

基于 MaxEnt 模型对大花序桉 在我国南方的适生区预测

欧阳林男, 陈少雄*, 何沙娥, 刘学锋, 朱林生, 张维耀

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 大花序桉材性优良是我国重要的实木利用树种, 本文对大花序桉在我国南方十省(区)的潜在分布区进行预测, 并对其适生区进行划定和分析。通过收集大花序桉的地理信息数据, 利用最大熵模型(MaxEnt)和 ArcGIS 空间分析技术, 综合相关气候因子, 预测划定大花序桉在我国南方十省(区)的潜在地理分布区。结果表明: 采用 MaxEnt 模拟大花序桉潜在地理分布的准确性较高, 模型预测准确性的衡量指标训练子集和验证子集 AUC 值均大于 0.88。大花序桉在我国南方的发展空间较大, 其中最适宜分布区主要集中在广东、广西、海南、福建沿海, 面积依次为广东($11.25 \times 10^4 \text{ km}^2$), 广西($9.19 \times 10^4 \text{ km}^2$), 海南($2.00 \times 10^4 \text{ km}^2$), 福建($1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$); 适宜区集中在广西、广东、重庆、福建省中部, 面积依次为广西($5.87 \times 10^4 \text{ km}^2$)、广东($4.51 \times 10^4 \text{ km}^2$)、重庆($3.64 \times 10^4 \text{ km}^2$)、福建($3.02 \times 10^4 \text{ km}^2$)。刀切法(Jackknife)分析结果显示, 影响大花序桉潜在适生区分布的主导气候因子为年平均气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、最冷月最低温、最冷月均温和极端低温。结合最大熵模型(MaxEnt)和 ArcGIS 技术, 预测和分析了大花序桉在我国南方十省(区)的潜在适生区, 阐明了影响其分布的主导气候因子, 为该树种在我国的有序推广种植提供科学依据。

关键词: 大花序桉; 潜在适生区; 主导气候因子; 最大熵(MaxEnt)模型

中图分类号: S792.39

文献标识码: A

Predicting Potential Distribution of *Eucalyptus cloeziana* in Southern China Using a MaxEnt Model

OUYANG Lin-nan, CHEN Shao-xiong, HE Sha-e, LIU Xue-feng,

ZHU Lin-sheng, ZHANG Wei-yao

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: This study was undertaken to determine the distribution of areas climatically suitable for *Eucalyptus cloeziana* plantations in ten southern Chinese provinces – this species is considered potentially important for production of solid wood in China on account of its superior wood properties. For this study, the current distribution of *E. cloeziana* and related climatic factors were collected. The potential suitable distribution range of *E. cloeziana* in ten southern Chinese provinces was then determined using Maximum Entropy Modeling and ArcGIS spatial analysis technology. The results showed that the accuracy of the MaxEnt model for predicting the potential distribution of *E. cloeziana* was high, with the correlation between a training dataset and test data being over 0.88. The area with suitable climates for *E. cloeziana* plantations in southern China was found to be extensive, and is mainly concentrated in the coastal provinces of Guangdong, Guangxi, Hainan and Fujian. The highly suitable area in each of these provinces amounts to: Guangdong ($11.25 \times 10^4 \text{ km}^2$), Guangxi ($9.19 \times 10^4 \text{ km}^2$), Hainan ($2.00 \times 10^4 \text{ km}^2$) and Fujian ($1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$). Almost all the most suitable environments for *E. cloeziana* plantations are concentrated in the central regions of Guangxi, Guangdong, Chongqing and Fujian province, and include: Guangxi ($5.87 \times 10^4 \text{ km}^2$), Guangdong ($4.51 \times 10^4 \text{ km}^2$), Chongqing ($3.64 \times 10^4 \text{ km}^2$) and Fujian ($3.02 \times 10^4 \text{ km}^2$). Jackknife analysis showed that for regions climatically suitable for *E. cloeziana* plantations, the factors of annual mean temperatures, accumulated temperature of 10°C or more, average lowest temperature of the coldest month, average temperature of the coldest month and extreme lowest temperature are the dominant climatic factors affecting the potential

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600502); 广东省林业科技创新项目(2016KJCX005)。

作者简介: 欧阳林男(1990—), 女, 博士, 研究实习员, 主要从事桉树人工林培育研究, E-mail: 1332356525@qq.com。

*通讯作者: 陈少雄(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事桉树人工林培育研究, E-mail: sxchen01@163.com。

distribution of *E. cloeziana*. The results from this study provide a reference for rationale future expansion of *E. cloeziana* plantation areas in China.

