

DOI: 10.5846/stxb201907091450

刘攀峰,王璐,杜庆鑫,杜兰英.杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析.生态学报,2020,40(16):5674-5684.

Liu P F, Wang L, Du Q X, Du L Y. Estimation of potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliv. in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5674-5684.

## 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析

刘攀峰<sup>1,2</sup>, 王璐<sup>1,2</sup>, 杜庆鑫<sup>1,2</sup>, 杜兰英<sup>1,2,\*</sup>

1 国家林业和草原局泡桐研究开发中心, 郑州 450003

2 国家林业和草原局杜仲工程技术研究中心, 郑州 450003

**摘要:** 杜仲是我国重要的乡土经济林树种, 其产业应用涉及医药、食品、保健、饲料、橡胶、化妆品及园林绿化等领域。预估杜仲在我国的潜在适生区分布, 对杜仲资源保护、引种、精细化管护及可持续利用具有重要意义。利用 601 个杜仲地理分布点和 24 个环境变量数据, 通过 MaxEnt 模型和空间分析技术预测杜仲潜在适生区分布及其生态特征, 结果显示我国杜仲适生区等级可分为 4 级, 其中高适生区 38.01 万 km<sup>2</sup>, 集中分布在大巴山中低山谷地区、川东平行低山岭谷区、鄂西高原-大别山中低山丘陵谷地区、武陵山中低山谷地区、雪峰山中低山区、川南黔北滇东喀斯特高原中山区以及浙闽中低山丘陵谷地地区。杜仲最适宜生长条件为年平均温度介于 11—16℃、年均降水量介于 700—1450 mm、温度季节性变化的标准差在 820 以下、海拔 1400 m 以下、坡度 24° 以下。

**关键词:** 杜仲; 适生区估计; 最大熵生态位模型; 主导环境变量; 栽植区划

## Estimation of potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliv. in China

LIU Panfeng<sup>1,2</sup>, WANG Lu<sup>1,2</sup>, DU Qingxin<sup>1,2</sup>, DU Lanying<sup>1,2,\*</sup>

1 Paulownia Research & Development Center of China, National Forestry and Grassland Administration, Zhengzhou 450003, China

2 The Eucommia Engineering Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Zhengzhou 450003, China

**Abstract:** *Eucommia ulmoides* Oliv. is an important native non-timber tree species. Its application in industry has been involved in medicine, food, health care, feedstuff, rubber, cosmetics, and landscaping. The estimation of *E. ulmoides* potential suitable distribution area is of highly importance, which would promote the resource protection, introduction, efficient tending and sustainable utilization. In this paper, to predict the potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *E. ulmoides* in China, data of 601 geographical distribution points and 24 environmental variables were analyzed by the MaxEnt model and the spatial analysis technique. The suitable level of *E. ulmoides* in China could be divided into 4 grades. The highly suitable area reached to 380,100 km<sup>2</sup>, which mainly distributed in the middle and low valleys in Daba mountain, the parallel ridge valleys in eastern Sichuan, the middle and low valleys in the western Hubei plateau and Dalei mountain, Wuling mountain and Xuefeng mountain, the Karst plateau and middle mountain in southern Sichuan, northern Guizhou and eastern Yunnan, and the low hills and valleys of Zhejiang and Fujian. The prediction of *E. ulmoides* optimum growth condition was the annual mean temperature of 11—16℃, the annual mean precipitation of 700—1450 mm, the temperature seasonality less than 820, the altitude below 1400 m and the slope below 24°.

**Key Words:** *Eucommia ulmoides* Oliv.; suitable area estimation; MaxEnt ecological niche model; dominant environmental variable; plantation regionalization

杜仲 (*Eucommia ulmoides* Oliv.) 是我国重要的国家战略资源、特有的名贵药材和木本油料树种, 其产业应

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0600702)

收稿日期: 2019-07-09; 网络出版日期: 2020-06-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dly371@126.com

用涉及医药、食品、保健、饲料、橡胶、化妆品以及园林绿化等领域<sup>[1]</sup>。我国对杜仲的利用已有两千多年的历史,成书于汉代的《神农本草经》视其为“上品”<sup>[2]</sup>,对我国不同历史时期杜仲产地分布的研究认为,早期杜仲的地理格局奠定了当代杜仲资源分布和产业化的基础<sup>[3]</sup>。在地质史上,杜仲属植物曾广布于北半球,由于第四纪大冰期的侵袭,在欧洲、北美等其他地区相继消失,只在中国存活至今<sup>[4-6]</sup>。随着杜仲用途与开发价值不断被认知,杜仲栽植范围日渐扩大,目前我国杜仲栽植面积在 35 万  $\text{hm}^2$ ,在国内 27 个省(区、市)均有种植<sup>[7]</sup>,并成功引种到美国、英国、法国、匈牙利、俄罗斯、日本、韩国等国家<sup>[8]</sup>。

对目标地区树种的潜在适生性进行评估,有利于良种资源的合理布局、科学引种以及加快生产效益。对杜仲的适生分布以及产区划分已开展了一定研究,认为我国杜仲中心产区在黔北、黔西北、鄂北、鄂西北、湘北、湘西北、豫西南、川东、川北、滇东北以及陕南地区,主要产区包括中亚热带和北亚热带及南温带南部的局部分散产区,在此以外的地方不宜栽植杜仲<sup>[8-9]</sup>。但早期杜仲适生区划分多通过文献归纳,缺少量化依据。生态位模型是根据物种已知的分布数据和相关环境变量,通过一定的算法构建模型用以判断物种的生态需求,并将运算结果投射至特定时间和空间来预测物种的实际分布和潜在分布,被广泛用于全球变化背景下物种分布、生物多样性保护、物种潜在分布区预测、保护区规划、外来物种入侵区域的预测等<sup>[10-11]</sup>。

