北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测

袁艳超 肖文发 刘逸夫 谭灿灿 郭宇锋 王志勇 王军辉 贾子瑞

Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change

Yuan Yanchao, Xiao Wenfa, Liu Yifu, Tan Cancan, Guo Yufeng, Wang Zhiyong, Wang Junhui, Jia Zirui

引用本文:
袁艳超, 肖文发, 刘逸夫, 谭灿灿, 郭宇锋, 王志勇, 王军辉, 贾子瑞. 气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):30–42. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240094
Yuan Yanchao, Xiao Wenfa, Liu Yifu, Tan Cancan, Guo Yufeng, Wang Zhiyong, Wang Junhui, Jia Zirui. Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):30–42. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240094

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240094

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于MaxEnt模型的紫椿适生区预测
Distributional change in suitable areas for *Toona sureni* based on MaxEnt model
北京林业大学学报, 2017, 39(8): 33–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170002

气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测
Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33–43. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200254

基于MaxEnt模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析
Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 59–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200416

辣木全球潜在适生区与生态特征
Global potential suitable area and ecological characteristics of *Moringa oleifera*
北京林业大学学报, 2020, 42(10): 45–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190375

矮牡丹在中国的地理分布及潜在分布区预测
Geographical distribution and potential distribution area prediction of *Paeonia jishanensis* in China
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 83–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200360

防风固沙优良树种欧李的潜在适生区及生态特征
Potential suitable distribution area and ecological characteristics of *Cerasus humilis*, an excellent tree species for windproof and sand fixation
北京林业大学学报, 2018, 40(3): 66–74. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170180

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240094

气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测

袁艳超[1] 肖文发[1] 刘逸夫[1] 谭灿灿[1] 郭宇锋[2]
王志勇[2] 王军辉[3,4] 贾子瑞[3,4]

（1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所，北京 100091；2. 北华大学林学院，吉林 吉林 132013；
3. 中国林业科学研究院林业研究所，北京 100091；4. 林木遗传育种国家重点实验室，北京 100091）

摘要:【目的】油杉属植物作为优良用材与绿化树种，具有重要的生态和经济价值，但目前全属受威胁，黄枝油杉（濒危）和江南油杉（易危）面临严峻挑战。本研究聚焦于模拟预测气候变化情景下两者的潜在适生区变迁，以揭示其响应规律，为油杉属植物的综合保护策略制定提供理论支撑。**【方法】**基于收集的黄枝油杉和江南油杉的现存分布点数据，以及从 Worldclim 下载的 19 个环境变量数据，利用优化后的 MaxEnt 模型，模拟这两种油杉在现代、末次间冰期、末次冰盛期、全新世中期以及未来 2 种温室气体排放情境（RCP2.6 和 RCP8.5）下两个时期（2050s 和 2070s）的潜在适生区。同时，分析影响适生区分布的关键环境因子。**【结果】**（1）黄枝油杉和江南油杉的模型预测结果显示，训练集和测试集的曲线下面积均高于 0.97，表明模型具有较高的预测精度。（2）现代适生区预测结果与实际分布情况相符。现代，黄枝油杉的总适生区面积为 112.15×10^4 km^2，江南油杉的总适生区面积 159.35×10^4 km^2。过去 3 个历史时期，黄枝油杉和江南油杉的潜在适生区面积均逐渐扩张，到全新世中期达到最大，分别为 76.17×10^4 km^2 和 128.88×10^4 km^2。未来气候变化情景下，黄枝油杉和江南油杉的总适生区面积略有扩大，分别为向北和西北方向（高纬度）扩张，但高适生区面积极大缩小，尤其是 RCP8.5 情境下的 2070 年代，黄枝油杉和江南油杉的高适生区分别缩小为现代的 5.88% 和 4.25%。（3）影响两种油杉潜在适生区分布的关键环境变量均为平均温日较差和最冷月最低温。**【结论】**研究揭示了温度因子对黄枝油杉和江南油杉分布的决定性作用，其影响显著大于降水因子。自末次间冰期以来，两物种的适生区持续扩张，且这一趋势在未来气候情景下仍将持续。尽管总适生区面积有所扩大，但高适生区的缩减可能对种群生存带来挑战。两物种预计将通过向高纬度地区迁移来应对气候变化，这一发现为制定物种保护策略提供了重要依据。

关键词：油杉属；MaxEnt 模型；适生区；气候变化

中图分类号：S791.15 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)06−0030−13

引文格式：袁艳超，肖文发，刘逸夫，等. 气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测［J］. 北京林业大学学报，2025，47(6)：30−42. Yuan Yanchao, Xiao Wenfa, Liu Yifu, et al. Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 30−42.

Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change

Yuan Yanchao[1] Xiao Wenfa[1] Liu Yifu[1] Tan Cancan[1] Guo Yufeng[2]
Wang Zhiyong[2] Wang Junhui[3,4] Jia Zirui[3,4]

(1. Ecology and Natural Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. College of Forestry, Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China;
3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
4. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2024−04−02 **修回日期:** 2024−06−07

基金项目: 国家自然基金面上项目（32271694）。

第一作者: 袁艳超。主要研究方向：植物地理学研究。Email: yuanyc2022@163.com。 地址：100091 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所。

