

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190053

基于 MaxEnt 对桉树枝瘿姬小蜂在 中国发生趋势的预测

黄梦伊 赵佳强 石 娟

(北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】桉树枝瘿姬小蜂是我国一种入侵性小蜂, 自 2007 年传入我国广西省, 在短短几年时间内危害了我国南部的桉树种植地, 造成严重经济损失。本研究利用 MaxEnt 模型对桉树枝瘿姬小蜂在中国现在和未来的适生区进行预测, 以了解桉树枝瘿姬小蜂在温度变化的影响下其适生地范围的变化。【方法】采用 MaxEnt 预测模型—最大熵模型, 通过收集桉树枝瘿姬小蜂在中国报道的分布地数据、调查最新发生地危害轻重程度对该蜂在中国的适生区现在以及未来 RCP8.5 气候情景下的适生区进行模拟并检测模拟结果的精准度。【结果】模型模拟结果的测试遗漏率与理论遗漏率基本吻合。AUC 值为 0.898, 标准差为 0.022, 表明所使用的数据无空间自相关, 模型筛选的参数结果可靠且准确度高。MaxEnt 模型预测得到桉树枝瘿姬小蜂在中国的最佳适生区主要分布在长江以南的福建、广东、广西、海南等地, 在 RCP8.5 气候情景下其未来中度适生区面积有小范围的下降, 但整体适生区范围显著增加。【结论】通过适生地范围预测结果的分析, 本研究对桉树枝瘿姬小蜂的监测以及潜在危险入侵地区制定有效的防治手段具有重要的理论指导意义。

关键词: 桉树枝瘿姬小蜂; MaxEnt; RCP8.5; 适生区

中图分类号: S763.305 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)11-0064-08

引文格式: 黄梦伊, 赵佳强, 石娟. 基于 MaxEnt 对桉树枝瘿姬小蜂在中国发生趋势的预测 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 64-71. Huang Mengyi, Zhao Jiaqiang, Shi Juan. Predicting occurrence tendency of *Leptocybe invasa* in China based on MaxEnt[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 64-71.

Predicting occurrence tendency of *Leptocybe invasa* in China based on MaxEnt

Huang Mengyi Zhao Jiaqiang Shi Juan

(Key Laboratory of Beijing for the Control of Forest Pests, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] *Leptocybe invasa* is an invasive wasp common to China, which was first introduced into the Guangxi Province of southern China in 2007. It had endangered the eucalyptus plantations in southern China within just a few years, causing serious economic and ecological losses. This study employed the MaxEnt latest prediction model, a novel maximum entropy model to firstly analyze this invasive wasp distribution in China under current and future climate conditions. The results will be helpful to understand the range dynamic change of *L. invasa* under the influence of temperature change. [Method] Data were collected on the current locations of this wasp, along with the damage incurred to eucalyptus. These data were used to create a forecast model for the present and future trends of the favorable habitat under the RCP 8.5 climate scenario. And model will test the accuracy of simulation results. [Result] The test omission rate of simulation results was basically consistent with that of theory. The value of AUC was 0.898 while a standard deviation of 0.022. The verification results showed that the test and

收稿日期: 2019-01-20 修回日期: 2020-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1202102)。

第一作者: 黄梦伊。主要研究方向: 植物检疫。Email: hmyiyouxiang@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 石娟, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 植物检疫。Email: shi_juan@263.net 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

training data were not independent and the constructed model was highly reliable and accurate. MaxEnt model predicted that the potential distribution for *L. invasa* was mainly concentrated at the south of the Yangtze River in the provinces of Fujian, Guangdong, Guangxi and Hainan. The RCP 8.5 scenario predicted a small-scale potential reduction of moderately favorable habitat, but the whole favorable habitat increased.

[**Conclusion**] Based on the analysis of the predicted scope of this invasive wasp distribution, this study has established the grounds for the effective formulation of preventive and control measures for the monitoring of *L. invasa* and the prediction of its possible colonies, which is a significant theoretical reference on its own.

Key words: *Leptocybe invasa*; MaxEnt; RCP8.5; favorable habitat

桉树枝瘿姬小蜂(*Leptocybe invasa*)属膜翅目(Hymenoptera), 姬小蜂科(Eulophidae)^[1]。其主要危害桃金娘科(Myrtaceae)桉树属(*Eucalyptus*)植物^[1]。桉树枝瘿姬小蜂最早在中东和地中海地区发现并造成危害, 之后迅速入侵到有桉树种植的国家, 目前该蜂在亚洲、欧洲、中东、美洲均有分布^[1-3]。我国从 19 世纪末开始引种桉树, 由于其适应性强、轮伐期短、繁殖容易等特点, 在我国华南及西南地区大面积种植^[4], 广泛用于造纸、园林绿化、生态防护林等方面^[5]。2007 年我国首次在广西东兴县发现桉树枝瘿姬小蜂, 并在几年时间里扩散到中国沿海的广东、福建、海南^[6], 并向内陆省份云南、四川等地继续扩散^[7]。桉树枝瘿姬小蜂在我国主要危害的桉树有赤桉(*Eucalyptus idulensis*)、巨桉(*E. grandis*)、尾赤桉(*E. urophylla*)、邓恩桉(*E. dunnii*)、窿缘桉(*E. exserta*)、多利桉(*E. dorrigoiensis*)等^[8-11], 对我国大面积桉树人工林造成严重经济损失。