常用的生态位模型有规则集遗传算法模型 GARP (genetic algorithm for rule-set prediction model)、最大熵模型 MaxEnt (maximum entropy model)、生物气候模型 BIOCLIM (biological climatic model) 以及气候动态模拟软件 CLIMEX (match climate and compare location model) 等<sup>[10,12]</sup>。其中 MaxEnt 模型是目前使用最为广泛的生态位模型<sup>[13]</sup>,通过计算物种和环境互作系统中具有最大熵时的状态参数,确定物种和环境间的稳定关系,并以此估计物种的适生分布<sup>[14]</sup>。MaxEnt 模型能有效处理各变量间的复杂交互关系,模型预测表现优异<sup>[15]</sup>,已有研究将 MaxEnt 模型及空间分析技术手段应用至贵州省杜仲的生态适宜性区划中,取得了具有较高可信度的分析结果<sup>[16]</sup>,此外在珙桐 (*Davidia involucrata*)、毛红椿 (*Toona ciliata* var. *pubescens*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、山茱萸 (*Cornus fructus*)、蓝莓 (*Vaccinium corymbosum*)、枸杞 (*Lycium barbarum*) 等树种的适生区划中也得到了满意结果<sup>[17-23]</sup>。本研究在对杜仲分布数据全面收集和整理的基础上,利用 MaxEnt 模型及 Arcgis 空间分析技术预测我国杜仲的潜在适生区,解析影响杜仲分布的主导环境变量,以期合理布局杜仲资源培育及产业发展提供理论依据。

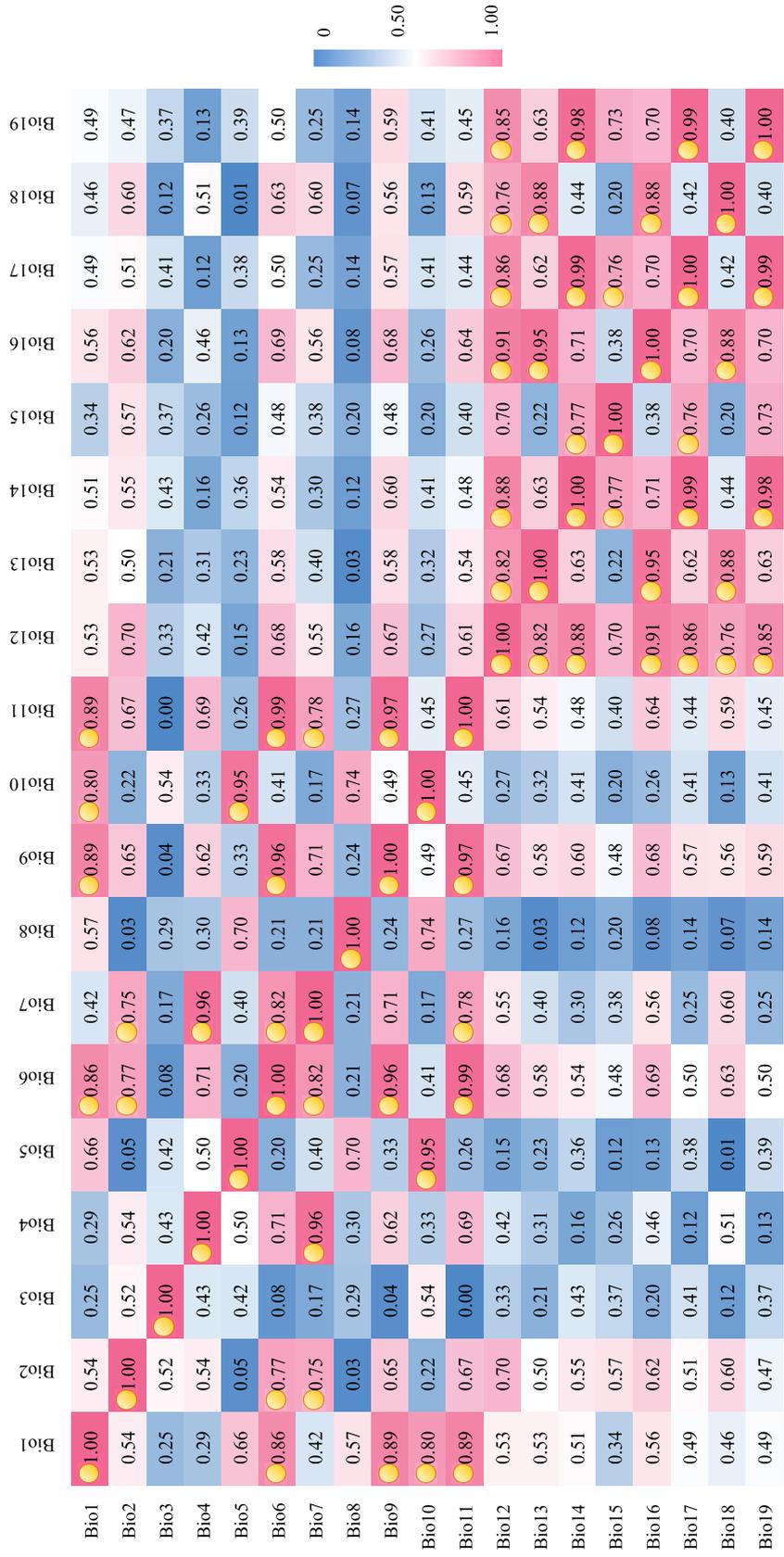
## 1 材料与方 法

### 1.1 物种分布数据来源及处理

杜仲在我国的地理分布信息通过查询中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>)、全球物种多样性信息库 (GBIF, <http://www.gbif.org/>)、中国林业科学研究院经济林研究开发中心国家杜仲种质资源库调查档案以及整理相关文献获取,分别得到 1464 条、222 条、669 条和 1128 条分布记录。通过排除经纬度缺失、无效以及重复登记信息,并利用腾讯地图坐标拾取器校对 (<https://lbs.qq.com/tool/getpoint/>) 分布点数据,获得 727 条有效地理分布记录。为降低人为调查偏向性造成分布记录的群集效应误差,结合环境数据空间分辨率,利用 ArcMap 软件设置  $10' \times 10'$  空间分辨率的格网,在每网格中筛选距离中心最近的分布点,最后得到有效分析样本地理分布记录 601 条。依照 MaxEnt 3.4.1 文件输入要求,将数据整理为 csv 格式备用。

