

基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的潜在适宜栽培区

辜云杰¹, 李晓清^{1*}, 杨汉波²

(1. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 311400; 2. 长江上游林业生态工程四川省重点实验室,
长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 华西雨屏区人工林生态系统研究长期科研基地,
四川农业大学 生态林业研究所, 四川 成都 611130)

摘 要:为探明珍贵用材树种桢楠的地理分布范围和潜在适宜栽培区范围, 基于气候、海拔、土壤条件和植被类型数据集, 结合桢楠分布样点数据, 利用最大熵模型(MaxEnt)预测桢楠的潜在适宜栽培区。结果表明, 桢楠的水平分布范围为 26°41′—31°7′N, 101°51′—110°57′E, 垂直分布海拔介于 139~1 524 m。桢楠分布区的适宜年均气温为 13℃~18℃, 适宜年降水量为 850~1 500 mm, 适宜越冬的极端最低气温为 -1℃~4℃, 适宜越夏的极端最高气温为 26℃~32℃。桢楠的潜在最适宜和较高适宜栽培区主要分布在龙门山-大巴山-武陵山-苗岭-峨眉山区域。其中, 四川省的高、中适宜栽培区面积最大, 为 137 694 km²; 依次为贵州省、重庆市、湖南省和湖北省, 面积分别为 101 972、61 658、38 382、25 456 km²。研究结果阐明了桢楠在我国的地理分布范围和适宜气候条件, 并采用 MaxEnt 模型进行了桢楠潜在适宜栽培区预测, 可为我国桢楠的推广栽培提供指导依据。

关键词:桢楠; MaxEnt; 地理分布区; 适宜栽培区

中图分类号:S725.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)02-0136-06

MaxEnt Model-based Prediction of Suitable Cultivation Area of *Phoebe zhennan* in China

GU Yun-jie¹, LI Xiao-qing^{1*}, YANG Han-bo²

(1. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 311400, Sichuan, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of the Yangtze River, Key Laboratory of Sichuan Province & National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River & Rainy Area of West China Plantation Ecosystem Permanent Scientific Research Base, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: To study the geographic distribution scope and potential suitable cultivation area of *Phoebe zhennan*, the MaxEnt model was applied to predict the suitable cultivation area based on the data of climate, altitude, soil condition, vegetation style, and natural distribution of *P. zhennan*. The results showed that, the horizontal equilibrium extent ranged from 26°41′ to 31°7′ N, and 101°51′ to 110°57′ E. The vertical distribution ranged from 139 m to 1 524 m above the sea level. The suitable annual average temperature, annual precipitation, extremely lowest and highest temperature were 13℃—18℃, 850—1 500 mm, -1℃—4℃, and 26℃—32℃, respectively. The potential optimum and highly suitable area were distributed in Longmen-Daba-Wuling-Miaoling-Emei Mountains, in which Sichuan Province occupied the most of the highly suitable and suitable cultivation area (137 694 km²), followed by Guizhou (101 972 km²), Chongqing (61 658 km²), Hunan (38 382 km²) and Hubei (25 456 km²). The geographic distribution and ranges of the dominant bioclimatic factors were clarified. This work predicted the regionalization of potential suitable cultivation area and provided references for reasonable cultivating *P. zhennan*.

Key words: *Phoebe zhennan*; Maxent; geographic distribution; suitable cultivation area

收稿日期:2020-04-17 修回日期:2020-05-09
基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0601102, 2016YFD0600603)。
作者简介:辜云杰, 研究员。研究方向:珍贵用材树种培育。E-mail: guyunjie7901@163.com
* 通信作者:李晓清, 研究员。研究方向:森林培育。E-mail: lixq_forestry@sina.com