责任作者: 贾子瑞，副研究员。主要研究方向：林木遗传改良、针叶树系统进化。Email: jiazirui646@163.com。 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] The plants of *Keteleeria* genus are excellent timber and ornamental tree species, possessing significant ecological and economic values. However, the entire genus is currently under threat, with *Keteleeria davidiana* var. *calcarea* (endangered) and *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* (vulnerable) facing severe challenges. This study focused on simulating and predicting the changes in potential suitable habitats of these two species under different climate change scenarios, in order to reveal their response patterns and provide a theoretical basis for the development of comprehensive conservation strategies for *Keteleeria* genus. [**Method**] Based on the optimized MaxEnt model, the data of existing distribution sites of *K. calcarea* and *K. cyclolepis* and 19 environmental variables downloaded by Worldclim were collected to simulate their suitable areas during the present, last interglacial (LIG), last glacial maximum (LGM), mid-holocene (MH), and two future climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), which covered the periods of 2050s and 2070s. At the same time, key environmental factors affecting their distribution were analyzed and their distribution patterns under future climate change were predicted. [**Result**] (1) The model predictions for *K. calcarea* and *K. cyclolepis* showed that the AUC values of both training and test sets exceeded 0.97, indicating high predictive accuracy of the models. (2) The prediction results of modern suitable distribution of *K. calcarea* and *K. cyclolepis* were consistent with their actual distributions. In modern times, the total suitable area for *K. calcarea* was 112.15×10^4 km^2 and for *K. cyclolepis* was 159.35×10^4 km^2. In the past three historical periods, the potential suitable areas for both species gradually expanded, with maximum values reached during the mid-holocene: 76.17×10^4 km^2 for *K. calcarea* and 128.88×10^4 km^2 for *K. cyclolepis*. Under future climate change scenarios, the total suitable areas for both *K. calcarea* and *K. cyclolepis* were projected to show slight expansion northward and northwestward (toward higher latitudes), but the highly suitable areas were expected to dramatically decrease. Particularly under the RCP8.5 scenario in the 2070s, the highly suitable area for *K. calcarea* shrank to only 5.88% of the modern suitable area, and the highly suitable area of *K. cyclolepis* was reduced to 4.25% of modern suitable area. (3) The key environmental variables affecting potential distribution of both Keteleeria species were identified as mean diurnal range and minimum temperature of the coldest month. [**Conclusion**] This study demonstrates that temperature factors play a decisive role in the distribution of *K. calcarea* and *K. cyclolepis*, exhibiting significantly stronger influence than precipitation variables. Historical distribution dynamics reveal continuous expansion of suitable habitats for both species since the Last Interglacial period, a trend projected to persist under future climate scenarios. Although the total suitable area shows expansion, the substantial reduction in high-quality habitats may pose critical challenges to population viability. Both species are predicted to respond to climate change through poleward range shifts, a finding that provides essential insights for conservation planning.

Key words: *Keteleeria*; MaxEnt model; suitable area; climate change

20 世纪以来，全球气候变暖趋势日益加剧[1]。全球气候变化对植物的生存生长有显著影响，预计会改变植物的空间分布格局[2]，促使植物由低纬度向高纬度地区迁移[3]。尤其是稀有和濒危植物，受全球气候变化的影响更为显著，若不制定有效的保护计划，可能面临灭绝风险[4]。第四纪冰期和间冰期周期性的交替出现，使得气候频繁振荡，极大影响了植物的分布，逐步形成了当前的地理分布格局[5]。预测不同气候情景下物种的潜在适生区及其对气候变化的响应，可为保护濒危珍稀植物提供重要的理论依据。

油杉属（*Keteleeria*）植物隶属于松科（Pinaceae），是常绿乔木，成材率高，材质优良，持久耐用，树形优美，具有较高的经济价值和观赏价值，是优良的用材与绿化树种[6]。根据化石资料推测，该属可能起源于白垩纪的欧亚大陆，并在第三纪达到分布鼎盛时期。在第四纪冰期之前，油杉属在北半球广泛分布，其化石在美国、欧洲和日本的渐新世至上新世地层中均有发现[7]。然而，随着冰期的到来，该属的种群分布受地史变迁，尤其受更新世冰期多次影响，大幅缩减。目前，该属仅存于东亚亚热带至热带北缘的温暖山区[8]。油杉属中分布范围较为广泛的有黄枝油杉（*K. davidiana* var. *calcarea*）、江南油杉（*K. fortunei* var. *cyclolepis*）、铁坚油杉（*K. davidiana*）、云南油杉（*K. evelyniana*）和油杉（*K. fortunei*）。已有研

究发现，铁坚油杉、云南油杉和油杉在未来气候情景下均存在继续扩散的可能性，温度和降水是影响这几种油杉分布的主要因素[9]。黄枝油杉目前主要分布于我国的贵州、广西、湖南等地，喜生长在石灰岩山坡，海拔 560～1 100 m[10]。2009 年，黄枝油杉被列入《广西壮族自治区第一批重点保护野生植物名录》[11]，其保护状况为濒危。江南油杉现主要分布于我国的湖南、福建、广西、云南、贵州、广东、浙江、江西等地[12]，多散生于丘陵和低山，海拔低于 1 000 m。江南油杉已被江西省和福建省列为地方保护树种，其保护状况为易危。

物种分布模型能基于物种的分布点数据及其所在分布区的环境参数来预测物种的适生分布[13]。近年来，物种分布模型在植物适生区预测[14]以及探究物种分布格局对气候变化的响应[15]等方面广泛应用。目前常用的物种分布模型有 MaxEnt、GARP 和 Bioclim 等[16]。其中，MaxEnt 模型因其预测结果准确、稳定性强而被广泛应用[17]，无论是在全球尺度，还是在物种廊道等小尺度范围内，该模型均表现出色，取得了良好的预测效果[18]。因此，它已成为目前预测物种分布区及其变迁的首选模型。

因此，本研究以黄枝油杉和江南油杉为研究对象，基于 MaxEnt 模型预测气候变化下这两种油杉潜在适生区变化趋势，旨在为油杉属植物的保护与遗传改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 分布数据的来源与处理

依据中国数字植物标本馆（http://www.cvh.ac.cn/）和全球生物多样性信息网络（https://www.gbif.org/）数据库，获得 77 个黄枝油杉分布点，59 个江南油杉分布点。基于 ENMTools 软件，对物种分布点数据进行冗余筛选，以避免地理聚集导致的空间自相关。最终共获得 67 个黄枝油杉和 56 个江南油杉的有效分布点。使用 ArcGIS v10.8.1 软件将黄枝油杉与江南油杉分布点数据在地图上展示出来（图 1）。

