基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的美丽异木棉适生区与主导环境因子分析*

黄君玥[1,2] 朱报著[2] 张卫华[2] 徐 放[2] 李永泉[1]
（1. 仲恺农业工程学院，广东 广州 510225；2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院，广东 广州 510520）

摘要 美丽异木棉 *Ceiba speciosa* 为园林观赏植物，具有重要的美学价值，通过探究其适生区分布可为科学引种栽培和资源有效利用提供依据，因此研究基于 854 个美丽异木棉的自然分布点数据和 26 个环境因子数据，选择最大熵模型（MaxEnt）和地理信息系统软件（ArcGIS）对美丽异木棉在中国的适生区分布进行预测，并探讨影响其分布的主导环境因子。结果表明：MaxEnt 模型的 AUC 训练集和测试集平均值均为 0.9 以上，表明模型的模拟结果具有较高的准确性。美丽异木棉适生区范围主要集中于我国广东省、广西壮族自治区、海南省、福建省南部和云南省南部、四川盆地南部、台湾沿海等地区，总面积为 60.2 km^2。由模型结果可知，影响美丽异木棉适生区分布的主导环境因子为最冷月最低温和年平均降水量，最冷月平均气温 5 ℃以上、年平均降水量 1 500~2 500 mm 的地区最适合美丽异木棉的生长。

关键词 美丽异木棉；适生区；环境变量；MaxEnt 模型
中图分类号：S792 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-2053（2024）01-0001-08

Analysis of Suitable Distribution Areas and Dominant Environmental Factors of *Ceiba speciosa* Based on MaxEnt Model and ArcGIS

HUANG Junyue[1,2] ZHU Baozhu[2] ZHANG Weihua[2]
XU Fang[2] LI Yongquan[1]
（1. Zhongkai University of Agriculture and Engineering，Guangzhou，Guangdong 510225，China；
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture，Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry，Guangzhou，Guangdong 510520，China）

Abstract *Ceiba speciosa* is a garden ornamental plant with important aesthetic value. By exploring its distribution of suitable habitats，we hope to provide a basis for scientific introduction and cultivation and effective use of resources. Therefore，this study is based on 854 natural distribution locations of *C. speciosa* and 26 environmental factors，we performed analysis by MaxEnt model and ArcGIS software to speculate the suitable area of *C. speciosa* in China and investigated the dominant environmental factors affecting the natural distribution. The results indicated that based on the MaxEnt model the average AUC values of the training and test set are both greater than 0.9，which indicates that the simulation results were accurate and the model was reliable. The range of suitable areas is mainly concentrated in Guangdong Province，Guangxi Zhuang Autonomous Region，Hainan

* **基金项目**：广东省林业科技创新专项（2011KJCX004，2014KJCX005-01）。
第一作者：黄君玥（1999—），女，在读硕士，研究方向为风景园林，E-mail：huangjunyue2023@163.com。
通信作者：徐放（1987—），男，副研究员，主要从事林木遗传育种研究，E-mail：xufang@sinogaf.cn。

Province, southern Fujian Province and southern Yunnan Province, southern Sichuan Basin, and coastal areas of Taiwan, with a total area of over 60.2 km^2. The dominant environmental factors affecting the natural distribution are the minimum temperature of the coldest month and the average annual precipitation. The coldest month's average temperature above 5 ℃ and the annual average areas with a rainfall of 1 500-2 500 mm are most suitable for the growth of *C. speciosa*. The study could provide a reference for the conservation, utilization, introduction, and artificial cultivation of *C. speciosa*.

Key words *Ceiba speciosa*; suitable distribution areas; environment variable; MaxEnt model

在全球气候变化背景下，研究物种适生区分布对实现物种的引种和栽培具有重要意义，也为物种的起源进化提供地理分布依据[1]，常用研究方法有实验室研究、野外调研、模型模拟环境等，研究模型有随机森林模型、广义线性模型、生态位模型等[2-3]。本研究选择生态位模型（MaxEnt），模型算法建立在最大熵原理上，而最大熵原理（maximum entropy principle，MaxEnt）于 1957 年由詹涅斯（Jaynes）提出，是一种能从已知信息对未知信息进行无偏推理的方法[4]。MaxEnt 模型根据所选物种的实际分布数据，模拟该物种在自然条件下所需的基础生态位，对该物种在研究范围内的适宜分布区进行预测[5-6]，即使该物种的实际分布数据较少，MaxEnt 模型也能对其进行预测[7-8]，具有精确性高、稳定性强等优点[9-11]。目前已在病虫害监测[12]、动植物保护[13-14]、植物引种栽培[15]、自然灾害防治[16-17]等领域取得较好的成效。

