气候变化情景下刚竹毒蛾在中国适生区预测分析*

张华峰 [1, 2**]

（1. 厦门市绿化中心，厦门 361004；2. 福建农林大学林学院，福州 350002）

摘 要 【**目的**】 在气候变化情况下，研究刚竹毒蛾 *Pantana phyllostachysae* Chao 潜在适生区的分布，有助于做好该虫监测预警，减少对竹林的危害。【**方法**】 基于 169 条刚竹毒蛾的分布记录，以及当代和未来气候数据，应用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 预测刚竹毒蛾在不同气候情景下的潜在适生区，探讨气候变化对其适生区分布的影响。【**结果**】 MaxEnt 模型受试者工作特征曲线（Receiver operating characteristic, ROC），训练 AUC 值均大于 0.944 8，表明预测结果极好；最干月降水量（bio14）和最冷季平均降水量（bio19）是影响我国刚竹毒蛾分布最主要的限制因子。MaxEnt 模型预测结果表明，当代刚竹毒蛾在我国的适生区总面积为 1.49×10^6 km^2，高度和中度适生区主要分布于江西、福建、湖南、浙江等长江以南地区。在未来气候条件下，刚竹毒蛾在我国适生区总面积变化不显著，但发生程度有变化，低适生区面积略有减少，中高适生区面积略有增加；在地理分布格局上，适生区向北、向南和向西扩张，江苏、安徽、河南和湖北等地将成为刚竹毒蛾新的适生区。【**结论**】 随着全球气候变暖，刚竹毒蛾适生区面积总体变化不大，但适生区发生程度和地理分布格局发生变化，未来要加强对新增刚竹毒蛾适生区的预警和防控。

关键词 刚竹毒蛾；MaxEnt；气候变化；适生区；预测

Predicting the future distribution of *Pantana phyllostachysae* in China in a changing climate

ZHANG Hua-Feng[1, 2**]

(1. Xiamen Greening Management Center, Xiamen 361004, China;
2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract [**Objectives**] *Pantana phyllostachysae* Chao is the main leaf-feeding pest in bamboo forest. Understanding the potential future distribution of this pest in a changing climate will be helpful for future pest monitoring and forecasting, and protecting bamboo forests. **[Methods]** Based on 169 distribution records, as well as contemporary and future climate data, we used the Maxent model and ArcGIS to predict the potential distribution of *P. phyllostachysae* under different climate scenarios. [**Results]** The AUC values of receiver operating characteristic curve (ROC) training in the MaxEnt model were all greater than 0.944 8, indicating that results of the predictive model were excellent. Precipitation in the driest month (bio14) and mean precipitation in the coldest quarter (bio19) are the main limiting factors affecting the distribution of *P. phyllostachysae* in China. The results of the MaxEnt model predict that the total habitat potentially suitable for *P. phyllostachysae* in China is 1.49×10^6 km^2, and that areas of high and moderate suitability are mainly distributed in Jiangxi, Fujian, Hunan and Zhejiang provinces. In the predicted future climate conditions, the total area of suitable habitat did not change significantly, but abundance did. The area of low suitability habitat decreased slightly, and the area of medium and high suitability habitat increased slightly. In terms of geographical distribution, suitable areas are predicted to expand northward, southward and westward. Jiangsu, Anhui, Henan and Hubei are predicted to become suitable for *P. phyllostachysae* in the future. [**Conclusion**] Global warming is predicted to have little effect on the distribution of *P. phyllostachysae*, but will affect

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金面上项目（42071300）

**第一作者 First author，E-mail：atugen@126.com

收稿日期 Received：2022-08-31；接受日期 Accepted：2022-11-12

the abundance and geographical distribution pattern of this pest. Monitoring, forecasting and control of *P. phyllostachysae* should be implemented in the areas predicted to become more suitable for this pest.

Key words　*Pantana phyllostachysae*; MaxEnt; climate change; suitable distribution area; prediction

我国是全球竹林分布最广的国家，竹林总面积达 600 多万公顷，有“竹子王国”之美誉（张亚慧等，2019）。由于经济效益显著，近年来林业部门、企业和林农经营竹林的积极性高涨，在福建、浙江、湖南等地已经兴起了竹林的产业化经营，高效、集约的竹产业链正逐步形成与深化（许章华等，2012）。竹类植物生产潜力巨大，经济价值可观，但另一方面，竹子所面临的病虫害的威胁依然不容忽视。据统计，目前已记载危害竹子的害虫达 630 余种（徐天森等，2004；赵仁友，2006），其中刚竹毒蛾 *Pantana phyllostachysae* Chao、黄脊竹蝗 *Ceracris kiangsu* Tsai 和竹缺爪螨 *Aponychus corpuzae* Rimando 等害虫在全国各竹子种植区周期性或暴发性发生（陈冰勇等，2019；耿显胜等，2020；罗友刚等，2021；李红梅等，2022；刘化桐，2022；许章华等，2022）。

刚竹毒蛾属鳞翅目毒蛾科竹毒蛾属，首次报道于 1977 年，国内分布于福建、江西、浙江、湖南、四川、贵州、江苏、广东及广西等省区，国外尚未有该虫分布的报道。该虫的主要寄主植物有毛竹、金竹、慈竹、龙竹、绵竹和苦竹等，是竹类的最主要食叶害虫之一（陈德良等，2006；王元康，2008）。刚竹毒蛾 1 年发生 3-4 代，在福建以 1 年 3 代为主，以卵或 1-2 龄幼虫在竹叶背上越冬；其暴发成灾时虫口密度急剧上升，每株毛竹虫口数可能高达 2 000 头以上（蔡国贵，2003），短时间内即可将竹叶取食殆尽，极大影响次年与第 3 年的出笋量，使竹材变脆，重则成片枯死，状如火烧，严重影响竹林生长与竹业生产，造成严重的经济损失（蔡国贵，2003；洪宜聪等，2021）。据统计，“十二五”以来，福建省平均每年刚竹毒蛾的发生面积达 8.4×10^4 hm^2，危害面积达 6.2×10^4 hm^2，该虫害已造成严重的经济损失，成为制约竹产业健康发展的主要因素（李兴天，2013）。

气候因子是引发刚竹毒蛾及其他森林虫害发生的重要变量（陈德良和王必元，1993）。有部分学者（兰斯文等，1993；李天生等，1988；罗盛健，2006）直接以气候变量为自变量，利用数学方法对刚竹毒蛾危害进行预测预报。兰斯文等（1993）建立了有虫株率与虫口密度的关系式，得到的模型与李天生等（1988）针对马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* Walker 拟合的指数模型类似；罗盛健（2006）指出，气象变量与刚竹毒蛾之间的关系并非线性，选择了 1985-2005 年的旬平均气温、旬降雨量、旬平均相对湿度等 8 类气候变量（共计 288 个变量）为自变量，利用人工神经网络的基本原因，建立了刚竹毒蛾发生面积的预测模型；张飞萍等（2006）采用典型相关性和 Pearson 相关性分析了月平均气温、月极端高温、月极端低温、月降水量、每月日降水量> 0.1 mm 的天数、月日照时数和月平均相对湿度等 7 个气象变量与刚竹毒蛾等节肢动物群落的关系，总体上看，月平均气温、月平均相对湿度和每月日降水量>0.1 mm 的天数是影响毛竹林节肢动物群落季节变化的重要变量，在毛竹叶部害虫的预测和控制中应注重对这些变量的监测和应用。

最大熵（Maxium entropy，MaxEnt）模型是目前使用最为广泛的生态位模型（Padalia *et al.*，2014；Oke and Thompson，2015），在物种地理分布数据和环境因子数据的基础上实现对物种在该区域生存的预测，并对未来气候变化下植物潜在分布区进行预测。MaxEnt 模型在入侵生态学（叶兴状等，2021；胡政香等，2022；Lee *et al.*，2021）和保护生物学（张劳模等，2020；Nzei *et al.*，2022）中有广泛的应用，特别是在预测物种的现实分布和潜在分布的研究中，表现出较高的预测准确率（庄鸿飞等，2018）。本研究以我国已报道的刚竹毒蛾分布和林间实地调查的基础上，应用 MaxEnt 模型与地理信息系统（ArcGIS）模拟预测刚竹毒蛾在不同气候情景下潜在适生区，分

析影响其发生分布区域变化的重要环境变量，以期为刚竹毒蛾的监测预报和科学防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 分布数据获取与处理

本研究相关刚竹毒蛾的分布数据，主要通过实地调查，以及查阅国内外公开发表的文献资料获取，去除明显有误、无效和重复的分布点，共计 194 个分布点。获取各分布点地理位置的经纬度数据，对于无经纬度数据的分布点利用地球在线（https://map.jiqrxx.com/jingweidu）输入地名解析经纬度。为提高模型预测拟合精度，降低群集误差，每 10 km×10 km 的网格只保留一个分布点，经筛选最终获得 169 个分布点（表 1）。

表 1 刚竹毒蛾在中国分布情况

Table 1 Distribution of *Pantana phyllostachysae* in China

分布情况 Distribution conditions	省级行政区 Provincial administrative districts	分布点数量（个） Number of distributional points
分布区 Distribution regions	福建全境 Fujian	57
	江西北部、西部和南部 Northern, western, and southern Jiangxi	23
	安徽南部 Southern Anhui	21
	浙江西南部和北部 Southwestern and northern Zhejiang	14
	四川东南部 Southeastern Sichuan	12
	湖北东南、中部和西南部 Southeastern, central, and southwestern Hubei	11
	广西东北部 Northeastern Guangxi	10
	湖南东北部、东南部、西南部和中部 Northeastern, southeastern, southwestern, and central Hunan	8
	贵州北部和东南部 Northern and southeastern Guizhou	6
	重庆西南部 Southwestern Chongqing	3
	广东北部和东部 Northern and eastern Guangdong	2
	云南南部 Southern Yunnan	2
未分布区 Distribution-free regions	北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、台湾、山东、河南、海南、香港、澳门、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆 Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Heilongjiang, Shanghai, Jiangsu, Taiwan, Shandong, Henan, Hainan, Hong Kong, Macao, Tibet, Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia and Xinjiang	0

1.2 气候变量数据获取与处理

本研究相关的气象数据来自于全球气候和天气数据库（https://www.worldclim.org/）的 CMIP6 模式共享社会经济路径（SSPs）的 19 个生物气候变量（表 2），根据施雯等（2021）及王艳君等（2021）的研究，将研究时间区划为当代和未来 2 个时段，包括当代（1970-2000 年均值），以及未来温室气体排放和发展情况下的 2 个时期（2050 时期：2041-2060 年均值；2070 时期：2061-2080 年均值）。选取当代和未来 2 个时期各 4 种气候情景（SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585，分别代表低、中低、中高和高 4 种排放模式）数据进行模拟，空间分辨率为 2.5 arc-minutes（约 4.5 km^2）。

