

# 板栗树种在中国水土流失区的分布及其环境因子

唐兴港<sup>1</sup>, 袁颖丹<sup>2</sup>, 张星<sup>1</sup>, 张金池<sup>1</sup>

(1.南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室

南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 2.扬州大学 园艺与植物保护学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** [目的] 在当前气候背景下预测板栗树种在中国的空间分布和生态特征, 为板栗树种的合理引种、产业持续发展以及在水土流失地区的应用提供理论支撑。[方法] 基于 261 个分布点和 40 个环境变量, 利用 MaxEnt 模型预测板栗树种的潜在地理分布并确定影响其分布的主要环境因子。通过对比国家级水土流失区和板栗树种的潜在分布确定其应用范围。[结果] 年均降水量、年平均温度、表层土壤酸碱度、平均日温差和温度季节变化方差 5 个环境变量对板栗树种适生区的分布贡献较大, 累积贡献率在 83% 以上。同时板栗树种喜水怕涝, 适合在酸性土壤中生长。潜在适生区面积总计为  $2.92 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 约占国土总面积的 30.46%, 其中高度适生区主要分布在四川省和云南省的东北部, 湖北省、湖南省和江西省的大部分地区, 陕西省、河南省、安徽省、浙江省和山东省的部分地区。中度适生区分布以高度适生区为中心向外扩展。[结论] 对比中国水土流失重点预防和重点治理区, 除青藏地区、西北地区和东北地区不太适宜板栗树种的引种外, 在其他水土流失区都可以考虑选择板栗树种作为水土保持的经济树种。基于 MaxEnt 模型的板栗树种潜在分布预测拓展了人们对板栗树种分布和生态特征的认识, 同时为水土保持功能区的树种选择提供了科学依据。

**关键词:** 板栗树种; MaxEnt 模型; 潜在适生区; 水土保持; 环境因子

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0345-08

**中图分类号:** S157.9

**文献参数:** 唐兴港, 袁颖丹, 张星, 等. 板栗树种在中国水土流失区的分布及其环境因子[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 345-352. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.045; Tang Xinggang, Yuan Yingdan, Zhang Xing, et al. Distribution and environmental factors of *Castanea mollissima* in soil and water loss areas in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 345-352.

## Distribution and Environmental Factors of *Castanea Mollissima* in Soil and Water Loss Areas in China

Tang Xinggang<sup>1</sup>, Yuan Yingdan<sup>2</sup>, Zhang Xing<sup>1</sup>, Zhang Jinchi<sup>1</sup>

(1. Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Jiangsu Province Key Laboratory of

Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution and ecological characteristics of *Castanea mollissima* in China under the current climate background were predicted in order to provide a theoretical support for the rational introduction and application of *Castanea mollissima* in soil and water loss areas. [Methods] Based on 261 occurrence points and 40 environmental variables, MaxEnt model was used to predict the potential distribution of *Castanea mollissima*. Environmental factors affecting the distribution of *Castanea mollissima* were also determined. The application scope was determined by comparing the potential distribution of *Castanea mollissima* with the national soil and water loss areas. [Results] Five environmental variables, including annual precipitation, annual mean temperature, topsoil pH value, mean diurnal range and temperature seasonality, contributed significantly to the distribution of suitable areas of *Castanea mollissima*, and the

收稿日期: 2020-09-14

修回日期: 2020-12-15

资助项目: 江苏省农业科技自主创新项目“典型困难立地生态经济防护林营建技术方案”[CX(17)1004]; 林业公益性行业科研专项“露采石矿植被恢复与重建关键技术研究及示范”(201504406); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者: 唐兴港(1997—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: simaojiu@126.com。

通讯作者: 张金池(1962—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和林业生态工程方面的研究。Email: zhang8811@njfu.edu.cn。

cumulative contribution rate was more than 83%. At the same time, *Castanea mollissima* likes water but is afraid of water logging, so it is suitable for growing in acid soils. The potential suitable areas were  $2.92 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, accounting for 30.46% of total nation land areas. The highly suitable areas were mainly in the northeast of Sichuan Province and Yunnan Province, most areas of Hubei Province, Hu'nan Province and Jiangxi Province, and some areas of Shaanxi Province, He'nan Province, Anhui Province, Zhejiang Province and Shandong Province. The distribution of moderately suitable areas expanded outward with the centre of highly suitable areas. [Conclusion] Compared with the national key prevention areas and key control areas of soil and water loss in China, *Castanea mollissima* can be selected as economic tree species for soil and water conservation in other areas, except for Qinghai-Tibet region, the northwest region and the northeast regions. The potential distribution prediction of *Castanea mollissima* based on MaxEnt model has expanded the understanding of the distribution of ecological characteristics of Chinese *Castanea mollissima*, and provided a scientific basis for the selection of tree species in the functional areas of soil and water conservation.

