的需求，海拔越低越适合美国白蛾的生长发育。

(3) 泰山风景区 6-9 月的光照时间统计

查阅泰山多年的气象资料，结果见表 3-24。从上表可以看出，泰山 6-9 月份光照时间均>14 小时，说明泰山景区的光照充足，可以满足美国白蛾生长发育对光照的需求。

表 3-24 泰山风景区 6-9 月份光照时间统计表

Table 3-24 Illumination time of 6-9 months in Mount.Tai Zone

时间 \ 月份	6	7	8	9
日出时间范围	4.43-4.45	4:47-5:07	5.08-5.32	5.32-5.55
日落时间	19:10-19:20	19:07-19:20	18:31-19:05	17:46-18:29
光照时间(h)	14.4-14.5	14.0-14.5	13.0-13.95	11.85-12.95

(4) 泰山风景区有效积温及美国白蛾发生世代数

通过对不同海拔台站温度的统计计算，其有效积温 ($>10^{\circ}\text{C}$) 及美国白蛾发生世代数计算结果见表 3-25。

表 3-25 泰山不同海拔高度、不同年份有效积温 ($>10^{\circ}\text{C}$) 及美国白蛾发生世代数

Table 3-25 Effective accumulative temperatures ($>10^{\circ}\text{C}$) statistical result of different elevation heights and different years and generation numbers of *Hyphantria cunea* in Mount. Tai Scenic Area

海拔 (m)		时间 (年)										均值	世 代 数
Elevation	(m)	Time(year)										Average	代 数
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	($^{\circ}\text{C}$)		
126.8	2444.8	2488.9	2336.4	2353.0	2442.9	2560.6	2413.7	2434.5	2676.6	2461.3	2461.3	2.8	
326.8	2181.0	2227.7	2070.6	2080.0	2176.7	2281.5	2150.4	2221.8	2602.6	2221.4	2221.4	2.5	
526.8	1925.9	1978.2	1816.8	1821.6	1917.2	2014.8	1898.1	1984.7	2377.3	1970.5	1970.5	2.2	
626.8	1803.5	1856.1	1696.2	1696.3	1794.5	1886.4	1776.8	1811.6	2225.9	1838.6	1838.6	2.1	
726.8	1684.6	1738.8	1579.2	1575.3	1677.0	1762.5	1646.7	1711.8	2125.4	1722.4	1722.4	2.0	
926.8	1568.3	1625.4	1470.7	1456.6	1561.8	1642.1	1535.4	1464.6	1817	1571.3	1571.3	1.8	
1553.0	905.7	891.5	762.4	810.7	905	957.5	930.3	901	952	890.7	890.7	1.0	

表 3-25 表明，泰山低海拔地区(海拔 126.8-326.8 米)年有效积温大于 4200°C ，而在海拔 526.8-926.8 米之间有效积温在 $3274\text{-}4497^{\circ}\text{C}$ ，处于表 3-5 第一级别及第二级别之间，而且更接近于第一级别；即使在最高海拔 (1553.0 米) 其有效积温在 $2291\text{-}2692^{\circ}\text{C}$ ，平均在 2484.9°C ，也处于表 3-5 第一级别及第二级别之间。说明泰山景区的有效积温可以满足美国白蛾的生长发育需求。

汇总上述美国白蛾的生物学特性、泰山不同海拔、多年各种气象因子的均值分析结果见表 3-26。

表 3-26 泰山风景区美国白蛾适生性分析结果

Table 3-26 The adaptability analysis on American white moth in Mount.Tai Scenic Area

气象因子 Meteorological factors	海拔 (m) Elevation (m)						
	126.8	326.8	526.8	626.8	726.8	926.8	1553.0
一年内日平均气温>15℃连续天数 (d)							
The daily average temperatures above 15°C continuous days	178	169	157	152	145	128	84
7月平均气温 (℃)							
Average temperatures in Jul.	26.26	25.06	23.86	23.26	22.69	21.48	18.15
1月平均气温 (℃)							
Average temperatures in Jan.	-0.99	-2.19	-3.39	-3.99	-4.59	-5.79	-7.31
有效积温 (>10℃) (日度)							
Effective accumulative temperatures (>10℃)	2461.3	2221.4	1970.5	1838.6	1722.4	1571.3	890.7
6月光照 (小时)							
Illumination time in Jun.	14.4-14.5	14.4-14.5	14.4-14.5	14.4-14.5	14.4-14.5	14.4-14.5	14.4-14.5
8月光照 (小时)							
Illumination time in Aug.	13.0-14.0	13.0-14.0	13.0-14.0	13.0-14.0	13.0-14.0	13.0-14.0	13.0-14.0
9月光照 (小时)							
Illumination time in Sept.	12.0-13.0	12.0-13.0	12.0-13.0	12.0-13.0	12.0-13.0	12.0-13.0	12.0-13.0
一年内可能发生的世代数							
The possible generations within a year	2-3	2-3	2-3	2-3	1-2	1-2	1

通过表 3-11 和表 3-20 比较，可以看出，泰山不同海拔高度的气象条件均可适合美国白蛾的生长发育，结合寄主等因素，美国白蛾在泰山发生的风险和危害度极大，美国白蛾可以在泰山全境范围内危害，即使在海拔最高处（1553.0 米），一年至少可以完成一代，而低海拔和中海拔地区可以完成 2-3 代、2 代或 1-2 代，结合美国白蛾的产卵特性及其它生物学特性，可以预测美国白蛾一旦进入风景区，将在泰山景区必然造成重大危害。因此，加强美国白蛾的风险管理，采取切实可行的综合治理方案，十分必要和重要。

3.3 泰山松材线虫病和美国白蛾的风险管理措施和建议

风险性管理是风险评估的一个组成部分，是指管理者根据实际情况，选择有效的控制技术，进行消减风险的费用和效益分析，确定可以接受的风险度和可接受的危害水平，采取适当的管理措施，将灾害的损失降低到最低水平。针对本研究研究结果可以得出，松材线虫入侵泰山的可能性非常大，而且一旦侵入，将对泰山低海拔地区造成中度的风险和危害；美国白蛾入侵泰山的可能性也很大，而且整个泰山景区均适合美国白蛾的入侵和定殖，因此，为防止松材线虫病和美国白蛾对泰山风景区造成危害，本研究提出了基于泰山风景区实际情况的针对性风险管理措施，以应对和减少林业有害生物松材线虫病和美国白蛾入侵泰山风景区的风险。

