

全球气候变化下贵州省青冈林的潜在生境动态

李望军¹, 冯图¹, 崔涛², 杨婧¹, 周瑞伍³, 陈丽¹, 彭明春^{4*}

(1. 贵州工程应用技术学院生态工程学院, 贵州 毕节 551700; 2. 威宁县林业局, 贵州 毕节 553100; 3. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303; 4. 云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

摘要: 为了解贵州省青冈林在全球气候变化下的潜在分布特征, 基于现状分布数据, 结合当前气候数据和未来气候变化情景(RCP8.5 情景, 2070–2099 年)构建 Maxent 潜在分布模型, 预测贵州省青冈林的潜在分布变化。结果表明, 最冷季均温(bio11)、最冷月最低温度(bio6)和年均降水量(bio12)为控制贵州省青冈林潜在生境的主导气候因子; RCP8.5 情景下贵州省青冈林的潜在分布面积相较当前气候条件增加, 中度适宜生境增加 19 419 km², 高度适宜生境增加 9 944 km²; 中度适宜生境平均海拔较当前气候条件上升 126 m, 高度适宜生境平均上升 85 m。总的来说, 贵州省青冈林对全球气候变化的响应不十分敏感。

关键词: 全球气候变化; Maxent 模型; 青冈林; 潜在生境

doi: 10.11926/jtsb.4158

Dynamics of Potential Distribution of *Cyclobalanopsis* Forest in Guizhou Province of China under Global Climate Change

LI Wang-jun¹, FENG Tu¹, CUI Tao², YANG Jing¹, ZHOU Rui-wu³, CHEN Li¹, PENG Ming-chun^{4*}

(1. School of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, Guizhou, China; 2. Forestry Bureau of Weining County, Bijie 553100, Guizhou, China; 3. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China; 4. Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In order to understand the potential distribution characters of *Cyclobalanopsis* forest in Guizhou Province, based on the current distribution data, and combined with current climate data and future climate change scenario (RCP8.5 scenario, 2070–2099), the Maxent potential distribution modeling was established to predict the changes of potential distribution of *Cyclobalanopsis* forest in Guizhou Province. The results showed that the dominant climatic factors affecting its potential distribution were mean temperature of the coldest quarter (bio11), min. temperature of the coldest month (bio6) and annual precipitation (bio12). Under the RCP8.5 scenario, potential habitat area of *Cyclobalanopsis* forest in Guizhou would increase than that under current climatic conditions, there were 19 419 km² for moderate suitable habitat and 9 944 km² for high suitable habitat, respectively. The mean altitude of moderate suitable habitat would increase 126 m, and 85 m for high suitable habitat. In general, *Cyclobalanopsis* forest in Guizhou Province wouldn't be sensitive to the global climate change.

Key words: Global climate change; Maxent model; *Cyclobalanopsis* forest; Potential habitat

收稿日期: 2019-09-23

接受日期: 2019-12-03

基金项目: 贵州省重点学科生态学项目(ZDXK[2013]11); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(KY[2018]394, KY[2018]399); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810668031); 贵州工程应用技术学院高层次人才科研启动基金项目(G2018006)资助

This work was supported by the Key Discipline of Ecology of Guizhou Province (Grant No. ZDXK[2013]11); the Project for Youth Science and Technology Talent of Guizhou Provincial Education Department (Grant No. [2018]394, KY[2018]399); the Program for Innovation and Entrepreneurship of National Undergraduate Training (Grant No. 201810668031); and the Research Foundation for Advanced Talents of Guizhou University of Engineering Science (Grant No. G2018006).

作者简介: 李望军(1986~), 男, 博士, 讲师, 研究方向为植被生态学。E-mail: 40133853@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 710523566@qq.com

青冈林是以青冈属(*Cyclobalanopsis*)树种为优势的植物群落,是我国亚热带常绿阔叶林的重要组成部分^[1]。贵州省青冈林群落是在当地特殊水热条件组合下形成的顶级群落,群落结构复杂,生物多样性丰富,是西南喀斯特山区的典型森林植被类型,也是珠江和长江上游重要的生态防护林^[2-4]。

目前关于青冈林的研究大多集中于地理起源^[5-6]、林分结构^[7]、种群结构与动态^[8-10]、竞争关系^[11]、种苗繁殖^[12]和资源利用^[13]等方面,而在植被类型和气候关系方面的研究尚不多见。倪健等^[14]基于植被-气候关系常见的指标方法,探究了青冈(*C. glauca*)在中国的地理分布及其与气候的关系;曹铭昌^[15]基于广义模型和分类回归树模拟了我国青冈树种的地理分布区。然而这些研究都局限于当前气候条件,尚未涉及青冈林的潜在分布对全球气候变