**Keywords:** *Castanea mollissima*; MaxEnt; potential suitable areas; soil and water conservation; environmental factors

改革开放以来中国的快速发展立足于资源与环境的消耗,这使得当前环境与发展的矛盾逐渐成为新的瓶颈<sup>[1]</sup>。作为生态环境决定因素和生产生活物质基础的水土资源面临着严峻的挑战<sup>[2]</sup>。据统计,中国 2/3 以上的国土面积是山地丘陵,现有水土流失面积  $2.74 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,每年新增治理水土流失面积约  $5.50 \times 10^4$  km<sup>2</sup><sup>[3-4]</sup>。水土资源的流失影响生态安全和经济发展,威胁人民生命财产安全<sup>[5]</sup>。在 2015 年 8 224 起地质灾害中,滑坡和泥石流分别占 68% 和 6%,因灾害造成的直接经济损失达 24.9 亿元<sup>[6]</sup>。因此,防治水土流失是确保社会稳定发展的重要前提。林业作为中国生态建设领域的主体能够起到保护生态环境和维持生态平衡的作用,植树造林增加森林覆盖率是防治水土流失的关键。树木根系通过物理和生物作用来提高土体的抗剪强度,同时地表的枯落物层也可以起到增加下渗和削弱洪峰的作用<sup>[7]</sup>。植被的叶片可以拦截降雨,减少雨水降落时对土壤表面的冲刷和侵蚀,有效提高土壤的稳定性,进而起到保护水土资源的作用<sup>[8]</sup>。由于地理空间的不同,水土流失区的地形地貌、生态环境和土壤性质等因素不尽相同,这使得水土保持林的树种选择及配置成为保护水土资源的重点和难点。随着地理信息技术以及生态环境与统计模型的发展,生态位模型可以通过最大程度地分离,量化和比较研究区域的气候和空间环境条件,确定环境因子和物种分布之间的稳定关系<sup>[9]</sup>。根据最大信息熵的状态参数可以估计物种的适宜分布范围,这将为不同地理空间下水土保持树种的选择提供理论依据,同时有利于制定适宜的植物引种和森林经营策略。目前, BIOCLIM, GMPGIS, CLIMEX, GARP 和 MaxEnt 等<sup>[10-13]</sup>模型在动植物潜在分布区的预测方面应用颇多且具有广泛的前景。在这些模型中,MaxEnt 模型是一种在 JAVA 和最大熵理论的

基础上发展起来的用来评估物种潜在适生分布的工具,其可以模拟气候对森林植被潜在分布的影响并合理预测在不同环境条件下物种可能出现的地区<sup>[14]</sup>。在物种潜在分布的预测方面,其较强的预测能力和相对较高的预测精度是 MaxEnt 模型相较于其他模型的优点,同时可以支持多种不同的变量类型,灵活性强,结果容易解释,且在样本数量较少的情况下依然可以获得令人满意的预测效果<sup>[15]</sup>。

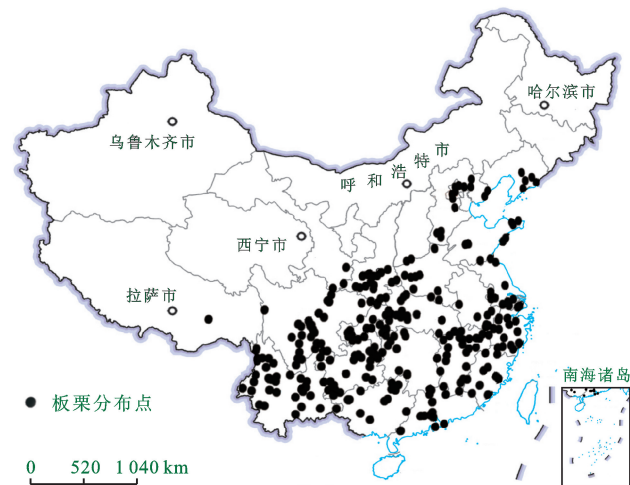
板栗树种(*Castanea mollissima*)属于被子植物门(Angiospermae),最早记载于《诗经》,栽培历史悠久,以落叶乔木为主,少数为灌木<sup>[16]</sup>。其具有较好的对温度和水分的适应性,在平均温度 8~15 °C,降水量 650~750 mm 的地区都适合栽培<sup>[17]</sup>。板栗树种多分布在沙砾质壤土为主的山地丘陵地区,在土壤贫瘠、坡度较大的边坡也能正常生长。将板栗林建设与水土保持的工程措施相结合,在增加地表覆盖、改良土壤和减少水土流失的同时,还能获得经济效益,提高人民生活水平。为此,本研究采用 MaxEnt 模型对板栗树种在全国范围内的空间分布格局进行预测并确定其主要影响因子。通过数据库和文献检索确定 261 个板栗树种分布点和 40 个环境变量数据,结合 ArcGIS 平台进行建模和分析,科学地预测当前板栗树种的空间分布现状及其生态特征。对比中国水土流失区的划分情况,为板栗树种在经济林建设中的应用提供理论依据。这有助于板栗树种的适地种植和资源保护,同时也为实现落后地区的水土保持和经济可持续发展提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 地理分布数据