根据 IPCC5 第 5 次评估报告, 全球气候将继续保持逐年变暖的趋势, 到 21 世纪末, 全球气温将升高 0.3 ~ 4.8 °C^[12]。桉树枝瘿姬小蜂虽然在中国的入侵时间较短, 但是在全球气候变暖的背景下, 桉树枝瘿姬小蜂的发生地不断向高纬度增加, 对内陆的桉树人工林造成了严重的威胁。目前我国对桉树枝瘿姬小蜂的研究主要集中在生物学特性、发生规律、生物防治方面的研究。但缺乏对桉树枝瘿姬小蜂在气候变化影响下中国分布区域的全面了解。生物气候模型用来预测在气候条件下物种适宜的分布区。广泛使用的模型主要有 CLIMEX、DOMAIN、GARP、HABITAT 和 MaxEnt^[13]。其中 MaxEnt 模型对适生区的预测主要由物种危害地点、气候图层数据和软件参数设置 3 部分来决定。该模型在实际预测应用中具有较高的精确度, 且模型一直不断得到改进, 增加许多附加功能以此提高模型的准确度^[14]。MaxEnt 3.4 版本, 增加了互补双对数“Cloglog”输出方式新功能。此输出功能较之前的“raw”“logistic”“cumulative”3 种输出方式能更准确的预测适生区^[15]。本研究基于 MaxEnt 3.4.1 版本软件, 利用模型的

“Cloglog”输出方法对桉树枝瘿姬小蜂在我国目前潜在适生区分布以及在未来气候影响下的发生趋势进行预测, 为桉树枝瘿姬小蜂的监测预警和有效防治提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 桉树枝瘿姬小蜂分布地信息

桉树枝瘿姬小蜂的分布地主要通过 4 种途径进行收集: (1)通过 CABI(commonwealth agricultural bureaux international)和 GBIF(global biodiversity information facility)获得; (2)文献收集。桉树枝瘿姬小蜂中国发生地的文献信息通过 CNKI 数据库进行收集, 外国发生地的文献信息通过搜索英文文献获得; (3)通过中国森防信息网收集不同省份市县桉树枝瘿姬小蜂发生地, 并可获得部分发生地虫害发生程度的信息; (4)2016—2017 年, 实地调查云南、福建两地桉树枝瘿姬小蜂危害分布地, 通过 GPS 定位获取分布点的坐标数据。由于部分分布点数据会在某地区集中分布, 可能会对预测结果产生一定的偏差。本研究利用 ArcGIS 中的 Arcmap, 比较所有采集点之间的欧氏距离, 一个 5 km × 5 km 网格中点的数量在 2 个及以上时, 随机选择其中 1 个点保留^[16], 以此确定导入模型的分布点信息。

1.2 中国气候数据

现在气候数据(1960—1990 年)和未来气候数据(2050 年)通过网站 WORLDCLIM(<http://www.worldclim.org>)下载获得。在 IPCC 第 5 次评估报告中 RCP8.5 气候情景是假设温室气体排放最高的气候情景。它假设未来没有制定对减少温室气体排放的相应政策, 并且伴随着甲烷气体的增加排放以及人们在日常活动中对化石燃料的过度使用^[17-18]。从目前的全球环境来看, RCP8.5 气候情景被很多学者作为未来气候情景进行研究^[19-21]。因此本研究未来气候数据(2050 年)采用气候系统模型 BCC-CSM1-1 的 RCP8.5 气候情景作为未来气候情景。

气候数据集共包括 19 个气候变量, 分别是年平均温度(bio1)、温差月均值(bio2)、等温性(bio3)、温

度季节性变动系数(bio4)、最热月最高温(bio5)、最冷月最低温(bio6)、年温差(bio7)、最湿季平均温度(bio8)、最干季平均温度(bio9)、最热季平均温度(bio10)、最冷季平均温度(bio11)、年降水(bio12)、最湿月降水量(bio13)、最干月降水量(bio14)、降水量季节性变动系数(bio15)、最湿季降水量(bio16)、最干季降水量(bio17)、最热季降水量(bio18)、最冷季降水量(bio19)。这 19 个变量是根据不同研究的需求衍生而来,变量之间存在一定的空间相关性。需对环境变量进行相关性分析,通过去除一部分空间相关联较高的环境变量来提高模型的转移能力,使预测结果更加精确^[22]。本研究利用 R 语言软件对 19 个气候变量进行 Pearson 相关性分析,去除具有高相关性的气候变量,最终获得主导气候变量为最终的建模气候图层。

1.3 MaxEnt

1.3.1 最大熵模型适生区预测

采用 MaxEnt 3.4.1 版本,利用该版本新增加的基于非齐次泊松分布过程(IPP)的互补双对数(complementary log-log, Cloglog)输出方式^[15],对适生区进行预测。Cloglog 输出的适生概率表达式^[15]为:

$$P = 1 - \exp(-\exp(H) p_{\lambda}(z))$$

式中: P 为适生概率, H 为熵值, λ 为非齐次泊松分布的强度参数, z 为所有落在研究地理区域 D 里的发生分布点的集合, $p_{\lambda}(z)$ 为在 D 区域内可能的密度值。

