应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2011,48(4):1017—1023

基于 CLIMEX 和 GIS 的南松大小蠹在中国的适生性分析*

姚 剑[1**] 杜 宇[2] 马 平[3] 李生贵[2] 蒋小龙[2] 陈雪娇[1] 张 萍[1] 李云飞[1]

(1. 安徽出入境检验检疫局 合肥 230022; 2. 云南出入境检验检疫局 昆明 650228;
3. 云南省农业科学院 昆明 650224)

摘 要 南松大小蠹 *Dendroctonus frontalis* Zimmermann 是美洲地区危害松杉类针叶树种的蛀干害虫。本文采用 CLIMEX 模型与 ArcGIS 分析相结合的预测方法,通过确定南松大小蠹的 CLIMEX 气候适应性参数,分析了南松大小蠹在我国的适生范围,并利用南松大小蠹的最低致死温度对适生范围进行限制。结果表明南松大小蠹在我国可能适宜其定殖的地区范围较广,其中在山东、河南、陕西、安徽中北部、山西南部、湖北中北部、四川部分地区和云南部分地区非常适合该小蠹的生存。

关键词 南松大小蠹,CLIMEX,GIS,最低致死温度,适生性分析

Prediction on potential distributions of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann in China using CLIMEX and GIS

YAO Jian[1**] DU Yu[2] MA Ping[3] LI Sheng-Gui[1] JIANG Xiao-Long[1]
CHEN Xue-Jiao[1] ZHANG Ping[1] LI Yun-Fei[1]

(1. Anhui Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Hefei 230022, China;
2. Yunnan Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Kunmin 650228, China;
3. Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunmin 650224, China)

Abstract *Dendroctonus frontalis* Zimmermann is one of the most economically important pests of *Pinus* plantations in America. Based on the biology of *D. frontalis* and climate data, potential suitable habitat for *D. frontalis* in China was predicted using CLIMEX and ArcGIS. The results show that *D. frontalis* has a wide potential distribution in China. Predicted optimum areas for establishment were most of north and southwestern China, including Shandong, Henan, Shanxi, Anhui, Shanxi, Hubei, Sichuan, Yunnan.

Key words *Dendroctonus frontalis*, CLIMEX, GIS, low lethal temperature, suitable distribution area

南松大小蠹 *Dendroctonus frontalis* Zimmermann 属鞘翅目小蠹科(Coleoptera: Scolytidae),原产美国,是松杉类针叶树种的蛀干害虫(Furniss and Carolin,1977)。该虫不仅直接对松杉类针叶树造成危害,而且传播蓝霉菌(blue-stain fungi),破坏树干木质部,阻止水分通道,造成树木死亡(Thatcher and Conner,1985)。南松大小蠹的暴发具有周期性,大约 6 到 12 年有一次大暴发(Belanger *et al.*,1993),1970 年在美国佛罗里达州对当地的火炬松造成的损害约 1.36 万 hm^2,至 1995 年增加到 3.27 万 hm^2(Brown,1999);1960 年到 1990 年间,南松大小蠹每年对美国地区松科林木造成的损失达 9 亿美元(Price *et al.*,1992)。

近年来,我国木材进口量逐年攀升,大小蠹检出的种类和数次随着贸易的发展不断增大(姚剑等,2009):1987—1991 年我国口岸从进口原木中截获云杉大小蠹、黄杉大小蠹、红脂大小蠹;2001 年 6 月从来自意大利集装箱的木箱板中截获西松

* 资助项目:安徽省自然科学基金项目(070411029)、国家质检总局科研项目(2009IK268,2010IK249)、安徽出入境检验检疫局科研项目(AHKT-04-2008)。

**E-mail: msyao@126.com

收稿日期:2010-03-10,接受日期:2011-03-09

大小蠹;2002 年在进口生牛皮的木托盘上检出山松大小蠹;2004 年从来自英国的木质包装上检出云杉大小蠹;2006 年从进口木包装中截获穆氏大小蠹;从美国进口原木中截获落叶松大小蠹;在加拿大产杉木上截获黄杉大小蠹;同年检疫截获的大小蠹属昆虫还有间大小蠹,红翅大小蠹等。而外来入侵生物红脂大小蠹从 20 世纪末传入中国后,对中国已造成严重的危害。作为大小蠹属中的重要危害种的南松大小蠹,其潜在寄主范围广、原产地与中国环境相似,一旦传入我国,势必对我国的林业生态安全构成直接危害,造成生态和旅游经济的双重破坏。因此,很有必要开展对南松大小蠹在中国的潜在适生区研究。