据中国植物志分类，美丽异木棉 *Ceiba speciosa* 为锦葵科 Malvaceae 吉贝属的落叶乔木，其树形直立高大，可用于造纸；树皮光滑坚韧，可用来生产绳索；果实具有丝状棉毛，可制成棉被；种子亦可榨油，具有较高的实用性和经济价值[18]。美丽异木棉原产南美洲，花期长达数月，具有较高的园林价值，在园林应用上常作行道树、庭院树，因此广东、广西、福建、海南等亚热带和热带地区开始广泛引种栽培[19]。目前，对于美丽异木棉研究大多集中于花色变化规律[20]、种苗培育[21]、高效栽培[22]、光合特性[23]、种质资源[24]等方面。

美丽异木棉在上述所在地区广泛引种栽培，然而对其栽培区划深入研究尚鲜见报道，以及是否有新的适生区可以推广美丽异木棉种植也鲜有相关研究。因此本研究拟通过美丽异木棉已有的分布点和环境因子数据，利用 MaxEnt 模型，推测其在全国范围内的适生区分布，结合推测结果分析影响美丽异木棉资源分布的主要环境因子，为美丽异木棉科学引种、人工栽植与培育以及树种的有效利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 美丽异木棉分布数据与处理

美丽异木棉的分布信息通过查阅资料获得，包括国内外公开发表的文献、全球生物多样性信息网络数据库（global biodiversity information facility，GBIF）（https://www.gbif.org/）、中国数字植物标本馆（http://www.cvh.ac.cn）以及中国植物志的图库照片分布图（http://www.iplant.cn/info/Ceiba%20speciosa?t=pm），为减少实验结果的过度拟合，采用方虎强等[25]的方法对分布点数据进行筛选，去除重叠度较高的分布点，最终共获得在中国范围内的 854 个美丽异木棉有效分布点，然后将筛选后的分布点数据按照物种名、分布点经纬度制作成 csv. 格式的文件[26]。

1.2 环境因子数据

环境变量是影响物种分布的关键因素之一[27]，利用环境因子能推测物种的适生区分布范围，研究采用的环境因子数据选自数据库 WorldClim（www.worldclim.org）中 1970—2000 年空间分辨率为 2.5 arc-minutes 的 19 个气候因子[28]，还另外选取了光照强度、风速、水汽压与海拔数据，共计 26 个环境因子（表 1）。为科学预测美丽异木棉的适生区域，选取的环境因子不宜过多，确保其具有拟合的准确性。先将筛选后的 854 个分布点数据和 19 个环境因子及海拔（测试集设置为 25%，训练集设置为 75%）在软件 MaxEnt 3.4.1 下进行

运算，通过刀切法（Jackknife）检验选取的 19 个环境因子及海拔的贡献率，再对各环境因子进行相关性分析[26]，绘制出相关系数矩阵图，筛选并选取相关系数大于 0.8 的环境因子数据，用软件对各环境因子的贡献率进行计算，筛掉贡献率较低的环境因子[29]，最终选取最冷月份最低温（bio06）、年平均降水量（bio12）、最干月份降水量（bio14）、最暖季度平均降水量（bio18）、年温度变化范围（bio05-bio06）（bio07）、年平均温度（bio01）、昼夜温差月均值（bio02）、海拔（ele）、最热月太阳辐射（srad07）、最冷月太阳辐射（srad01）共计 10 个环境因子预测美丽异木棉的适生区，统一环境因子的地理坐标系为 D_ WGS_ 1984。

1.3 最大熵模型（MaxEnt）模拟

模型预测精度的指标通过 MaxEnt 3.4.1 软件计算出受试者工作特征（Receiver operating characteristic curve，ROC）[5] 下面积 AUC 值来评价，取值范围为 0~1，徐军等[30] 认为 AUC 值愈接近 1，模型预测结果愈精确。分布点数据分为 25%测试集和 75%训练集[25]，将数据集重复 10 次运算，以提高运算结果的准确度，设置随机测试为 25%，其余运算使用默认数值，得到的 ASC 格式文件导入 ArcGIS 10.8 软件计算出适生概率[25]。适生等级能便于观测物种的适生区分布及面积，美丽异木棉的适生等级通过 ArcGIS 10.8 的 Spatial Analysis Tools 的 Reclassif 功能来划分[31]，再结合模型预测结果中的美丽异木棉适生概率（P）[25]，将预测结果分成不适生区（$P \leqslant 0.1$）、低适生区（$0.1 < P \leqslant 0.3$）、边缘适生区（$0.3 < P \leqslant 0.5$）、适生区（$0.5 < P \leqslant 0.7$）、高适生区（$0.7 < P \leqslant 1$）5 个适生等级来划分[32]。