1.2 环境变量的获取与筛选

从全球气候数据网站 WoldClim version 1.4（http://www.worldclim.org/）获得 8 个气候情景下与温度和降水相关的 19 个环境变量（Bio1～Bio19）[19]。8 个情景包括现代情景（1960—1990 年），末次间冰期、末次冰盛期和全新世中期 3 个过去情景，以及 2 种温室气体排放典型浓度路径（RCPs）下的 4 个未来情景（RCP2.6-2050s、RCP2.6-2070s、RCP8.5-2050s 和 RCP8.5-2070s），模式为通用气候系统模式 CCSM4，空间分辨率为 2′30″。末次间冰期的数据精度为 30″，使用 ArcGIS v10.8.1 将末次间冰期数据重采样为 2′30″。

为防止环境变量之间的过度拟合，使用 MaxEnt 软件的刀切法（jackknife）对 19 个环境变量

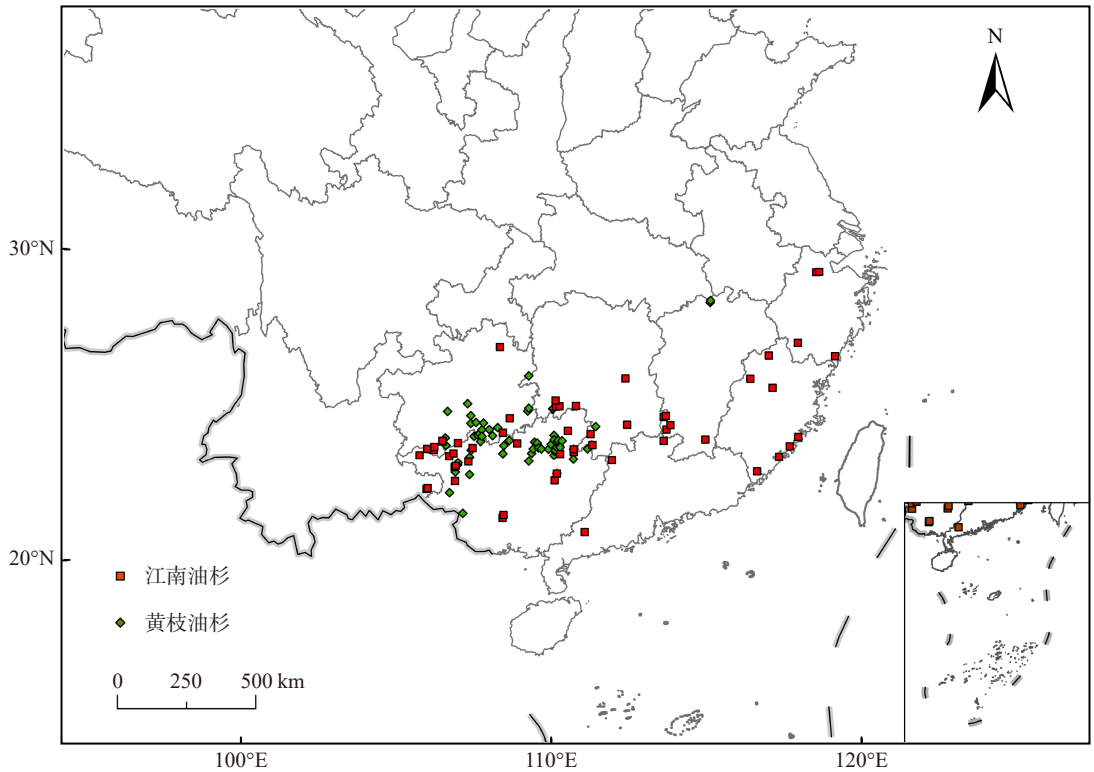


图 1 我国黄枝油杉与江南油杉的分布情况

Fig. 1 Distribution condition of *Keteleeria calcarea* and *K. cyclolepis*

的贡献率进行排序，剔除贡献率小于 1% 的变量。利用 SPSS 对 19 个环境变量进行相关性分析，相关系数绝对值大于 0.8 的两个环境变量被视为非独立变量，只选 1 个有较大贡献的环境变量用于黄枝油杉与江南油杉的分布状况分析。

1.3　模型构建与评估

为提高模型精度，本研究对不同要素类型（feature combination，FC）和正则化乘数值（regularization multiplier，RM）组合进行筛选。FC 一般包括 5 种类型，线性 L（linear features），二次型 Q（quadratic features），乘积型 P（product features），阈值型 T（threshold features）和片段化 H（hinge features）。在模型中，70% 的分布点数据用于构建训练集、30% 用于验证测试集，训练数据集和测试数据集重复 10 次。将物种分布点数据和环境变量导入 MaxEnt 软件进行建模，采用受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic，ROC）进行模型评估，使用曲线下面积（area under the ROC curve，AUC）测量模型可信度。AUC 值域为 [0，1]，值越大表示模型模拟的结果越准确[20]，AUC = [0，0.5] 表示预测结果不比随机猜测好，（0.5，0.7] 表示预测结果较差，可信度低，（0.7，0.9] 表示预测结果准确性较高，（0.9，1] 表示预测结果准确性极高。使用自然间断点法划分黄枝油杉与江南油杉的适生区等级[21]：非适生区 [0 ~ 0.2]、低适生区（0.2 ~ 0.4]、中适生区（0.4 ~ 0.6] 和高适生区（0.6 ~ 1]。以中国地图为底图，使用 ArcGIS v10.8.1 软件进行绘图，并且计算各时期的适生区面积。

