

粗皮桉在我国的潜在适生区与主导生态因子研究

欧阳林男, 陈少雄*, 刘学锋, 何沙娥, 张维耀

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 本文基于粗皮桉的实地栽培点分布数据, 结合气候、地形、土壤因子数据集, 运用最大熵模型(MaxEnt)预测了粗皮桉在中国的潜在适生区。结果表明: MaxEnt 的预测准确性较高, 模型预测的训练子集和测试子集 AUC 值均大于 0.855。粗皮桉适生区分布集中在东南沿海, 最适生区总面积 53 522 km², 集中在广东西部和东部沿海, 广西中部, 福建和海南沿海; 总适生面积 145 655 km², 占研究区总面积的 5.05%。刀切法分析结果表明, 海拔、温度变化方差、最冷月份最低温度、最暖季度降水量、坡向 5 个因子是影响粗皮桉分布的主导生态因子, 累积贡献率为 85.7%。中国适生区的温度变化方差与自然分布区的相似性较强; 与自然分布区相比, 我国适生区的海拔更低、最冷月份最低温度更高、最暖季度降水量更大, 有利于粗皮桉的生长。

关键词: 粗皮桉; 适生区; 生态因子; 最大熵模型

中图分类号: S724

文献标识码: A

Study on Potential Suitable Area for *Eucalyptus pellita* in China and Key Factors Influencing This

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

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

Abstract: The areas geographically suitable for *Eucalyptus pellita* plantations in China were analyzed using maximum entropy modeling technology in this study, by combining data on climate, topography and soil factors. The results showed that the MaxEnt model is able to predict the potential distribution of *E. pellita* with a high precision – the correspondence between the training data and test data was over 0.855. The majority of area suitable for this species is concentrated in China's southeast coastal region, with most of the highly suitable areas being concentrated in the western and eastern coastal regions of Guangdong, central regions of Guangxi and coastal regions of both Fujian and Hainan, covering a total area of 53 522 km². The total suitable area for the species in China totals 145 655 km², which is 5.05% of the total research area. Jackknife analysis of MaxEnt showed that the dominant ecological factors influencing the potential geographic distribution of *E. pellita* are altitude, seasonal temperature variance, minimum temperature of the coldest month, precipitation of the warmest quarter and topographical aspect; together these factors account for 85.7% of the variation in suitable areas. Seasonal temperature variance of the suitable area in China is similar to that found in *E. pellita*'s native habitat. But, compared with the latter, suitable areas in China have lower altitudes, higher minimum temperatures of the coldest month and greater precipitation of the warmest quarter – the latter being a trait favorable for the rapid growth of *E. pellita*.

Key words: *Eucalyptus pellita*; potential suitable area; ecological factors; MaxEnt model

粗皮桉(*Eucalyptus pellita*)生长迅速, 木质坚实, 力学强度适中, 为理想的实木利用树种^[1-3]。粗皮桉原产于澳大利亚昆士兰州沿海地带, 最冷月平均最低温 0.3 ~ 21.9℃, 最热月平均最高温 22.5 ~ 39.2℃, 年均降水量 152 ~ 4 060 mm, 一般无霜冻。

粗皮桉作为实木利用树种在国际上广泛栽植。

在巴西、印度、刚果、新几内亚广泛引种, 生长状况良好, 原木用于电线杆、枕木、木地板、桥梁建筑^[4]。我国于 1986 年在海南地区引种栽培, 之后在广东、广西、海南广泛种植。目前有关粗皮桉的研究集中在力学性质^[5]、育苗繁殖^[6-7]、种源遗传多样性^[8-9]、引种试验^[10], 而有关该树种在我国的潜在地

基金项目: 广东省林业科技创新项目“桉树大径材与林下经济培育技术研究示范”(2016KJXC005); 国家重点研发计划课题“桉树大径材定向培育技术”(2016YFD0600502)。

