

## 基于优化 MaxEnt 模型的黑木相思引种栽培区划

张伟皓, 叶利奇, 陈启华, 阮少宁\*

(福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

**摘要:**利用 MaxEnt 模型评估黑木相思在中国引种的潜在适生区,探讨影响其适生区分布的主要生态因子,并对适生区范围和类型进行划分,旨在为该树种在中国的引种区划提供依据。采用 ENMeval 数据包优化的 MaxEnt 模型,基于 14 个环境变量和 159 条黑木相思分布点,以我国  $95^{\circ}$ — $125^{\circ}$ E、 $17^{\circ}$ — $38^{\circ}$ N 区域为模型投射空间范围,评估黑木相思的潜在适生地理分布;通过 Spearman 相关分析、方差膨胀因子(VIF)分析和刀切法检验,筛选出制约其潜在分布的主导环境因子。经 ENMeval 优化,当特征组合  $F_C=Q_{HP}$ ,调控倍频  $R_M=6$  时,  $A_{UC}$  值为 0.965,模型准确度极高。刀切法检验表明:最干月降雨量(40.1%)、月平均昼夜温差(26.9%)、年降水量(15.6%)、年均温(6.6%)、最冷月最低温(3.2%)和表层土壤酸碱度(2.8%)是影响黑木相思地理分布的重要生态因子,累计贡献率达 95.2%。结果表明,黑木相思在中国适生区分为高( $55.8354 \times 10^4 \text{ km}^2$ )、中( $152.9915 \times 10^4 \text{ km}^2$ )、低( $68.4567 \times 10^4 \text{ km}^2$ )和非适生区( $682.7165 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),其中高适生区为黑木相思引种栽培推广的重点地区,主要涵盖贵州、湖南、江西、福建、浙江东南部、台湾中部、云南西部和东部、广东北部和广西北部。该研究划分了黑木相思在中国适生分布范围,并分析了制约其分布的主要生态因子为水分和温度,为黑木相思在中国引种和推广提供科学依据。

**关键词:**黑木相思;MaxEnt;引种栽培;潜在适生区;ENMeval;生态因子

**中图分类号:**S792.99

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)01-0088-07

### Introduction and Cultivation Zoning of *Acacia melanoxylon* Based on Optimized MaxEnt Model

ZHANG Wei-hao, YE Li-qi, CHEN Qi-hua, RUAN Shao-ning\*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** *Acacia melanoxylon* is a fast-growing and high-quality timber species native to Australia. It has high economic and ecological values. The MaxEnt model was used to assess the potential suitable areas for its introduction to China. The main ecological factors affecting the distribution of *A. melanoxylon* suitable areas were discussed. The range and types of suitable areas were also evaluated. The division intended to provide a basis for the introduction of this tree species. Using the MaxEnt model optimized by ENMeval data package, based on 14 environmental variables and 159 *A. melanoxylon* distribution points, with  $95^{\circ}$ — $125^{\circ}$ E and  $17^{\circ}$ — $38^{\circ}$ N as the model projection space range in China, the potential suitable geographic distribution of the plant was assessed. Through Spearman correlation analysis, variance inflation factor (VIF) analysis and knife-cutting test, the dominant environmental factors restricting its potential distribution were screened out. Optimized by ENMeval, when the feature combination  $F_C=Q_{HP}$  and the control frequency multiplier  $R_M=6$ , the  $A_{UC}$  value was 0.965, and the model accuracy was extremely high. The knife-cut

收稿日期:2021-12-06 修回日期:2022-01-22

基金项目:福建省林木种苗科技攻关项目(KLB19001B);福建农林大学科技创新专项(KFA17299A);福建省林业外来物种调查与研究(KHd2001A);福建农林大学林学高峰学科建设项目(72202200205)。

第一作者:张伟皓。研究方向:森林培育。E-mail:307737102@qq.com

\* 通信作者:阮少宁,硕士,副教授。研究方向:森林培育与林木遗传育种。E-mail:fjrsn@126.com

method showed that the precipitation of driest month (40.1%), mean diurnal temperature range (26.9%), annual precipitation (15.6%), mean annual temperature (6.6%), min temperature of the coldest month (3.2%) and topsoil pH (2.8%) were important ecological factors to limit the geographic distribution of *A. melanoxylon*, with a cumulative contribution rate of 95.2%. The prediction results of MaxEnt divided the potential area for the introduction to China into three levels: highly—( $55.8354 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), moderately—( $152.9915 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), hardly—( $68.4567 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), and non-suitable areas ( $682.7165 \times 10^4 \text{ km}^2$ ). The highly suitable areas would be the key area for the cultivation and promotion of *Acacia melanoxylon*, mainly covering the administrative regions of Guizhou, Hunan, Jiangxi, Fujian, southeastern Zhejiang, central Taiwan, western and eastern Yunnan, northern Guangdong and northern Guangxi. It was recommended that the introduction of *A. melanoxylon* to China should be focused on highly suitable areas due to the suitable climate and environment, mature cultivation and management technology, and the survival rate. For the moderately suitable areas, the introduction should be careful; local real situations should be considered. For the hardly- and non-suitable areas, the introduction should not be carried out. The main ecological factors restricting its distribution were moisture and temperature. The results of this study would provide scientific evidence for the introduction of *A. melanoxylon* to China.

