北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

气候变化下中国油茶毒蛾潜在分布区模拟预测

杨柳 刘君昂 周国英 何苑 段翔 周洁尘

Simulation and prediction of potential distribution area of *Euproctis pseudoconspersa* under climate change in China

Yang Liu, Liu Jun’ang, Zhou Guoying, He Yuanhao, Duan Xiang, Zhou Jiechen

引用本文:
杨柳, 刘君昂, 周国英, 何苑, 段翔, 周洁尘. 气候变化下中国油茶毒蛾潜在分布区模拟预测[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):93–105. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230034
Yang Liu, Liu Jun’ang, Zhou Guoying, He Yuanhao, Duan Xiang, Zhou Jiechen. Simulation and prediction of potential distribution area of *Euproctis pseudoconspersa* under climate change in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):93–105. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230034

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230034

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测

Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33–43. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200254

基于MaxEnt模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析

Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt

北京林业大学学报, 2021, 43(9): 59–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200416

基于MaxEnt模型的紫椿适生区预测

Distributional change in suitable areas for *Toona sureni* based on MaxEnt model

北京林业大学学报, 2017, 39(8): 33–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170002

矮牡丹在中国的地理分布及潜在分布区预测

Geographical distribution and potential distribution area prediction of *Paeonia jishanensis* in China

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 83–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200360

辣木全球潜在适生区与生态特征

Global potential suitable area and ecological characteristics of *Moringa oleifera*

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 45–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190375

基于MaxEnt模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析

Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200103

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230034

气候变化下中国油茶毒蛾潜在分布区模拟预测

杨 柳[1,2] 刘君昂[1] 周国英[1] 何苑皞[1] 段 翔[1,2] 周洁尘[1,2]
（1. 中南林业科技大学林学院，湖南 长沙 410004；2. 湘潭市林业科学研究所，湖南 湘潭 411206）

摘要:【目的】油茶是国家重点发展的木本油料作物，具有较高的经济价值和生态价值。油茶毒蛾是油茶的主要病虫害之一，严重制约了油茶的产量和质量。本研究针对油茶毒蛾的潜在分布开展模拟预测，以期为油茶毒蛾的预警和具体防控行动提供科学依据。**【方法】**基于油茶毒蛾在中国的有效地理分布数据和生物气候数据，利用 MaxEnt 生态位模型和 ArcGIS 软件，模拟预测油茶毒蛾在当前气候条件的潜在分布，以及 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 3 种气候情景下 2050 年和 2070 年油茶毒蛾在中国潜在适生区分布范围，并分析了制约其适生区分布的主导环境因子。**【结果】**(1)影响油茶毒蛾适生区分布的主导环境因子为最干月降水量、年降水量、最冷月最低温度和温度日较差月均值。当最干月降水量 28 ~ 148 mm、年降水量 1 290 ~ 2 080 mm、最冷月最低温度 1.0 ~ 10.1 ℃、温度日较差月均值 7.2 ~ 8.5 ℃ 时最适宜油茶毒蛾的生存。(2)当前气候条件下，油茶毒蛾总适生区面积约占我国国土面积的 20.0%，主要分布在我国南方的长江中下游地区和华南地区，高度适生区面积为 64.2 × 10^4 km^2，中度适生区面积为 61.8 × 10^4 km^2，低度适生区面积为 66.0 × 10^4 km^2。(3)在未来两个时期和 3 种气候情景下，油茶毒蛾适生区面积出现不同程度的扩大，新增适生区面积在 9.3 × 10^4 ~ 33.0 × 10^4 km^2 之间，地理分布中心迁移距离在 24.4 ~ 125.1 km 之间。气候变暖越明显，油茶毒蛾的潜在分布区面积增加越多，地理分布中心点的迁移距离越远。**【结论】**油茶毒蛾在中国的适生区范围较广，几乎囊括了中国南部所有的省份。在未来气候情景下，油茶毒蛾的适生区将向北、向西等高纬度的内陆地区扩张。为此，建议相关部门应提前制定预案和政策，加强对油茶毒蛾的观测和防控，减少其对油茶产业造成的损失。

关键词：油茶；油茶毒蛾；MaxEnt 模型；环境因子；适生区
中图分类号：S763 **文献标志码**：A **文章编号**：1000−1522(2024)06−0093−13
引文格式：杨柳，刘君昂，周国英，等. 气候变化下中国油茶毒蛾潜在分布区模拟预测［J］. 北京林业大学学报，2024，46(6)：93−105. Yang Liu, Liu Jun'ang, Zhou Guoying, et al. Simulation and prediction of potential distribution area of *Euproctis pseudoconspersa* under climate change in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 93−105.

Simulation and prediction of potential distribution area of *Euproctis pseudoconspersa* under climate change in China

Yang Liu[1,2] Liu Jun'ang[1] Zhou Guoying[1] He Yuanhao[1] Duan Xiang[1,2] Zhou Jiechen[1,2]
(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. Xiangtan Research Institute of Forestry, Xiangtan 411206, Hunan, China)

Abstract:［**Objective**］*Camellia oleifera* is a woody oleiferous plant with high economic and ecological value. *Euproctis pseudoconspersa* is one of the main pests of *Camellia oleifera*, which seriously restricts the yield and quality of *C. oleifera*. In order to provide scientific basis for early warning and specific prevention and control of the *Euproctis pseudoconspersa*, the potential distribution of *E. pseudoconspersa* was simulated and predicted in this study.［**Method**］Based on the distribution data and biological climate data

收稿日期: 2023−02−14 **修回日期:** 2023−03−07
基金项目: 湖南省林业科技创新资金项目(XLK202101-2)。
第一作者: 杨柳。主要研究方向：植物有害生物综合治理。Email: 981367866@qq.com 地址：411206 湖南省湘潭市雨湖区楠竹山镇湘林村湘潭市林业科学研究所。
责任作者: 周国英，教授，博士生导师。主要研究方向：植物检疫。Email: zgyingqq@163.com 地址：410004 湖南省长沙市韶山南路 498 号中南林业科技大学林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

of *E. pseudoconspersa* in China, MaxEnt model and ArcGIS software were used to predict the suitable area for *E. pseudoconspersa* in China under the current climate, and the distribution range and potential suitable area of *E. pseudoconspersa* in China in the 2050 and 2070 under SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate change scenarios, and then the dominant environmental variables affecting the distribution of its potential suitable area were analyzed. [**Result**] (1) The dominant environmental variables affecting the distribution of suitable habitat of *E. pseudoconspersa* were precipitation of the driest month, annual precipitation, min. temperature of the coldest month, and the mean diurnal range (mean of monthly (max. temp – min. temp)). The optimum conditions were precipitation of the driest month of 28−148 mm, annual precipitation of 1 290−2 080 mm, the min. temperature of the coldest month of 1.0−10.1 ℃, and mean diurnal range of 7.2−8.5 ℃. (2) Under the current climate conditions, the total suitable area of *E. pseudoconspersa* accounted for 20.0% of China's land area, mainly distributed in the middle and lower reaches of the Yangtze River and South China, with a high suitable area of 642 000 km^2, a medium suitable area of 618 000 km^2, and a low suitable area of 660 000 km^2. (3) In the next two periods and three climate scenarios, the suitable area of *Camellia oleifera* moth will be enlarged to different degrees, with the newly increased area of 93 000−330 000 km^2 and the migration distance of geographical distribution center between 24.4−125.1 km. The more obvious the climate warming was, the more the potential distribution area increased, and the farther the geographical distribution center moved. [**Conclusion**] *E. pseudoconspersa* has a wide range of habitats in China, including almost all the provinces in southern China. In the future climate change scenario, the suitable habitat of *E. pseudoconspersa* will expand northward, westward and other high latitude inland areas. Therefore, it is suggested that relevant departments should make plans and policies in advance to strengthen the observation and control of *E. pseudoconspersa*, so as to reduce its losses to *Camellia oleifera* industry.