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。

理适生区划分的报道尚无。

本文以粗皮桉为研究对象, 选取我国长江以南 12 个省(区)为研究区域, 使用粗皮桉已有的分布数据, 采用最大熵(MaxEnt)模型预测粗皮桉在我国的潜在适生区, 分析影响粗皮桉适生区分布的主导生态因子, 为粗皮桉在我国的有序推广种植提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与数据收集

根据长期野外调查结果和文献报道, 粗皮桉在我国的分布主要集中在长江以南 12 个省(区)($15^{\circ}40' \sim 32^{\circ}13' \text{N}$, $97^{\circ}31' \sim 120^{\circ}40' \text{E}$), 包括海南、广西、广东、福建、云南、江西、四川、重庆、湖南、贵州、浙江、台湾, 因而选定此区域为研究区。结合长期以来对部分样地的野外调查资料, 相关省(区)等有关文献和专著^[10-21]以及国家林业局桉树研究开发中心的桉树资源连续清查数据, 共获得粗皮桉的分布数据 32 份。通过 ArcGIS10.2 将粗皮桉的 32 个分布点与我国南部 12 省(区)1:400 万数字化区政图层进行叠加, 当分布点在研究区之外时将该点剔除, 最终确定 30 个粗皮桉分布点(图 1)。

1.2 环境因子

环境数据来源于世界气候数据库 (<https://www.worldclim.org>) 和世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.2)(HWSD, <http://www.fao.org>), 空间分辨率为 $30'$ ($\approx 1 \text{ km}$), 包括气候因子 19 个、土壤因子 10 个、地形因子 3 个、太阳辐射因子 1 个, 共 33 个环境因子, 均为当前时期 1950—2000 年各地理站点记录的数据。

使用 SPSS 20.0 对环境变量进行相关性分析和主成分分析, 以消除各环境变量间的多重共线性。例如, 当 Bio2 和 Bio1 之间相关系数 $r=0.801$, Bio2 和 Bio3 之间 $r=-0.917$ 时, 去掉 Bio2, 保留 Bio1 和 Bio3。综合主成分分析因子载荷量分析和因子间的相关性分析结果, 筛选出 19 个环境变量, 用于粗皮桉适生区预测(表 1)。

1.3 模型预测

将粗皮桉的分布点数据和 19 个环境变量数据集导入 Maxent 3.4 中。设置测试集为分布点的 10%, 训练集为分布点的 90%, 采用刀切法检验环境因子贡献权重^[22], 设置受试者特征曲线(ROC), 采用 ROC 曲线与横坐标围成的面积(AUC)值评价模型准确度^[23]。AUC 评价标准为: 0.5~0.6 差, 0.6~0.7 较差, 0.7~0.8 一般, 0.8~0.9 好, 0.9~1.0 非常好^[24]。