### 1.2 环境变量数据收集及处理

从国家基础地理信息系统 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 获取比例尺为 1:4000000 的中国行政区划图。环境变量共有 54 个,包括 19 个气候变量、32 个土壤变量和 3 个地形变量,其中气候数据源自全球气候数据库网站 (<http://www.worldclim.org/>, WorldClim 2.0)<sup>[24]</sup>,空间分辨率为  $2.5'$ ;土壤数据和地形数据来自世界土壤数据库 (<http://www.fao.org/>, HWSD 1.2)<sup>[25]</sup>,空间分辨率为  $30''$ 。根据 MaxEnt 3.4.1 模型分析对环境数据格式一致性的要求,在 Arcgis 10.2 软件中将其空间分辨率统一重采样为  $2.5'$ 。在物种分布模型的建模中,环境变量的多重共线性将会使物种分布模型过度拟合,导致预测结果精确性降低<sup>[26]</sup>。利用 Spearman 秩相关分析分别考察气候变量、土壤变量中各变量之间的相关性,相关系数矩阵见图 1—图 2,保留相关系数小于 0.75 的变量,对相关系数大于 0.75 的两个变量选择其中一个具有重要指示意义的环境变量。最终确定 24 个变量用于建模模拟,如表 1 所示。



● 相关系数大于0.75

图1 19个气候变量间的相关系数矩阵  
Fig.1 Correlation coefficient matrix of 19 climate variables