化的响应。

本研究基于 Maxent 物种分布模型,结合 IPCC5 提供的 19 个气候因子数据,预测了贵州省青冈林的潜在分布,并结合未来气候变化情景(2070–2090 年),探究了全球气候变化下其潜在分布的变化趋势,以期为贵州省青冈林与气候因子的关系提供生态学解释,同时为其保护和恢复提供理论依据。

1 研究区概况

贵州省位于 103°31′~109°30′ E, 24°30′~29°13′ N, 全省土地面积约 $1.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1), 地处中国西南云贵高原东部的斜坡地带,属亚热带高原季风湿润气候,当地充沛的水热条件与复杂的地形地貌共同孕育了丰富的植物、植被资源^[16]。

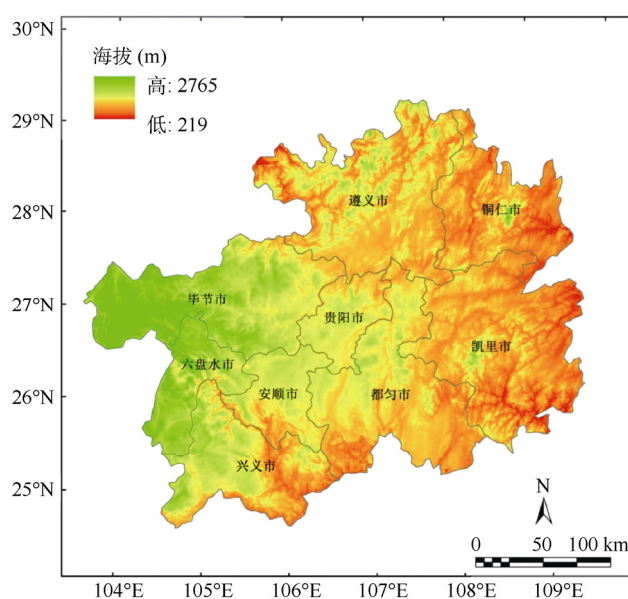


图 1 贵州省行政区划图

Fig. 1 Administrative divisions of Guizhou Province

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究用到的数据主要有贵州省的 DEM 数据、青冈林的实际分布样点数据以及气候因子数据(包含当前气候因子数据和未来气候情景数据)。DEM 数据从中国科学院地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)下载,并用贵州省行政边界掩膜提取后存储为 tiff 格式;青冈林的实际分布样点数据通过野外实地调查采集,将记录的经纬度坐标生成

ArcGIS 可用的 shp 图层后输出为 csv 格式,备 Maxent 建模使用,本研究的野外调查工作共记录 79 个青冈林实际分布样点数据;气候因子数据从 Worldclim 气候数据中心(www.worldclim.org)下载。当前气候数据为 IPCC5 提供的 19 个生物气候因子(表 1),未来气候情景选用最高温室气体排放情景,即 RCP8.5 情景(2070–2099 年)。所有气候因子数据通过贵州省行政边界掩膜提取后存储为 asc 格式。涉及的地理空间数据统一选用 WGS84 投影坐标系统,以便 ArcGIS 进行空间叠加分析。

表 1 19 个生物气候因子

Table 1 Nineteen bio-climate factors

编号 No.	描述 Description	编号 No.	描述 Description
bio1	年均温 Annual mean temperature	bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter
bio2	昼夜温差月均温 Mean diurnal range	bio12	年均降水量 Annual precipitation
bio3	等温性 Isothermality	bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month
bio4	温度季节变化标准差 Temperature seasonality	bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month
bio5	最暖月最高温度 Max temperature of the warmest month	bio15	降水量变异系数 Coefficient of variation of precipitation
bio6	最冷月最低温度 Min temperature of the coldest month	bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter
bio7	年均温变化范围 Temperature annual range	bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter
bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter
bio10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter		

2.2 模型构建及精度检验

本研究从贵州省青冈林现状分布样点中随机抽取 80%构建模型, 剩余 20%用于精度检验。建模过程需依次添加样本图层、当前气候变量图层和未来气候情景图层, 并设置输出路径、输出内容和参数^[17-18]。应用刀切法工具输出的各环境因子的检验得分, 将检验得分超过总分 60%的气候因子进行 Pearson 相关分析, 从 $|r| \geq 0.85$ 的气候因子(这些因子对模型存在共线性影响)中选择有明显生物学意义的因子, 确定为影响贵州省青冈林潜在生境分布的主导因子^[19-20]。