为了避免和减少松材线虫病和美国白蛾对泰山风景区的森林生态系统造成危害，防止其影响当地的经济和旅游业发展，保护人类珍贵的景观资源和生态资源，本研究提出应当针对灾害发生前、灾害发生过程中、以及灾害发生以后的不同时空，采取不同的风险管理措施。因此，风险管理措施包括三方面内容：一是预防措施。在灾害发生前预防松材线虫病和美国白蛾对泰山风景区造成危害；二是应急预案。如果松材线虫病和美国白蛾在泰山风景区发生，应当采取最有效的治理手段，将松材线虫病害和美国白蛾所造成的损失降低到最低水平；三是灾后重建。在灾害发生以后，应当对遭受危害的部分进行综合治理和生态修复，恢复原森林生态系统的价值。

3.3.1 预防措施

泰山风景区内的寄主和生态环境无法人为改变，松材线虫病的媒介昆虫携带松材线虫的能力决定于媒介昆虫的特性和环境条件；美国白蛾的传播能力主要取决于人为和自身的飞翔能力，因此，预防措施的制定应当从可以人为干预的角度进行。所以，预防措施包含三个方面的内容，一是防止松材线虫病病原和美国白蛾被携带进入泰山风景区；二是对降低泰山风景区内的松材线虫媒介昆虫种群密度和周边美国白蛾疫点的数量，减少美国白蛾数量及松材线虫借媒介昆虫扩散的概率及防治难度；三是建立完善的预警、监测和测报制度。

3.3.1.1 防止松材线虫病原和美国白蛾的传入

近年来，随着泰安市旅游事业、经济贸易往来的不断扩大和苗木资源的迅速增加，泰山人员交流不断增多及泰山周边新发展的苗圃（花圃）大量增加，面积不断扩大，新的植物种类大量引进，松材线虫侵入隐患有加大的严峻形势，同时泰山景区周边与济南、岱岳区、泰山区接壤，这些地区已发现美国白蛾疫点，因此，防控松材线虫病、美国白蛾侵入泰山的形势更为严峻，森林植物检疫工作的难度和强度也越来越大。

针对外来有害生物入侵的严峻形势，本研究确定了检疫执法的工作思路，并将检疫执法工作概括为“64321”思路。即：把住 6 个路口，4 次执法检查，3 方协作，2 项监测措施，争取 1 项收费。详细工作思路如下：

首先，把住 6 个主要路口。在桃花峪、天外村、红门已有检疫检查站的基础上，增设樱桃园、玉泉寺牛山口、大津口上梨园等三个检疫检查站，配备专门的检疫工作人员和检疫检测设备，制定规章制度，对进入景区的苗木严格执行检疫、复检等措施，切实把住路口，杜绝外来有害生物由于人为原因而侵入。

二是 4 次执法检查。与森林公安、工商、行政执法局携手联合，对景区内所有的苗圃、楼堂馆所内的苗木花卉、松木及其制品包装物一年进行 4 次检疫执法巡查检查，登记造册立档，提高森防检疫站的依法监管能力和执法水平。建立外来松木及其包装制品登记申报制度，加强外来松木及其包装制品管理。

三是 3 方合作。森防站、门票管理处、有施工任务和外来有害生物监测职能的管理区、乡及社会事业局等三方签订责任状，各司其职，互相协作，互通有无，确保进山检疫、复检不出疏漏和差错。

四是 2 项措施结合。在外来有害生物重点监测区，实行机防和人员盯防两项监测措施。重点区域、重点地段安置测报灯和杀虫灯，实行专人专灯管理，执行每周一上报制度；同时，各单位明确监测区责任人，实行定点定人监测、定时报告，对外来有害生物监测做到早发现、早处理。

五是争取 1 项收费。积极向上争取，由泰山森防站主管本辖区内的森林检疫工作，开具国家统一的“森林植物检疫证书”；落实行政收费许可权，将景区内检疫收费许可权和除害处理收费许可权授权给泰山森防站，处罚权可继续划归泰山行政执法局。

3.3.1.2 降低景区媒介昆虫的种群密度和泰山景区周边的美国白蛾的种群密度

针对松材线虫病通过媒介昆虫传播的特点，发现褐幽天牛 (*Arhopalus rusticus* (L)) 和松褐天牛 (*Monochamus alternatus* Hope) 是泰山松林的主要害虫。松褐天牛存在于海

拔 1000m 以下的油松和赤松林中，而在海拔 1100-1500m 的油松林中没有发现；褐幽天牛在油松和赤松林中广泛存在。经过本研究 5 年的研究发现，降低媒介昆虫的种群和数量是减少松材线虫病入侵泰山风险的重要途径，目前，本研究已经应用了多种方法如引诱剂诱杀、管氏肿腿蜂、花绒寄甲等多种物理和生物防治方法进行有机耦合对泰山媒介昆虫发生严重的重点区域进行了防控，取得了良好的监测和防控效果，为降低松材线虫病入侵泰山的风险发挥了重要作用。另外，国内李增智等（1998）、王滨（2003）、夏成润（2005）、丁德贵（2006）使用无纺布菌条释放球孢白僵菌来控制松褐天牛种群密度效果良好。

泰山景区应继续将国内外有关松褐天牛防控的最先进的技术和方法应用到媒介昆虫防控的具体实践中，同时将泰山的生态环境条件、寄主的健康状况等结合起来，也可以同其它防控技术结合起来，如在成虫羽化前对发生区受害木、衰弱木及其伐桩及时刨除，集中焚烧，对林分密度过大者进行合理修枝间伐。另外，应当注意对泰山天敌资源的保护，丰富景区内的生物多样性，增加当地生态环境的自然抵御能力（杨忠岐等，2004），以上措施并用，可大幅度减少天牛的种群密度，并使其维持在较低的水平。

针对目前美国白蛾已蔓延至泰山景区周边的济南、岱岳区、泰山区等地，拔除这些疫区美国白蛾的疫点，降低美国白蛾的种群数量，防止美国白蛾进入景区。

3.3.1.3 加强预警、预报

在松材线虫病的防治工作中，发现越早，治理效果就越好，就越容易清除。由于松材线虫必需由人为传播进入泰山风景区。人为传播的松材线虫病疫情在发生的时候具有中心爆发点，并且一般不会多点同时爆发。在预测疫情发生的过程中，应当先划定重点监测区，尤其是人为活动和进行基础建设的地区。对重点监测区内的松林做到有效的监测，对可疑松木进行定期的检测，做到及时发现松材线虫病的疫情；一旦发现可疑松木，立刻进行人工取样调查，形成立体的松材线虫病监测网，在泰山各景区所有入口处建立了检疫检查站和专职检疫员队伍；最后还应当定期根据客观情况做好松材线虫病入侵泰山风景区的风险性评估，随时掌握风险变化情况。