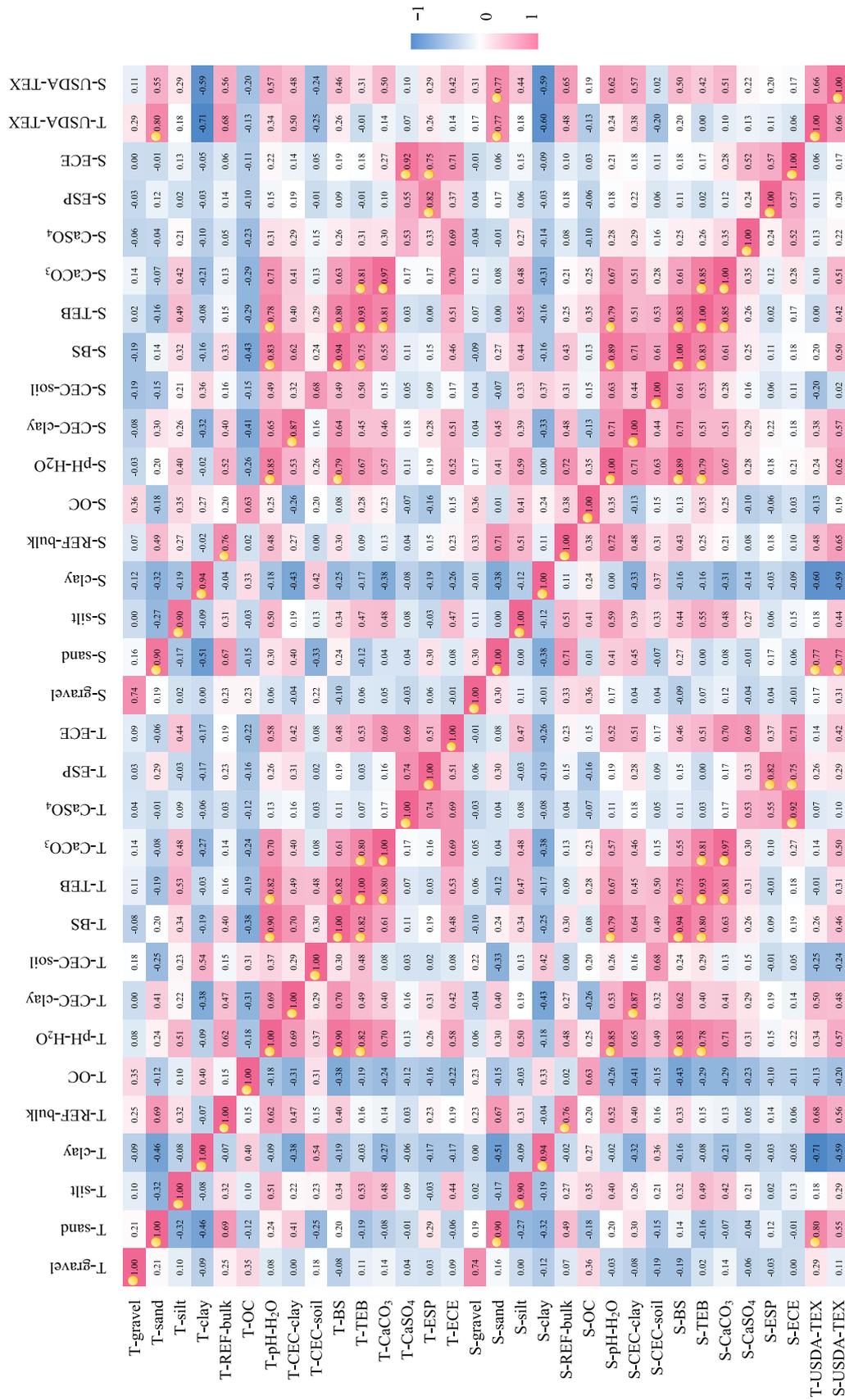


表 1 用于模型预测的环境变量  
Table 1 Variables used in the model prediction

变量描述 Variable description	名称简写 Abbreviated name	单位 Unit
年平均温度 Annual mean temperature	Bio1	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max.temp.-min.temp.))	Bio2	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
昼夜温差与年温差比值 Isothermality (Bio2/Bio7) ( $\times 100$ )	Bio3	1
温度季节性变化的标准差 Temperature seasonality (Standard deviation $\times 100$ )	Bio4	1
最暖月份最高温 Max temperature of warmest month	Bio5	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter	Bio8	$\times 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
年均降水量 Annual precipitation	Bio12	mm
降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	Bio15	1
最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	Bio18	mm
表层土壤碎石体积百分比 Topsoil gravel content	T-gravel	%
表层土壤粉沙粒含量 Topsoil silt fraction	T-silt	%
表层土壤粘土含量 Topsoil clay fraction	T-clay	%
表层土壤容重 Topsoil reference bulk density	T-REF-bulk	$\text{kg}/\text{dm}^3$
表层土壤有机碳含量 Topsoil organic carbon	T-OC	%
表层土壤酸碱度 Topsoil pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	T-pH- $\text{H}_2\text{O}$	$-\log(\text{H}^+)$
表层土壤阳离子交换能力 Topsoil CEC (soil)	T-CEC-soil	$\text{cmol}/\text{kg}$
表层土壤硫酸盐含量 Topsoil gypsum	T- $\text{CaSO}_4$	%
表层土壤可交换钠盐含量 Topsoil sodicity (ESP)	T-ESP	%
底层土壤有机碳含量 Subsoil organic carbon	S-OC	%
底层土壤阳离子交换能力 Subsoil CEC (soil)	S-CEC-soil	$\text{cmol}/\text{kg}$
底层土壤硫酸盐含量 Subsoil gypsum	S- $\text{CaSO}_4$	%
海拔 Altitude	Alt	m
坡向 Aspect	Asp	—
坡度 Slope	Slp	( $^{\circ}$ )

### 1.3 模型预测及评估

将杜仲地理分布点和环境变量数据导入 MaxEnt 3.4.1 软件中建模运算,随机选取 75% 分布数据为训练集,剩余 25% 为测试集,开启刀切法 (jackknife) 计算环境变量对杜仲分布的影响,绘制各环境变量的响应曲线。设定模型运算 500 次,设置 10 次重复,其余选项采用默认设定<sup>[27]</sup>。利用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 对 Maxent 模型运算结果进行检验,ROC 曲线以假阳性率 (即 1-特异度) 为横坐标,真阳性率 (敏感度) 为纵坐标,曲线下的面积为 AUC 值。当 AUC 值介于 0.70—0.80 时,认为预测结果较准确;当 AUC 值介于 0.80—0.90 时,认为预测结果很准确;当 AUC 值大于 0.90 时,认为预测结果极准确<sup>[28-29]</sup>。

### 1.4 适生等级划分和主导环境因子分析

将 Maxent 分析得到的 .asc 文件在 Arcgis 10.2 中转化成 Raster 格式,利用 Arcgis 10.2 空间分析工具重分类工具进行适生区划分。参照 IPCC 报告有关评估可能性的划分方法<sup>[30]</sup>,并结合杜仲实际分布情况,将杜仲潜在地理分布划分 4 个等级:  $0 \leq P \leq 0.1$  归为非适生区,  $0.1 < P \leq 0.3$  归为低适生区,  $0.3 < P \leq 0.6$  为中适生区,  $P \geq 0.6$  归为高适生区<sup>[31]</sup>。将模型预测结果转化后导入 ArcGIS 10.2 绘制分布图,并利用 Raster Reclassify 功能,统计不同等级适生区分布面积。综合 Jackknife 检验、贡献率和置换重要值分析结果确定影响杜仲适生分布的主导环境变量,根据杜仲潜在分布概率在不同主导环境变量中的响应曲线,获得不同分布等级下主导环境因子的作用阈值。

## 2 结果与分析

### 2.1 Maxent 模型的准确性评估

基于 Maxent 模型建模并重复运行 10 次后得出的 AUC 分析结果如图 3 所示,其中训练数据 AUC 值在 0.898—0.903,平均值为 0.900;测试数据 AUC 值在 0.861—0.907,平均值为 0.889。根据 AUC 值的评估标准<sup>[32]</sup>,模型预测的准确性分别达到“极准确”与“很准确”的标准,表明模型能很好的拟合杜仲物种分布数据,其预测结果可信。

### 2.2 杜仲在我国的潜在适生区分布

基于 MaxEnt 模型预测的杜仲潜在适生区(包括高适生区、中适生区和低适生区)分布示意图如图 4 所示,潜在适生区面积总计为 277.61 万 km<sup>2</sup>,约占国土总面积的 28.92%。按照全国五级地貌等级分区体系<sup>[33]</sup>,杜仲高适生区面积 38.01 万 km<sup>2</sup>,集中分布在大巴山中低山谷地区、川东平行低山岭谷区、鄂西高原-大类山中低山丘陵谷地区、武陵山中低山谷地区、雪峰山中低山区、川南黔北滇东喀斯特高原中山区以及浙闽中低山丘陵谷地地区;中适生区面积 135.78 万 km<sup>2</sup>,集中分布在鲁东低山丘陵平原地区、武夷山中低山丘陵谷地区、江汉湖积冲积平原区、赣南低山丘陵盆地地区、南阳盆地低山丘陵岗地平原区、汾渭洪积冲积平原台地区、盆西冲积平原区以及武陵山中低山谷地区;低适生区面积 103.82 万 km<sup>2</sup>,集中分布在燕山低山丘陵区、苏北湖积海积平原区、黄淮海冲积平原区、辽河下游冲海积平原区、鄱阳湖丘陵岗地冲积湖积平原区、幕阜山—罗霄山中低山丘陵盆地地区、粤东低山丘陵平行岭谷区、桂西喀斯特低山丘陵盆地地区、鄂尔多斯高原区及南横断山中高山区。

我国 30 个省级行政区中不同等级杜仲适生区分布面积预测结果如表 2 所示,以四川省杜仲潜在适生区面积最大,达到 23.092 万 km<sup>2</sup>;四川省、云南省、湖南省、湖北省、河南省、贵州省、陕西省、广西壮族自治区、江西省、山东省、安徽省等地区杜仲潜在适生区分布较为集中,约占全国总面积的 68.32%。

