

气候变化对油松毛虫在全球适生区的影响*

邹 娅^{1**} 郭思维¹ 周玉婷¹ 王 涛² 宗世祥^{1***} 葛雪贞^{3***}

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市门头沟区林业工作站, 北京 102300;

3. Department of Integrative Biology, University of Guelph, Ontario N1G 2W1)

摘 要 【目的】为明确油松毛虫 *Dendrolimus tabulaeformis* 在中国的潜在适生区, 降低油松毛虫扩散带来的经济和生态损失。【方法】本研究利用 CLIMEX 软件, 并结合油松毛虫和寄主油松的已知地理分布和生物学数据, 分别预测油松毛虫和寄主油松在历史气候条件下 (1987-2016) 和未来气候条件下 (2071-2100) 在全球的潜在分布区, 以评估气候变化分别对油松毛虫和油松适生程度的影响; 本研究叠加寄主分布, 以评估寄主油松对油松毛虫全球适生性的影响。【结果】研究结果显示, 在历史和未来气候条件下, 油松毛虫在全球各洲均有适生区分布 (除南极洲), 低度适生区分布范围较广, 高度适生区仅分布于局部地区, 如美国和中国。并且在未来气候变化情景下, 油松毛虫潜在适生区有北移的趋势, 总适生面积增加。寄主植物仅在局部地区限制油松毛虫的分布。【结论】本研究明确了气候变化和寄主植物对油松毛虫气候适生区的影响, 可为未来油松毛虫的监测防治提供一定的理论依据。

关键词 油松毛虫; 气候变化; 潜在适生区; 寄主植物, CLIMEX4.0.0

Climate change impacts on the global potential distribution of *Dendrolimus tabulaeformis*

ZOU Ya^{1**} GUO Si-Wei¹ ZHOU Yu-Ting¹ WANG Tao²
ZONG Shi-Xiang^{1***} GE Xue-Zhen^{3***}

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Mentougou Forestry Station, Beijing 102300, China;

3. Department of Integrative Biology, University of Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada)

Abstract [Objectives] The study aims to clarify the potential distribution of *Dendrolimus tabulaeformis* in China to reduce the economic and ecological losses caused by the spread of the pest. [Methods] In this study, we used CLIMEX software, combined with the known geographical distribution and biological data of *Dendrolimus tabulaeformis* and *Pinus tabulaeformis*, to predict the global potential distribution of the pest and its host plant under historical climatic condition (1987-2016) and future climatic condition (2071-2100). Besides, we analyzed the impact of climate change on the climatic suitability of the pest and its host plant. We also identified the impacts of host plant on the climatic suitability of the pest. [Results] The results show that the pest had a suitable distribution area in all continents (except Antarctica) under historical and future climatic conditions. The marginal region was widely distributed, while the very favorable region was only distributed in some areas, such as the United States and China. Furthermore, the potential habitat of the pest tended to move northward, and the total suitable area increased in the future. The host plant only had slight impacts on the potential distribution of the pest. [Conclusion] We clarified the impact of climate change on the potential distribution of *D. tabulaeformis* and provided a theoretical basis for the future monitoring and control of the pest.

Key words *Dendrolimus tabulaeformis*; climate change; potential distribution; host plant, CLIMEX4.0.0

*资助项目 Supported projects: “十三五”国家重点研发计划 (2018YFD0600201)

**第一作者 First author, E-mail: ou_ya@bjfu.edu.cn

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zongsx@126.com; xuezhen@uoguelph.ca

收稿日期 Received: 2018-10-26; 接受日期 Accepted: 2019-06-24

油松毛虫 *Dendrolimus punctatus tabulaeformis* (Tsai et Liu), 属鳞翅目 Lepidoptera, 枯叶蛾科 Lasiocampidae, 为中国本地种, 其生活史因环境和地域不同而存在地理差异, 发生世代为 1-3 代, 在辽宁、山西、陕西等多数地区一年发生一代(严静君, 1988)。油松毛虫作为我国北方针叶林重要的食叶害虫, 主要分布在我国华北和华中地区, 现已分布在辽宁、北京、河北和甘肃等 13 个省份(侯陶谦, 1987; 李长森等, 2003)。它以幼虫为害松林, 在幼虫越冬期结束后上树取食针叶, 主要危害油松 *Pinus tabulaeformis*, 也危害马尾松 *Pinus massoniana*、黑松 *Pinus thunbergii*、华山松 *Pinus armandii* 和白皮松 *Pinus bungeana* 等(侯陶谦, 1987)。松毛虫危害较轻时会使松林成片枯黄, 远观似被火烧, 发生猖獗时会使大面积松林死亡(侯陶谦, 1987), 我国每年平均有超过 4 000 万 hm^2 的松林遭到松毛虫的危害, 造成的损失高达数亿元(陈昌洁, 1990), 而油松毛虫在所有松毛虫造成的危害中位居第 4, 给林业带来了巨大的经济损失, 严重危害了生态安全(杜凯名等, 2016)。

全球气候变暖已为国际社会所公认。根据国际耦合模式比较计划(CMIP5)第 5 次评估报告(AR5), 与 1986-2005 年相比, 预计本世纪末在不同温室气体排放情景下全球大气温度将升高 0.3-4.8 $^{\circ}\text{C}$, 在未来全球变暖的背景下, 极端天气事件发生的频率也在变化, 极端暖事件进一步增多, 极端冷事件进一步减少, 全球海平面进一步上升(Allen et al., 2013)。对变温动物昆虫而言, 以气温上升为显著特征的气候变化对昆虫很多方面均有显著的影响。气候变化会影响昆虫的越冬存活率; 增加昆虫发生季的有效积温, 从而使得发生世代数增加; 影响昆虫的迁移扩散和分布, 使得昆虫向高纬度和高海拔分布等(董兆克和戈峰, 2011)。因此, 在全球气候变暖背景下, 明确气候变暖对油松毛虫适生区的影响具有重要意义。

已有相关学者采用灰色预测模型、Leslie 矩阵模型、PDFS 系统、多元回归法、期距法、ARMA(p, q)模型、主成分分析和最大熵模型等方法

针对油松毛虫的发生期、发生量、发生范围、发生面积、危害程度等方面进行了预测(屠泉洪等, 1990; 张素芬, 1991; 张素芬和夏乃斌, 1992; 屠泉洪等, 1993; 张海松, 1993; 段君博等, 1997; 于景利和李翠芹, 1999; 宋雄刚等, 2016)。这些研究有助于明确油松毛虫的发生特点, 但目前还尚未对油松毛虫在全球范围内的适生区开展研究, 因此明确油松毛虫在全球范围内的适生区分布以及未来气候变化对其潜在地理分布的影响, 对其科学防控具有重要的意义。本研究基于历史和未来气象数据, 结合油松毛虫的地理分布和生物学资料, 利用 CLIMEX 对该虫在全球范围内的潜在地理分布进行预测, 以期对油松毛虫的检疫防控提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究模型及软件

1.1.1 CLIMEX 模型 CLIMEX 是一个动态模拟模型, 最早版本发布于 1985 年, 由来自于澳大利亚联合科学与工业研究组织(简称 CSIRO) Sutherst 和 Maywald 建立(1985)。该模型通过利用物种已知地理分布数据和相关生物学数据来确定适合物种的 CLIMEX 参数, 从而预测物种的潜在适生区(Kriticos et al., 2015)。

生态气候参数(Ecoclimatic index, EI)用来评价物种的适生性, 由三部分指数计算得到: 生长指数(Growth indices, GI)、胁迫指数(Stress Indices, SI)和限制条件(Limitation conditions)。生长指数主要取决于湿度指数(Moisture indices, MI)、温度指数(Temperature indices, TI), 表明种群在适宜季节的增长潜力。胁迫指数包括干胁迫(Dry stress, DS)、湿胁迫(Wet stress, WS)、热胁迫(Heat stress, HS)、冷胁迫(Cold stress, CS)以及 4 个交互胁迫指数, 用来表示不良环境对物种存活的影响。在 CLIMEX 的限制条件中, EI 值除了受到生长指数和胁迫指数的影响, 还会受到有效积温(PDD)和滞育指数(Diapause indices, DI)等参数的影响(Kriticos et al., 2015)。

EI 值用来描述物种在某地的适生程度,取值范围为 0-100。EI 值越接近于 0 表明该地区越不适合物种生存;EI 值接近于 100 表示该地环境条件非常接近于理想的环境条件。一般当 EI 值大于 30 时,表明该地区属于高度适生区,气候条件适合该物种生存 (Kriticos *et al.*, 2015)。