本文利用 CLIMEX 生态位模型和 ArcGIS 对南松大小蠹在我国的适生区进行了预测,为我国对南松大小蠹制定检疫措施和防止该虫入侵提供指导。

1 材料与方法

1.1 数据及来源

1.1.1 南松大小蠹生物学特性 生物学及分布数据的收集与分析,获取利用 CLIMEX 软件分析南松大小蠹适生性所需要的大部分参数。南松大小蠹的整个生长周期为 26 ~ 60 d,在佛罗里达州每年可发生 7 ~ 9 代(Foltz and Meeker, 2001)。成虫在 20 ~ 45℃ 的温度条件下都能迁飞(Hoebeke *et al.*, 2009)。成虫最远能够迁飞 3 km,在其扩散时期,大约有一半的成虫能够迁飞 0.69 km (Turchin and Thoeny, 1993)。南松大小蠹越冬忍受的极端最低温度为 -16℃ (Ungerer *et al.*, 1999);发育起点温度为 7 ~ 10℃ (Hoebeke *et al.*, 2009),最适发育温度 25℃ (Ayres, 2005),发育最高温度 32℃ (Nicholas *et al.*,2008);在 15 ~ 35℃ 下完成发育需要 29 ~ 100 d (Thatcher, 1960, 1967)。

1.1.2 环境数据 采用 CLIMEX 软件系统中自带的世界气象数据库,涵盖 2 031 个地点(中国 85 个)的气象数据,包括月平均降水量、日最高气温、日最低气温、9:00 和 15:00 的空气相对湿度;中国气象数据采自 1952—2000 年 756 个中国气象站点(不含台湾省)的地面气候资料,筛选其中 616 个气象站点数据,包括完整月平均气温、月最高温、月最低温、月平均降水量和月平均湿度,通过 CLIMEX 的 MetManager 转换,与上述 85 个点的数据一起,建立中国气候数据库。

1.2 适生性方法

1.2.1 CLIMEX 分析 本研究采用气候模型 CLIMEX(澳大利亚科学与工业研究组织, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization,CSIRO 开发)的地点比较功能,分别设定种群增长指数(GI)、抑制指数(SI)和综合抑制作用(SX)参数,最后生成生态气候指数(EI);生态气候指数 EI 大于 0,则表示该地点适合目标物种生存;如果 EI 等于 0,则表示不适宜生存,EI 的大小反映了适合度的大小,预示着种群密度的大小(Sutherst *et al.*, 2004)。根据该原理,参考红脂大小蠹在我国适生分布的风险等级(杨星科, 2005),预测南松大小蠹在中国的潜在分布。

1.2.2 最低温限制 冬季低温对昆虫的不利影响往往是非常广泛的,昆虫对低温的忍耐能力和所经历的低温影响其存活和进一步的发育、繁殖、扩散(MacDonald *et al.*, 2000; 景晓红和康乐, 2002)。对于害虫而言,耐寒性及其越冬策略是其在新的区域建立种群并成为当地害虫的关键因素之一(任璐等,2006)。

Ungerer(1999)测定南松大小蠹在 -15℃ 时,死亡率达到 90%,考虑该虫在寄主的韧皮部越冬,韧皮部温度与环境温度有 1 ~ 2℃ 的差别,采用 -16℃ 为南松大小蠹的最低致死温度。

本文利用 ArcGIS9.2 对我国(不含台湾省)的气候条件以 -16℃ 为界限进行划分,将年平均最低温大于 -16℃ 的分布区作为南松大小蠹的顺利越冬的限制条件,最终结合 CLIMEX 分析结果得出南松大小蠹在我国的潜在适生区。

1.2.3 适生结果的地图化 通过 CLIMEX 所分析的适生数据以离散点的形式存在,只能表现该气候数据点的南松大小蠹适生情况。为了更加准确地反应南松大小蠹在我国的适生情况,通过栅格插值方法对已知的适生数值来推算未采样点值。

本文利用地理信息系统软件 ArcGIS9.2 的空间分析模块(ArcGIS Spatial Analyst)中能够清晰表现出不同风险级别适生区之间过渡特征的反距离加权插值法(IDW) (吴秀芹等,2007; 阳文锐等, 2007),对适生情况进行处理,插值结果将生成一个连续的表面,最终获得南松大小蠹在我国的区

