

基于物种分布模型对未来气候变化下云南松毛虫在四川省适生区的预测

吴思俊 朱天辉* 谯天敏

(四川农业大学林学院, 温江 611130)

摘要: 为明确云南松毛虫 *Dendrolimus houi* 于未来气候变化下在四川省的分布情况, 运用最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 模型中的刀切法和 Pearson 相关系数分析法对未来气候数据 (2050 年和 2070 年)、林地因子及人为因子进行权重划分, 筛选出影响云南松毛虫潜在分布的重要且相关系数较低的环境因子, 并结合 openModeller 中的人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 模型、生物气候 (BioClim) 模型、气候空间 (climate space, CS) 模型、气候信封 (envelope score, ES) 模型、基于统计概率和规则集的遗传算法 (genetic algorithm for rule-set production, GARP) 模型、MaxEnt 模型和支持向量机 (support vector machine, SVM) 模型对云南松毛虫未来的适生区进行预测, 利用 AUC (area under curve) 评价模型的精确度。结果发现, 最暖季降水量、人类足迹指数、最冷季降水量和海拔对云南松毛虫在未来气候条件下的潜在分布有较强影响, 在 2050 年贡献率分别为 27.2%、16.0%、2.0% 和 4.9%, 在 2070 年贡献率分别为 20.6%、16.8%、9.7% 和 4.9%。对比 7 种模型的预测结果, 发现 SVM 模型在 2050 年和 2070 年对云南松毛虫适生区预测的 AUC 为 0.93, 预测精确度最高, 具有较高的可信度; 该模型预测结果显示, 从 2050 年至 2070 年云南松毛虫在四川省的总适生面积增加了 4 269.8 km², 其中, 中、低适生区面积共减少了 17 185.8 km², 高适生区面积增加了 21 455.6 km²。
关键词: 云南松毛虫; 未来气候; 物种分布模型; 潜在分布; 适生区

Projections of Yunnan pine moth *Dendrolimus houi* in Sichuan Province under future climate change based on species distribution model

Wu Sijun Zhu Tianhui* Qiao Tianmin

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan Province, China)

Abstract: In order to understand the dynamic distribution of Yunnan pine moth *Dendrolimus houi* in Sichuan Province under the future climate, the Jackknife method in maximum entropy (MaxEnt) model and Pearson correlation coefficient analysis was used to divide the future climate data (2050 and 2070), forest land factors and human factors into weights, screen out the important environmental factors influencing the potential distribution of *D. houi* and with low correlation coefficients, combined with the seven species distribution models in openModeller, including artificial neural network (ANN), Bioclim, climate space (CS), envelope score (ES), MaxEnt, genetic algorithm for rule-set production (GARP), support vector machine (SVM), predict the future suitable areas of *D. houi* and use AUC values to evaluate the accuracy of the model. The results showed that precipitation in the warmest season, human footprint index, precipitation in the coldest season and altitude had strong influences on the potential distribution of Yunnan pine moth under future climate conditions. Their contribution rates were 27.2%, 16.0%, 2.0%

and 4.9% in 2050, and 20.6%, 16.8%, 9.7% and 4.9% in 2070, respectively. Among the seven species distribution models, the AUC value predicted by SVM model for 2050 and 2070 was 0.93, which had the highest accuracy and strong credibility. From 2050 to 2070, the overall suitable areas may increase by 4 269.8 km²; the moderately and slightly suitable areas may decrease by 17 185.8 km², and the highly suitable areas may increase by 21 455.6 km².

Key words: *Dendrolimus houi*; future climate; species distribution model; potential distribution; suitable area

云南松毛虫 *Dendrolimus houi* 属鳞翅目枯叶蛾科松毛虫属, 俗称柳杉毛虫、大柏毛虫或洋辣子, 寄主植物包括云南松 *Pinus yunnanensis*、柏木 *Cupressus funebris* 和高山松 *Pinus densata* 等(罗松根等, 1998)。云南松毛虫在我国广泛分布于南方地区, 如浙江、福建、四川、云南、广西、广东、湖南、贵州等省区, 在国外则主要分布于东南亚国家, 包括缅甸、斯里兰卡、印度尼西亚和马来西亚等(尹安亮等, 2002)。云南松毛虫主要啃食树干的嫩枝和幼叶, 轻则引起枝干枯萎, 影响树木的正常发育, 重则造成植株死亡(许国莲, 2008)。在第三次全国林业有害生物普查当中, 云南松毛虫位列林业有害生物前100名, 各地受灾面积高达10万~20万hm², 已成为为害针叶林的主要食叶害虫之一(宋玉双等, 2019)。云南松毛虫在不同地区发生的世代不同, 如在四川省与福建省1年发生1代, 而在云南省多地则1年发生2代(许国莲等, 2002; 尹安亮等, 2003; 何香等, 2018)。因此对于四川省的针叶材林地, 尤其是以柏木为主的风景区地区遭受了严重的经济损失。

物种分布模型是利用物种已知的分布数据和相关环境变量, 根据一定的数学算法来构建模型, 并将预测结果在对应的时间和空间中进行数据可视化表达以分析物种的生态需求(朱耿平等, 2013)。该方法是生态学、概率学、生物信息学、地理生物学、计算机学等多种学科的交叉集合, 主要用于预测外来入侵物种分布、物种多样性保护、濒危动物栖息地规划、未来气候对物种分布的影响等多种生态学研究。目前, 运用于预测物种的潜在分布及适生区域规划的物种分布模型主要包括最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型、生态位因子分析(ecological niche factor analysis, ENFA)模型、基于统计概率和规则集的遗传算法(genetic algorithm for rule-set production, GARP)模型、生物气候(BioClim)模型和领域(Domain)模型等(Ward, 2007; Nabout et al., 2010; Sillero, 2011)。杨瑞(2008)利用ENFA模型对苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 在我国的适生区进行了预测, 并使用该模型对影响2种蝶类的5类生态变量进行