2 结果与分析

2.1 最大熵模型（MaxEnt）精确度评估

运用 ROC 曲线[33] 和 AUC 值[34] 对预测结果进行检验，模型训练集 AUC 值为 0.944，测试集的 AUC 值为 0.941，两个数据集明显大于随机预测模型的 AUC 值（0.500），王运生等[5] 认为，AUC 值分为 0.5~0.7、0.7~0.9 和>0.9 共 3 个范围，其精确值分别为较低、中等和较高，即美丽异木棉分布点通过 MaxEnt 模型预测出的结果具有较高精确度。将 10 次模拟中 AUC 值最大的一组作为分析对象，结果表明第 9 次模拟的 AUC 值最大，对应训练集的 AUC 值为 0.943，测试集的值为 0.953（表 2），表明 MaxEnt 模型对美丽异木棉在我国适生区的预测结果极佳。

表 1 选取的 19 个环境因子

Table 1 19 environmental factors selected

环境因子 Environment factors	单位 Unit	环境因子 Environment factors	单位 Unit
年平均温度（bio01）	℃	最干月份降水量（bio14）	mm
昼夜温差月均值（bio02）	℃	雨量变化方差（bio15）	/
昼夜温差与年温差比值（bio02/bio07×100）（bio03）	/	最湿季度降水量（bio16）	mm
温度变化方差（bio04）	/	最干季度降水量（bio17）	mm
最热月份最高温（bio05）	℃	最暖季度平均降水量（bio18）	mm
最冷月份最低温（bio06）	℃	最冷季度平均降水量（bio19）	mm
年温度变化范围（bio05-bio06）（bio07）	℃	海拔（ele）	m
最湿季度平均温度（bio08）	℃	最冷月太阳辐射（srad01）	$kJ \cdot m^{-2} \cdot (day^{-1})$
最干季度平均温度（bio09）	℃	最热月太阳辐射（srad07）	$kJ \cdot m^{-2} \cdot (day^{-1})$
最暖季度平均温度（bio10）	℃	最冷月水汽压（varp01）	kPa
最冷季度平均温度（bio11）	℃	最热月水汽压（varp07）	kPa
年平均降水量（bio12）	mm	最冷月平均风速（wind01）	$m \cdot s^{-1}$
最湿月份降水量（bio13）	mm	最热月平均风速（wind07）	$m \cdot s^{-1}$

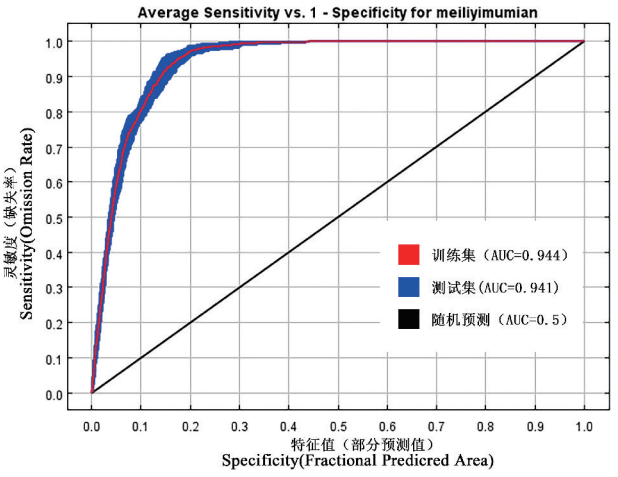


图 1 研究中采用的 ROC 曲线

Figure 1 ROC curves used in the study

表 2 MaxEnt 模型 10 次模拟获得 AUC 值

Table 2 MaxEnt model 10 simulations to obtain AUC values

次数 No.	训练数据 Training data	测试数据 Test data
1	0.944 6	0.935 9
2	0.944 3	0.935 1
3	0.943 8	0.940 4
4	0.943 6	0.942 8
5	0.944 2	0.936 6
6	0.944 3	0.934 2
7	0.943 0	0.951 6
8	0.943 7	0.945 7
9	0.943 1	0.952 5
10	0.944 6	0.933 7
均值	0.943 9	0.940 8