桢楠(*Phoebe zhennan*)隶属樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe*),为高大常绿乔木,树干通直,树冠浓荫,树形美观^[1]。桢楠为我国特有的Ⅱ级珍稀濒危保护植物,兼具用材和观赏价值,常被用作珍贵木材及绿化树种,其木材颜色淡黄、纹理美观、结构细密、木味香馥,是主要的“金丝楠木”树种,曾是明清时期帝王的“皇木”^[2]。由于桢楠木材价值极高,古往今来备受人们青睐,使得过度采伐导致桢楠成林破坏严重,资源日益匮乏。因此,大力开展桢楠人工造林,扩大栽培范围,是有效保护桢楠的重要途径^[3]。而我国的桢楠人工林发展缓慢,造林面积较少,严重制约了桢楠的规模化和产业化发展。因此,全面开展桢楠人工林培育的相关研究已迫不及待。但目前桢楠有关研究多集中在苗木繁育^[1]、生理生态特性^[4-5]、生长特性^[6-9]、木材构造和物理性能^[10-11]等方面,对其在全国范围的地理分布及适宜气候特征等方面的研究还较少。因此,基于生态位模型和桢楠分布的地理气候因子,进行适宜栽培区预测,有利于指导桢楠人工林培育,推动产业健康、持续发展。

物种分布与气候条件之间存在密切的关系,气候是在大尺度上决定物种分布的主要因素,其他环境因子(如地形、土壤等)通过直接或间接影响物种的生理生态功能,进而调控物种的分布^[12-13]。物种分布模型主要利用物种的分布数据与气候环境因子数据,依据特定的数学算法计算物种的生态位,并以概率的形式反映物种出现的概率或生境适宜程度^[13]。MaxEnt 最大熵模型是以最大熵理论为基础的密度估计和物种分布预测模型,具有运算结果稳定、运算时间短等优点,被广泛应用于动植物生长环境分析和潜在分布区预测等^[14]。邱浩杰等^[15]利用 MaxEnt 模型分析了未来气候对鹅掌楸空间分布的影响,并对其在中国的适宜性分布区进行了预测。董波等^[16]基于 MaxEnt 模型模拟了漆树在中国的适生分布区,认为年均降水量、海拔等是影响漆树地理分布的主导环境因子。孙杰杰等^[17]以浙江省生态监测样地数据库中 181 个檫木样本实测分布点数据为对象,采用 MaxEnt 和 ArcGis 对檫木在浙江省的潜在适生区进行了预测。为此,本研究以珍稀用材树种桢楠在全国的地理分布数据为基础,采用 MaxEnt 模型,结合桢楠分布样点数据,预测其适宜的栽培区范围及适宜的气候条件,以期对桢楠人工林推广栽培和产业健康稳定发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 桢楠分布数据的收集与整理

利用 CVH 中国数字植物标本馆(Chinese Vir-

tual Herbarium, <http://www.cvh.org.cn/>) 和 NSII 国家标本平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>) 等数据库采集桢楠分布、环境等相关数据,结合桢楠实地调查数据(采用 GPS 对桢楠树分布经纬度进行记录)。综合桢楠分布样点的地理位置信息,共确定了 94 个桢楠地理分布点信息,整理成 shp 文件格式,采用 A 如此 GIS 软件绘制桢楠地理分布图。

1.2 环境数据采集

从国家基础地理信息系统数据库获取中国省级行政区划图。为准确预测桢楠的适宜分布区,选择海拔、气候、土壤以及植被类型等 25 个影响植物生长和分布的环境因子数据为基础数据。气候和海拔数据均通过世界气候数据库获取,其中,气候数据包括 19 个生物气候变量:bio1-年均气温、bio2-平均月气温变化范围、bio3-等温性、bio4-温度季节变化方差、bio5-极端最高气温、bio6-极端最低气温、bio7-年气温幅度、bio8-湿季平均气温、bio9-干季平均气温、bio10-最暖季平均气温、bio11-最冷季均温、bio12-年降水量、bio13-最湿月降水量、bio14-最干月降水量、bio15-季降水量变异系数、bio16-最湿季降水量、bio17-最干季降水量、bio18-最暖季降水量、bio19-最冷季降水量^[18]。利用“基于世界土壤数据库的中国土壤数据集”获取表层土壤(0~30 cm)数据:pH、有机质含量、土壤密度以及土壤类型 4 个土壤条件因子。以上环境数据集土层的空间分辨率均为 30''。