分析运算, 得到其适生区; 周国梁等(2007)利用GARP模型结合14种环境图层对橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 在我国的潜在分布区进行了模拟; 王文婷等(2019)利用MaxEnt软件对入侵杂草狼毒 *Stellera chamaejasme* 在当前和未来气候变化下的潜在分布区进行了预测, 认为未来气候下高寒草地将成为狼毒的高适生区。评价模型的精确度有多种方法, 评价指标主要包括总体准确度、特异度、灵敏度、Kappa统计量、TSS(true skill statistic)和AUC(area under curve)等, 其中AUC应用最为广泛(许仲林等, 2015)。

近年来, 云南松毛虫在四川省的发生逐渐加重, 林业资源破坏严重。在未来气候条件下, 云南松毛虫的地理分布格局或出现新的变化, 掌握其潜在分布区域以及影响其分布的重要环境因子对于该害虫防控具有重大意义。目前, 对于云南松毛虫的研究主要集中在生物特性(刘湘早, 2006)、种群生命表(王玲萍等, 2007)、空间分布(赵仁友等, 1998)和林间治理(石雷等, 2004; 李文和钟国红, 2013)等方面。在预测防治方面, 侧重利用多元线性回归模型对云南松毛虫的发生期与发生面积进行预测(柴守权等, 2002; 李才进, 2000; 张慧霞等, 2019), 但对云南松毛虫在大尺度下的空间分布及对未来气候响应的研究较少, 缺乏具体的地理空间动态分析和有效的可视化表达。本研究基于云南松毛虫的当前分布数据, 结合未来气候条件、林地因子和人为因子预测其在四川省的潜在适生区, 并划分出不同的适生等级, 以期对云南松毛虫的预测与防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试分布数据: 登录四川林业有害信息系统(sc.30120.org/fpgis/secure/Login.aspx?ReturnUrl=%2ffpgis%2f)下载云南松毛虫在四川省的分布数据, 通过查阅国内相关文献及报道和检索相关物种分布数据网, 包括生物多样性数据库(GBIF, <http://www.gbif.org/>)、中国西南地区动物资源数据库(

www.swanimal.csdb.cn)和中国动物主题数据库(<http://www.zoology.csdb.cn/>),收集云南松毛虫的相关分布信息,利用Google Map查找出相应的GPS位置点,标注经度、纬度以及海拔,依据四川省地图,剔除省外的且重复和极相似的位点,最终选取出70个分布点,其中包括成都市(14个)、泸州市(4个)、德阳市(5个)、绵阳市(7个)、广元市(8个)、南充市(10个)、广安市(4个)、达州市(2个)、眉山市(4个)、巴中市(6个)、凉山彝族自治州(3个)和资阳市(3个)。

环境因子:共选取4大类64个环境因子数据,其中气候因子数据主要来源于全球气候数据网(<http://www.worldclim.org/>),年份为2050年和2070年,采用的空间分辨率为30 s,精确度为1 km×1 km,选择CCSM4模型,包括19个生物气候变量(年平均温度、每日平均温度、等温性、温度季节性、最暖月最高温度、最冷月最低温度、温度年度范围、最湿季平均温度、最干季平均温度、最暖季平均温度、最冷季平均温度、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水季节性、最湿季降水量、最干季降水量、最暖季降水量和最冷季降水量)及1—12月的月降水量、月平均最高温度和月平均最低温度;林地因子包括坡度、坡向和海拔,数据来源于全球SRTM数据网(<http://srtm.csi.cgiar.org/>);土壤因子包括有机碳密度、pH和湿度指数,数据来源于全球社会经济数据与应用中心(<https://sedac.ciesin.columbia.edu>);人为因子包括人类足迹指数、人类影响指数和人口种群密度,数据来源于全球环境可持续发展中心(<https://nelson.wisc.edu/sage/data-and-models/atlas/maps.php>)。

地图数据:在国家自然资源部标准地图服务系统下载四川省地图,比例为1:6 300 000。

供试软件:MaxEnt 3.4.1、openModeller 1.5.1和ArcGIS 10.5软件分别从网站<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>、<http://openmodeller.sourceforge.net>和<https://developers.arcgis.com>下载。

1.2 方法

1.2.1 影响云南松毛虫环境因子的筛选

首先将云南松毛虫分布点按照物种名、经度及纬度顺序整理并转换为CSV格式导入ArcGIS 10.5软件当中,运用Unclassified Color划分出2010—2018年云南松毛虫在四川省的热点分布图。同时,运用ArcGIS 10.5软件的Mask Extraction功能,按照四川省地图对所有的64个环境因子进行掩膜提取,获得四川省的环境因子图,输出为geoTIFF格式,坐标系为WGS84,再用System Tool Boxes转换为ASC格式。参照郭彦龙等(2014)研究方法利用MaxEnt

3.4.1软件进行模拟,软件中的Samples设置为云南松毛虫的分布数据,且对所有分布点随机选择75%为训练集,25%作为测试集;Environmental Layers设置为ASC格式的四川省环境因子图,Output Format中选择Logistic,Setting设置中利用刀切法(Jack-knife)测评环境因子的权重,即各环境因子的常规训练收益值,初步筛选影响云南松毛虫分布的重要环境因子,其他参数设定为默认,最后选择Run输出格式为ASC的模拟结果。

由于环境变量之间有一定的相关性,过多的环境变量会影响预测结果的稳定性,所以必须对环境变量进行相关性分析,当 $|r|>0.8$ 则说明相关性较大,需对环境变量进行二选一(Phillips et al., 2006)。将MaxEnt 3.4.1软件模拟得到的高贡献率环境因子,通过ArcGIS 10.5软件中的Spatial Analyst分析功能进行Pearson相关性分析,最终筛选重要且相关性较低的环境因子。