本研究应用 ROC 分析评价模型的预测精度, ROC 曲线又称受试者工作特征曲线, 是试验者、诊断工作者和预测工作者针对可能或存在混淆的状态或条件, 从而做出准确判断和决策的一种定量检验方法。ROC 曲线评价模型精度时不必针对模拟结果选取固定阈值, 而是通过绘制统计图直观地显示敏感性(sensitivity, 表示不同阈值的正确模拟存在的百分比)和特异性(specificity, 表示 1 减去正确模拟不存在的百分率)信息, 最后计算模型的 ROC 曲线下面积 AUC (area under curve)评价模型的预测精度。AUC 运算结果评价标准为: 0.90~1.00 为优秀; 0.80~0.90 为良好; 0.70~0.80 为一般; 0.60~0.70 为较差; 0.50~0.60 为失败^[21-22]。

2.3 潜在生境划分

预测模型将输出一个属性值为贵州省青冈林在各个栅格中的潜在分布概率的栅格图层, 本研究基于此图层, 参照文献并结合贵州省青冈林的实际分布情况, 将潜在分布概率<0.5 的区域划为不适宜生境, 0.5~0.75 的区域划为中度适宜生境, >0.75

的区域划为高度适宜生境^[23], 然后绘制出贵州省青冈林当前气候条件及未来气候变化情景下的潜在生境分布图。

2.4 未来气候情景下的潜在生境变化

本研究基于当前气候条件和未来气候变化情景下的潜在生境分布结果, 通过 ArcGIS 生成转移矩阵, 分析对比当前气候条件和未来气候情景下贵州省青冈林的潜在生境变化, 应用 SPSS 绘制潜在生境分布海拔盒形图, 分析其气候变化下的海拔移动趋势。本研究的总体技术路线如图 2。

3 结果和分析

3.1 模型预测精度

预测模型的 ROC 曲线(图 3)显示, 训练数据的 AUC 值为 0.941, 检验数据的 AUC 值为 0.907, 因此, 模型的预测精度达优秀水平。

3.2 主导气候因子

采用刀切法计算各气候因子的检验得分(图 4), 结果表明, 最冷季均温(bio11)、最干季均温(bio9)、最冷月最低温度(bio6)和年均降水量(bio12)等 4 个气候因子的“仅此变量”建模时检验得分超过总分的 60%。Pearson 相关分析表明, 最冷季均温(bio11)和最干季均温(bio9)具有极显著的相关性, 说明这 2 个气候因子对预测模型存在共线性的影响。结合各气候因子的生物学意义, 最终确定最冷季均温(bio11)、最冷月最低温度(bio6)和年均降水量(bio12)为控制和影响贵州省青冈林潜在生境的主导气候因子。