### 2.3 影响我国杜仲分布的主导环境变量

利用 Jackknife 检验可以评估环境变量对预测结果的影响程度,从而判断不同变量对杜仲潜在分布的重要性。Jackknife 检验结果表明如图 5 所示,仅使用单独变量时,正则化训练增益由高到低前 10 个环境变量依次为年平均温度(Bio1,0.8534)、年均降水量(Bio12,0.8238)、昼夜温差月均值(Bio2,0.8025)、最暖季度降水量(Bio18,0.7375)、温度季节性变化的标准差(Bio4,0.5729)、降水量季节性变异系数(Bio15,0.4182)、最暖月份最高温(Bio5,0.3519)、最湿季度平均温度(Bio8,0.3305)、海拔(Alt,0.2974)、昼夜温差与年温差比值(Bio3,0.2504);测试增益由高到低前 10 个环境变量依次为年平均温度(Bio1,0.8648)、年均降水量(Bio12,0.8354)、昼夜温差月均值(Bio2,0.8105)、最暖季度降水量(Bio18,0.7546)、温度季节性变化的标准差(Bio4,

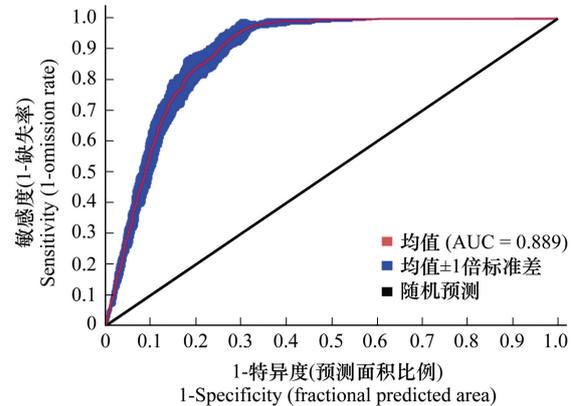


图 3 MaxEnt 模型的 ROC 检验  
Fig.3 ROC test of the MaxEnt model

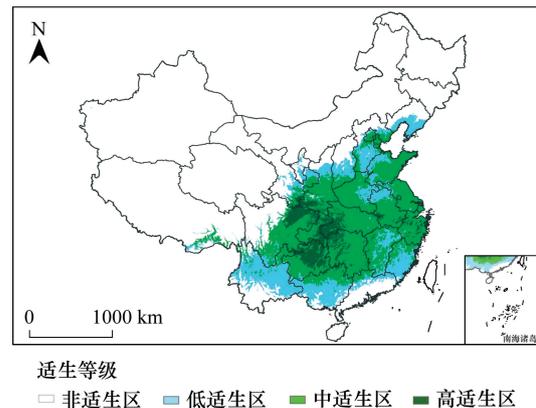


图 4 基于 MaxEnt 模型的我国杜仲潜在适生区分布示意图  
Fig.4 Potential suitable area of *E. ulmoides* in China applied by the MaxEnt model

0.5913)、降水量季节性变异系数(Bio15,0.4321)、最暖月份最高温(Bio5,0.3631)、最湿季度平均温度(Bio8,0.3403)、海拔(Alt,0.2994)、昼夜温差与年温差比值(Bio3,0.2711)。贡献率和置换重要值也是评估各环境变量影响程度的重要指标,由表3可以看出,年均降水量(Bio12,53.8657)、年平均温度(Bio1,24.1872)、温度季节性变化的标准差(Bio4,11.1563)、海拔(Alt,3.587)、坡度(Slp,2.2436)5个环境变量的贡献率位居前列,累积贡献率在95.0%以上;置换重要值由高到低前5个环境变量依次为年平均温度(Bio1,54.7322)、温度季节性变化的标准差(Bio4,17.1309)、年均降水量(Bio12,6.5668)、海拔(Alt,6.5239)和昼夜温差月均值(Bio2,6.0536)。

表2 30个省级行政区不同等级杜仲适生区分布面积估计/万 km<sup>2</sup>

Table 2 Potential suitable area of *E. ulmoides* of 30 provincial-level administrative regions in China

省级行政区名称 Province name	低适生区 Lowly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	高适生区 Highly suitable area	潜在适生区 Potential suitable area
四川省	3.683	13.338	6.072	23.092
云南省	17.677	4.499	0.521	22.697
湖南省	0.904	12.545	5.940	19.389
湖北省	1.608	10.881	5.068	17.557
河南省	2.922	12.579	0.609	16.110
贵州省	0.298	9.275	6.403	15.975
陕西省	4.179	8.164	3.433	15.775
广西壮族自治区	8.770	6.121	0.545	15.436
江西省	5.771	8.949	0.521	15.242
山东省	5.605	9.190	0.000	14.795
安徽省	5.353	6.626	1.334	13.314
河北省	8.111	3.174	0.021	11.306
福建省	3.331	7.229	0.018	10.578
江苏省	6.111	3.364	0.035	9.510
浙江省	0.692	5.999	2.465	9.156
甘肃省	5.814	2.457	0.723	8.994
山西省	5.924	2.411	0.011	8.346
重庆市	0.068	3.605	4.044	7.716
广东省	5.186	1.964	0.065	7.215
辽宁省	5.396	0.204	0.072	5.672
西藏自治区	2.246	1.500	0.006	3.752
宁夏回族自治区	1.664	0.013	0.000	1.677
北京市	0.556	0.954	0.104	1.614
天津市	0.916	0.283	0.000	1.200
上海市	0.209	0.333	0.000	0.542
新疆维吾尔自治区	0.417	0.000	0.000	0.417
青海省	0.085	0.000	0.000	0.085
内蒙古自治区	0.037	0.000	0.000	0.037
吉林省	0.015	0.000	0.000	0.015
台湾省	0.001	0.000	0.000	0.001

综合 Jackknife 检验、贡献率和置换重要值分析结果,得出年平均温度(Bio1)、年均降水量(Bio12)、温度季节性变化的标准差(Bio4)、海拔(Alt)、坡度(Slp)是影响我国杜仲潜在适生区分布的主导因子。基于 Maxent 模型得出5个主导环境变量的响应区间如图6所示,以存在概率大于0.6作为杜仲最宜适生区的遴选条件,5个主导环境变量的值域分别为:年平均温度介于11—16℃、年均降水量介于700—1450 mm、温度季节