1.4　黄枝油杉与江南油杉潜在适生区空间格局变化

在全球气候变化影响下，物种的潜在适生区空间格局可划分为保留区、丧失区和增加区[1]。使用 ArcGIS v10.8.1 将现代和未来潜在适生区数据转换为栅格数据，并对其进行模糊叠加，得到黄枝油杉和江南油杉潜在地理分布图层，再进行重分类。保留区为现代与未来情景均适生的区域，丧失区为现代适生但未来不适生的区域，增加区为现代不适生但未来适生的区域。建立现代与未来气候环境下适生/不适生矩阵，保留区为 1→1，丧失区为 1→0，新增区为 0→1[22]，将矩阵值转换为属性值导入 ArcGIS v10.8.1，获得黄枝油杉与江南油杉的适生区空间格局变化图。

2　结果与分析

2.1　MaxEnt 模型评价

基于黄枝油杉和江南油杉现存分布点和 19 个环境变量的当前值，利用 MaxEnt 软件进行模型模拟，模拟出黄枝油杉最优模型要素类型为 LP，最优正则化乘数为 0.1，训练数据集和测试数据集 10 次重复的平均 AUC 值分别为 0.992 ± 0.000 4 和 0.990 ± 0.005 5；江南油杉最优模型要素类型为 QP，最优正则化乘数为 0.2，训练数据集和测试数据集 10 次重复的平均 AUC 值分别为 0.978 ± 0.001 2 和 0.973 ± 0.012 5。表明模型预测性能良好，模拟结果可信度较高，可用于黄枝油杉和江南油杉适生区的准确预测（图 2）。

2.2　当前情景下影响黄枝油杉与江南油杉潜在适生区分布的关键环境变量

2.2.1　影响黄枝油杉潜在适生区分布的关键环境变量

刀切法筛选出平均温日较差（Bio2）、等温性（Bio3）、最冷月最低温（Bio6）、最湿季度平均温（Bio8）、最干季度平均温（Bio9）、年平均降水量（Bio12）、最干月降水量（Bio14）和最暖季度降水量（Bio18）共 8 个环境变量预测黄枝油杉潜在适生区分布。结合各环境变量的贡献率和排列重要性以及刀切法分析结果（表 1、图 3），分析各环境变量对黄枝油杉潜在分布区变化的贡献，其中平均温日较差（Bio2）、最冷月最低温（Bio6）、最干月降水量（Bio14）、最干季度平均温（Bio9）为关键环境变量，

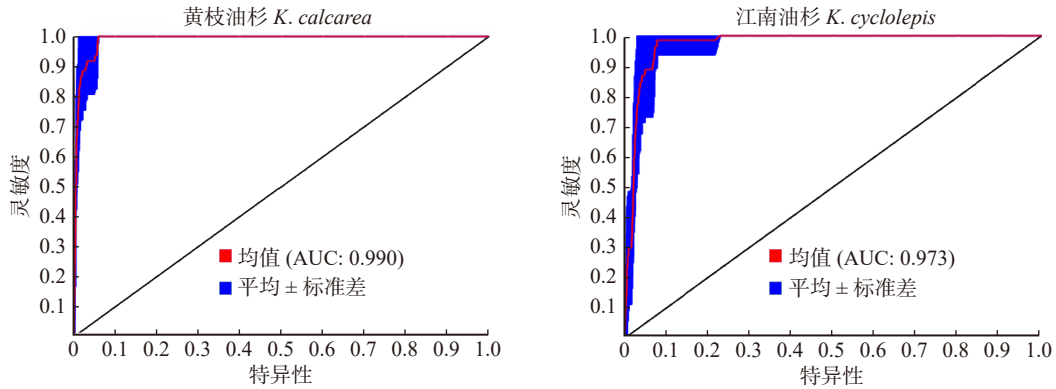


图 2　基于 MaxEnt 模型预测黄枝油杉与江南油杉分布的受试者工作特征曲线

Fig. 2　ROC curves predicting distribution of *K. calcarea* and *K. cyclolepis* based on MaxEnt model

表 1 影响黄枝油杉分布的关键环境变量贡献率

Tab. 1 Contribution rates of critical environmental variables affecting distribution of *K. calcarea*

环境变量	描述	贡献率/%	排列重要性/%
Bio2	平均温日较差	31.7	4.7
Bio6	最冷月最低温	17.4	49.6
Bio14	最干月降水量	16.9	2.5
Bio9	最干季度平均温	10.7	24.2
Bio3	等温性	8.9	5.1
Bio12	年平均降水量	5.8	3.8
Bio8	最湿季度平均温	5.5	6.4
Bio18	最暖季度降水量	3.1	3.6

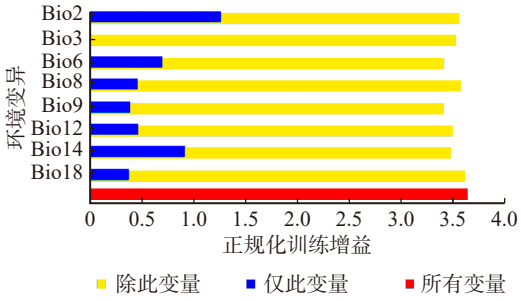


图 3 黄枝油杉环境变量刀切法检验

Fig. 3 Jackknife test of environmental variables of *K. calcarea*

贡献率分别为 31.7%、17.4%、16.9%、10.7%。

2.2.2 影响江南油杉潜在适生区分布的关键环境变量

筛选出平均温日较差(Bio2)、温度季节性变化(Bio4)、最冷月最低温(Bio6)、年平均降水量(Bio12)、最干季度降水量(Bio17)共 5 个环境变量预测江南油杉潜在适生区分布。结合各环境变量的贡献率和排列重要性以及刀切法分析结果(表 2、图 4),分析各环境变量对江南油杉潜在分布区变化的贡献,其中平均温日较差(Bio2)、最冷月最低温(Bio6)和温度季节性变化(Bio4)为关键环境变量,贡献率分别为 42.5%、32.4% 和 13.8%。