1.2.2 预测云南松毛虫适生区最优模型的筛选

将云南松毛虫分布点导入ArcGIS 10.5软件中进行核密度分析,得到其当前气候下的分布热力图,再利用openModeller软件中7种物种分布模型,包括人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型、BioClim模型、气候空间(climate space, CS)模型、气候信封(envelope score, ES)模型、GARP模型、MaxEnt模型和支持向量机(support vector machine, SVM)模型,结合1.2.1筛选出来的重要环境因子对云南松毛虫在未来气候下的潜在分布进行模拟,方法同1.2.1,并将结果导入到ArcGIS 10.5软件中进行重分类,选择自然分断法计算得到适生指数 P ,并以该指标为依据将预测区域划分为高适生区($0.5 \leq P$)、中适生区($0.3 \leq P < 0.5$)、低适生区($0.1 \leq P < 0.3$)和不适生区($P < 0.1$)4种不同级别的区域。

采用受试者操作特性(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析法对各预测模型的精度进行验证。以ROC曲线下的面积,即AUC为评价标准来反映模型的价值,因为AUC不会受到阈值和其他因素的影响,因此被广泛用于评价模型的精确度(Vanagas, 2004)。用AUC对1.2.3所得7种物种分别模型模拟结果进行评价,当 $0.5 < \text{AUC} \leq 0.6$ 时预测结果失败,当 $0.6 < \text{AUC} \leq 0.7$ 时预测结果极差, $0.7 < \text{AUC} \leq 0.8$ 时预测结果较差, $0.8 < \text{AUC} \leq 0.9$ 时预测结果较好, $0.9 < \text{AUC} \leq 1.0$ 时预测结果优秀,当AUC越接近1,模型精确度越高,以此筛选最优预测模型。

1.2.3 基于最优模型预测云南松毛虫适生区面积

利用1.2.2筛选得到的最优模型和云南松毛虫

适生区,采用ArcGIS 10.5软件的空间运算模块计算2050年和2070年云南松毛虫在四川省4个不同等级的潜在适生区面积。

1.2.4 基于最优模型预测重要环境因子的最适范围

将1.2.1筛选到的重要环境因子数据,利用Max-Ent模型分析其对云南松毛虫存在概率的影响并输出响应曲线,利用ArcGIS 10.5软件的空间运算模块对其进行转换后,依据1.2.2得到的2050年和2070年云南松毛虫潜在高适生区进行分区统计,分析影响云南松毛虫生存的各重要环境因子的最适范围。

2 结果与分析

2.1 影响云南松毛虫分布的环境因子分析

利用刀切法对64个环境因子进行划分,筛选对云南松毛虫分布贡献率高的环境因子,同时为减少图层之间的过度拟合,故意抬高AUC,引起较大的误差,对划分的高贡献率因子进行再次筛选,最终筛选出Pearson系数绝对值小于0.8的8个环境因子作为影响云南松毛虫分布的重要环境因子,在2050年为

最暖季降水量、9月降水量、温度季节性、人类足迹指数、1月降水量、4月平均最低温度、海拔和最冷季降水量,贡献率分别为27.2%、17.8%、16.0%、16.0%、9.3%、6.6%、4.9%和2.0%;在2070年为7月降水量、最暖季降水量、人类足迹指数、2月平均最低温度、最冷季降水量、每日平均温度、海拔和8月平均最低温度,贡献率分别为22.1%、20.6%、16.8%、15.4%、9.7%、8.9%、4.9%和1.6%。

在2050年,最暖季降水量和9月降水量是影响云南松毛虫分布的重要环境因子,常规训练收益值均超过2.0;其次为温度季节性、4月平均最低温度、人类足迹指数,常规训练收益值高于1.5;其他3个重要环境因子的重要性排序为1月降水量、最冷季降水量和海拔(图1-A)。在2070年,2月平均最低温度、最暖季降水量、7月降水量、每日平均温度是影响云南松毛虫分布的重要环境因子,常规训练收益值均超过2.0,其次为人类足迹指数,常规训练收益值高于1.5;其他3个重要环境因子的重要性排序为8月平均最低温度、最冷季降水量和海拔(图1-B)。

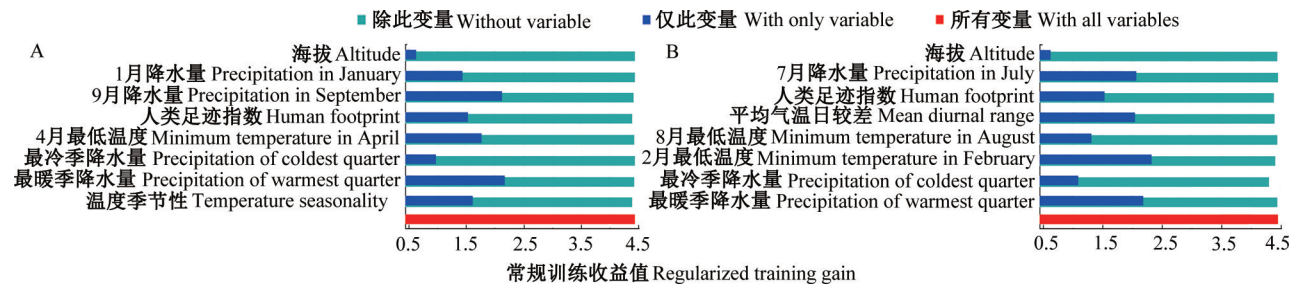


图1 2050年(A)和2070年(B)影响云南松毛虫分布的重要环境因子排序

Fig. 1 Key environmental factors affecting the distribution of *Dendrolimus houi* in 2050 (A) and 2070 (B)