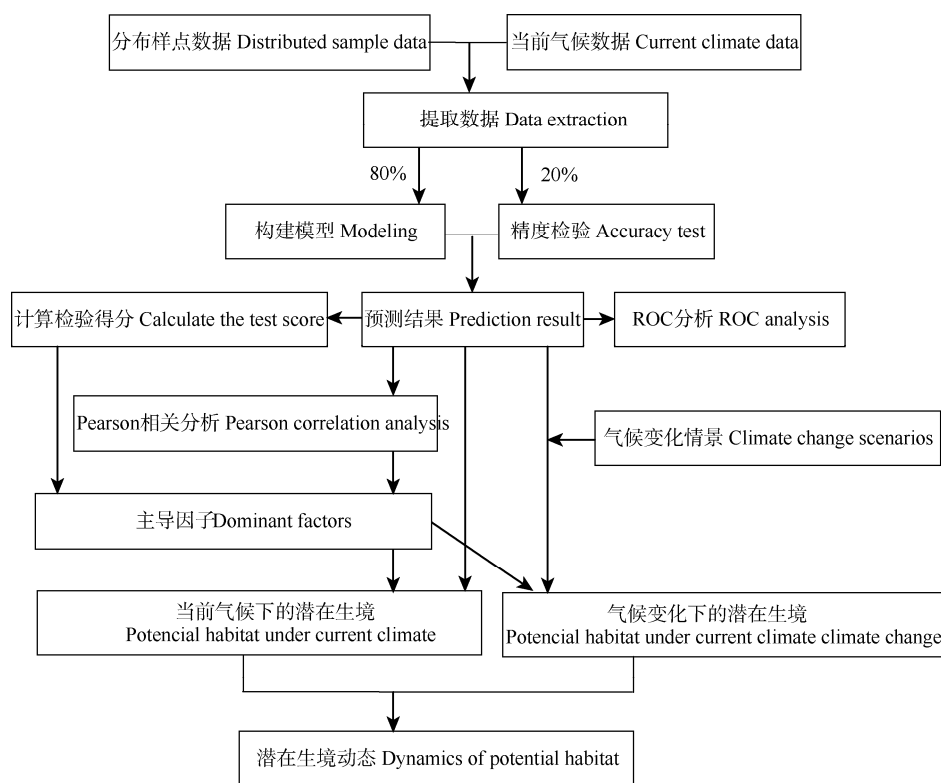


图 2 技术路线图

Fig. 2 Work flowchart

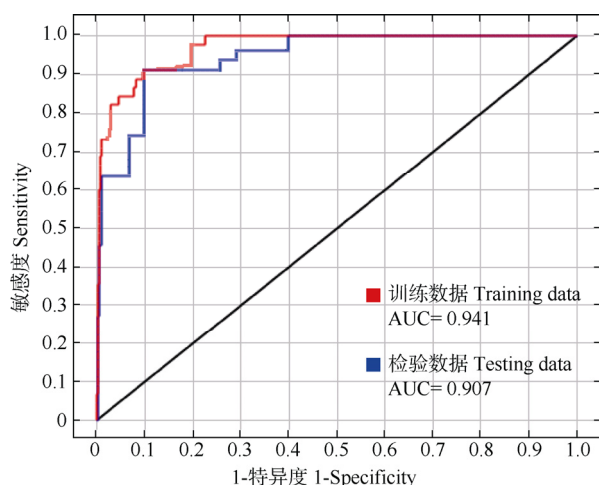


图 3 预测模型的 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of the predictive model

3.3 当前气候条件下的潜在生境预测

当前气候条件下的潜在生境见图 5, 贵州省青冈林的潜在适宜生境总面积 $44\,059\text{ km}^2$, 其中高度适宜生境 $15\,861\text{ km}^2$, 主要分布于铜仁、遵义和毕节, 凯里、都匀和贵阳有少量分布; 中度适宜生境面积 $28\,198\text{ km}^2$, 分布特征与高度适宜生境基本一

致, 大多分布于高度适宜生境的周边区域。

3.4 气候变化情景下的潜在生境变化

综合贵州省青冈林在 RCP8.5 情景下的潜在生境分布图(图 6)和潜在生境面积转移矩阵(表 2)可知, 两种气候条件下, 青冈林的生境类型未发生转化的部分依然占绝对的比重, 这说明全球气候变化不会对贵州省青冈林的潜在适宜生境造成非常重大的影响。RCP8.5 情景下, 青冈林的潜在适宜生境较当前气候条件有所增加, 中度适宜生境从 $28\,198\text{ km}^2$ 增加至 $47\,617\text{ km}^2$, 共增加 $19\,419\text{ km}^2$; 高度适宜生境从 $15\,681\text{ km}^2$ 增加至 $25\,625\text{ km}^2$, 共增加 $9\,944\text{ km}^2$ 。RCP8.5 情景下中度适宜生境的增加主要来源于当前气候条件下的不适宜生境($35\,468\text{ km}^2$), 而高度适宜生境的增加也主要来源于当前气候条件下的不适宜生境($12\,503\text{ km}^2$)。

从图 7 可见, 2 种气候条件下青冈林潜在生境的分布海拔并无明显变化, 从 SPSS 输出的盒形图属性数据(表 3)可知, RCP8.5 情景下, 青冈林的中度适宜生境平均分布海拔较当前气候条件上升 126 m (从 $1\,122\text{ m}$ 上升至 $1\,248\text{ m}$), 高度适宜生境平均上