1.1.2 ArcMap 软件 ArcGIS 是由美国环境系统研究所 (Environment System Research Institute, ESRI) 于 1978 年开发的 GIS 系统,是 ArcGIS Desktop 用户桌面组件专业制图软件之一。本研究借助 ArcGIS 空间分析模块中的反距离加权插值 (Inverse distance weighted, IDW) 分析功能,对从 CLIMEX 软件输出的 EI 值做插

值分析,并对 EI 值进行划分,利用专题制图功能得到油松毛虫在历史和未来气候条件下在全球范围内的适生区分布图。本研究所用图层来自于 <http://www.diva-gis.org/Data>。

1.2 数据收集

1.2.1 油松毛虫和寄主油松地理分布数据 根据已发表文献,明确了油松毛虫在全球的地理分布情况,如图 1 (A) 所示,目前油松毛虫主要分布于我国的辽宁、北京、河北、山东、山西和陕西等地 (刘彦林等, 2000; 路常宽等, 2000; 张三亮等, 2003; 韩瑞东等, 2005; 刘朝辉等, 2012; 王银翠等, 2016)。油松毛虫寄主油松主

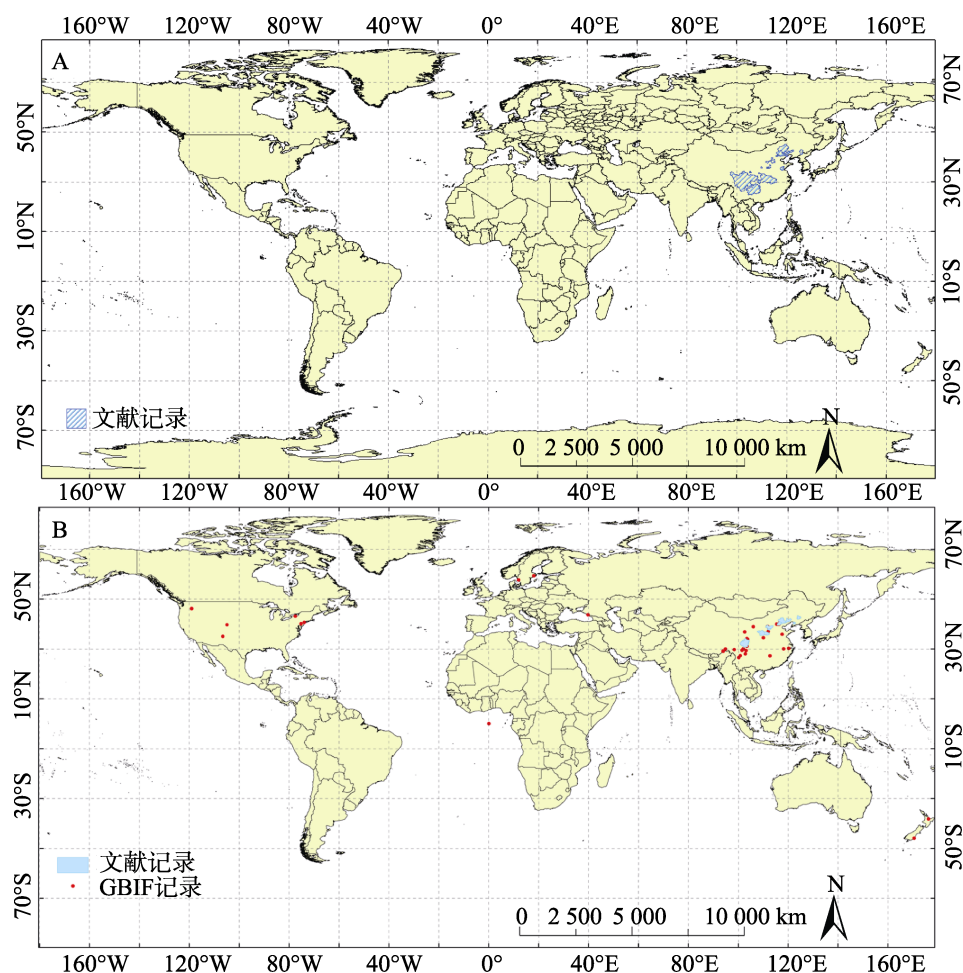


图 1 油松毛虫和寄主植物油松在全球已知分布地

Fig. 1 Geographical distribution of *Dendrolimus tabulaeformis* and host plant *Pinus tabulaeformis*

A. 油松毛虫在全球已知分布地。阴影代表从文献获得的分布记录。

B. 寄主植物油松在全球已知分布地。红色的点代表从 GBIF 获得的寄主植物分布记录。

A. Geographical distribution of *Dendrolimus tabulaeformis*. Shadows represent distribution records obtained from literature.

B. Geographical distribution of host plant *Pinus tabulaeformis*. Red points represent distribution records from GBIF.

要分布于我国的北部地区,如图 1(B)所示,图中分布数据来自于已发表文献(张慧东等,2015;何如梦等,2018;刘建荣,2018;范慧涛等,2019)和 GBIF(Global Biodiversity Information Facility)。

1.2.2 气象数据 CLIMEX 所需气象数据包括 5 类,分别为月平均降水量、日最高气温、日最低气温、9:00 和 15:00 的日相对湿度。从东英格利亚大学提供的 CRU TS4.01(1901-2016)气象数据提取 1987-2016 年间气象数据作为历史气象数据,该气象数据集具有较高的分辨率($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)(Harris *et al.*, 2017)。IPCCAR5 第 5 次国际耦合模式比较计划(CMIP5)考虑了 4 种未来温室气体排放情景,包括极低强水平的温室气体减缓情景 RCP2.6,两个中等稳定化情景 RCP4.5 和 RCP6.0 和温室气体排放不受限制的情景 RCP8.5(IPCC, 2014)。根据 CMIP5 第 5 次报告,在 RCP4.5 情景下全球温度在 2081-2100 年上升范围为 1.1-2.6℃,与各国升温控制上线的目标(2℃)更加贴合(IPCC, 2014),因此本研究选取 RCP4.5 温室气体排放情景,并基于 CMIP5 提供的 29 个 GCMs 模式,计算不同模式模拟的未来气候数据,将各个模式模拟的气象数据平均值作为最终未来气象数据(2071-2100)。

1.3 研究方法

1.3.1 总体分析流程 本研究主要基于气象数据,油松毛虫和寄主植物油松的已知分布地和生物学参数,利用 CLIMEX 的“Compare Locations”功能,并且结合 ArcGIS 的插值功能对油松毛虫和寄主植物油松在全球范围内的潜在地理分布进行预测。分别根据油松毛虫和其寄主油松的生物学资料及两者的已知分布地,设置油松毛虫和寄主植物油松的 CLIMEX 初始参数值,根据软件的预测结果不断对参数进行调试,最终使得预测的油松毛虫和寄主植物油松的已知分布地分别与实际分布地一致,确定适用于油松毛虫和寄主植物油松的最终 CLIMEX 参数值。分别从 CLIMEX 软件中导出两者在历史和未来气候条件下的 EI 值,利用 ArcGIS 的反距离插值分析功

能对两种气候条件下的 EI 值进行插值分析,最终制得在历史和未来气候变化情景下油松毛虫和寄主植物油松在全球的气候适生区分布图,分析气候变化对油松毛虫和寄主植物油松在全球范围内潜在适生区的影响。此外,本研究通过叠加寄主分布,获得历史和未来气候条件下叠加寄主后和未叠加寄主油松毛虫在各站点 EI 差值,以评估寄主对油松毛虫在全球适生性的影响。

1.3.2 参数调节

1.3.2.1 油松毛虫 CLIMEX 参数设置 油松毛虫在中国分布地的气候带属于暖温带半湿润气候和温带大陆性季风气候(王仁合等,2011;宋雄刚等,2016),因此参照软件自带的温带物种模板和专性滞育模板数据并结合油松毛虫的生物学数据以及地理分布调节参数。油松毛虫最终参数值如表 1 所示。

温度参数:根据夏乃斌等(1987)的研究结果,油松毛虫的发育起点温度为 7.074℃,将 DV0 设置为 7℃;康晓强等(2007)的研究表明,油松毛虫卵孵化为幼虫的适宜温度为 25-30℃,并结合温带和滞育模版中的适宜温度范围,将 DV1 和 DV2 分别设置为 18℃ 和 30℃;已知油松毛虫的卵在 34℃ 的高温下不能发育(韩瑞东等,2005),因此结合模板将 DV3 设为 35℃。