域适生范围。

ArcGIS 9.2 利用 1∶400 中国地图(从国家基础地理信息中心 http://nfgis.nsdi.gov.cn/下载)作为分析底图。

2　结果与分析

2.1　南松大小蠹生物学参数确定

南松大小蠹的起源地为北美洲,所以选择美国作为参数值的调试地区。按照 CLIMEX 的要求,输入参数,运行 CLIMEX 模型中的 Compare Locations 模块,计算 EI 值。通过 EI 生成的南松大小蠹在美国的模拟分布图与其实际分布区域比较,反复调整各个参数值,最终得到南松大小蠹的 17 个气候适应性参数(表 1)。

表 1　预测南松大小蠹在中国潜在适生区的 CLIMEX 相关参数

Table 1　CLIMEX parameters for estimate the potential distribution of *Dendroctonus frontalis* in China

参数 Parameter	参数缩写 Abbreviations	修正后参数值 Modified values
发育起点温度	DV0	10
适宜温度下限	DV1	15
适宜温度上限	DV2	32
限制性高温	DV3	44
限制性最低湿度	SM0	0.1
适宜湿度下限	SM1	0.6
适宜湿度上限	SM2	0.9
限制性最高湿度	SM3	0.95
有效发育积温	PDD	430
冷胁迫开始积累阈值	TTCS	2.0
冷胁迫累积速度	THCS	0.0001
热胁迫开始累积阈值	TTHS	35
热胁迫累积速度	THHS	0.02
干胁迫开始积累值	SMDS	0.2
干胁迫积累速率	HDS	0.003
湿胁迫开始积累阈值	SMWS	0.96
湿胁迫积累速度	HWS	0.006

利用这些参数的模拟结果显示,在美国 173 个气象点中,EI 值大于 0,即能定殖的地方有 152 个,由图 1 可以看出,在有气候数据的州中,南松大小蠹几乎都能适生。CLIMEX 的模拟结果与南松大小蠹在美国的实际分布区达到最大的吻合度。

2.2　CLIMEX 的预测结果

利用 CLIMEX 模型对南松大小蠹在我国的适生区进行了预测,其适生结果见图 2。根据南松大小蠹在北美洲的为害程度,将南松大小蠹在我国潜在分布区划分为 4 个适生等级,即非适生区(EI = 0)、低度适生区(0 < EI ≤ 10)、中度适生区(10 < EI ≤ 20)、高度适生区(EI > 20)。

将 EI 值通过 ArcGIS 插值处理后,如图 3 所示,南松大小蠹在我国的适生区主要为华中、华北、东北和西南的大部分地区。

2.3　南松大小蠹在我国的适生区分布

利用 ArcGIS9.2 对我国(包括台湾)的年平均最低温以 -16℃ 为界限进行划分,得到我国年平均最低温大于 -16℃ 的区域分布图。以 CLIMEX 分析数据作为南松大小蠹适生区分布的主要因素,以南松大小蠹最低致死温度为限制条件,利用 GIS 对寄主分布气候预测图与最低温限制区域叠加分析,最终得到南松大小蠹在我国的潜在适生图(图 4)。