1.3 潜在适宜栽培区预测分析

采用最大熵模型(MaxEnt),根据已知分布点的像元为样点,结合样点的环境数据集得出约束条件,在规定范围内寻找与物种实际分布样点相同的像元,从而达到预测物种在规定区划内的地理生境分布区域^[19]。将桢楠分布点和气候环境因子图层导入 MaxEnt 模型,进行桢楠潜在适宜栽培区预测,预测结果为桢楠在我国不同地理区域的适宜栽培概率($0 \leq P \leq 1$), P 值越高,表明该区域栽培桢楠的适宜性越高, P 值越低,表明该区域越不适宜栽培桢楠。采用 ArcGIS 软件中的重分类(Reclass)工具,对其预测的适宜等级进行划分。

MaxEnt 模拟预测结果的效果采用 ROC 曲线(受试者工作特征曲线)下的面积(AUC)进行评测: $0.90 \leq AUC \leq 1.0$ (非常好)、 $0.80 \leq AUC \leq 0.90$ (好)、 $0.70 \leq AUC \leq 0.80$ (一般)、 $0.60 \leq AUC \leq 0.70$ (较差)、 $0.50 \leq AUC \leq 0.60$ (失败)^[20]。

2 结果与分析

2.1 地理分布

我国桢楠的水平分布范围主要为 $26^{\circ}41' - 31^{\circ}$

7°N, 101°51′—110°57′E, 主要分布在四川盆周山地、贵州、重庆、湖南西部和湖北西部等地区(图 1)。桢楠的垂直分布点位于海拔 139~1 524 m, 最低处位于四川盆地及重庆地区, 最高处位于四川盆周山地。我国桢楠分布的北缘为大巴山区, 南缘为苗岭-雪峰山西南麓, 分布东缘武陵山区, 西缘为四川的盆周山地区-云贵高原以东的山区。从地形特征和山脉走势看, 桢楠主要分布区为四川龙门山、大巴山和华蓥山等盆地丘陵区及盆周山区、贵州苗岭、方斗山-武陵山系之间以及雪峰山西南麓地区。按省级行政划分, 桢楠主要分布在四川、重庆、贵州、湖北西部、湖南西北部等区域, 云南、陕西等省有小部分零

星分布。

2.2 气候特征

水热条件是物种分布的重要气候因素之一, 其中主要以年降水量、极端高温、低温以及年均气温为主要影响因素。通过对桢楠分布点气候分析显示, 气候变量累计频率>90%的高频率区间是最为适宜桢楠生存和生长的气候条件, 其分布区的年均气温为 9~20℃, 以 13~18℃为适宜的年均温(图 2)。年降水量为 850~1 500 mm, 以 900~1 450 mm 为适宜的年降雨量。可越夏的极端高温为 23~33℃, 适宜越夏的极端高温为 26~32℃。可越冬的极端低温为-5~5℃, 适宜越冬的极端低温为-1~4℃。