Key words: *Camellia oleifera*; *Euproctis pseudoconspersa*; MaxEnt model; environmental factor; suitable area

气候是决定物种地理范围分布最重要的因素[1]。气候变化使得物种的适生分布区随之改变，物种适生区面积的增加或可造成有害生物扩散进而威胁生态和经济，物种适生区面积减少又或导致物种灭绝[2]。因此，研究物种潜在分布对气候的响应以及预测未来气候变化情景下物种的适生分布区，能够为生物保护和病虫害防控相关政策制定提供理论依据和数据支撑。

油茶毒蛾(*Euproctis pseudoconspersa*)，又名茶黄毒蛾、油茶毛虫、茶毛虫，隶属于鳞翅目(Lepidoptera)毒蛾科(Lymantriidae)黄毒蛾属(*Euproctis*)。油茶毒蛾为典型的植食性害虫，是为害油茶较为严重的一种害虫。油茶毒蛾通常优先取食嫩梢，而后食叶片、果皮、嫩枝，严重时导致油茶当年绝收，甚至林木死亡，危害性极大[3]。此外，油茶毒蛾一次可产卵数多达 200 粒，一年内可发生 3 代，繁殖速度快，防治难度大。

目前关于油茶毒蛾的研究主要集中在生物学特性、发生规律、危害特点及生理生化防治技术等方面[4−6]。虽然实地调查和文献报道均表明油茶毒蛾在中国分布广泛，尤其是在湖南、江西、广东、广西等省份危害严重，但其具体的地理分布区尚未被完全摸清，导致油茶毒蛾的防控工作缺乏有效的参考和指导。近年来，物种分布模型在不同的研究领域得到开拓和发展，被广泛应用在动植物适生区预测、全球气候变化对物种地理分布的影响、病虫害及物种入侵预测等方面[7−8]。最大熵(maximum entropy，MaxEnt)模型是一种物种分布模型，以目标物种已知的分布数据为基础，以环境变量数据为约束条件，找出目标物种概率分布的最大熵，预测其适生分布，估计和预测其潜在分布地区[9]。相较于其他物种分布模型，如 Bioclim、GARP(genetic algorithm for rule-set production)、Domain 等，MaxEnt 模型具有预测结果稳定和所需物种分布数据量小等优势[10]，已被应用于多种病虫害的适生区预测，如刺槐叶瘿蚊(*Obolodiplosis robiniae*)[11]、麦瘟病[12]、舞毒蛾(*Lymantria dispar*)[13]、苹果树腐烂病[14]等。本研究基于油茶毒蛾分布点数据以及相关环境变量，通过 MaxEnt 模型对油茶毒蛾在当前及未来气候条件下在中国范围内的适生区进行预测，旨在解决以下问题：(1)明确油茶毒蛾在气候变化下潜在适生区的变化动态；(2)揭示影响油茶毒蛾潜在适生分布的主要环境因子及两者相关性；(3)为油茶毒蛾的防控提供理论支撑和重要参考。

1　研究方法

1.1　数据收集

1.1.1　物种发生点数据的获取与处理

油茶毒蛾在中国的分布数据通过检索国家标本资源共享平台(http://www.nsii.org.cn)以及查阅国内外公开发表的论文等途径获得。使用谷歌地球(Google Earth Pro)获取分布地的经纬度信息，降低由于采样偏差带来的分布点假性聚集的影响[15−16]，将两点之间欧式距离小于 10 km 的其中一点随机删掉，经过筛选，获得油茶毒蛾发生点 86 个。

1.1.2　环境数据来源

本研究使用的环境气候数据集下载自 http://www.worldclim.org/中的 WorldClim2 数据库，下载的气候数据集包括当前(1970—2000 年)及未来 2050 年(即 2041—2060 年平均值)和 2070 年(即 2061—2080 年平均值)的 19 个衍生的生物气候变量(Bio1 ~ Bio19，见表 1)，气候数据空间分辨率为 5arc-minutes(每个栅格单元约 81 km^2)。BCC-CSM2-MR 模式是国家(北京)气候中心最新研发的中等分辨率气候系统模式，研究表明该模式能够较好模拟中国各陆面变量[17]。因此，对于未来气候情景，本文选择了 CMIP6(coupled model intercomparison project phase 6)中 BCC-CSM2-MR 模式的 3 种共享社会经济途径(shared socio-economic pathways)：低辐射强迫情景 SSP1-2.6，中辐射强迫情景 SSP2-4.5 和高辐射强迫情景 SSP5-8.5。具体而言，SSP1 是可持续发展，SSP2 是中度发展，SSP5 是化石燃料驱动的发展；数字部分表示未来气候(到 2100 年)辐射强迫幅度路径，2.6 表示到 2100 年总辐射强迫达到 2.6 W/m^2，4.5 表示到 2100 年总辐射强迫达到 4.5 W/m^2，8.5 表示到 2100 年总辐射强迫达到 8.5 W/m^2。本研究下载并使用两个未来时期(2050 年和 2070 年)与 3 种情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下共计 6 个数据集作为未来气候数据。

1.1.3　地图数据

本研究使用的全国地图通过国家测绘地理信息局标准地图服务网站(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/)下载获得，审图号为 GS(2020)4619 号。

1.1.4　应用软件

MaxEnt 软件(https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)3.4.4 和 ArcGIS 10.5。

1.2　模型构建

1.2.1　数据预处理

依照 MaxEnt 软件要求，将油茶毒蛾的实际分布地点依照物种名称、经度和纬度顺序分别存储为 csv 文件，其中西经和南纬为负，东经和北纬为正。MaxEnt 模型要求输入的环境变量满足边界范

表 1　WorldClim2 数据中的气候变量

Tab. 1　Bioclimatic variables of WorldClim2

名称 Name	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年平均温度 Annual mean temperature	℃
Bio2	温度日较差月均值 Mean diurnal range (mean of monthly (max. temp − min. temp))	℃
Bio3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7) (× 100)	℃
Bio4	温度季节性变化标准差 Temperature seasonal change (standard deviation × 100)	℃
Bio5	最热月最高温度 Max. temperature of the warmest month	℃
Bio6	最冷月最低温度 Min. temperature of the coldest month	℃
Bio7	温度年际变化 Temperature annual range (Bio5 − Bio6)	℃
Bio8	最湿季平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	℃
Bio9	最干季平均温度 Mean temperature of the driest quarter	℃
Bio10	最热季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	℃
Bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	℃
Bio12	年降水量 Annual precipitation	mm
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
Bio15	降水量变异系数 Coefficient of variation of precipitation	mm
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	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm

围统一、分辨率相同、坐标系统一致等条件，因此需要对下载的环境气候数据在 ArcGIS 中以研究区域边界进行掩膜处理，之后转换为 ASCII 格式导出备用。

1.2.2 环境变量筛选

环境变量的选择直接决定了 MaxEnt 物种分布模型的预测结果[18]。气候数据中的环境因子之间往往有一定的相关性，这种共线性会导致模型预测出现过拟合现象，从而降低模型的预测性能。因此，在 MaxEnt 模型建立前，需要对环境变量开展相关性分析，对有相关性的环境变量根据物种的特点进行选择。将环境变量数据和油茶毒蛾的发生点数据导入 ArcGIS 中，提取发生点的环境变量数据，做 Pearson 相关性分析（图 1）。剔除相关性系数绝对值大于 0.9 且贡献率较小的环境变量，筛选后的变量为 Bio2、Bio3、Bio4、Bio5、Bio6、Bio8、Bio12、Bio14、Bio15 和 Bio18，该 10 个气候变量即为最终 MaxEnt 建模所用环境变量。

1.2.3 软件参数设置

下载 MaxEnt 软件，安装并运行，将收集到的油茶毒蛾发生点数据导入 MaxEnt 软件，进行关键参数设置。本研究将 75% 的发生点数据用于建立物种分布模型的训练模型，其余 25% 的发生点数据用于验证物种分布模型的训练模型[19]，正则化乘数（regularization multiplier）默认参数为 1，将正则化乘数设置为 0.5 ~ 4.0 的区间，步长设置为 0.5，利用 R 4.2.1 软件中的 ENMeval 包来对正则化乘数和特征组合（feature combination multiplier）进行优化，当正则化乘数为 1.5、特征组合为 LQHP 时，模型对训练数据的拟合能力和模型对验证数据的迁移泛化能力均比较理想。最大迭代次数（maximum iterations）设置为 5 000，重复训练次数为 10[20]，降低异常值带来的不确定性。设置重复迭代方式（replicated run type）为“Subsample”[21]，绘制响应曲线（response curves）和刀切法（jackknife）功能来分析影响油茶毒蛾分布的环境变量，输出文件格式设置为 Logistic，其输出值是栅格单元中某物种存在的概率（范围 0 ~ 1 之间），输出文件类型为 asc。