Key words: *Eucalyptus cloeziana*; potential geographical distribution; dominant climatic factor; maximum entropy (MaxEnt) model

大花序桉(*Eucalyptus cloeziana*), 又名昆士兰桉, 为桉属的昆士兰桉亚属树种^[1]。大花序桉木材纹理通直, 结构均匀、基本密度大、耐久, 材质特性好, 是重要的实木利用树种之一, 在家具、矿柱、建筑等行业应用广泛^[2]。此外, 大花序桉材积生长率高, 尤其在后期材积生长显著, 生长潜力大, 是极具培育价值的中大径材树种之一^[3], 在肯尼亚、南非、津巴布韦、巴西、刚果等多个国家引种栽培, 成为当地重要的经济林产业支柱^[4]。我国自 1972 年起开始引种大花序桉, 在广西、福建、海南、四川等省(区)进行了引种试验^[2,5-6], 但大花序桉在我国的大规模种植还较少。

国内外有关大花序桉的研究报道较多, 如刘涛等^[7]调查了 2 年生大花序桉在桂北地区的生长状况, 测试了其抗寒性能; Ngugi 等^[8-9]通过设置不同水分需求梯度, 比较不同种源大花序桉的耐旱性; Paes 等^[10]发现, 木材干燥前的盐溶液浸泡措施能有效降低大花序桉木材开裂状况, 提高木材质量; 吕建雄等^[11]发现, 与尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)、巨桉(*E. grandis*)相比, 大花序桉的材性更佳, 木材的附加值高; 张岳等^[12]分析了我国大花序桉的纤维形态、化学组成和材质密度, 探讨了有关大花序桉的制浆工艺。这些报道主要集中在大花序桉人工林培育、树种的耐寒性和耐旱性、木材性质和纸浆工艺方面, 为我国大花序桉产业的发展提供了一定参考, 但总体上缺少对其适生区的划分, 盲目引种和推广会导致人力、物力、财力的浪费。明确划定其潜在适生区对推动我国大花序桉产业的发展尤为重要。

MaxEnt 为基于最大熵原理^[13]开发的一种生态位模型软件, 通过整合分析物种实生点位信息和相关环境气象数据对物种的未知分布做出最优预测^[14]。MaxEnt 基于一系列的物种适生环境变量对比得出物种的分布概率, 即估算出物种的适生环境生态位分布^[15]。AUC 分析显示, 与同类生物地理分布预测模型如 ENFA、BIOCLIM、GARP^[16]相比, MaxEnt

模型的预测结果更佳, 尤其在物种潜在分布预测方面, MaxEnt 通常能得到较满意的结果^[17-19]。近年来, MaxEnt 模型在物种适生区预测领域得到广泛应用, 已成功预测了栓皮栎(*Quercus variabilis*)在东亚地区的分布^[19]; 娑罗树(*Shorea robusta*)在东南亚地区的分布^[20]; 巨桉在巴西的分布^[21]; 鞣桉(*E.wandoo*)在澳大利亚西南部的分布^[22]; 红果桉木(*Dysoxylum binectariferum*)^[23]、林生杧果(*Mangifera sylvatica*)^[24]在孟加拉国的分布; 欧洲紫杉(*Taxus baccata*)在印度达旺的分布^[25]; 檀香(*Santalum album*)^[26]、油松(*Pinus tabulaeformis*)^[17]在我国的分布和紫花针茅(*Stipa purpurea*)在青藏高原的分布^[27]。本文利用 MaxEnt 生态学模型, 根据大花序桉在我国的已知栽培分布点和气象条件划分我国南方十省的潜在适生区, 为其在我国的培育和推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 预测模型构建

1.1.1 数据收集

检索国内外与大花序桉有关且公开发表的文献, 收集大花序桉在我国的引种栽培地点共 35 个(表 1)。35 个样点中, 大部分具有准确的经纬度信息, 可直接使用; 少数样点仅有地名, 使用 Google earth 查找经纬度。

表 1 研究中使用的大花序桉地理分布数据的来源及分布

省(区)	数量	文献来源
广东	8	[28-34]
四川	2	[1]
重庆	1	[1]
浙江	1	[1]
云南	1	[1]
广西	13	[1], [3], [6], [35-41]
海南	1	[1]
福建	8	[1], [7], [42-43]

1.1.2 环境因子选择

1981—2010年的广东、四川、江西、重庆、湖南、云南、广西、贵州、海南、福建十个省(区)中各县气象站点的现实地面气候标准值数据集由我国气象数据网提供,共记768个气象站(图1),数据集包含以下四类指标:

反映平均温度的指标:年平均气温、最冷月平

均气温、最热月平均气温。

反映极端温度的指标:最冷月平均最低温、最热月平均最高温、极端低温。

反映水分条件的指标:年降水、年均相对湿度。

反映热量供应的指标: $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的天数、太阳辐射。

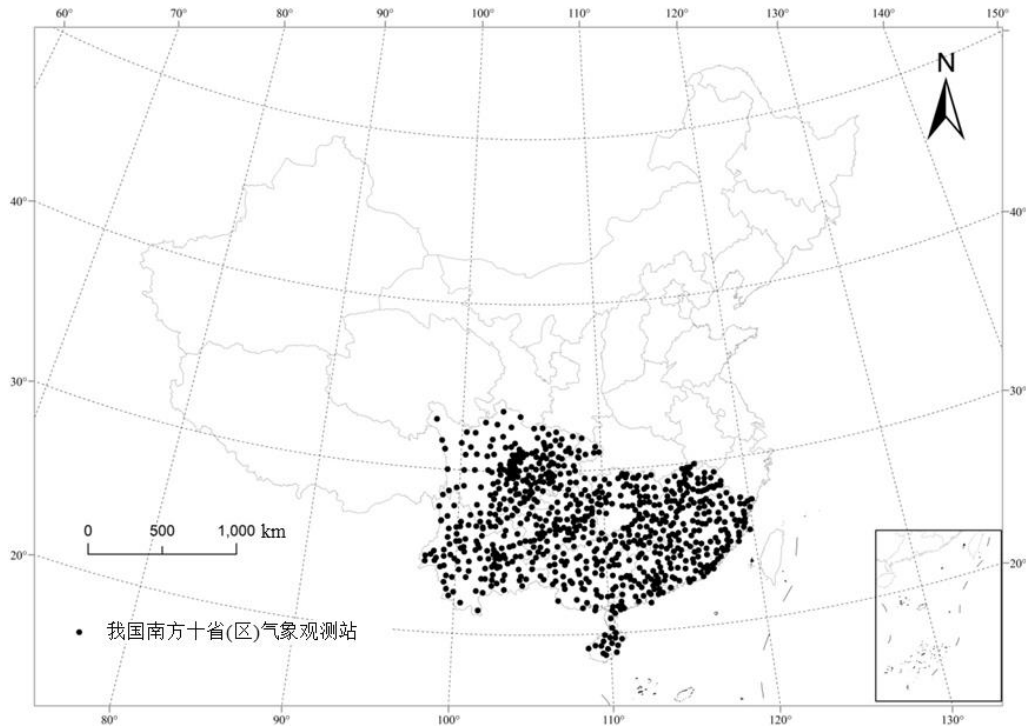


图1 我国南方十省(区)气象观测站地理分布图

1.2 模型精度验证

采用MaxEnt模型(3.4.1)分析大花序桉气候适应性。首先,确定物种特定空间分布区域,随机选取所有数据的75%作为训练子集(training data),用来训练模型,将剩余25%的数据作为评估子集(testing data),用来验证模型。其次,寻找限制物种分布潜在气候因子构筑约束集合。第三,用MaxEnt模型构建大花序桉的地理分布与气候关系模型,采用接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法检验模型精度,ROC曲线基于非阈值依赖评判(threshold independent evaluation)模型精度,以计算得到的特异度(1-specificity)为横坐标,以灵敏度(1-omission rate)为纵坐标绘制成ROC曲线,AUC值是ROC曲线与横坐标围成的面积值(the area under the ROC

curve),取值范围0~1,AUC值越接近1,环境变量与预测物种地理分布间的相关性越大,模型预测结果越准确。因AUC不受诊断阈值影响,对物种发生率不敏感,目前被公认为是最佳的评价指标。ROC曲线的评估标准为:AUC为0.5~0.6,预测结果不可接受(fail);AUC为0.6~0.7,预测结果勉强可以接受(poor);AUC为0.7~0.8,预测结果可以接受(fair);AUC为0.8~0.9,预测结果较为满意(good);AUC为0.9~1.0,预测结果非常满意(excellent)。

1.3 适生区预测与划分

在ArcGIS 10.2软件中将MaxEnt模型计算生成的ASCII格式数据转换为栅格数据文件,并进行重分类和制作大花序桉适宜性区划图,依照适宜性指

数将大花序桉适生区划分为 4 个等级：不适宜区 ($P < 0.05$)、次适宜区 ($0.05 \leq P < 0.33$)、适宜区 ($0.33 \leq P < 0.66$)、最适宜区 ($P \geq 0.66$)。利用 ArcGIS 10.2 软件中的 Raster Reclassify 功能, 计算出各研究省区中各等级适宜区的面积, 得出研究区大花序桉的潜在适生区分布结果。

1.4 环境因子的重要值

运用 MaxEnt 模型的刀切法(Jackknife)模块逐一轮流剔除各环境变量, 并用剩余的变量参与运算, 得出各变量对适生区分布预测模型的贡献值, 评价各环境因子的权重, 筛选出影响大花序桉适生地理分布的主导气候因子。

2 结果与分析

2.1 模型模拟结果的准确性

基于 MaxEnt 模型模拟大花序桉在我国南方十省(区)的潜在分布, 采用 ROC 曲线作为模型预测准确性的衡量指标(图 2), 训练子集和验证子集 AUC 值均大于 0.88(表 2), 表明所构建模型的预测准确性较好, 可用于大花序桉地理分布与气候因子关系的研究。