**Key words:** *Acacia melanoxylon*; MaxEnt; cultivation; potential habitat; ENMeval; ecological factor

黑木相思(*Acacia melanoxylon*)是豆科(Leguminosae)金合欢属(*Acacia*)的阳性常绿阔叶乔木,高 6~45 m,胸径 1~1.5 m,为澳大利亚本土树种,原产地从昆士兰北部(16°S)向南至塔斯马尼亚岛南部(43°S),向西至南澳的东南部,海拔在 550~1 350 m,年降水量 500~2 800 mm,最热月均温 23~26℃,最冷月均温 1~10℃,喜湿润、深厚的酸性土,心材黄褐色至暗褐色,纹理美观,易加工,材质可与红木媲美,是国际上高级家具用材,具有重要经济价值<sup>[1]</sup>。我国黑木相思引种源自 1985 中国林科院与 ACIAR 的“澳大利亚阔叶树种的引种与栽培”项目<sup>[2]</sup>,现已引种于广东、广西、海南、贵州、云南、四川、福建和浙江等地<sup>[3]</sup>,2000 年以来福建省在闽南山地丘陵连片种植相思人工林,实现生态建设与珍贵用材林培育相结合,改进了当地景观生态,目前初见效益。目前国内外学者对黑木相思的研究局限于生境分布<sup>[4]</sup>、引种栽培<sup>[5]</sup>、扦插育苗<sup>[6]</sup>、良种选育<sup>[7]</sup>和材性综合评价利用<sup>[8]</sup>等方面,然而还未见有关黑木相思引种栽培区划及其在中国空间分布研究的详细报道,制约其引种栽培的生态因子也尚未明确。因此,有必要对黑木相思进行地理区划层面的研究,并探讨影响黑木相思适生区分布的重要生态因子。

福建农林大学相思种苗攻关团队在近 20 a 的黑木相思引种中发现其存在严重生长与适应性分化现象,不同造林地点、造林时间、种源材料生长表现不一、造林保存率差异较大,在福建闽北山地较易受冬季低温冻害,这既有不同引种种源材料的生态适应性原因,也与引种栽培区气候生态差异有关。阮少宁等<sup>[9]</sup>研究发现,黑木相思耐寒能力呈现南北渐

进的地理变异趋势,与原产地的温度因子密切相关,也佐证这一观点。我国东南林区长期主栽针叶树种,导致林地土壤肥力衰退、生产力下降和林种单一等系列生态问题。黑木相思具有固 N、速生、耐寒、耐贫瘠、生物量高、材质密实等特点<sup>[10]</sup>,吴中伦<sup>[11]</sup>、王豁然等<sup>[12]</sup>认为,黑木相思引种至长江流域并与杉松林混交,可对该区域林业做出极大贡献<sup>[11-12]</sup>。现有的引种实践也表明该树种对土壤改良效益明显,是桉树(*Eucalyptus robusta*)等采伐迹地理想的替代树种和荒山造林的先锋树种。

林木引种需了解树种生物学特性和地理分布格局及其限制因子,木本植物引种首先遵循气候相似理论<sup>[13]</sup>。传统上研究气候相似,开展林木引种区划主要采用模糊聚类、模糊相似优先比、灰色聚类、灰色关联度分析、基于 GIS 的引种气候决策等方法<sup>[14-16]</sup>。通过 MaxEnt 模型探究植物适生范围的方法则是目前最常用的方法之一,MaxEnt 的物种分布模型是基于物种现实居群地理位置及其环境变量信息作为约束条件,计算最大熵的概率分布作为最优分布的算法原理,同时结合 ArcGIS 预测物种潜在的地理分布。MaxEnt 模型自 21 世纪初首次开发使用后,因其操作便捷且预测精确度高的特点,广泛应用于濒危植物、入侵植物、病虫害及野生动物潜在分布预测<sup>[17]</sup>。近年来基于 MaxEnt 的物种分布模型也多有应用于引种分布预测,在桉树<sup>[18]</sup>、澳洲坚果(*Macadamia integrifolia*)<sup>[19]</sup>、北美银钟花(*Halesia carolina*)<sup>[20]</sup>等均有报道。本研究以黑木相思为对象,利用 MaxEnt 模型开展引种分布预测,探讨制约其地理分布的重要环境因子,以期为该树

种的引种栽培区划及合理种植提供有力依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域确定

原产区域:黑木相思主要分布范围北至昆士兰州东北部(约 153 °E, 43 °S),南至塔斯马尼亚岛南部(约 135 °E, 16 °S),向西至南澳的东南部(约 117 °E, 33 °S),分布的气候带以暖温带为主,主要由热带雨林气候向温带海洋性气候逐渐过渡,在地中海气候带也存在少量分布。

引种区域:选取我国的可能引种适生范围(95°—125 °E, 17°—38 °N),该区域完整涵盖 18 个省(云南、广东、广西、海南、福建、浙江、江西、湖南、贵州、四川、重庆、湖北、安徽、江苏、上海、山东、河南和台湾),作为该模型投射的空间范围,该区域属于热带季风气候区和亚热带季风气候区相结合区域。

### 1.2 黑木相思数据的收集、筛选与处理

通过检索全球生物多样性信息网络平台(<https://www.gbif.org/>)(GBIF),搜索黑木相思在澳大利亚的分布范围及具体分布点,并使用 Google Earth 地图软件的高清卫星图,结合黑木相思在澳大利亚的生境特点进行分布点的二次校对,最后得出每个分布点确切的经纬度坐标。经过搜索、选取和校对之后,共获得黑木相思现代分布记录 201 条,去除重复分布记录,为降低模型的分布偏差,遵循在每个网格(10 km×10 km)中只保留 1 个记录点的原则进行对重复点的筛选与删除,最终获得 159 条黑木相思分布点。