2.2 适生区预测

研究结果表明，我国美丽异木棉的高适生区和适生区主要分布在广东省、广西壮族自治区、海南省、福建省南部和云南南部、四川盆地南部、台湾沿海地区，浙江沿海地区也有适生区零星分布（图 2）。适生区、边缘适生区和低适生区依次围绕高适生区分布。利用 ArcGIS 10.8 软件的像元个数×像元面积方法计算出中国境内美丽异木棉 5 个适生等级的面积，分别为高适生区面积约为 16.50 km^2、适生区面积为 43.70 km^2、边缘适生区面积约 33.24 km^2、低适生区面积约 85.47 km^2，分布范围主要在我国华南地区中部，不适生区面积约 782.87 km^2，分布范围在长江中下游平原以北（我国境内北纬 30°以北），分布区域符合美丽异木棉喜光、喜温暖湿润，不耐寒的生理特性。由图 2 可知，美丽异木棉的高适生区、适生区和边缘适生区的范围与数据库中的自然分布区具有高度重叠，预测的我国适生分布区与实际记录范围基本一致，由此说明模型的运算结果具有稳定性。

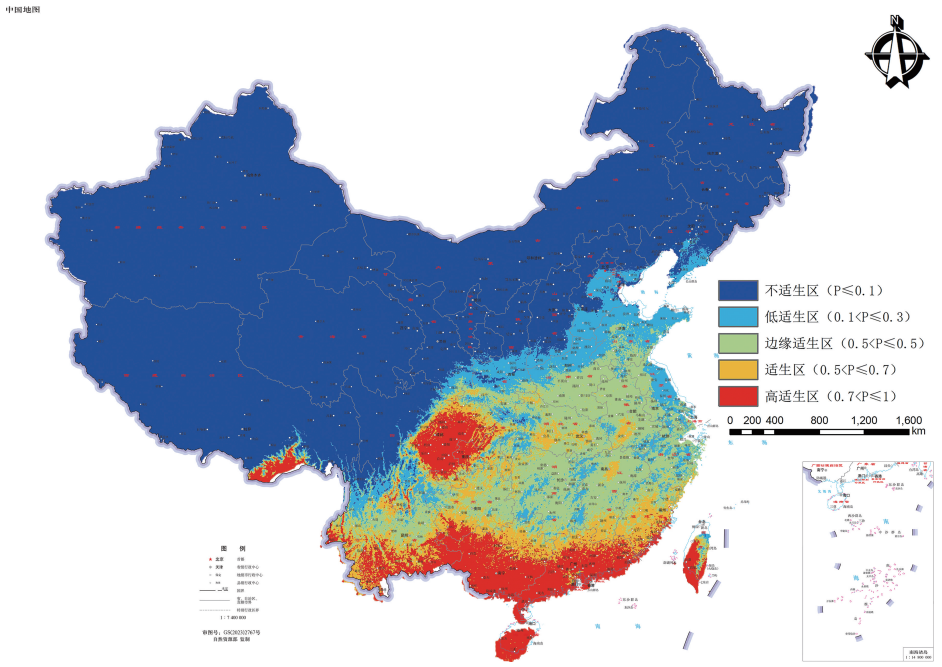
2.3 各环境因子对最大熵模型（MaxEnt）的贡献率

根据刀切法（Jackknife）分析得到的结果，计算涉及模型建立的环境因子对 MaxEnt 模型的贡献率，可以判断影响物种分布的主要环境变量，结果表明最冷月份最低温（bio06）和年平均降水量（bio12）为影响美丽异木棉分布的主要环境因子，其贡献率分别为 52.3% 和 24.1%。由于美丽异木棉耐寒性较差，生长旺季为 3 月至 9 月[35]，在此期间需要充足的水分，因此两个环境变量对美丽异木棉的生长栽培具有较大程度的影响。其次是最干月份降水量（bio14）的贡献率为 6.5%，对美丽异木棉的分布也可能造成影响，其他环境变量对分布的贡献率均在 6.5% 以下（表 3）。

表 3 筛选后的环境因子贡献率

Table 3 Contribution of environmental factors after screening

环境因子 Environment factors	贡献率/% Contribution rate
最冷月份最低温（bio06）	52.3
年平均降水量（bio12）	24.1
最干月份降水量（bio14）	6.5
最暖季度平均降水量（bio18）	6.3
年温度变化范围（bio05-bio06）（bio07）	5.7
年平均温度（bio01）	3.7
昼夜温差月均值（bio02）	0.7
海拔（ele）	0.6
最热月太阳辐射（srad07）	0.1
最冷月太阳辐射（srad01）	0



注：*P* 为适生概率。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2023）2767 号的标准地图制作，底图无修改。

Note：*P* is the probability of adaptation. The map is produced based on the standard map with review number GS（2023）2767 downloaded from the website of Standard Map Service of the State Administration of Surveying，Mapping and Geoinformation，with no modification of the base map.