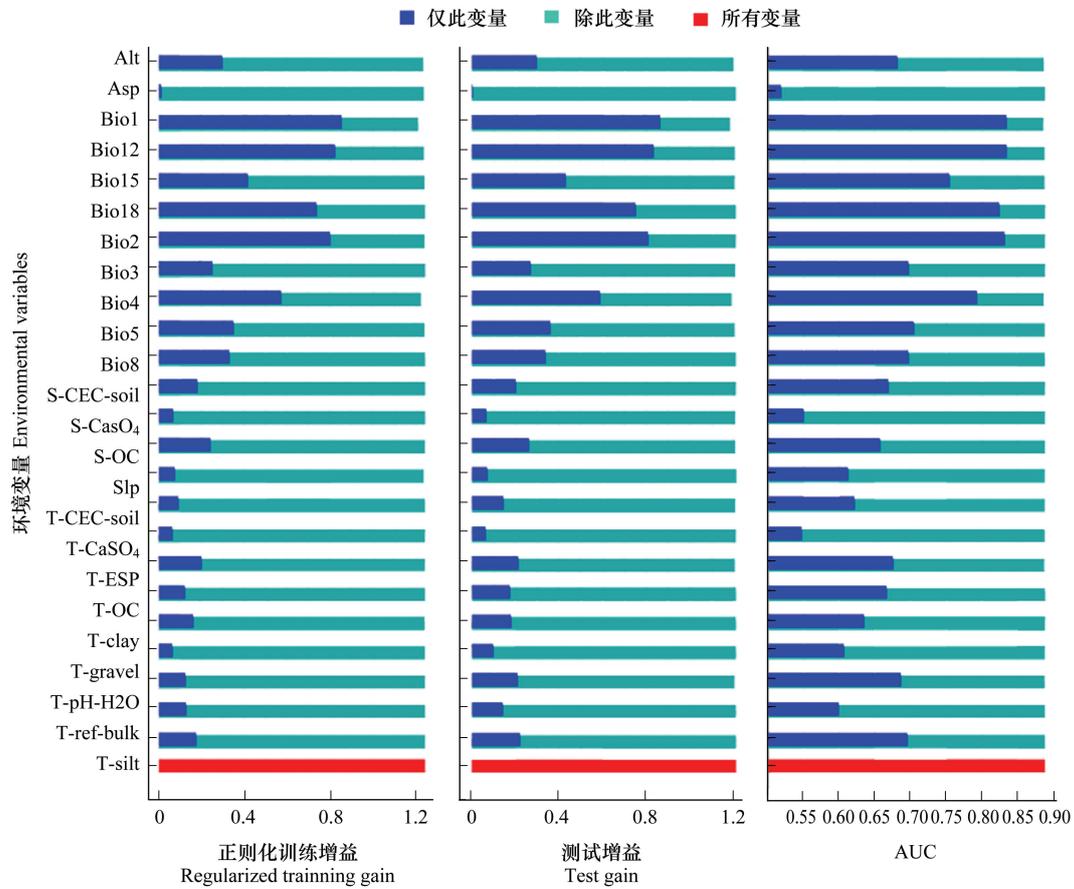


图 5 环境变量的 Jackknife 检验

Fig.5 Jackknife test of the environmental variables

性变化的标准差在 820 以下、海拔在 1400m 以下、坡度在 24°以下。

表 3 环境变量建模贡献率和置换重要值

Table 3 Contribution rate and permutation importance value of each environmental variable

环境变量 Environmental variable	贡献率 Contribution rate	累积贡献率 Accumulative contribution rate	置换重要值 Permutation importance value	环境变量 Environmental variable	贡献率 Contribution rate	累积贡献率 Accumulative contribution rate	置换重要值 Permutation importance value
Bio12	53.8657	53.8657	6.5668	T-ref-bulk	0.131	99.5384	0.0995
Bio1	24.1872	78.0529	54.7322	T-pH-H <sub>2</sub> O	0.1283	99.6667	0.217
Bio4	11.1563	89.2092	17.1309	T-ESP	0.1048	99.7715	0.7155
Alt	3.587	92.7962	6.5239	S-CEC-soil	0.0885	99.86	0.1186
Slp	2.2436	95.0398	1.5888	S-CaSO <sub>4</sub>	0.0398	99.8998	0.227
Bio3	1.8094	96.8492	0.705	T-CEC-soil	0.0313	99.9311	0.1406
Bio2	0.7456	97.5948	6.0536	T-CaSO <sub>4</sub>	0.0274	99.9585	0.0713
Bio5	0.5355	98.1303	2.2801	T-gravel	0.02	99.9785	0.0433
Bio15	0.4523	98.5826	0.7457	S-OC	0.0109	99.9894	0.0018
Asp	0.339	98.9216	0.8421	Bio18	0.008	99.9974	0.1554
T-clay	0.271	99.1926	0.6105	T-OC	0.0016	99.999	0.0119
T-silt	0.2148	99.4074	0.4185	Bio8	0.0009	99.9999	0