表 2 模型 AUC 预测精度

气候模型	训练子集 AUC	验证子集 AUC	随机预测 AUC
现在气候	0.907	0.881	0.5

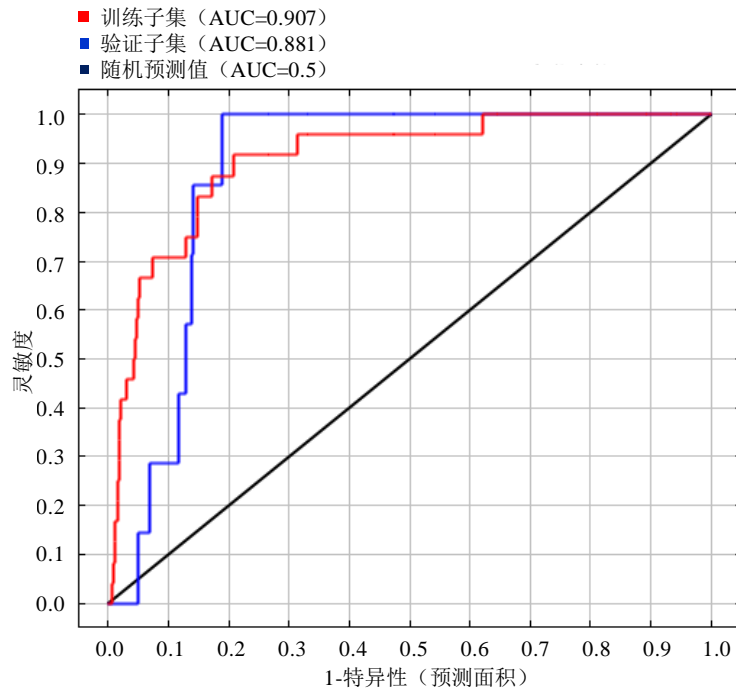


图 2 大花序桉分布预测的 ROC 曲线

2.2 大花序桉在我国南方十省(区)的潜在适生区分布

表 3 为大花序桉在我国南方十省(区)的适生区分布面积。通过 ArcGIS 计算, 大花序桉在我国南方十省(区)的最适宜区总面积为 $24.64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 适宜区总面积为 $21.51 \times 10^4 \text{ km}^2$, 次适宜区总面积为 $51.65 \times 10^4 \text{ km}^2$, 与油松(最适宜区总面积 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$)^[17]、澳洲坚果(最适宜区总面积 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$)^[44] 在我国的潜在分布情况相比, 大花序桉在我国的适生区面积更大, 更具发展潜力。从表 3 还可知, 大花序桉

适生区主要集中在南方沿海地区, 广东省大花序桉最适宜区的面积最大, 其次为广西。图 3 和图 4 显示了大花序桉在我国南方十省(区)的适生区分布状况。最适宜区集中在广东、广西、福建南部和海南北部, 适宜区集中在广西、广东、重庆中部, 在广东和海南的大花序桉总适生区面积分别占其省总面积的 62.64% 和 61.16%, 在十省(区)中适生区面积所占比例最大。

表 3 大花序桉在我国南方十省(区)的适生区分布面积

省(区)	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)			
	不适宜区	次适宜区	适宜区	最适宜区
广东	0.18	2.02	4.51	11.25
四川	38.58	11.66	2.68	0.00
江西	11.82	5.91	0.00	0.00
重庆	2.66	2.60	3.64	0.00
湖南	15.56	7.03	0.03	0.00
云南	27.69	11.18	0.65	0.29
广西	1.91	7.44	5.87	9.19
贵州	17.41	1.27	0.02	0.00
海南	0.00	0.18	1.09	2.00
福建	5.27	2.36	3.02	1.91