图 2　我国美丽异木棉适生区分布

Figure 2　Distribution of *Ceiba speciosa* habitats in China

2.4　美丽异木棉的主导环境变量分析

MaxEnt 模型的环境响应曲线能对环境变量进行量化，以及通过物种适生区分布获得该物种的生长环境阈值[25]。本研究选取最冷月份最低温（bio06）和年平均降水量（bio12）2 个环境变量进行分析。由图 3 可知，美丽异木棉在最冷月最低温的 5～15 ℃范围内具有较高的分布概率（>0.5），当最冷月最低温的平均气温达到 10 ℃时分布概率位于最高峰（0.81），而在最冷月最低温的气温处于 13 ℃时，分布概率呈明显下降趋势，分布概率在平均气温大于 25 ℃时逐渐趋于 0 ℃（图 3a）。年平均降水大于 450 mm 时，分布概率显著提高，年平均降水量的分布概率在 1 000～1 500 mm 范围内达到最大，当分布概率呈明显下降趋势时年平均降水量大于 1 800 mm（图 3b），因此美丽异木棉在繁育过程中要注意控制水分和温度这两个条件，当处于夏季时需给予充足的水分，当处于冬季低温地区时，需要对其采取适当的防护措施，保证其安全越冬，使其得到更好的培育效果[36]。

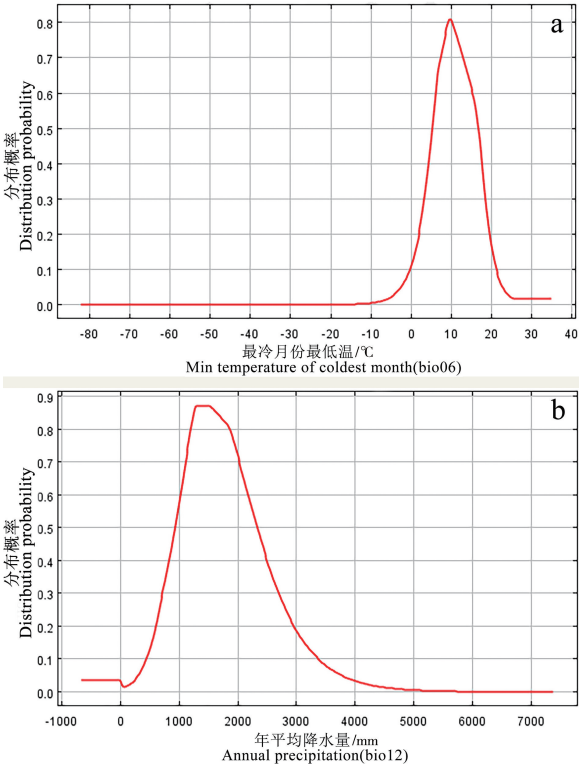
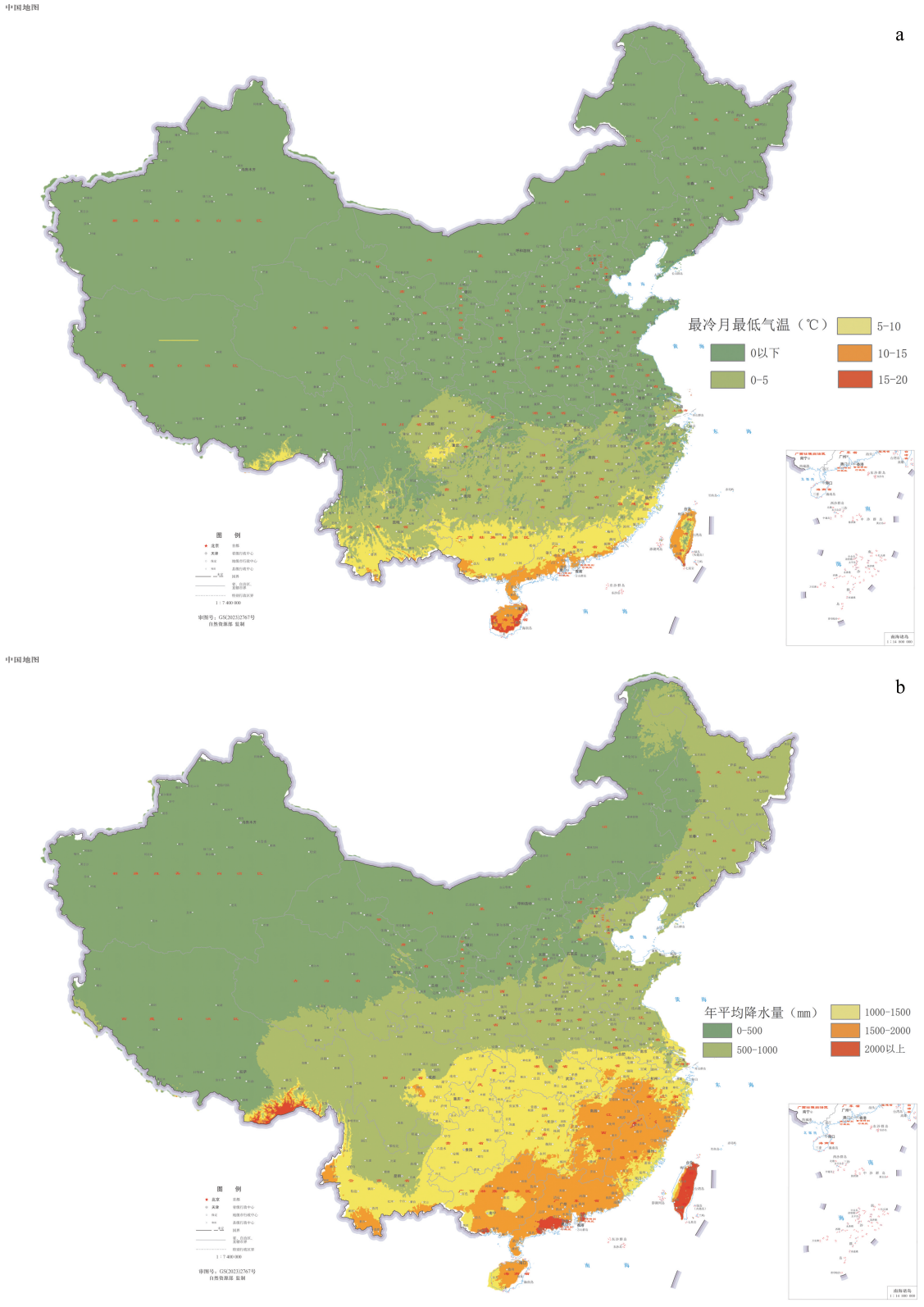