表 2 影响江南油杉分布的关键环境变量贡献率

Tab. 2 Contribution rates of critical environmental variables affecting distribution of *K. cyclolepis*

环境变量	描述	贡献率/%	排列重要性/%
Bio2	平均温日较差	42.5	16.3
Bio6	最冷月最低温	32.4	39.4
Bio4	温度季节性变化	13.8	29.4
Bio17	最干季度降水量	5.3	9.6
Bio12	年平均降水量	3.3	5.3

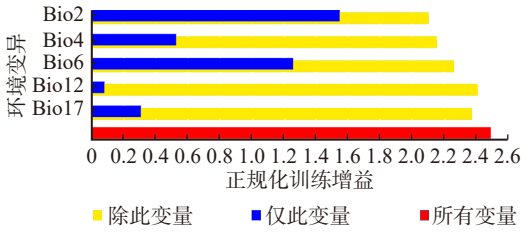


图 4 江南油杉环境变量刀切法检验

Fig. 4 Jackknife test of environmental variables of *K. cyclolepis*

2.3 8 个气候情景下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测

2.3.1 黄枝油杉的潜在适生区预测

当前气候条件下,黄枝油杉的中高适生区主要集中在贵州省和广西壮族自治区交界处的云贵高原南缘山区等地(图 5),分布范围与实际分布相符。末次间冰期黄枝油杉的中高适生区主要集中在陕西省南部(宝鸡市)和广东省中部(广州市)等地,现代其在陕西省的适生区已经丧失;末次冰盛期黄枝油杉的中高适生区主要集中在四川省东南部(宜宾市、自贡市)和广西壮族自治区西北部(河池市、百色市与崇左市);全新世中期黄枝油杉中高适生区分布范围与当前情景下非常相似,并且相较于末次间冰期和末次冰盛期有明显的扩张(图 5、表 3),以高适生区的广西壮族自治区向北、东逐渐扩张。与当前适生区相比,4 种未来气候情景下高适生区有减小趋势,广西壮族自治区的高适生区丧失严重,但中高适生区分布范围与当前分布相似,在 RCP8.5 路径下的 2070s,黄枝油杉的分布呈现片段化,且高适生区面积极大缩减。

2.3.2 江南油杉的潜在适生区预测

潜在适生区预测结果(图 6)显示,当前气候情景下江南油杉中高适生区主要集中在四川省东南部、贵州省南部、广西壮族自治区大部分地区、湖南省南部、浙江省与福建省南部等地,中高适生区主要分布于东南丘陵一带,分布范围与实际分布相符。末次间冰期江南油杉的中高适生区主要分布在广西壮族自治区南部(崇左市、南宁市、钦州市、玉林市)、广东省西南部地区(湛江市、茂名市、珠海市、江门市)和东南部地区(汕头市、潮州市)、福建省南部(漳州市、厦门市、泉州市)、海南省西北部(东方市、昌江市、儋州市)等地;末次冰盛期江南油杉的中高适生区主要分布在四川省东南部(宜宾市、自贡市、内江市、贵阳市)与重庆市交界处(潼南县、铜梁县、大足县、荣昌县、永川市)、广西壮族自治区大部分地区、广东省西北部(肇州市、佛山市)等地,相较于末次间冰期,分布范围明显扩张(图 6、表 4),并且扩张方向为向北(高纬度)扩张,中高适生区向北迁