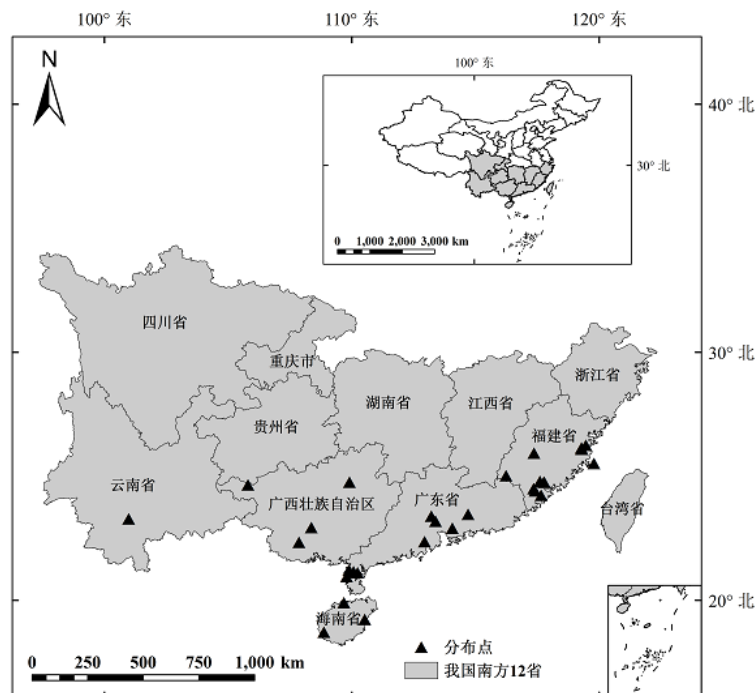


图 1 研究区域与实地分布点

1.4 数据处理

在 ArcGIS 软件中将模型计算得到的 ASCII 文件转换为栅格格式。潜在分布概率值为 0 ~ 1，依照适生性指数将粗皮桉潜在分布区分为不适生($P < 0.33$)、适生($0.33 \leq P < 0.66$)和最适生($P > 0.66$)3 个等级。

本研究选择适生和最适生两个等级为粗皮桉的总适生区，使用 Excel 2007 统计最适生区、总适生区面积，采用 SPSS 20.0 分析数据的差异性。

2 结果与分析

2.1 模型预测

图 2 展示了 MaxEnt 模型的 ROC 预测精度结果，训练数据和测试数据子集 AUC 值分别为 0.970 和 0.855，模型对粗皮桉适生区分布的预测可信度达到“好”的水平。表 1 显示了模型刀切法分析结果，即各环境变量对粗皮桉适生区分布的贡献率大小，其中 Alt 海拔因子的贡献率最高(48.9%)，为最重要的环境因子；其次，Bio4 温度变化方差(16.3%)、Bio6 最冷月份最低温度(9.2%)的贡献率也较高；

Bio18 最暖季度降水量(6.1%)、Aspect 坡向(5.2%)的贡献率均大于 5.0%。上述 5 个环境因子的贡献率累积达到 85.7%，这些因子是分布模型构建过程中起主要作用的环境因子，也是影响粗皮桉潜在分布的主导生态因子。

表 1 环境变量描述及贡献率

序号	变量代码	变量类型	贡献率 /%
1	Bio1	年均温	0.0
2	Bio3	昼夜温差与年温差比值	0.5
3	Bio4	温度变化方差	16.3
4	Bio6	最冷月份最低温度	9.2
5	Bio8	最湿季度平均温度	1.3
6	Bio9	最干季度平均温度	1.0
7	Bio11	最冷季度平均温度	1.3
8	Bio13	最湿月份降水量	2.0
9	Bio17	最干季度降水量	1.6
10	Bio18	最暖季度降水量	6.1
11	Bio19	最冷季度降水量	1.5
12	pH	土壤 pH 值	1.8
	Water	土壤有效水含量	1.7
14	N	土壤氮含量	0.8
15	CEC	土壤阳离子交换量	0.1
16	Alt	海拔	48.9
17	Aspect	坡向	5.2
18	Slop	坡度	0.6
19	SR	太阳辐射	0.0