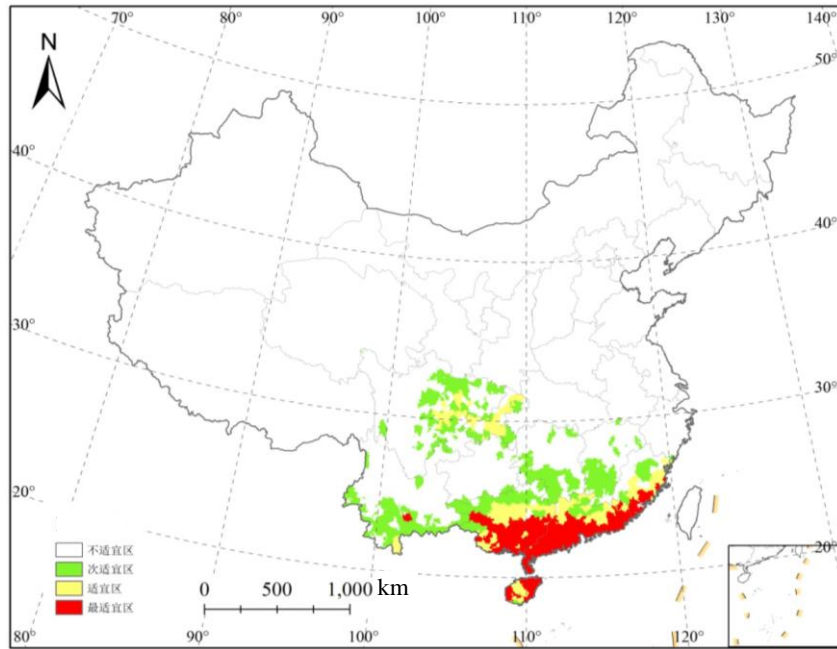


图 3 基于 Maxent 模型的大花序桉潜在适生区预测图

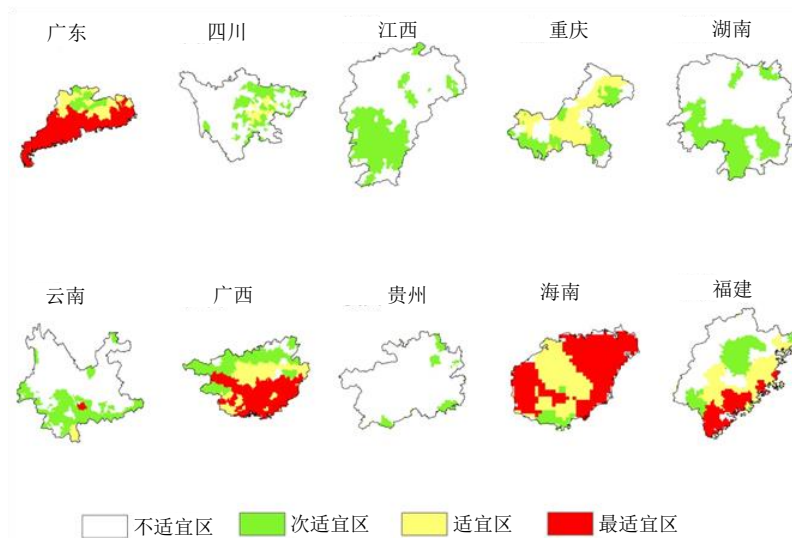


图 4 大花序桉在我国南方十省(区)的适生区分布图

2.3 影响大花序桉分布的不同气候因子评价

图5展示了各环境气候因子对适生区分布的贡献得分情况。由图5可知,影响大花序桉分布情况的环境气候因子按其贡献程度由高到低依次为年平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、最冷月最低温、最冷月均温、极端低温、最热月均温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的天数、太阳辐射、

最热月平均最高温、年降水、年平均相对湿度。综合分析表明,年平均气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是影响大花序桉分布最主要的环境因子,其次为最冷月最低温、最冷月均温、极端低温,最热月均温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的天数对大花序桉的分布也有一定影响,但较年均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和最冷月最低温小。

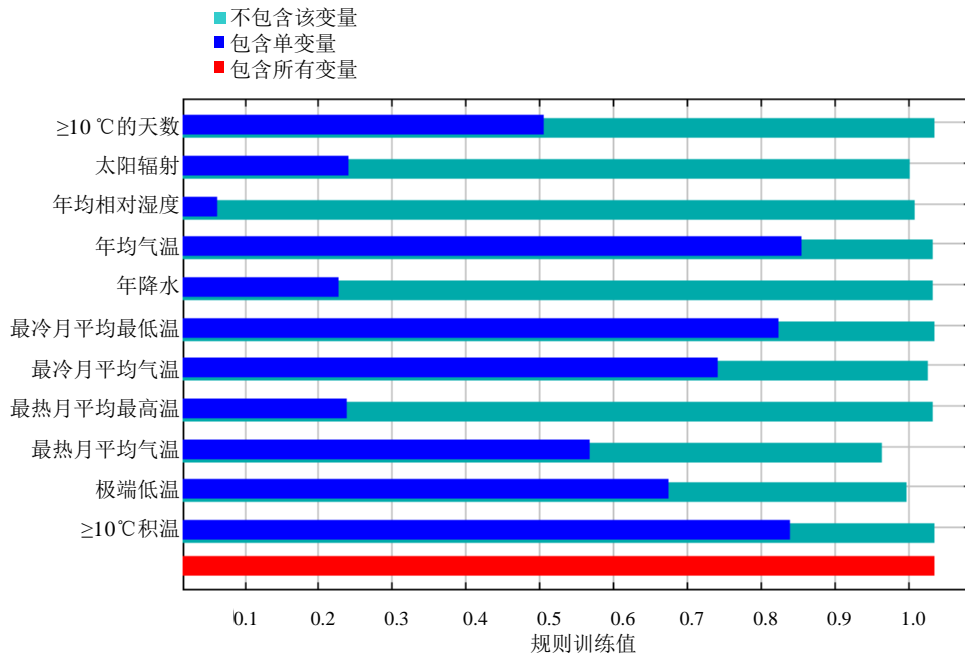


图5 基于 Jackknife 的气候因子对大花序桉在我国南方十省(区)分布的贡献

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型模拟应用

本文利用 MaxEnt 生态位模型与地理信息系统相结合,对原生于澳大利亚且对林业生产和生态环境保护具有重要价值的大花序桉潜在分布进行了预测,获得了大花序桉在我国南方十省(区)的潜在适生分布图。由于大花序桉在国内栽种还处于起步探索阶段,因此在国内引种成功的较少,本文仅收集到35个引种栽培地点。经检验,MaxEnt模型的受试者工作特征曲线(ROC曲线)下面积AUC值均接近于1,预测结果较好。