图 3　美丽异木棉与主导环境因子响应曲线

Figure 3　Response curve of *Ceiba speciosa* to dominant environmental factors



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2023）2767 号的标准地图制作，底图无修改。

Note：The map is produced based on the standard map with review number GS（2023）2767 downloaded from the website of Standard Map Service of the State Administration of Surveying，Mapping and Geoinformation，with no modification of the base map.

图 4 美丽异木棉两个主导环境因子空间分布

Figure 4 *Ceiba speciosa* spatial distribution of the two dominant environmental factors

3 结论与讨论

3.1 本研究利用 MaxEnt 模型预测美丽异木棉在中国的适生区分布，其 AUC 值接近于 1，表明 MaxEnt 模型具有较好的模拟效果，适生概率 $P>0.3$ 的区域与植物电子标本数据库中美丽异木棉分布区基本一致。研究结果表明，最冷月份最低温和年平均降水量是影响美丽异木棉分布的主要环境变量，贡献率共计 76.4%，最干月份降水量和最暖季度平均降水量对美丽异木棉的分布也有影响。

上述结果表明，最冷月份最低温是影响美丽异木棉分布的最大环境变量，这与美丽异木棉不耐寒的生物学特性相符，也与阎传海[37] 的结论一致，该研究发现，木本植物受温度和降水的影响很大。由图 4a 可知，美丽异木棉的适生区分界线与最冷月份最低温 5~10 ℃边界基本一致，低适生区和不适生区的分界线与最低温 0~5 ℃的边界基本重合。结合研究中变量的响应曲线在 0 ℃以上时分布概率呈明显上升趋势，推测美丽异木棉在 0 ℃以下地区可能受到低温冻害影响，和红锥 *Castanopsis hystrix*[38]、海南杜鹃 *Rhododendron hainanense*[39]、迎春樱桃 *Cerasus discoidea*[40] 等分布于热带或亚热带的物种相同，均受到最冷月最低温的影响。图 4b 显示，平均降水量影响美丽异木棉适合区和高适生区的分布范围，结合该变量的响应曲线在 500 mm 以上时分布概率呈显著上升，与美丽异木棉喜湿的特性相吻合，因此需要充沛的降水维持其生理状态。综上表明，最适宜美丽异木棉生长的地区需要满足年平均降水量在 1 500 ~2 000 mm，最冷月份最低温在 0 ℃以上温暖湿润且降水充沛等基本条件。这一结果可为美丽异木棉人工种植区选择及标准化栽培提供理论依据。然而城市中降水量、温度、光照等环境因子可能与实际统计的数据有所差异，例如不合理的城市规划可能造成城市内涝，土壤吸收雨水效果降低，降水利用率减少。城市中的二氧化碳浓度、人造光等也会影响城市内温度、光照的变化，与自然环境下的环境因素产生差异，因此研究结果可供引种参考，而后续实际应用还需在引种栽培的实践中总结探索。