1.2.4 模型评估

使用 MaxEnt 模型进行物种分布模拟时，需要对模型的泛化性能进行评估，通过评估的模型才具有理想的泛化能力，才可用于物种分布的预测。本研究采用受试者工作特征（ROC）曲线 AUC 值的大小评估 MaxEnt 模型预测性能。ROC 曲线分别以真阳性率（实际有分布且预测为存在的概率）、假阳性率（实际无分布但被预测为存在的概率）为纵、横轴。据此绘制 ROC 曲线，通过比较 AUC 值即 ROC 曲线与横坐标围成的面积来评价物种分布模型的性能[22]。AUC 的值越大，模型的预测性能越好。一般来说，AUC 不同值所代表的评价标准：0.6 以下，模型模拟结果失败，没有应用的价值；0.6 ~ 0.7，模型模拟结果较差；0.7 ~ 0.8，模型预测性能一般；0.8 ~ 0.9，模型预测性能好；0.9 ~ 1.0，模型预测性能极好。在物种分布模型的评价中，普遍认为，AUC 值达到 0.7 以上即代表模型预测性能是可接受的。

1.2.5 适生区等级划分

参照国内外文献对油茶毒蛾在中国各地区发生程度的报道，选定适宜的阈值进行油茶毒蛾适生等

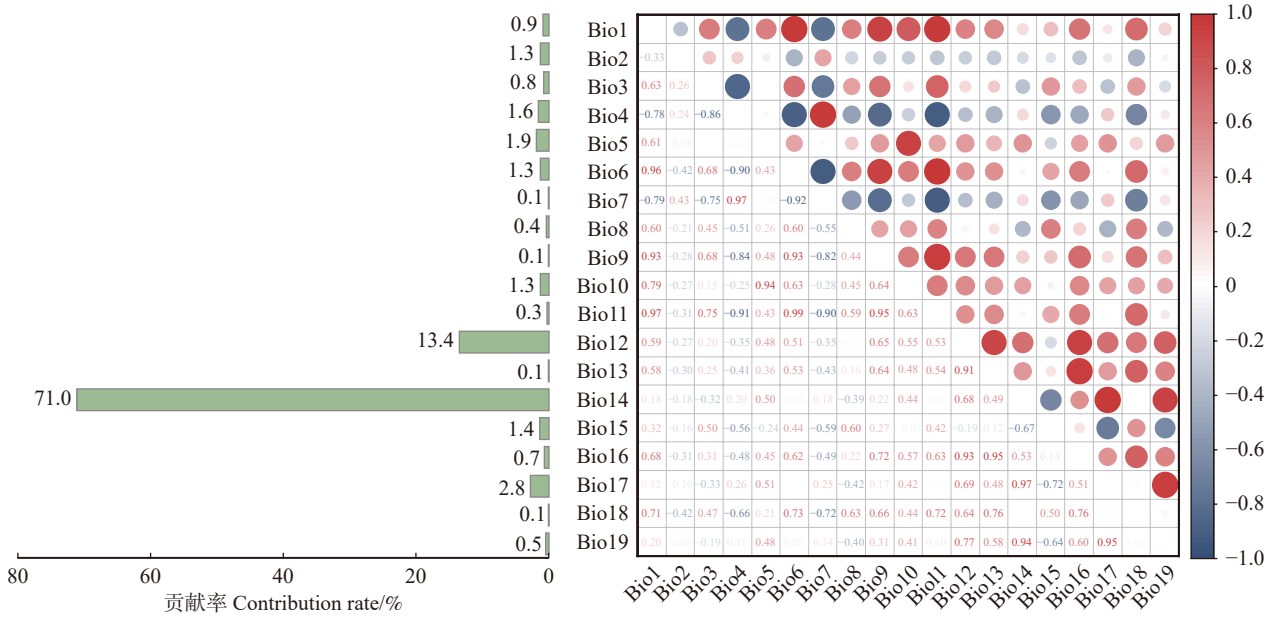


图 1 油茶毒蛾危害点 19 个环境因子贡献率及相关性分析

Fig. 1 Contribution rate and correlation analysis of 19 environmental variables of *Euproctis pseudoconspersa* hazard points

级划分。中国油茶毒蛾发生程度严重的江西、湖南、广西、福建 4 个省的适生性概率基本在 0.5 以上，其他有油茶毒蛾分布地区的适生性概率基本在 0.3 以上，适生性概率在 0.1 以下的地区无油茶毒蛾分布记录。最终设定：$p < 0.1$ 为不适生区；$0.1 \leqslant p < 0.3$ 为低度适生区；$0.3 \leqslant p < 0.5$ 为中度适生区；$p \geqslant 0.5$ 为高度适生区。总适生区为低度适生区、中度适生区和高度适生区的合集。

1.2.6　未来分布预测

使用 MaxEnt 模型对中国两个未来时期(2050 年和 2070 年)与 3 种气候情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)的油茶毒蛾潜在分布预测。结合油茶毒蛾的危害点数据和气候数据，分别将未来不同时期 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 的相应环境变量数据导入 MaxEnt 软件中原本当前气候数据的位置，参数设置和其他操作与 1.2.3 相同。

1.2.7　地理分布变化分析

1.2.7.1　分布区面积变化

建立当前、未来气候变化情景下油茶毒蛾的潜在分布矩阵(表 2)，基于分布矩阵表对两个未来时期 3 个气候情景下油茶毒蛾潜在分布的格局变化进行分析。

表 2　物种潜在分布变化矩阵

Tab. 2　Matrix of potential distribution changes of species

未来气候情景 Future climate scenario	当前气候情景 Current climate scenario	
	适生 Suitable	非适生 Unsuitable
适生 Suitable	保留适生区 Reserved suitable area	新增适生区 New-added suitable area
非适生 Unsuitable	缩减适生区 Reduction of suitable area	非适生区 Unsuitable area

1.2.7.2　分布区中心变化

将油茶毒蛾预测的结果导出，输入到 ArcGIS 中，根据前述确定的适生分布阈值将连续的值转换为存在/不存在(0 和 1)的两类值，得到各时期各气候情景下物种潜在分布的范围。分别将油茶毒蛾潜在分布范围看作一个整体，使用“栅格转点”工具和“平均中心”工具，将分布范围缩减成一个矢量质点，也即物种分布地理中心点。根据其不同时期和气候情景下的中心点位置，计算移动距离，分析物种适生分布范围的整体迁移趋势。

2　油茶毒蛾的潜在分布预测

2.1　模型准确性评价

基于稀疏后的 86 条油茶毒蛾的发生点数据及筛选后的 10 个环境变量，利用 MaxEnt 软件进行了 10 次重复建模，运行结果表明物种分布模型构建的效果很好。ROC 曲线(图 2)所示，曲线下所占的面积大，模型的 AUC 值为 0.934，预测精度达到“极好”的标准，证明 MaxEnt 模型具有良好的稳定性，表明 86 条油茶毒蛾的分布点数据具有很好的代表性，建模所用的 10 个关键环境变量包含有足够的信息，所建模型具有较好的拟合效果和较强的预测能力。此外，AUC 曲线中的标准差均匀地分布在曲线两侧的小范围内，表明模型的标准差很小，MaxEnt 模型受随机取样影响很小。综上，本研究所建立 MaxEnt 油茶毒蛾适生分布模型具有较好的准确度和可信度，可用于油茶毒蛾潜在分布范围的研究。