2.2 不同模型的预测结果及精度验证

将7种模型对云南松毛虫分布的预测结果导入ArcGIS 10.5软件,划分得到不同的分布区域预测图(图2)。通过AUC对模型的精确度进行排序,2050年各模型预测精确度排序为BioClim模型、ES模型(AUC=0.80)<CS模型(AUC=0.82)<MaxEnt模型(AUC=0.83)<GARP模型(AUC=0.86)<ANN模型(AUC=0.88)<SVM模型(AUC=0.93),2070年各模型预测精确度排序为ANN模型(AUC=0.75)<BioClim模型(AUC=0.8)<ES模型(AUC=0.81)<CS模型(AUC=0.83)<GARP模型、MaxEnt模型(AUC=0.87)<SVM模型(AUC=0.93)(图3)。根据AUC的评价标准,在7种物种分布模型中,SVM模型的预测精确度最高,AUC为0.93,表明预测结果优秀,同时对比云南松毛虫当前的地理分布格局,匹配程度

较高,预测结果具有较高的可信度。

2.3 云南松毛虫在四川省的适生区面积

本研究利用预测AUC最高的SVM模型对云南松毛虫在四川省的潜在分布区进行不同等级的划分,结果显示,从2050年至2070年该虫的总适生面积呈增加趋势,增加了4 269.8 km²。低适生区面积减少了4 994.4 km²,中适生区面积减少了12 191.4 km²,两者共减少了17 185.8 km²;而高适生区面积则增加了21 455.6 km²,增加比例达到了4.4%(表1)。对比2010—2018年的云南松毛虫热点分布图,其整体地理空间布局未发生较大变化,仍集中分布在四川盆地的东部地区,其中成都市、资阳市、内江市、巴中市、遂宁市、绵阳市、德阳市、南充市为高适生区;眉山市、自贡市、宜宾市、广元市、广安市、乐山市为中适生区;低适生区主要集中在雅安市、泸州市、攀枝花

花市以及凉山彝族自治州;不适生区为甘孜藏族自治州和阿坝藏族自治州。

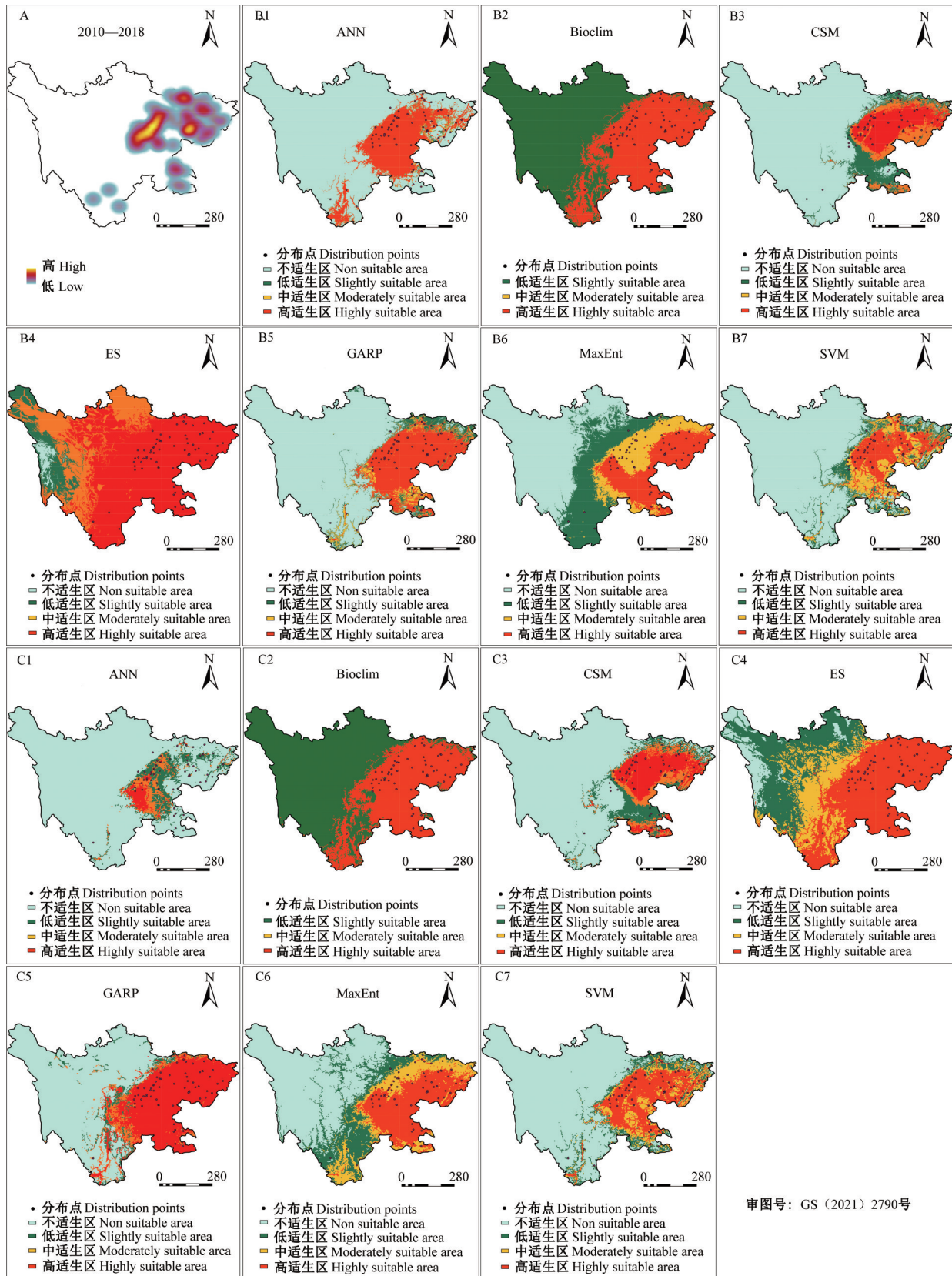


图2 云南松毛虫在四川省的实际分布图(A)与利用不同物种分布模型预测的2050年(B)和2070年(C)潜在分布图
Fig. 2 The actual distribution map (A) and the potential distribution maps in 2050 (B) and 2070 (C) of *Dendrolimus houi* in Sichuan predicted by different species distribution models