为了防止多重共线性问题，应用 SPSS 软件对数据进行 Spearman 相关性分析和 VIF 方差膨胀变量分析，对 19 个生物气候变量（表 1）进行去共线性分析，并选取相关系数$|r|>0.8$ 的变量用于建模。结果筛选出昼夜温差月均值（bio2）、

表 2　生物气候变量
Table 2　Bioclimatic variables

变量 Variable	气候变量特征描述 Describe	单位 Unit
bio1	年平均温 Annual mean temperature	℃
bio2	昼夜温差月均值 Monthly diurnal range	℃
bio3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	–
bio4	温度变化方差 Variation coefficient of temperature	–
bio5	最热月份最高温 Max temperature of the warmest month	℃
bio6	最冷月份最低温 Min temperature of the coldest month	℃
bio7	年温变化范围 Annual range of temperature	℃
bio8	最湿季平均温度 Mean temperature of wettest quarter	℃
bio9	最干季平均温度 Mean temperature of the driest quarter	℃
bio10	最暖季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	℃
bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	℃
bio12	年平均降水量 Annual precipitation	mm
bio13	最湿月份降水量 Precipitation of the wettest month	mm
bio14	最干月份降水量 Precipitation of the driest month	mm
bio15	降水量变化方差 Variation coefficient of precipitation	–
bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
bio18	最暖季平均降水量 Mean precipitation of the warmest quarter	mm
bio19	最冷季平均降水量 Mean precipitation of the coldest quarter	mm

昼夜温差与年温差比值（bio3）、最热月份最高温（bio5）、最冷月份最低温（bio6）、最干季平均温度（bio9）、最干月份降水量（bio14）、降水量变化方差（bio15）和最冷季平均降水量（bio19）共 8 个环境变量用于刚竹毒蛾潜在适生区预测。

1.3　MaxEnt 建模及预测精度

用 MaxEnt 软件进行预测模型构建，将相关数据导入模型中，设训练集（75%的分布点）和测试集（剩余 25%的分布点），模型重复运行 10 次，其他参数均采用系统默认值。利用刀切法（Jackknife）检验气候变量对模型的贡献（叶兴状等, 2021）。采用受试者工作特征曲线（Receiver operating characteristic, ROC）的面积值（Area under curve, AUC）评价模型预测精度。AUC 值一般取值范围为 0-1，数值越大表示预测结果越精确。

1.4　刚竹毒蛾适生区划分

将数据转化后导入 ArcGIS, 利用 ArcGIS 中重分类功能划分生境适宜性指数（Suitable habitat index, HSI）（刘玮等，2021），将刚竹毒蛾的潜在适生区划分为 4 个等级：HIS < 0.147，为非适生区；0.147 ≤ HIS < 0.294，为低适生区；0.294 ≤ HIS < 0.441 为中适生区；HIS ≥ 0.441，为高适生区。用 ArcGIS 栅格计算出各时期刚竹毒蛾适生区面积。

1.5　刚竹毒蛾适生区地理格局变化

本研究参考张殷波（2015）的方法，实现刚竹毒蛾适生区地理分布格局变化的可视化表达。在 ArcGIS 中加载矩阵变化值，将刚竹毒蛾适生区的地理分布情况划分为增加区（当前不存在但未来存在的区域）、丧失区（在当前存在但未来

消失的区域）和保留区（当前和未来均存在的区域）3 种变化类型。

2 结果与分析

2.1 模型预测准确性评价

对 MaxEnt 模型的预测结果进行准确性评价，数值为 10 次重复建模的均值。结果显示，在当代及未来 2050 和 2070 2 个时期的 4 种气候情景下（SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585），样本训练数据和测试数据的 AUC 均值均大于 0.944 8，标准差均小于 0.01，表明拟合模型预测极准确（表 3）。本次模型预测结果可用于刚竹毒蛾潜在适生区的预测。

表 3 MaxEnt 模型预测精度 AUC 值
Table 3 AUC value for MaxEnt prediction model

数据来源 Data source	当代 Current	2050s				2070s			
		SSP126	SSP254	SSP370	SSP585	SSP126	SSP254	SSP370	SSP585
训练数据 Training data	0.955 9	0.961 0	0.957 9	0.962 8	0.958 5	0.957 5	0.960 5	0.955 3	0.955 2
测试数据 Testing data	0.947 7	0.953 5	0.949 3	0.961 0	0.948 4	0.944 8	0.951 4	0.947 7	0.953 7
AUC 标准差 Standard deviation	0.009 5	0.007 4	0.008 6	0.006 3	0.007 6	0.008 5	0.007 5	0.008 2	0.007 8

2.2 影响刚竹毒蛾分布的主导气候变量

对 8 个重要的环境变量进行刀切法检验（图 1），并计算各变量对预测模型的贡献率和置换重要值（表 4），筛选出主导变量，并综合分析各变量对刚竹毒蛾发生分布的影响。刀切法检验结果表明，最冷季平均降水量（bio19）、最干月份降水量（bio14）、最冷月份最低温（bio6）、昼夜温差月均值（bio2）、最干季平均温度（bio9）和降水量变化方差（bio15）6 个环境变量对模型的贡献值均超过了 1.0，这些变量对当代刚竹毒蛾的潜在的地理分布影响较大。由表 4 贡献率可看出，最干月降水量（bio14）和最冷季平均降水量（bio19）分别为 68.9%和 16.8%，累计贡献率为 85.7%。由表 2 置换重要值可看出，最干月降水量（bio14）和最冷季平均降水量（bio19）分别为 3.61%和 24.4%，累计置换重要值为 28.00%。Oke 和 Thompson（2015）认为当环境变量对模型的贡献率大于 15%时，则认为该变量是影响物种分布的重要变量，说明最干月降水量（bio14）和最冷季平均降水量（bio19）是模拟刚竹毒蛾潜在的地理分布模型最关键的环境变量。

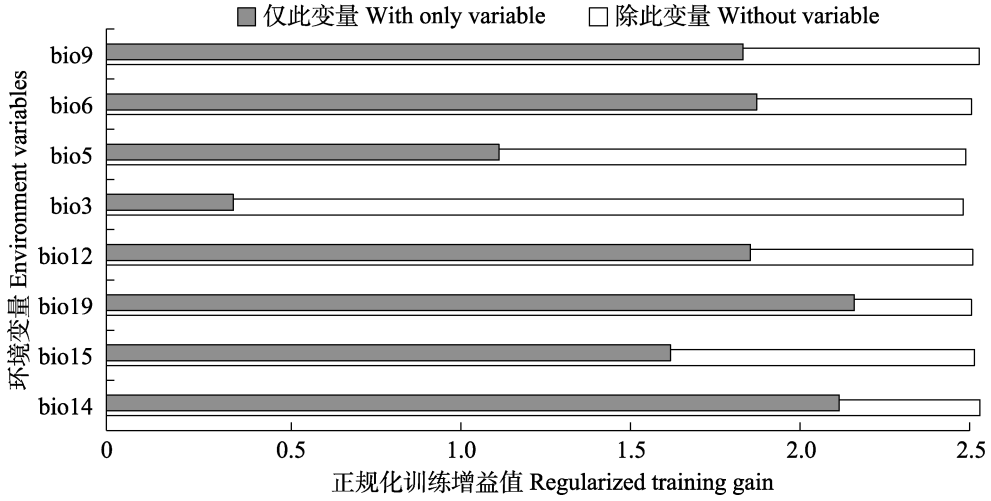

图 1 主导环境变量刀切法检验
Fig. 1 Jackknife test for evaluating the main environmental variables

表 4　主导环境变量的贡献率和重要值

Table 4　Contribution rates and permutation importance values of main environmental variables

序号 No.	变量 Variable	贡献百分率（%） Contribution percent (%)	置换重要值（%） Permutation importance (%)
1	最干月份降水量（bio14） Precipitation of the driest month	68.90	3.61
2	最冷季平均降水量（bio19） Mean precipitation of the coldest quarter	16.85	24.39
3	昼夜温差与年温差比值（bio3） Isothermality	4.10	15.19
4	最热月份最高温（bio5） Max temperature of the warmest month	3.03	8.94
5	最干季平均温度（bio9） Mean temperature of the driest quarter	2.20	9.42
6	最冷月份最低温（bio6） Min temperature of the coldest month	2.16	32.86
7	昼夜温差月均值（bio2） Monthly diurnal range	2.00	2.86
8	降水量变化方差（bio15） Variation coefficient of precipitation	0.77	2.72

MaxEnt 模型的单一环境变量响应曲线（图 2，图 3）显示，最干月份降水量（bio14）在 0-42 mm 内，随着降水量的增加，刚竹毒蛾的存在概率显著上升，在最干月份降水量 42 mm 上存在概率达到临界值 0.63 后，降水量上升过程中存在概率基本保持不变状态。最冷季平均降水量（bio19）在 0-241 mm 时，随着降水量的增加，刚竹毒蛾的存在概率显著上升，在最冷季平均降水量 245 mm 上存在概率达到临界值 0.70 后，降水量上升过程中存在概率保持不变状态。

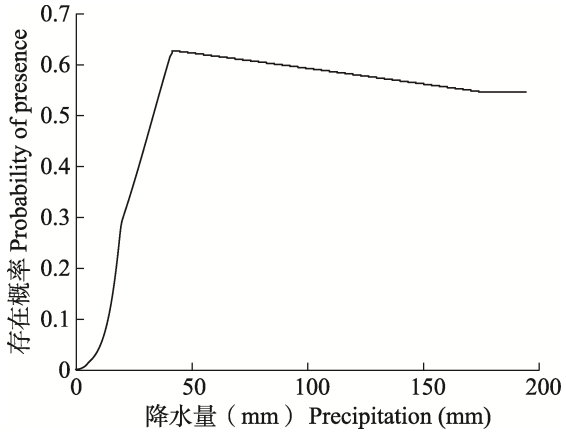

图 2　最干月份降水量（bio14）

Fig. 2　Precipitation of the driest month

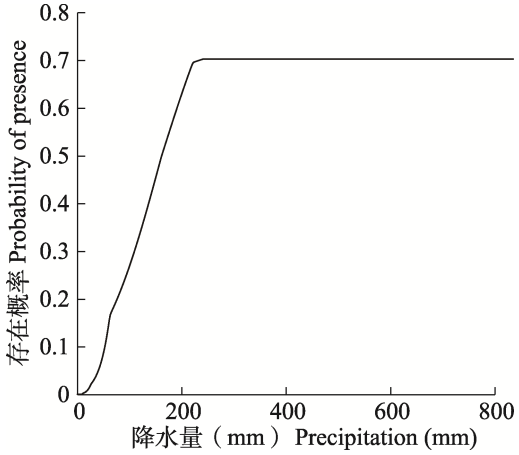

图 3　最冷季平均降水量（bio19）

Fig. 3　Mean precipitation of the coldest quarter

2.3　当代刚竹毒蛾潜在适生区预测

利用 ArcGIS 重分类功能并计算面积（表 5，图 4）得知，当代刚竹毒蛾在中国潜在的适生区总面积为 1.49×10^6 km^2，占全国总面积的 15.50%。高适生区分布面积最大，为 5.54×10^5 km^2，占全国总面积的 5.77%；几乎覆盖了江西、湖南和福建全境，部分覆盖了浙江、广东、广西、重庆和湖北等地，零散分布于湖北南部、江苏南部、安徽中南部、四川东南部和台湾北部。