目前，美国白蛾在泰城和泰山景区周边区域已经发现，美国白蛾可通过人为和自然飞翔途径就可以到达泰山景区，本研究在美国白蛾发生期（4 月-10 月），采用多台自动虫情测报灯和频振式杀虫灯，对美国白蛾实行了全天候不间断地自动监测，实现了监测全方位自动化，取得了良好效果。

3.3.2 应急预案

在风险管理措施中，需要对松材线虫病和美国白蛾在泰山风景区内发生后的对策进行探讨，以便在有害生物发生时迅速启动应急系统以及时遏制其扩散，防止造成不必要的损失。

松材线虫病在泰山风景区内发生后，其传播途径会由人为传播转化为自然传播。但其初始发病点应当为疫木所在地。由于自然传播受媒介昆虫的活动影响，所以初始发病面积和规模不会过大。松材线虫病的自然扩散具有连续（渗透）和不连续（跳跃）两种方式(来燕学等，2000)。但其最远扩散距离应为媒介昆虫的迁飞距离。松褐天牛在松林中的理论最远迁飞距离为 3.3 km (杨宝君等，2003)。松材线虫病大部分的扩散范围在 100 m 之内，部分可达到 115m，越年死亡传染的死树可以达到 350 m 的距离 (朋金和等，1997)。因此，如果在泰山风景区发现松材线虫病，应当对罹病木进行及时有效的管理，同时做好疫情扩散监测，随时掌握疫情的发生情况。依照松材线虫病扩散规律，首先应及时发现病原，对病原周围 350m 半径内的寄主要及时清理，尤其注意处理好清理后的树枝、桠、桩，防止再次传播，减少病害扩散可能；其次，在病原周围 4km 内大强度降低媒介昆虫的种群密度，并进行择伐和清理枯死木的工作，对于部分价值较高的松树或者重要的区域应当进行提前单株预防措施；最后要在疫情发生周围做好监测工作尤其是名松古树的监测工作，及时掌握疫情的发生情况，将疫情控制在 4km 的理论扩散范围之内 (魏初奖等，1997)。

美国白蛾若在景区发生，将会出现多点同时发生危害的局面，必须采取果断措施彻底剪除网幕，然后在其树木周围 300—500 米的范围内，彻底喷洒无公害农药进行防治，降低和清除美国白蛾的数量，缓解泰山景区大面积防治的压力。

3.3.3 灾后重建

泰山风景区如果发生松材线虫病和美国白蛾，在疫情发生和除治过程中势必会对疫区的森林（松林）生态系统造成一定的影响，可能会有部分地区松林消失和阔叶树种的生长势受到显著影响。由于泰山风景区的森林景观很大程度上是建立在自然形成或人工辅助自然形成的基础上，因此，过多的人为干预恢复会导致景区的整体自然景观的破坏。在灾后森林生态系统恢复问题上，必须要考虑到充分利用生态系统的自我修复和森林生态系统的多样性及稳定性功能，进行必要合理的人工引导，实现遭受有害生物区域内的生态恢复。

4 讨 论

4.1 松材线虫病入侵泰山的可能性

松材线虫病在短期内不会通过自然传播方式入侵泰山风景区，其入侵的途径主要通过人为传播途径，因此，检疫检查力度将对该病是否能进入泰山风景区产生最为重要的影响，应该引起足够重视。

泰山 400 米以下的低海拔地区的气候条件适合松材线虫的定殖。而 400-700 米，随着海拔的升高，气候条件（温度）逐渐不适合松材线虫病的生存，在高海拔 700 米以上地区，松材线虫则无法生存。因此，加强低海拔地区（700 米以下）松林的松材线虫病监测预警，对于防控泰山松材线虫病至关重要。

4.2 松材线虫入侵泰山风景区的危害度评估

人工接种试验证明：泰山景区面积最大的油松属于松材线虫病的感病树种。油松是泰山的乡土树种，以前的文献尚未有油松是易感树种的报道，其原因可能与我国松材线虫病发生区域有关。目前松材线虫病多发生于我国沿海和南方地区，这些地区的常见树种为黑松、赤松、马尾松、雪松等。油松自然分布在辽宁、吉林、内蒙古、河北、河南、山西、陕西、山东、甘肃、宁夏、青海、四川北部等地区，这些地区尚未发现松材线虫病疫情，本研究证实了油松也是松材线虫病的易感树种。

泰山风景区主要存在 2 种松材线虫病的传播媒介，其中松褐天牛主要存在于海拔 1100m 以下的油松和赤松林中，一年发生一代；褐幽天牛在泰山低海拔地区的油松和赤松林中广泛存在；上述两种天牛携带松材线虫的能力尚需要通过实验进行验证。

通过对松材线虫病入侵泰山风景区的可能性、危害度及风险性的分析，松材线虫在 400 米以下的低海拔地区人为入侵和定殖的可能性为高度，风险性属于高度风险，入侵后造成的危害度为中等危害。其中低海拔地区的天烛峰、巴山、桃花峪、玉泉寺、桃花源、竹林寺、樱桃园和长城岭等区域为松材线虫病最易发生的区域，应重点对这些区域进行监控，上述研究结果也为实际生产中分类施策提供了依据。

4.3 不同松褐天牛引诱方法对松材线虫病预警技术研究

松材线虫病入侵泰山风险性评估中表明：降雨量、温度对风险性影响最大，其次是媒介昆虫的生活史和种群密度，在这4个因素中，前3个因素均不受人为调控，因此，通过监测和诱杀媒介昆虫来明确松材线虫病的有无和变化，可以为科学防控提供有效依据。而结合引诱剂的使用和林间修枝间伐的正常作业，就可以达到既降低了虫口，又提高了森林质量的目的。本研究也表明：引诱剂假植木法引诱松褐天牛效果最好，该方法可以较彻底的消灭虫源，使大量的松树免遭死亡的威胁，减少了下代松褐天牛的危害。