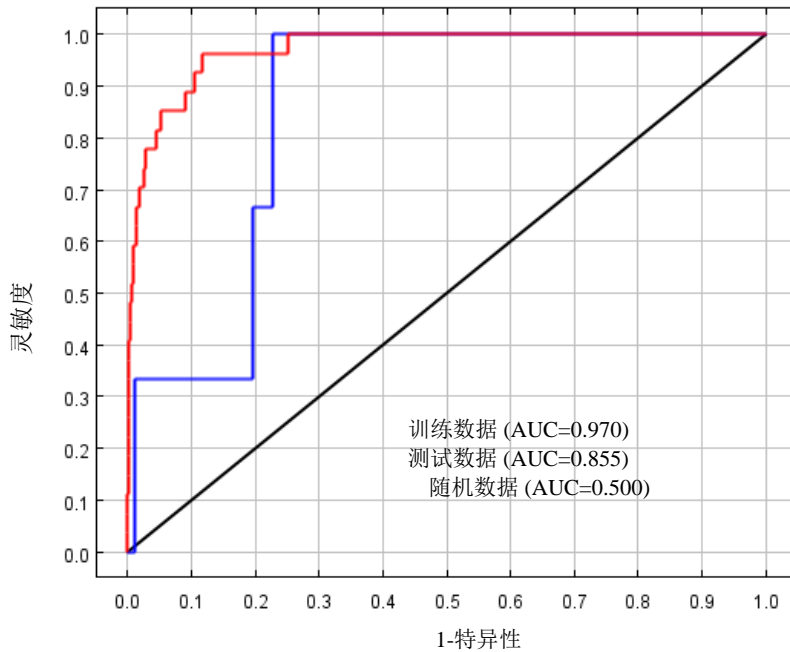


图 2 MaxEnt 模型 ROC 预测结果

2.2 粗皮桉适生区分布

表 2 为粗皮桉在我国南部 12 省(区)的适生面积。当前气候条件下,粗皮桉的最适生面积为 53 522 km², 总适生面积为 145 655 km², 占研究区总面积的 5.05%; 广东、福建、广西的最适生面积排名前三; 海南总适生区占本省总面积的比例最大, 为 38.99%。图 3 显示了基于 MaxEnt 模型的粗皮桉适生区分布

预测结果。从图 3 可知, 粗皮桉在我国的总适生区主要分布在东南部沿海地带, 为湿润南亚热带和热带地区, 地势以低海拔东南丘陵地带为主, 范围主要为 18°3′~28°0′N、106°1′~121°8′E。最适生区范围为 18°6′~26°6′N、108°7′~121°8′E, 主要地点有广东湛江、潮州、汕头、揭阳, 福建漳州、厦门, 广西来宾、贵港, 海南琼海、万宁。

表 2 粗皮桉在我国南部的适生区分布面积 km²

省(区)	最适生面积	适生面积	不适生面积	总适生面积(比例)
广东	25 700	42 163	154 016	67 863(30.59%)
福建	12 867	12 737	130 784	25 604(16.37%)
广西	7 277	23 083	270 566	30 360(10.09%)
海南	5 994	10 108	25 200	16 102(38.99%)
台湾	1 561	1 697	41 844	3 258(7.22%)
云南	52	1 056	492 084	1 108(0.22%)
江西	35	657	218 957	692(0.32%)
浙江	35	417	132 307	452(0.34%)
四川	1	139	654 754	140(0.02%)
重庆	0	17	110 767	17(0.02%)
贵州	0	53	229 988	53(0.02%)
湖南	0	6	279 043	6(0.00%)
合计	53 522	92 133	2 740 310	145 655(5.05%)