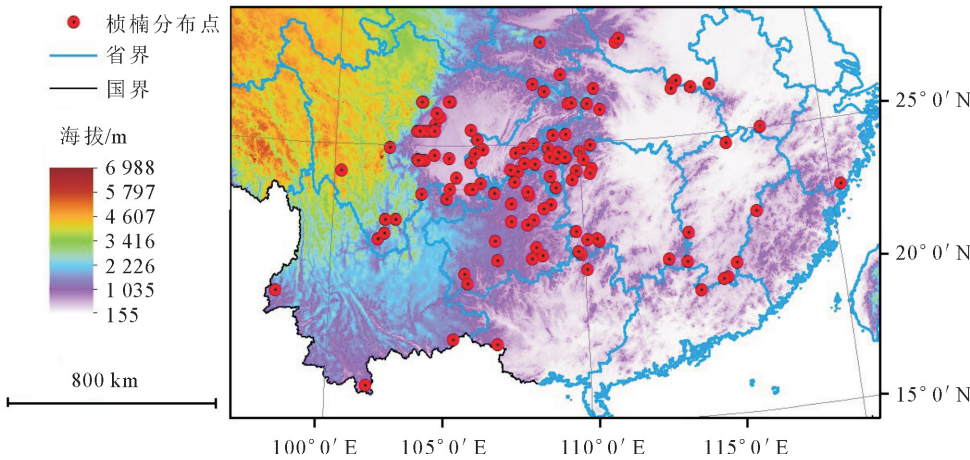


图 1 桢楠地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of *Phoebe zhenman*

基于 MaxEnt 模型评价的 25 个环境因子对桢楠分布样点的贡献率结果显示, 年气温幅度、极端最低气温和平均月气温变化范围等 9 个的环境因子的累积贡献率达 90.3%, 按贡献率大小依次为年气温幅度>极端最低气温>平均月气温变化范围>气温季节变化方差>等温性>植被类型>干季平均气温>年降水量>极端最高气温(表 1)。其中, 温差(bio7、bio2、bio3)对桢楠分布的影响极其重要, 表明桢楠的生长对温差的要求很高, 温差影响着桢楠的花芽分化和开花结实。低温对桢楠分布区的影响也很重要, 决定桢楠能否安全越冬。植被类型因子主要反映了桢楠的伴生树种及其分布区植被类型, 桢楠主要分布于常绿阔叶林、针阔叶混交林和常绿落叶阔叶混交林。年降水量反映了桢楠对水分条件的需求和耐受能力, 桢楠对高温的耐受能力以极端最高气温为反应指标。

2.3 桢楠潜在适宜栽培区预测分析

构建的 MaxEnt 模型的 AUC 值为 0.984, 表明构建的 MaxEnt 预测模型预测的桢楠潜在适宜栽培区结果具有较高的精准度。模拟结果呈现每个栅格单元中桢楠出现的概率值($0 \leq P \leq 1$), P 值越接近

于 0, 表明桢楠在该栅格中出现的概率越小; P 值越接近 1, 表明桢楠在该栅格单元中出现的几率越大。利用自然分割法将桢楠潜在适宜栽培区划分为 4 个等级: $P \leq 0.08$ 为不适宜区, $0.08 \leq P < 0.27$ 为低适宜区, $0.27 \leq P < 0.48$ 为中适宜区, $P \geq 0.48$ 为高适宜区。桢楠潜在适宜栽培区的预测结果(图 3)与桢楠实际分布区具有较高的一致性, 其潜在适宜栽植区主要集中在龙门山-大巴山-武陵山-苗岭-峨眉山区域。

表 1 桢楠地理分布的环境影响因子的贡献率

Table 1 Percentage contribution of environmental factors affected on the distribution of *P. zhenman*

环境因子	贡献率/%	累积贡献率/%
bio7	35.1	35.1
bio6	12.8	47.9
bio2	12.0	59.9
bio4	6.6	66.5
bio3	5.8	72.3
veg-sty	5.0	77.3
bio9	4.9	82.2
bio12	4.7	86.9
bio5	3.4	90.3