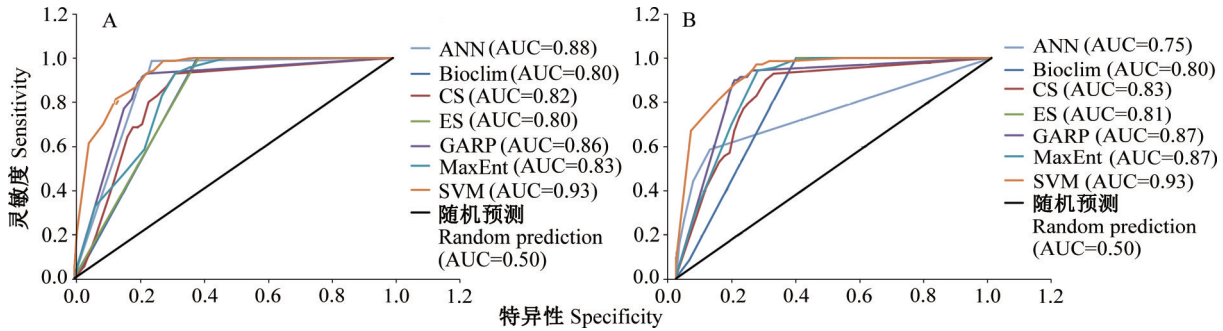


图3 2050年(A)和2070年(B)7种物种分布模型的AUC值

Fig. 3 AUC values of seven species distribution models for 2050 (A) and 2070 (B)

表1 未来气候条件下云南松毛虫在四川省的适生区面积

Table 1 The suitable areas of *Dendrolimus houi* in Sichuan Province under future climate conditions

适生等级 Suitable level	2050		适生等级 Suitable level	2070	
	面积 Area/km ²	占比 Percentage/%		面积 Area/km ²	占比 Percentage/%
不适生区 Non suitable area	328 403.4	67.6	不适生区 Non suitable area	324 133.6	66.7
低适生区 Slightly suitable area	45 326.5	9.3	低适生区 Slightly suitable area	40 332.1	8.3
中适生区 Moderately suitable area	54 023.2	11.1	中适生区 Moderately suitable area	41 831.8	8.6
高适生区 Highly suitable area	58 246.9	12.0	高适生区 Highly suitable area	79 702.5	16.4

2.4 重要环境因子的最适范围

8个重要环境因子对云南松毛虫分布概率的响应曲线均呈单峰型,表明云南松毛虫的分布随环境变量的增加而增加,达到最佳值后则随环境变量的增加而降低,同时确定了适宜云南松毛虫分布的重要环境因子最适范围。2050年重要环境因子中最暖季降水量、9月降水量、温度季节性、4月平均最低温度、人类足迹指数、1月降水量、最冷季降水量和海拔的最适范围(最佳值)为378~842 mm(552 mm)、100~219 mm(156 mm)、4 775~8 050(7 243)、10.3~17.9℃(14.9℃)、26~93(43)、4~19 mm(9 mm)、11~71 mm(33 mm)和192~1 897 m(465 m)(图4)。2070年重要环境因子中2月平均最低温度、最暖季降水量、7月降水量、平均气温日较差、人类足迹指数、8月平均最低温度、最冷季降水量和海拔的最适范围(最佳值)为3.4~12.6℃(7.6℃)、428~970 mm(594 mm)、168~397 mm(244 mm)、6.4~11.9℃(7.6℃)、15~93(42)、19.8~29.1℃(25.9℃)、13~64 mm(36 mm)和201~1 912 m(464 m)(图5)。

3 讨论

研究表明,气候因素是影响云南松毛虫周期性变化的关键(王学锋等,2003)。在本研究中,利用刀

切法将年份为2050年和2070年的气候因子并结合林地因子以及人为因子共4大类64个环境因子做出划分,通过筛选与剔除,最终确定了8个环境因子,其中4个对云南松毛虫在2050年和2070年的分布均有较强的影响,分别为最暖季降水量、人类足迹指数、最冷季降水量和海拔。这与云南松毛虫的生活史密切相关,3月该虫越冬卵开始孵化,5—6月是幼虫高发期,也是从低龄幼虫变为老熟幼虫的关键期,9月下旬—10月为成虫羽化盛期。最暖季降水量过多容易造成老熟幼虫化蛹失败以及成虫受到暴雨冲击导致死亡,而最冷季降水量过多容易造成低龄幼虫无法破卵。这与赵仁友和刘大伟(2007)研究结果相同,认为降水量越大,对于云南松毛虫的生长越不利。同时本研究发现海拔是影响云南松毛虫分布的最重要林地因子,在四川省该虫的适生海拔在191~165 m,超过465 m之后,分布会逐渐减少。但张家胜等(2003)研究认为云南松毛虫的暴发与林地因子的关系是坡向→海拔→开阔度→坡度→土壤综合肥力,这种差异的产生可能是因为选择的试验地不同以及林地因子的变量存在差异所致。人类足迹指数是指人口密度、途径密度、建筑面积、房屋数目等,是贡献率最高的人为影响因子。随着城市规模化的扩展和乡村旅游业的新兴,以及大量交通基