### 1.3 环境因子数据与地图数据的获取及处理

从 WorldClim 世界气候数据库(<http://worldclim.org>)中选取 19 个气候因子,1 个海拔因子取自 WorldClim 数据库;土壤因子取自世界土壤数据库(HWSD),并从中选取 10 个常用表层土壤因子,所有因子数据均来自当前时期(1950—2000 年)各气象和地理站点所记录数据(共 30 个变量见表 1)。经过裁图(澳大利亚与中国地图)、相互掩膜及重采样等操作步骤后,使其环境因子数据形成大小、格式相同的 asc 文件,且空间分辨率统一为 30"(30 arc-second),并将整理所得的数据在 SPSS 22.0 及 R 软件中做 Spearman 相关分析和方差膨胀因子(VIF)分析<sup>[21]</sup>,最终筛选出对黑木相思分布影响较大的环境因子参与建模。

### 1.4 模型建立、优化及评估预测

采用 MaxEnt 软件建立澳大利亚区域黑木相思适宜种植区模型,并将其投射至所需研究的中国区域。在 R 程序中采用 ENMeval 数据包优化出最佳

调控倍频 RM 和特征组合 FC,设置 RM 从 0.5~8 变化,依次增加 0.5;而 FC 选取 10 种模式进行测试,依次为 L、QT、H、HP、PT、QH、LQH、LPT、QHP 及 LQHPT,其中 L 为线性,Q 为二次型,H 为片段化,T 为阈值型以及 P 为乘积型。并将筛选所得的黑木相思 159 条分布记录进行四等分,随机选取 3 份进行模型建立,余下 1 份进行模型验证。本研究建立模型时设置 10 次重复,并采用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)的 AUC 值来对 MaxEnt 模型进行精确度验证,其数值越大模型的精确度越高。模拟结果的准确性以所得 AUC 值为判定标准,数值在 0.5 以下说明模拟失败,在 0.5~0.8 说明准确度较低,在 0.8~0.9 说明准确度高,在 0.9~1 则说明准确度极高且预测准确。

表 1 环境变量

Table 1 Environmental variables

数据类型	生态因子	单位
气候因子	年均温(bio1)	×10 °C
	月平均昼夜温差(bio2)	×10 °C
	等温性(bio3)	1
	气温的季节性(bio4)	1
	最暖月最高温(bio5)	×10 °C
	最冷月最低温(bio6)	×10 °C
	气温年范围(bio7)	×10 °C
	最湿季平均气温(bio8)	×10 °C
	最干季平均气温(bio9)	×10 °C
	最暖季平均温(bio10)	×10 °C
	最冷季平均温(bio11)	×10 °C
	年降水量(bio12)	mm
	最湿月降水量(bio13)	mm
	最干月降水量(bio14)	mm
	降水的季节性(bio15)	1
	最湿季降水量(bio16)	mm
	最干季降水量(bio17)	mm
	最暖季降水量(bio18)	mm
	最冷季降水量(bio19)	mm
土壤因子	土壤中砂砾比例(T_gravel)	(%)
	土壤中沙子比例(T_SAND)	(%)
	土壤中黏土比例(T_CLAY)	(%)
	土壤中泥沙比例(T_SILT)	(%)
	土壤电导率(T_ECE)	dS·m <sup>-1</sup>
	表层土壤有机碳含量(T_OC)	(%)
	土壤质地(T_USDA_TEX_CLASS)	1
	土壤的阳离子交换能力(T_CEC_SOIL)	(%)
	表层土壤酸碱度(T_PH_H <sub>2</sub> O)	1
	土壤基础饱和度(T_BS)	(%)
地形	海拔(ELEV)	m

参考欧阳林男等<sup>[18]</sup>对同为澳大利亚引种的赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)在中国适生等级的



划分,并结合黑木相思的生境特点,划分其在国内的潜在适生区等级  $P$ ,且  $P$  的概率值在  $0\sim 1$  之间,设置非适生区间断值为  $0\leq P<0.3$ ;低度适生区为  $0.3\leq P<0.6$ ;中度适生区为  $0.6\leq P<0.85$ ;高度适生区为  $0.85\leq P<1$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型优化与准确性评价

基于 159 条黑木相思澳大利亚现代地理分布点和 14 个生态因子的图层数据,利用 MaxEnt 软件模拟黑木相思现代的潜在地理分布范围。Maxent 模型默认特征组合  $FC=LQHPT$ ,调控倍频  $RM=1$ ,delta.  $AICc=216.116\ 980\ 6$ 。当通过 ENMeval 包优化后,Maxent 模型的特征组合  $FC=QHP$ ,调控倍频  $RM=6$ ,此时的 delta.  $AICc=0$ ,说明在此参数类型下的模型为最佳模型,因此选定  $FC=QHP$ , $RM=6$  为最终设置参数(表 2)。在该参数设定下,采用 ROC 曲线衡量 MaxEnt 模型预测精准度,结果表明(图 1)AUC 平均值为 0.965,大于 0.9,说明此次模拟的结果准确,可信度高。

表 2 Maxent 模型 ENMeval 优化评价指标

Table 2 Evaluation metrics of Maxent model generated by ENMeval

类型	特征组合 (FC)	调控倍频 (RM)	最小信息 准则 AICc	训练集 AUC 与 测试集 AUC 平均值差
默认	LQHPT	1	216.116 980 6	0.013 490 97
优化	QHP	6	0	0.005 410 535