南松大小蠹的潜在适生区主要集中在华南、华中和西南地区,这些地区寄主丰富,气候适宜,非常有利于南松大小蠹的适生。

高度适生区: 河南、陕西、安徽中北部、山西南部、湖北中北部、山东部分地区、四川部分地区和云南部分地区。

中度适生区: 辽宁、北京、天津、河南、陕西北部、甘肃南部、山西北部、江苏北部、安徽中部、湖北中部、四川、西藏部分地区、云南、贵州西部和广西西部。

低度适生区: 内蒙古南部、新疆北部部分地区、青海东部部分地区、西藏部分地区、重庆、贵州、广西中部、湖南部分地区、福建南部部分地区和海南。

非适生区: 黑龙江、吉林、新疆大部、西藏大部、内蒙古西部、青海、甘肃中北部、广西东部、湖南大部、江西、广东、福建、浙江、上海、海南部分地区。

3　讨论

有害生物风险分析(PRA)是通过评价生物或其它科学的和经济的证据,以确定生物体是否是能造成不可接受风险的有害生物,以及确定对其

图 1　南松大小蠹在美国的 CLIMEX 分析图

Fig. 1　CLIMEX map in USA of *Dendroctonus frontalis*

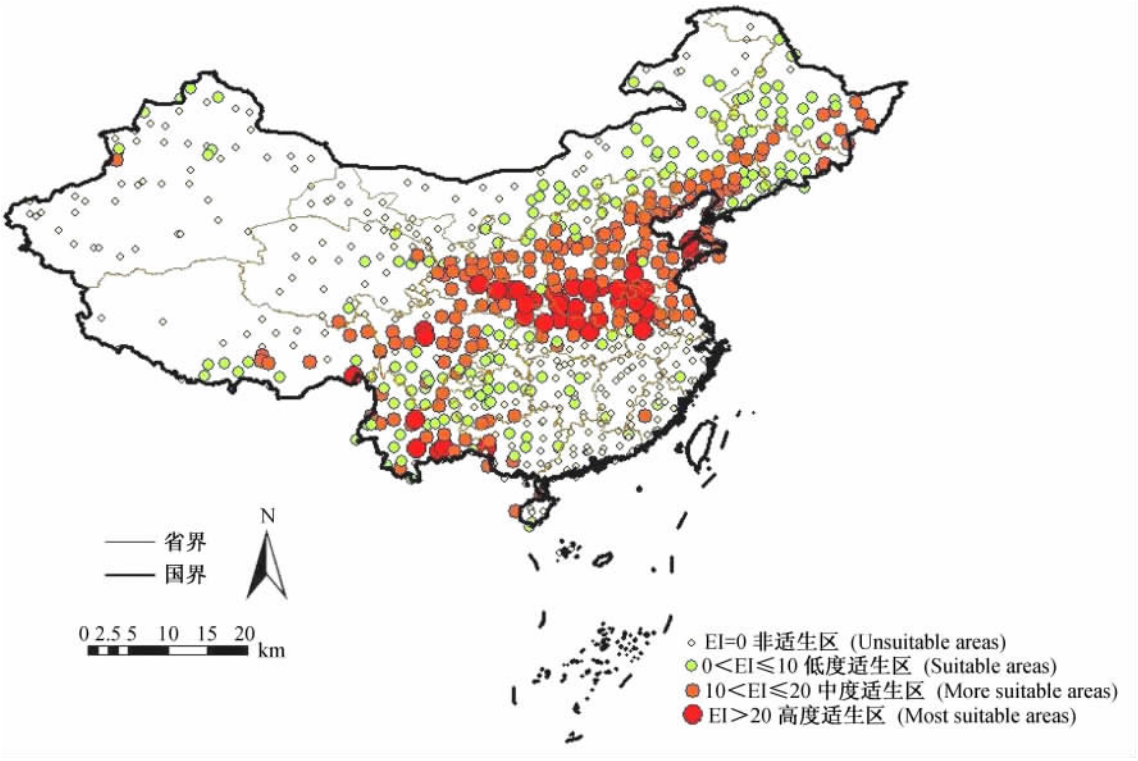

图 2　利用 CLIMEX 预测的南松大小蠹在中国的 EI 值

Fig. 2　The EI value of *Dendroctonus frontalis* in China by CLIMEX

采取何种植物检疫措施的力度的过程(FAO, 1996)。有害生物风险分析对于保护本国农业生产安全,促进其农产品出口具有十分重要的作用,是解决农产品贸易中有关检疫问题争端的重要技术措施。

有害生物风险分析方法主要有定性和定量两类分析方法。有害生物风险分析定量方法主要是对有害生物的适生性分析。外来入侵物种适生性分析近年来成为热点研究课题,目前分析手段主要是利用以气候为主要影响因素的生态位模型,包括 BIOCLIM, DOMAIN、ENFA、GARP、MAXENT 和 CLIMEX 等。CLIMEX 应用的原理是基于物种分布主要由气候因素决定,通过 EI 值表述该物种在预测地能否定殖。CLIMEX 在预测物种潜在地