表 5　当代气候条件下刚竹毒蛾在中国潜在适生区

Table 5　Potential distribution area of *Pantana phyllostachysae* in China under contemporary climate conditions

区域 Regions	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
福建 Fujian	福州、厦门、莆田、泉州、漳州、三明、南平、宁德等 Fuzhou, Xiamen, Putian, Quanzhou, Zhangzhou, Sanming, Nanping, Ningde, etc	龙岩 Longyan	—	—
江西 Jiangxi	南昌、景德镇、萍乡、九江、新余市、鹰潭、赣州、吉安、宜春、抚州等 Nanchang, Jingdezhen, Pingxiang, Jiujiang, Xinyu City, Yingtan, Ganzhou, Ji'an, Yichun, Fuzhou, etc	九江 Jiujiang	—	—
安徽 Anhui	安庆、黄山、池州、宣城 Anqing, Huangshan, Chizhou, Xuancheng	六安、合肥、铜陵、芜湖、马鞍山 Lu'an, Hefei, Tongling, Wuhu, Ma'anshan	阜阳、淮南、滁州、蚌埠、亳州、淮北 Fuyang, Huainan, Chuzhou, Bengbu, Bozhou, Huaibei	宿州 Suzhou
浙江 Zhejiang	台州、温州、丽水、衢州、杭州 Taizhou, Wenzhou, Lishui, Quzhou, Hangzhou	金华、绍兴、宁波、湖州 Jinhua, Shaoxing, Ningbo, Huzhou	舟山、嘉兴 Zhoushan, Jiaxing	—
四川 Sichuan	泸州、宜宾 Luzhou, Yibin	乐山、自贡、内江 Leshan, Zigong, Neijiang	雅安、成都、眉山、资阳、德阳、遂宁、广安、南充、达州 Ya'an, Chengdu, Meishan, Ziyang, Deyang, Suining, Guang'an, Nanchong, Dazhou	绵阳、攀枝花、广元、巴中、阿坝、甘孜、凉山 Mianyang, Panzhihua, Guangyuan, Bazhong, Aba, Ganzi, Liangshan
湖北 Hubei	咸宁、黄石、黄冈 Xianning, Huangshi, Huanggang	荆州、武汉 Jingzhou, Wuhan	恩施、宜昌、荆门、孝感、随州 Enshi, Yichang, Jingmen, Xiaogan, Suizhou	十堰、襄樊 Shiyan, Xiangfan
广西 Guangxi	桂林、贺州 Guilin, Hezhou	梧州、柳州、来宾、贵港、钦州、北海 Wuzhou, Liuzhou, Laibin, Guigang, Qinzhou, Beihai	河池、南宁、防城港、玉林 Hechi, Nanning, Fangchenggang, Yulin	百色、崇左 Baise, Chongzuo
湖南 Hunan	长沙、株州、湘潭、娄底、衡阳、永州、郴州 Changsha, Zhuzhou, Xiangtan, Loudi, Hengyang, Yongzhou, Chenzhou	怀化、益阳、岳阳 Huaihua, Yiyang, Yueyang	吉首、张家界、邵阳 Jishou, Zhangjiajie, Shaoyang	—

续表 5 (Table 5 continued)

区域 Regions	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
重庆 Chongqing	重庆西部 Western Chongqing	—	重庆北部和南部 Northern and southern Chongqing	城口 Chengkou
广东 Guangdong	韶关、清远 Shaoguan, Qingyuan	肇庆、佛山、广州、河源、梅州、潮州、揭阳、汕头、珠海、中山 Zhaoqing, Foshan, Guangzhou, Heyuan, Meizhou, Chaozhou, Jieyang, Shantou, Zhuhai, Zhongshan	湛江、茂名、阳江、云浮、江门、东莞、深圳、惠州、汕尾 Zhanjiang, Maoming, Yangjiang, Yunfu, Jiangmen, Dongguan, Shenzhen, Huizhou, Shanwei	—
河南 Henan	—	—	南阳、驻马店、信阳 Nanyang, Zhumadian, Xinyang	其他地区 Other regions
上海 Shanghai	—	上海全境 Throughout Shanghai	—	—
台湾 Taiwan	—	—	台北 Taipei	其他地区 Other regions
海南 Hainan	—	—	海口少部分 A small area of Haikou	其他地区 Other regions
江苏 Jiangsu		南通部分、镇江、南京、常州、无锡、苏州 Part of Nantong, Jiangsu, Zhenjiang, Nanjing, Changzhou, Wuxi, Suzhou	淮安、盐城、扬州、泰州 Huai'an, Yancheng, Yangzhou, Taizhou	徐州、连云港、宿迁 Xuzhou, Lianyungang, Suqian
贵州 Guizhou	—	—	遵义、贵阳、黔南、铜仁、黔东南 Zunyi, Guiyang, ,Qiannan, Tongren, Qiandongnan	毕节、六盘水、黔西南 Bijie, Liupanshui, Qianxinan
其他省区 Other provinces and regions				河北、山西、黑龙江、吉林、辽宁、山东、云南、陕西、甘肃、青海、内蒙古、西藏、宁夏、新疆、北京、天津、香港、澳门全境 Hebei, Shanxi, Heilongjiang, Jilin, Liaoning, Shandong, Yunnan, Shaanxi, Gansu, Qinghai, Inner Mongolia, Tibet, Ningxia, Xinjiang, Beijing, Tianjin, Hong Kong, Macao

低适生区分布面积次之，为 4.88×10^5 km^2，占全国总面积的 5.08%，沿中适生区向周边分布，主要分布于广东南部、广西东南和中部、贵州中东部、四川东南部、重庆东南部、湖北西南和东南部、河南南部、安徽中部、江苏中部和台湾北部，在海南北部有小范围分布。中适生区面积为 4.52×10^5 km^2，占全国总面积的 4.71%，沿高适生区向周边分布，主要分布于福建西南部、广东中东部、广西中部、贵州东部、四川东南部、湖南西北部、湖北南部、安徽南部、江苏南部和浙江北部，在台湾西北部小范围分布。以上刚竹毒蛾高适生区和中适生区主要分布在长江以南地区，几乎覆盖了刚竹毒蛾实际分布点，表明模型模拟结果与其实际分布点基本一致。

2.4 未来气候变化情景下刚竹毒蛾潜在适生区预测

与当代气候情景下相比，未来气候变化情景下刚竹毒蛾在中国潜在适生区面积总体保持平稳，适生程度略有变化（图 4，表 6）。2050 时期，在 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 4 种气候情景下，刚竹毒蛾平均总适生区面积为 $1.45.\times10^6$ km^2，较当代气候条件下面积减少了 2.91%，面积变化不大，其中在 SSP370 气候情景下，总适生区面积减幅稍大，减少了 7.76×10^4 km^2，主要在四川东南部、重庆西南部等地区中高适生区面积大幅减少；2070 时期，4 种气候情景下，刚竹毒蛾平均总适生区面积为 1.49×10^6 km^2，较当代气候条件下的适生面积几乎无变化，其中在 SSP585 气候情景下，适生面积增幅最大，增加了 5.24×10^4 km^2，主要在安徽大部分中适生区大幅增加。未来气候情景下，尤其是在 2050 时期 SSP370 气候情景下，低适生区面积达到最大值 6.13×10^5 km^2，与当代相比增加了 25.56%，主要在安徽、湖南、广东、台湾等大部分地区低适生区分布大幅增加；在 2070 时期 SSP245 气候情景下，中适生区面积增幅也较大，为 5.26×10^5 km^2，与当代相比增加了 16.18%，主要在江苏南部、安徽中南部、广西中部、广东中部等地区中适生区增幅较大；在 2070 时期 SSP370 气候情景下，高适生区面积达到最大值，为 6.17×10^5 km^2，与当代相比增加了 11.38%，主要在江西、福建、广西南部、广东北部等地区高适生区增幅较大。综合未来气候情景下的预测结果，刚竹毒蛾在我国适生区总面积变化不显著，低适生区面积略有减少，中高适生区面积略有增加，更有利于刚竹毒蛾的发生危害。

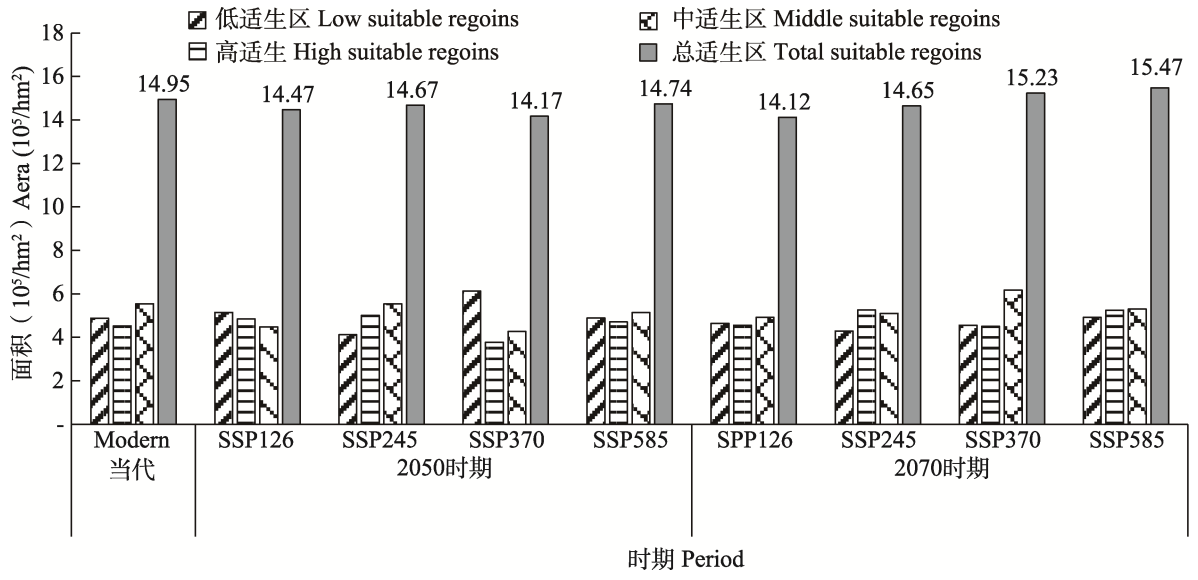

图 4 不同时期刚竹毒蛾适生区面积变化

Fig. 4 Changes of suitable area of *Pantana phyllostachysae* in different periods