3.2 当前，相关报告预测到全球气候将持续变暖[41-43]、极端事件频发[44]。有关资料表明，中国年平均温度和降水量呈显著上升趋势，气候区域分布有“北暖南冷”的变化趋势[45-47]，美丽异木棉作为亚热带地区极具观花价值的落叶树种，其展叶期与温度显著相关，开花期对降水量和温度有较大需求[48]。在此情况下，预测未来数十年内我国北方对美丽异木棉引种成功的可能性会上升，因此可考虑在美丽异木棉适生区与不适生区边缘分界线往北部偏冷地区进行引种试验，扩展美丽异木棉的种植区域，选择的种源和家系需具有一定的耐寒性。基于上述分析结果，各地区也需考虑适地适树、因地制宜的原则，进行适当引种栽培。目前，有相关研究表明在大尺度范围下应用的生态位模型只关注气候因素对物种分布的影响而忽视了物种间相互作用及物种迁移能力[2]，因此在后续研究中，可以深入探讨物种的相互作用和迁移能力对美丽异木棉分布的影响，提升美丽异木棉引种北方的成功率。

参考文献

[1] 廖剑锋,易自力,李世成,等. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究[J]. 生态学报 . 2020,40(22):8297-8305.

[2] 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性,2013,21(1):90-98.

[3] 蔡静芸,张明明,粟海军,等. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究[J]. 经济动物学报,2014,18(1):47-52,58.

[4] 邢丁亮,郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. 生物多样性,2011,19(3):295-302.

[5] 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(4):365-372.

[6] 张颖,李君,林蔚,等. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2970-2976.

[7] 李白尼,魏武,马骏,等. 基于最大熵值法生态位模型(Maxent)的三种实蝇潜在适生性分布预测(英文)[J]. 昆虫学报,2009,52(10):1122-1131.

[8] 雷军成,徐海根 . 基于 MaxEnt 的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(2):137-141.

[9] 张春华,和菊,孙永玉,等. 基于 MaxEnt 模型的毛红椿适生区预测[J]. 林业科学研究,2018,31(3):120-126.

[10] 郭飞龙,徐刚标,卢孟柱,等. 基于 MaxEnt 模型分析胡杨潜在适宜分布区[J]. 林业科学,2020,56(5):184-192.

[11] 辜云杰,李晓清,杨汉波 . 基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的潜在适宜栽培区[J]. 西北林学院学