1.3.2 模型参数设置及文件输出

结合文献及小蜂的生物学特征,将随机选取测试集比例的值设置为 25,运行参数中的重复迭代次数设置为 15,来削减取样范围带来的误差,最大重复次数设置为 5 000,输出方式选择 Cloglog。特征设置选择“auto features”,文件输出类型为“asc”。生成响应曲线及绘制刀切图。具体参数设置见表 1。设置参数建立预测模型后,再利用 ArcGIS 的转换工具(conversion tools)将软件输出的文件转化为栅格格式,然后利用 ArcGIS 中的重分类功能划分适生区:0~0.05 为非适生区,0.05~0.33 为低度适生区,0.33~

0.66 为中度适生区,0.66~1 为高度适生区。最后得到桉树枝瘿姬小蜂在中国不同适生区的分布图。

1.3.3 模型检验

采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法中的曲线下面积值(area under curve, AUC)进行模型结果的精确度检验。以真阳性率为纵坐标,假阳性率为横坐标所形成的曲线,AUC 值越大则模型预测效果越好。其具体判别标准为:AUC 值在 0.5~0.6,不及格;0.6~0.7,较差;0.7~0.8,一般;0.8~0.9,较好;0.9~1.0,极好^[23]。

2 结果与分析

2.1 桉树枝瘿姬小蜂分布点的确定

通过欧式距离的比对筛选,从世界的 216 个分布点中筛选掉 102 个点,最终确定用于建模的 114 个分布点(图 1)。

2.2 气候数据的确定

对获取的 19 个气候数据利用 R 语言进行 Pearson 相关系数分析和聚类分析,并使结果通过热图的形式展示(图 1)。对相关性在 80% 以上的两个气象数据,结合桉树枝瘿姬小蜂的生物学特征,二者择一。最终筛选出 12 个气候数据用于模型预测(表 2)。

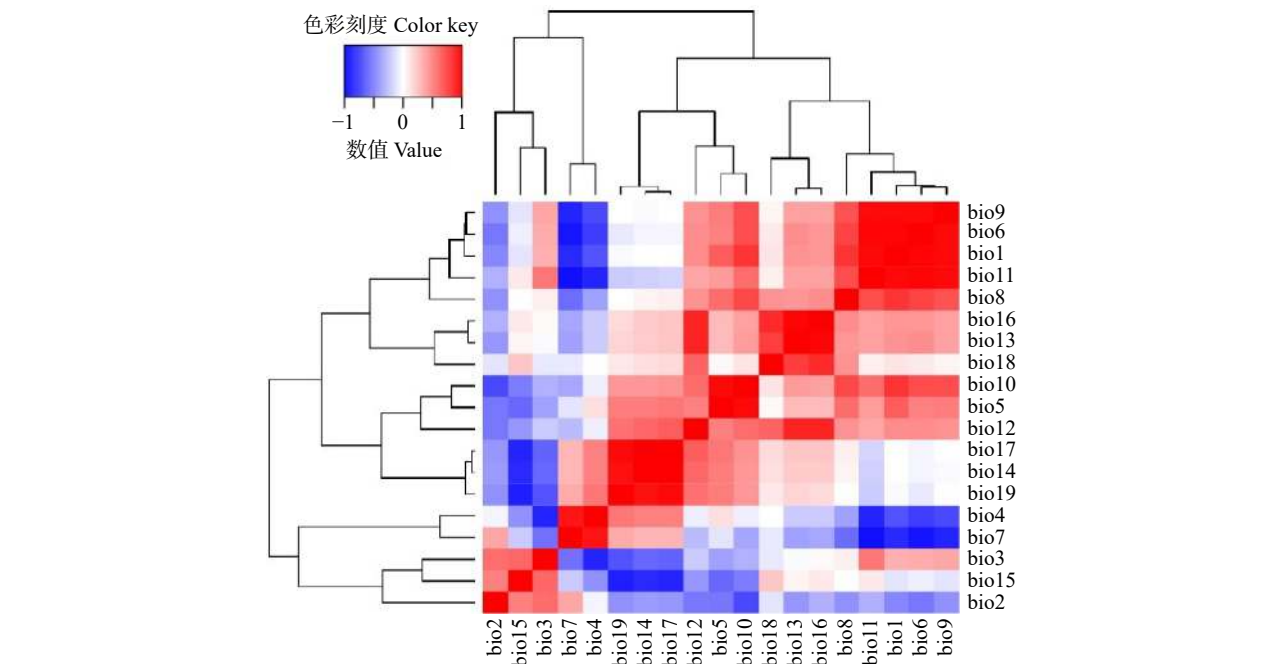
2.3 模型检验

在对 MaxEnt 输出结果进行评估检验中,可以看出,测试样本的遗漏率与预测遗漏率基本吻合,模型构建的效果良好(图 2A)。ROC 曲线显示模型 AUC 值为 0.898,标准差为 0.022,说明模型预测的适生区结果达到“较好”的标准(图 2B)。根据以上结果,本次模型的预测结果是准确可靠的。输出的刀切图可得到各个气候因子对桉树枝瘿姬小蜂分布的贡献值(图 3)。绿色的条带越短,说明该变量具有较多的其他变量不具有的信息,对物种分布的影响较大。结果表明最冷季平均温度(bio11)是影响桉树枝瘿姬小蜂分布最主要的气候因子,其次是年温差(bio7)(图 4)。