湿度参数:根据植物的永久萎蔫点为 0.1,将 SM0 设置为 0.1,并结合模板,分别将 SM1, SM2 和 SM3 设置为 0.7、1.5、2。依据 DV3,将 TTHS 设为 36℃,并结合温带模板,将 THHS 设为 0.005。由于油松毛虫在 3-4 龄期滞育以越冬(李兆麟和贾凤友,1989),本研究没有设置冷胁迫参数。

胁迫参数:根据 SM0 和温带模板数据,将 SMDS 和 HDS 分别设置为 0.1 和 -0.005。依据 SM3 和模板数据,分别将 SMWS 和 HWS 设置为 2 和 0.002。

有效积温:依据夏乃斌等(1987)的研究结果,并结合油松毛虫在吉林省的分布,将 PDD 设置为 1900。

滞育参数：根据李兆麟和贾凤友（1989）的研究，油松毛虫在北京地区的临界光周期为 14.5 h，结合滞育模板参数，将 DPD0 设置为 14。根据朱程浩等（2016）的研究，油松毛虫的最低活动温度为 6℃，以及依据汤文高（2012）的研究，日平均温度为 10℃ 左右时越冬幼虫上树取食，并且结合模板数据，分别将 DPT0 和 DPT1 设置为 7 和 10。结合模板数据将 DPD 设置为 90。因油松毛虫滞育以越冬，将 DPSW 设置为 0。

以 CLIMEX 软件计算得出的 EI 值评价油松毛虫的适生程度，EI 值的划分范围为：非适生区，EI=0；低度适生区 $0 < EI \leq 10$ ；中度适生区 $10 < EI \leq 20$ ；高度适生区 $EI > 20$ 。

1.3.2.2 油松 CLIMEX 参数设置 油松毛虫主要危害油松，寄主油松是华北地区常见的针叶树种，广泛分布于暖温带地区，因此在 CLIMEX 中选择温带模板作为调参数的参照模板。

温度参数：根据油松的冬芽在日均温达到 5℃ 以上时开始萌动（雷振民等，1993），其种子萌发的生物学起点温度为 10℃，并结合其已知分布地的日均温度范围，将 DV0 设置为 8℃；根据边银霞（2008）对油松种子萌发的生态学研究，在恒温处理下油松种子萌发的最适温度为 25℃ 和 30℃，在 20℃ 和 25℃ 变温处理下，油松种子的萌发和出苗率最高，因此将 DV1 和 DV2 分别设置为 20℃ 和 30℃；在温度超过 35℃ 时，油松种子的萌发会受到抑制，因此将 DV3 设置为 35℃。

湿度参数：根据油松耐干旱的特性（吕振刚等，2019）将 SM0 设置为 0.05；根据其在河北的已知分布地，将 SM1 设为 0.15，SM2 设为 1；根据其在新西兰的分布情况将 SM3 设为 1.5。

胁迫参数：根据油松能耐 -25℃ 的低温（马桂萍和胡继元，2008），将 TTCS 设置为 -25℃，THCS 设置为 -0.01；油松在超过 40℃ 高温胁迫下，针叶的光合机构会受损严重，将 TTHS 设置为 40℃，结合模板参数将 THHS 设置为 0.005，并与已知分布地相符；根据 SM0 将 SMDS 设置为 0.05，结合模板参数将 HDS 设置为 -0.005；根据 SM3 将 SMWS 设置为 1.5，此外结合模板参

数，将 HWS 设置为 0.002。

有效积温：将 PDD 设置为 0。

光照指数：油松为喜光植物，光照对油松种子萌发具有明显的促进作用（边银霞等，2008），并且根据边银霞（2008）的研究显示，在 25℃ - 35℃ 温度范围内，光照 10 h 油松种子的萌发速率高于黑暗条件，将 LT1 和 LT0 分别设置为 10 h 和 15 h。

1.3.3 数据统计分析 本研究基于历史和未来气象数据，并结合 ArcGIS 反距离插值分析功能制得油松毛虫和油松在全球适生分布图，评估两者在历史和未来气候条件下在全球分布情况；本研究并制得未来和历史气候条件下油松毛虫和油松 EI 差值图以评估气候变化对两者潜在适生区的影响。

本研究参照 Zou 等（2019）的方法评估油松的可获得性（ θ ）对油松毛虫在全球分布的影响。 θ 的计算基于油松的 EI_p 值，方程为 $\theta = (EI_p/h)^q / (1 + (EI_p/h))^q$ 。参数 q 代表曲线的斜率，参数 h 代表 θ 等于 0.5 时 EI_p 的值，本文中 q 和 h 的值分别为 $q = 7$ ， $h = 14$ 。本研究将 θ 乘以油松毛虫原始 $EI(EI_D)$ 值得到油松毛虫新的 EI 值（ EI_D' ）。本研究通过分别制得两种气候条件下 EI_D' 和 EI_D 之间的 EI 差值图以评估油松的可获得性对油松毛虫在全球适生性的影响。

2 结果与分析

2.1 历史气候条件下油松毛虫在全球的气候适生区

历史气候条件下油松毛虫在全球范围内的气候适生区如图 2（A）所示。从图 2 中可以看出，油松毛虫在全球各个大洲（除南极洲）都有分布，气候适生区广泛。在全球范围内，总的适生面积占全球陆地面积的 14.61%。其中低度适生区所占比例最大，为 8.88%；中度适生区所占面积比例最小，为 1.65%；高度适生区所占面积比例为 4.08%。在历史气候条件下，油松毛虫在各洲适生面积如图 2（C）所示，具体分布描述如下所述。

表 1 油松毛虫和油松 CLIMEX 参数
Table 1 CLIMEX parameter value of *Dendrolimus tabulaeformis* and *Pinus tabulaeformis*

CLIMEX 参数 CLIMEX parameter	温带 Temperate	专性滞育 Obligate diapause	油松毛虫 <i>Dendrolimus punctatus</i>	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>
发育起点温度 (DV0) Lower temperature threshold (°C)	8	8	7	8
适宜温度下限 (DV1) Lower optimum temperature ()	18	18	18	20
适宜温度上限 (DV2) Upper optimum threshold ()	24	26	30	30
发育最高温度 (DV3) Upper temperature threshold ()	28	31	35	35
发育需要的最低土壤湿度 (SM0) Lower soil moisture threshold	0.25	0.3	0.1	0.05
适宜发育需要的土壤湿度下限 (SM1) Lower optimal soil moisture	0.8	0.7	0.7	0.15
适宜发育需要的土壤湿度上限 (SM2) Upper optimal soil moisture	1.5	1	1.5	1
发育需要的土壤最高湿度 (SM3) Upper soil moisture threshold	2.5	2	2	1.5
热胁迫开始积累的阈值 (TTHS) Heat stress temperature threshold ()	30		36	40
热胁迫积累速率 (THHS) Heat stress temperature rate (week ⁻¹)	0.005		0.005	0.005
干胁迫开始积累的阈值 (SMDS) Dry stress threshold	0.2		0.1	0.05
干胁迫开始积累的速率 (HDS) Dry stress rate (week ⁻¹)	-0.005		-0.005	-0.005
湿胁迫开始积累的阈值 (SMWS) Wet stress threshold	2.5		2	1.5
湿胁迫开始积累的速率 (HWS) Wet stress rate (week ⁻¹)	0.002		0.002	0.002
有效积温 (PDD) Effective degree days	600	0	1 900	0
滞育诱导日照长度 (DPD0) Diapause induction daylength		11	14	
滞育诱导温度 (DPT0) Diapause induction temperature		5	7	
滞育解除温度 (DPT1) Diapause termination temperature		7	10	
完成滞育的日期期限 (DPD) Diapause development days		90	90	
夏季滞育或冬季滞育指示值 (DPSW) Diapause summer or winter indicator		0	0	
种群增长为零的日照时数 (LT1) Daylength at no growth				10
种群增长最快的日照时数 (LT0) Daylength at maximum growth				15

油松毛虫在北美洲的适生区主要分布于南部，总适生面积所占比例为 16.06%，其中低度适生区面积所占比例最大，为 7.66%；中度和高度适生区分别占北美洲总面积的 1.47%和 6.93%。低度适生区主要集中在美国的西部和中部，以及墨西哥的大部分区域；中度适生区分布于美国的中部和墨西哥中部；高度适生区大部分分布于美国的东部。

油松毛虫在南美洲总适生面积所占比例为 9.05%，低度、中度和高度适生区分别占南美洲总面积的 5.24%、1.43%和 2.39%，其中低度适生区所占南美洲面积比例最大。低度适生区分布