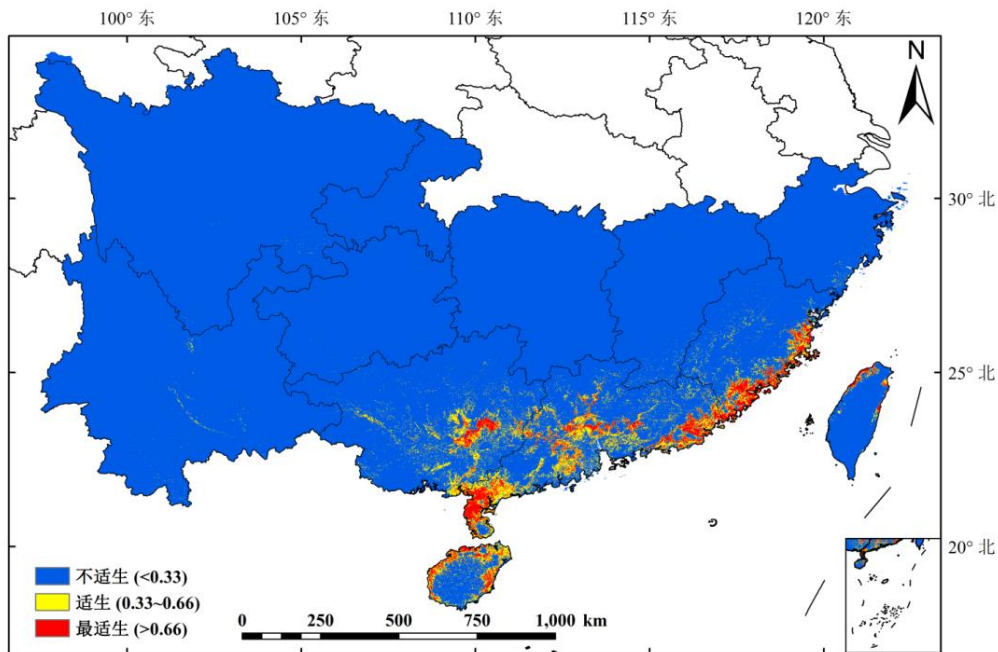


图 3 基于 MaxEnt 模型的粗皮桉潜在适生区

2.3 粗皮桉适生区与自然分布区之间的生态因子相似性

基于 MaxEnt 模型筛选出的 5 个主导生态因子，利用差异性分析评价我国适生区与昆士兰州自然分布区之间的生态因子相似性。图 4 展示了我国适生区与自然分布区之间的生态因子相似性结果，可以

看出，温度变化方差在我国适生区与自然分布区之间无显著差异；与自然分布区相比，我国适生区的海拔更低、最冷月份最低温度更高、最暖季度降水量更大；自然分布区的坡向为南，我国适生区的坡向为东南。