### 2.2 环境因子重要性

通过刀切法检验各环境因子对黑木相思潜在适生区影响的重要程度(图 2,表 3),结果表明,贡献率最高的 3 个环境因子为最干月降水量(bio14)、月平均昼夜温差(bio2)和年降水量(bio12),总贡献率为 82.5%,说明 bio14、bio2 和 bio12 是影响黑木相思分布范围的主要环境因子。年均温(bio1,6.6%)、最冷月最低温(bio6,3.2%)和表层土壤酸碱度( $T_{pH\_H_2O}$ ,2.8%)这 3 个环境因子也在一定程度上影响了黑木相思的地理分布。综上所述,14 个环境因子中与降雨量有关的环境变量总贡献率为 55.9%,与温度有关的为 38.7%,海拔和土壤因子综合为 5.4%,说明降雨和温度是影响黑木相思适生区分布的主要环境变量。

由表 3 可看出,Bio2(月平均昼夜温差)、Bio12(年降水量)和 Bio14(最干月降水量)是影响黑木相思适生区分布的主导环境因子,Bio1(年均温)、Bio6(最冷月最低温)和  $T_{pH\_H_2O}$ (表层土壤酸碱度)也在一定程度上制约其分布,因此选取这 6 个环境

变量进行具体分析。通过 Maxent 软件输出得到环境因子的单因子响应曲线,分析黑木相思适生区的适宜生物气候变化范围。由图 3 可见,当各变量存在概率大于 0.5 时,可认为该变量处于适宜范围。从图 3A 可以看出:适宜的 Bio2 在  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,且  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  时达到黑木相思最大适生率,随 Bio2 的上升其适应性持续下降;Bio12 响应曲线可看出,黑木相思适生率随着年降水量的增加而增大,年降水量在  $500\sim 1\ 000\text{ mm}$  时其适生率增长较快,在  $1\ 000\text{ mm}$  以上时缓慢增加,且在  $3\ 500\text{ mm}$  时达到适生率最大值(图 3B);图 3C 中,Bio14 的增长趋势与 Bio12 相似,随着最干月降水量的增加,黑木相思的存在概率持续增长,在  $50\text{ mm}$  时达到其最大值,且曲线区域平缓;当年均温 Bio1 低于  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时黑木相思适生率较高,在  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  达到最大值,当年均温持续升高其适生率随之下降(图 3D);图 3E 所示:Bio6 在  $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时黑木相思存在概率呈上升趋势,在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时达到最大值随后下降;图 3F 中,黑木相思存在概率随  $T_{pH\_H_2O}$  值的升高而降低,最适宜 pH 值为  $4.0\sim 4.6$ ,且在 4.0 时适生率最大。

表 3 黑木相思主要环境因子参数

Table 3 Environmental variables and their main parameters

of <i>A. melanoxylon</i>		
环境变量	贡献率(%)	置换重要值(%)
最干月降水量(bio14)	40.1	30.6
月平均昼夜温差(bio2)	26.9	8.0
年降水量(bio12)	15.6	2.6
年均温(bio1)	6.6	25.6
最冷月最低温(bio6)	3.2	18.4
表层土壤酸碱度( $T_{pH\_H_2O}$ )	2.8	1.1
最干季度平均气温(bio9)	1.2	1.5
表层土壤含沙量( $T_{Sand}$ )	0.9	1.3
表层土壤有机碳含量( $T_{OC}$ )	0.6	0.8
海拔(ELEV)	0.6	1.3
土壤的阳离子交换能力( $T_{CEC\_SOIL}$ )	0.5	1.4
等温性(bio3)	0.4	1
最湿季度平均气温(bio8)	0.4	6
最湿月降水量(bio13)	0.2	0.4

### 2.3 黑木相思在中国的适生区分布和面积

通过分析 MaxEnt 软件模拟当代气候情景下所得的结果(表 4),黑木相思在我国的潜在适生区主要在亚热带季风区,最西至西藏东南部的察隅县、墨脱县;东至我国沿海地区的浙江舟山;向北可达山东烟台;向南可至我国最南端的海南三亚,涵盖了我国中东南部地区和台湾地区,约分布于  $92^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 、 $18^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 。其中黑木相思的高度潜在适生区面积约为  $55.835\ 4\times 10^4\text{ km}^2$ ,集中于贵州、湖南、江西、

福建、浙江东南部、云南西部和东部、华南两广北部和台湾中部。中度潜在适生区面积约  $152.9915 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、包括了四川中东南部、重庆西北部、湖北长江以东地区、安徽淮河以南地区、江苏中南部、上海东南部、云南中部、广东中北部、广西中部和海南中东部。低度潜在适生区面积  $68.4567 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，涵盖有山东东南部、河南南部、陕西南部、甘肃南部和西藏东南部。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

利用 MaxEnt 优化模型模拟了黑木相思在中国的潜在适生区,结果表明,黑木相思在中国的高度适生区主要集中于贵州、湖南、江西、福建、浙江东南部、台湾中部、云南西部和东部、广东北部和广西北部,也是黑木相思引种栽培推广的重点地区,基本具备成熟的栽培管理技术,引种存活率较高,只需在此

基础上注意适时清理杂草、修枝整形及抚育间伐等,中度适生区需结合实际情况慎重引种,低适生区和非适生区不宜引种。最干月降雨量、月平均昼夜温差、年降水量、年均温、最冷月最低温和表层土壤酸碱度是影响黑木相思潜在地理分布的主要环境因子。