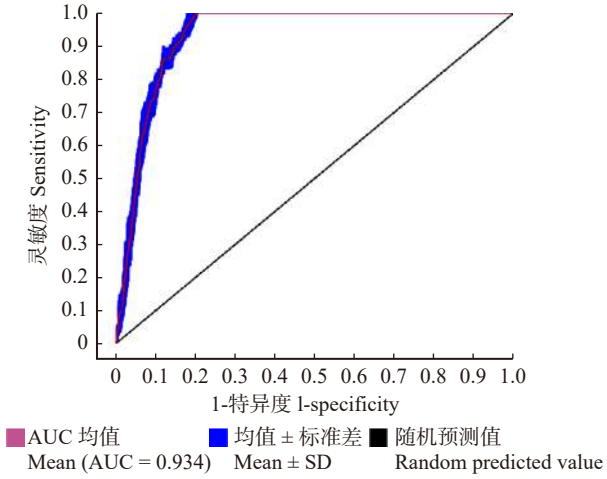


图 2　油茶毒蛾 MaxEnt 模型下 ROC 曲线

Fig. 2　ROC curve of *E. pseudoconspersa* under MaxEnt model

2.2　主导环境因子分析

根据输出的刀切图(图 3)，确定各环境变量对油茶毒蛾分布的贡献。蓝色的条带(单独使用该变量)越长，意味着该变量对油茶毒蛾的分布越重要。筛选出的 10 个环境因子中，对训练增益、测试增益和 AUC 值影响较大的环境变量为 Bio12(年降水量)、Bio14(最干月降水量)、Bio2(温度日较差月均值)和 Bio6(最冷月最低温度)，这些环境因子表现出对数据较好的合理拟合且包含更多的有效信息，其他环境因子，尤其如 Bio3(等温性)和 Bio8(最湿季平均温度)，仅使用该变量时几乎没有增益，这表明该变量对油茶毒蛾的潜在分布的影响较小。转向绿色条形图(去除该变量)，条带越短，表明该变量具有

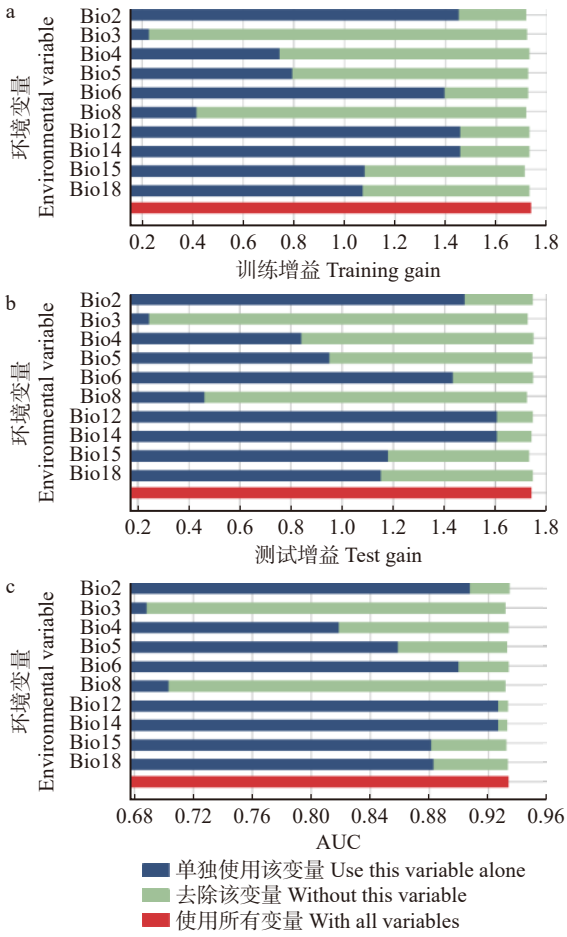


图 3 建模环境因子刀切图分析

Fig. 3 Jacknife plot analysis of modeling environmental factors

较多的其他变量不具有的信息，对油茶毒蛾分布的影响较大。从刀切图中可以发现，依次忽略各环境变量并不会显著降低增益，这意味着没有一个环境变量包含其他变量所不包含的大量有用信息。表 3 表明，贡献率最为显著的变量是 Bio14(最干月降水量)和 Bio12(年降水量)，分别为 72.1% 和 16.2%，置换重要值最为显著的变量是 Bio6(最冷月最低温度)和 Bio5(最热月最高温度)，分别为 52.9% 和 14.2%。综上分析可得，影响油茶毒蛾适生分布的主要气温变量为 Bio2(温度日较差月均值)和 Bio6(最冷月最低温度)，主要降水变量为 Bio12(年降水量)和 Bio14(最干月降水量)。

表 3 环境因子贡献率和置换重要值

Tab. 3 Contribution rate and permutation importance of environmental variables

环境变量 Environmental variable	贡献率 Contribution rate/%	置换重要值 Permutation importance value/%
Bio14	72.1	0.7
Bio12	16.2	2.0
Bio6	3.0	52.9
Bio5	1.9	14.2
Bio4	1.8	4.8
Bio2	1.7	4.2
Bio15	1.4	9.5
Bio3	1.4	4.8
Bio8	0.4	4.7
Bio18	0.1	2.2

2.3 环境因子响应曲线

油茶毒蛾的分布主要受 Bio14(最干月降水量)、Bio12(年降水量)、Bio6(最冷月最低温度)和 Bio2(温度日较差月均值)的影响，各主导环境变量对油茶毒蛾的分布概率的作用如图 4 所示。Bio14、Bio12、Bio6 和 Bio2 的响应曲线均为单峰型。具体地，就环境因子 Bio14 来说，随着最干月降水量的增加，油茶毒蛾的分布概率也随之增加，最干月降水量在 28 ~ 148 mm 范围内时最适宜油茶毒蛾的生长发育。就环境因子 Bio12 来看，年降水量在 1 290 ~ 2 080 mm 时最适宜油茶毒蛾的分布，年降水量低于 800 mm 或高于 3 600 mm 时非常不利于油茶毒蛾的生存。对于环境因子 Bio6，油茶毒蛾最适宜分布的最冷月最低温度范围为 1.0 ~ 10.1 ℃，当最冷月最低温度低于−12.8 ℃ 时，油茶毒蛾将无法生存。对于环境因子 Bio2，温度日较差月均值在 7.2 ~ 8.5 ℃ 时最适合油茶毒蛾的分布，之后随着该环境变量取值的继续增加会越来越不利于油茶毒蛾的分布，当该环境变量取值高于 12.6 ℃ 时油茶毒蛾将无法生存。