从全球生物多样性数据库(GBIF, <http://www.gbif.org/>),中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)

www.cvh.org.cn/), 中国在线植物志(eFlora, <http://www.eflora.cn>) 和中国知识基础设施工程(CNKI, <http://www.cnki.net/>) 获取 1950—2017 年板栗树种在中国的分布点记录。剔除地理信息缺失和坐标经纬度重复的样本信息, 同时核查样本点的植物名录。对于经纬度缺失的有效记录, 可以利用经纬度坐标拾取网站(<http://www.gpsspg.com/>) 进行查询, 确定分布点对应的经纬度信息。另外, 为避免分布点的地理自相关, 板栗树种分布点在同一个像元内仅保留 1 个, 将获得的 261 个板栗树种分布点保存为(.csv)文件供后续使用。最后, 基于 ArcGIS 10.5 软件和 MaxEnt 模型的预测结果来绘制板栗树种的适生区。ArcGIS 10.5 是由美国环境系统研究所公司开发的用于数据格式转换和重新分类的综合地理信息系统平台, 中国行政区划比例尺矢量图由国家基础地理信息系统提供(<http://mail.nsd.gov.cn/>)。板栗树种在中国的分布点如图 1 所示。



注: 该图基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2019)1823 的标准地图, 边界无修改。下同。

图 1 中国板栗树种分布点

## 1.2 环境变量

为预测板栗树种在中国的适生区分布, 本研究选取 40 个环境变量数据, 包括 19 个气候变量, 20 个土壤变量和 1 个地形变量。生物气候变量(Bio1—19)是从 WorldClim 数据库(<http://www.worldclim.org>)下载的, 版本为 2.1(1970—2000 年气候数据, 2020 年发布), 坐标系为 WGS84, 空间分辨率为 30" (约 1 km<sup>2</sup>)<sup>[18]</sup>。气候变量反映了温度和降水的特点及其季节性变化特征<sup>[19]</sup>。土壤变量和地形变量来自世界土壤数据库(<http://www.fao.org/>, HWSVDV.1.2), 空间分辨率为 30", 地形和土壤变量主要反映了陆地海拔高程和表层土壤(0—30 cm)的理化性质等特

征。40 个环境变量的多重共线性会影响模型预测的精度和准确性, 所以对上述变量的相关性采用 Pearson 相关分析法进行检验。若两个变量的相关系数大于 0.8 说明两者具有较强的相关性, 应删除两个相关变量中的一个来确保模型模拟的准确性<sup>[20]</sup>。气候变量、土壤和地形变量中各变量间的相关性如图 2 所示, 根据相关性检验最终确定 25 个环境变量用于模型建模(表 1)。

表 1 用于板栗树种分布模型预测的环境变量

变量描述	名称简写
年均降水量/mm	Bio12
年平均温度/℃	Bio1
表层土壤酸碱度[-lg(H <sup>+</sup> )]	T_pH_H <sub>2</sub> O
平均日温差/℃	Bio2
温度季节变化方差/℃	Bio4
土壤参考深度/cm	Ref_Depth
极端最高温/℃	Bio5
土壤有效含水量范围/%	Awc_Class
表层土壤硫酸盐含量/%	T_CaSO <sub>4</sub>
高程/m	Elev
黏性层土壤的阳离子交换能力/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	T_CEC_clay
沙含量/%	T_Sand
最干月降水量/mm	Bio14
季节降水量变异系数	Bio15
等温性	Bio3
最湿季均温/℃	Bio8
表层土壤碎石石体积百分比/%	T_Gravel
顶层土壤质地	T_Texture
排水等级	Drainage
表层土壤粉沙粒含量/%	T_Silt
表层土壤阳离子交换能力/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	T_CEC_soil
最暖季降水量/mm	Bio18
电导率/(dS·m <sup>-1</sup> )	T_ECE
表层土壤可交换钠盐含量/%	T_ESP
表层土壤有机碳含量/%	T_OC

## 1.3 模型预测及评估

基于板栗树种分布点和环境变量, MaxEnt 模型 V3.4.1 被用于适生区分布的分析和预测。将 25 个环境变量和 261 个板栗树种分布点加载到 MaxEnt 模型中进行建模和分析。参数设置: 将数据按照 3:1 的比例分配给训练集(training data)和测试集(testing data), 即 25% 的数据用于测试模型的预测能力<sup>[21]</sup>。通过 R 语言对特征组合(FC)和正则化系数(RM)进行优化, 其他参数则保留默认值。模型进行 500 次迭代运算, 预测结果以 ASCII 文件类型输出<sup>[22]</sup>。以假阳性率(FPR)和真阳性率(TPR)为横、纵坐标的 ROC 曲线, 其曲线面积为 AUC 值<sup>[23]</sup>。ROC 曲线下的面积是评估模型可靠性的重要方法, 通常, AUC 值介于 0.8~0.9 时, 认为预测结果很准确, 在 0.9 到 1.0 范围内时则说明预测结果非常优秀<sup>[24-25]</sup>。