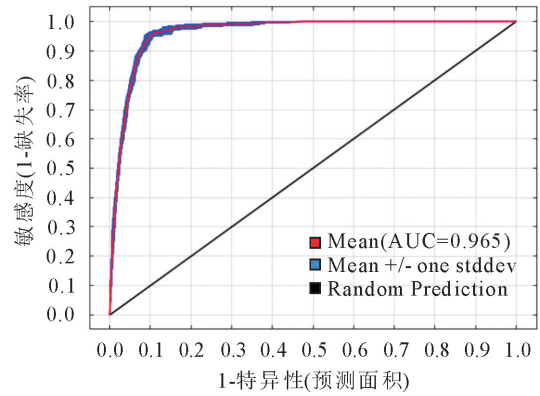


图 1 Maxent 模型预测的 ROC 曲线

Fig. 1 Predicted ROC curve in Maxent model

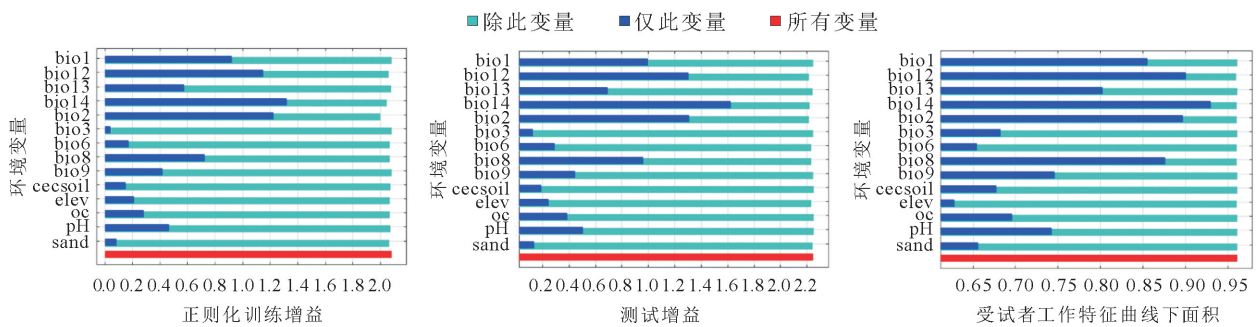


图 2 主要环境变量的 Jackknife 检验

Fig. 2 Jackknife test for the main environmental variables

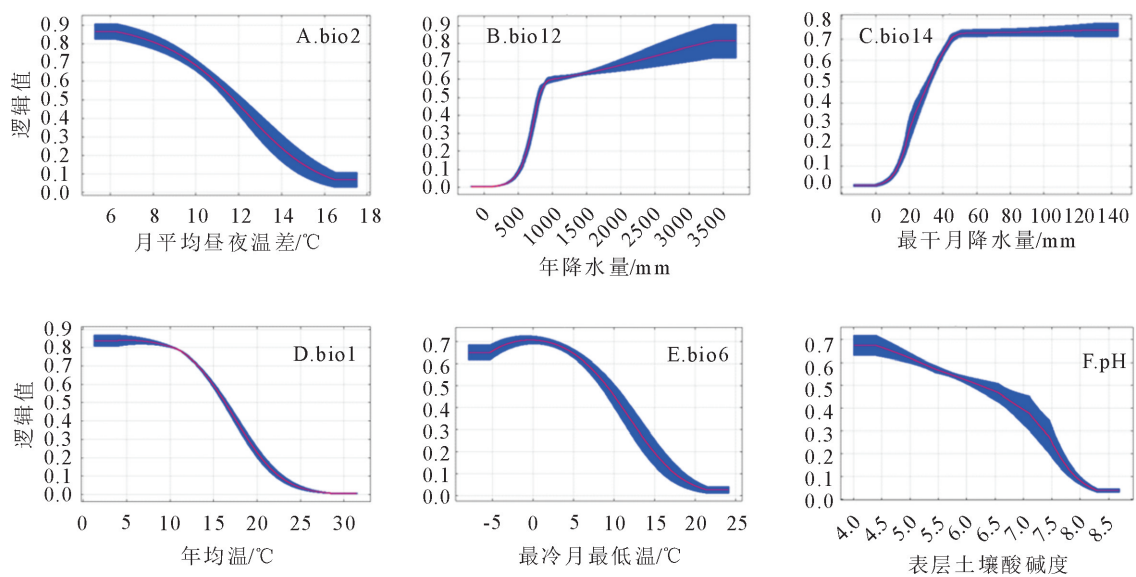


图 3 黑木相思主导环境变量响应曲线

Fig. 3 Response curves of dominant environmental variables of *A. melanoxylon*

表 4 选黑木相思在中国的适生区面积  
Table 4 Suitable areas of *A. melanoxylon* in China

×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>

适生区	面积/×10 km <sup>2</sup>	适生区范围	限制原因
非适生面积	682.716 5	河北、山西、宁夏、青海、山东中西北部、四川西北部、河南北部、陕西北部	极端低温过低,土壤多呈碱性,海拔较高
低适生面积	68.456 7	山东东南部、河南南部、陕西南部、甘肃南部、西藏东南部	极端低温过低,土壤多呈中性、碱性,海拔较高
中适生面积	152.991 5	四川中东南部、重庆西北部、湖北长江以东地区、安徽淮河以南地区、江苏中南部、上海东南部、云南中部、广东中北部、广西中部、海南中东部	气候、降雨量、地形地貌较适宜,但土壤酸碱度接近中性且土壤类型较不适宜
高适生面积	55.835 4	贵州、湖南、江西、福建、浙江东南部、台湾中部、云南西部和东部、广东北部、广西北部	气候、降雨量、地形地貌、土壤酸碱度和土壤类型适宜
总适生面积	277.283 6		