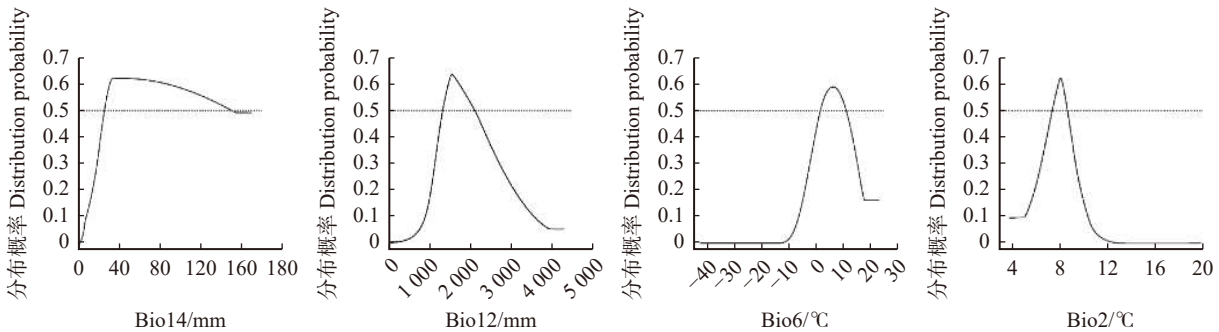


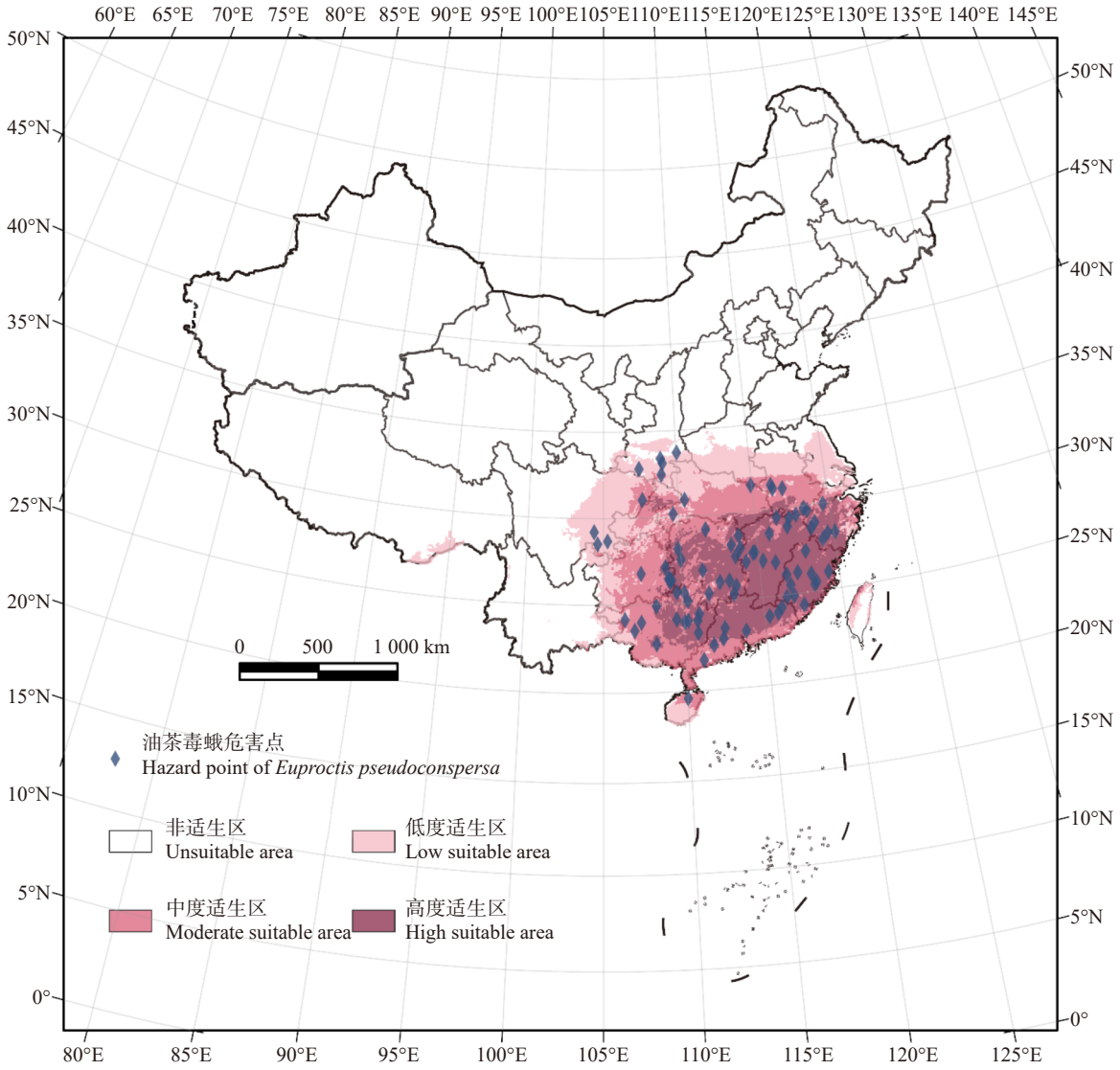
图 4 适生分布对主要环境因子的响应曲线

Fig. 4 Response curves of suitable distribution to main environmental factors

2.4　当前潜在地理分布

基于油茶毒蛾分布数据开发的 MaxEnt 模型，预测油茶毒蛾在当前的潜在地理分布如图 5 所示。利用 ArcGIS 软件栅格统计不同适生等级的面积，可知当前气候情景下，油茶毒蛾高度适生区面积为 64.2×10^4 km^2，约占我国国土面积的 6.7%；中度适生区面积为 61.8×10^4 km^2，约占我国国土面积的 6.4%；低度适生区面积为 66.0×10^4 km^2，约占我国国土面积的 6.9%；总适生区面积为 192.0×10^4 km^2，占我国国土面积的 20.0%（图 6）。

从分布区域上来看，当前油茶毒蛾的适生区主要分布在我国南方的长江中下游地区和华南地区，如湖南、湖北、江西、浙江、福建、广东、广西、海南、贵州、四川、重庆、陕西、河南、江苏、安徽等省份，台湾东部和西部、云南东部、西藏山南和林芝地区、甘肃东南部也有小部分适生区。在这其中，油茶毒蛾高度适生区为湖南大部、江西大部、浙江中西部、福建大部、广东北部、广西东北部，湖北南部、安徽南部、贵州东部和重庆中部也有小部分高度适生区域。油茶毒蛾中度适生区主要分布在湖北中南部、安徽南部、浙江东部、广东南部、海南北部、广西西南部、贵州中部、重庆中部等省份和地区，河南南部、四川东部和台湾西部也有小部分中度适生区。油茶毒蛾中高度适生区主要位于亚热带季风气候区、常绿阔叶林区，气候温暖湿润。研究预测使用的环境因子与油茶毒蛾生态学特性基本一致。油茶毒蛾低度适生区主要分布在湖北西北部、河南中南部、安徽中部、江苏中南部、海南南部、贵州西部、四川东部、重庆北部、陕西南部等省份和地区，甘肃东南部、台湾东部和西藏林芝地区有小部分低度适生



基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作，底图边界无修改。下同。Based on the standard map production of the Ministry of Natural Resources' GS(2020)4619 standard map service website, the basemap boundaries have not been modified. The same below.

图 5　当前油茶毒蛾适生区分布情况

Fig. 5　Current distribution condition of suitable area for *C. oleifera*

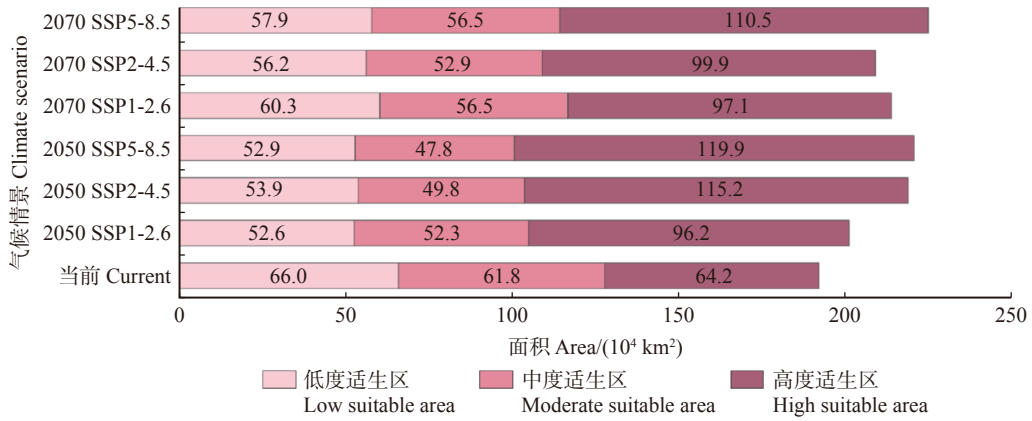


图 6 油茶毒蛾不同时期在中国的潜在适生区面积

Fig. 6 Potential suitable area distribution of *E. pseudoconspersa* in China under different climate scenarios

区。油茶毒蛾非适生区分布范围较广，包括我国西南、西北、东北和华北地区，约占我国国土面积的80.0%。

2.5 未来不同气候情景下潜在地理分布

本研究预测了 2050 年和 2070 年在不同气候变化情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)油茶毒蛾的潜在分布。预测结果显示，在未来气候情景下，油茶毒蛾的潜在地理分布面积较当前的适生分布区域均有不同程度的扩大(图 7)。在 2050 SSP1-2.6、2050 SSP2-4.5、2050 SSP5-8.5、2070 SSP1-2.6、2070 SSP2-4.5 和 2070 SSP5-8.5 气候情景下，油茶毒蛾的总适生面积分别为 201.1×10^4、218.9×10^4、220.6×10^4、213.9×10^4、209.0×10^4 和 224.9×10^4 km^2，相对于当前的 192.0×10^4 km^2，增幅分别达 4.7%、14.0%、14.9%、11.4%、8.9% 和 17.1%，增加明显(图 6)。

在未来气候变化情景下，高辐射强迫情景 SSP5-8.5 油茶毒蛾的总适生区面积最大，2050 年和 2070 年总适生区面积分别为 220.6×10^4 km^2 和 224.9×10^4 km^2，分别占我国国土面积的 23.0% 和 23.4%；其次是中辐射强迫情景 SSP2-4.5；低辐射强迫情景 SSP1-2.6 下的油茶毒蛾总适生区面积增加幅度最小，2050 年和 2070 年总适生区面积分别为 201.1×10^4 km^2 和 213.9×10^4 km^2。由此可知，气候变暖导致的高温高湿能够促进油茶毒蛾分布范围的扩张。此外，在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下，2070 年的总适生区面积均高于 2050 年，而在 SSP2-4.5 气候情景下，2070 年的总适生区面积均低于 2050 年，这表明，SSP2-4.5 气候情景下随时间的推移某些环境因素可能会变得不适宜油茶毒蛾的生长发育。