3.2 大花序桉在我国南方十省(区)的潜在分布

本研究发现适宜大花序桉生长的区域主要集中在南方沿海地区,这主要与南方沿海地区温暖湿

润的气候条件相关。Dalmaris等^[22]发现鞣桉在澳大利亚西南部内陆的适生性低于沿海地区,而由区域气候变化引起的鞣桉适生区收缩主要发生在干燥周期,适生区扩张主要发生在湿润周期,这说明了沿海地区湿润环境对桉树生长的重要性。由本研究结果可知,南方十省(区)最适宜区中以广东省的面积最大,依次为广西区和海南省,这主要是因为广东、广西和海南的年平均气温在十省(区)中名列前茅,而年平均相对湿度也排名靠前;最适宜区主要分布于广东、广西、福建南部和海南北部,这些地区恰好是沿南海海岸线向内陆辐射的区域,而有关研究表明昆士兰沿海地区大花序桉种源的生长状况优于内陆地区^[45],进一步证实了沿海地区为大花序桉的最佳适生区。大花序桉在后期的生长速度快^[3],而沿海地区遭受台风的频率较高,因此在沿海地区大面积种植大花序桉时需做好防风措施,或通过调控

种植密度减少台风对其的侵害。

大花序桉适宜区中仍以广西、广东的面积最大,适宜区在内陆省市的分布以重庆、四川为最多,其中重庆市的适宜区在南方十省(区)中名列第三,而重庆和四川的年降水量在南方十省(区)中排名靠后,这与大花序桉广布于昆士兰沿海和北部降水量较小地区的分布相一致^[8];适宜区集中在广西、广东、重庆、福建中部及四川省东部,大花序桉适宜在重庆、四川两个内陆省市生长,这与早期大花序桉引种于四川时,其生长状况较好的研究结果一致^[46],这为大花序桉在我国内陆的栽培和种植提供了实施方向。

从适生区面积在全省区总面积所占比例来看,广东和海南的总适生区面积所占比例最大,分别为62.64%和61.16%,说明广东和海南的气候条件适宜大花序桉的种植,但在人工林栽培实施中不仅要考虑气候因素,同样也需考虑到土壤因子,海南省长年高温导致土壤含水量低,有报道称大花序桉在海南的耐旱性较差^[2],因而在物种生长气候条件佳但土壤条件相对差的地区,为改善物种生长环境寻找增大土壤湿度等土壤改良措施值得进一步探讨。

3.3 影响大花序桉适生区分布的主导因子

树木的生长和生产力取决于其遗传潜力,植物与环境间的交互作用影响着植物的生理过程速率^[47]。本研究表明,在影响大花序桉适生区分布的11个环境因子中,年均气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是最主要的影响因子,其次为最冷月最低温、最冷月均温、极端低温,表明平均温度和热量供应是影响大花序桉适生区分布的主控环境因子类型。在水分、营养供应相当时,气温是限制植物生产力和产量的最重要因子^[48],如桉树幼苗的蒸腾速率与空气温度呈正相关关系^[49],在正常情况下木本植物的净光合速率与温度呈极显著正相关^[50];气温过高或过低均会给桉树生长带来危害,如较长时间的高温刺激会影响叶肉细胞的光合活性,致使净光合速率约为零,而零度以下的低温处理可破坏桉树叶片细胞膜,降解可溶性蛋白质,使叶片积累过量的MDA(丙二醛),对体内防御系统造成不可逆转的伤害^[51]。因此,在大花序桉适生区划分过程中,选择气温适宜的温暖地

带尤为重要。在热量供应方面,日照与大花序桉的生长紧密相关,随着光子通量密度增大,大花序桉的生长速率逐渐增大^[8];桉树叶片的蒸腾速率随光照强度增大而逐渐上升^[52],因而大花序桉在热量供应相对更充足的广东、广西地区适生性更强。

除了气候因素外,影响物种分布的因素还很多,包括生物因素和非生物因子,其中生物因素主要包括因物种进化而带来的其对环境因子适应性的改变,以及物种间竞争对物种分布区的影响等,非生物因素主要包括地形和土壤等,因目前的认识水平以及技术条件不足,本文未做分析。