树木在生长发育过程中易受气候变化的不确定性影响,如干旱、台风、霜冻和洪涝等自然灾害对黑木相思人工林的影响和破坏较大。因此除了对所选各环境因子的综合分析外,还需结合黑木相思实地生长情况,对其引种栽培区进行长期观察试验。此外在引种黑木相思时,降水、温度、和土壤是优先考虑要素,后续更有待学者加入其他因子如坡位、太阳辐射及病虫害等影响因素开展更深入研究,进一步提高其引种成功率,也能更具体地指导黑木相思这类树种在我国下一阶段的栽培推广。

3.2 讨论

3.2.1 MaxEnt 模型在引种栽培方面的应用  
MaxEnt 结果表明,温度和降水量是影响黑木相思地理分布的重要环境因素。黑木相思产地分布资料表明,适宜的原始生境主要在沿海岸带的低海拔丘陵分布,性喜土壤肥沃,以微酸性土壤为主,常见于河岸、山谷、潮湿硬叶林和雨量充沛的凉爽雨林地区<sup>[22]</sup>,与本研究温度和降水量是重要环境因子相一致。与温度因子相比,水分因子(最干月降水量、年降水量)与黑木相思潜在适生区的关联性更大。欧阳林男等<sup>[23]</sup>利用 MaxEnt 模型预测了由澳洲引种的柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)在我国的适生区分布,并与原产地对比发现,我国适生区具有更低的海拔,且最暖季降水量更高,具有更适宜柠檬桉生长、栽培的条件,可进一步为这类引种植物在国内的栽培推广提供理论支持。

3.2.2 主导环境因子筛选 研究发现,水分因子(最干月降水量和年降水量)是制约黑木相思潜在地理分布的主导环境因子。黑木相思所需的最干月降水量在 50 mm 左右时可达其适生率最大值,黑木相思的适生概率随年降水量的增加而增加,并在 3 500 mm 达到最大值,原产地资料表明黑木相思年均降水量在 540~2 800 mm,这也反映出黑木相思喜湿润的特点。但该模型对雨型因子预测不佳,黑木相思原产分布跨越夏雨型、均雨型和冬雨型地

区,通常冬雨型区树种向夏雨型地区引种较容易失败<sup>[24]</sup>,在福建的黑木相思引种中也发现塔斯马尼亚种源引种成活率较低<sup>[25]</sup>,但可能由于 MaxEnt 物种分布模型以树种全分布区信息进行预测而掩盖了种源差异。温度因子中,黑木相思最适宜的昼夜温差为 6℃左右,当昼夜温差大于 6℃时,其适生性逐渐降低,在以往气候相似分析中较少体现昼夜温差因子,在引种实践中也几乎不曾考虑该因子,有关该因子指导作用还需结合引种实践进行实证。当年均温低于 10℃时黑木相思的适生率最大,最冷月最低温在-5~0℃时黑木相思适生率呈上升趋势,在 0℃时达到最大值随后下降。国内多数研究表明黑木相思能耐-4℃甚至-7℃的低温<sup>[26]</sup>;Pollock 等<sup>[27]</sup>认为黑木相思春秋季节耐-1.5℃,冬季可耐-5℃低温,与本研究结果相近。当前黑木相思引种栽培面积较大的主要在闽东南的漳州、泉州地区和广东梅县,在福建闽西北、闽北、湖北宜昌、重庆等地也有引种成功报道<sup>[28]</sup>,考虑到该树种较耐低温,选择澳洲南部夏雨型或均雨型地区的耐寒种源北移种植,引种存活率或许较高。

除了温度和降水量外,土壤因子也起到不可忽视的作用。研究表明,最适宜黑木相思生长的土壤 pH 值为 4.0~4.6,且在 4.0 时适生率最大,这与黑木相思在微酸性土壤中(pH 为 4.5~4.9)生长发育较好、在酸性偏高及中性土壤中(pH 为 7.0)也存在适应性、但引种栽培情况并不乐观的研究情况相符<sup>[29]</sup>。根据我国土壤分布规律,华中、华南及华东地区主要为酸性的砖红壤、赤红壤及红壤,土壤 pH 为 4.0~7.0,结合适生区分布和刀切法检验图,证明适宜引种于我国中东南部地区。因此,在引种时,不仅需要选择与原产地气候类型相似地区,还应优先考虑酸性、深厚且湿润的土壤环境,在中性或碱性、肥力弱、降雨稀少的山地生长不良。

3.2.3 黑木相思适生分布区的模拟 经 MaxEnt 模拟及 ArcGIS 可视化分析,黑木相思的高度适生



区主要涵盖贵州、湖南、江西、福建、浙江东南部、台湾中部、云南西部和东部、广东北部和广西北部,这与前人对黑荆树(*Acacia mearnsii*)的研究相近<sup>[30]</sup>,我国的适生区也主要在云南、贵州、四川、湖南、广东、广西和福建等南方省区,这些地区的气候类型为亚热带季风气候,雨热同期,山地和丘陵分布较多,适合黑木相思的引种。与黑木相思原产地天然分布区相比,我国适生区温度与其相近,最干月降水量和年降水量更高,更适宜黑木相思的栽培生长。