表 1 MaxEnt 参数设置值

Tab. 1 Parameter setting values of MaxEnt

选项 Option	参数 Parameter	
	默认值 Default value	设置值 Setting value
随机选取测试集比例 Randomly selected test set percentage	0	25
正则化乘数 Regularization multiplier	1	2
重复迭代次数 Number of iterations repeated	1	10
最大重复次数 Maximum number of repetitions	500	5 000
应用阈值规则 Applying threshold rules	无 None	10%训练值验证 10% training value verification



bio1. 年平均温度; bio2. 温差月均值; bio3. 等温性; bio4. 温度季节变化; bio5. 最热月最高温; bio6. 最冷月最低温; bio7. 年温差; bio8. 最湿季平均温度; bio9. 最干季平均温度; bio10. 最热季平均温度; bio11. 最冷季平均温度; bio12. 年降水量; bio13. 最湿月降水量; bio14. 最干月降水量; bio15. 降水量季节性变动系数; bio16. 最湿季降水量; bio17. 最干季降水量; bio18. 最热季降水量; bio19. 最冷季降水量。下同。 bio1, annual mean temperature; bio2, mean diurnal range; bio3, isothermality; bio4, temperature seasonality; bio5, maximum temperature of the warmest month; bio6, minimum temperature of coldest month; bio7, temperature annual range; bio8, mean temperature of the wettest quarter; bio9, mean temperature of the driest quarter; bio10, mean temperature of the warmest quarter; bio11, mean temperature of the coldest quarter; bio12, annual precipitation; bio13, precipitation of wettest month; bio14, precipitation of the driest month; bio15, precipitation seasonality (coefficient of variation); bio16, precipitation of the wettest quarter; bio17, precipitation of the driest quarter; bio18, precipitation of the warmest quarter; bio19, precipitation of the coldest quarter. The same below.

图 1 气候因子相关性分析和聚类分析
Fig. 1 Correlation analysis and cluster analysis of climatic variables

表 2 筛选的 12 个气候因子及其贡献率

Tab. 2 Screening 12 climatic variables and their contribution rates

序号 No.	数据简称 Data abbreviation	气候因子 Climatic factor	贡献率 Contribution rate/%
1	bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	38.9
2	bio4	温度季节变化 Temperature seasonality	5.4
3	bio10	最热季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	3.9
4	bio12	年降水量 Annual precipitation	0.8
5	bio3	等温性 Isothermality	2.5
6	bio2	温差月均值 Monthly mean temperature difference	13.4
7	bio15	降水量季节性变动系数 Precipitation seasonality (coefficient of variation)	9.8
8	bio8	最湿季平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	1.0
9	bio7	年温差 Temperature annual range	4.1
10	bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	4.8
11	bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	11.7
12	bio18	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter	3.7

2.4 当前气候下桉树枝瘿姬小蜂适生区范围

利用 MaxEnt 预测得到当前气候下桉树枝瘿姬小蜂适生区范围(图 5), 高度适生区面积为 141.12 万 km², 占我国内陆国土的 14.7%, 分布范围包括海南、广西、广东三省全范围, 福建、江西、湖南、四川、

重庆、浙江、台湾、湖北、贵州大部分地区, 云南、安徽、江苏、上海少部分地区有零星分布。

中度适生区面积为 82.56 万 km², 占我国内陆国土的 8.6%, 分布范围包括云南、浙江、上海、安徽、江苏、河南、湖北大部分地区, 台湾、贵州、湖南、江西、