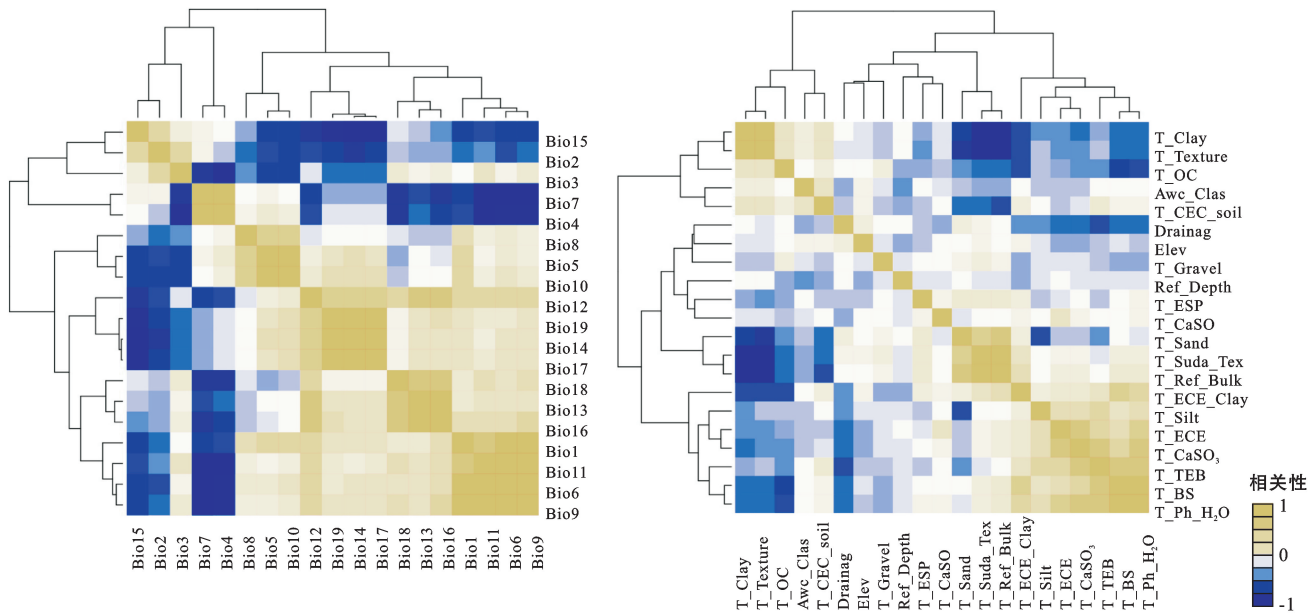


图 2 影响板栗树种分布的 40 个环境变量(气候、土壤)相关性

#### 1.4 适生等级划分和主导环境因子分析

利用 ArcGIS 10.5 软件对板栗树种预测结果的 (.asc) 文件进行重分类, 参照 IPCC 报告有关评估可能性的划分方法,  $p \geq 0.6$  为高度适生区,  $0.4 \leq p < 0.6$  为中度适生区,  $0.2 \leq p < 0.4$  为低度适生区, 利用 ArcGIS 10.5 软件统计不同等级适生区的分布面积。根据 Jackknife 检验得到每个环境变量的贡献率和置换重要值, 以此确定影响板栗树种当前分布的主要环境变量。最后将板栗树种不同等级适生区分布与中国水土流失重点防治区进行比较, 确定板栗树种在中国水土流失区的适种范围。

## 2 结果

### 2.1 模型准确性

MaxEnt 模型预测结果的准确性通过 ROC 曲线和坐标轴所包围区域的面积(AUC)来确定。在 0~1 的范围内, AUC 值与模型的预测精度成正相关, 即 AUC 值越高, 模型结果的可靠性越高<sup>[26]</sup>。模型在匹配板栗树种的发生记录和预测适生区方面表现良好, 训练集与测试集的 AUC 平均值分别为 0.901 和 0.869, 表明模型对板栗树种适生区的预测达到“极准确”与“很准确”的水平, 可以很好地用于模拟和预测板栗树种的空间分布, 预测结果可信度高。

### 2.2 板栗树种潜在地理分布

对 MaxEnt 模型的预测结果进行重分类, 将板栗树种适生区划分为高、中和低三级, 其具体分布范围如图 3 所示。板栗树种潜在适生区面积总计  $2.92 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占国土总面积的 30.46%。高度适生区面积为  $4.62 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占其适生区总面积的 15.8%, 主要分布在四川省和云南省的东北部, 湖北省、

湖南省和江西省的大部分地区, 陕西省、河南省、安徽省、浙江省和山东省的部分地区, 尤其在四川省的东北部分布最为集中。中度适生区面积为  $1.78 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占其适生区总面积的 60.9%, 主要分布在中国 800 mm 降水量线以东地区, 包括华北平原、长江中下游平原、云贵高原和四川盆地等地区。低度适生区面积为  $6.82 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占其适生区总面积的 23.3%, 主要分布在中国 400 mm 降水量线以东的地区, 包括陕西省, 山西省、河北省和辽宁省的大部分地区。