2.6 未来不同气候情景下潜在适生区空间格局变化

对比分析油茶毒蛾适生区空间格局在未来气候变化情景下的变化(图 8)，结果表明，在未来两个时期 3 种气候情景下，油茶毒蛾当前的适生区几乎全部都将保留，保留适生区面积均在 191.8×10^4 km^2 以上，保留率均超过 99%(表 4)，这表明，在未来气候情景下，当前适生区的环境条件依然适宜油茶毒蛾生存。适生区新增区域主要在当前适生区的北侧和西侧，油茶毒蛾在未来不同气候情景下增加的面积大小范围为 $9.3 \times 10^4 \sim 33.0 \times 10^4$ km^2，新增率在 4.8% ~ 17.2% 之间，具体来说，江苏北部、安徽北部、河南中部、陕西中部、四川中部、云南北部和南部、西藏山南和林芝地区、新疆西部以及台湾等小部分地区会在未来成为油茶毒蛾的适生分布区；油茶毒蛾在未来不同气候情景下丧失的适生区面积均较小，均在 0.2×10^4 km^2 以下，丧失率均不足 0.1%，几乎没有发生适生区缩减。

分析油茶毒蛾适生区新增区域面积与不同气候情景的关系，可以发现，SSP5-8.5 气候情景下油茶毒蛾适生区的新增面积最大，2050 年和 2070 年新增适生区面积分别为 28.6×10^4 km^2 和 33.0×10^4 km^2；对于适生区的新增面积最小的气候情景，不同时期有所不同，2050 年为 SSP1-2.6 气候情景，新增面积为 9.3×10^4 km^2，而 2070 年为 SSP2-4.5 气候情景，新增适生区面积为 17.0×10^4 km^2。但就总体趋势而言，高辐射气候情景有利于油茶毒蛾的生长发育，油茶毒蛾新增适生区面积随辐射增加而增加。

本研究使用不同时期的物种分布地理中心点来表征油茶毒蛾的整体空间位置的变迁情况(表 4)。除 SSP2-4.5 气候情景 2070 年适生区的油茶毒蛾适生区分布地理中心点回迁外，在相同时期，辐射强度越大的气候情景下，地理分布中心距当前适生区分布地理中心点的迁移越大。在时期不同气候情景相同时，除去 SSP2-4.5 气候情景，SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候情景下，2070 年的地理分布中心较 2050 年呈现往西北方向迁移的趋势，且在 SSP5-8.5 气候情景下迁移的距离最大。从当前时期开始，随着时间推

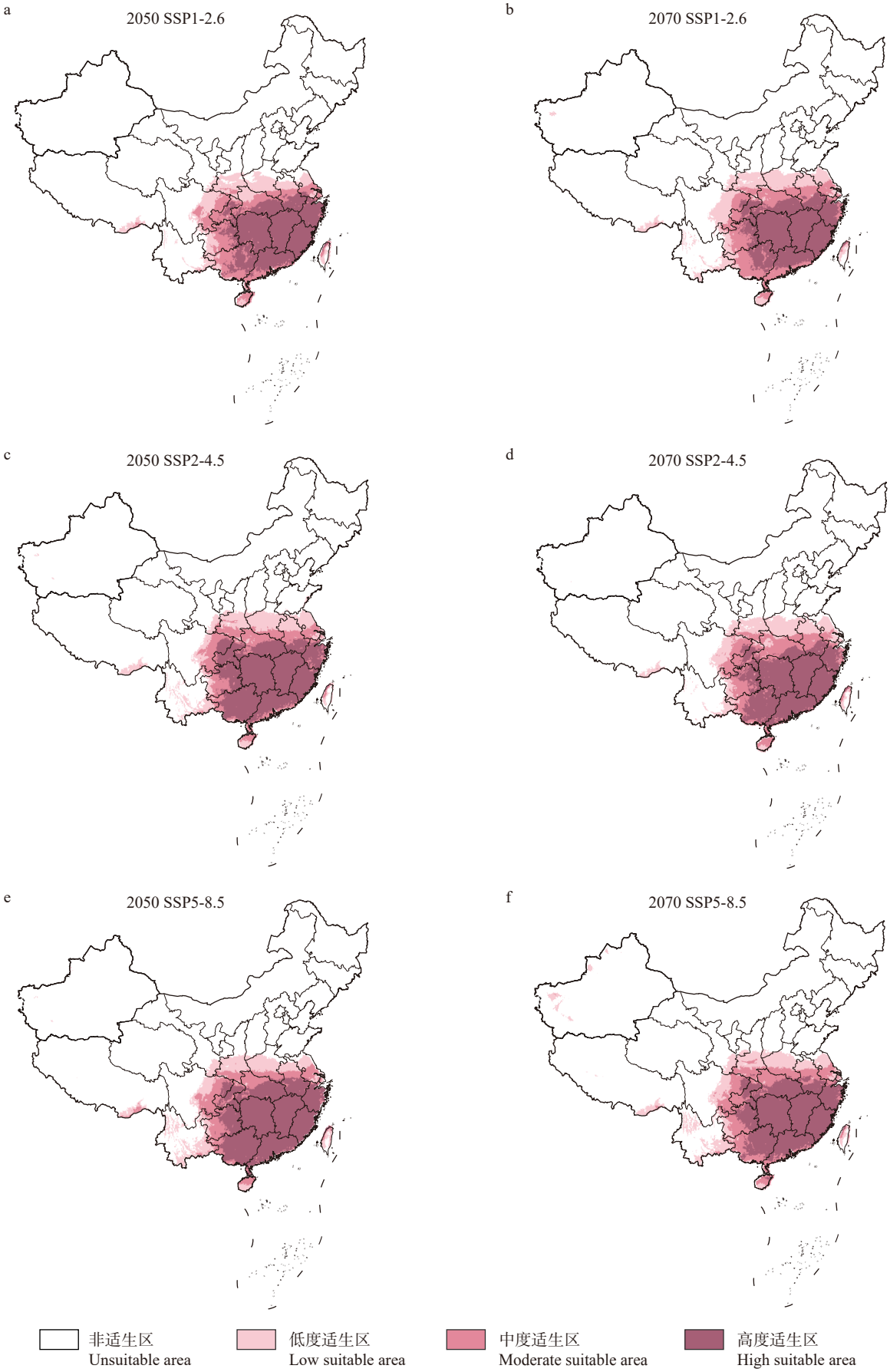


图 7　油茶毒蛾不同气候情景下在中国的适生分布区

Fig. 7　Suitable distribution area of *E. pseudoconspersa* in China under different climate scenarios