报,2021,36(2):136-141.
[12] 谢聿源,李晨,赵宁宁,等. 基于 MaxEnt 模型的西藏飞蝗在昌都市的适生区预测[J]. 高原农业,2023,7(3):249-258.
[13] 程向元,刘俊,崔杰,等. 基于 MaxEnt 模型预测马来鳄在中国的潜在生境[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(5):691-697.
[14] 吴生海,兰雪涵,王玉莹,等. 基于 MaxEnt 模型的兴安杜鹃在我国东北地区潜在适生区预测[J]. 北华大学学报(自然科学版),2023,24(5):585-590.
[15] 张伟皓,叶利奇,陈启华,等. 基于优化 MaxEnt 模型的黑木相思引种栽培区划[J]. 西北林学院学报,2023,38(1):88-94.
[16] 张泽方. 耦合 MaxEnt 模型的望谟县滑坡易发性对比研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2022,38(10):108-113.
[17] 刘凡,邓亚虹,慕焕东,等. 基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究[J]. 水文地质工程地质,2023,50(5):146-158.
[18] 韩姗姗. 美人树在福州市的应用及养护管理[J]. 现代园艺,2020(2):137-138.
[19] 肖珍泉,刘湘源,费盛强,等. 美丽异木棉的种子繁殖与栽培管理[J]. 广东园林,2006(5):45-46.
[20] 吴欣,黄颂谊,黄桂莲. 美丽异木棉复合体的花色变化规律研究[J]. 广东园林,2021,43(2):59-62.
[21] 郭丽荣. 美丽木棉种子快捷育苗的初步研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2004(2):137-140.
[22] 丁晓纲,刘喻娟,张晓珊,等. 不同浓度指数施肥对美丽异木棉等 3 个树种幼苗生长的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(4):619-624.
[23] 吴吉林,李永华,叶庆生. 美丽异木棉光合特性的研究[J]. 园艺学报,2005(6):1061-1064.
[24] 张永强,沈海岑,陈峥,等. 广州市异木棉属种质资源遗传评价[J]. 中国农学通报,2018,34(33):74-83.
[25] 方虎强,章鹏飞,何兵,等. 基于 MaxEnt 模型与 ArcGIS 的线叶蓟生态适宜性区划研究[J]. 中国中医药信息杂志,2023,30(7):1-4.
[26] 徐放,杨晓慧,潘文,等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对珍贵树种红锥适生区与主导环境因子分析[J]. 林业与环境科学,2022,38(5):29-37.
[27] 伊拉木江·托合塔洪,阿迪力·艾合麦提,单文娟,等. 新疆兔属三物种潜在生境分布及未来气候变化的影响[J]. 野生动物学报,2020(1):70-79.
[28] HIJMANS R J,CAMERON S E,PARRA J L,et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land area[J]. International Journal of Climatology,2005(25):1965-1978.
[29] 陈豪杰,聂艳,刘新华,等. 基于 MaxEnt 模型的胡杨潜在适生区预测研究[J]. 中国农业信息,2021,33(1):46-55.
[30] 徐军,曹博,白成科. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3354-3359.
[31] 王书越,潘少安,王明睿,等. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布[J]. 生态学报,2019,39(9):3277-3286.
[32] 张飞,陈随清,王利丽,等. 基于 Maxent 和 ArcGIS 的山茱萸生态适宜性区划研究[J]. 中国中药杂志,2017,42(16):3078-3083.
[33] PHILLIPS S J,ANDERSON R P,DUDIK M,et al. Opening the black box: an open-source release of Maxent[J]. Ecography,2017,40(7):887-893.
[34] 王红阳,马文琪,景志贤,等. 基于最大熵模型和地理信息系统的苍术生态适宜性及品质区划[J]. 世界中医药,2023,18(13):1847-1856.
[35] 林云. 美丽异木棉栽培管理[J]. 农村实用技术,2008(11):35.
[36] 欧阳晟,秦思思,陈王赋,等. 基于 Maxent 和 ARCGIS 的醉鱼草属植物适生区预测[J]. 生态科学,2021,40(3):165-173.
[37] 阎传海. 植物地理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
[38] 徐放,杨晓慧,廖焕琴,等. 红锥天然分布区气候区区划[J]. 林业与环境科学,2017,33(2):21-28.
[39] 陈怡超. 海南杜鹃保育生物学初步研究[D]. 海口:海南大学,2018.
[40] 杨宏,董京京,吴桐,等. 基于 MaxEnt 模型的迎春樱桃潜在适生区预测[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(4):131-138.
[41] 龚莹. 全球气候变暖问题与中国应对[J]. 中国商界(下半月),2010(1):306-307.
[42] ZANDALINAS S I,FRITSCHI F B,MITTLER R. Global warming, climate change, and environmental pollution:eecipe for a multifactorial stress combination disaster[J]. Trends in Plant Science,2021,26(6):588-599.
[43] WILLIAM C,CLARK,et al. Climate change 1995: the science of climate change[J]. Environment Science & Policy for Sustainable Development,1997,39(9):23-28.
[44] 毛克彪,田世英,袁紫晋,等. 乡村振兴战略视域下极端气候灾害与藏粮于民计划分析和展望[J]. 农业展望,2019,15(8):47-51.
[45] 赵东升,高璇,吴绍洪,等. 基于自然分区的 1960—2018 年中国气候变化特征[J]. 地球科学进展,2020,35(7):750-760.
[46] 沙万英,邵雪梅,黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2002(4):317-326.
[47] 张国宏,李智才,宋燕,等. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J]. 干旱区地理,2011,34(1):34-42.
[48] 陈沁,唐欣然,薛乾怀,等. 亚热带植物春季和秋季物候格局及其对气候变化的响应[J]. 广西植物,2022,42(7):1105-1115.