#### 参考文献:

- [1] 黄猛,宁昭然,黄玉梅,等. 黑木相思无性系开花物候及结实规律[J]. 东北林业大学学报,2019,47(7):1-5.  
HUANG M, NING Z R, HUANG Y M, et al. Flowering phenology and fruiting regularity of *Acacia melanoxylon* clones [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(7): 1-5. (in Chinese)
- [2] 王豁然. 澳大利亚阔叶树引种与栽培的研究——中澳合作研究项目[J]. 林业科学研究, 1988(1): 112-113.
- [3] 李柳. 黑木相思(*Acacia melanoxylon*)无性系早期综合评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [4] POWER I L, THORROLD B S, BALKS M R. Soil properties and nitrogen availability in silvopastoral plantings of *Acacia melanoxylon* in north Island, New Zealand [J]. Agroforestry Systems, 2003, 57(3): 225-237.
- [5] 黄玉梅, 刘丽, 赵苗菲, 等. 黑木相思组培苗瓶外生根技术研究[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 21-26.  
HUANG Y M, LIU L, ZHAO M F, et al. Test on ex vitro rooting technology of tissue culture seedlings of *Acacia melanoxylon* [J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(1): 21-26. (in Chinese)
- [6] 林启灵. 黑木相思根插繁殖技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [7] PLAYFORD J, BELL J, MORAN G. A major disjunction in genetic diversity over the geographic range of *Acacia melanoxylon* [J]. Australian Journal of Botany, 1993, 41(3): 355-368.
- [8] SANTOS A, ALVES A, SIMOES R, et al. Estimation of wood basic density of *Acacia melanoxylon* (R. Br.) by near infrared spectroscopy [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2012, 20(2): 267-274.
- [9] 阮少宁, 林思祖, 翁剑, 等. 黑木相思种源耐寒性的地理变异[J]. 三明学院学报, 2011, 28(5): 70-76.  
RUAN S N, LIN S Z, WENG J, et al. Geographic variation of cold resistance of *Acacia melanoxylon* provenances [J]. Journal of Sanming University, 2011, 28(5): 70-76. (in Chinese)
- [10] GORDIN J B, BRAD M P, CHRISL B. Genetic and environmental variation in wood properties of *Acacia melanoxylon* [J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(8): 1363-1373.
- [11] 吴中伦.《黑荆树及其利用》一书之我见[J]. 林产化学与工业, 1992(4): 314-342.
- [12] 王豁然, 江泽平, 李延骏, 等. 格局在变化: 树木引种与植物地理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 2-6.
- [13] 江泽平, 王豁然, 吴中伦. 论北美洲木本植物资源与中国林木引种的关系[J]. 地理学报, 1997(2): 75-82.  
JIANG Z P, WANG H R, WU Z L. North American trees grown in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1997(2): 75-82. (in Chinese)
- [14] 王德英, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 中国珍稀荒漠植物梭梭在半干沙地引种适应性[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 74-81.  
WANG D Y, DING G D, ZHAO Y Y, et al. On suitability for introduction of Chinese rare desert plant *Haloxyylon ammodendron* in semi-arid sandy regions of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 74-81. (in Chinese)
- [15] 席万鹏, 王有科. 扁桃在甘肃适宜栽培区的灰色区划研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 93-95, 113.  
XI W P, WANG Y K. Study on grey regional planning of suitable cultivation area of almond [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(1): 93-95, 113. (in Chinese)
- [16] 李丽纯, 陈福梓, 王加义, 等. 基于 GIS 的台湾青枣在福建引种的气候适宜性区划[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 47-54.  
LI L C, CHEN F Z, WANG J Y, et al. Climate suitability regionalization for Taiwan green jujube introduction and expansion in Fujian Province using GIS [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 47-54. (in Chinese)
- [17] WIENS J A, STRALBERG D, JONGSOMJIT D, et al. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106: 19 729-19 736.
- [18] 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.  
OUYANG L N, CHEN S X, LIU X F, et al. Suitable geographic range for *Eucalyptus camaldulensis* in China and its response to climate change [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(12): 1-11. (in Chinese)
- [19] 王伟, 田荣荣, 那立妍, 等. 基于 MaxEnt 生态软件划分澳洲坚果的潜在地理适生区[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 444-449.  
WANG W, TIAN R R, NA L Y, et al. Predicting potential geographic suitable regions of *Macadamia integrifolia* based on MaxEnt [J]. Forest Research, 2017, 30(3): 444-449. (in Chinese)
- [20] 王璐, 吴秀萍, 李垚, 等. 北美银钟花在中国的适宜栽培区研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(5): 10-16.  
WANG L, WU X P, LI Y, et al. Prediction of suitable cultivation area for *Halesia carolina* L. in China [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2018, 42(5): 10-16. (in Chinese)
- [21] 李尤, 唐雪海, 王雷宏, 等. 基于 MaxEnt 模型的不同气候情景下白蜡树中国适生区预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 100-107.  
LI Y, TANG X H, WANG L H, et al. Prediction of suitable areas of *Fraxinus chinensis* in China under different climate scenarios based on MaxEnt [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 100-107. (in Chinese)