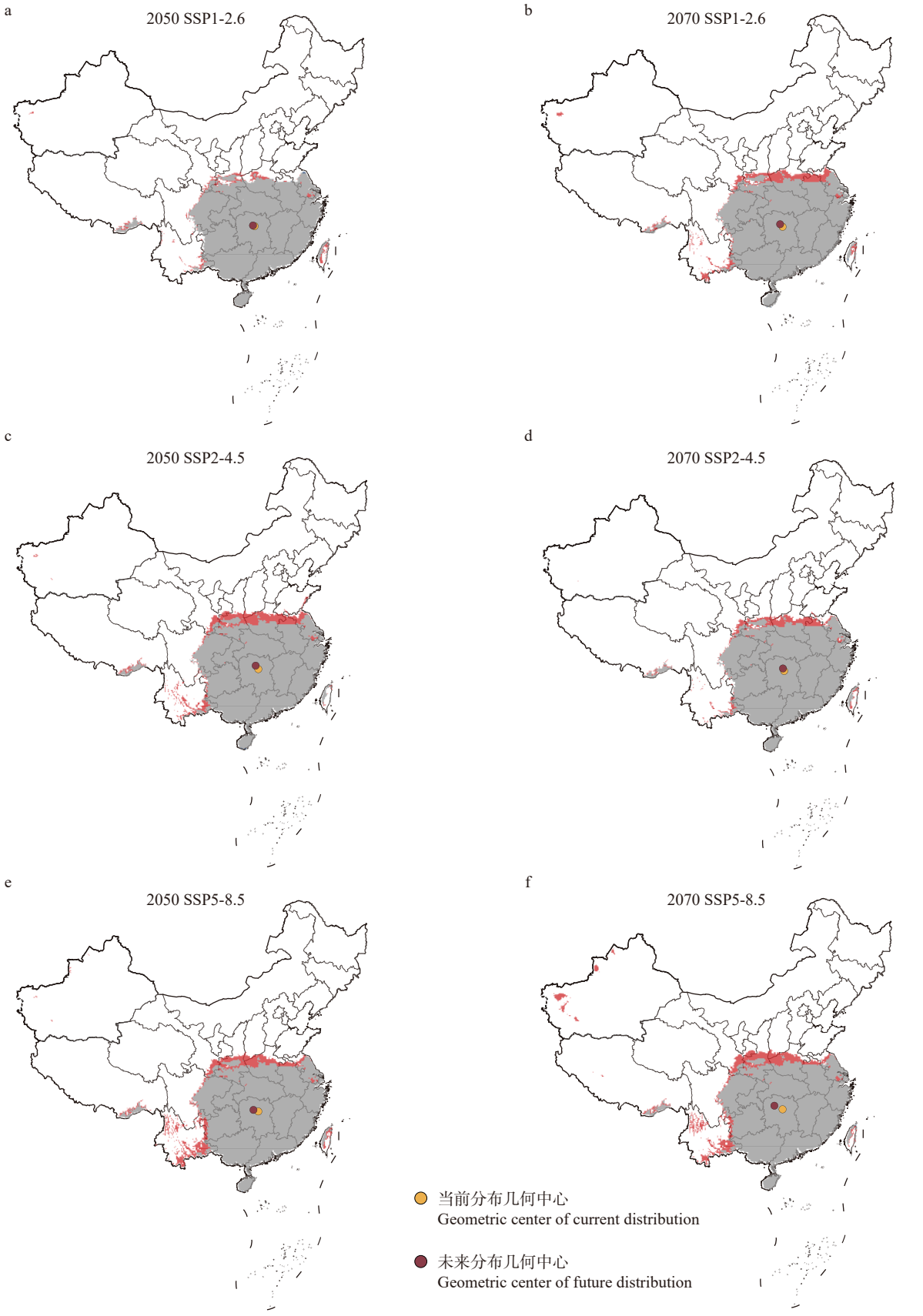


图 8 未来气候变化情景下油茶毒蛾空间分布格局变化

Fig. 8 Changes in spatial distribution pattern of *E. pseudoconspersa* in China under future climate change scenarios

表 4　不同时期几何中心（质心）迁移距离及适生区变化

Tab. 4　Migration distance of geometric center (centroid) and change of the suitable area in different periods

气候情景 Climate scenario	质心迁移距离 Migration distance of centroid/km	非适生区 Unsuitable area/ (10^4 km^2)	新增适生区 New-added suitable area/ (10^4 km^2)	保留适生区 Reserved suitable area/ (10^4 km^2)	缩减适生区 Reduction of suitable area/ (10^4 km^2)
当前 Current					
2050SSP1-2.6	24.4	758.7	9.3	191.8	0.2
2050SSP2-4.5	61.3	741.0	27.0	191.9	0.1
2050SSP5-8.5	71.4	739.4	28.6	192.0	0.0
2070SSP1-2.6	50.1	746.1	21.9	192.0	0.0
2070SSP2-4.5	38.9	751.0	17.1	192.0	0.0
2070SSP5-8.5	125.1	735.0	33.0	191.9	0.1

移和气候变化的影响，油茶毒蛾适生区地理分布中心整体上往西北方向迁移，即，在未来气候变化情景下，油茶毒蛾适生区将向高纬度和内陆地区扩张。

3　讨　　论

3.1　油茶毒蛾潜在分布区空间格局

油茶毒蛾潜在分布区主要集中在长江中下游平原、东南丘陵等我国南方地区，物种分布模型的预测分布与实际发生相吻合。从模型的评价指标 ROC 曲线的 AUC 值上来看，物种模型 AUC 值为 0.934，表明物种分布模型的预测性能极好。有研究表明，与其他物种分布模型相比，MaxEnt 模型的预测结果较为保守，但可能更为精确。王运生等[2]应用包括 MaxEnt 在内的 5 个物种分布模型模拟香蕉穿孔线虫（*Radopholus similis*）在中国的适生分布，结果显示 MaxEnt 模型的预测效果最好。Kaky 等[23]对埃及的 114 种药用植物的物种分布模型进行了拟合，发现 MaxEnt 模型的预测性能最高。但也有研究显示，MaxEnt 模型并不是物种分布预测的最佳选择。刘欣[24]在同时使用 MaxEnt 模型和 GARP 模型预测外来入侵生物空心莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）在中国的潜在分布时认为，GARP 模型比 MaxEnt 模型所预测的分布区范围更广，更能反映空心莲子草潜在分布区的范围。本研究仅使用 MaxEnt 模型对油茶毒蛾的适生分布进行了预测，缺少与其他物种分布模型的比较，尚无法断言 MaxEnt 模型是预测油茶毒蛾的适生分布的最佳模型。此外油茶毒蛾的部分分布点数据基于文献获取，各研究对地理位置描述的精确程度不一，因而地理坐标可能存在一定程度的误差。

此外，油茶毒蛾的适生区与崔相艳等[25]预测油茶的潜在分布区基本一致，该结果意味着适宜油茶生长的地区同样适于油茶毒蛾的发生。地理气候条件的适宜，导致广阔的中国南方油茶潜在分布地区都十分适宜油茶毒蛾的分布，并且在未来各时期和气候情景下，油茶毒蛾的适生区都有不同程度的扩大，这些都极大增加了油茶毒蛾灾化的风险。因此，油茶毒蛾适生分布区的有关部门应加强监测预报，关注油茶毒蛾的发生发展情况，提高对油茶毒蛾虫害发生的预警能力；加强防控体系建设，制定相关预案，抓好油茶毒蛾防治措施的宣传工作。

3.2　环境变量对当前分布的制约

物种在地理上的潜在分布情况主要受到环境因素的限制，降水和温度在造就物种地理分布上发挥着深刻而又深远的作用[26]。本研究运用 MaxEnt 模型分别对影响油茶毒蛾分布的环境因子建模分析表明，最干月降水量（Bio14）、年降水量（Bio12）、最冷月最低温度（Bio6）和温度日较差月均值（Bio2）是影响油茶毒蛾分布的主导因子，这就证明了降水和温度在塑造油茶毒蛾地理分布上起着重要作用。

对于油茶毒蛾，有研究发现，干燥可能是限制毒蛾类害虫生存生长的重要因素，湿度高的环境不但能增加毒蛾各生活史阶段的存活率，也能增加其产卵量、孵化率、化蛹率和羽化率，越高的湿度环境越有利于毒蛾的生存[27]。此外，冬季最低温度直接影响昆虫能否安全越冬，太低的温度不利于其生长发育[28]。本研究发现，最干月降水量（Bio14）28 ~ 148 mm、年降水量（Bio12）1 290 ~ 2 080 mm、最冷月最低温度（Bio6）1.0 ~ 10.1 ℃、温度日较差月均值（Bio2）在 7.2 ~ 8.5 ℃ 时最适宜油茶毒蛾的生存，我国满足此条件的气候类型是热带和亚热带季风气候，油茶毒蛾的适生区预测结果也显示油茶毒蛾的适生区主要集中在长江中下游流域及华南降水量充沛、温度适宜的地区。油茶毒蛾的生物特性与环境变量相吻合。

3.3　气候变化对潜在分布的影响

根据对中国油茶毒蛾潜在分布的预测结果显示，未来气候变化条件下，会使油茶毒蛾的分布区面积出现扩张。同时还发现，伴随着气候变化，油茶毒蛾的分布地理中心点出现了向西北迁移的现象。这表明气候的改变能对油茶毒蛾的地理分布产生相应影响，造成其潜在分布区面积的增减和范围的改