表 6　未来不同气候情景下竹毒蛾适生区面积变化

Table 6　Changes of suitable area of *Pantana phyllostachysae* in the future climate conditions

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
SSP126	2050s	江西、福建大部、浙江西部、安徽南部、湖北东南部、湖南东南部和西部局部、广西东南部、广东北部、重庆西北部、四川中南部和台湾中部等局部 Jiangxi, most of Fujian, western Zhejiang, southern Anhui, southeastern Hubei, southeastern and western Hunan, southeastern Guangxi, northern Guangdong, northwestern Chongqing, mid-southern Sichuan, and central Taiwan	福建中部和西南部、浙江西部和南部、安徽南部、湖北中南部、贵州中部、重庆西部、四川东南部、广西中部、台湾北部 Central and southwestern Fujian, western and southern Zhejiang, southern Anhui, mid-southern Hubei, central Guizhou, western Chongqing, southeastern Sichuan, central Guangxi, and northern Taiwan	浙江东北部、上海、江苏西部和南部、安徽、河南南部、湖北中部和东部、湖南北部和西部、重庆、四川东部、贵州东部、广西西部和南部、广东东部、南部和西部、台湾中部和北部 Northeastern Zhejiang, Shanghai, western and southern Jiangsu, Anhui, southern Henan, central and eastern Hubei, northern and western Hunan, Chongqing, eastern Sichuan, eastern Guizhou, western and southern Guangxi, eastern, southern and western Guangdong, and central and northern Taiwan	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions
	2070s	江西、福建大部、浙江西部、安徽中部、湖北东部、湖南、重庆中部和西部、四川东南部、广西中部和东部、广东北部、台湾中部 Jiangxi, most of Fujian, western Zhejiang, central Anhui, eastern Hubei, Hunan, central and western Chongqing, southeastern Sichuan, central and eastern Guangxi, northern Guangdong, and central Taiwan	福建西南部、浙江北部、江苏南部、安徽中部和南部、河南东南部、湖北中部、重庆西北部、四川东南部、广西中部、广东中部、台湾中部 Southwestern Fujian, northern Zhejiang, southern Jiangsu, central and southern Anhui, southeast Henan, central Hubei, northwest Chongqing, southeast Sichuan, central Guangxi, central Guangdong, and central Taiwan	浙江东部、上海、江苏中部、安徽北部、河南南部、湖北中部和南部、四川东部、贵州北部、东部和南部、广西西部、广东南部、台湾 Eastern Zhejiang, Shanghai, central Jiangsu, northern Anhui, southern Henan, central and southern Hubei, eastern Sichuan, northern, eastern and southern Guizhou, eastern Guangxi, southern Guangdong, and Taiwan	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions

续表 6 (Table 6 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
SSP126	2050s	江西、福建大部、浙江西部和南部、安徽西南零星分布、湖北东南部、湖南东部、南部和西北部、四川中南部、重庆西北部、广西中部和东北部、广东北部、台湾北部和南部零星分布 Jiangxi, most of Fujian, western and southern Zhejiang, sporadic distribution in southwestern Anhui, southeastern Hubei, eastern, southern and northwestern Hunan, mid-southern Sichuan, northwestern Chongqing, central and northeastern Guangxi, northern Guangdong, and northern and sporadic distribution in southern Taiwan	福建西南部、浙江北部、江苏西南部、安徽中部、河南南部、湖北中部、湖南北部和西南部、四川中部、重庆北部、广西北部和西南部、广东中部、台湾北部 Southwestern Fujian, northern Zhejiang, southwestern Jiangsu, central Anhui, southern Henan, central Hubei, northern and southwestern Hubei, central Sichuan, northern Chongqing, northern and southwestern Guangxi, central Guangdong, northern Taiwan	浙江东部、上海、江苏南部、中部和西北部、安徽北部、河南南部和西南部、湖北东部、中部和西部、重庆南部、四川东南部、贵州东部、广西中部、北部和西南部、广东南部、台湾中部和南部 Eastern Zhejiang, Shanghai, southern, central and northwestern Jiangsu, northern Anhui, southern and southwestern Henan, eastern, central and western Hubei, southern Chongqing, southeastern Sichuan, eastern Guizhou, central, northern and southwestern Guangxi, southern Guangdong, and central and southern Taiwan	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions
	2070s	江西大部、福建沿海、中部和西北部、浙江沿海、西部和北部、安徽西南部、湖北东南部、湖南大部分、重庆中部和西部局部、四川中南部、广西东北部、广东北部、台湾中部和南部零星分布 Most of Jiangxi, coastal, central and northwestern Fujian, coastal, western and northern Zhejiang, southwestern Anhui, southeastern Hubei, most Hunan, central and western parts of Chongqing, mid-southern Sichuan, northeastern Guangxi, northern Guangdong, and central and sporadic distribution in southern Taiwan	江西西部零星分布、福建西南部和东北部、浙江北部、中部和南部、上海、江苏南部、安徽南部和中部、河南南部局部、湖北中南部、湖南北部和西南部、重庆西南部、四川中南局部、广西中南部、广东中部、台湾中部 Sporadic distribution in western Jiangxi, southwestern and northeastern Fujian, northern, central and southern Zhejiang, Shanghai, southern Jiangsu, southern and central Anhui, partial parts of southern Henan, central and southern Hubei, northern and southwestern Hunan, southwestern Chongqing, partial parts of central and southern Sichuan, mid-southern Guangxi, central Guangdong, and central Taiwan	江西西部零星分布、福建东北部、浙江东部和西部、上海、江苏中部和南部、安徽北部、河南南部、湖北中部和西部、重庆东南和东北部、四川东南部、贵州东部、广西中部和东南少部、广东西南和东南部、台湾东南沿海、云南西双版纳零星分布、西藏林芝零星分布 Sporadic distribution in western Jiangxi, northeastern Fujian, eastern and western Zhejiang, Shanghai, central and southern Jiangsu, northern Anhui, southern Henan, central and western Hubei, southeastern and northeastern Chongqing, southeastern Sichuan, eastern Guizhou, central and southeastern Guangxi, southwestern and southeastern Guangdong, southeastern coast of Taiwan, sporadic distribution in Xishuangbanna, Yunnan, and sporadic distribution in Lingzhi Tibet	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions

续表 6 (Table 6 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
SSP370	2050s	江西大部、福建大部、浙江南部、西部和北部，安徽中南零星分布、湖北东南部、重庆西部零星分布、四川中南零星分布、湖南东南和西部零星分布、广西东北部、广东北部及台湾中部零星分布 Most of Jiangxi, most of Fujian, southern, western and northern Zhejiang, sporadic distribution in mid-southern Anhui, southeast Hubei, sporadic distribution in western Chongqing, sporadic distribution in mid-southern Sichuan, southeast and sporadic distribution in western Hunan, northeast Guangxi, northern Guangdong, and sporadic distribution in central Taiwan	江西西部零星分布、福建西南、中部和东北部、浙江南部和北部、安徽中部、湖北中南零星分布、重庆西部和西北部、四川中南部、广西中部、广东中北部及台湾中部零星分布 Sporadic distribution in western Jiangxi, southwestern, central and northeastern Fujian, southern and northern Zhejiang, central Anhui, sporadic distribution in central and southern Hubei, western and northwestern Chongqing, central and southern Sichuan, central Guangxi, central and northern Guangdong, and sporadic distribution in central Taiwan	江西西部零星分布、福建南部零星分布、浙江东部、上海、江苏南部和西部、安徽大部、河南南部、湖北中南部、重庆南部、东部和北部局部、四川东南部、贵州东部、广西中部和南部、广东南部、中部和东部、台湾中部及西藏林芝零星分布 Sporadic distribution in western Jiangxi, sporadic distribution in southern Fujian, eastern Zhejiang, Shanghai, southern and western Jiangsu, most of Anhui, southern Henan, central and southern Hubei, southern, eastern and northern Chongqing, southeastern Sichuan, eastern Guizhou, central and southern Guangxi, southern, central and eastern Guangdong, central Taiwan, and sporadic distribution in Linzhi, Tibet	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions
	2070s	江西大部、福建大部、浙江南部、西部和北部、安徽中南部和中西部、湖北南部、重庆西部和中部零星分布、四川东南部、湖南南部、东部和中西部、广西东部、东北部和中部、广东北部及台湾中部和南部零星分布 Most of Jiangxi, most of Fujian, southern, western and northern Zhejiang, mid-southern and mid-western Anhui, southern Hubei, western and sporadic distribution in central Chongqing, southeastern Sichuan, southern, eastern and mid-western Hunan, southern, northeastern and central Guangxi, northern Guangdong, and central and sporadic distribution in southern Taiwan	江西西部零星分布、福建南部、浙江南部和北部、江苏西南部、安徽南部和中部、河南南部局部、湖北中南局部、重庆中部零星分布、四川中南零星分布、广西中部和东南部、广东中部和中东部及台湾中部零星分布 Sporadic distribution in western Jiangxi, southern Fujian, southern and northern Zhejiang, southwestern Jiangsu, southern and central Anhui, partial parts of southern Henan, partial parts of central and southern Hubei, sporadic distribution in central Chongqing, sporadic distribution in central and southern Sichuan, central and southeastern Guangxi, central and mid-eastern Guangdong, and sporadic distribution in central Taiwan	江西西部零星分布、福建南部零星分布、浙江东部、上海、江苏南部、东部和西北部、安徽北部、湖南中东部、重庆东南部和东北部、四川东南部、贵州北部、东部和南部、广西西部、广东南部、台湾北部、中部和南部、云南南部零星分布及西藏林芝零星分布 Sporadic distribution in western Jiangxi, sporadic distribution in southern Fujian, eastern Zhejiang, Shanghai, southern, eastern and northwestern Jiangsu, northern Anhui, mid-eastern Hunan, southeastern and northeastern Chongqing, southeastern Sichuan, northern, eastern and southern Guizhou, western Guangxi, southern Guangdong, northern, central and southern Taiwan, sporadic distribution in southern Yunnan, and sporadic distribution in Linzhi, Tibet	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions