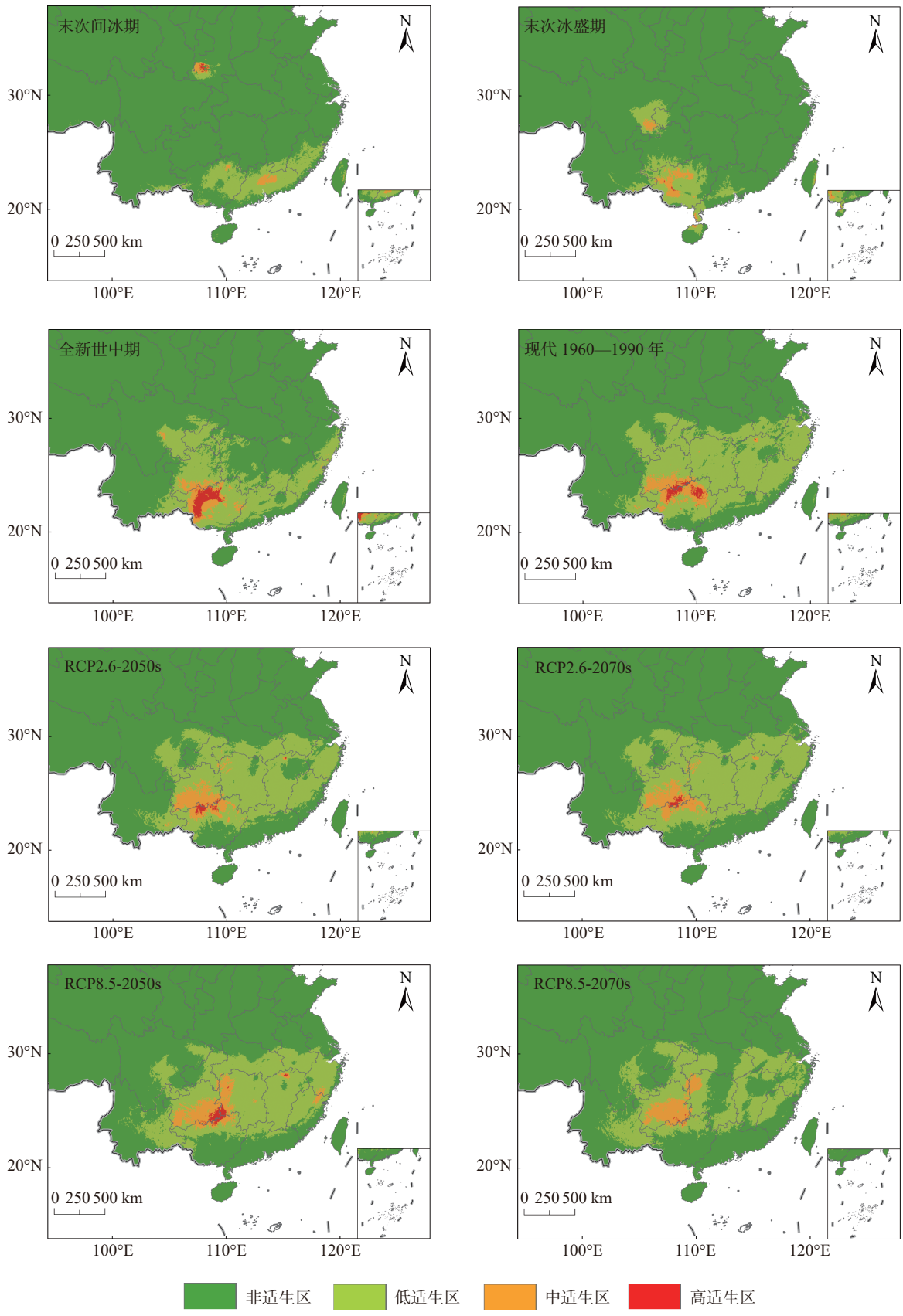


图 5　8 个气候情景下黄枝油杉的潜在分布

Fig. 5　Potential distribution of *K. calcarea* under 8 climate scenarios

移; 全新世中期江南油杉的中高适生区主要分布在广西壮族自治区大部分地区、广东省(江门市、云浮市、肇庆市、清远市、韶关市、河源市、梅州市、潮州市、汕头市、揭阳市)和福建省大部分地区等地, 相较于末次冰盛期, 分布范围扩张, 中高适生区分布向东南方向迁移; 与当前适生区相比, 4 种未来情景下

表 3 黄枝油杉 8 个气候情景下的适生区面积

Tab. 3 Suitable distribution area of *K. calcarea* under 8 climate scenarios

年代	总适生区		低适生区		中适生区		高度适生区	
	面积/km^2	变化率/%	面积/km^2	变化率/%	面积/km^2	变化率/%	面积/km^2	变化率/%
1960—1990	112.15×10^4		100.80×10^4		9.04×10^4		2.30×10^4	
末次间冰期	28.70×10^4	−74.41	26.24×10^4	−73.97	2.19×10^4	−75.80	0.27×10^4	−88.17
末次冰盛期	31.24×10^4	−72.14	26.67×10^4	−73.54	4.50×10^4	−50.26	0.07×10^4	−96.76
全新世中期	76.17×10^4	−32.08	65.40×10^4	−35.12	7.41×10^4	−18.05	3.36×10^4	46.04
RCP2.6-2050s	106.95×10^4	−4.63	95.73×10^4	−5.03	10.28×10^4	13.71	0.94×10^4	−59.16
RCP2.6-2070s	112.27×10^4	0.10	102.21×10^4	1.39	9.33×10^4	3.17	0.73×10^4	−68.27
RCP8.5-2050s	114.37×10^4	1.98	99.66×10^4	−1.13	13.02×10^4	44.04	1.69×10^4	−26.83
RCP8.5-2070s	88.99×10^4	−20.64	78.92×10^4	−21.71	9.94×10^4	9.95	0.14×10^4	−94.12

注：变化率指不同时期潜在适生区面积相对于现代（1960—1990）的相对变化百分比。下同。

中高适生区有减小趋势，主要减少的区域为江西省、浙江省、福建省等地区，但总分布范围与当前分布相似。总体来看，相较于过去 3 种情景，当前适生区分布范围明显扩大，未来 4 种情景与现代相比，总分布区范围变化不大，但中高适生区范围明显减小。

2.4 黄枝油杉与江南油杉潜在适生区分布格局变化

2.4.1 黄枝油杉的潜在适生区分布格局变化

对比黄枝油杉未来 4 种情景与现代潜在适生区分布格局（图 7、表 3）可知，在 RCP2.6 路径下，2050 年代总适生区减少，相比于现代减少了 4.63%，2070 年代总适生区面积有所增加，相比于现代增加了 0.10%。相比于现代，2050s 和 2070s 的中适生区均有所扩增，分别增加 13.71% 和 3.17%；高适生区均显著缩小，分别缩小了 59.16% 和 68.27%。在 RCP8.5 路径下，2070 年代黄枝油杉的总适生区面积缩小了 20.64%，中高适生区变化趋势与 RCP2.6 路径变化趋势一致，中适生区扩增，高适生区缩减。

4 种未来情景下黄枝油杉的中适生区面积都有所扩增，高适生区面积不同程度缩小。中高适生区在 2 种情景下的 2050 年代到 2070 年代，面积均呈缩减趋势。此外，4 种情景下黄枝油杉的潜在适生区均有向北（高纬度）迁移的趋势，从广西北部（河池市、柳州市与桂林市）和贵州省南部（安顺市、黔西南、黔南、黔东南）为中心向北扩张至湖南省西部（张家界市、吉首市与怀化市）与重庆市南部（秀山、酉阳），总适生区的南部逐渐丧失，丧失主要区域为广西壮族自治区北部（百色市、河池市、柳州市、桂林市）。RCP8.5 路径下的 2070 年代，总适生区丧失面积最大。

2.4.2 江南油杉的潜在适生区分布格局变化

对比江南油杉未来 4 种情景与现代潜在适生区分布格局（图 8、表 4）可知，总适生区均呈现增加的趋势。相比于现代，RCP2.6-2050s、RCP2.6-2070s、RCP8.5-2050s、RCP8.5-2070s 的总适生区面积分别增加了 2.43%、1.43%、9.10% 和 5.80%。其中，低适生区面积分别增加了 18.80%，27.99%，30.78% 和 58.81%，中高适生区均呈减少的趋势，高适生区的缩减趋势更明显，分别缩减了 66.83%，76.13%，65.31% 和 95.75%。