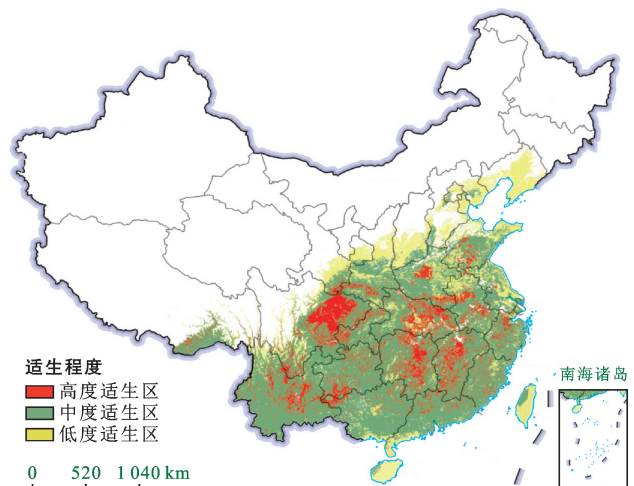


图 3 基于 MaxEnt 模型的中国板栗树种潜在适生区分布

### 2.3 板栗树种在水土流失地区的适用性

水利部《全国水土保持规划(2015—2030 年)》中划分的国家级水土流失重点预防和重点治理区如图 4 所示。其中国家级水土流失重点预防区主要分布在大小兴安岭、呼伦贝尔、长白山、燕山、阴山北麓、武陵山以及大江大河流域等地区。国家级水土流失重点治理区主要包括东北漫川漫岗、大兴安岭东麓、西辽

河和大凌河中上游等地区。水土流失区普遍存在于高原山地和大江大河流域,在降雨集中但植被覆盖率不高的山地丘陵地区尤为严重。中国长江流域由于横跨三级阶梯地形复杂,同时受到降雨和植被破坏等因素的影响,水土流失现象也十分突出。根据 MaxEnt 模型的预测结果,板栗树种高度适生区主要集中在长江流域,整个长江流域范围内均适合板栗树种的生长。在中国水土流失重点预防区中,桐柏山大别山地区、金沙江岷江及三江并流区、丹江口库区、武陵山、新安江流域、湘资沅上游、东江上中游、黄泛平原适合引种板栗树种作为预防水土流失的经济树种。在中国水土流失重点治理区中,沂蒙山泰山地区、西南诸河高山峡谷地区、金沙江下游、嘉陵江和沱江中下游、三峡库区、湘资沅上游、乌江赤水河上中游、滇黔桂岩溶石漠区和粤闽赣红壤区适合引种板栗树种作为水土保持的经济树种。根据板栗树种的潜在适生区分布,青藏地区、西北地区和东北地区不太适宜板栗树种的引种。

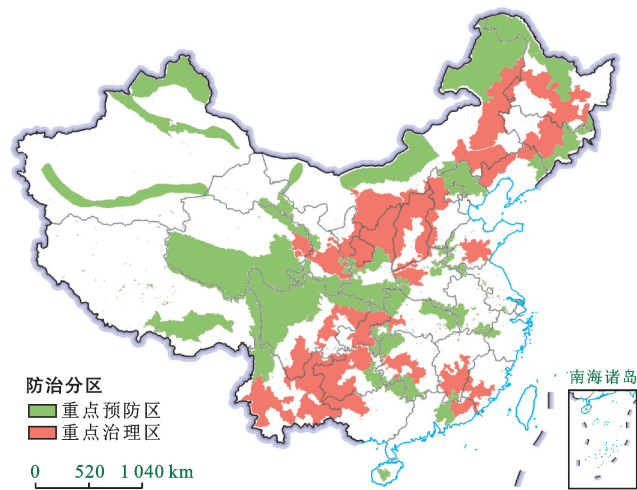


图 4 国家级水土流失重点预防和重点治理区

#### 2.4 影响板栗树种分布的主导环境变量

在板栗树种适生区分布预测中,Jackknife 检验被用于评估不同变量的重要性,进而研究环境因子对板栗树种分布的影响。在仅单一变量被使用的情况下,将 25 个环境变量按照训练增益由高到低排列,前十位的环境变量依次为年均降水量(Bio12)、年平均温度(Bio1)、最暖季降水量(Bio18)、平均日温差(Bio2)、最干月降水量(Bio14)、温度季节变化方差(Bio4)、最湿季均温(Bio8)、季节降水量变异系数(Bio15)、极端最高温(Bio5)和海拔(Elev)。环境变量按照测试增益由高到低排列,前十位的环境变量依次为年均降水量(Bio12)、年平均温度(Bio1)、最暖季降水量(Bio18)、平均日温差(Bio2)、最干月降水量(Bio14)、温度季节变化方差(Bio4)、最湿季均温

(Bio8)、季节降水量变异系数(Bio15)、极端最高温(Bio5)和表层土壤可交换钠盐含量(T\_ESP)。贡献率和置换重要值也是评估环境变量影响程度的重要指标。由表 2 可以看出,年均降水量(Bio12)、年平均温度(Bio1)、表层土壤酸碱度(T\_Ph\_H<sub>2</sub>O)、平均日温差(Bio2)和温度季节变化方差(Bio4)这 5 个环境变量的贡献率位居前列,累积贡献率在 83% 以上,环境变量的响应曲线见图 5。