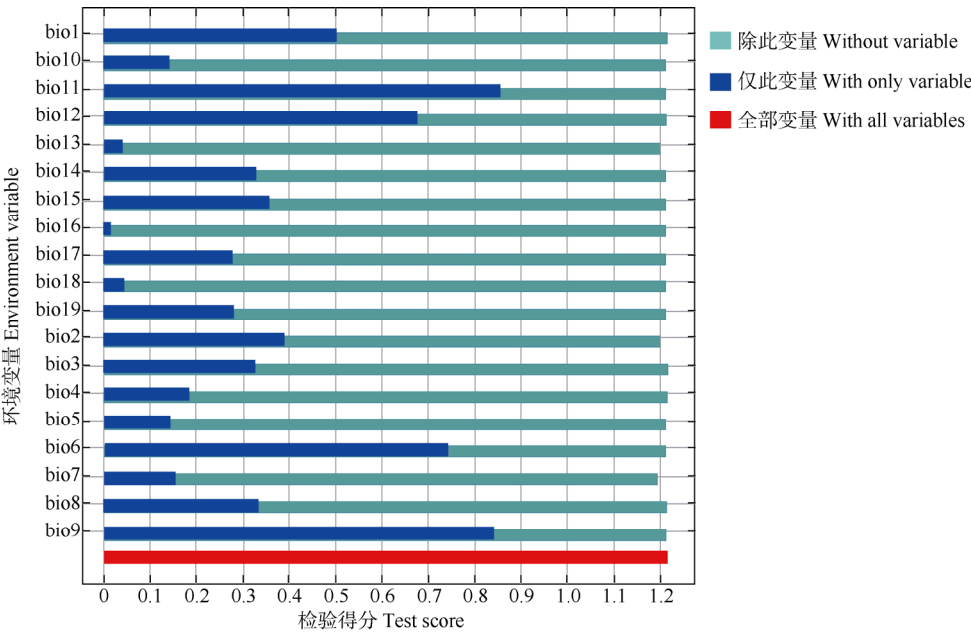


图 4 气候因子的检验得分

Fig. 4 Testing scores for climate factors

表 2 潜在生境面积(km²)转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of potential habitat area (km²)

RCP8.5 情景 RCP8.5 scenario	当前气候 Current climate			合计 Total
	不适宜 Unsuitable	中度适宜 Moderate suitable	高度适宜 High suitable	
不适宜 Unsuitable	95 490	35 468	1 220	132 178
中度适宜 Moderate suitable	6 653	9 042	12 503	28 198
高度适宜 High suitable	852	3 107	11 902	15 861
合计 Total	102 995	47 617	25 625	—