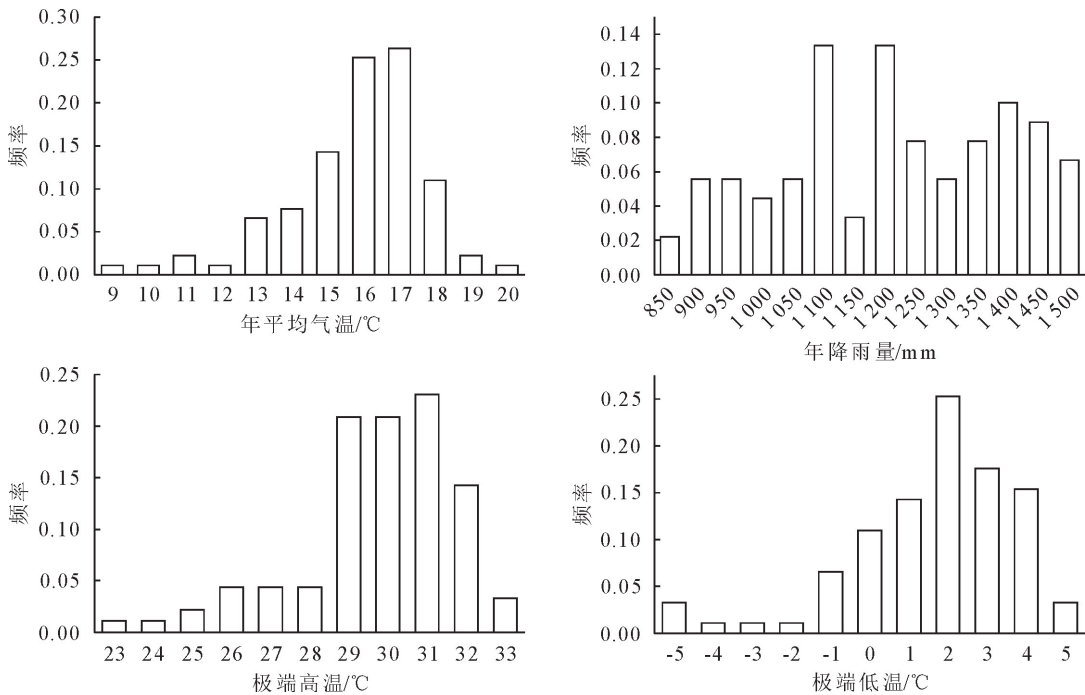


图 2 桉楠地理分布区域的气候因子频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of climatic factors in geographic distribution area of *P. zhennan*

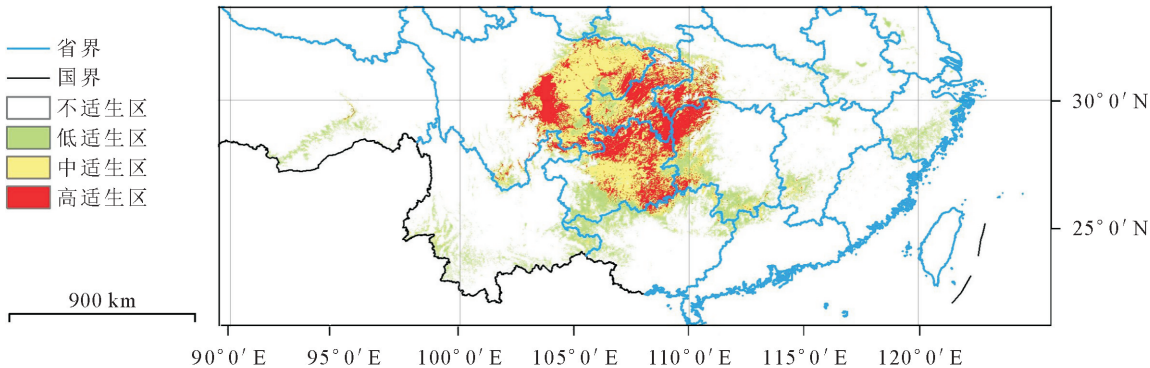


图 3 MaxEnt 模型预测的桉楠分布

Fig. 3 Distribution map of *P. zhennan* predicted by the Maxent model

桉楠适宜栽培区面积较大主要为四川、重庆、贵州、湖北和湖南 5 个省份,其他地区(陕西、云南和江西 3 个省份)的适宜栽培区面积相对较小。由表 2 和图 3 可知,桉楠在我国的高适宜栽培区(红色部分)面积为 165 183 km²,中适宜区(黄色部分)面积为 225 730 km²,低适宜区(绿色部分)面积为 252 483 km²。从高适宜栽培区来看,贵州的面积最大,为 45 743 km²,其次为四川、湖南、湖北、贵州、和重庆地区,其他地区的高适宜栽培区仅 6 399 km²。从中适宜栽培区来看,四川的面积最大,为 92 998 km²,其次为贵州、重庆、湖南、湖北地区,其他地区的 中适宜栽培区仅 19 352 km²。从低适宜栽培区来看,湖南的面积最大,为 35 915 km²,其次为贵州、四川、湖北、重庆地区。总体来看,四川的高、中适宜栽培区面积最大,为 137 694 km²;其次为贵州,其高、中适宜栽培区面积为 101 972 km²;重庆、