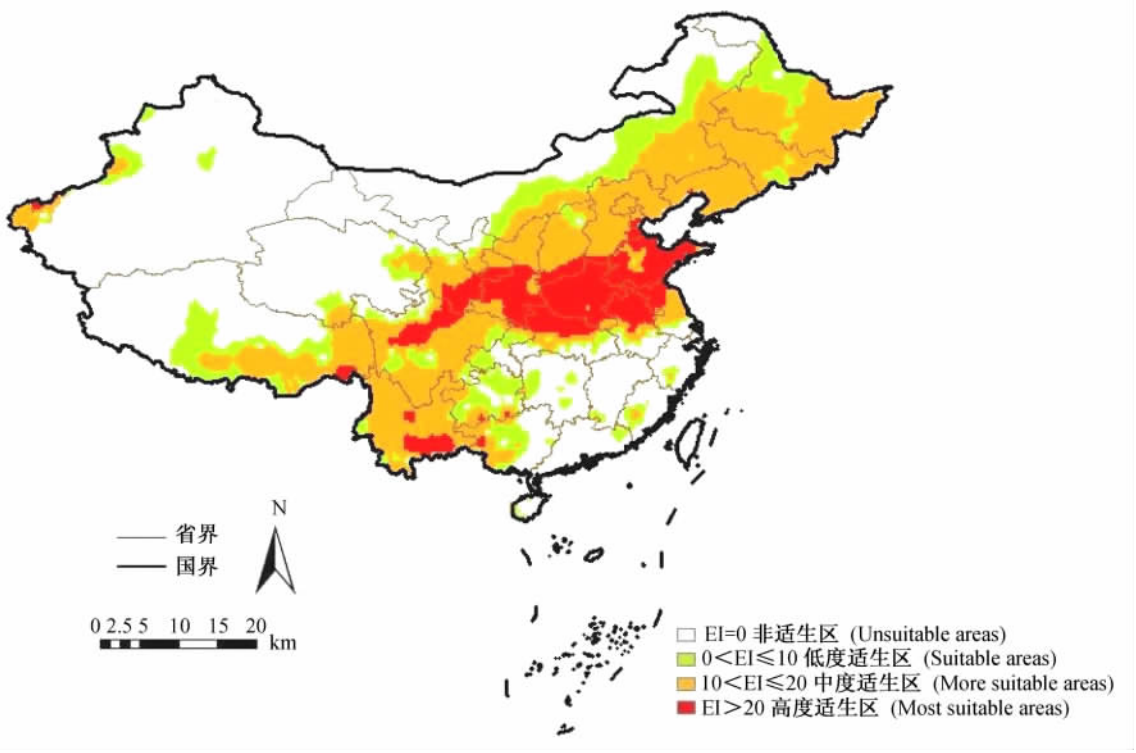

图 3　CLIMEX 预测的南松大小蠹在中国的潜在适生区分布

Fig. 3　The map of potential distribution of *Dendroctonus frontalis* in China by CLIMEX