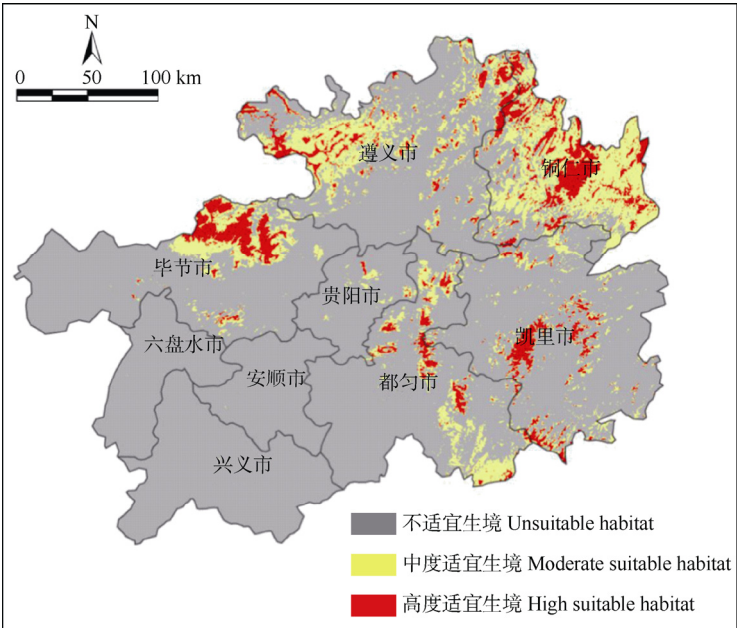


图 5 当前气候条件下的潜在生境分布图

Fig. 5 Potential habitats under current climate

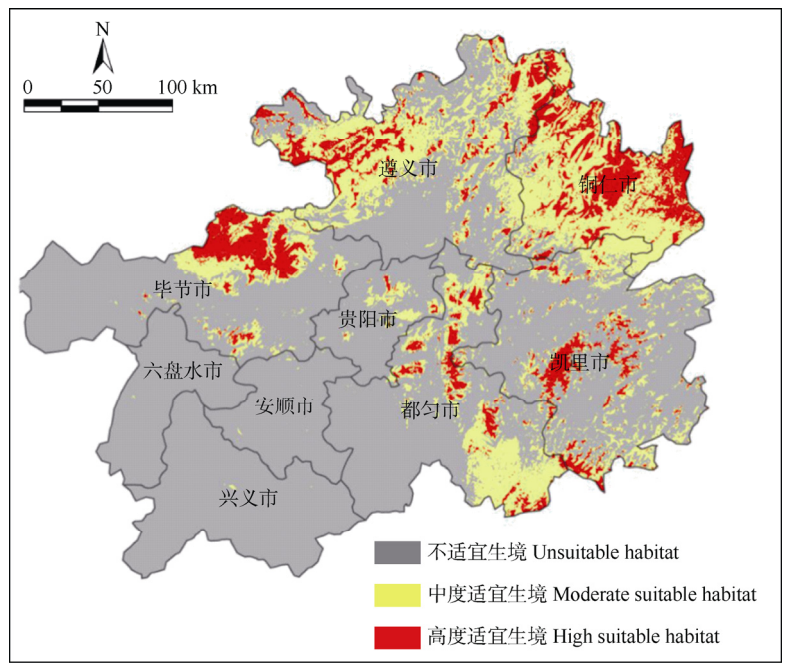


图 6 RCP8.5 情景下的潜在分布区划图

Fig. 6 Potential distribution area under RCP8.5 scenario

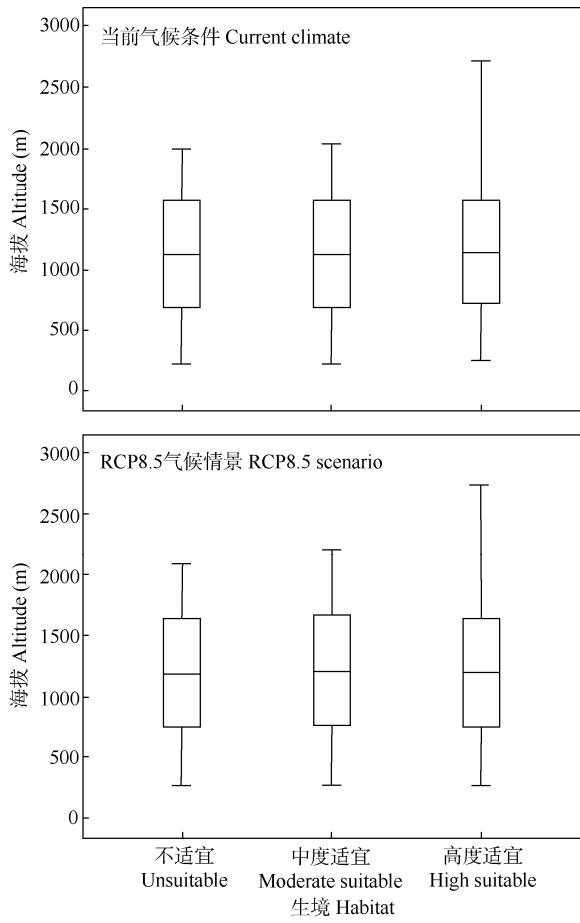


图 7 潜在生境分布海拔盒形图

Fig. 7 Box plot of distribution altitude of potential habitat

升 85 m (从 1 146 m 上升至 1 231 m)，其他属性值变化规律不清晰。

4 结论和讨论

最冷季均温(bio11)、最冷月最低温(bio6)和年降水量(bio12)等 3 个气候因子被确定为影响贵州省青冈林潜在生境的主导因子，并且从检验得分排名来看，温度因子比降水因子更为重要。2 个温度因子实质上共同反映了极端寒冷条件对贵州省青冈林潜在分布的决定性作用，这与前人报道^[24-26]控制日本水青冈(*Fagus crenata*)、日本常绿橡树(*Quercus acuta*)和榉树(*Zelkova serrata*)等潜在分布主导因子的结果一致。因此，本研究提出壳斗科树种为优势的群落潜在生境是不是都会受到极端寒冷条件控制这一科学问题，有待于后续补充研究论证。

本研究结果表明，RCP8.5 情景下贵州省青冈林的潜在生境分布面积将有所增加(中度适宜生境增加 19 419 km²，高度适宜生境增加 9 944 km²)，这只能初步反映全球气候变化对研究区内青冈群系这一植被分类层级潜在生境的积极影响，并不足以概括其对整个植被生态系统的综合影响。

全球气候变化下诸多植被类型的潜在生境都

表 3 潜在生境分布海拔(m)范围

Table 3 Range of distribution altitude (m) of potential habitat

	当前气候 Current climate			RCP8.5 情景 RCP8.5 scenario		
	不适宜 Unsuitable	中度适宜 Moderate suitable	高度适宜 High suitable	不适宜 Unsuitable	中度适宜 Moderate suitable	高度适宜 High suitable
最小值 Minimum	253	219	233	264	279	242
最大值 Maximum	1 996	2 030	2 071	2 109	2 196	2 185
平均数 Mean	13 130	1 122	1 146	1 180	1 248	1 231
中位数 Median	1 094	1 129	1 082	1 155	1 125	1 134

表现出向更高海拔移动的趋势^[27-30], 本研究得出了类似的结果(中度适宜生境平均上升 126 m, 高度适宜生境平均上升 85 m)。但是综合对比其他植被类型的移动幅度来看, 贵州省青冈林的海拔移动并不十分明显, 这一方面体现了贵州省青冈林对全球气候变化的响应不十分敏感, 另一方面可能与贵州省相对狭小的海拔跨度和相对平缓的海拔落差有关。

参考文献

[1] SUN J Y. Seedling and afforestation technology of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* [J]. Anhui For, 2005(1): 27.
孙军义. 青栲育苗及造林技术 [J]. 安徽林业, 2005(1): 27.