松褐天牛的习性是先补充营养危害传播完线虫以后才能被引诱剂诱捕到，具有一定的滞后性，因此，需要增加监测的数量才能达到早期检测预警的目的。

由于影响松材线虫入侵泰山风景区的因素很多，且各因素之间相互作用十分复杂，本研究有关松材线虫入侵泰山的风险分析未能考虑到所有因素及其之间的相互作用，因此，本研究的风险评估体系尚需要继续完善。

4.4 美国白蛾入侵泰山的可能性

目前国内有关美国白蛾的风险预警技术研究主要侧重于大尺度、大范围的适生性预测研究，应用一些风险性分析软件如李淑贤等(2009)应用GARP软件对美国白蛾在中国的可能分布及危险性进行定性评估，而针对区域性美国白蛾的发生、分布及风险评价国内缺乏研究。

本研究针对泰山风景区美国白蛾可能的分布及危害进行了较为系统的研究，研究和事实都已经表明：美国白蛾可以通过自然传播和人为传播等多种途径入侵泰山风景区，泰山风景区的生态环境条件完全适合美国白蛾生长发育所需的温度、降雨量、湿度、光照等因素，且目前已在泰山景区周围发生和定殖，美国白蛾入侵泰山风景区的可能性极大，如果不及时采取措施，发生是必然的。

4.5 美国白蛾入侵泰山风景区的危害度评估

由于目前国内缺乏美国白蛾风险分析及危害度评估的定量评价体系，本研究主要借鉴金瑞华等（1991）所采用的美国白蛾的评价指标进行了系统研究，获得了预期的研究结果，但仍需要继续进行风险分析的定量研究，以便更好的评价林业有害生物的风险性及危害度。

泰山风景区主要阔叶林带麻栎林、刺槐林、元宝槭林、杂木林、果树林及周边地区的
主要寄主植物大多为美国白蛾的喜食树种，每一林带及周边环境中的灌木、草本也有
部分为美国白蛾取食，从寄主角度来看，美国白蛾入侵泰山的风险极高。

泰山不同海拔高度的气象条件均可适合美国白蛾的生长发育，结合上述美国白蛾的
寄主范围、产卵特性及其它生物学特性，美国白蛾可以在泰山全境范围内危害，即使在
海拔最高处（1553.0米），一年至少可以完成一代，而低海拔和中海拔地区可以完成2-3
代、2代或1-2代，可以预测美国白蛾一旦进入风景区，发生的危害度将极大。泰山周
边的美国白蛾疫情已经证明了这一个问题。

4.6 泰山松材线虫病和美国白蛾的风险管理措施和建议

本研究从三个方面提出了针对泰山松材线虫病和美国白蛾的风险管理措施和建议，
但松材线虫病和美国白蛾的传播途径和发生机理复杂，针对泰山的地理位置、松材线虫
病和美国白蛾的防控现状，建议政府加强宏观管理，加大宣传，提高认识，从各个环节
方面加强松材线虫病和美国白蛾的宏观治理，可能是一种行之有效的预警和治理措施，
这方面的研究和具体实施方案亟待加强和落实。

5 结 论

5.1 结论

5.1.1 松材线虫病入侵泰山风景区的可能性和危害性

从温度、寄主、媒介昆虫等方面分析，松材线虫在泰山风景区的适生性分析可以得出以下结论：泰山风景区 400 米以下的低海拔松林为松材线虫的适生区，松材线虫一旦传入，很可能定殖并迅速传播，造成巨大危害；而 400-700 米，随着海拔的升高，气候条件（温度）逐渐不适合松材线虫病的生存，该区域的松林也会有风险，而在高海拔 700 米以上地区，松材线虫则无法生存，该区域松林不会受松材线虫病的危害，比较安全。

通过对松材线虫病入侵泰山风景区的可能性、危害度及风险性的分析，松材线虫在低海拔地区人为入侵和定殖的可能性为高度，风险性属于高度风险，入侵后造成的危害度为中等危害。气候条件对结果产生的贡献度最大。因此，在干旱少雨的季节中，更应当加强对松材线虫病害的风险管理。

泰山风景区存在着大量的松材线虫病易感树种，油松是松材线虫病的易感树种。低海拔地区的天烛峰、巴山、桃花峪、玉泉寺、桃花源、竹林寺、樱桃园和长城岭等风景区为松材线虫病最易发生的区域，应重点进行监控这些地区。

5.1.2 不同引诱方法诱捕松褐天牛是松材线虫病的预警配套技术一个重要手段

不同引诱方法诱捕松材线虫病的传播媒体——松褐天牛，可以作为松材线虫病的预警配套技术一个重要手段。引诱剂假植木法是一种有效的的引诱松褐天牛的方法，即可以较彻底的消灭虫源，使大量的松树免遭死亡的威胁，减少了下代松褐天牛的危害；又可以结合森林抚育间伐，提供森林质量。

5.1.3 美国白蛾入侵泰山的可能性和危害性

通过泰山景区的主要阔叶树种及草本植物的种类、分布、价值、生态环境条件、目前已发生同类地区的寄主树种和疫区树种的种类、美国白蛾的生物学特性、美国白蛾生长发育所需的气候条件等多因子进行分析和研究表明：

美国白蛾可以通过自然传播和人为传播等多种途径入侵泰山风景区，且目前已在泰山景区周围发生和定殖，美国白蛾入侵泰山风景区的可能性极大，如果不及时采取措施，发生是必然的。

泰山风景区的生态环境条件完全适合美国白蛾生长发育所需的温度、降雨量、湿度、光照等因素，美国白蛾一旦入侵泰山，可以快速定殖并繁衍。

泰山风景区主要阔叶林带麻栎林、刺槐林、元宝槭林、杂木林、果树林及周边地区的主要寄主植物大多为美国白蛾的喜食树种，每一林带及周边环境中的灌木、草本也有部分为美国白蛾取食，从寄主角度来看，美国白蛾入侵泰山的风险极高。

泰山不同海拔高度的气象条件均可适合美国白蛾的生长发育，结合上述美国白蛾的寄主范围、产卵特性及其它生物学特性，美国白蛾可以在泰山全境范围内危害，即使在海拔最高处（1553.0米），一年至少可以完成一代，而低海拔和中海拔地区可以完成2-3代、2代或1-2代，可以预测美国白蛾一旦进入风景区，发生的危害度将极大。因此，加强美国白蛾的风险管理，采取切实可行的综合治理方案，十分必要和重要。