续表 6 (Table 6 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	高适生区 High suitable regions	中适生区 Middle suitable regions	低适生区 Low suitable regions	非适生区 Unsuitable regions
SSP585	2050s	江西大部、福建大部、浙江南部和西部、安徽中南部和中西部零星分布、湖北东部、重庆西部零星分布、四川中南部零星分布、湖南东部和西部零星分布、广西东北部及广东北部 Most of Jiangxi, most of Fujian, southern and western Zhejiang, sporadic distribution in mid-southern and mid-western Anhui, eastern Hubei, sporadic distribution in western Chongqing, sporadic distribution in mid-southern Sichuan, sporadic distribution in eastern and western Hunan, northeastern Guangxi, and northern Guangdong	江西西部零星分布、福建南部零星分布、浙江西部、江苏西南部零星分布、安徽中部、河南南部局部、湖北中南部、重庆西部、四川东南局部、广西中部和南部及广东中部和中东部 Sporadic distribution in western Jiangxi, sporadic distribution in southern Fujian, western Zhejiang, sporadic distribution in southwestern Jiangsu, central Anhui, partical parts of southern Henan, mid-southern Hubei, partical parts of western Chongqing, southeastern Sichuan, central and southern Guangxi, and central and eastern Guangdong	福建东北零星分布、浙江东部、南部和北部、上海、江苏南部和西部、安徽北部、河南中南部、湖北中北部、重庆东南部、四川中东部、贵州南部、东部和北部、广西中部和西南部、广东南部、台湾大部及西藏林芝零星分布 Sporadic distribution in northeastern Fujian, eastern, southern and northern Zhejiang, Shanghai, southern and western Jiangsu, northern Anhui, mid-southern Henan, mid- northern Hubei, southeastern Chongqing, mid-eastern Sichuan, southern Guizhou, eastern and northern Guangxi, southern Guangdong, most of Taiwan, and sporadic distribution in Linzhi, Tibet	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions
	2070s	江西、福建大部、浙江西部和北部、安徽中南部和中西部零星分布、湖北东部、重庆西部零星分布、四川东部零星分布、湖南东南、南部和西部零星分布、广西东北部、广东北部及台湾零星分布 Jiangxi, most of Fujian, western and northern Zhejiang, mid-southern and sporadic distribution in mid-western Anhui, eastern Hubei, sporadic distribution in western Chongqing, sporadic distribution in eastern Sichuan, sporadic distribution in southeastern, southern and western Hunan, northeastern Guangxi, northern Guangdong, and sporadic distribution in Taiwan	福建南部零星分布、浙江南部、江苏西南局部、安徽中部和南部、河南南部局部、湖北东南部、重庆西部零星分布、四川中南局部、广西中部和南部、广东中部和中东部及台湾中部零星分布 Sporadic distribution in southern Fujian, southern Zhejiang, partical pasts of southwestern Jiangsu, central and southern Anhui, partical parts of southern Henan, southeastern Hubei, sporadic distribution in western Chongqing, partical parts of mid- southern Sichuan, central and southern Guangxi, central and mid-eastern Guangdong, and sporadic distribution in central Taiwan	福建东北零星分布、浙江东部、上海、江苏大部、安徽北部、河南中南部、湖北中北部和西部零星分布、重庆东南部、四川中东部、贵州东部、北部和南部、广西中部和西南部、广东南部和东南部、台湾大部、云南西双版纳零星分布及西藏林芝零星分布 Sporadic distribution in northeastern Fujian, eastern Zhejiang, Shanghai, most of Jiangsu, northern Anhui, mid-southern Henan, sporadic distributin in mid-northern and western Hubei, southeastern Chongqing, mid-eastern Sichuan, southern, northern and eastern Guizhou, central and southwestern Guangxi, southern and southeastern Guangdong, most of Taiwan, sporadic distribution in Xishuangbanna, Yunnan, and sporadic distribution in Linzhi, Tibet	适生区外的其他地区 Other regions outside the suitable distribution regions

2.5　未来气候变化情景下刚竹毒蛾潜在适生区地理分布格局变化

未来气候变化情景下，刚竹毒蛾在中国潜在的适生区地理分布格局均有不同程度的变化（表7）。2050 时期，在 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 4 种气候情景下，刚竹毒蛾适生区地理格局中的保留区面积均达 75%以上，其中在 SSP245 气候情景下保留区面积最大，达 8.89×10^5 hm^2，主要分布在江西、福建、广西、广东、湖南等省份，部分分布在湖北南部、安徽南部、浙江西南部、重庆西南部、四川东南部；增加区主要分布在适生区的北缘和南缘，如安徽中部、湖北中部、重庆中部，以及广西西南部和东南部、广东北部以及台湾东南部，其中在 SSP245 气候情景下增加区面积最大，达 1.69×10^5 hm^2；丧失区主要分布适生区的东部和西部，部分中部和北部区域，如江苏南部、浙江东部、安徽南部、贵州东部、湖南西部和中部、重庆西北部，其中在 SSP370 气候情景下丧失区面积最大，达 2.08×10^5 hm^2。

2070 时期，在 4 种气候情景下，刚竹毒蛾适生区空间格局中的保留区面积均达 76%以上，其中在 SSP245 气候情景下保留区面积最大，达 9.05×10^5 hm^2，主要分布在江西、湖南、福建、浙江、广西、广东等省份，部分分布在湖北南部、安徽南部、重庆西南部、四川东南部；增加区主要分布在适生区的北缘、南缘和西缘，如江苏西南部、安徽中部、河南南部、湖北中部、湖南北部和西部、重庆西北和西部，以及贵州南部、广西的中西南和东南、广东的南部以及台湾东北和东南部，零星分布在云南西双版纳地区，其中在 SSP585 气候情景下增加区面积最大，达 1.71×10^5 hm^2；丧失区主要分布适生区的东部和西部，部分中部区域，如浙江、江苏南部、安徽南部、四川东南部、重庆西北部、贵州北部和东部、广东南部，以及湘赣、桂湘、粤湘交界处，其中在 SSP126 气候情景下丧失区面积最大，达 1.95×10^5 hm^2。总体而言，刚竹毒蛾在未来气候条件下适生能力将不断增强，适生区向北和向南、向西扩张，特别是在未来要加强对江苏、安徽、河南、湖北、湖南、重庆、贵州、广西、广东以及台湾等地的潜在刚竹毒蛾适生区的预警和防控。

3　结论与讨论

MaxEnt 模型做为一种物种分布模型（Species distribution model）和生态位模型（Ecological niche model）被应用于入侵物种适生区预测和濒危物种保护地的选择（张路，2015；张劳模等，2020；叶兴状等，2021）。目前常用的物种分布模型还有 CLIMEX（Sutherst and Maywald，1985）、GARP（David，1999）、BIOCLM 和 DOMAIN（Ganeshaiah *at al.*，2003；成丽芳等，2022）等，与其他模型软件相比，MaxEnt 模型具有 ROC 值大，预测效果好的特点（庄鸿飞等，2018）。近年来，结合 ArcGIS 地理信息系统软件，MaxEnt 模型在鞘翅目、半翅目、鳞翅目、双翅目和直翅目等农林害虫潜在分布预测、适生区扩散模拟和外来入侵物种的风险评估等方面的应用越来越广泛（吕飞等，2017；施雯等，2021；王艳君等，2021；成丽芳等，2022）。本研究通过 MaxEnt 模型分析，明确了最干月降水量（bio14）和最冷季平均降水量（bio19）是影响我国刚竹毒蛾适生区分布最主要的限制因子。MaxEnt 模型预测结果表明，当代刚竹毒蛾在我国的适生区总面积为 1.49×10^6 km^2，高度和中度适生区主要分布于江西、福建、湖南、浙江等长江以南地区，适生程度呈现从南到北逐渐递减，要加大中高适生区该虫的防控力度；在未来气候条件下，刚竹毒蛾在我国适生区总面积变化不显著，低适生区面积略有减少，中高适生区面积略有增加，更有利于刚竹毒蛾的发生危害，应做好潜在适生区刚竹毒蛾的监测预报工作。未来气候变化为刚竹毒蛾适生区的扩张提供了有利的条件，模型预测分析表明，刚竹毒蛾在未来中国潜在的适生区地理分布格局均有不同程度的变化，适生区向北和向南、向西扩张，特别是在未来要加强对江苏、安徽、河南、湖北等地刚竹毒蛾入侵危害的风险评估，加强潜在适生区的预警和防控。

表 7　未来不同气候情景下竹毒蛾适生区地理分布格局变化

Table 7　Changes of geographical distribution pattern of suitable area of *Pantana phyllostachysae* in the future climate conditions

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	保留区 Reserved regions	丧失区 Decrease regions	增加区 Increased regions
SSP126	2050s	江西、福建、湖南、浙江西部、中部和北部、南部局部、安徽中南部和中西部、湖北东部、重庆西南部、四川东南部、广西中东部和北部、广东北部和东部 Jiangxi, Fujian, Hunan, partial parts of western, central, northern, and southern Zhejiang, mid-southern and mid-western Anhui, eastern Hubei, southwestern Chongqing, southeastern Sichuan, mid- eastern and northern Guangxi, and northern and eastern Guangdong	江西西部局部、福建东北部局部、浙江东部、南部和北部、上海 、江苏南部、安徽南部、湖北中南部局部、重庆南部局部、四川中南部局部、贵州东部局部、湖南北部和南部局部、广西北部局部、广东南部和中南部局部及台湾北部局部 Partial parts of western Jiangxi, partial parts of northeastern Fujian, eastern, southern and northern Zhejiang, Shanghai, southern Jiangsu, southern Anhui, mid-southern Hubei, partial parts of southern Chongqing, partial parts of central southern Sichuan, partial parts of eastern Guizhou, northern and partial parts of southern Hunan, partial parts of northern Guangxi, southern and partial parts of mid-southern Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	江西北部零星分布、福建西南部零星分布、浙江中部和北部零星分布、江苏南部局部、安徽中部、河南南部、湖北中东部、重庆中部、四川东部局部、贵州东北部局部、湖南西部零星分布、广西中部局部和东南局部、广东中部、台湾中部局部及西藏阿里地区局部 Sporadic distribution in northern Jiangxi, sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in cenrtal and northern Zhejiang, partial parts of southern Jiangsu, central Anhui, southern Henan, mid-eastern Hubei, central Chongqing, partial parts of eastern Sichuan, partial parts of northeastern Guizhou, sporadic distribution in western Hunan,partial parts of central and southeastern Guangxi, central Guangdong, partial parts of central Taiwan, and partial parts of Ali, Tibet
	2070s	江西、福建、湖南、浙江西部、中部和北部局部、安徽中南部、湖北东部、重庆西南部、四川东南部、广西中东部和北部及广东北部和东部 Jiangxi, Fujian, Hunan, partial parts of western, central and northern Zhejiang, mid-southern Anhui, eastern Hubei, southwestern Chongqing, southeastern Sichuan, central eastern and northern Guangxi, and northern and eastern Guangdong	江西西部局部、福建东北部和中部、浙江东部、南部和北部、上海、江苏南部、安徽南部、四川东南局部、重庆东南局部、贵州东部局部、广西中部局部、广东南部沿海和北部局部及台湾北部局部 Partial parts of western Jiangxi, northeastern and central Fujian, eastern, southern and northern Zhejiang, Shanghai, southern Jiangsu, southern Anhui, partial parts of southeastern Sichuan, partial parts of southeastern Chongqing, partial parts of eastern Guizhou, partial parts of central Guangxi, southern coastal and partial parts of northern Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏南南部局部、安徽中部、河南南部、湖北中部和西部局部、重庆中部、四川东部局部、贵州东北部局部、湖南西北部和中部零星分布、广西中部和东南部、广东中部、台湾北部及西藏阿里地区局部 Sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, partial parts of southeastern Jiangsu, central Anhui, southern Henan, central and partial parts of western Hubei, central Chongqing, partial parts of eastern Sichuan, partial parts of northeastern Guizhou, northwestern and sporadic distribution in central Hunan, central and southeastern Guangxi, central Guangdong, northern Taiwan, and partial parts of Ali, Tibet