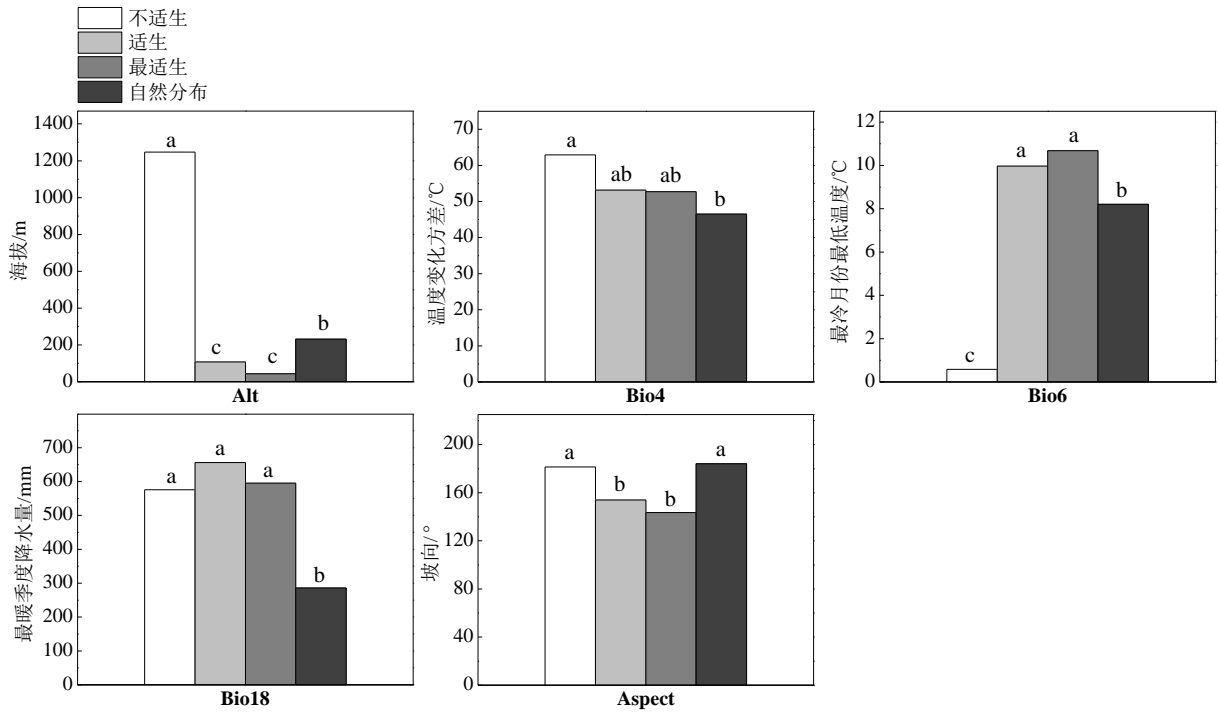


图 4 适生分布区与自然分布区之间的生态因子相似性

注：图中不同字母表示生态因子数值差异显著($P < 0.05$)；坡向北(0 ~ 22.5)，东北(22.5 ~ 67.5)，东(67.5 ~ 112.5)，东南(112.5 ~ 157.5)，南(157.5 ~ 202.5)，西南(202.5 ~ 247.5)，西(247.5 ~ 292.5)，西北(292.5 ~ 337.5)，北(337.5 ~ 360)。

3 讨论

本文运用 MaxEnt 模型在当前气候条件下对粗皮桉在我国的适生区分布进行了预测，得出粗皮桉在我国的潜在分布图。经检验，模型受试者特征曲线训练子集和测试子集 AUC 值均大于 0.855，模型预测结果较好。根据刀切法分析结果，用于模型构建的 19 个生态因子中，海拔对分布模型的贡献率最高，为 48.9%，对粗皮桉的分布起最重要的作用；温度变化方差、最冷月份最低温度的贡献率也很高，分别为 16.3%、9.2%，对粗皮桉的分布其次重要。实地调查发现，在广西东门林场的粗皮桉长势良好，

其海拔低于 100 m，且温差小，最冷月份最低温在 10°C 以上；有学者发现，在新几内亚发现的粗皮桉均位于低海拔地区，并且生长状况好^[4]，以上均与海拔因子对粗皮桉分布起重要作用的研究结果相一致。此外，最暖季度降水量、坡向的贡献率分别为 6.1%、5.2%，对粗皮桉的分布也有较大影响。

本研究发现，粗皮桉在我国的适生区分布集中在东南部沿海地带，最适生区集中在广东西部和东部沿海(湛江、潮州、汕头、揭阳)，广西中部(来宾、贵港)，福建(漳州、厦门)和海南沿海(琼海、万宁)，这主要与上述地区的较低海拔与较小的温度变化方差有关。广东、福建、广西的最适生面积排名前三，分别为 25 700、12 867、7 277 km²，海南总适生区

占本省总面积的比例最大, 为 38.99%, 这同样与广东、福建、广西、海南的地形以及气候因素相关。

外来物种的适宜栽培区主要根据该物种的生物学特性、自然分布区与潜在适生区生态相似性以及实地种源试验结果综合确定^[25]。粗皮桉自然分布区与潜在适生区的 5 个主导生态因子相似性分析表明, 我国适生区的温度变化方差与自然分布区无显著差异, 具有较强相似性。相较自然分布区而言, 我国适生区的海拔更低、最冷月份最低温度更高、最暖季度降水量更大。有学者报道, 粗皮桉原生于低海拔地区^[4], 一定温度范围内, 粗皮桉代谢过程中叶绿素含量与生长环境温度呈正相关^[26], 降水量的变化对粗皮桉的生长影响较大^[27], 因而就此 3 个生态因子而言, 粗皮桉更适于在我国适生区环境中生长。粗皮桉具有较小的叶角和较高的叶黄素循环活性, 能较好地耗散过度的太阳辐射, 减少光抑制作用^[28], 因而太阳辐射强度和及其产生的高温效应对粗皮桉分布的影响相对小。