变。同样，这也体现了物种分布对于气候变化的适应。

分析本研究的预测结果发现，随着未来气候变化的影响，油茶毒蛾的分布区面积在向北、向西扩大。这可能是由于在临近当前油茶毒蛾适生区的北侧和西侧区域，油茶毒蛾不适生的限制因素，在气候变暖的未来，这一限制因素逐渐被解除，不适生区域变成了适生区域。许多研究也有类似发现，孙淑霞[29]通过对气候变化下中国栎属物种的分布研究发现，全球气候的变暖会导致中国栎属(*Quercus*)物种的潜在分布区逐渐扩大。油茶毒蛾在当前分布区域的北侧和西侧新增了许多分布区，但分布范围与当前相比，基本上没有适生区缩减。究其原因，在本研究给定的气候时期里，影响油茶毒蛾分布的主导环境因子在当前适生区内并未演变到环境变量的不利区间。

未来气候条件下预测结果表明，气候变化将会深刻影响油茶毒蛾的空间分布。总的来说，在气候变暖的作用下，油茶毒蛾开始倾向于向高纬度和高海拔的内陆地区迁移，而且随着气候变化的加剧，这种影响也越明显。其他研究支持类似的结论，气候变化将导致酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)[30]、稻绿蝽(*Nezara viridula*)[31]、冬尺蛾[7]等向高纬度分布扩散。

4 结　　论

本研究利用 MaxEnt 模型模拟了油茶毒蛾的潜在地理分布，其 AUC 值为 0.934，表明该模型对油茶毒蛾的分布研究具有很好的适用性。研究得出，油茶毒蛾对最干月降水量、年降水量、最冷月最低温度和温度日较差月均值较为敏感，降水和温度在塑造油茶毒蛾潜在分布格局上起着重要作用。当前气候条件下，油茶毒蛾的适生区非常广，几乎将长江中下游平原、东南丘陵等我国南方地区全部涵盖在内，基本与油茶的分布区重合，这意味着油茶毒蛾可能对油茶种植业造成巨大的潜在威胁。未来气候情景下，油茶毒蛾的适生区将向北、向西等高纬度的内陆地区扩张。气候变暖将有利于油茶毒蛾在中国的扩散，油茶毒蛾的防控形势将更加严峻。

参 考 文 献

[1] Bedia J, Busque J, Gutierrez J M. Predicting plant species distribution across an alpine rangeland in northern Spain: a comparison of probabilistic methods[J]. Applied Vegetation Science, 2011, 14(3): 415−432.

[2] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365−372.
Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365−372.

[3] Wang Y M, Ge F, Liu X H, et al. Evaluation of mass-trapping for control of tea tussock moth *Euproctis pseudoconspersa* (Strand) (Lepidoptera: Lymantriidae) with synthetic sex pheromone in south China[J]. International Journal of Pest Management, 2005, 51(4): 289−295.

[4] 刘万才, 刘振东, 朱晓明, 等. 我国昆虫性信息素技术的研发与应用进展 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4): 803−811.
Liu W C, Liu Z D, Zhu X M, et al. Development and application of insect sex pheromone technology in China[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(4): 803−811.

[5] 李霞, 盛如, 王振营, 等. 二点委夜蛾两种新型性诱芯田间诱蛾性能比较 [J]. 植物保护, 2013, 39(3): 141−143, 166.
Li X, Sheng R, Wang Z Y, et al. Comparison of trapping efficacy of two kinds of sex pheromone lure of *Athetis lepigone* in field[J]. Plant Protection, 2013, 39(3): 141−143, 166.

[6] Dong W W, Dong S Y, Jiang G F, et al. Characterization of the complete mitochondrial genome of tea tussock moth, *Euproctis pseudoconspersa* (Lepidoptera: Lymantriidae) and its phylogenetic implications[J]. Gene, 2016, 577(1): 37−46.

[7] Lehmann P, Ammunet T, Barton M, et al. Complex responses of global insect pests to climate warming[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2020, 18(3): 141−149.

[8] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557−567.
Xu Z L, Peng H H, Peng S Z. The development and evaluation of species distribution models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 557−567.

[9] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3–4): 231−259.

[10] Merow C, Smith M J, Silander J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058−1069.

[11] 赵佳强, 石娟. 基于新型最大熵模型预测刺槐叶瘿蚊 (双翅目: 瘿蚊科) 在中国的适生区 [J]. 林业科学, 2019, 55(2): 118−127.
Zhao J Q, Shi J. Prediction of the potential geographical distribution of *Obolodiplosis robiniae* (Diptera: Cecidomyiidae) in China based on a novel maximum entropy model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(2): 118−127.

[12] 杜志宏, 刘伟, 曹学仁, 等. 气候变化情景下基于 MaxEnt 的麦瘟病在全球及中国的适生性分析 [J]. 植物保护, 2022, 48(5): 158−166.
Du Z H, Liu W, Cao X R, et al. Suitability analysis of wheat blast in the world and China under climate change scenarios based on MaxEnt[J]. Plant Protection, 2022, 48(5): 158−166.

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

Beijing Forestry University, 2021, 43(9): 59−69.

[14] 孙红云, 徐亮胜, 冯浩, 等. 基于 MaxEnt 模型预测苹果树腐烂病在中国的潜在地理分布 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(3): 461−466.
Sun H Y, Xu L S, Feng H, et al. Prediction for potential geographic distribution of valsamali in China based on MaxEnt model[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(3): 461−466.

[15] Aiello-Lammens M E, Boria R A, Radosavljevic A, et al. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models[J]. Ecography, 2015, 38(5): 541−545.

[16] Sillero N, Barbosa A M. Common mistakes in ecological niche models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2021, 35(2): 213−226.

[17] 谭洁, 黄安宁, 史学丽, 等. BCC-CSM2-MR 模式对中国陆面过程模拟能力评估 [J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1335−1347.
Tan J, Huang A N, Shi X L, et al. Evaluating the performance of BCC-CSM2-MR model in simulating the land surface processes in China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1335−1347.

[18] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. Ecological Modelling, 2000, 135(2–3): 147−186.

[19] Kumar R S, Kala R H, Kumar G S, et al. Predicting the impact of climate change on the distribution of two threatened Himalayan medicinal plants of Liliaceae in Nepal[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(3): 558−570.

[20] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists: statistical explanation of MaxEnt[J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43−57.

[21] Kalboussi M, Achour H. Modelling the spatial distribution of snake species in northwestern Tunisia using maximum entropy (Maxent) and geographic information system (GIS)[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(1): 13.

[22] Fielding A. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models[J]. Environmental Conservation, 1997, 24(1): 38−49.

[23] Kaky E, Nolan V, Alatawi A, et al. A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: a case study with Egyptian medicinal plants[J]. Ecological Informatics, 2020, 60: 101150.

[24] 刘欣. 基于 GARP 和 MAXENT 的空心莲子草在中国的入侵风险预测 [D]. 济南: 山东师范大学, 2012.
Liu X. Prediction of the invasion risk for *Alternanthera philoxeroides* in China based on the GARP and MAXENT Model[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012.

[25] 崔相艳, 王文娟, 杨小强, 等. 基于生态位模型预测野生油茶的潜在分布 [J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1117−1128.
Cui X Y, Wang W J, Yang X Q, et al. Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1117−1128.

[26] Punyasena S W, Eshel G, Mcelwain J C. The influence of climate on the spatial patterning of Neotropical plant families[J]. Journal of Biogeography, 2010, 35(1): 117−130.

[27] 杨丽娜. 舞毒蛾对环境因子及 Pb 胁迫的响应机制 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
Yang L N. Response mechanism of gypsy moth to environmental factors and Pb stress[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.

[28] 郭明明, 李晓峰, 邓盼, 等. 豆天蛾越冬幼虫滞育解除后生物学特性的研究 [J]. 应用昆虫学报, 2021, 58(4): 966−972.
Guo M M, Li X F, Deng P, et al. Diapause termination and post-diapause of overwintering *Clanis bilineata tsingtauica* larvae[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2021, 58(4): 966−972.

[29] 孙淑霞. 气候变化下中国栎属物种及其丰富度潜在分布格局模拟预测研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
Sun S X. The effect of climate change on potential distribution pattern of oaks (*Quercus* L.) and its richness in China[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[30] 赵光华. 气候变化背景下我国酸枣空间分布格局演变及影响因素分析 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2020.
Zhao G H. Analysis on spatial distribution pattern evolution and influencing factors of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in China under climate change[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2020.

[31] Musolin D L. Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (Heteroptera) to climate change[J]. Global Change Biology, 2007, 13(8): 1565−1585.

（责任编辑　范　娟
责任编委　骆有庆）