续表 7 (Table 7 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	保留区 Reserved regions	丧失区 Decrease regions	增加区 Increased regions
SSP245	2050s	江西、福建、湖南，浙江西南部、北部和南部，安徽南部、湖北东部和南部、重庆西南部、四川东南部、广西中东部和北部及广东北部和东南部 Jiangxi, Fujian, Hunan, southwestern, northern and southern Zhejiang, southern Anhui, eastern and southern Hubei, southwestern Chongqing, southeastern Sichuan, mid-eastern and northern Guangxi, and northern and southeastern Guangdong	江西西部局部、福建东北部和西南局部、浙江东部、西南部和西北部、上海、江苏南部、安徽南部局部、重庆西南局部、四川中南局部、贵州东部局部和北部局部、广西北部、广东北部局部和南部沿海及台湾北部局部 Partial parts of western Jiangxi, partial part of northeastern and southwestern Fujian, eastern, southwestern and northwestern Zhejiang, southern Jiangsu, partial part of southern Anhui, partial part of southwestern Chongqing, partial part of mid-southern Sichuan, partial part of eastern and northern Guizhou, partial part of northern Guangxi, partial part of northern and southern coastal Guangdong, and partial part of northern Taiwan	福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏西南部局部、安徽中部、河南南部、湖北中部、重庆中部、四川东部局部、贵州东北部局部、湖南西北部局部、广西中部和东南部、广东中部和东南部、台湾大部及西藏阿里局部 Sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, partial parts of southwestern Jiangsu, central Anhui, southern Henan, central Hubei, central Chongqing, partial parts of eastern Sichuan, partial parts of northeastern Guizhou, partial parts of northwestern Hunan, partial parts of central and southeastern Guangxi, partial parts of central and southeastern Guangdong, most of Taiwan, and partial parts of Ali, Tibet
	2070s	江西、福建、湖南、浙江西部、北部及沿海地区、上海局部、江苏南部、安徽南部、湖北东南部、重庆西南部、四川东南部、广西东部及广东北部和东南部 Jiangxi, Fujian, Hunan, western, northern and coastal areas of Zhejiang, partial parts of Shanghai, southern Jiangsu, southern Anhui, southeastern Hubei, southwestern Chongqing, southeastern Sichuan, eastern Guangxi, and northern and southeastern Guangdong	江西西部局部、福建东北部和西南部局部、浙江南部和中部局部、上海局部、江苏中南部局部、安徽西南部局部、湖北中南部局部、四川东南局部、贵州北部和东北部局部、湖南西南局部、广西东北部局部、广东沿海及台湾北部局部 Partial parts of western Jiangxi, partial parts of northeastern and southwestern Fujian, southern and partial parts of central Zhejiang, partial parts of Shanghai, partial parts of mid-southern Jiangsu, partial parts of southwestern Anhui, partial parts of mid-southern Hubei, partial parts of southeastern Sichuan, partial parts of northern and northeastern Guizhou, partial parts of southwestern Hunan, partial parts of northeastern Guangxi, coastal Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏中南部局部、安徽中部、河南南部、湖北东部局部、重庆北部局部、贵州东部局部、广西中部和东南部、广东中部和西部、台湾大部及云南西双版纳局部 Sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, partial parts of mid-southern Jiangsu, central Anhui, southern Henan, partial parts of eastern Hubei, partial parts of northern Chongqing, partial parts of eastern Guizhou, central and southeastern Guangxi, central and western Guangdong, most of Taiwan, and partial parts of Xihuangbanna in Yunnan

续表 7 (Table 7 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	保留区 Reserved regions	丧失区 Decrease regions	增加区 Increased regions
SSP370	2050s	江西、福建、湖南东部和南部、浙江南部和西部、安徽南部、湖北东南部局部、重庆西部局部、四川东南部、广西东北部和东部及广东北部 Jiangxi, Fujian, eastern and southern Hunan, southern and western Zhejiang, southern Anhui, partial parts of southeastern Hubei, partial parts of western Chongqing, southeastern Sichuan, northeastern and eastern Guangxi, and northern Guangdong	江西西部零星分布、福建东北部和西南部零星分布、浙江东部和北部、上海、江苏南部、安徽南部局部、河南南部零星分布、湖北中南局部、重庆中部零星分布、四川东南部零星分布、贵州北部和东部局部、广西中南总局部、广东中部、东部和沿海及台湾北部局部 Sporadic distribution in western Jiangxi, sporadic distribution in northeastern and southwestern Fujian, eastern and northern Zhejiang, Shanghai, southern Jiangsu, partial parts of southern Anhui, sporadic distribution in southern Henan, partial parts of mid-southern Hubei, sporadic distribution in central Chongqing, sporadic distribution in southeastern Sichuan, partial parts of northern and eastern Guizhou, partial parts of central and southern Guangxi, central, eastern and coastal Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	江西西北部零星分布、福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏西北部零星分布、安徽中部和东北部零星分布、重庆北部零星分布、四川中南部和东北部零星分布、贵州东南部零星分布、湖南西部零星分布、广西中部零星分布、广东中部零星分布及台湾中部和南部 Sporadic distribution in northwestern Jiangxi, sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, sporadic distribution in northwestern Jiangsu, central and sporadic distribution in northeastern Anhui, sporadic distribution in northern Chongqing, mid-southern and sporadic distribution in southeastern Sichuan, sporadic distribution in southeastern Guizhou, sporadic distribution in western Hunan, sporadic distribution in central Guangxi, sporadic distribution in central Guangdong, and central and southern Taiwan
	2070s	江西、福建、湖南大部、浙江西部、北部及沿海地区、江苏南部、安徽南部和中西局部、湖北东部、四川西部和东南部、广西北部和东部及广东北部和东部 Jiangxi, Fujian, most of Hunan, western, northern and coastal areas of Zhejiang, southern Jiangsu, southern and partial parts of central western Anhui, eastern Hubei, western and southeastern Sichuan, northern and eastern Guangxi, and northern and eastern Guangdong	江西西部和中部零星分布、福建东北部和西南部零星分布、浙江东北部和西南部及西部零星分布、上海 、江苏南部零星分布、安徽南部零星分布、湖北中西部局部、重庆中南部零星分布、四川东南部零星分布、贵州北部和东部零星分布、湖南西部和南部零星分布、广西东北部零星分布、广东中部和南部沿海局部及台湾北部局部 Sporadic distribution in western and central Jiangxi, sporadic distribution in northeastern and southwestern Fujian, sporadic distribution in northeastern, southwestern and western Zhejiang, Shanghai, sporadic distribution in southern Jiangsu, sporadic distribution in southern Anhui, sporadic distribution in mid-western Hubei, sporadic distribution in mid-southern Chongqing, sporadic distribution in southeastern Sichuan, sporadic distribution in northern and eastern Guizhou, sporadic distribution in western and southern Hunan, and sporadic distribution in northeastern Guangxi, partial parts of coastal areas, central and southern Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	江西北部零星分布、福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏中西部零星分布、安徽中部、河南南部、湖北中部和北部零星分布、重庆中部、四川东南零星分布、贵州东部和南部零星分布、湖南西部零星分布、广西东南部和中部、广东东南部和中部及台湾中部和南部 Sporadic distribution in northern Jiangxi, sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, sporadic distribution in mid-western Jiangsu, central Anhui, southern Henan, central and sporadic distribution in northern Hubei, central Chongqing, sporadic distribution in southeastern Sichuan, sporadic distribution in eastern and southern Guizhou, sporadic distribution in western Hunan, southeastern and central Guangxi, southeastern and central Guangdong, and central and southern Taiwan

续表 7 (Table 7 continued)

气候情景 Climate scenarios	时期 Periods	保留区 Reserved regions	丧失区 Decrease regions	增加区 Increased regions
SSP585	2050s	江西、福建、湖南大部、浙江西部局部、安徽南部、湖北东南部、重庆西部、四川东南部局部、广西北部和东部及广东北部和东部 Jiangxi, Fujian, most of Hunan, partial parts of western Zhejiang, southern Anhui, southeastern Hubei, western Chongqing, partial parts of southeastern Sichuan, northern and eastern Guangxi, and northern and eastern Guangdong	江西西部和中部零星、福建东北部和西南部零星、浙江大部、上海、江苏南部局部、安徽南部局部、湖北中部局部、重庆东南部零星分布、四川东南部局部、贵州北部和东部、湖南西部和南部零星分布、广西北部和南部沿海零星分布、广东南部沿海及台湾北部局部分布 Western and sporadic distribution in central Jiangxi, northeastern and sporadic distribution in southwestern Fujian, most Zhejiang, Shanghai, partial parts of southern Jiangsu, partial parts of southern Anhui, partial parts of central Hubei, sporadic distribution in southeastern Chongqing, southeastern Sichuan, northern and eastern Guizhou, western and sporadic distribution in southern Hunan, sporadic distribution in coastal areas in northern and southern Guangxi, coastal areas in southern Guangdong, and partial parts of northern Taiwan	江西北部零星分布、福建西南部零星分布、江苏中西部零星分布、安徽中部和北部零星分布、河南南部、湖北中部和北部零星分布、重庆北部零星分布、四川东南零星分布、贵州东南部零星分布、湖南西部零星分布、广西东南部和中部、广东东南部和中部及台湾中部和南部 Sporadic distribution in northern Jiangxi, sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in mid-western Jiangsu, central and sporadic distribution in northern Anhui, southern Henan, central and sporadic distribution in northern Hubei, sporadic distribution in northern Chongqing, sporadic distribution in southeastern Sichuan, sporadic distribution in southeastern Guizhou, sporadic distribution in western Hunan, southeastern and central Guangxi, southeastern and central Guangdong, and central and southern Taiwan
	2070s	江西、福建、湖南大部、浙江西部局部和南部零星分布、江苏南部零星分布、安徽南部、湖北东南部和中部、重庆西部、四川东南部局部、广西北部和东部及广东北部和东部 Jiangxi, Fujian, most of Hunan, partial parts of western and sporadic distribution in southern Zhejiang, sporadic distribution in southern Jiangsu, southern Anhui, southeastern and central Hubei, western Chongqing, partial parts of southeastern Sichuan, northern and eastern Guangxi, and northern and eastern Guangdong	江西西部和中部、东部零星分布、福建东北部和西南、西北部零星分布、浙江东南部、西南部和北部、上海、江苏南部局部、安徽南部零星分布、湖北中部零星分布、重庆东南部零星分布、四川东南部局部、贵州北部和东部、湖南西部和南部、东部零星分布、广西北部和南部沿海零星分布、广东南部沿海及台湾北部局部分布 Western, central and sporadic distribution in eastern Jiangxi, northeastern, southwestern and sporadic distribution in northwestern Fujian, southeastern, southwestern and northern Zhejiang, Shanghai, partial parts of southern Jiangsu, sporadic distribution in southern Anhui, sporadic distribution in central Hubei, sporadic distribution in southeastern Chongqing, partial parts of southeastern Sichuan, northern and eastern of Guizhou, western, southern and sporadic distribution in eastern Hunan, northern and sporadic distribution in southern coast of Guangxi, southern coast of Guangdong and northern Taiwan	江西北部零星分布、福建西南部零星分布、浙江北部零星分布、江苏中西部零星分布、安徽中部和北部、河南南部、湖北中部和北部局部、重庆北部局部、四川东南零星分布、贵州东部零星分布、湖南西部零星分布、广西东南部和中部、广东东南部和中部及台湾中部和南部 Sporadic distribution in northern Jiangxi, sporadic distribution in southwestern Fujian, sporadic distribution in northern Zhejiang, sporadic distribution in mid-western Jiangsu, central and northern Anhui, southern Henan, central and partial parts of northern Hubei, partial parts of northern Chongqing, sporadic distribution in southeastern Sichuan, sporadic distribution in eastern Guizhou, sporadic distribution in western Hunan, southeastern and central Guangxi, southeastern and central Guangdong, and central and southern Taiwan