于玻利维亚的中部和南部，阿根廷的北部和中部，以及智利中部地区；中度和高度适生区都分布于阿根廷中部。

油松毛虫在欧洲总适生面积为 28.03%。低度适生区所占比例最大，为 19.74%；高度适生面积最小，为 2.38%；中度适生面积为 5.91%。油松毛虫的气候适生区主要分布于欧洲南部，其中低度适生区分布于西班牙、土耳其、乌克兰、保加利亚和罗马尼亚的大部分地区；中度适生区位于法国、意大利的大部分地区、罗马尼亚的西部；高度适生区位于法国的西部和意大利北部等地区。

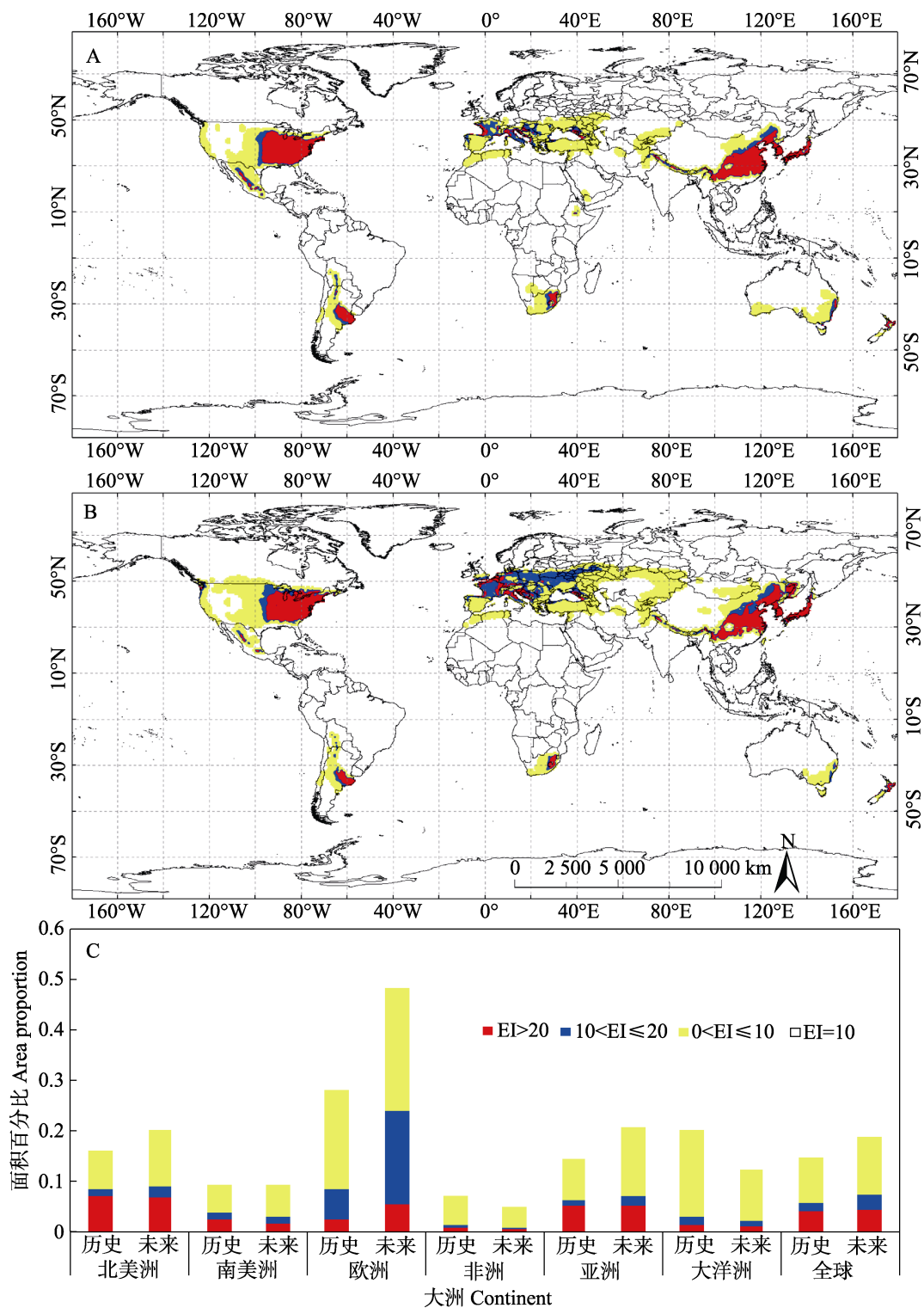


图 2 油松毛虫在全球的潜在适生区分布情况

Fig. 2 The potential global distribution of *Dendrolimus tabulaeformis*

A. 历史气候条件下油松毛虫在全球适生区；B. 未来气候条件下油松毛虫在全球适生区；

C. 历史和未来气候条件下油松毛虫在全球各洲适生面积。

A. The potential global distribution of *D. tabulaeformis* under historical climate conditions. B. The potential global distribution of *D. tabulaeformis* under future climate conditions. C. Area of the potential global distribution of *D. tabulaeformis* under historical and future climate conditions.

油松毛虫在非洲总适生区面积比例为 7.12%, 其中大部分适生区为低度适生区, 所占面积比例为 5.94%, 中度和高度适生区所占面积比例分别为 0.52% 和 0.66%。低度适生区分布于摩洛哥和南非的大部分区域, 阿尔及利亚北部区域和博茨瓦纳的西南部区域; 中度适生区分布于南非的中部; 高度适生区分布于南非的东部。

亚洲总陆地面积的 14.33% 为油松毛虫的气候适生区, 其中低度适生区所占面积比例最大, 中度适生区所占面积比例最小, 分别为 8.1% 和 1.26%; 高度适生区所占面积比例为 4.97%。低度适生区分布于哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和阿富汗的东部区域、伊朗和巴基斯坦的北部、以及中国的北部和南部等地区; 中度适生区仅分布于中国的北部区域; 高度适生区分布于中国东部和日本的大部分区域。

油松毛虫在大洋洲的总适生面积占总陆地面积的 20.23%, 低度、中度和高度适生区分别占总适生面积的 17.44%、1.48% 和 1.32%。低度适生区分布于澳大利亚的南部和东部, 以及新西兰的大部分区域; 中度适生区仅分布于澳大利亚东南部的小部分区域; 高度适生区分布于新西兰的北部。

历史气候条件下, 油松毛虫高度适生区主要分布于北美洲和亚洲, 低度适生区主要分布于欧洲, 而南美洲、非洲和大洋洲的适生区分布较少。

2.2 未来气候条件下油松毛虫在全球的气候适生区

利用模拟的未来气象数据制得油松毛虫在全球的潜在气候适生区分布图, 如图 2(B) 所示。总体来看, 油松毛虫在未来气候条件下的适生区有北移的趋势。总的适生面积占全球总陆地面积的 18.84%, 低度适生区所占面积为 11.46%, 中度适生区所占面积为 3.08%, 高度适生区面积所占面积比例为 4.3%。在未来气候条件下, 油松毛虫在各洲的适生面积如图 2(C) 所示, 具体分布描述如下所述。

油松毛虫在北美洲适生范围北移, 适生区主要分布于北美洲的南部。总适生面积比例为

20.21%, 低度适生区所占面积比例最大为 11.41%, 中度和高度适生区所占面积比例分别为 2.19% 和 6.62%。未来气候条件下油松毛虫在北美洲适生区分布范围基本和历史气候条件下的分布范围一致, 低度、中度和高度适生区所占面积比例分别为 6.3%、1.12% 和 1.63%。在欧洲, 油松毛虫总的适生范围明显变大, 呈现北移的趋势, 总的适生面积为 48.31%, 低度、中度和高度适生区所占面积比例分别为 24.34%、18.6% 和 5.38%。油松毛虫在非洲的适生区范围明显缩小, 位于非洲的南部区域, 总的适生面积为 4.73%, 低度、中度和高度适生区所占面积比例分别为 3.97%、0.28% 和 0.49%。油松毛虫在亚洲的适生范围扩大, 适生区总体也呈现北移的趋势, 总的适生面积为 20.68%, 低度、中度和高度适生区所占面积比例分别为 13.78%、1.73% 和 5.17%。油松毛虫在大洋洲的适生范围缩小, 总的适生面积比例为 12.09%, 低度、中度和高度适生区所占面积比例分别为 9.9%、1.32% 和 0.88%。