在物种分布模型研究领域, 多数学者通常只采用气候因子进行建模^[29-30]。本文在建模因子中加入了地形和土壤数据集, 分析结果表明, 海拔与温度变化方差对分布模型的贡献度名列前二, 地形与气候因子对粗皮桉分布均很重要, 在粗皮桉栽培区选择中应充分考虑海拔与温度变化方差因子。因高精度土壤指标数据获取难度大, 本研究尝试采用 HWSD 网站公布的土壤基本数据, 研究发现, 土壤因子对粗皮桉的分布预测贡献度很低, 土壤 pH 值、有效水含量、氮含量以及阳离子交换量的累积贡献率仅 4.4%, 这与粗皮桉对土壤质量的要求较低, 能在不肥沃土壤基质生长的生物学特性相一致^[4]。本研究在建模中采用土壤因子只是一种探索, 将高精度生态因子、物种野外生长数据集合运用到物种的适生区分布预测仍为该研究领域中的一个突破点。

4 结论

MaxEnt 模型对粗皮桉预测的受试者特征曲线训练数据和测试数据集 AUC 值均大于 0.855, 模型预测结果较好。粗皮桉在我国的潜在适生区分布

集中在东南沿海, 最适生区面积 53 522 km², 集中在广东西部和东部沿海、广西中部、福建和海南沿海; 总适生面积 145 655 km², 占研究区总面积的 5.05%。

影响树种潜在适生区分布的 19 个环境变量中, 海拔、温度变化方差、最冷月份最低温度、最暖季度降水量、坡向 5 个因子为主导生态因子, 对粗皮桉分布的影响最大。我国适生区的温度变化方差与自然分布区具有较强的相似性; 与自然分布区相比, 我国适生区的海拔更低、最冷月份最低温度更高、最暖季度降水量更大, 有利于粗皮桉的生长。

在我国栽培推广粗皮桉时, 建议考虑在本研究结果中的总适生区范围内进行栽植, 在实际种植中, 应首先考虑上述 5 个主导生态因子的适宜性。在此基础上, 还需结合考虑实地树木生长情况, 进而实施粗皮桉种植工程。

参考文献

- [1] 赵荣军, 邢新婷, 吕建雄, 等. 粗皮桉木材力学性质的近红外光谱方法预测[J]. 林业科学, 2012, 48(6): 106-111.
- [2] Hii S Y, Ha K S, Ngui M L, et al. Assessment of plantation-grown *Eucalyptus pellita* in Borneo, Malaysia for solid wood utilisation[J]. Australian Forestry, 2017, 80(1): 26-33.
- [3] Sun D, Dickinson G R, Robson K J. Growth of *Eucalyptus pellita* and *E. urophylla* and effects on pasture production on the coastal lowlands of tropical northern Australia[J]. Australian Forestry, 1996, 59(3): 136-141.
- [4] Harwood C E, Alloysius D, Pomroy P, et al. Early growth and survival of *Eucalyptus pellita* provenances in a range of tropical environments, compared with *E. grandis*, *E. urophylla* and *Acacia mangium*[J]. New Forest, 1997, 14(3): 203-219.
- [5] Lukmandaru G, Zumaini U F, Soeprijadi D, et al. Chemical Properties and Fiber Dimension of *Eucalyptus pellita* from The 2nd Generation of Progeny Tests in Pelaihari, South Borneo, Indonesia[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2016, 44(4): 571-588.
- [6] 沙月娥, 吴志华, 欧阳乐军, 等. 粗皮桉的组织培养与植株