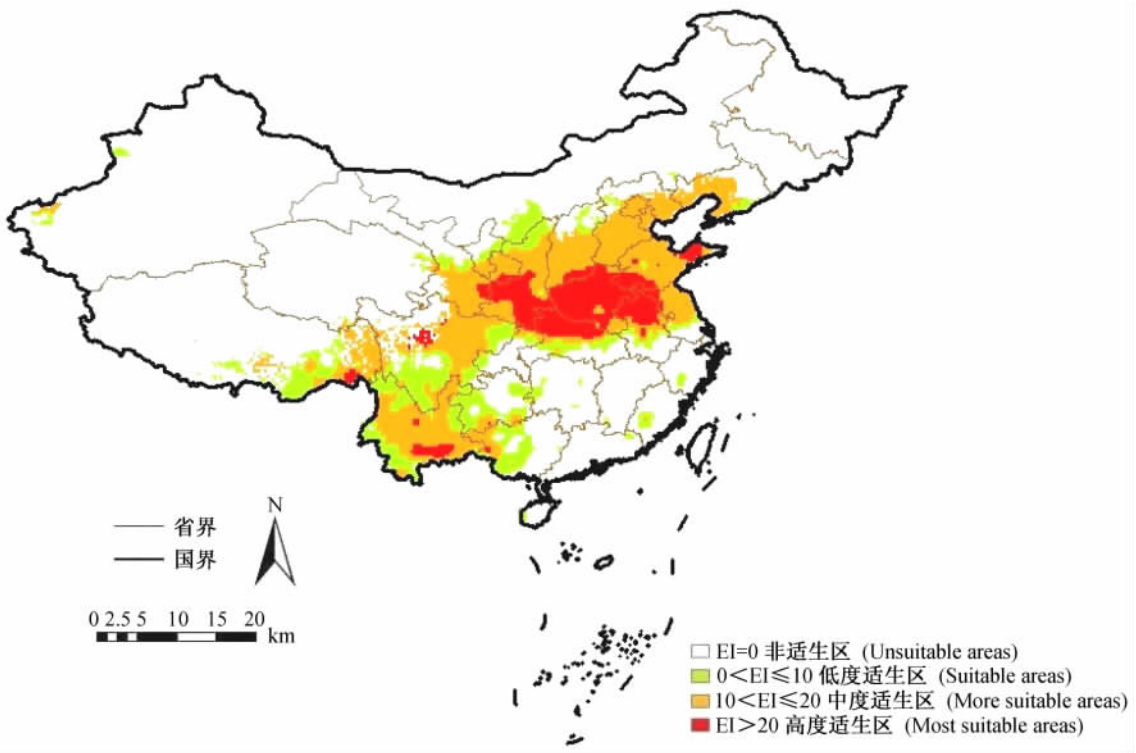

图 4　南松大小蠹在中国的潜在适生区分布

Fig. 4　The map of potential distribution of *Dendroctonus frontalis* in China

理分布范围过程中是一个动态的模拟模型，尤其当相关研究数据有限时，它能够根据有限的信息，做出很有价值的预测（侯柏华和张润杰，2005；程俊峰等，2006；杜予州等，2006）。因此在预测物种分布方面得到了广泛应用。

本研究利用 CLIMEX 模型结合 GIS 软件对南松大小蠹在我国的适生区进行了研究。根据初步的预测结果，南松大小蠹在我国可能适宜其定殖的地区范围较广，在 701 个气象站点中，有 419 能够适生。其中在我国的河南、陕西、安徽中北部、山西南部、湖北中北部、山东部分地区、四川部分地区和云南部分地区等 100 个气候观测点的生态条件非常适合该小蠹的生存。

以南松大小蠹能忍耐的最低温对 CLIMEX 的分析结果进行限制，更加准确地反应南松大小蠹在我国的潜在适生区分布。

通过 EI 值对南松大小蠹在美洲的实际分布区域比较验证，结果显示南松大小蠹实际分布地区的预测结果与实际分布基本吻合，表明本研究中的预测结果能够反映南松大小蠹在我国的潜在适生区，为我国降低或控制南松大小蠹的入侵风险和在潜在风险地区对其采取相应的监测和防治措施提供科学依据。

本文没有考虑寄主对南松大小蠹适生区的影响。南松大小蠹的主要寄主报道为松属植物的 8 个种，在我国没有分布，只有部分引种；但该虫严重为害或大暴发时还会再为害其它松属植物（Ungerer *et al.*，1999）。资料显示，一些大小蠹在入侵一个地区后，寄主可能会改变和扩大。松属植物以喜马拉雅－横断山区为分化中心，向各方向扩散，几乎广布我国的各样分布型或地理区域（王荷生，2000），而且我国目前不断从国外引入松科树种栽培，增加了该虫入侵定殖的几率。因此，只要气候和其它条件能够满足南松大小蠹的生活，南松大小蠹在适生地就能找到适应的寄主进行繁殖为害，一旦南松大小蠹入侵我国，其适生寄主可以扩大，为害我国本地的松属植物。

外来种在新的生境中的居留，是环境因子和生物因子互作的结果（高增祥等，2003），不仅取决于当地的气候和寄生，也取决于它本身的生物学特性以及与其它生物的竞争、捕食关系。本研究所用的环境数据只包含气温、湿度、降水等常见环境变量，未考虑海拔、地形等非生物因素的影响，而除寄主外，土著种的竞争、天敌的捕食、当地生态的多样性程度等也影响预测结果的精确性，因此，在下一步试验中，应综合考虑其他影响南松大小蠹适生的因素，并通过不同的预测模型对其可能的适生区进行深度分析，使预测结果更加准确。

参考文献（References）

Ayres MP，2005. The effect of temperature on the *Dendroctonus frontalis* community. http://www.dartmouth.edu/~mpayres/posters/LukePoster.pdf. 1.

Belanger RP，Hedden RL，Lorio PL，1993. Management strategies to reduce losses from the southern pine beetle. *Southern Journal of Applied Forestry*，17：150—154.

Brown MJ，1999. Florida's forests，1995. Resour. Bull. SRS-48. Asheville，NC：U. S. Department of Agriculture，Forest Service，Southern Research Station. 83.

程俊峰，万方浩，郭建英，2006. 西花蓟马在中国适生区的基于 CLIMEX 的 GIS 预测. 中国农业科学，39(3)：525—529.

杜予州，郭建波，郑福山，任顺祥，2006. 刺桐姬小蜂在中国的适生区分析. 植物保护，32(1)：63—66.

FAO，1996. Publication No. 2. Guidelings for Pest Risk Analysis. International Standards for Phytosanitary Measures. 6.

Foltz JL，Meeker JR，2001. The southern pine beetle in Florida. http://eny3541. ifas. ufl. edu/pbb/spb_info. htm.