湖南、湖北依次为 61 658、38 382、25 456 km²。

表 2 中国不同行政区划的宜栽培区面积

Table 2 Different grades of suitable distribution area in China

地区	面积/km ²		
	高适宜区	中适宜区	低适宜区
四川	44 696	92 998	25 052
重庆	32 585	29 073	8 634
贵州	45 743	56 229	27 798
湖南	20 596	17 786	35 915
湖北	15 164	10 292	13 823
其他地区	6 399	19 352	141 261
合计	165 183	225 730	252 483

3 结论与讨论

环境因素、生物因素、物种的扩散能力和物种适应新环境的进化能力是决定物种地理分布的主要因素^[21]。但在大区域尺度上,气候因素是决定物种分

布的主要因子^[22]。本研究利用 MaxEnt 模型预测桢楠分布区的年均气温为 9~20℃,以 13~18℃为适宜的年均温;年降水量为 850~1 500 mm,以 900~1 450 mm 为适宜的年降雨量;可越夏的极端高温为 23~33℃,适宜越夏的极端高温为 26~32℃;可越冬的极端低温为-5~5℃,适宜越冬的极端低温为-1~4℃。这与李晓清等^[3]利用四川桢楠分布区 38 个站点的气候数据统计的结果相一致,桢楠在四川地区的年均气温为 16.05~17.24℃,越冬的极端低温为-2.8~-4.82℃,年均降雨量为 968.83~1 333.50 mm。不同物种对环境因子的敏感性在较大程度上影响其分布范围,如麻栎适宜生长的年平均温度在 5.1℃~20.7℃,适宜越冬的年极端低温在-17.1℃~8.7℃,其适宜的年平均温度和年极端低温跨度非常大,对环境的适应能力较强,其分布范围亦更宽广^[22]。<-4.0℃和>5.0℃以上都不适宜鹅掌楸生长,这就将其适生范围限定在了秦岭-淮河以南,而福建南部、广东等低纬度地区分布较少^[15]。桢楠对气候因素的要求较高,是导致其分布区和适宜栽培区域相对狭窄的主要原因。

MaxEnt 模型预测结果与桢楠实际分布区具有较高的一致性,均显示桢楠主要集中在四川、贵州和重庆等西南地区。与丁鑫等^[23]在野外调查的基础上估测的桢楠潜在分布区范围保持一致。同时,本研究在生物气候因子的基础上,加入了海拔、土壤因子和植被类型的数据,进一步优化分析了桢楠的栽培区范围和适宜性等级,为我国桢楠的推广栽培提供了理论参考。桢楠主要连续分布在四川盆地,潜在适宜栽植区主要集中在龙门山-大巴山-武陵山-苗岭-峨眉山区域,与 Bioclim 与 Domain 模型估计的桢楠潜在分布区相一致^[23]。同时,本研究将 MaxEnt 模型预测与 94 个桢楠实际分布点相结合预测桢楠在我国适宜栽培范围,结果显示,高适宜区($P\geq 0.48$)面积排名前 3 的地区为四川、重庆和贵州,这些地区地势平坦、气候温暖湿润,四川是桢楠的原产地,非常适宜桢楠的生长。由于建模时未考虑人为活动干扰,预测的桢楠最适栽培区主要在四川的中部、北部地区,是发达城市所在地,但也从侧面说明人类活动对桢楠资源造成了很大的影响。因此,在种植区域选择时应在本区划图的基础上,结合实地调查结果,在适生区开展桢楠人工林栽培工作,以提高桢楠在产业化推广栽培的效果。

参考文献:

[1] 谢英赞,王朝英,马立辉,等.不同种源区桢楠种子形态、发芽特征及幼苗生长情况研究[J].西北林学院学报,2017,32(4):92-

99.
XIE Y Z,WANG C Y,MA L H,*et al.* Seed traits and seedling growth of *Phoebe zhennan* from different provenance [J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):92-99. (in Chinese)
[2] 郑万钧.中国树木志(第1卷)[M].北京:中国林业出版社,1983.
[3] 李晓清,杜宜建,朱纯燕,等.四川桢楠栽培气候区划与应用研究[J].四川林业科技,2013,34(2):16-19.
[4] 贺维,胡庭兴,王锐,等.施肥对桢楠幼苗光合生理及生长特性的影响[J].西北植物学报,2014,34(6):1187-1197.
HE W,HU T X,WANG R,*et al.* Effect of fertilization on photosynthetic physiology and growth characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.,2014,34(6):1187-1197. (in Chinese)
[5] 王茹,刘桂华,赵海燕,等.不同光环境下桢楠幼树叶片叶绿素荧光特性[J].东北林业大学学报,2012,40(7):32-36.
WANG R,LIU G H,ZHAO H Y,*et al.* Chlorophyll fluorescence characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings under different light regimes [J]. Journal of Northeast Forestry University,2012,40(7):32-36. (in Chinese)
[6] 龙汉利,张炜,宋鹏,等.四川桢楠生长初步分析[J].四川林业科技,2011,32(4):89-91.
[7] 张炜,何兴炳,唐森强,等.四川桢楠生长特性与分布[J].林业科技开发,2012,26(5):38-41.
[8] 周祖洪,陈孝,纪程灵,等.桢楠径向生长量变化规律研究[J].湖南林业科技,2014,41(6):66-69.
[9] 梁俊林,毛绘友,郭丽,等.遮荫对3种珍贵乡土阔叶树种幼苗生长及光合作用的影响[J].西北林学院学报,2019,34(4):57-63.
LIANG J L,MAO H Y,GUO L,*et al.* Influence of shading on the seedlings growth of three precious native tree species and photosynthesis [J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(4):57-63. (in Chinese)
[10] 薛晓明,谢春平,孙小苗,等.樟和楠木的木材解剖结构特征和红外光谱比较研究[J].四川农业大学学报,2016,34(2):178-184.
XUE X M,XIE C P,SUN X M,*et al.* Comparison on anatomical structure and FTIR spectra between *Cinnamomum camphora* and *Pheobe zhennan* woods [J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2016,34(2):178-184. (in Chinese)
[11] 杨进,宁莉萍,刘敏,等.桢楠木材构造特征及其径向变异研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(2):7-14.
YANG J,NING L P,LIU M,*et al.* Wood characteristics and radial variations of *Phoebe zhennan*[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2018,46(2):7-14. (in Chinese)
[12] 谢春平,方彦,方炎明.乌冈栎地理分布与水热环境因子的关系[J].水土保持研究,2011,18(1):125-131.
XIE C P,FANG Y,FANG Y M. Study on the relationship between *Quercus phillyraeoides* distribution region and the environmental factors [J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(1):125-131. (in Chinese)
[13] 李国庆,刘长成,刘玉国,等.物种分布模型理论研究进展[J].生态学报,2013,33(16):4827-4835.

LI G Q,LIU C C,LIU Y G,*et al.* Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(16):4827-4835. (in Chinese)

[14] AHMED S E,MCINERNEY G,Q'HARA K,*et al.* Scientists and software-surveing the species distribution modeling community [J]. *Diversity & Distributions*. ,2015,21(3):258-267.