- 再生研究[J].南方农业学报,2013,44(9):1511–1516.
- [7] Sulichantini E D, Sutisna M, Sukartiningsih S, et al. Clonal Propagation of Two Clones *Eucalyptus Pellita* F. Muell By Mini-Cutting[J].International Journal of Science and Engineering,2014, 6(2):117–121.
- [8] 李昌荣,熊涛,陈东林,等.粗皮桉种源遗传多样性 SSR 分析[J].南方农业学报,2016,47(1):7–12.
- [9] Hung T D, Brawner J T, Meder R, et al. Estimates of genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus pellita* F. Muell. to support tree breeding in Vietnam[J]. Annals of Forest Science,2015,72(2): 205–217.
- [10] 林玉清.闽南山地粗皮桉家系引种试验[J].福建林业科技,2010,37(3):50–55.
- [11] 周永东,孙锋,吕建雄,等.6 种桉木单板干燥质量的比较[J].林业科学,2014,50(11):104–108.
- [12] 农锦德,蔡林,李梅艳,等.桂西桉树无性系对比试验[J].广西林业科学,2017,46(3):284–288.
- [13] 周群英,陈少雄,吴志华,等.广东樟木头 5 种桉树的能量特征研究[J].热带亚热带植物学报,2009,17(6):549–555.
- [14] 陈晓明,王以红,蔡玲,等.几个桉树优良无性系的 ISSR 指纹图谱分析[J].西部林业科学,2009,38(2):57–61.
- [15] 卢万鸿,罗建中,谢耀坚,等.桉树幼林抗风特点研究[J].桉树科技,2009,26(2):21–25.
- [16] 吴清,黄艺平,瞿超,等.东江林场桉树无性系生长初步对比试验[J].广东林业科技,2009,25(3):46–50.
- [17] 施成坤.沿海前沿林带更新树种选择研究[J].海峡科学,2010(2):46–47.
- [18] 周顺得.闽南丘陵山地桉树不同无性系栽培试验研究[J].安徽农学通报,2010,16(1):165–166.
- [19] 罗火月.闽南山地桉树优良无性系选择试验研究[J].安徽农学通报,2012,18(1):128–130.
- [20] 吴坤明,吴菊英,徐建民,等.桉树杂交育种的研究[J].林业科学研究,1996,9(5):504–509.
- [21] 罗亚春,童清,史富强,等.卫国林业局桉树优良无性系的引种栽培初报[J].山东林业科技,2013,43(5):48–50.
- [22] Mohammad-Reza A S, Tarkesh M, Bashari H. MaxEnt modeling for predicting suitable habitats and identifying the effects of climate change on a threatened species, *Daphne mucronata*, in central Iran[J].Ecological Informatics, 2018, 43: 116–123.
- [23] Cupertino-Eisenlohr M A, Vin íus-Silva R, Meireles L D, et al. Stability or breakdown under climate change? A key group of woody bamboos will find suitable areas in its richness center[J].Biodiversity and Conservation,2017, 26(8): 1845–1861.
- [24] 宗敏,韩广轩,栗云召,等.基于 MaxEnt 模型的黄河三角洲滨海湿地优势植物群落潜在分布模拟[J].应用生态学报,2017,28(6):1833–1842.
- [25] Booth T H, Jovanovic T, Arnold R J. Planting domains under climate change for *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus urograndis* in parts of China and South East Asia[J].Australian Forestry,2017,80(1): 1–9.
- [26] Mokochinski J B, Mazzafera P, Sawaya A C H F, et al. Metabolic responses of *Eucalyptus* species to different temperature regimes[J].Journal of Integrative Plant Biology, 2018,60(5): 397–411.
- [27] Manson D,Schmidt S, Bristow M, et al.Species-site matching in mixed species plantations of native trees in tropical Australia[J].Agroforestry Systems,2013,87(1): 233–250.
- [28] Xu S M, Liu L X,Woo K C, et al.Changes in photosynthesis, xanthophyll cycle,and sugar accumulation in two North Australia tropical species differing in leaf angles[J].Photosynthetica,2007,45(3):348–354.
- [29] Remya K, Ramachandran A, Jayakumar S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India[J].Ecological Engineering, 2015, 82: 184–188.
- [30] Wang C J, Wan J Z, Mu X Y, et al. Management planning for endangered plant species in priority protected areas[J].Biodiversity and Conservation,2015,24(10): 2383–2397.