基础设施的增加,为云南松毛虫的传播与扩散提供了有利条件。

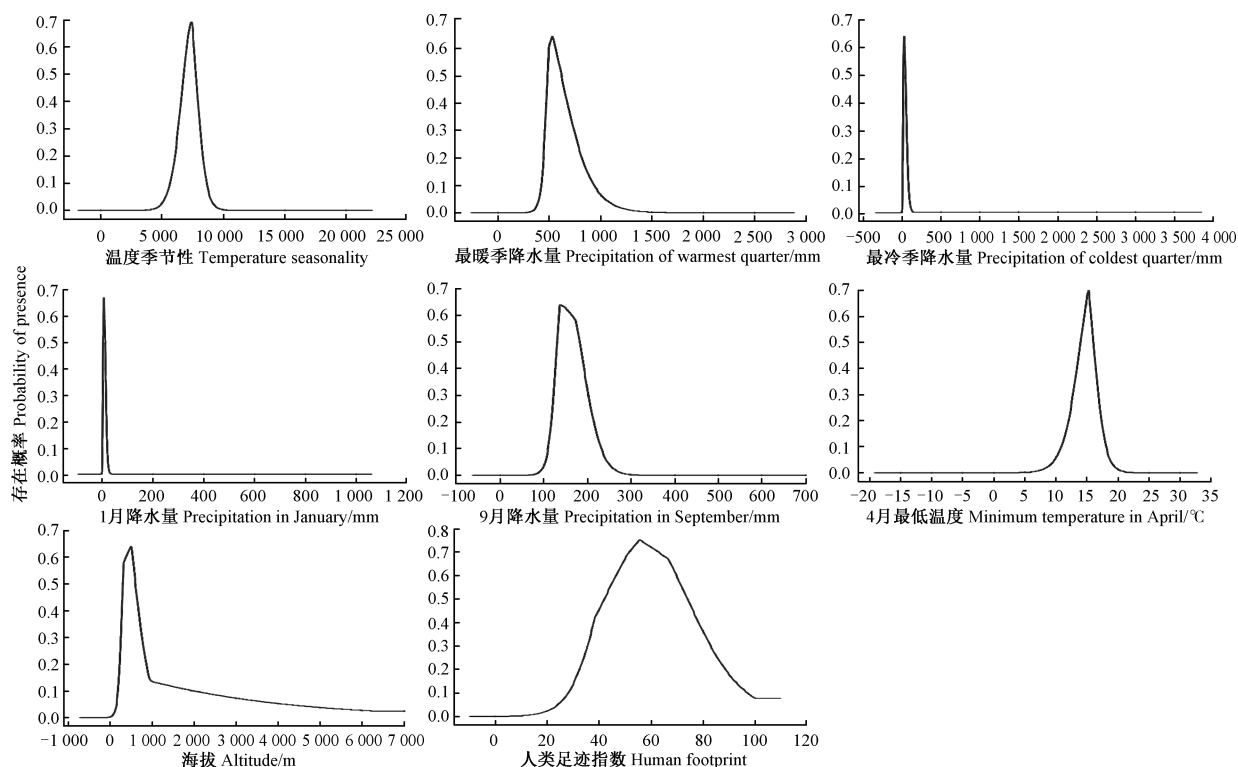


图4 2050年影响云南松毛虫分布的主要环境变量的响应曲线

Fig. 4 Response curves of main environmental variables affecting the distribution of *Dendrolimus houi* in 2050

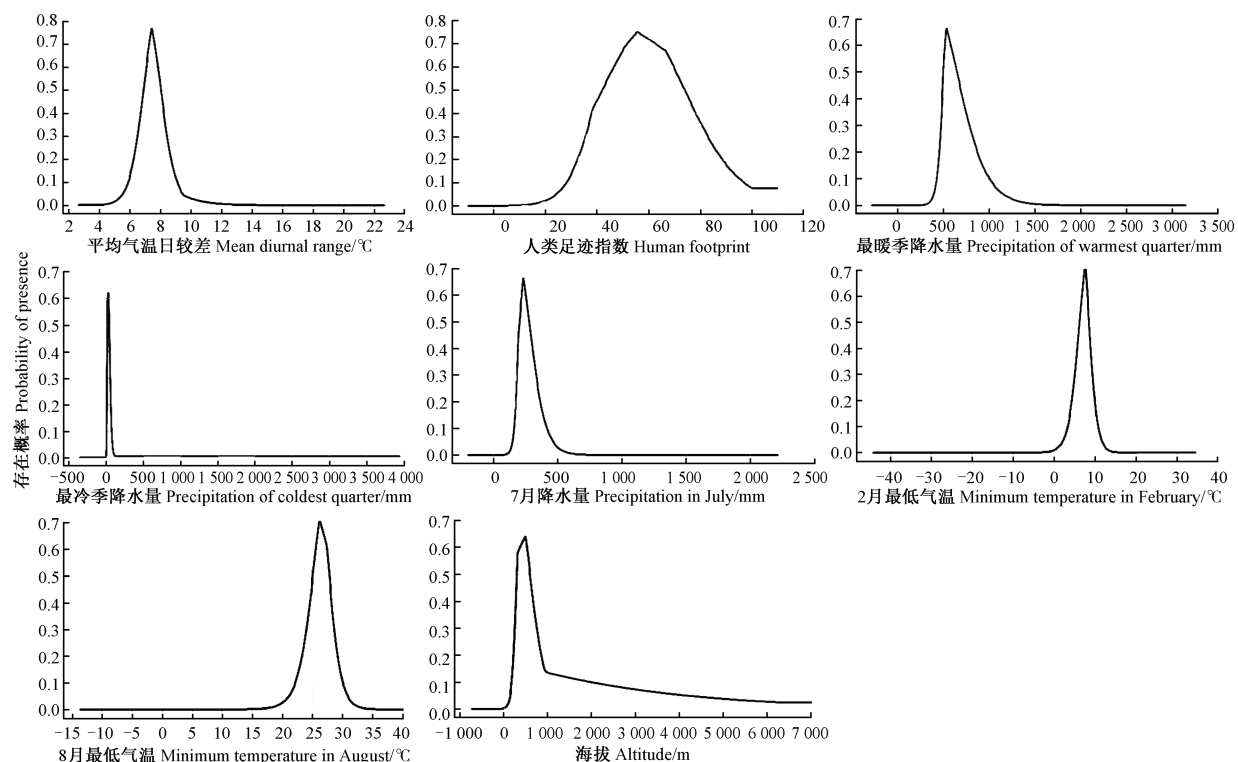


图5 2070年影响云南松毛虫分布的主要环境变量的响应曲线

Fig. 5 Response curves of main environmental variables affecting the distribution of *Dendrolimus houi* in 2070