表 2 影响板栗树种分布的前 10 环境变量建模贡献率和置换重要性

环境变量	贡献率/%	置换重要性
Bio12	43.6	27.3
Bio1	24.7	34.8
T_Ph_H <sub>2</sub> O	7.5	4.7
Bio2	3.8	0.3
Bio4	3.8	3.7
Ref_Depth	3.4	0.4
Bio5	3.1	2.6
Awc_Class	1.3	0.5
T_CaSO <sub>4</sub>	1.3	3.2
Elevation	1.1	6.6

### 3 讨论

最大熵理论最早提出于 1957 年,MaxEnt 模型便是基于这一理论和 JAVA 语言发展而来的,目前已成为最常用的物种分布模型<sup>[27]</sup>。在评估当前气候环境下动植物潜在分布的同时还能够合理预测未来气候变化条件下物种可能出现的适宜分布区,以此判断环境对物种分布区迁移的影响<sup>[28-30]</sup>。板栗树种的中、高度适生区主要分布在中国 800 mm 降水量线以东地区,其中高度适生区主要集中在长江流域,在中国的整个南方地区具有重要的应用潜力。对其他物种的预测发现中国西南地区的秦巴山、横断山脉、云贵高原和四川盆地等是漆树的主要适生区,这为漆树的合理栽培提供了依据<sup>[31]</sup>。赤桉主要分布在东南沿海丘陵、南岭山地和云贵高原西部,未来气候变化将使得赤桉的适生环境进一步扩展<sup>[32]</sup>。但同样的气候变化背景下,未来胡杨不同等级的潜在适生区面积均有不同程度的缩小,且整体上呈现向高海拔区域迁移的趋势<sup>[33]</sup>。与此同时,MaxEnt 模型还在物种入侵、病虫害防治和其他动物的适生区研究中取得了良好的预测效果<sup>[34-36]</sup>。值得注意的是,在应用模型预测时由于参数设置缺乏准确的评价指标,参数设置对模型过度拟合的影响尚需进一步研究。同时概率指数模型在预测结果中的应用可能导致预测值超出研究区域气候条件的范围。因此,当外推转移到另一个研究区域或未来(过去)的气候条件时,需要特别注意。