4 结论

在我国南方十省(区)中,大花序桉在广东、广西、福建、海南、重庆的最适宜区和适宜生长区面积较大,最适宜区总面积 $24.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,适宜区总面积 $21.51 \times 10^4 \text{ km}^2$,较油松、澳洲坚果树种而言,大花序桉在我国的发展空间更大。大花序桉的适生区主要集中在南部沿海地区,其中最适宜区集中在广东、广西、福建南部和海南北部,适宜区集中在广西、广东、重庆中部。采用MaxEnt最大熵模型对11个环境气候因子进行检测发现,年平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、最冷月最低温、最冷月均温、极端低温这5个气候因子对大花序桉的分布影响最大。

MaxEnt最大熵模型对大花序桉预测结果进行ROC曲线检验,其AUC值均接近于1,说明模型对大花序桉的预测结果较好,若在我国南部引种和推广大花序桉,应在最适宜区和适宜区进行引种试验或推广,在次适宜区和不适宜区需谨慎栽种。

综上,本研究通过采集大花序桉在我国引种栽培的分布数据,基本考虑到大花序桉在我国的实际生态位,明确划定了大花序桉在我国南方的具体适生区,为我国大花序桉引种和推广提供了参考依据。鉴于实际栽种情况的复杂性,本研究仅考虑了气候环境因子的影响,而未考虑大花序桉对土壤条件的需求。因此在引种大花序桉时,既要参考本文的区划结果也应考察地域土壤条件,或配套实施土壤改良措施等提高林木保存率。此外,大花序桉前期生

长缓慢,在本研究种植预测图的一些适宜区域,由于受到台风侵扰,应慎重评估台风可能带来的损失,并采取适宜的规避措施。综合考虑各方面因素,结合本文的适生区划分结果,可提高种植和推广的成功率。在模型预测的潜在适生区分布范围之外,虽然引种成功的概率低,但不排除通过采取相应措施实现成功引种栽培的可能。

参考文献

- [1] 祁述雄.中国桉树(第2版)[M].北京:中国林业出版社,2002.
- [2] 李昌荣,陈奎,周小金.大花序桉研究现状与发展趋势[J].桉树科技,2012,29(2):40-46.
- [3] 王建忠,熊涛,张磊,等.25年生大花序桉种源生长与形态性状的遗传变异及选择[J].林业科学研究,2016,29(5):705-713.
- [4] Keating W G, Bolza E. Characteristics, properties and uses of timbers. Volume 1. Southeast Asia, Northern Australia and the Pacific[M]. Melbourne: Inkata Press, 1982.
- [5] 韦国洁.大花序桉在桂中地区的发展前景[J].桉树科技,2002(1):32-34.
- [6] 翟新翠,项东云,陈健波,等.大花序桉种源/家系遗传变异与早期选择研究[J].广西林业科学,2007,36(1):26-30.
- [7] 刘涛,龙永宁,张维耀,等.几种桉树在冷寒地区的早期适应性研究[J].桉树科技,2005,22(2):23-31.
- [8] Ngugi M R, Doley D, Hunt M A, et al. Physiological responses to water stress in *Eucalyptus cloeziana* and *E. argophloia* seedlings[J]. Trees, 2004, 18(4): 381-389.
- [9] Ngugi M R, Doley D, Hunt M A, et al. Leaf water relations of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* in response to water deficit[J]. Tree Physiology, 2003, 23(5): 335-343.
- [10] Paes J B, Loiola P L, Oliveira J T D S, et al. Effect of salt solutions in dimensional stability of *Corymbia torelliana* and *Eucalyptus cloeziana* woods[J]. Scientia Forestalis, 2015, 43(106): 271-281.
- [11] 吕建雄,殷亚方,赵有科,等.我国南方地区不同桉树人工林树种生长应变水平的评估[J].北京林业大学学报,2005,27(4):69-72.
- [12] 张岳,姚春丽,吴宁.大花序桉 KP 法制浆性能研究[J].中华纸业,2006,27(6):76-79.
- [13] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [14] Cao B, Bai C K, Zhang L L, et al. Modeling habitat distribution of *Cornus officinalis* with Maxent modeling and fuzzy logics in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(6): 742-751.
- [15] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [16] Peterson A T, Papes M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent[J]. Ecography, 2007, 30(4): 550-560.
- [17] Li G Q, Xu G H, Guo K, et al. Geographical boundary and climatic analysis of *Pinus tabulaeformis* in China: Insights on its afforestation[J]. Ecological Engineering, 2016, 86: 75-84.
- [18] Adams-Hosking C, McAlpine C, Rhodes J R, et al. Modelling changes in the distribution of the critical food resources of a specialist folivore in response to climate change[J]. Diversity and Distribution, 2012, 18(9): 847-860.
- [19] 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.
- [20] Deb J C, Phinn S, Butt N, et al. The impact of climate change on the distribution of two threatened Dipterocarp trees[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(7): 2238-2248.
- [21] Garcia L G, Ferraz S F D B, Alvares C A, et al. Modeling suitable climate for *Eucalyptus grandis* under future climates scenarios in Brazil[J]. Scientia Forestalis, 2014, 42(104): 503-511.
- [22] Dalmaris E, Ramalho C E, Poot P, et al. A climate change context for the decline of a foundation tree species in south-western Australia: insights from phylogeography and species distribution modelling[J]. Annals of Botany, 2015, 116(6): 941-952.