[2] LAN S A, SONG M, ZENG F P, et al. Species composition of woody plants in evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, southwest China [J]. Guihaia, 2016, 36(10): 1156–1164. doi: 10.11931/guihaia.gxzw 201606018.
兰斯安, 宋敏, 曾馥平, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林木本植物组成特征 [J]. 广西植物, 2016, 36(10): 1156–1164. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201606018.

[3] HU M, ZENG S Q, LONG S S. Spatial distribution patterns and associations of the main tree species in *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest [J]. J CS Univ For Technol, 2019, 39(6): 66–71. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.06.010.
胡满, 曾思齐, 龙时胜. 青冈栎次生林主要树种空间分布格局及其关联性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(6): 66–71. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.06.010.

[4] LÜ S H, LI X Q, BAI K D, et al. The effects of three pioneer tree species on facilitation and twig and leaf traits of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings in a rocky desertification region of Guangxi, China [J]. Chin J Ecol, 2018, 37(7): 1917–1924. doi: 10.13292/j.1000-4890.201807.024.
吕仕洪, 李象钦, 白坤栋, 等. 石漠化区先锋树种对青冈幼苗的保育作用及枝叶性状的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 1917–1924. doi: 10.13292/j.1000-4890.201807.024.

[5] LUO Y, ZHOU Z K. Phytogeography of *Quercus* subg. *Cyclobalanopsis* [J]. Acta Bot Yunnan, 2001, 23(1): 1–16, 28. doi: 10.3969/j.issn.

2095-0845.2001.01.001.
罗艳, 周浙昆. 青冈亚属植物的地理分布 [J]. 云南植物研究, 2001, 23(1): 1–16, 28. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2001.01.001.

[6] XU J, DENG M, JIANG X L, et al. Phylogeography of *Quercus glauca* (Fagaceae), a dominant tree of East Asian subtropical evergreen forests, based on three chloroplast DNA interspace sequences [J]. Tree Genet Genom, 2015, 11(1): 805. doi: 10.1007/s11295-014-0805-2.

[7] HUANG Q L, ZHENG Q R, RUAN X R. A study on structure and productivity of *Cyclobalanopsis chungii* sprout stand [J]. J Fujian Coll For, 1995, 15(2): 107–111. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.1995.02.003.
黄清麟, 郑群瑞, 阮学瑞. 福建青冈萌芽林分结构及生产力的研究 [J]. 福建林学院学报, 1995, 15(2): 107–111. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.1995.02.003.

[8] YU M J. Dynamics of an evergreen broad-leaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* in southeast China [J]. Sci Silv Sin, 1999, 35(6): 42–51. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.1995.02.003.
于明坚. 青冈常绿阔叶林群落动态研究 [J]. 林业科学, 1999, 35(6): 42–51. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.1999.06.006.

[9] ZHAO L J, XIANG W H, LI J X, et al. Floristic composition, structure and phytogeographic characteristics in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* forest community in the subtropical region [J]. Sci Silv Sin, 2013, 49(12): 10–17. doi: 10.11707/j.1001-7488.20131202.
赵丽娟, 项文化, 李家湘, 等. 中亚热带石栎-青冈群落物种组成、结构及区系特征 [J]. 林业科学, 2013, 49(12): 10–17. doi: 10.11707/j.1001-7488.20131202.

[10] HU M, ZENG S Q, LONG S S, et al. Structure and dynamic characteristics of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forests [J]. J CS Univ For Technol, 2017, 37(11): 110–114. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.018.
胡满, 曾思齐, 龙时胜, 等. 青冈栎次生林种群结构及动态特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 110–114. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.11.018.