Furniss RL，Carolin VM，1977. *Dendroctonus* species of the western United State. Western forest insects. Miscellaneous publication 1339. Washington D. C.：U. S. Department of Agriculture，Forest Service. 346.

高增祥，季荣，徐汝梅，谢宝瑜，李典谟，2003. 外来种入侵的过程、机理和预测. 生态学报，23(3)：559—570.

Hoebeke ER，Kirkendall L，Jordal BH，2009. Diagnostic Methods for Southern and Mountain Pine Beetles *Dendroctonus frontalis*（Southern）and *Dendroctonus ponderosae*（Mountain）. LastPaDIL-Plant Biosecurity Toolbox. http://www.padil.gov.au/pbt.4

侯柏华，张润杰，2005. 基于 CLIMEX 的桔小实蝇在中国适生区的预测. 生态学报，25(7)：1569—1574.

景晓红，康乐，2002. 昆虫耐寒性研究. 生态学报，22(12)：2202—2207.

MacDonald JR，Head J，Bale JS，Walters KFA，2000. Cold tolerance，overwintering and establishment potential of *Thrips palmi*. *Physiol. Entomol.*，25(2)：159—166.

Nicholas AF，Sudipta S，Nicholas KS，Billings RF，Ayres

MP, 2008. Ayres1 temperature extremes, density dependence, and southern pine beetle (Coleoptera: Curculionidae) population dynamics in east Texas. *Environ. Entomol.*, 37(3): 650—659.

Price TS, Doggett C, Pye JL, Smith B, 1992. A history of southern pine beetle outbreaks in the southeastern United States. Sponsored by the Southern Forest Insect Work Conference. The Georgia Forestry Commission, Macon, GA. 65.

任璐, 陆永跃, 曾玲, 2006. 寄主对桔小实蝇耐寒性的影响. 昆虫学报, 49(3): 447—453.

Sutherst RW, Maywald GF, Bottomley W, Bourne A, 2004. Climex2 User Guide. Australia: Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization Publishing. 105.

Thatcher RC, 1960. Bark beetles affecting southern pines: a review of current knowledge. USDA Forest Service Southern Forest Experiment Station Occasional Papers. 1—25.

Thatcher RC, 1967. Winter brood development of southern pine beetle in southeast Texas. *J. Econ. Entomol.*, 60: 599—600.

Thatcher RC, Conner MD, 1985. Identification and biology of southern pine barkbeetles. USDA Forest Service, Washington, Handbook. 14.

Turchin P, Thoeny WT, 1993. Quantifying dispersal of southern pine beetles with mark-recapture experiments and a diffusion mode. *Ecol. Appl.*, 3: 187—198.

Ungerer MJ, Ayres MP, Lombardero MJ, 1999. Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *J. Biogeogr.*, 26(6): 1133—1145.

王荷生, 2000. 中国松科植物的分布型和区系分析. 植物研究, 20(1): 12—19.

吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改, 张正祥, 董贵华, 2007. ArcGIS 地理信息系统应用与实践(下册). 北京: 清华大学出版社. 331—332.

阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 陈展, 李锋, 2007. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用. 应用生态学报, 18(9): 2013—2018.

杨星科, 2005. 外来入侵种——强大小蠹. 北京: 中国林业出版社. 74—87.

姚剑, 殷玉生, 余晓峰, 张萍, 郑海松, 李云飞, 张龙娃, 2009. 世界大小蠹研究. 安徽农业科学, 37(6): 7533—7535 转 7606.

(Rueppell *et al.*, 2007a)。而越冬蜜蜂,寿命可长达 3~6 个月(Münch *et al.*, 2008)。蜂群中环境改变可以加速、延迟甚至逆转哺育蜂与采集蜂过渡时间(Robinson, 1992; Huang and Robinson, 1996),比如在除去蜂群中所有的哺育蜂后,蜂群中有部分老龄工蜂将转换为哺育蜂,这种个体发育行为的逆转影响了老化的几种生理指标,而这些改变直接延缓了其老化过程(Amdam *et al.*, 2005)。本文将从老化的不同层面综述蜜蜂寿命的可塑性。