在 2 种未来情景下，2050 年代到 2070 年代中、高适生区以及总适生区面积均呈缩减趋势。RCP2.6 路径下，2050 年代到 2070 年代江南油杉向北（高纬度）扩张。RCP8.5 路径下，2050 年代到 2070 年代江南油杉向西和向北（高纬度）扩张，扩张范围为云南省东部（曲靖市、昆明市与玉溪市），四川省南部（成都市、德阳市）和湖南省北部（张家界市、常德市、岳阳市）。总适生区南部和东北部逐渐收缩，南部收缩范围主要为广西壮族自治区的南部（崇左市、南宁市、玉林市）与广东省（江门市、河源市与揭阳市），东北部的收缩范围在江西省北部（九江市、景德镇市）与浙江省北部（杭州市）。RCP8.5 路径下的 2070 年代，总适生区丧失的面积最大。

3 讨 论

3.1 MaxEnt 模型模拟的可靠性

模型模拟的精度取决于样本的覆盖率、样本量的多少，而 AUC 值是衡量模型精度的最佳指标[23]。在小样本量条件下，MaxEnt 模型进行物种潜在分布区预测可避免过度拟合，获得较好的预测结果，并且精度较高[24]。本研究收集的分布点数据，尽可能覆盖了黄枝油杉与江南油杉的分布范围。通过对 19 个环境变量进行筛选，剔除高相关性变量中贡献率较

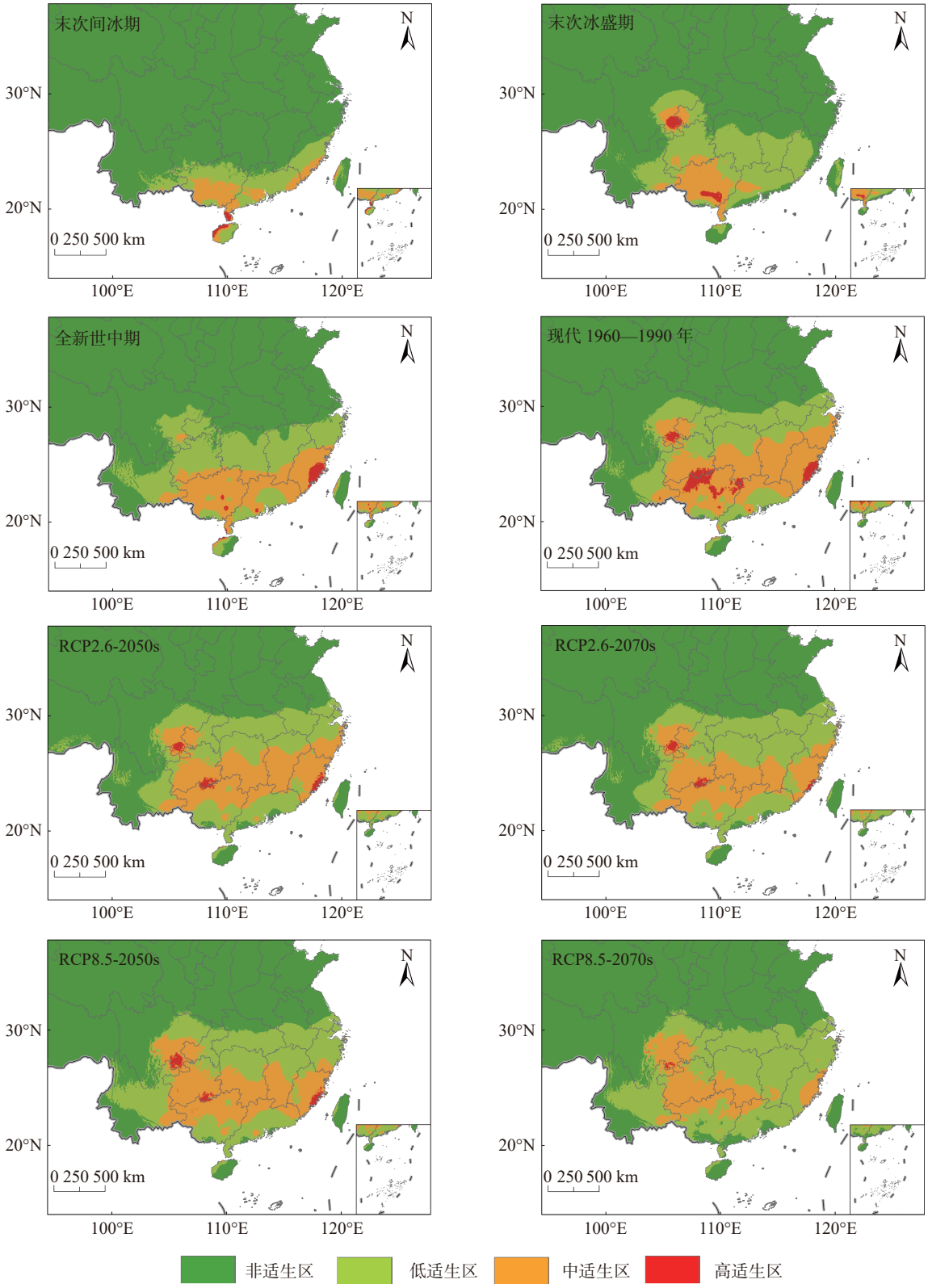


图 6　8 个气候情景下江南油杉的潜在分布

Fig. 6　Potential distribution of *K. cyclolepis* under 8 climate scenarios

低的变量，并使用 AUC 值来评价模型模拟精度，充分保障了预测的可靠性。本研究中，黄枝油杉与江南油杉的训练集和测试集的 AUC 值均高于 0.970，这与麻璨璨等[9]的研究结果一致，说明模型模拟结果精度较高，现代潜在适生区的分布预测符合实际生长分布情况。