在未来气候条件下, 油松毛虫在北美洲、欧洲和亚洲的总适生面积增加, 而非洲和大洋洲的总适生面积减小, 南美洲的总适生面积未发生变化。高度适生区主要分布于北美洲和亚洲, 而中度适生区主要分布于欧洲。

2.3 两种气候条件下油松毛虫在全球的气候适生区变化

2.3.1 两种气候条件下油松毛虫气候适生区面积变化 在历史和未来气候条件下, 油松毛虫在各大洲不同适生程度地区的面积存在差异。未来气候条件下, 北美洲总适生面积增加了 4.15%, 其中低度适生区和中度适生区的面积分别增加 3.74% 和 0.72%, 而高度适生区面积减少了 0.31%。南美洲总的适生面积没有变化, 其中低度适生区面积增加了 1.06%, 而中度和高度适生区面积分别减少了 0.3% 和 0.76%。欧洲的适生面积变化最大, 不同适生程度的面积都有所增加, 总的适生面积增加了 20.28%。非洲总的适生面积减少了 2.39%, 低度、中度和高度适生区的面积分别减少 1.97%、0.24% 和 0.17%。亚洲总的

适生面积增加 6.35%，低度、中度和高度适生区的面积分别增加 5.68%、0.47%和 0.2%。大洋洲总的适生面积减少 8.14%，各个适生程度的面积都有所降低，其中低度适生区面积降低幅度最大，低度，中度和高度适生区面积分别减少 7.54%、0.16%和 0.44%。

综上所述，在未来气候条件下，各洲不同适生程度面积变化存在差异。总适生面积在欧洲增加的比例最大，低度适生区在大洋洲的减小比例最大，中度和高度适生区在欧洲增加比例最大。

2.3.2 气候变化对油松毛虫适生程度的影响

将历史和未来气候条件下的 EI 值输出，我们得到两种气候条件下的 EI 差值并对其进行插值处理，制得油松毛虫在全球范围内适生程度变化图，如图 3 (A) 所示。由图 3 可知，气候变化将在全球范围内影响油松毛虫的适生程度。油松毛虫在美国的东北部适生程度增加，在未来气候条件下非适生区域变为适生区；美国的东部和墨西哥的部分区域适生程度降低，特别是在墨西哥，一些中度或者高度适生的区域变为低度适生

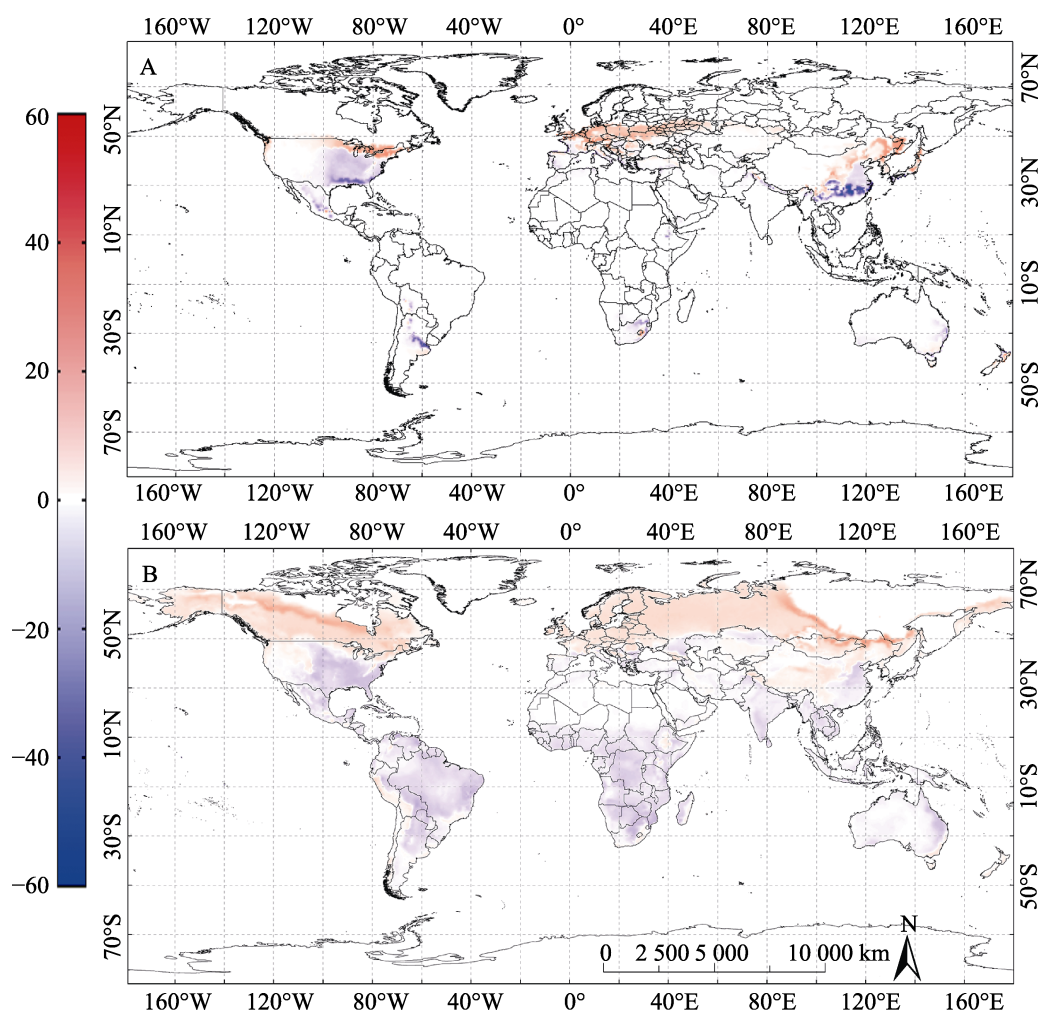


图 3 气候变化对油松毛虫和寄主油松适生程度的影响

Fig. 3 The impacts of climate change on the climatic suitability of *Dendrolimus tabulaeformis* and *Pinus tabulaeformis*

A. 气候变化对油松毛虫在全球适生区的影响；B. 气候变化对寄主油松在全球适生区的影响。红色代表 EI 差值为正，表示适生程度增加，蓝色代表 EI 差值为负，表示适生程度降低，颜色的深浅表示 EI 差值变化程度的大小。

A. The impacts of climate change on the climatic suitability of *D. tabulaeformis*; B. The impacts of climate change on the climatic suitability of *P. tabulaeformis*. Red represents a positive EI difference; blue represents a negative EI difference; the depth of color in different regions indicates the sensitivity to climate change.

区。油松毛虫在欧洲南部的适生程度明显增加,一些低度适生区变为中度适生区,中度适生区变为高度适生区。气候变化对油松毛虫在非洲的适生程度影响较小。适生程度变化的地区在亚洲主要集中于中国和日本,中国的北部和中部地区以及日本的大部分地区,油松毛虫的适生程度明显增加,一些不适生的区域变得适生;而在中国的南部地区,适生程度明显降低,一些高度适生的区域变为低度适生区,低度适生区变为非适生区。气候变化对油松毛虫在澳大利亚的适生性影响较小,澳大利亚南部的低度适生区变为非适生区,而在新西兰的北部,适生程度有所增加,一些低度适生区变为高度适生区。

综上可知,油松毛虫的适生程度在美国的北部、中国的中部和东北部、日本的大部分地区以及欧洲南部大部分国家和地区有所增加,而在美国的东部,墨西哥大部分地区和中国的南部有所减小。适生程度在南半球各洲变化不大。

2.4 寄主油松对油松毛虫分布的影响

历史气候条件下寄主油松在全球的潜在适生区分布如图 4(A)所示,其在全球各洲的适生面积如图所示 4(C)。预测结果显示,其广泛分布于各个大洲,总适生面积占全球陆地面积的 72.21%,低度适生区所占面积比例最大,中度适生区所占面积比例最小,高度适生区主要分布于北美洲,亚洲和欧洲。未来气候条件下油松在全球的潜在分布区如图 4(B)所示,在未来气候条件下,油松在全球适生区总面积变化较小,高度适生区和低度适生区面积增加,中度适生区面积减少。气候变化对油松全球适生性的影响如图 3(B)所示,在气候变化条件下,油松的潜在适生区有北移的趋势,并且气候变化将显著影响其在全球的适生性,主要表现为油松在北美洲,欧洲和亚洲的部分适生区适生性增加,而在南美洲,非洲和大洋洲的大部分地区,油松的适生性降低。总之,在历史和未来气候条件下,油松在全球的适生区广泛,气候变化将显著影响其在全球的气候适生性,气候适生性主要在北半球增加,在南半球降低。