- bias of chloroplast genome of *Rosa odorata* var. *gigantea* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 123-130. (in Chinese)
- [6] ZHOU M, LONG W, LI X. Analysis of synonymous codon usage in chloroplast genome of *Populus alba* [J]. Journal of Forestry Research, 2008, 19(4): 293-297.
- [7] FU C, LI H, MILNE R, *et al.* Comparative analyses of plastid genomes from fourteen *Cornales* species; inferences for phylogenetic relationships and genome evolution [J]. BMC Genomics, 2017, 18(1): 956.
- [8] 叶友菊, 倪州献, 白天道, 等. 马尾松叶绿体基因组密码子偏好性分析 [J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(10): 4464-4471. YE Y J, NI Z X, BAI T D, *et al.* The analysis of chloroplast genome codon usage bias in *Pinus massoniana* [J]. Genomics and Applied Biology, 2018, 37(10): 4464-4471. (in Chinese)
- [9] 钱萍仙, 李学孚, 吴月燕, 等. 遮阴对樟叶槭容器苗生长和生理特性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 667-672. QIAN P X, LI X F, WU Y Y, *et al.* Influence of shading on growth and physiological characteristics of container seedlings of *Acer cinnamomifolium* [J]. Jiangsu Agricultural Journal, 2015, 31(3): 667-672. (in Chinese)
- [10] ARECES-BERAZAIN F, HINSINGER DAMIEN D, STRIJK JOERI S. Genome-wide supermatrix analyses of maples (*Acer*, Sapindaceae) reveal recurring inter-continental migration, mass extinction, and rapid lineage divergence [J]. Genomics, 2021, 113(2): 681-692.
- [11] YU T, GAO J, HUANG B H, *et al.* Comparative plastome analyses and phylogenetic applications of the *Acer* section *Platanioidea* [J]. Forests, 2020, 11(4): 462.
- [12] SUZUKI H, MORTON B R. Codon adaptation of plastid genes [J]. PLoS One 2016, 11(5): 154306.
- [13] 原晓龙, 康洪梅, 王毅. 云南蓝果树叶绿体基因组密码子偏好性分析 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 26-31. YUAN X L, KANG H M, WANG Y. Codon usage bias analysis of chloroplast genome in *Nyssa yunnanensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 26-31. (in Chinese)
- [14] 原晓龙, 王毅, 张劲峰. 灰毛浆果楝叶绿体基因组密码子使用特征分析 [J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 195-202. YUAN X L, WANG Y, ZHANG J F. Characterization of codon usage in *Cipadessa cinerascens* chloroplast genome [J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(2): 195-202. (in Chinese)
- [15] 王媛媛, 杨美青. 蒙古韭叶绿体基因组密码子使用偏好性分析 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(4): 1084-1092. WANG Y Y, YANG M Q. The analysis of the codon usage bias in the chloroplast genome of *Allium mongolicum* Regel [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(4): 1084-1092. (in Chinese)
- [16] 王文斌, 于欢, 邱相坡. 黄芩叶绿体基因组重复序列及密码子偏好性分析 [J]. 分子植物育种, 2018, 16(8): 2445-2452. WANG W B, YU H, QIU X P. Analysis of repeat sequence and codon bias of chloroplast genome in *Scutellaria baicalensis* [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(8): 2445-2452. (in Chinese)
- [17] 王鹏良, 杨利平, 吴红英, 等. 普通油茶叶绿体基因组密码子偏好性分析 [J]. 广西植物, 2018, 38(2): 135-144. WANG P L, YANG L P, WU H Y, *et al.* Condon preference of chloroplast genome in *Camellia oleifera* [J]. Guihaia, 2018, 38(2): 135-144. (in Chinese)
- [18] 屈亚亚, 辛静, 冯发玉, 等. 香花枇杷质体基因组序列密码子偏性分析 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 138-144. QU Y Y, XIN J, FENG F Y, *et al.* Codon usage bias in chloroplast genome of *Eriobotrya fragrans* Champ. ex Benth [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 138-144. (in Chinese)

(上接第 94 页)

- [22] JENNINGS S M, WILKINSON G R, UNWIN G L. Response of blackwood (*Acacia melanoxylon*) regeneration to silvicultural removal of competition in regrowth eucalypt forests of north-west Tasmania, Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 177(1): 75-83.
- [23] 欧阳林男, 陈少雄, 张维耀, 等. 柠檬桉在中国的适生地理分布及其影响因子 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 55-61. OUYANG L N, CHEN S X, ZHANG W Y, *et al.* The suitable geographic range for *Corymbia citriodora* in China and the influencing factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 55-61. (in Chinese)
- [24] 阎洪. 中国和澳大利亚的气候比较研究 [J]. 林业科学, 2006, 42(8): 30-36, 148. YAN H. Comparison of climate similarity between Australia and China using numerical classification analysis [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(8): 30-36, 148. (in Chinese)
- [25] SEARLE S D. *Acacia melanoxylon*—a review of variation among planted trees [J]. Australian Forestry, 2000, 63(2): 79-85.
- [26] 李纪元, 高传壁, 郑学为, 等. 两个温带相思属树种的耐寒性评估 [J]. 林业科学研究, 1999(1): 90-94. LI J Y, GAO C B, ZHENG X W, *et al.* Evaluation of frost tolerance of two *Acacia* species introduced from Australian temperate zone [J]. Forest Research, 1999(1): 90-94. (in Chinese)
- [27] POLLOCK K M, GREER D H, BULLOCH B T. Frost tolerance of *Acacia* seedlings [J]. Australian Forest Research, 1986, 4: 337-346.
- [28] 张亚榕. 黑木相思白腐病原鉴定 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [29] 朱彩丽. 五种南方阔叶树种人工林土壤肥力状况评价 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [30] BROWN A G, TURNBULL J W, BOOTH T H. Chapter 1 the Australian environment [J]. Environmental Science & Management, 1949(1): 8-15.