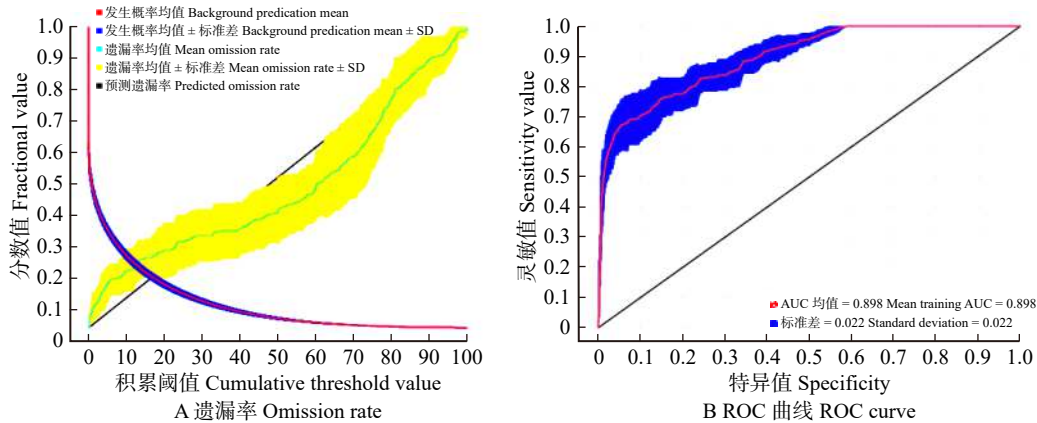


图2 模型预测检验

Fig. 2 Validation charts of model predicting

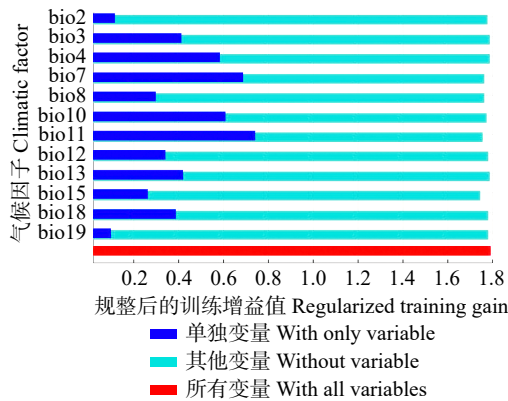


图3 筛选后的气候因子对 MaxEnt 模型的贡献值

Fig. 3 Contribution values of selected climate factors to MaxEnt model

重庆、四川、西藏、甘肃、陕西、山东少部分地区。

低度适生区面积为 77.76 万 km^2 ，占我国内陆国土的 8.1%，分布范围包括山东、河南、陕西、福建大部分地区，辽宁、陕西、河北、天津、甘肃、宁夏、西藏、四川、云南少部分地区，重庆、湖北、北京、台湾有零星分布。

2.5 未来气候下桉树枝瘿姬小蜂适生区范围

在未来气候条件下，全国适生区范围较现在气

候条件下总体有所上升(图 6)。高度适生区面积为 171.84 万 km^2 ，占我国内陆国土的 17.9%，中度适生区面积为 79.68 万 km^2 ，占我国内陆国土 8.3%，低度适生区面积为 83.52 万 km^2 ，占我国内陆国土的 8.7%。与现在气候条件下的适生区范围相比，高度适生区和低度适生区范围分别增加了 30.72 万 km^2 和 5.76 万 km^2 ，中度适生区范围减少了 2.88 万 km^2 (图 7)。

2.6 寄主分布区内适生区的变化

对于入侵昆虫，寄主分布也是影响其扩散和生存的主要因素之一。结合目前国内寄主植物桉树分布的文献^[24-25]，将现在与未来气候下桉树枝瘿姬小蜂的适生区范围与寄主分布区叠加(图 8)。从图 8 可以看出，在未来气候条件下，高度适生区的范围有所增加，主要是在云南省内有较明显的变化。云南省部分地区的中度适生区在未来气候条件下变化成高度适生区。