在两种气候条件下,分别值得油松毛虫在叠加寄主情况下和未叠加寄主情况下 EI 差值图(图 5),以评估气候变化对油松毛虫适生性的影响。结果显示,寄主油松对油松毛虫全球适生性的影响很小,主要在美国的南部,中国的南部和墨西哥的部分地区限制油松毛虫的潜在分布。

3 结论

历史和未来气候条件下油松毛虫在全球的潜在适生区的预测结果表明,油松毛虫在各个大洲均有适生区分布,低度适生区分布范围较广,高度适生区分布于局部地区,如美国和中国。并且在未来气候变化情景下,油松毛虫潜在适生区有北移的趋势。根据寄主油松在全球适生区预测结果显示,在历史和未来气候条件下,油松在全球的适生区广泛,广泛分布于各大洲;气候变化将显著影响其在全球的气候适生性。

本研究明确了气候变化对油松毛虫气候适生区的影响,气候变化会使得油松毛虫在全球适生面积增加,对不同区域适生程度也有一定的影响。寄主油松对油松毛虫气候适生性影响较小,仅在局部地区限制油松毛虫的分布。预测结果可为未来油松毛虫的监测预警提供一定的理论依据。

4 讨论

本研究使用的历史气象数据来源于澳大利亚东英格利亚大学提供的 CRU TS4.01 气象数据集,包含 64 943 个气象站点,站点数相对较多且分布均匀。未来气象数据来源于 CMIP5 提供的 29 个 GCMs 模式所计算所得的气象数据平均值。准确多样的气象数据为预测结果的准确性提供了数据保障。然而气候模式的不确定性,参数设置的人为主观性,物种也可能对气候变化产生适应性进化,这些都可能对预测结果带来一定的影响。

油松毛虫的主要寄主为油松,根据 GBIF (Global Biodiversity Information Facility, <https://www.gbif.org>) 上记录的油松分布信息,明确油

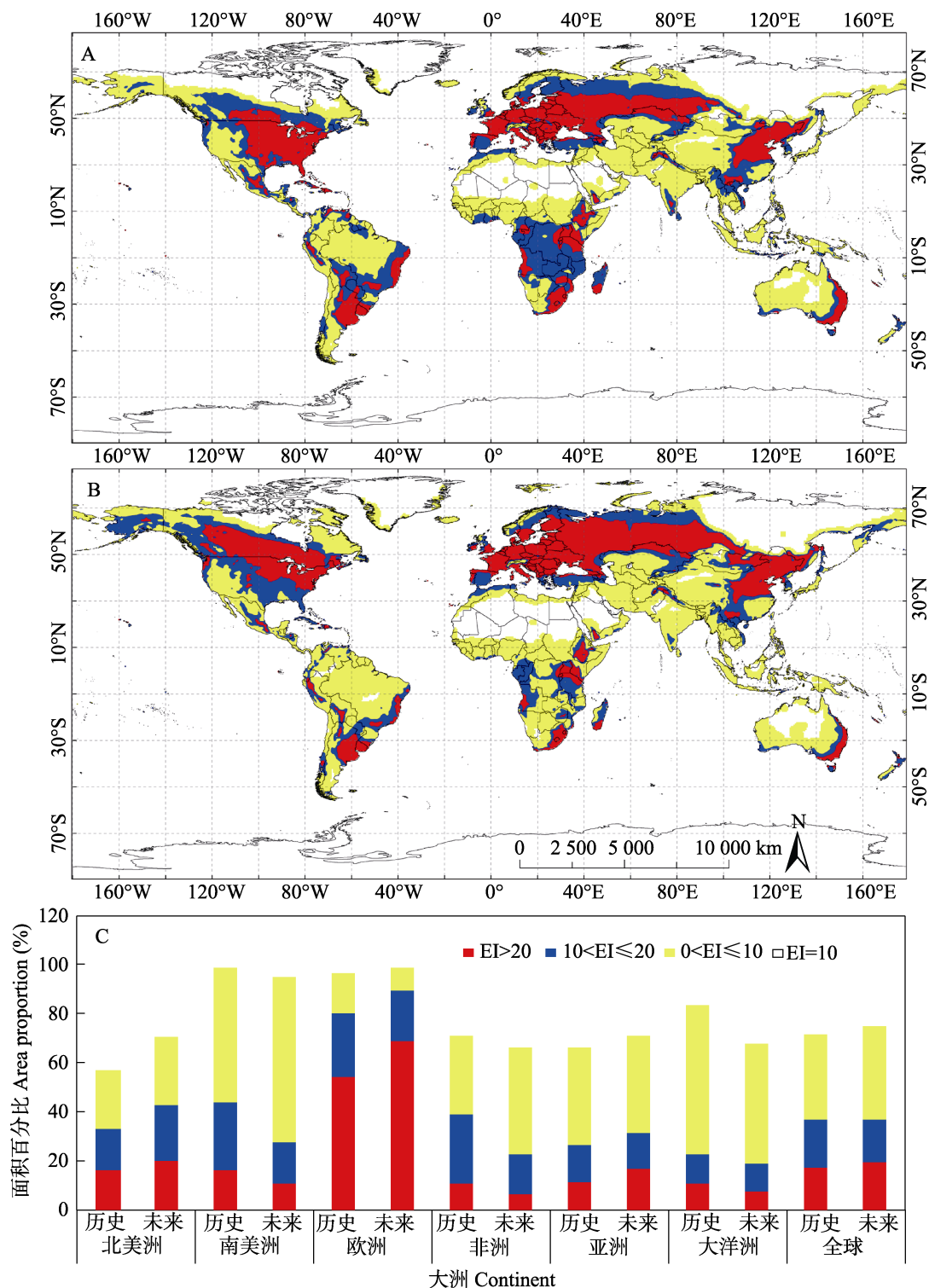


图 4 油松全球气候适生区分布情况

Fig. 4 The projected global potential distribution of *Pinus tabulaeformis*

A. 历史气候条件下油松在全球潜在适生区；B. 未来气候条件下油松在全球潜在适生区；

C. 历史和未来气候条件下油松在全球各洲适生面积。

A. The potential global distribution of *P. tabulaeformis* under historical climate conditions. B. The potential global distribution of *P. tabulaeformis* under future climate conditions. C. Area of the potential global distribution of *P. tabulaeformis* under historical and future climate conditions.