寄主植物的分布直接影响昆虫的适生区范围（陈瑜和马春森，2010；刘晓丽等，2019）。江西、福建、湖南、浙江等地是我国竹类资源的主产区，也是刚竹毒蛾发生危害的重灾区（蔡国贵，2003），这与本研究所得该害虫的中高适生区分布结果基本一致。降水是影响竹类植物生长发育阶段的关键气候因子（李应等，2011；王舒悰，2017）。一般竹类植物生长在年降水量 1 000-2 000 mm 以上的地区，年降水量的季节分配决定了竹类植物的地理分布（王舒悰，2017）。中国未来降水呈增加趋势，预计到 2050 年全国平均年降水将增加 5%-7%（程诗悦等，2019）。气候变化会引起森林植被的分布格局发生变化，植被的分布区北界南移和南界北移（李学平，2022）。在未来气候条件下，随着气候变暖、降水量增加，竹类植物将不断向分布区外缘扩张，寄主植物丰盛度增加，同时也促进刚竹毒蛾向新领地的入侵定殖（胡飞和孔垂华，2004；Witkowski *at al.*，2022）。本研究结果证实了降水量是影响刚竹毒蛾中高适生区不断扩大的主要因子，这与姜明鑫等（2022）研究茶小绿叶蝉 *Empoasca pirisuga* Matumura 分布影响因子的结论一致。

在未来全球气候变化背景下，人类的活动将对生态环境带来深刻的影响（傅伯杰等，2020）。气候变化在引起森林植被分布格局变化的同时，对刚竹毒蛾等森林害虫的发生也造成极大的影响。本研究发现，未来 2 个时期 4 种气候情境（SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585）下刚竹毒蛾地理分布格局发生变化，除 2050 时期 SSP370 情景下外，其适生区明显向北向南扩张趋势，这可能与不同排放模式下温度和降水量变化有关，导致原本不适合刚竹毒蛾生长的地方逐渐变成其适生区。有研究表明，随着未来气温进一步升高，降水量持续增加，害虫的适生区有不断扩张的趋势（Phillips *at al.*，2006；樊婷婷等，2019；邹娅等，2019），本研究结果正好与其一致。

全球气候变暖导致我国林业有害生物危害种类增多、发生期提前、世代增加、发生周期缩短、发生范围和危害程度加大，并诱发一些突发性林业生物灾害，我国林业生物灾害的发生危害呈现出明显的加剧之势（魏书精等，2013）。因此应对气候变化对林业生物灾害的影响，研究和制订行之有效的战略对策，减轻气候变化的不利影响，降低影响和损失，已成为林业生物灾害防治的一项极为重要而紧迫的工作（李伟等，2014）。本研究以刚竹毒蛾为研究对象，寻找和发现未来影响的该害虫发生分布的关键气候变量，分析其影响机制，判断气候变化背景下林业有害生物的适应性、潜在分布区域和危险性，明晰了未来刚竹毒蛾发生发展趋势和入侵的可能。

参考文献 (References)

Cai GG, 2003. Screening of the superior strains of *Beauveria bassiana* of *Pantana phyllostachysae* and practical application. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(2): 102–108. [蔡国贵, 2003. 刚竹毒蛾白僵菌优良菌株筛选及生产应用研究. 林业科学, 39(2): 102–108.]

Chen BY, Liu X, Chen S, 2019. Test of bamboo cavity injection against *Schizotetranychus bambusae*. *Forest Pest and Disease*, 38(6): 36–38. [陈冰勇, 刘曦, 陈松, 2019. 竹腔注药防治竹裂爪螨试验. 中国森林病虫, 38(6): 36–38.]

Chen DL, Zhao RY, Qu QW, 2006. Damage degree of *Pantana phyllostachysae*. *Forest Pest and Disease*, 25(6): 14–16. [陈德良, 赵仁友, 瞿巧文, 2006. 刚竹毒蛾虫情级的研究. 中国森林病虫, 25(6): 14–16.]

Chen Y，Ma CS, 2010. Effect of global warming on insect: A literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2159–2172. [陈瑜, 马春森, 2010. 气候变暖对昆虫影响研究进展. 生态学报, 30(8): 2159–2172.]

Cheng DL, Wang BY, 1993. Life history of *Pantana phyllostachysae* and relationships between the insect and meteorological conditions. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 10(3): 93–96. [陈德良, 王必元, 1993. 刚竹毒蛾生活习性及其大发生与气候条件的关系. 浙江林学院学报, 10(3): 93–96.]

Cheng LF, Zhao Q, Zhang HF, Gao XY, Wei JF, 2022. Prediction of the potential distribution areas of two harmful scale insects in China under climate change. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 50(9): 1333–1344. [成丽芳, 赵清, 张虎芳, 高新悦, 魏久锋, 2022. 气候变化下 2 种有害蚧虫在中国的适生区预测. 山西农业科学, 50(9): 1333–1344.]

Cheng SY, Qin W, Guo QK, Xu LR, 2019. Review on

spatio-temporal variation of extreme precipitation events in China in the past 50 years. *Science of Soil and Water Conservation*, 17(3): 155–161. [程诗悦, 秦伟, 郭乾坤, 徐立荣, 2019. 近 50 年我国极端降水时空变化特征综述. 中国水土保持科学, 17(3): 155–161.]

David S, 1999. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2): 143–158.

Fan TT, Gao SK，Meng FL, Yin HZ, Li C, Wang QH, Zhou CG, 2019，Prediction of suitable distribution regions of a new invasive pest: *Chrysaster ostensackenella* (Lepidoptera: Gracillariidae) in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(6): 86–95. [樊婷婷, 高尚坤, 孟凡玲, 尹红增, 李超, 王庆华, 周成刚, 2019. 外来入侵新害虫刺槐突瓣细蛾在中国的适生区预测. 林业科学, 55(6): 86–95.]

Fu BJ, Tian HQ, Tao FL, Zhao WW, Wang S, 2020. Progress of the impact of global change on ecosystem services. *China Basic Science*, 22(3): 25–30. [傅伯杰, 田汉勤, 陶福禄, 赵文武, 王帅, 2020. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展. 中国基础科学, 22(3): 25–30.]

Ganeshaiah KN, Barve N, Nath N, 2003. Predicting the potential geographical distribution of the sugarcane woolly aphid using GARP and DIVA-GIS. *Current Science*, 85(11): 1526–1528.

Geng XS, Shu JP, Zhang W, Shi J, 2020. Plant volatiles-based attract-and-kill technology against two species of gall-inducing pests on *Phyllostachys praecox*. *Forest Research*, 33(4): 184–190. [耿显胜, 舒金平, 张威, 石坚, 2020. 2种早竹造瘿害虫植物源诱控技术. 林业科学研究, 33(4): 184–190.]

Hong YC，Ding B，Liu HT，Zhu XJ，Shen CX, 2021. Toxicity of six biochemical pesticides and their application effect on the larvae of *Pantana phyllostachysae*. *World Bamboo and Rattan*, 19(6): 13–20. [洪宜聪, 丁玶, 刘化桐, 朱祥锦, 沈彩霞, 2021. 6 种生物化学农药对刚竹毒蛾幼虫的毒力及防治效果. 世界竹藤通讯, 19(6): 13–20.]

Hu F, Kong CH, 2004. Selectivity and influence of parasite plants on their hosts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(5): 905–908. [胡飞, 孔垂华, 2004. 寄生植物对寄主的选择和影响. 应用生态学报, 15(5): 905–908.]

Hu ZX, Nuo MDL, Yu QW, Hu EC, 2022. MaxEnt distribution prediction of *Dermacentor nuttalli* in Xinjiang region of China. *Ecological Science*, 41(4): 92–101. [胡政香, 诺明达来, 余权威, 呼尔查, 2022. 新疆地区草原革蜱 MaxEnt 分布预测分析. 生态科学, 41(4): 92–101.]

Jiang MX, Zhong WY, Hu HQ, Zheng ZQ, Chen YT, You MS, Chen LL, 2022. Prediction of potential suitable regions of the tea green leaf hopper in China in the context of climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 9(14): 1–11. [姜明鑫, 钟文玉, 胡海琴, 郑志强, 陈燕婷, 尤民生, 陈李林, 2022. 气候变化背景下茶小绿叶蝉在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, 9(14): 1–11.]

Lan SW, Ye XY, Li TS, Lv SQ, Yang ZW, Lu MZ, 1993. Type of distribution and method of density estimation for *Pantana phyllotachysae*. *Forest Research*, 6(5): 579–582. [兰斯文, 叶小瑜, 李天生, 吕水泉, 杨子旺, 卢美珠, 1993. 刚竹毒蛾聚集分布原因及密度估计方法. 林业科学研究, 6(5): 579–582.]

Lee CM, Lee DS, Kwon TS, Athar MH, Park YS, 2021. Predicting the global distribution of *Solenopsis geminata* (Hymenoptera: Formicidae) under climate change using the MaxEnt model. *Insects*, 12(3): 229–229.