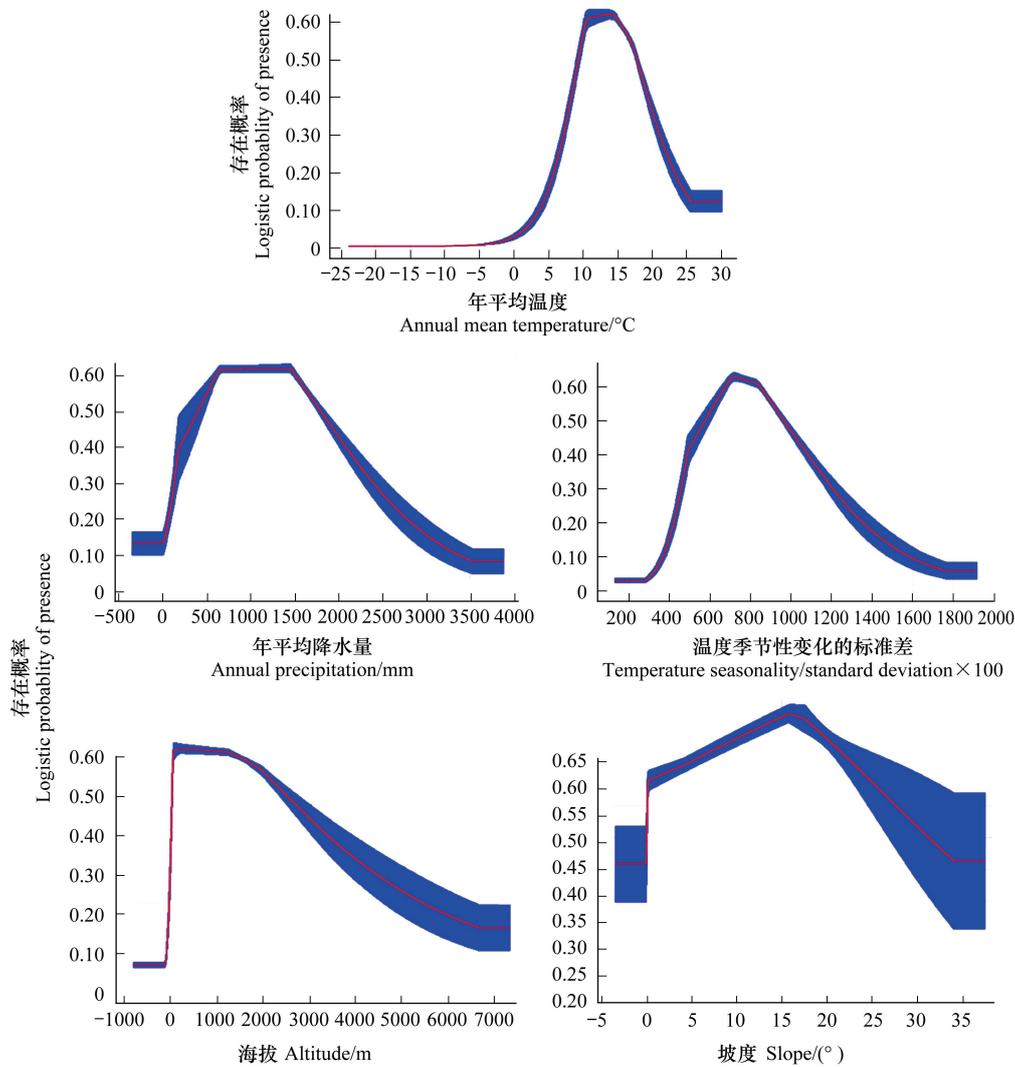


图 6 5 个主导环境变量的响应曲线

Fig.6 Response curve of 5 main environmental variables

### 3 讨论

预估我国杜仲潜在的适生区分布,对杜仲资源保护、引种栽培、精细化管理以及可持续利用具有重要意义。本研究利用 601 个杜仲地理分布点和 22 个环境变量数据,通过 MaxEnt 模型对我国杜仲潜在适生区进行预测,预测结果准确度在“很准确”的标准之上,说明模型预测结果可信度高,适用于我国杜仲适生区的估计与划分。与早期研究结果不同,本研究认为杜仲高适生区分布还应包括鲁东低山丘陵平原地区、浙闽中低山丘陵谷地地区、武夷山中低山丘陵谷地区以及赣南低山丘陵盆地区,这在实地考察以及一些文献报道中也初步予以证实<sup>[3,34-37]</sup>。根据 MaxEnt 模型及 ArcGIS 软件统计分析结果,我国杜仲潜在适生区分布区面积达 277.61 万 km<sup>2</sup>,其中高适生区面积达 38.01 万 km<sup>2</sup>,这与目前国内杜仲栽植面积(约 35 万 hm<sup>2</sup>)具有显著差距,说明杜仲在我国各适生区引种栽植的潜力很大,除四川、湖南、贵州、湖北、陕西等传统产区外,今后在河南、山东、安徽、江西、浙江等省区也有巨大的发展空间。

综合 Jackknife 检验、贡献率和置换重要值分析结果,年平均温度、年均降水量、温度季节性变化的标准差、海拔、坡度 5 个环境变量的重要性位居前列,而 12 个土壤变量的贡献率之和仅在 1% 左右,说明影响我国杜仲适生分布的主要环境因素为气候,其次为地形,而土壤因素的影响程度较小。温度和降水作为最主要的