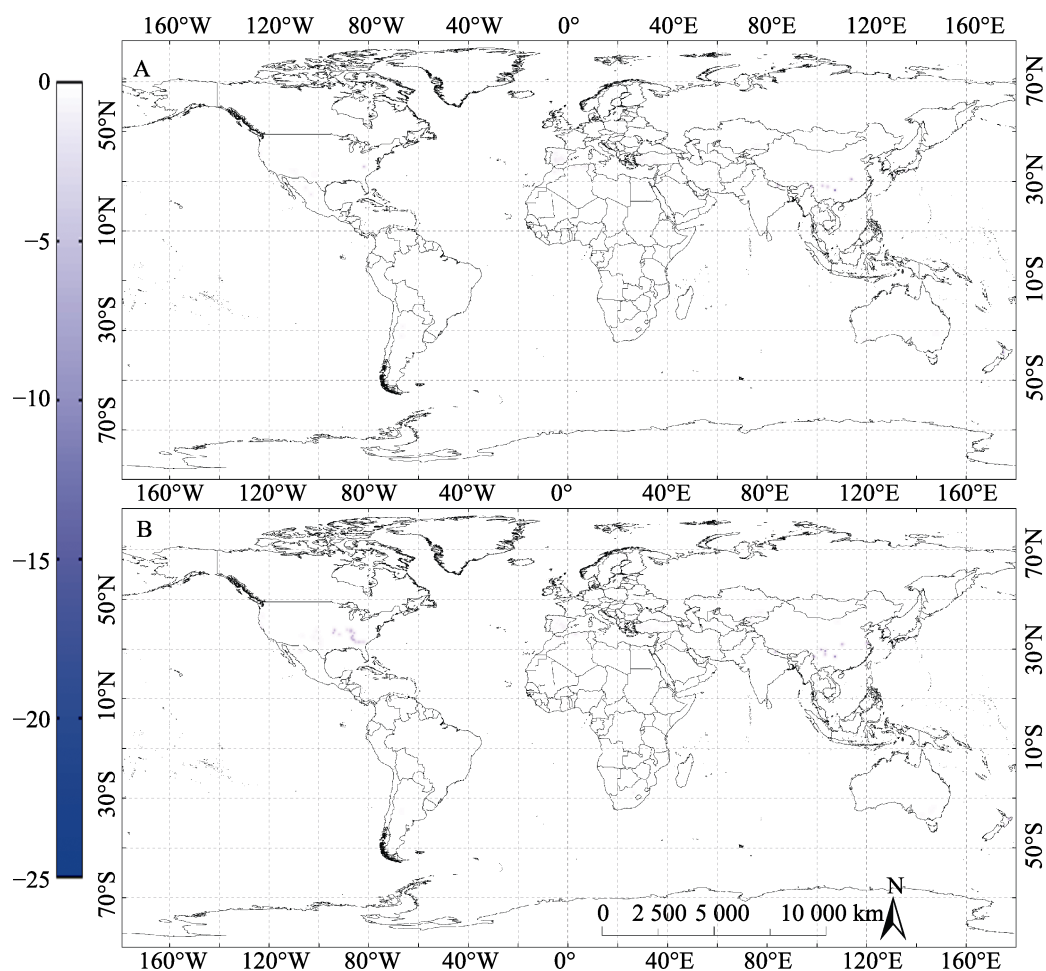


图 5 油松对油松毛虫在全球适生性的影响

Fig. 5 Impacts of *Pinus tabulaeformis* on the global potential distribution of *Dendrolimus tabulaeformis*

A. 在历史气候条件下寄主油松对油松毛虫适生性的影响; B. 表示在未来气候条件下寄主油松对油松毛虫适生性的影响。蓝色代表 EI 差值为负, 表示适生程度降低, 颜色的深浅表示 EI 差值变化程度的大小。

A. Impacts of *P. tabulaeformis* on the global potential distribution of *D. tabulaeformis* under historical climate conditions. B. Impacts of *P. tabulaeformis* on the global potential distribution of *D. tabulaeformis* under future climate conditions. Blue represents a negative EI difference;

The depth of color in different regions indicates the sensitivity to climate change.

松在国内主要分布于北京、山东、四川、山西、江西、湖北、辽宁、贵州、甘肃、河北和内蒙古等省份; 国外分布于美国、俄罗斯、比利时、韩国、日本、波兰和瑞典等国家和地区。虽然油松对油松毛虫在全球的适生性影响较小, 然而油松毛虫目前仅分布于中国, 国外的寄主尚不可知, 可能由于生境的改变导致其寄主的变化, 所以难以评价其他的寄主对油松毛虫的潜在适生区的限制情况。除寄主外, 其他因子如土壤类型、天敌、地理特征、人类活动等都会影响物种适生区, 因此 CLIMEX 对物种适生区的预测具有一定的

局限性 (宋红敏等, 2014)。

根据宋雄刚等 (2016) 利用最大熵模型模拟预测大尺度范围油松毛虫灾害结果, 在 RCP4.5 情景下, 灾害将集中于北京, 河北以及河北与内蒙古交界处, 与本研究的预测结果油松毛虫在中国的潜在适生区有北移的趋势相符。宋雄刚等 (2015) 筛选出区域尺度与松毛虫灾害相关的气候因子, 明确了与重度发生呈正相关的是前一年的 11 月份到当年的 1 月份的平均最高温度以及 9 月份的最高温度, 呈负相关的是年平均湿度, 此结果可以和本研究相结合, 随着更多预测模型

的构建和应用,可更加精确地对油松毛虫的扩散进行预测预报。

在未来气候条件下,油松毛虫的潜在适生区有向更高纬度地区扩散的趋势,油松毛虫一旦传入,会对松林造成严重危害,因此建议加强对油松毛虫的检疫和防控力度,防止其进一步的扩散。具体措施有:

(1)对调动的苗木,木材和木质包装材料等进行严格的现场检疫和处理;

(2)根据预测的油松毛虫在我国的潜在适生区,对中度和高度适生区实行重点监测;

(3)注意油松毛虫在其他寄主如马尾松、黑松和华山松等的危害情况。

参考文献 (References)

- Allen SK, Plattner GK, Nauels A, Xia Y, Qin D, Stocker TF, 2013. Climate change 2013: The physical science basis. An overview of the Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 18(2): 95–123.
- Bian YX, 2008. Study on seed germination ecology of *Pinus tabulaeformis*. Master thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [边银霞, 2008. 油松种子萌发生态学研究. 硕士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学.]
- Chen CJ, 1990. Integrated Management of Pine Caterpillars in China. Beijing: China Forestry Press. 282–300. [陈昌洁, 1990. 松毛虫综合管理. 北京: 中国林业出版社. 282–300.]
- Dong ZK, Ge F, 2011. The fitness of insects in response to climate warming. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1141–1148. [董兆克, 戈峰, 2011. 温度升高对昆虫发生发展的影响. 应用昆虫学报, 48(5): 1141–1148.]
- Du KM, Gao CL, Liu WP, 2016. The correlation analysis among sex pheromone trap catch, leaf loss rate and population density of Chinese-pine caterpillar *Dendrolimus tabulaeformis*. *Journal of Plant Protection*, 43(6): 966–971. [杜凯名, 高成龙, 刘文萍, 2016. 油松毛虫性信息素监测与失叶率及虫口密度的相关性分析. 植物保护学报, 43(6): 966–971.]
- Duan JB, Zhao DY, Sun XW, 1997. Development of real-time dynamic prediction and prediction of *Pinus tabulaeformis* PDFS system. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, (1): 32–35. [段君博, 赵殿一, 孙向文, 1997. 油松毛虫实时动态预测预报 PDFS 系统的研制. 辽宁林业科技, (1): 32–35.]
- Fan HT, Chen LB, Chen ZZ, Gu JC, 2019. Response of radial growth of *Pinus tabulaeformis* and *Larix gmelinii* to meteorological factors in mountainous region of northern Hebei province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 39(1): 58–63. [范慧涛, 陈立标, 陈忠震, 谷建材, 2019. 冀北山地油松、落叶松径向生长对气象因子的响应. 中
- 南林业科技大学学报, 39(1): 58–63.]
- Han RD, Xu YX, Wang Y, Ge F, 2005. The effect of high temperature on the development of eggs of pine caterpillars, *Dendrolimus tabulaeformis*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(3): 294–297. [韩瑞东, 徐延熙, 王勇, 戈峰, 2005. 高温对油松毛虫卵发育的影响. 昆虫知识, 42(3): 294–297.]
- Harris IC, Jones PD, 2017. CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901– Dec. 2016), CEDA Achive, doi: 10.5285/ 58a8802721c94c66ae45-c3baa4d814d0.
- He RM, Wang BT, Yu XW, Wang XH, Liu T, Wang YS, Liu Z, 2018. Growth release and growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* forest in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Environment Biology*, 24(6): 12–18. [何如梦, 王百田, 于显威, 王旭虎, 刘涛, 王岩松, 刘臻, 2018. 晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制. 应用与环境生物学报, 24(6): 12–18.]
- Hou TQ, 1987. The Pine Caterpillars in China. Beijing: Science Press. 1–301. [侯陶谦, 1987. 中国松毛虫. 北京: 科学出版社. 1–301.]
- IPCC, 2014. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- Kang XQ, 2007. Integrated control technology of *Pinus tabulaeformis*. *Shanxi Forestry Science Aand Technology*, (3): 34–35. [康晓强, 2007. 油松毛虫综合防治技术. 山西林业科技, (3): 34–35.]
- Kriticos DJ, Maywald GF, Yonow T, Zurcher EJ, Herrmann NI, Sutherst RW, 2015. CLIMEX Version 4: Exploring the Effects of Climate on Plants, Animals and Diseases. Canberra: CSIRO. 184.
- Lei ZM, Dong LF, 1993. Observation on the growth and development of *Pinus tabulaeformis*. *Shanxi Forestry Science and Technology*, (4):27–29. [雷振民, 董丽芬, 1993. 油松生长发育规律的观察. 陕西林业科技, (4):27–29.]
- Li CS, Zhang SM, Shi GX, 2003. Influence of low temperature on the overwintering larvae of *Dendrolimus* spp. *Forest Pest and Disease*, 22(4): 24–25. [李长森, 张淑敏, 石广学, 2003. 低温对松毛虫幼虫越冬的影响. 中国森林病虫, 22(4): 24–25.]
- Li ZL, Jia FY, 1989. Photoperiodical reaction of the pine caterpillar *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu. *Acta Entomologica Sinica*, 32(4): 410–417. [李兆麟, 贾凤友, 1989. 油松毛虫的光周期反应. 昆虫学报, 32(4): 410–417.]
- Liu JR, 2018. Influencing factors of natural regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantation. *Protection Forest Science and Technology*, 181(10): 20–21, 24. [刘建荣, 2018. 油松人工林自然更新的影响因子研究. 防护林科技, 181(10): 20–21, 24.]
- Liu YL, 2000. Integrated control technology of *Pinus tabulaeformis*. *Shanxi Forestry Science and Technology*, (2): 29–30. [刘彦林, 2000. 油松毛虫综合防治技术. 山西林业, (2): 29–30.]
- Liu ZH, Zhao J, Jiang HJ, Bai SW, 2012. Method of setting up *Dendrolimus tabulaeformis* situation monitoring spots based on variogram. *Forest Pest & Disease*, 31(1): 9–11. [刘朝辉, 赵杰, 姜宏瑾, 白胜文, 2012. 基于变异函数的油松毛虫虫情监测点