3 讨 论

相比以往 MaxEnt 模型预测的方式，本研究利用主成分分析和模型参数进行筛选优化，并使用 MaxEnt 模型最新优化的互补双对数输出方式对桉树枝瘿姬

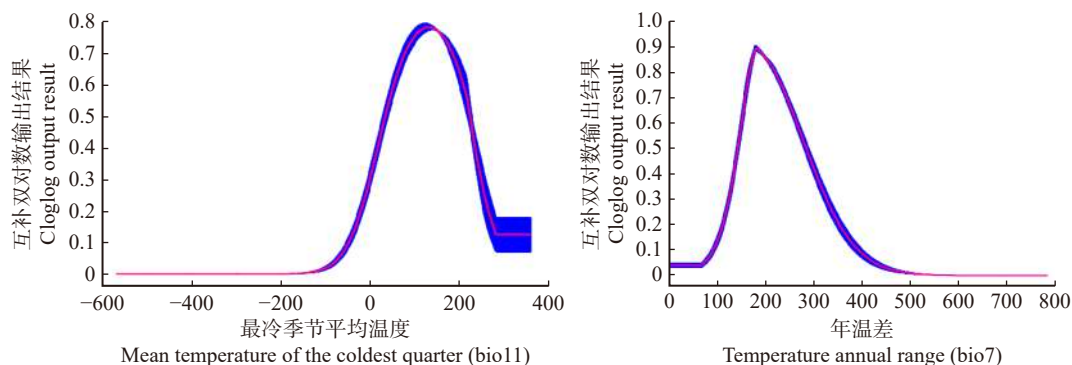


图4 主导气候因子响应曲线

Fig. 4 Response curves of dominant climatic factors

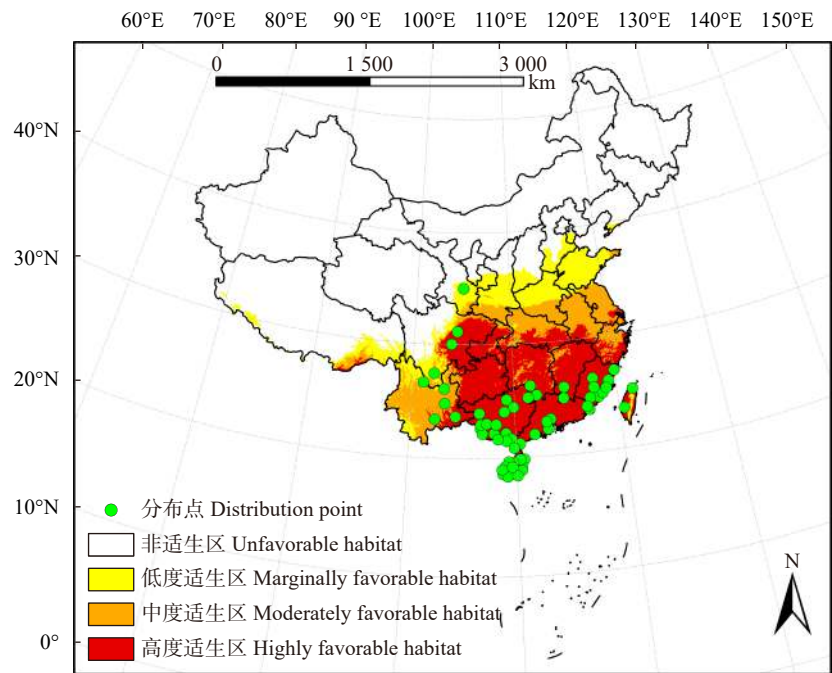


图 5 桉树枝瘿姬小蜂在现在气候条件下的全国预测分布图

Fig. 5 Predicted potential distribution of *Leptocybe invasa* in China under current climate conditions

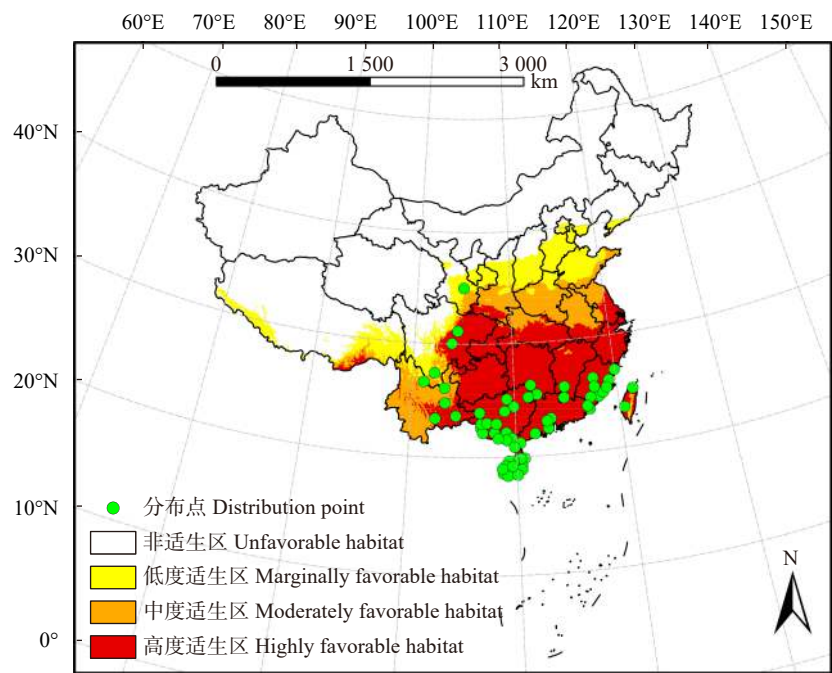


图 6 桉树枝瘿姬小蜂在未来气候条件下的全国预测分布图

Fig. 6 Predicted potential distribution of *L. invasa* in China under future climate conditions

小蜂在中国的适生区进行预测。模拟结果的测试遗漏率与理论遗漏率基本吻合。通过优化后的模拟结果使得模型预测的精准度得到了提高,说明该优化方法可在今后的模型预测中继续使用。

MaxEnt 选用与温度、降水量有关的环境变量对物种的适生范围进行预测,但对于入侵物种来说,分布地除了受到气候条件的影响,还会受到天敌种类与分布、寄主分布、地形、自身生物学特性等因素的

影响。虽然本文未结合所有因素进行综合分析,但本文 MaxEnt 的预测结果覆盖了目前桉树枝瘿姬小蜂已知的分布地,且与寄主分布区进行叠加,叠加后的区域大部分都是桉树枝瘿姬小蜂的高度适生区。近几年全球气候变暖现象加剧,使很多物种的适生环境发生变化,可以看出气候变化对物种的适生环境具有很大的影响作用。不同的模型所预测的结果也会出现一定的偏差,参数的选择和调整都会影响