5.2 创新点

1、首次对暖温带季风气候区的山地松林树种——油松进行了松材线虫的感病性研究。

2、首次明确松材线虫和美国白蛾入侵泰山的可能性、风险及危害度。划分了松材线虫病在泰山入侵发生危险等级，确定了低海拔地区的天烛峰、巴山、桃花峪、玉泉寺、桃花源、竹林寺、樱桃园和长城岭等风景区为松材线虫病最易发生的区域；从理论上证明了美国白蛾在整天泰山地区均可发生和危害；并根据研究结果和实际情况提出了适合于泰山的重大林业有害生物的风险管理措施。

参考文献

- 陈克, 姚文国, 章正. 小麦矮腥黑穗病在中国定殖风险性分析及区域划分. 植物病理学报, 2002, 32(4): 312~317
- 褚栋, 刘开昌, 张正. 山东省生物入侵的现状及其防控对策-由入侵物种美国白蛾大暴发引发的思考. 山东农业科学, 2009, 1: 121~124
- 丁德贵. 黄山风景区松材线虫病风险性评估和管理. 安徽农业大学博士论文, 2006
- 方天松, 余海滨, 卓侃, 罗梅, 李迅东, 尹成江, 廖金铃. 寄生加勒比松松材线虫的鉴定及其致病性测定. 广东林业科技, 2008, 2: 37~41
- 冯士明. 松材线虫病在云南发生的可能性及预防对策. 植物检疫, 2000, 14(5): 289~291
- 冯益明, 张海军, 吕全. 松材线虫病在我国适生性分布的定量估计. 林业科学, 2009, 45(5): 65~71
- 冯益明, 梁军, 吕全. 松突圆蚧在我国潜在的适生性分析. 林业科学研究, 2009, 22(4): 563~567
- 高天裕. 松材线虫在我国的适生性分析. 植物检疫, 1987, 1(3): 215~219
- 葛泉卿, 温孚江. 葡萄金黄化病和葡萄带叶蝉在中国的潜在分布区. 植物保护学报, 2006, 33(1): 51~58
- 侯柏华, 张润杰. 基于CLIMEX的桔小实蝇在中国适生区的预测. 生态学报, 2005, 25(7): 1570~1574
- 黄海勇, 黄吉勇. 松材线虫等5种有害生物在贵州省的风险分析. 中国森林病虫, 2004, 6: 14~17
- 季荣, 谢宝瑜, 李欣海. 外来入侵种—美国白蛾的研究进展. 昆虫知识, 2003, 40(1), 13~18
- 贾文明, 周益林, 丁胜利. 外来有害生物风险分析的方法和技术. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, (33): 195~200
- 蒋星华, 童爱珍, 池友军. 金华市美国白蛾风险分析. 现代农业科技, 2008, 2: 89~99
- 金昊. 从适生性分析松材线虫对云南松树树种的威胁. 西部林业科学, 1993, 2: 11
- 来燕学. 松材线虫病自然扩散特性及防治策略. 浙江林学院学报, 2000, 17(2): 170~175

- 李红梅, 韩红香, 薛大勇. 利用GARP生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布. 昆虫学报, 2005, 48(1): 95~100
- 李建中, 彭德良, 刘淑艳. 潜在外来入侵甜菜孢囊线虫在中国的适生性风险分析. 植物保护, 2008, 34(1): 90~94
- 李莉. 松材线虫病入侵陕西的风险分析. 陕西林业科技, 2004, 4: 53~59
- 李淑贤, 高宝嘉, 张东风. 美国白蛾危险性评估研究. 中国农学通报, 2009, 25 (10): 202~206
- 李学磊. 外来物种入侵我国风险性分析制度之探讨. 亚太经济, 2005, 2: 91~93
- 李增智, 韩宝瑜, 樊美珍. 应用球孢白僵菌防治马尾松毛虫的策略及其生物多样性基础的研究. 应用生态学报, 1998, 9(5): 503~510
- 梁宏斌, 张润志, 张广学. 麦双尾蚜在中国的适生区预测. 昆虫学报, 1999, 42(8): 55~61
- 林伟. 美国白蛾在中国适生性的初步研究. 北京农业大学硕士论文, 1991, 60
- 林伟. 苹果蠹虫蛾在中国危险性的初步研究. 北京农业大学博士论文, 1994
- 刘桂林, 庞虹, 周昌清. 我国松材线虫病的研究现状及趋势. 当代昆虫学研究——中国昆虫学会成立60周年纪念大会暨学术讨论会论文集, 2004
- 刘海军, 骆有庆, 温俊宝. 北京地区红脂大小蠹、美国白蛾和锈色粒肩天牛风险评价. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 81~88
- 刘海军. 中国输美包装箱携带重要钻蛀性害虫的风险评价, 北京林业大学博士论文, 2006
- 刘洪霞, 冯益明. 双钩异翅长蠹在我国潜在的适生性分析. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2009, 26(8): 24~28
- 刘静远, 陈洪俊, 李志红. 基于GARP的杏小食心虫在中国的潜在分布研究. 植物保护, 2008, 34(5): 39~43
- 国家林业局 2012年我国松材线虫病疫区第2号公告 2012, 3
- 吕全, 王卫东, 梁军. 松材线虫在我国的潜在适生性评价. 林业科学研究, 2005, 18(4): 460~464
- 毛志农, 孙汝川, 窦学芝. 低湿和低温对稻水象死亡率的影响及稻水象在我国分布范围的初探. 植物检疫, 1997, 15 (增刊): 26~29
- 宁眺, 方宇凌, 汤坚, 孙江华. 松材线虫及其传媒松墨天牛的监测和防治现状. 昆虫知识, 2005, 42(3): 264~269