- [23] Sohel S I, Akhter S, Ullah H, et al. Predicting impacts of climate change on forest tree species of Bangladesh: evidence from threatened *Dysoxylum binectariferum* (Roxb.) Hook.f. ex Bedd. (Meliaceae)[J]. Forest Biogeosciences and Forestry, 2017, 10(1): 1-7.
- [24] Akhter S, McDonald M A, Breugel P V, et al. Habitat distribution modelling to identify areas of high conservation value under climate change for *Mangifera sylvatica* Roxb. of Bangladesh[J]. Land Use Policy, 2017, 60: 223-232.
- [25] Nimasow G, Nimasow O D, Rawat J S, et al. Remote sensing and GIS-based suitability modeling of medicinal plant (*Taxus baccata* Linn.) in Tawang district, Arunachal Pradesh, India[J]. Current Science, 2016, 110(2): 219-227.
- [26] 胡秀, 吴福川, 郭微, 等. 基于 MaxEnt 生态学模型的檀香在我国的潜在种植区预测[J]. 林业科学, 2014, 50(5): 27-33.
- [27] 胡忠俊, 张镜铨, 于海彬. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 的青藏高原紫花针茅分布格局模拟[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 505-511.
- [28] 梁坤南. 桉属树种/种源试验[J]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 203-208.
- [29] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬. 华南十种桉树的热值与灰分含量比较[J]. 广西植物, 2016, 36(7): 788-794.
- [30] 薛华正, 吴之扬, 陈霞, 等. 桉属树种与种源、家系比较试验[J]. 林业科学研究, 1997, 10(6): 591-598.
- [31] 许宇星, 陈少雄. 一年生高密度初植桉树能源林生物量及热值研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(11): 2079-2084.
- [32] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄. 雷州半岛桉树生物质能源林生长的密度效应研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(4): 350-356.
- [33] 刘德浩, 张卫华, 张方秋, 等. 不同种源巨桉幼林生长性状变异和早期评价[J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 91-94.
- [34] 陈添基. 几种优良桉树引种试验初报[J]. 粤东林业科技, 2006(2): 11-13.
- [35] 邓紫宇. 利用 SSR 分子标记研究大花序桉遗传结构[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [36] 周维, 卢翠香, 杨中宁, 等. 6 年生大花序桉不同种源木材纤维特性的差异分析[J]. 西部林业科学, 2016, 45(2): 29-34.
- [37] 周维, 李昌荣, 陈健波, 等. 大花序桉种源遗传变异及适应性研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(4): 36-41.
- [38] 刘媛, 卢翠香, 苏勇, 等. 大花序桉木材干燥特性研究[J]. 桉树科技, 2016, 33(2): 39-43.
- [39] 杜阿朋, 赵知渊, 王志超, 等. 不同品种桉树人工林生长特征及持水性能研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(7): 1306-1310.
- [40] 唐庆兰, 任世奇, 郭东强, 等. 修枝对大花序桉生长和光合特性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(2): 264-268.
- [41] 李昌荣, 项东云, 陈健波, 等. 大花序桉木材基本密度的变异研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 158-162.
- [42] 陈建有. 大花序桉密度效应的初步研究[J]. 绿色科技, 2014(5): 86-88.
- [43] 简丽华. 桉树实木利用树种/种源引种试验研究[J]. 现代农业科技, 2012(10): 198-199.
- [44] 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.
- [45] Turnbull J W. Geographic variation in *Eucalyptus cloeziana*[D]. Canberra: Australian National University, 1979.
- [46] 李晓清, 胡天宇. 四川桉树基因收集及培育技术[J]. 四川林业科技, 2004, 25(1): 26-30.
- [47] Teskey R O, Bongarten B C, Clegg B M, et al. Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L.)[J]. Tree Physiol, 1987, 3(1): 41-61.
- [48] Turner N C, Kramer P J. Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress[M]. New York: Wiley/Interscience, 1980.
- [49] 于婧睿, 杨钙仁, 王廖丹, 等. 光照强度与风速对盆栽桉树幼树蒸腾速率的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(2): 76-81.
- [50] 李洪军, 吴玉环, 张志祥, 等. 温度变化对木本植物光合生理生态的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 39-42.
- [51] 黄月华, 徐建民, 余雪标. 低温胁迫对桉树代谢的影响[J]. 热带农业科学, 2005, 25(5): 24-28.
- [52] 刘建, 曾解放, 项东云, 等. 尾叶桉和邓恩桉的光合和蒸腾特性对光强的响应[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9152-9153, 9156.