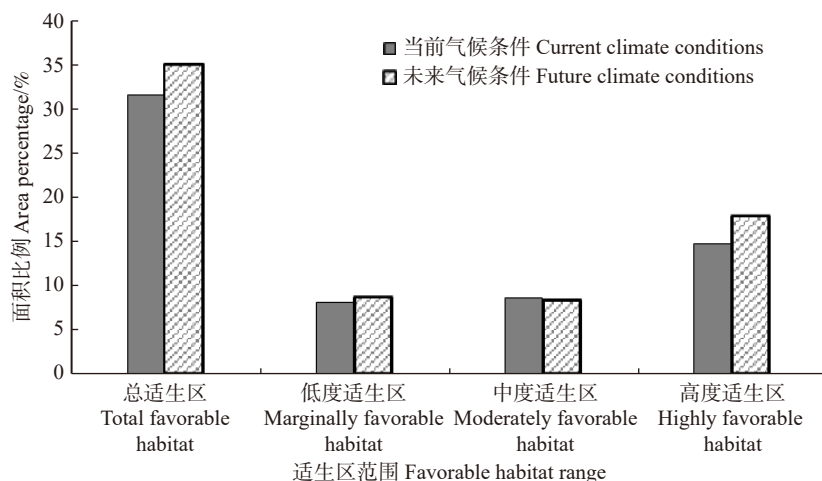


图 7 桉树枝瘿姬小蜂在当前和未来气候条件下不同适生范围占全国面积的比例

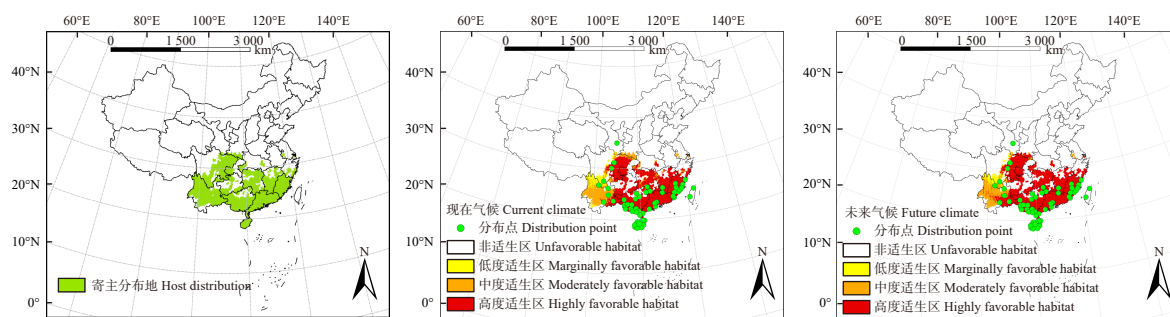
Fig. 7 Area proportion of different ranges for *L. invasa* under current and future climate conditions

图 8 寄主分布区与预测分布区叠加后的分布图

Fig. 8 Superposition diagram of host distribution area and predicted distribution area

整个预测结果。本研究在未来气候条件下,桉树枝瘿姬小蜂适生区预测结果与 CLIMEX 软件预测结果^[26]相似,都呈现高度与低度适生区的增加以及中度适生区的减少。证明本研究成果具有一定的参考性。

BCC-CSM1-1 气候模式是以我国的气候数据研发的耦合模式^[27]。该气候模式模拟的气候变化会更接近中国实际的气候变化。因此,在未来气候条件下,本研究选用 BCC-CSM1-1 气候模式预测桉树枝瘿姬小蜂在中国的适生区范围以减小预测结果的偏差。MaxEnt 预测结果显示最冷季平均温度对桉树枝瘿姬小蜂有较大的影响。BCC-CSM1-1 气候模式显示在 2011 年后我国年平均气温增暖速度加快^[28],北方地区气温逐年升高,冬季平均气温在未来气候条件下开始能满足桉树枝瘿姬小蜂完成一个世代发育生长所需的最低温度,使桉树枝瘿姬小蜂能进一步向北方的扩张。

参 考 文 献

[1] Mendel Z, Protasov A, Fisher N, et al. Taxonomy and biology of *Leptocybe invasa* gen. & sp. n. (Hymenoptera: Eulophidae), an invasive gall inducer on *Eucalyptus*[J]. Australian Journal of

Entomology, 2004, 43: 51–63.

- [2] Udagedara S K, Karumaratne I P. Biology, damage and parasitoids of the Eucalyptus gall wasp, *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae), infesting *Eucalyptus camaldulensis* (Myrtaceae) in Maragamuwa plantation, Sri Lanka[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2014, 34(3): 179–189.
- [3] Vanegas-Rico J M, Lomeli-Flores J R, Guez-Leyva E R, et al. First record of eucalyptus gall wasp *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) in Mexico[J]. Revista Mexicana de Biodiversidad, 2015, 86: 1095–1098.
- [4] 谢耀坚. 我国桉树种质资源现状及育种目标探讨[J]. 桉树科技, 2012, 29(2): 33–39.
- Xie Y J. Study on *Eucalyptus* selection objectives and current situation of genetic resources in China[J]. Eucalypt Science & Technology, 2012, 29(2): 33–39.
- [5] 郑嘉琪, 陈少雄. 我国桉树用途概述[J]. 桉树科技, 2017, 34(3): 42–46.
- Zheng J Q, Chen S X. A discussion on utilization of eucalyptus in China[J]. Eucalypt Science & Technology, 2017, 34(3): 42–46.
- [6] 朱方丽, 邱宝利, 任顺祥. 桉树枝瘿姬小蜂连续世代种群生命表[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 97–102.
- Zhu F L, Qiu B L, Ren S X. The continuous life-table of *Leptocybe invasa*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 97–102.