1 蛋氨酸与老化

有研究表明,动物的寿命与其摄入的营养水平有着直接的联系。饮食限制是唯一一种能延长大多数动物寿命的共同因素(Houtkooper *et al.*, 2010)。然而饮食限制能延长寿命的机理目前还不清楚,很可能是缺乏某些特定氨基酸或者某些特定氨基酸之间的相互作用而导致动物的寿命发生改变。给老鼠饲喂蛋氨酸含量较低的日粮能提高其寿命,并能减少与衰老相关的病状(Houtkooper *et al.*, 2010)。在果蝇的日粮中添加各类必需氨基酸可以显著缩短其寿命,而单一的去除必需氨基酸中的蛋氨酸则可以消除这种缩短寿命的影响(Houtkooper *et al.*, 2010)。这表明果蝇日粮中的蛋氨酸含量对果蝇寿命有很大调控作用。

蜂王与工蜂均由遗传背景相同的受精卵发育而来,但两者的寿命却迥然不同,很有可能是与蜂王和工蜂摄入的食物差异有关(蜂王与工蜂的食物分别为蜂王浆与蜂粮)。而造成寿命差异的内部机理是否也是由蜂王浆与蜂粮中的蛋氨酸或其它氨基酸的含量差异所致,目前尚不清楚。

2 内分泌信号与老化

由于激素对昆虫生长、发育与行为有显著影响,因此内分泌腺功能、激素反馈调节和激素的靶组织敏感性等研究已成为老龄病学研究感兴趣的领域(Tatar *et al.*, 2003; Flatt *et al.*, 2005; Kenyon, 2005)。胰岛素/类胰岛素生长因子(IIS)信号通路在真核生物中是一条重要、且高度保守的信号传导途径,并且与寿命调控有关(Böhni *et al.*, 1999)。在果蝇、老鼠、蠕虫和人类,突变或沉默这些途径的元件通常会导致其体型与生育力下降,而寿命则得以延长(Kimura *et al.*, 1997; Abe *et al.*, 1998; Böhni *et al.*, 1999; Suh *et al.*, 2008)。蜜蜂的胰岛素信号,除了对雌性级型分化发育有关外,也被认为是决定蜂王与工蜂寿命差异的一个关键因素(Wheeler *et al.*, 2006; Corona *et al.*, 2007)。蜜蜂至少有 2 种胰岛素受体(InR-1 和 InR-2)和 2 种类胰岛素肽(ILP-1 和 ILP-2),并且含有与线虫转录因子 DAF-16 或果蝇 FOXO 系同源的基因,而这些基因与线虫或果蝇的老化和寿命调控相关(Remolina and Hughes, 2008)。

在蚊子中,胰岛素能诱导卵黄蛋白原(Vg)基因的表达,而 RNA 干扰沉默蚊子胰岛素受体(InR)、蛋白激酶(涉及到 IIS 通路的激酶)可以抑制胰岛素诱导 Vg 表达(Roy *et al.*, 2007)。

最近研究表明,胰岛素/类胰岛类生长因子信号(insulin insulin-like signaling, IIS)通路与卵黄蛋白原(Vg)和保幼激素(JH)相互作用调控蜜蜂的寿命,而且有可能正是这些相互作用产生了既长寿又高繁殖力的蜂王(Corona *et al.*, 2007)。

在果蝇中,JH 与 Vg 丰度是正相关的,热量丰富的饮食能增加 IIS 通路信号,从而导致寿命缩短(Remolina and Hughes, 2008)。然而在蜜蜂中,JH 与 Vg 丰度是负相关的:蜂王低水平 JH 会引起 Vg 滴度上升,而采集蜂高水平 JH 会引起 Vg 滴度下降(Remolina and Hughes, 2008)。丰富的营养(蜂王和哺育蜂)产生了低表达的类胰岛素肽和胰岛素受体(Remolina and Hughes, 2008)。Corona 等(2007)提出了蜂王长寿和高繁殖力的分子机理模型,高营养导致低水平的 JH,低水平 JH 诱导 Vg 的高表达,高水平的 Vg 压制了 IIS 通路(图 1)。在该模型中,IIS 通路的低信号解释了蜂王的长寿,同时能维持高 Vg 水平和高繁殖力。

3 氧化应激与老化

老化的自由基理论认为,氧化应激是反映机体老化的重要指标之一,机体内活性氧簇(ROS)是导致老化的主要驱动力(Harman, 1956, 1981)。ROS 甚至可以氧化蛋白质、脂肪和 DNA,触发多种多样的 DNA 损伤、蛋白膜降解和信号中断,最终导致细胞坏死或凋亡性死亡(Harman, 1956, 1981; Esterbauer and Cheeseman, 1990; Stadtman, 1992; Sohal *et al.*, 1993; Richter *et al.*, 1995; Møller and Loft, 2004; Dalle-Donne *et al.*, 2006; Muller