- 朋金和,蒋丽雅,周建生.松材线虫病在纯林内自然扩散规律的研究.森林病虫通讯,1997,(3): 9~12
- 秦绪兵,李东军,邵文惠.美国白蛾在山东的发生与防治.植物检疫,2000,14(1): 48~49
- 秦绪兵,李东军,邵文惠.山东省查治美国白蛾存在问题与建议.森林病虫通讯,2000,19(5): 41~43
- 秦绪兵,张秋梅,刘建新.山东省林业有害生物2005年发生情况和2006年趋势预测.山东林业科技,2006,2: 46~48
- 石娟,骆有庆,武海卫,严晓素,陈卫平,蒋平.松材线虫入侵对马尾松林植物群落功能的影响.北京林业大学学报,2007,29(5): 114~120
- 史东平.浅谈松材线虫病对我省林业生产的潜在威胁及检疫对策.江西植保,1997,01: 9
- 宋红敏,张清芬,韩雪梅.Climex: 预测物种分布区的软件.昆虫知识,2004, 41(4): 379~386
- 宋玉双.松材线虫在我国适生性分析及检疫对策初探.森林病虫通讯,1989, (4): 38~41
- 汤宛地.松材线虫入侵黄山风景区的风险性评估.北京林业大学硕士毕业论文,2008
- 万方浩,郑小波,郭建英.重要农林外来入侵物种的生物学与控制.科学出版社, 2005, 573~616
- 王滨.白僵菌持续控制马尾松毛虫的生物多样性和生态学基础.浙江大学博士毕业论文,2003
- 王德青.豫西南松材线虫病监测预警体系研究.现代农业科技,2010,(12) : 146~168
- 王峰,王志英,喻盛甫.基于ArcView GIS的松材线虫传入云南风险评估.云南农业大学学报,2007, 22 (5): 639~644
- 王明旭.湖南松材线虫病早期预警系统的建立与实践.湖南林业科技, 2007 , 34(5): 14~16
- 王卫东.中国松材线虫病风险分析.中国林业科学研究院, 2004
- 王新花,李东军,王连东.从浙、皖松材线虫病发生防治谈泰山松林的保护.山东林业科技, 2004, 1: 37~38
- 王颖,章桂明,杨伟东.基于MAXENT的大豆南北方茎溃疡病菌在中国适生区的预测.植物检疫, 2009, 4: 14~17
- 王运生,谢丙炎,万方浩.相似穿孔线虫在中国的适生区预测.中国农业科学, 2007, (40): 2502~2506

魏初奖. 松材线虫病在福建省的潜在危险性分析及检疫对策. 福建林业科技, 1997, 01:

10

魏东晨, 陈合志, 王峰. 美国白蛾发生特点及防治对策. 中国林业, 2005, (1IB): 43~44

魏晓棠, 肖海军, 杨东. 美国白蛾生物学上的几个重要特征. 植物检疫, 2006, 20(1):

14~17.

夏成润. 白僵菌无纺布菌剂中试生产工艺及应用虫生真菌防治天牛的研究. 安徽农业大学博士论文, 2005

胥勇, 周平阳, 王扬. 应用BIOCLIM生态位模型对松材线虫传入云南的风险评估. 云南农业大学学报, 2008, 23(6): 746~753

徐福元, 葛明宏, 徐克勤. 松墨天牛的生物防治技术研究. 江苏省植病、昆虫学会通讯2——江苏省松材线虫病研讨会论文集, 2003

徐进, 陈林, 许景生. 香蕉细菌性枯萎病菌在中国的潜在适生区域. 植物保护学报, 2008, 35(3): 233~238

杨宝君, 汤坚, 潘宏阳. 松材线虫病. 北京: 中国林业出版社, 2003

杨宝君, 王秋丽. 不同松树品种对松材线虫的抗性. 植物保护学报, 1987, 17(4): 211~214

杨宝山, 梁伟, 曲士松. 济南市美国白蛾调查及控制措施. 济南大学学报, 2008, 22(3): 292~294

杨振德, 赵博光, 郭建. 松材线虫行为学研究进展. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 87~92

杨忠岐. 利用天敌昆虫控制我国重大林木害虫研究进展. 中国生物防治, 2004, 20(4): 221~227

曾辉, 黄冠胜, 林伟. 利用Maxent预测橡胶南美叶疫病菌在全球的潜在地理分布. 植物保护, 2008, 34(4): 88~92

张海军. 中国松材线虫病潜在分布区研究. 内蒙古农业大学, 2008

张连生, 庞建军. 美国白蛾生活史观察及防治技术研究. 天津: 天津园林科学研究所, 1999, 2~3

张清芬, 徐岩, 黄新凯, 徐汝梅. 日本金龟子在中国适生区的预测. 植物检疫, 2002, 16(2): 73~77

张志诚, 孙江华, 黄保续, 等. 基于GIS的松树萎蔫病发生格局研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(5): 551~556.

- 张星耀, 骆有庆. 中国森林重大生物灾害. 中国林业出版社, 2003
- 赵文娟, 陈林, 丁克坚. 利用MAXENT预测玉米霜霉病在中国的适生区. 植物保护, 2009, 35(2): 32~38
- 赵志晶, 刘秀梅. 由苍蝇传播引起E. coli 0157: H7感染爆发的评估模型的建立. 疾病控制杂志, 2005, 9(1): 23~28
- 进出境植物和植物产品有害生物风险分析技术要求. 中华人民共和国质量监督检验检疫总局N/T 16011-2005
- 周国梁, 陈晨, 叶军. 利用GARP生态位模型预测桔小实蝇在中国的适生性区域. 生态学报, 2007, 27(8): 3362~3369
- 周汝良, 石雷, 尹立红. 云南省松材线虫适生区的精细化评估. 林业科学的研究, 2008, 21(5): 702~706
- Anderson R P, Lew D, Peterson A T. Evaluating predictive models of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2003, 162(3): 211~232
- Baker R. H. A., Sansford C. E., Jarvis C. H. The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2000, 82(3): 57~71
- Fernandez, JM Solla, A. Risk Maps of Appearance and Development of the Pine Wilt Disease(*Bursaphelenehus xylophilus*)in Extremadura. Investigacion Agraria, Sistemas Y Recursos Forestales . Instituto Nacional de Investigacion Tecnologia Agraria Alimentaria(INIA), 2006, 15:41~151
- Kroon A, Veenendaal R L, Veerman A. Photoperiodic induction of diapause in the spider mite *Tetranychus urticae*: qualitative or quantitative time measurement. Physiol Entomol, 1997, 22: 357~364
- Macleod A. , Evans H. F. , Baker R. H. A. An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle (*Anoplophora glabripennis*) to hardwood trees in the European community. Crop Protection, 2002, 21: 635~645
- Mamiya Y, Enda N. *Bursaphelenchus mucronatus* n. sp. (Nematoda: Aphelenchoididae) from pine wood and its biology and pathogenicity to pine trees. Nemat, 1979, 25: 353 ~ 361.
- Mamiya Y, Kiyohara T. Description of *Bursaphelenchus lignicolus* n.sp.(Netmtoda:

- Aphelenchoididae) from pine wood and histopathology of nematode - infested trees. Nemat. 1972, 18: 120~124.
- Mamiya Y. Initial pathological changes and disease development in pine trees induced by the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Ann Phytopathol Soc Japan, 1985, 51 (5): 546~555
- Mamiya Y. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. Ann Rev Phytopathol, 1983, 21: 201~220.
- Masaki S, Kikukawa S. The diapause clock in a moth: Response to temperature signals. In: Biological Clocks in Seasonal Reproductive Cycles, BK Follett and DE Follett, eds, Scientifica, Bristol, UK. 1981, 101~112
- Necibi Semi, Linit Marc J. The role of wood moisture content and *Monochamus carolinensis* life stages on pinewood nematode development. International Symposium on Pine Wilt Disease Caused by Pine Wood Nematode. Beijing, 1995, 103~107.
- Nickle W R, Golden A M, Mamiya Y. On the taxonomy and morphology of the pine wood nematode, *Burursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer 1934) Niclde 1970. Nemat, 1981, 13(3): 385~392.
- Saunders D S. A diapause induction-termination asymmetry in the photoperiodic responses of the linden bug, *Pyrrhocoris apterus*, and an effects of near-critical photoperiods on development. J Insect Physiol, 1983, 29: 399~405
- Wang X, Ge F, Xue F. Diapause induction and clock mechanism in the cabbage beetle, *Colaphellus bowringi* (Coleoptera:Chrysomelidae). J Insect Physiol, 2004, 50: 373~381
- Wang Y, XIE B. The Potential Geographic Distribution of *Radopholus similis* in China. Agricultural Sciences in China. 2007, 6(12): 1444~1449
- Wingfield A B, Kondo E. Comparison of pine wood nemtode, *Bursaphelenchus xylophilus* from pine and balsam fir. Sonderdruck aus Euro J For Path, 1983, 13: 360~372.

附录

附表 1 Climex 软件使用的 54826 台站气象数据

年份	月份	最高温度℃	最低温度℃	降雨量 mm	湿度 %
2001	1	-5.1	-10.1	57.6	60.52
2001	2	-1.4	-7.5	27.2	61.29
2001	3	4.6	-3.9	3.2	41.13
2001	4	28.3	14.9	14.4	51.07
2001	5	18.2	11.1	5.8	51.16
2001	6	20	13.5	218	72.77
2001	7	21.4	16.3	222.9	81.26
2001	8	19.8	14.3	125.2	81.58
2001	9	15.5	10.3	55.2	73.60
2001	10	11.6	5.8	13.5	65.61
2001	11	5.1	-1.4	8.7	48.47
2001	12	-3.4	-10	21.1	51.55
2002	1	-6.9	-0.8	8.5	43.87
2002	2	1.5	-4.4	2	44.21
2002	3	6.3	-0.2	8.2	51.52
2002	4	10.2	2.7	35.7	55.47
2002	5	14.4	8.2	146.2	66.32
2002	6	19.5	13.4	111.8	72.53
2002	7	21.3	15.7	168.4	80.39
2002	8	19.9	14.6	41.1	85.55
2002	9	17.7	11.1	52	72.67
2002	10	10.6	3.8	18.2	64.94
2002	11	2.6	-3.8	9	47.40
2002	12	-1.5	-6.9	27.5	58.74
2003	1	-4.1	-7.2	27.5	41.26
2003	2	-0.3	-3.5	15.3	51.39
2003	3	1.8	-1.2	44.7	68.74
2003	4	10	6.4	197.2	60.67
2003	5	14.8	11.6	53.7	74.16
2003	6	19	15.9	49.5	71.03
2003	7	19.6	6.8	290.4	87.94
2003	8	20	17.6	344.9	88.23
2003	9	16.3	1.34	212.3	81.77
2003	10	10.2	7.2	265	57.94
2003	11	5	1.8	58.6	56.93
2003	12	-1	-4.3	21.9	36.87
2004	1	-4.6	-11	11.2	47.68

2004	2	1	-6.1	29.4	39.59
2004	3	4.5	-3.6	5.9	54.26
2004	4	11.8	3.6	27.2	58.53
2004	5	15.6	7.7	96.9	62.87
2004	6	18.3	11.9	233.4	78.00
2004	7	20.5	15.2	479.7	90.81
2004	8	19.1	14.3	529.9	87.81
2004	9	16.9	10.6	119.3	72.90
2004	10	11.9	5.4	21.5	52.48
2004	11	6.4	0	23	51.60
2004	12	0.7	-5.4	10.9	53.23
2005	1	-4.7	-11.5	0.8	44.61
2005	2	-4.9	-11.1	33.1	66.25
2005	3	3	-4.8	1.5	49.35
2005	4	12.7	4.8	65.5	59.83
2005	5	15.1	7.9	115.4	62.16
2005	6	21.7	14.4	183.4	66.77
2005	7	21.5	16	351.5	84.68
2005	8	18.8	14.3	180.5	89.97
2005	9	16.9	11.1	310.3	81.10
2005	10	11.6	5.7	90.3	58.00
2005	11	6.6	0.7	9.9	48.23
2005	12	-4.1	-10.8	0	51.58
2006	1	-2.6	-8.3	12.9	56.45
2006	2	-2.7	-9.4	13.2	61.71
2006	3	6.2	-2.1	0.7	47.52
2006	4	11.9	3.2	33.6	58.63
2006	5	16.9	11.1	310.3	70.48
2006	6	20.6	13.8	157.3	68.90
2006	7	21.5	16.1	127.5	86.90
2006	8	21	15.7	203.2	87.94
2006	9	16.1	10.3	82.3	72.93
2006	10	14.5	8.9	6.4	66.94
2006	11	7	1	26	62.87
2006	12	-1.5	-7.2	17.1	50.19
2007	1	-2.8	-8.8	3.2	40.32
2007	2	2.3	-3.9	11.1	49.43
2007	3	3.8	-2.9	53.9	67.68
2007	4	10.1	2.9	14.4	61.30
2007	5	17.2	10.5	110.1	55.48
2007	6	19.9	13.7	129.2	72.17
2007	7	20.3	15	232	81.97
2007	8	20.7	15.9	268.9	92.29
2007	9	17.2	11.3	55.5	76.40

2007	10	10.5	5.2	77.4	69.32
2007	11	5.3	-1.1	20.9	51.33
2007	12	-0.3	-5.7	27.1	55.68