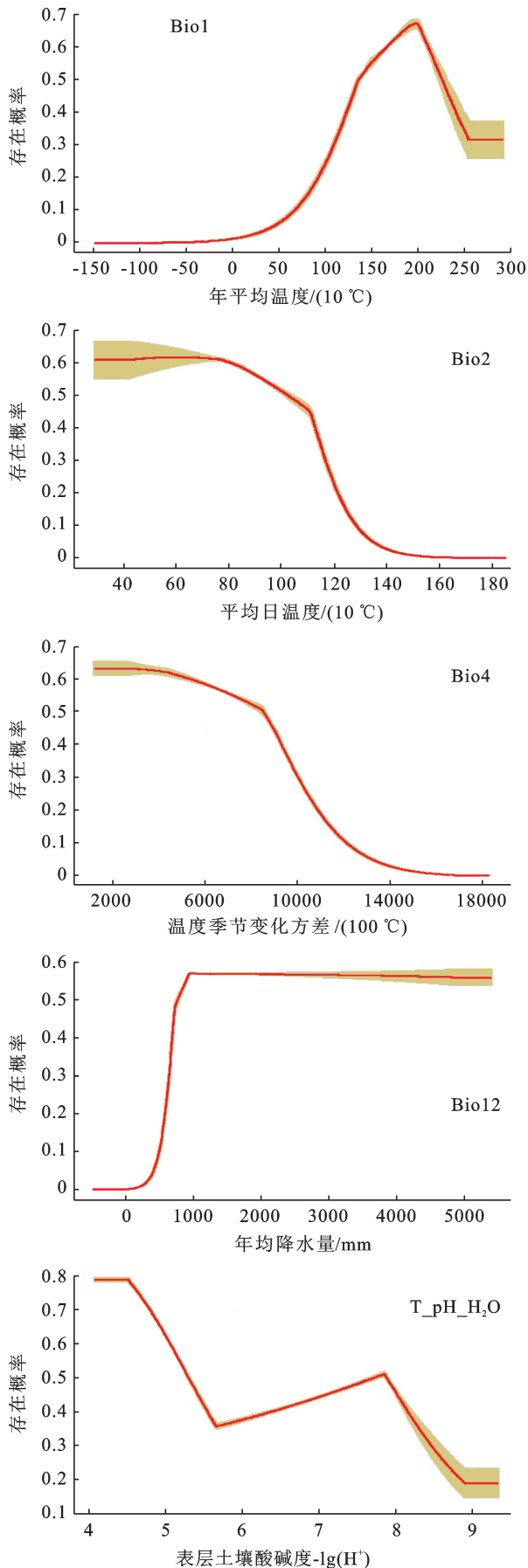


图 5 影响板栗树种分布的主导环境变量的响应曲线

通过对板栗树种潜在适生区分布和环境因子的关系进行研究, 结果发现年均降水量(Bio12)、年平均温度(Bio1)、表层土壤酸碱度(T\_Ph\_H<sub>2</sub>O)、平均日温差(Bio2)和温度季节变化方差(Bio4)是影响板栗树种适生区分布的最主要环境变量, 其累计贡献率在83%以上。年平均温度、年均降水量和温度季节变化方差分别指征热量指标、水分指标以及气候的稳定性。在57%~64%的田间持水量下, 板栗树种具有良好的生长状态, 其适宜栽培在多雨湿润的气候条件下。在一定的范围内, 降雨量与板栗树种产量成正比, 但板栗树种在土壤水分过高时其根系容易被泡胀, 造成板栗树种的减产甚至枯萎, 说明其耐涝性较差<sup>[37]</sup>。酸碱度pH值为4.6~7.5和含盐量小于0.2%的土壤最适宜板栗树种的栽植, 当土壤含盐、碱量较高时会引起渗透压的改变, 造成根毛细胞脱水, 最后导致植物死亡, 在需水怕涝的同时, 酸性土壤更加适合板栗树种的生长<sup>[38]</sup>。热量影响植物的生长速度和光合效率, 板栗树种生长环境的温度高低是决定其丰欠的关键因素, 因为冬季低温会造成栗树冻害, 影响其来年的生长<sup>[39]</sup>。属于北亚热带季风气候的浙江省中部和东部地区年均温15~17 °C, 板栗树种生长良好, 其产量占全省的60%以上<sup>[40]</sup>。温差有利于植物养分的累积, 促使植物更好更快的生长。在一定范围内适当扩大温差能够提高植株内源激素, 通过提高植物光合作用增加植物干物质的生成量<sup>[41]</sup>。相反, 过高的温差会抑制植物生长以及营养物质的合成与积累。

水土流失是中国水土资源面临的严重威胁, 地形和气候条件的异质性使得全国范围内水土流失的发生程度不同。在水土流失重点预防区, 林草覆盖度较大, 但依然存在潜在的水土流失风险, 对此应采取保护措施来防止水土流失的发生和发展。而重点治理区内由于水土流失严重, 需要开展大规模的集中治理。板栗树种作为兼具水土保持生态功能与经济价值为一身的树种, 其在水土流失区的应用十分广泛。研究表明坡耕地改种板栗树种后明显减少了年均地表径流量、土壤侵蚀量和养分流失量<sup>[42]</sup>。其引种到长汀县河田地区后, 在防止水土流失的同时实现了丰产和早熟<sup>[43]</sup>。此外, 美国山核桃、香樟、槐树和杨树也都是优秀的兼具水土保持和经济效益的树种, 同样具有重要的应用潜力<sup>[44]</sup>。当前对水土保持树种的研究主要集中在生长状况和生理特征、土壤改良和造林技术等方面, 缺乏对不同树种在当前气候条件下的适生分布研究<sup>[45-47]</sup>。这使得水土流失区的树种选择以经验为主, 缺乏必要的理论依据。本研究以板栗树种

为研究对象,研究其适生区及主要影响因子,同时结合中国水土流失重点防治区的分布来确定适宜引种板栗树种的地区,为板栗树种在水土流失区的应用和引种栽培提供了理论基础。

## 4 结论

(1) 板栗树种潜在适生区面积总计为  $2.92 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占国土总面积的 30.46%, 主要分布在中国 400 mm 降水量线以东的地区, 高度适生区在四川省东北部分布最为集中。受热量指标、水分指标和土壤酸碱度的影响, 中国西北地区、青藏地区和东北地区不太适合板栗树种的引种和培育。

(2) 年均降水量、年平均温度、表层土壤酸碱度、平均日温差和温度季节变化方差这 5 个环境变量对板栗树种适生区分布具有较大的影响, 贡献率总和超过 83%。板栗树种喜水怕涝, 适合在酸性土壤中生长, 在一定范围内增加降雨量和温差有利于板栗树种的生长。