近年来,随着机器学习的不断新兴,大量的深度学习模型被广泛应用于模拟物种的潜在分布以及预

测发生期和发生量。SVM模型广泛用于物种分布建模,具有构建速度快、辨别效率高、优化性能强等优点。相比较其他物种分布模型仅结合已存在的具体分布数据进行模拟,SVM模型可以利用算法模拟出具有潜在分布可能的位点进行分析,能够有效与环境变量结合以判断物种的适生区(Guo et al., 2005)。本研究结果显示,通过对环境变量多次筛选,剔除相关系数较大的变量,减少图层的过度拟合,避免AUC过高,使其处于正常的区间;根据AUC的评判标准分析,SVM预测的AUC达到了0.93,属于优秀范围,说明本研究预测的云南松毛虫的潜在分布与地区适生等级拟合度较高,研究结果对于云南松毛虫的空间地理分布研究具有重要参考价值。

在本研究中,将2010—2018年的分布热点图与2050年和2070年模拟适生区图进行对比分析,发现云南松毛虫目前的分布格局与未来的潜在分布未呈现出较大幅度的变化,仍然主要集中在四川盆地东部,且总适生面积呈增加的趋势,低适生区与中适生区面积减少,高适生区面积则增加了21 455.6 km²,尤其是四川省中部的高适生区明显增加。本研究结果也为云南松毛虫的防治提供了重要参考,在当前化学农药减施增效的大环境下,建议对云南松毛虫的防控采用“重点突破”模式,对发生虫害较严重的地区运用无公害治理技术,包括灯诱、人工除茧、释放天敌和生物制剂等方法,既能有效控制虫害的暴发与蔓延,又能节约防治成本,降低环境污染。同时依据不同的适生等级区域设置对应的检疫强度,对于高适生区需要提高筛查力度,尤其针对以柏木、柳杉为主的活苗、幼树、板材等加强检疫工作;中、低适生区采取规划重点区域,对高暴发区建立监察隔离带,防止云南松毛虫入侵其他区域。在未来气候条件下,结合林地因子和人为因子分析,云南松毛虫的适生区仍会增加,需要转变防治思路,从原来的“大而广”转变为“点而精”,既能有效提高防治效率,同时减少治理成本和资源的浪费。

参 考 文 献 (References)

- Chai SQ, Xu GL, Xie KL, Lu N, Li GY. 2002. Forecast of occurrence stage and harm extent of *Dendrolimus houi*. Journal of Northwest Forestry University, 17(2): 54–57 (in Chinese) [柴守权, 许国莲, 谢开立, 卢南, 李广英. 2002. 云南松毛虫发生期及危害程度预测预报研究. 西北林学院学报, 17(2): 54–57]
- Guo QH, Kelly M, Graham CH. 2005. Support vector machines for predicting distribution of Sudden oak death in California. Ecological Modelling, 182(1): 75–90
- Guo YL, Wei HY, Lu CY, Zhang HL, Gu W. 2014. Predictions of potential geographical distribution of *Sinopodophyllum hexandrum* under climate change. Chinese Journal of Plant Ecology, 38(3): 249–261 (in Chinese) [郭彦龙, 卫海燕, 路春燕, 张海龙, 顾蔚. 2014. 气候变化下桃儿七潜在地理分布的预测. 植物生态学报, 38(3): 249–261]
- He X, Zou XM, Shang HY, Yuan SB, He HG. 2018. The occurrence regularity and biocontrol research of *Dendrolimus houi* Lajonguiere in cypress forest of Guang'an. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 39(2): 132–136 (in Chinese) [何香, 邹学梅, 尚慧艳, 袁施彬, 何恒果. 2018. 云南松毛虫在广安市柏木林区的发生规律及生物防治研究. 西华师范大学学报(自然科学版), 39(2): 132–136]
- Li CJ. 2000. Occurrence period forecast of *Dendrolimus* sp. in Gulin County. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 21(3): 5–9 (in Chinese) [李才进. 2000. 古蔺县大柏毛虫发生期预测预报研究. 四川林业科技, 21(3): 5–9]
- Li W, Zhong GH. 2013. Occurrence and prevention and control of *Dendrolimus houi* Lajonguiere. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 54(5): 76–77 (in Chinese) [李文, 钟国红. 2013. 云南松毛虫的发生及防治. 宁夏农林科技, 54(5): 76–77]
- Liu XZ. 2006. Study on biological characteristics and its integrated control of *Dendrolimus latipennis*. Journal of Southwest Forestry College, 26(3): 52–54, 58 (in Chinese) [刘湘早. 2006. 云南松毛虫生物学特性及综合治理. 西南林业大学学报, 26(3): 52–54, 58]
- Luo SG, Xu ZW, Zhao RY, Hua BS, Lin SB. 1998. Biological properties and control of *Dendrolimus houi*. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 18(1): 11–15 (in Chinese) [罗松根, 徐真旺, 赵仁友, 华宝松, 林少波. 1998. 云南松毛虫的生物学特性及防治. 浙江林业科技, 18(1): 11–15]
- Nabout JC, Soares TN, Diniz-Filho JAF, de Marco Júnior P, Telles MPC, Naves RV, Chaves LJ. 2010. Combining multiple models to predict the geographical distribution of the Baru tree (*Dipteryx alata* Vogel) in the Brazilian Cerrado. Brazilian Journal of Biology, 70(4): 911–919
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190: 231–259
- Shi L, Zhao Y, Zhang ZH, Xu LF, Wan YM. 2004. Effect of compound microbial pesticide on controlling *Dendrolimus* spp. in large areas. Forest Research, 17(4): 461–464 (in Chinese) [石雷, 赵耘, 张忠和, 徐珑峰, 万有铭. 2004. 复合微生物杀虫剂大面积防治松毛虫的效果. 林业科学研究, 17(4): 461–464]
- Sillero N. 2011. What does ecological modelling model: a proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. Ecological Modelling, 222: 1343–1346
- Song YS, Dong YQ, Cui DY, Yue FZ, Zhu NB, Bai HY. 2019. Species analysis of forest pest in China V: insect. Forest Pest and Disease, 38(1): 26–30 (in Chinese) [宋玉双, 董瀛谦, 崔东阳, 岳方