附表2 Climex 软件使用的 54827 台站气象数据

年份	月份	最高温度 °C	最低温度 °C	降雨量 mm	湿度 %
2001	1	2.3	-4.2	35	71.61
2001	2	6.7	-1.9	22.6	74.25
2001	3	14.8	2	3.2	46.55
2001	4	20.3	7.9	13.2	53.67
2001	5	28.8	14.9	0.1	58.42
2001	6	31.4	18.6	138.2	65.23
2001	7	30.3	22.4	198.1	80.10
2001	8	30.1	19.8	125.2	78.52
2001	9	26.8	15.8	16.6	72.07
2001	10	22.3	10.7	8	69.77
2001	11	14.7	1.3	5	63.37
2001	12	4.5	-3.8	8.9	59.71
2002	1	8	-4.6	3.6	51.97
2002	2	11.9	-1.1	0	49.43
2002	3	17.2	3.8	3	55.03
2002	4	20.8	9.2	21.3	53.73
2002	5	25.4	13.7	83.8	68.32
2002	6	31.4	19.9	46.6	58.37
2002	7	33.4	22.1	72.3	71.13
2002	8	31.6	20.9	24.8	77.90
2002	9	28.4	16	20.3	74.93
2002	10	21.4	8.5	7.4	60.23
2002	11	12.5	0.6	0	52.67
2002	12	6	-2.3	10.8	71.45
2003	1	4.4	-7.1	4.9	57.58
2003	2	8.4	-2.8	4.7	57.32
2003	3	12.7	2.8	25.5	62.65
2003	4	6.4	9.8	113	60.37
2003	5	25.5	14.9	33.3	66.35
2003	6	30.3	18.4	32.9	61.87
2003	7	29.3	20.8	257.7	81.87
2003	8	30.1	22.1	164.9	82.42
2003	9	25.5	16.5	204.7	80.40
2003	10	20.2	10.3	110.9	70.39
2003	11	14.5	4.8	62.2	68.83
2003	12	5.9	-3.2	12.1	69.06
2004	1	4.6	-6	1.3	58.00
2004	2	11.3	-1.6	24.3	48.48

2004	3	14.4	3.8	1.5	53.03
2004	4	22.2	10.2	14.7	57.03
2004	5	25.4	13.9	51.4	63.61
2004	6	28.9	18	138.8	70.73
2004	7	30.5	22.6	320.1	82.94
2004	8	29.2	21.3	317.9	82.74
2004	9	27.3	16.3	126.9	74.83
2004	10	21.8	8.7	10.4	67.90
2004	11	15.9	4.7	27.2	70.33
2004	12	7.8	-1	4	67.16
2005	1	4	-7	0	48.32
2005	2	-11.1	-4.8	14	56.89
2005	3	12.8	-0.2	0.5	44.10
2005	4	22.9	10.2	51	50.50
2005	5	25.7	13.9	95.2	53.97
2005	6	32.6	19.9	103.9	56.43
2005	7	30.7	22.8	264.9	76.71
2005	8	29.8	21.3	184.9	73.32
2005	9	26.6	16.3	189.4	72.07
2005	10	20.8	10.4	69.6	66.65
2005	11	16.1	3.4	5.4	61.67
2005	12	5.5	-5.9	3.8	46.58
2006	1	5	-3.6	4.7	61.55
2006	2	6	-3.1	7.8	54.29
2006	3	15.8	3.6	0	40.39
2006	4	21.8	9.6	23.5	56.17
2006	5	25.9	14.8	77	62.61
2006	6	31.7	20.2	130.5	62.03
2006	7	30.8	23.2	109.1	79.81
2006	8	31.2	22.4	143.9	80.74
2006	9	26.5	15.9	56.4	73.67
2006	10	24.4	13.5	5.3	73.45
2006	11	16.5	5	13.2	66.10
2006	12	6.6	-3.2	10.4	66.58
2007	1	5.7	-6.1	0.1	56.74
2007	2	11.9	0.3	2.1	54.00
2007	3	13.9	3.6	46.7	57.58
2007	4	21.2	9	14.7	51.33
2007	5	28.1	15.7	113.2	56.71
2007	6	29.9	19.5	73	67.60
2007	7	29.7	21.8	235.8	79.94
2007	8	30.6	22.6	179.2	83.03
2007	9	27.9	16.6	33.6	75.67
2007	10	20.1	10.8	38.3	72.00

2007	11	14.3	1.8	12.4	65.33
2007	12	7.6	-2.2	16.5	68.48

附表 3 @risk 软件使用的 54827 台站气象数据

年份	年降雨 (mm)	6-8 月降雨 (mm)	年平均气温 (℃)	6-8 月平均气温 (℃)
2001	580.6	436.3	14.98	25.57
2002	288.0	143.7	14.23	26.47
2003	1057.2	486.7	13.28	24.67
2004	1038.5	802.1	13.82	24.69
2005	982.6	818.1	13.22	25.73
2006	581.9	424.6	14.31	26.09
2007	765.5	509.8	14.05	25.07
平均	756.3	517.3	13.98	25.47

致 谢

本论文是在导师黄大卫教授的精心指导以及各位同仁、朋友、家人的支持帮助下完成的，从论文的选题、试验设计到论文的撰写，都凝聚着导师的心血与智慧。虽然在这个大集体中仅仅与大家相处了短暂的四年，但这必将是我一生的财富。在求学的这段时间里，导师那严谨的科研态度、忘我的工作精神、对学科前沿的敏锐把握、对科学事业的执着追求都令人无比钦佩，尤其是认认真真做人、踏踏实实做事的人生态度必将让我受益终生。在导师的悉心指导和支持下，博士阶段的研究工作得以顺利完成，在此论文完成之际，谨向尊师表示衷心的感谢！

感谢昆虫学科的各位老师在学习和生活上给予的诸多关心和帮助，感谢泰山管委的领导和同事们对本课题的大力帮助和支持。

感谢我的家人一直做我身后的坚强后盾，他们多年来在生活、学习等方面的真诚理解、无私关怀、热情鼓励，才使我的学习和研究工作得以顺利完成。

最后，感谢所有参与本论文评审和答辩的老师及同学们！

申卫星

2012年4月

攻读博士学位期间发表论文情况

- 1、申卫星，郭慧玲，迟元凯，谭亚军，刘会香，黄大卫，美国白蛾在泰山的适生性分析，林业科学，2012（6）
- 2、申卫星、刘会香、郭慧玲、谭亚军、郭维菊，泰山重大林业有害生物预警技术研究，泰安市科技进步三等奖，2011.9
- 3、申卫星、刘会香、郭慧玲、谭亚军、郭维菊、李秀芬、张兴强，泰山重大林业有害生物预警技术研究，山东省林业科技贡献奖二等奖，2011.9