- 97–102.
- [7] 魏初奖, 张华峰, 陈德兰, 等. 福建省桉树枝瘿姬小蜂发生现状与防控对策[J]. *中国森林病虫*, 2017, 36(4): 44–46.
- Wei C J, Zhang H F, Chen D L, et al. Hazard situation and control measures of *Leptocybe invasa* in Fujian Province[J]. *Forest Pest and Disease*, 2017, 36(4): 44–46.
- [8] 韦建林, 何震, 梁一萍, 等. 桉树枝瘿姬小蜂危害林巨园桉 DH201-2 近自然生长研究[J]. *农业研究与应用*, 2013(5): 1–4.
- Wei J L, He Z, Liang Y P, et al. Studies on the damage of *Leptocybe invasa* to near-natural growth of (*Eucalyptus grandis* × *E. tereticornis*) DH201-2[J]. *Agricultural Research and Application*, 2013(5): 1–4.
- [9] 武海卫, 贾薪玉, 黄焕华, 等. 五种桉树对桉树枝瘿姬小蜂的抗性研究[J]. *环境昆虫学报*, 2009, 31(2): 132–136.
- Wu H W, Jia X Y, Huang H H, et al. Studies on the resistance of five *Eucalyptus* species to *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2009, 31(2): 132–136.
- [10] 张开存, 李晓艳, 朱琼, 等. 云南东川桉树枝瘿姬小蜂危害调查[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(8): 163–166.
- Zhang K C, Li X Y, Zhu Q, et al. Damage Investigation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle in Dongchuan District in Yunnan Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(8): 163–166.
- [11] 常润磊, 周旭东. 我国桉树枝瘿姬小蜂研究现状[J]. *桉树科技*, 2010, 27(1): 75–78.
- Chang R L, Zhou X D. Research status of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle in China[J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2010, 27(1): 75–78.
- [12] Pachauri R K, Meyer L A. Climate change, fifth assessment synthesis report [R/OL]. Geneva: IPCC, 2014 [2019–02–13]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [13] Chejara V, Kriticos D, Kristiansen P, et al. The current and future potential geographical distribution of *Hyparrhenia hirta*[J]. *Weed Research*, 2010, 50(2): 174–184.
- [14] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008, 31: 161–170.
- [15] Phillips S J, Robert P A, Dudík M, et al. Opening the black box: an open-source release of MaxEnt[J]. *Ecography*, 2017, 40: 887–893.
- [16] Guevara L, Gerstner B E, Kass J M, et al. Toward ecologically realistic predictions of species distributions: a cross-time example From tropical montane cloud forests[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1511–1522.
- [17] Riahi K, Rao S, Krey V, et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions[J]. *Climatic Change*, 2011, 109: 33–57.
- [18] Tebaldi C, Wehner M F. Benefits of mitigation for future heat extremes under RCP4.5 compared to RCP8.5[J]. *Climatic Change*, 2018, 146: 349–361.
- [19] Zhao Z C, Luo Y, Wang S W, et al. Science issues on global warming[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(1): 1–5.
- [20] Bao J, Feng J, Wang Y. Dynamical downscaling simulation and future projection of precipitation over China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(16): 8227–8243.
- [21] Sa E, Martins H, Ferreira J, et al. Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 131: 209–224.
- [22] 朱耿平, 刘强, 高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布[J]. *生物多样性*, 2014, 22(2): 223–230.
- Zhu G P, Liu Q, Gao Y B. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species[J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(2): 223–230.
- [23] Zhong Q, Zhang J E, Ditommaso A, et al. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with MaxEnt and GARP models[J]. *Journal of Plant Research*, 2015, 128: 763–775.
- [24] 李志辉, 杨民胜, 陈少雄, 等. 桉树引种栽培区划研究[J]. *中南林业学院学报*, 2000, 20(3): 1–10.
- Li Z H, Yang M S, Chen S X, et al. Study on regionalization for *Eucalyptus* introduction cultural area in China[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2000, 20(3): 1–10.
- [25] 邓利和, 王丕振. 海南省桉树种质资源分布调查及分析[J]. *热带林业*, 2018, 46(2): 47–51.
- Deng L H, Wang P Z. Investigation and analysis on distribution of germplasm resources of *Eucalyptus sinensis* in Hainan Province[J]. *Tropical Forestry*, 2018, 46(2): 47–51.
- [26] Huang M Y, Ge X Z, Shi H L, et al. Prediction of current and future potential distributions of the *Eucalyptus* pest *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) in China using the CLIMEX model[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(11): 2958–2968.
- [27] 翟薇, 李肖霞. BCC_CSM1.1 全球-模式中极端气温变化的归因分析[J]. *气象与环境科学*, 2014, 37(4): 25–32.
- Zhai W, Li X X. Attribution analysis of the extreme temperature change in BCC_CSM1.1 global pattern[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2014, 37(4): 25–32.
- [28] 周鑫, 李清泉, 孙秀博, 等. BCC_CSM1.1 模式对我国气温的模拟和预估[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 95–106.
- Zhou X, Li Q Q, Sun X B, et al. Simulation and projection of temperature in China with BCC_CSM1.1 model[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(1): 95–106.

(责任编辑 范娟
责任编委 张真)