Li HM, Wang JY, Zhuo FY, Zhu JQ, Tu XB, Zhang GC, Belinda L, 2022. Review on the occurrence and management technology of *Ceracris kiangsu* in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(2): 531–536. [李红梅, 王珺雅, 卓富彦, 朱景全, 涂雄兵, 张国财, Belinda Luke, 2022. 黄脊竹蝗在中国的发生及防控技术. 中国生物防治学报, 38(2): 531–536.]

Li TS, Zhou GF, Wang GH, Gan ZN, Hua ZY, 1998. Evaluating the impact of insect community on pine caterpillar density in different stand conditions. *Biodiversity Science*, 6(3): 161–166. [李天生, 周国法, 汪国华, 干中南, 华正媛, 1998. 马尾松林天敌昆虫群落对马尾松毛虫控制作用的研究. 生物多样性, 6(3): 161–166.]

Li W, Wang QH, Shen LX, 2014. Impact of climate change on forest ecosystems and countermeasures of sustainable forest development. *Forest Inventory and Planning*, 39(1): 94–97, 114. [李伟, 王秋华, 沈立新, 2014. 气候变化对森林生态系统的影响及应对气候变化的森林可持续发展. 林业调查规划, 39(1): 94–97, 114.]

Li XP, 2022. The impact of climate change on forest tree species distribution information and above ground biomass. *Forestry Science and Technology Communications*, 2022 (4): 23–27. [李学平, 2022. 气候变化对森林树种分布信息和地上生物量的影响. 林业科技通讯, 2022(4): 23–27.]

Li XT, 2013. Bionomics and comprehensive control measure of *Pantana phyllostachysae*. *Contemporary Horticulture*, 2013(2): 153–154. [李兴天, 2013. 刚竹毒蛾的生物学特性及其综合防治措施. 现代园艺, 2013(2): 153–154.]

Li Y, Chen SL, Li YC, Xie SX, 2011. Research review in the effects of climate factors on bamboo growth. *Journal of Bamboo Research*, 30(3): 9–12. [李应, 陈双林, 李迎春, 谢双喜, 2011.

气候因子对竹子生长的影响研究综述. 竹子研究汇刊, 30(3): 9–12.]

Liu HT, 2022. Evaluation of the effect of UAV spray technology on *Pantana phyllostachysae* larvae control. *World Bamboo and Rattan*, 20(2): 50–55. [刘化桐, 2022. 无人机喷雾技术防治刚竹毒蛾幼虫效果评价. 世界竹藤通讯, 20(2): 50–55.]

Liu W, Xin ML, Zhou J, Zhan DM, Ding G, Wu HY, 2021. Habitat hierarchies distribution of *Sargassum muticum* in Lidao bay, Shandong, China based on habitat suitability index model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(3): 1061–1068. [刘玮, 辛美丽, 周健, 詹冬梅, 丁刚, 吴海一, 2021. 基于生境适宜性指数模型的俚岛海黍子生境层级分布. 应用生态学报, 32(3): 1061–1068.]

Liu XL, Dou L, Sun T, Geng XX, 2019. Effect of CO_2 concentration changing and climate warming on insects. *Journal of Huaibei Normal University* (*Natural Sciences*), 40(4): 49–53. [刘晓丽, 窦莉, 孙涛, 耿雪侠, 2019. CO_2 浓度和气候变暖对昆虫的影响. 淮北师范大学学报(自然科学版), 40(4): 49–53.]

Luo SJ, 2006. Forecast model of *Pantana phyllostachysae* occurrence area based on neural network. *Entomological Journal of East China*, 15 (1): 37–39. [罗盛健, 2006. 基于人工神经网络的刚竹毒蛾发生面积的预测模型. 华东昆虫学报, 15(1): 37–39.]

Luo YR, Ma XC, Wang YJ, Li HY, Yuan XW, Xu JH, 2021. Experiments on *Beauveria bassiana* controlling *Coclebotys coclesalis* which infesting *Phyllostachys praecox*. *Hubei Forestry Science and Technology*, 50(6): 26–29. [罗友刚, 马协春, 王永久, 李红玉, 袁稀伟, 许敬辉, 2021. 球孢白僵菌防治雷竹食叶螟试验. 湖北林业科技, 50(6): 26–29.]

Lv F, Wang J, Zhou YJ, Yang WY, Li ZH, Xu Q, Du YZ, 2017. Predicted suitable habitat for the quarantine forest pest *Ips grandicollis* (Eichhoff). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 1023–1030. [吕飞, 王洁, 周奕景, 杨文晏, 李志红, 许强, 杜予州, 2017, 检疫性林木害虫南部松齿小蠹适生区分析. 应用昆虫学报, 54(6): 1023–1030.]

Nzei JM, Mwanzia VM, Ngarega BK, Musili PM, Wang QF, Chen JM, Li ZZ, 2022. Ecological niche modeling of water lily (*Nymphaea* L.) species in Australia under climate change to ascertain habitat suitability for conservation measures. *Plants*, 11(14): 1874–1874.

Oke OA, Thompson KA, 2015. Distribution models for mountain plant species: The value of elevation. *Ecological Modelling*, 301: 72–77.

Padalia H, Srivastava V, Kushwaha S, 2014. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatic*, 22: 36–43.

Phillips S, Anderson R, Schapire R, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190 (3/4): 231–259.

Shi W, Zhu EJ, Wang YC, Ma FZ, He QJ, Yi CH, 2021. Prediction of potentially suitable distribution area of *Propomacrus davidi* Deyrolle in China based on MaxEnt model. *Chinese Journal of Ecology*，40(9) : 2936–2944. [施雯, 朱恩骄, 王宇宸, 马方舟, 和秋菊, 易传辉, 2021. 基于 MaxEnt 模型预测戴褐臂金龟在中国的潜在适生区. 生态学杂志, 40(9): 2936–2944.]

Sutherst RW, Maywald GF, 1985. A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 13(3/4): 281–299.

Wang SZ, 2017. Effects of different light intensities on the growth of *Pleioblastus pygmaea*. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Forestry University. [王舒悰, 2017. 不同光照强度对翠竹生长的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京林业大学.]

Wang YJ, Gao T, Shi J, 2021. Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(9): 59–69. [王艳君, 高泰, 石娟, 2021. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析. 北京林业大学学报, 43(9): 59–69.]

Wang YK, 2008. Studies on the biological characteristics and control of *Pantana phyllostachysae* Chao. *Wuyi Science Journal*, 24(1): 65–68. [王元康, 2008. 刚竹毒蛾生物学特性及防治研究. 武夷科学, 24(1): 65–68.]

Wei SJ, Sun L, Wei SW, Hu HQ, 2013. Effects of climate on forest disasters and preventive measures. *Journal of Catastrophology*, 28(1): 36–40, 64. [魏书精, 孙龙, 魏书威, 胡海清, 2013. 气候变化对森林灾害的影响及防控策略. 灾害学, 28(1): 36–40, 64.]

Witkowski R, Dyderski M, Bełka M, Mazur A, 2022. Potential European geographical distribution of *Gnathotrichus materiariu*s (Fitch, 1858) (Coleoptera: Scolytinae) under current and future climate conditions. *Forests*, 13(7): 1097–1097.

Xu TS, Wang HJ, 2004. The Main Pests of Bamboo in China. Beijing: China Forestry Press. 46–50. [徐天森, 王浩杰, 2004. 中国竹子主要害虫. 北京: 中国林业出版社. 46–50.]

Xu ZH, Zhou X, Yao X, Li QS, Li ZL, Guo XY, 2022. Severity detecting of *Pantana phyllostachysae* Chao infestation of moso bamboo by selecting optimal sentinel-2A MSI features. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,

53(5): 191–200. [许章华, 周鑫, 姚雄, 李巧斯, 李增禄, 郭孝玉, 2022. 基于 Sentinel-2A MSI 特征的毛竹林刚竹毒蛾危害检测. 农业机械学报, 53(5): 191–200.]

Ye XZ, Zhang MZ, Lai WF, Yang MM, Fan HH, Zhang GF, Chen SP, Liu B, 2021. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization mode. *Acta Ecologica Sinica*, 41(20): 8135–8144. [叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨淼森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝, 2021. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. 生态学报, 41(20): 8135–8144.]

Zhang FP, Chen QL, You MS, 2006. Relationships between climate factors and the arthropod community in the forest of *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens*. *Entomological Journal of East China*, 15(1): 30–33. [张飞萍, 陈清林, 尤民生, 2006. 气象因子与毛竹林节肢动物群落的关系. 华东昆虫学报, 15(1): 30–33.]

Zhang L, 2015. Application of MAXENT maximum entropy model in predicting the potential distribution range of species. *Bulletin of Biology*, 50(11): 9–12. [张路, 2015. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. 生物学通报, 50(11): 9–12.]

Zhang LM, Pang LF, Xu DP, Tang XM, 2020. Potential distribution of *Pinus koraiensis* in northeastern China predicted by the MaxEnt model. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 42(1): 74–83. [张劳模, 庞丽峰, 许等平, 唐小明, 2020. 基于最大熵模型预测东北地区红松潜在分布. 江西农业大学学报, 42(1): 74–83.]

Zhang YB, Du HD, Jin XH, Ma KP, 2015. Species diversity and geographic distribution of wild *Orchidaceae* in China. *Chinese Science Bulletin*, 60(2): 179–188.[张殷波, 杜昊东, 金效华, 马克平, 2015. 中国野生兰科植物物种多样性与地理分布. 科学通报, 60(2): 179–188.]

Zhang YH, Huang YX, Yu WJ, Ma HX, 2019. Development, current situation and trend of bamboo industry in China. *China Wood-Based Panels*, 26(6): 32–36. [张亚慧, 黄宇翔, 于文吉, 马红霞, 2019. 我国竹产业的发展历程、现状及趋势. 中国人造板, 26(6): 32–36.]

Zhao RY, 2006. Color Illustrations for Bamboo Diseases and Insect Pests Prevention and Treatment. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 75–78. [赵仁友, 2006. 竹子病虫害防治彩色图鉴. 北京: 中国农业科学技术出版社. 75–78.]

Zhuang HF, Zhang YB, Wang W, Ren YH, Liu FZ, Du JH, Zhou Y, 2018. Optimized hot spot analysis for probability of species distribution under different spatial scales based on MaxEnt model: *Manglietia insignis* case. *Biodiversity Science*, 26(9): 931–940. [庄鸿飞, 张殷波, 王伟, 任月恒, 刘方正, 杜金鸿, 周越, 2018. 基于最大熵模型的不同尺度物种分布概率优化热点分析: 以红色木莲为例. 生物多样性, 26(9): 931–940.]

Zou Y, Guo SW, Zhou YT, Wang T, Zong SX, Ge XZ, 2019. Climate change impacts on the global potential distribution of *Dendrolimus tabulaeformis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1382–1395. [邹娅, 郭思维, 周玉婷, 王涛, 宗世祥, 葛雪贞, 2019. 气候变化对油松毛虫在全球适生区的影响. 应用昆虫学报, 56(6): 1382–1395.]