[11] LONG S S, ZENG S Q, XIAO H S, et al. Analysis on the competitive status of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest based on the improved Hegyi model [J]. For Resour Manag, 2018(1): 50–56. doi:

- 10.13466/j.cnki.lyzygl.2018.01.008.
- 龙时胜, 曾思齐, 肖化顺, 等. 基于 Hegyi 改进模型的青冈栎次生林竞争分析 [J]. 林业资源管理, 2018(1): 50–56. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2018.01.008.
- [12] PENG Y S, LI T H, WEN S Z, et al. Effect of different sand-storage methods on the germination of *Cyclobalanopsis glauca* seed [J]. J CS Univ For Technol, 2016, 36(8): 44–48. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.08.009.
- 彭颖姝, 李铁华, 文仕知, 等. 不同沙藏处理对青冈栎种子萌发的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 44–48. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.08.009.
- [13] DUAN M X. Comprehensive utilization of *Cyclobalanopsis glauca* resources in China [J]. J Beijing For Univ, 1995, 17(2): 109–110. doi: 10.13332/j.1000-1522.1995.02.019.
- 端木柝. 我国青冈属资源的综合利用 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(2): 109–110. doi: 10.13332/j.1000-1522.1995.02.019.
- [14] NI J, SONG Y C. Relationships between geographical distribution of *Cyclobalanopsis glauca* and climate in China [J]. Acta Bot Sin, 1997, 39(5): 451–460.
- 倪健, 宋永昌. 中国青冈的地理分布与气候的关系 [J]. 植物学报, 1997, 39(5): 451–460.
- [15] CAO M C. Study on simulating the geographical distributions of common tree species in China based on generalized models and classification and regression tree [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005: 44–49.
- 曹铭昌. 基于广义模型和分类回归树的中国常见树种地理分布模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005: 44–49.
- [16] YANG R H. Current situation and utilization research of wild woody vine resources in Guizhou [J]. Seed, 2008, 27(1): 55–57. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2008.01.016.
- 杨荣和. 贵州野生木质藤本资源现状及开发利用研究 [J]. 种子, 2008, 27(1): 55–57. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2008.01.016.
- [17] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter [J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058–1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.
- [18] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecol Model, 2006, 190(3/4): 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- [19] TANG C Q, DONG Y F, HERRANDO-MORAIRA S, et al. Potential effects of climate change on geographic distribution of the Tertiary relict tree species *Davidia involucrata* in China [J]. Sci Rep, 2017, 7: 43822. doi: 10.1038/srep43822.
- [20] TARANTA II E M, SAMIEI A, MAGHOUMI M, et al. Jackknife: A reliable recognizer with few samples and many modalities [C]// Proceedings of 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Denver, Colorado, USA: ACM, 2017. doi: 10.1145/3025453.3026002.
- [21] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240(4857): 1285–1293. doi: 10.1126/science.3287615.
- [22] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. Ecography, 2006, 29(2): 129–151. doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
- [23] WAN J Z, WANG C J, HAN S J, et al. The planning of priority protection area for *Taxus cuspidata* under climate change [J]. J Shenyang Agric Univ, 2014, 45(1): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-1700.2014.01.007.
- 万基中, 王春晶, 韩士杰, 等. 气候变化压力下建立东北红豆杉优先保护区的模拟规划 [J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(1): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-1700.2014.01.007.
- [24] MATSUI T, YAGIHASHI T, NAKAYA T, et al. Climatic controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan [J]. J Veg Sci, 2004, 15(1): 57–66. doi: 10.1111/j.1654-1103.2004.tb02237.x.
- [25] YAGIHASHI T, MATSUI T, NAKAYA T, et al. Climatic determinants of the northern range limit of *Fagus crenata* forests in Japan [J]. Plant Spec Biol, 2007, 22(3): 217–225. doi: 10.1111/j.1442-1984.2007.00196.x.
- [26] NAKAO K, MATSUI T, HORIKAWA M, et al. Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan [J]. Plant Ecol, 2011, 212(2): 229–243. doi: 10.1007/s11258-010-9817-7.
- [27] HIGA M, TSUYAMA I, NAKAO K, et al. Influence of nonclimatic factors on the habitat prediction of tree species and an assessment of the impact of climate change [J]. Landsc Ecol Eng, 2013, 9(1): 111–120. doi: 10.1007/s11355-011-0183-y.
- [28] HORIKAWA M, TSUYAMA I, MATSUI T, et al. Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*) [J]. Landsc Ecol, 2009, 24(1): 115–128. doi: 10.1007/s10980-008-9289-5.
- [29] LI W J, PENG M C, HIGA M, et al. Effects of climate change on potential habitats of the cold temperate coniferous forest in Yunnan Province, southwestern China [J]. J Mt Sci, 2016, 13(8): 1411–1422. doi: 10.1007/s11629-016-3846-1.
- [30] LENOIR J, GÉGOUT J C, MARQUET P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century [J]. Science, 2008, 320(5884): 1768–1771. doi: 10.1126/science.1156831.