- 正, 朱宁波, 白鸿岩. 2019. 我国林业有害生物种类动态分析, V: 昆虫类. 中国森林病虫, 38(1): 26-30]
- Vanagas G. 2004. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 3: 319-322
- Wang LP, Tang CC, Su SC, Lian PH. 2007. Studies on natural population life table of *Dendrolimus houi* Lajonquiere. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 34(2): 36-40 (in Chinese) [王玲萍, 汤春常, 苏世春, 连培华. 2007. 云南松毛虫自然种群生命表的研究. 福建林业科技, 34(2): 36-40]
- Wang WT, Wang SP, Zhang W. 2019. Prediction of the potential geographical distribution of *Stellera chamaejasme* under climate change in China based on maximum entropy method. *Journal of Plant Protection*, 46(1): 136-141 (in Chinese) [王文婷, 王淑璠, 张炜. 2019. 基于最大熵方法的未来气候变化下狼毒在中国潜在分布的预测. 植物保护学报, 46(1): 136-141]
- Wang XF, Zhou DL, Tong Q, Chen J. 2003. Meteorological factors and *Dendrolimus* occurrence at *Pinus kesiya* var. *langbianensis* distribution area. *Yunnan Forestry Science and Technology*, (3): 77-82 (in Chinese) [王学锋, 周德丽, 童青, 陈疆. 2003. 思茅林区松毛虫害发生与气象因子的关系. 云南林业科技, (3): 77-82]
- Ward DF. 2007. Modeling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, 9: 723-735
- Xu GL. 2008. Research advances on *Dendrolimus houi* in Yunnan Province. *Journal of Southwest Forestry College*, 28(3): 42-44 (in Chinese) [许国莲. 2008. 云南省云南松毛虫研究进展. 西南林学院学报, 28(3): 42-44]
- Xu GL, Chai SQ, Xie KL, Luo F, Liu WH, Feng ZM. 2002. A study on the bio-ecological characteristics of *Dendrolimus houi* in Jingdong County. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 30(6): 151-155 (in Chinese) [许国莲, 柴守权, 谢开立, 罗芳, 刘文红, 冯周明. 2002. 景东县云南松毛虫生物生态学特性研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 30(6): 151-155]
- Xu ZL, Peng HH, Peng SZ. 2015. The development and evaluation of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 35(2): 557-567 (in Chinese) [许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 2015. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 35(2): 557-567]
- Yang R. 2008. Study on habitat suitability of *Cydia pomonella* (L.) in China. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [杨瑞. 2008. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.) 在中国的适生性研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Yin AL, Chuan RF, Xu GL. 2002. A study on the biological characteristics of *Dendrolimus houi*. *Journal of Southwest Forestry College*, 22(4): 53-55 (in Chinese) [尹安亮, 钊润芳, 许国莲. 2002. 云南松毛虫生物学特性初步研究. 西南林学院学报, 22(4): 53-55]
- Yin AL, Yang CZ, Zhang ZS, He XH, Shi YF. 2003. Natural population life table establishment of *Dendrolimus latipennis* and feeding of larva. *Yunnan Forestry Science and Technology*, (2): 60-65 (in Chinese) [尹安亮, 杨承志, 张家胜, 何新华, 施跃芬. 2003. 昌宁云南松毛虫自然种群生命表组建及幼虫取食量测定. 云南林业科学, (2): 60-65]
- Zhang HX, Wu HY, Huang JH, Xiao W, Luo WG, Xu P. 2019. Prediction of occurrence area of *Dendrolimus* in Yongding District of Zhangjiajie using Markov chains. *Hunan Forestry Science & Technology*, 46(5): 48-52 (in Chinese) [张慧霞, 吴洪渊, 黄建华, 肖炜, 罗文国, 徐鹏. 2019. 运用马尔科夫链模型预测张家界永定区松毛虫发生面积. 湖南林业科技, 46(5): 48-52]
- Zhang JS, Xu GL, Yin AL, Yang CZ, He XH, Shi YF. 2003. Correlation analysis of outbreak of *Dendrolimus houi* Lajonquiere and forest factors in Yunnan Province. *Forestry Science & Technology*, 28(5): 25-27 (in Chinese) [张家胜, 许国莲, 尹安亮, 杨承志, 何新华, 施跃芬. 2003. 云南松毛虫发生与林分因子相关性研究. 林业科技, 28(5): 25-27]
- Zhao RY, Liu DW. 2007. Relationship between the occurrence of *Dendrolimus kikuchii* and weather factors. *Forest Pest and Disease*, 26(5): 26-28 (in Chinese) [赵仁友, 刘大伟. 2007. 云南松毛虫发生与气象因子关系的分析. 中国森林病虫, 26(5): 26-28]
- Zhao RY, Xu ZW, Luo SG, Lin SB, Hua BS. 1998. Studies on the spatial distribution pattern of *Dendrolimus houi* Lajonquiere. *Jiangxi Plant Protection*, 21(4): 9-11, 21 (in Chinese) [赵仁友, 徐真旺, 罗松根, 林少波, 华宝松. 1998. 柳杉毛虫空间分布型的研究. 江西植保, 21(4): 9-11, 21]
- Zhou GL, Chen C, Ye J, Hu BS, Liu FQ. 2007. Predicting potential ecological distribution of *Bactrocera dorsalis* in China using GARP ecological niche modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 27(8): 276-283 (in Chinese) [周国梁, 陈晨, 叶军, 胡白石, 刘凤权. 2007. 利用GARP生态位模型预测桔小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)在中国的适生区域. 生态学报, 27(8): 3362-3369]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB. 2013. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21(1): 90-98 (in Chinese) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 2013. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 21(1): 90-98]

(责任编辑:李美娟)