[15] 邱浩杰,孙杰杰,徐达,等. 基于 MaxEnt 模型预测鹅掌楸在中国的潜在分布区[J]. *浙江农林大学学报*,2020,37(1):1-8.
QIU H J,SUN J J,XU D,*et al.* MaxEnt model-based prediction of potential distribution of *Liriodendron chinense* in China [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*,2020,37(1):1-8. (in Chinese)

[16] 董波,李建伟,林杰,等. 基于 MaxEnt 模型预测漆树在中国的潜在适生区研究[J]. *西南林业大学学报*,2020,40(2):79-85.
DONG B,LI J W,LIN J,*et al.* Prediction of potential distribution of *Toxicodendron vernicifluum* in China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Southwest Forestry University*,2020,40(2):79-85. (in Chinese)

[17] 孙杰杰,江波,朱锦茹,等. 应用生态位模型预测檫木在浙江省的潜在适生区与主导环境因子[J]. *东北林业大学学报*,2020,48(2):1-6.
SUN J J,JIANG B,ZHU J R,*et al.* Prediction of potential suitable habitat and dominate environmental factors of *Sassafras tzumu* in Zhejiang with MaxEnt model [J]. *Journal of Northeast Forestry University*,2020,48(2):1-6. (in Chinese)

[18] HIJMANS R J,CAMERON S E,PARRA J L,*et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1965-1978.

[19] 热木图拉·阿卜杜克热木,古再努尔·孜比比拉,许仲林,等. 基于生态位模型的艾比湖鹅喉羚生境评价[J]. *生态学报*, 2016,36(13):4171-4177.
RAHMUTULA ABDUKERIM, GUZALNUR ZIBIBILLA, XU Z L,*et al.* Assessment of habitat suitability for *Gazella subgutturosa* in the Ebinur reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2016,36(13):4171-4177. (in Chinese)

[20] 刘少军,周广胜,房世波. 中国橡胶种植北界[J]. *生态学报*, 2016,36(5):1272-1280.
LIU S J,ZHOU G S,FANG S B. A preliminary study of the northern planting boundary of rubber tree cultivation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5): 1272-1280. (in Chinese)

[21] 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.
ZHU G P,LIU G Q,BU W J,*et al.* Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*,2013,21(1):90-98. (in Chinese)

[22] 张兴旺,李垚,方炎明. 麻栎在中国的地理分布及潜在分布区预测[J]. *西北植物学报*,2014,34(8):1685-1692.
ZHANG X W,LI Y,FANG Y M. Geographical distribution and prediction of potential ranges of *Quercus acutissima* in China [J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* , 2014, 34(8): 1685-1692. (in Chinese)

[23] 丁鑫,肖建华,黄建峰,等. 珍贵木材树种楠木的野生资源调查[J]. *植物分类与资源学报*,2015,37(5):629-639.
DING X,XIAO J H,HUANG J F,*et al.* Investigation on wild resource of valuable timber tree *Phoebe zhennan* (Lauraceae) [J]. *Plant Diversity and Resources*,2015,37(5):629-639. (in Chinese)

(上接第 115 页)

[33] TAHAR T,MUSTAPHA U,MOHAMED N. Uermination responses of Diplotaxis harm to temperature and salinity[J]. *Journal of Arid Environments*,2008,203:421-428.

[34] 丁佳红,薛正莲,杨超英. 水杨酸对铜胁迫下水稻幼苗膜脂过氧化作用的影响[J]. *黑龙江农业科学*,2013(1):14-18.

[35] 王传旗,梁莎,张文静,等. 温度和水分对赖草种子萌发的影响[J]. *草业科学*,2018,35(6):1459-1464.

[36] 马雨婷,蒋志荣,方向文,等. 白毛锦鸡儿种子萌发对温度及外源激素的响应[J]. *甘肃农业大学学报*,2018,53(1):124-129.
MA Y T,JIANG Z R,FANG X W,*et al.* Influence of different temperature and exogenous hormone on seed germination characteristics of *Caragana licentina* [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*,2018,53(1):124-129. (in Chinese)

[37] 王传旗,梁莎,扎西次仁,等. 温度对西藏 3 种野生披碱草属牧草种子萌发的影响[J]. *西藏大学学报:自然科学版*,2016,31(2):63-67.
WANG C Q,LIANG S,ZHAX C R,*et al.* ffects of temperature on seed germination of three wild *Elymus* species in Tibet[J]. *Journal of Tibet University:Natural Science Edition*, 2016,31(2):63-67. (in Chinese)