两个气候生态因子常被用来解释大尺度上植物的分布格局<sup>[38]</sup>。年平均温度和年均降水量分别指征研究单元内重要的热量指标和水分指标;温度季节性变化的标准差则主要反映研究单元内温度的季节分异,用于指征气候的稳定性<sup>[38-39]</sup>;海拔包含了温度、水分、光照、土壤肥力等诸多环境因子的剧烈变化,海拔梯度引起的环境异质性往往影响着植物的垂直分布格局<sup>[40-41]</sup>;坡度是水平方向上水分、土壤养分的驱动因子,对土壤厚度及其理化性质有显著影响,进而影响着林木的定居和生长<sup>[42-43]</sup>。本研究推算出杜仲最宜适生区 5 个主导环境变量的值域分别为:年平均温度介于 11—16℃、年均降水量介于 700—1450 mm、温度季节性变化的标准差在 820 以下、海拔在 1400 m 以下、坡度在 24°以下,这与部分杜仲生理生态研究所得出的结果相吻合<sup>[44-46]</sup>,同时也进一步说明本研究所采用 MaxEnt 模型估算的合理性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 杜红岩, 胡文臻, 俞锐. 中国杜仲橡胶资源与产业发展报告(2013). 北京: 社会科学文献出版社, 2013.
- [ 2 ] 顾观光. 神农本草经(第三版). 北京: 学苑出版社, 2007.
- [ 3 ] 胡安徽. 唐至清代渝鄂湘黔界邻地区厚朴和杜仲产地的分布变迁. 中国野生植物资源, 2016, 35(1): 46-48, 52-52.
- [ 4 ] 耿宝印, Manchester S R, 路安民. 杜仲属果实化石在中国的首次发现. 科学通报, 1999, 44(15): 1648-1651.
- [ 5 ] Wang Y F, Li C S, Collinson M E, Lin J, Sun Q G. *Eucommia* (Eucommiaceae), a potential biothermometer for the reconstruction of paleoenvironments. American Journal of Botany, 2003, 90(1): 1-7.
- [ 6 ] 郭双兴. 我国发现最早的杜仲化石//中国古生物学会第 22 届学术年会论文摘要集. 成都: 中国古生物学会, 2003.
- [ 7 ] 周政贤. 中国杜仲. 贵阳: 贵州科技出版社, 1993.
- [ 8 ] 何方, 张康健, 王承南, 王桂芝, 杜红岩. 杜仲产区的划分. 经济林研究, 2010, 28(2): 86-87.
- [ 9 ] 周政贤, 郭光典. 我国杜仲类型、分布及引种. 林业科学, 1980, 16(S1): 84-91.
- [ 10 ] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [ 11 ] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [ 12 ] 王茹琳, 李庆, 何仕松, 刘原. 中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 27-37.
- [ 13 ] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [ 14 ] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [ 15 ] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [ 16 ] 康传志, 王青青, 周涛, 江维克, 肖承鸿, 谢宇. 贵州杜仲的生态适宜性区划分析. 中药材, 2014, 37(5): 760-766.
- [ 17 ] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1230-1237.
- [ 18 ] 肖敏, 胡卓玮, 董琳. 基于 MaxEnt 模型的油松潜在地理分布研究. 地理空间信息, 2017, 15(6): 34-37.
- [ 19 ] 吴良, 徐正刚, 张婉, 丁一, 唐永成, 赵运林. 基于 MaxEnt 模型的中国构树潜在适生分布研究. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(5): 40-45.
- [ 20 ] 张飞, 陈随清, 王利丽, 张涛, 张小波, 朱寿东. 基于 Maxent 和 ArcGIS 的山茱萸生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2017, 42(16): 3078-3083.
- [ 21 ] 崔晋亮, 卫海燕, 桑满杰, 朱俐南, 顾蔚. 基于最大熵模型的蓝莓潜在分布区预测. 山东农业科学, 2015, 47(9): 36-41, 45-45.
- [ 22 ] 孙莉, 王山, 王正元, 冯锋. 基于最大熵模型的枸杞生态适宜区预测. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2018, 39(2): 143-147.
- [ 23 ] 张春华, 和菊, 孙永玉, 李昆. 基于 MaxEnt 模型的毛红椿适生区预测. 林业科学研究, 2018, 31(3): 120-126.
- [ 24 ] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [ 25 ] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, Van Velthuisen H T, Verelst L, Wiberg D. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). Rome, Italy: IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, 2008: 10.
- [ 26 ] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Townsend Peterson A. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [ 27 ] 景鹏飞, 武坤毅, 龚晔, 韩立敏, 崔浪军. 药用植物细辛在中国的潜在适生区分布. 植物分类与资源学报, 2015, 37(3): 349-356.
- [ 28 ] 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子. 生态学报, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [ 29 ] 邵慧, 田佳倩, 郭柯, 孙建新. 样本容量和物种特征对 BIOCLIM 模型模拟物种分布准确度的影响——以 12 个中国特有落叶栎树种为例. 植物生态学报, 2009, 33(5): 870-877.

- [30] Mastrandrea M D, Field C B, Stocker T F, Edenhofer O, Ebi K L, Frame D J, Held H, Kriegler E, Mach K J, Matschoss P R, Plattner G K, Yohe G W, Zwiers F W. Guidance note for lead authors of the ipcc fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010.
- [31] 许志东, 丁国华, 刘保东, 池春玉, 肖玮, 金晓霞, 李春焯. 假苍耳的地理分布及潜在适生区预测. 草业学报, 2012, 21(3): 75-83.
- [32] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [33] 程维明, 周成虎, 李炳元, 申元村. 中国地貌区划理论与分区体系研究. 地理学报, 2019, 74(5): 839-856.
- [34] 王华田, 徐建国. 山东省杜仲引种适应性分析. 生态学杂志, 1996, 15(2): 64-67.
- [35] 宓秀民, 祝清义, 张晓波, 李登开, 隋道庆, 孙安农, 程广秀, 宋学智, 王宏年, 王发卫, 陈伟. 山东省发展杜仲前景分析. 山东林业科技, 1996, (1): 37-39.
- [36] 唐光旭, 唐仕斌, 李勇, 张丽萍, 吉庆森, 施大炉, 余厚存. 江西引种杜仲生长和生物量的调查研究. 江西林业科技, 1999, (5): 29-31, 38-38.
- [37] 胡光煌. 武夷山市发展杜仲产业的探索. 福建林业, 2016, (2): 45-48.
- [38] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的尺度分布格局及其气候解释. 生物多样性, 2008, 16(5): 470-476.
- [39] 倪健. 全球变化研究中的生物气候指标. 第四纪研究, 2017, 37(3): 431-441.
- [40] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 20-28.
- [41] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 吴杰, 杜忠, 刘兴良. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722-730.
- [42] 区余端, 王华南, 张璐, 苏志尧. 南岭国家级自然保护区林下植物分布的地形相关性. 武汉植物学研究, 2009, 27(1): 41-46.
- [43] 区余端, 苏志尧, 李镇魁, 林义辉. 地形因子对粤北山地森林不同生长型地表植物分布格局的影响. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1107-1113.
- [44] 李浚明, 陈光友. 杜仲的研究与开发. 生物学通报, 1996, 31(6): 43-44.
- [45] 季志平, 何佳林, 吕平会. 杜仲萌芽的最适温度观测试验. 林业科技通讯, 2017, (8): 20-21.
- [46] 毕俊国. 陕北黄土丘陵区杜仲的生长规律与生理特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.