(3) 板栗树种的适生区分布基本覆盖中国整个南方地区和大部分的北方地区, 对比中国水土流失重点预防区, 南方地区和华北地区的水土流失地区都可以考虑选择板栗树种作为主要的经济林树种。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘毅, 杨宇. 中国人口、资源与环境面临的突出问题及应对新思考[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(2): 248-257.
- [2] 谢高地, 封志明, 沈镭, 等. 自然资源与环境安全研究进展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1424-1431.
- [3] 姜德文. 新时代水土流失治理目标及评价标准[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(2): 140-144.
- [4] 崔鹏, 王道杰, 范建容, 等. 长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 43-50.
- [5] Qin Chuangjian, Tang Zhenda, Chen Jing, et al. The impact of soil and water resource conservation on agricultural production—an analysis of the agricultural production performance in Zhejiang, China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 2(4): 102-113.
- [6] 韩笑, 张会民, 李凤燕. 我国地质灾害防治投入效果评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(4): 114-119.
- [7] 陈明. 植树造林治理危岩体、滑坡的局限性及对策[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 71-73.
- [8] 焦云祥, 王应刚. 森林对土壤侵蚀的调控作用研究综述[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 13949-13952.
- [9] Eric W, J H R, Townsend P A, et al. Locating pleistocene refugia: comparing phylogeographic and ecological niche model predictions [J]. PLoS One, 2007, 2(6): 256-267.
- [10] Beaumont L J, Hughes L, Poulsen M. Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions [J]. Ecological Modelling, 2005, 186(2): 453-472.
- [11] Pattison R R, Mack R N. Potential distribution of the invasive tree *Triadica sebifera* (Euphorbiaceae) in the United States: Evaluating climex predictions with field trials [J]. Global Change Biology, 2010, 14(4): 120-136.
- [12] 邓阳川, 向丽, 汤欢, 等. 基于 GMPGIS 的杜仲全球产地生态适宜性分析[J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2019, 21(4): 755-763.
- [13] 杨芙蓉, 张琴, 孙成忠, 等. 蒙古黄芪潜在分布区预测的多模型比较[J]. 植物科学学报, 2019, 37(2): 136-143.
- [14] 张路. MaxEnt 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9-12.
- [15] 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[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [16] 费晓. 密云板栗林地水土流失治理措施及其效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [17] 曹春萍, 梁维峰. 板栗栽植对环境条件的要求[J]. 河北林业科技, 2009, 29(3): 101-102.
- [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(15): 231-243.
- [19] 李宏群, 刘晓莉, 汪建华, 等. 基于 MaxEnt 模型荔枝在中国的潜在种植区预测[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 394-400.
- [20] Ming-Gang Zhang, Ferry S J W, Ke-Ping Ma. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China [J]. Scientific Reports, 2016, 6(3): 365-378.
- [21] 郭杰, 刘小平, 张琴, 等. 基于 MaxEnt 模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 992-1000.
- [22] 谭钰凡, 左小清. 基于 GIS 与 MaxEnt 模型的金花茶潜在适生区与保护研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(1): 24-32.
- [23] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 等. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5674-5684.
- [24] 高文强, 王小菲, 江泽平, 等. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [25] 邵慧, 田佳倩, 郭柯, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5):

- 870-877.
- [26] 王哲,李波,肖井雷,等.基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的吉林省穿龙薯蓣分布区划研究[J].中国中药杂志,2017,42(22):4373-4377.
- [27] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006,190(3):147-159.
- [28] 郭飞龙,徐刚标,牟虹霖,等.伯乐树潜在地理分布时空格局模拟[J].植物科学学报,2020,38(2):185-194.
- [29] 张童,黄治昊,彭杨靖,等.基于 MaxEnt 模型的软枣猕猴桃在中国潜在适生区预测[J].生态学报,2020,40(14):4921-4928.
- [30] Boyang L, Zhihui J, Jun M, et al. Modelling the potential distribution of arbovirus vector *Aedes aegypti* under current and future climate scenarios in Taiwan, China [J]. Pest Management Science, 2019,75(11):894-907.
- [31] 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(自然科学),2020,40(2):79-85.
- [32] 欧阳林男,陈少雄,刘学锋,等.赤桉在中国的适生地理区域及其对气候变化的响应[J].林业科学,2019,55(12):1-11.
- [33] 张华,赵浩翔,王浩.基于 MaxEnt 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布[J].生态学报,2020,40(18):6552-6563.
- [34] 李安,李良涛,高萌萌,等.基于 MaxEnt 模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测[J].农学学报,2020,10(1):60-67.
- [35] 王茹琳,郭翔,李庆,等.四川省猕猴桃溃疡病潜在分布预测及适生区域划分[J].应用生态学报,2019,30(12):4222-4230.
- [36] 赵宁,夏少霞,于秀波,等.基于 MaxEnt 模型的渤海湾沿岸鸬鹚类栖息地适宜性评价[J].生态学杂志,2020,39(1):194-205.
- [37] 汪辉,陆建设,陈敏.年降雨量对不同品种板栗产量影响分析[J].科技创业月刊,2017,30(10):47-48.
- [38] 杨俊霞,郭宝林.河北板栗生态环境的模糊聚类分析[J].河北林学院学报,1991,6(4):292-297.
- [39] 杨庆红,白雪萍,彭九慧.影响板栗产量的气象条件分析及产量评估方法[J].农业网络信息,2011,24(6):39-40.
- [40] 郁怡汶.浙江省板栗气候生态区划探讨[J].浙江气象科技,1998,19(4):18-21.
- [41] 杨再强,朱凯,彭晓丹,等.昼夜温差对设施番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].生态学杂志,2013,32(12):3190-3196.
- [42] 黄承标,韦宏民,韦智卫,等.黄豆坡耕地改植板栗林后对水土流失的影响[J].中国水土保持,2014(7):60-63.
- [43] 傅锡成,刘永泉,罗学升,等.河田水土流失区板栗引种初报[J].福建水土保持,1993(1):41-46.
- [44] 赵黎明.以美国山核桃为例分析江淮丘陵区优选水土保持树种[J].治淮,2018(3):58-59.
- [45] 刘丙友,苗润吉,景国臣,等.典型黑土区主要水保树种土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(6):51-54.
- [46] 郭利平,宋月君,叶忠铭,等.水土保持措施对塘背小流域典型林地植被恢复状况的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(4):67-74.
- [47] 吕海军,于卫平,马晖,等.西吉县退耕还林树种选择试验研究[J].水土保持研究,2007,14(3):263-268.