- 布点方法研究. 中国森林病虫, 31(1): 9–11.]
- Lu CK, Shi GX, Han JB, Zhang JX, 2000. Effects of *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu's overwintering on trunk on results of winter control. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, s1: 43–45. [路常宽, 石广学, 韩静波, 张井习, 2000. 油松毛虫在树干上越冬对冬季防治效果的影响. 内蒙古林业科技, s1: 43–45.]
- Lv ZG, Li WB, Huang XR, Zhang ZD, 2019. Predicting suitable distribution area of three dominant tree species under climate change scenarios in Hebei province. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(3): 13–21. [吕振刚, 李文博, 黄选瑞, 张志东, 2019. 气候变化情景下河北省 3 个优势树种适宜分布区预测. 林业科学, 55(3): 13–21.]
- Ma GP, Hu JY, 2018. *Pinus tabulaeformis* seedling test. *Rural Technology*, 11: 46. [马桂萍, 胡继元, 2008. 油松育苗试验. 农村科技, 11: 46.]
- Song HM, Zhang QF, Han XM, Xu Yan, Xu RM, 2004. CLIMEX: Professional biological software for predicting potential distribution of species. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(4): 379–386. [宋红敏, 张清芬, 韩雪梅, 徐岩, 徐汝梅, 2004. CLIMEX: 预测物种分布区的软件. 昆虫知识, 41(4): 379–386.]
- Song XG, Wang HB, Li GH, 2015. Climatic factors screening for large-scale outbreaks of *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu. *Journal of Northeast Forestry University*, 43(7): 127–132. [宋雄刚, 王鸿斌, 李国宏, 2015. 区域尺度油松毛虫灾害发生相关气象因子筛选. 东北林业大学学报, 43(7): 127–132.]
- Song XG, Wang HB, Zhang Z, Kong XB, Liu SC, Li YF, 2016. Application of the Maximum Entropy Model (MaxEnt) to simulation and forecast of large scale outbreaks of *Dendrolimus tabulaeformis* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 52(6): 66–75. [宋雄刚, 王鸿斌, 张真, 孔祥波, 苗振旺, 刘随存, 李永福, 2016. 应用最大熵模型模拟预测大尺度范围油松毛虫灾害. 林业科学, 52(6): 66–75.]
- Sutherst RW, Maywald GF, 1985. A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 13(3): 281–299.
- Tang WG, 2012. Study on biological characteristics and integrated control techniques of *Dendrolimus tabulaeformis*. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 58(1): 47–49. [汤文高, 2012. 油松毛虫生物学特性及综合防治技术研究. 陕西农业科学, 58(1): 47–49.]
- Tu QH, Xia NB, Li ZD, 1993. Application of a regression model for the principal component of population dynamic of the Chinese pine caterpillar. *Journal of Beijing Forestry University*, 15(3): 94–101. [屠泉洪, 夏乃斌, 李湛东, 1993. 主成分回归模型在油松毛虫种群动态中的应用. 北京林业大学学报, 15(3): 94–101.]
- Tu QH, Xia NB, Shao HR, 1990. Greymodels for projecting the burst of *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu. *Acta Ecologica Sinica*, 10(3): 261–265. [屠泉洪, 夏乃斌, 邵海荣, 1990. 油松毛虫发生的灰色预测模型. 生态学报, 10(3): 261–265.]
- Wang RH, Bi BZ, Huang H, 2011. Causes analysis concerning occurrence of *Dendrolimus tabulaeformis* in Huanglong Mountainous forest area. *Shaanxi Forest Science and Technology*, (5): 44–47. [王仁合, 毕保忠, 黄华, 2011. 黄龙山林区油松毛虫发生原因分析及防治措施. 陕西林业科技, (5): 44–47.]
- Wang YC, Zhou GN, Zhang B, Chen MY, Gao BJ, 2016. Difference in protein expression of *Pinus tabulaeformis* induced by *Dendrolimus tabulaeformis* feeding and leaf-cutting stimulation. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(8): 68–75. [王银翠, 周国娜, 张斌, 陈明叶, 高宝嘉, 2016. 油松毛虫取食和剪叶刺激下油松的蛋白质表达差异分析. 林业科学, 52(8): 68–75.]
- Xia NB, Tu QH, Wang YL, 1987. A study of developmental threshold and effective accumulated temperature of Chinese Caterpillar (*Dendrolimus tabuliformis*). *Scientia Silvae Sinicae*, 23(3): 314–319. [夏乃斌, 屠泉洪, 王玉兰, 1987. 油松毛虫发育起点温度和有效积温的研究. 林业科学, 23(3): 314–319.]
- Yan JJ, 1988. On generation and generation differentiation of pine caterpillars (*Dendrolimus* spp.). *Forest Research*, 1(5): 524–530. [严静君, 1988. 松毛虫发生世代与世代分化. 林业科学研究, 1(5): 524–530.]
- Yu JL, Li CQ, 1999. Study on prediction method of occurrence period of *Pinus tabulaeformis* in Lingyuan city. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, (6): 41–43. [于景利, 李翠芹, 1999. 凌源市油松毛虫发生期预测方法的研究. 辽宁林业科技, (6): 41–43.]
- Zhang HD, Long WZ, Wei WJ, Zhou M, 2015. Temperature sensitivity of soil respiration in four forest types in temperate ecotone, northeast China. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(11): 1757–1764. [张慧东, 尤文忠, 魏文俊, 周梅, 2015. 暖温带-中温带过渡区 4 种典型森林土壤呼吸的温度敏感性. 生态环境学报, 24(11): 1757–1764.]
- Zhang HS, 1993. Non-linear gray prediction model of *Pinus tabulaeformis*. *Entomological Knowledge*, 30(1): 36–37. [张海松, 1993. 油松毛虫发生的非线性灰色预测模型. 昆虫知识, 30(1): 36–37.]
- Zhang SF, Xia NB, 1992. ARMA(p,q) Model for the population dynamics of Chinese pine caterpillar. *Journal of Beijing Forestry University*, 14(1): 93–97. [张素芬, 夏乃斌, 1992. 油松毛虫种群动态的 ARMA(p, q) 模型. 北京林业大学学报, 14(1): 93–97.]
- Zhang SF, 1991. The leslie matrix model for the population dynamics of *Dendrolimus tabulaeformis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 27(4): 470–474. [张素芬, 1991. Leslie 矩阵模型在油松毛虫种群动态分析中的应用研究. 林业科学, 27(4): 470–474.]
- Zhang SL, Song Y, Ran X L, Wei YQ, Wang YQ, 2003. Experiments of using bio-pesticides spraying smoke to control *Dendrolimus tabulaeformis*. *Journal of Gansu Forestry Science & Technology*, 28(2): 11–12. [张三亮, 宋云, 冉雄林, 魏永奇, 王亚茜, 2003. 百部·桉·烟乳油防治油松毛虫试验. 甘肃林业科技, 28(2): 11–12.]
- Zhu CH, Qu S, Zhang XL, 2016. *Dendrolimus tabulaeformis* disaster monitoring and analysis of its influencing factors through remote sensing technology. *Journal of Remote Sensing*, 20(4): 653–664. [朱程浩, 瞿帅, 张晓丽, 2016. 油松毛虫灾害遥感监测及其影响因子分析. 遥感学报, 20(4): 653–664.]
- Zou Y, Ge XZ, Guo SW, Zhou YT, Wang T, Zong SX, 2019. Impacts of climate change and host plant availability on the global distribution of *Brontispa longissima* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Pest Management Science*, doi: 10.1002/ps.5503.