3.2　环境因子对黄枝油杉和江南油杉适生分布的影响

植物的地理分布主要受到气候因子的限制[25]，并且水热条件起主导作用[26]。在现代气候条件下，

表 4 江南油杉 8 个气候情景下的适生区面积

Tab. 4 Area of suitable habitats for *K. cyclolepis* under 8 climate scenarios

气候情景		总适生区		低适生区		中适生区		高度适生区	
		面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%	面积/km²	变化率/%
1960—1990		159.35×10^4		77.36×10^4		73.86×10^4		8.12×10^4	
末次间冰期		47.42×10^4	−70.24	32.13×10^4	58.47	14.33×10^4	−80.60	0.96×10^4	−88.16
末次冰盛期		102.32×10^4	−35.79	77.03×10^4	−0.43	22.85×10^4	−69.07	2.44×10^4	−69.97
全新世中期		128.88×10^4	−19.12	80.45×10^4	3.99	46.00×10^4	−37.73	2.43×10^4	−70.04
RCP2.6	2050s	163.21×10^4	2.43	91.91×10^4	18.80	68.61×10^4	−7.11	2.69×10^4	−66.83
	2070s	161.62×10^4	1.43	99.02×10^4	27.99	60.66×10^4	−17.87	1.94×10^4	−76.13
RCP8.5	2050s	173.85×10^4	9.10	101.17×10^4	30.78	69.86×10^4	−5.42	2.82×10^4	−65.31
	2070s	168.58×10^4	5.80	122.86×10^4	58.81	45.38×10^4	−38.56	0.35×10^4	−95.75

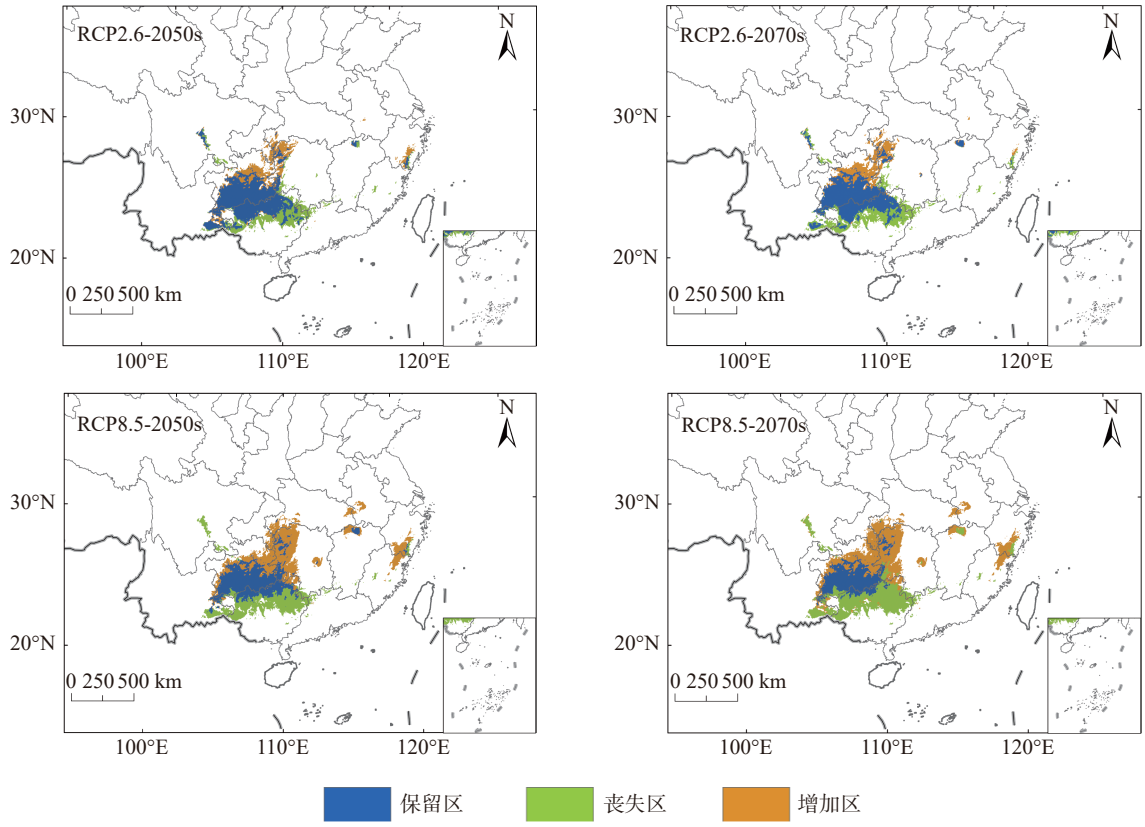


图 7 未来不同气候情景下黄枝油杉的空间分布格局变化

Fig. 7 Changes of spatial distribution patterns of *K. calcarea* under different climate scenarios in the future

限制油杉属植物潜在地理分布的环境变量可能是温度和降水[9]。本研究发现平均温日较差(Bio2)、最冷月最低温(Bio6)、最干月降水量(Bio14)和最干季度平均温(Bio9)是制约黄枝油杉地理分布的最主要环境因子。其中，与温度相关的因子(Bio2、Bio6 和 Bio9)的贡献率为 59.8%，与水分相关的因子(Bio14)贡献率为 16.9%，说明温度因子对黄枝油杉的分布影响更大。平均温日较差(Bio2)、最冷月最低温(Bio6)和温度季节性变化(Bio4)3 个温度因子是制约江南油杉地理分布的最主要环境因子，累计贡献率为 88.7%。平均温日较差(Bio2)与最冷月最低温(Bio6)在决定黄枝油杉和江南油杉的地理分布中起到了决定性作用，这表明了它们对昼夜温度变化的敏感性与对极端低温的耐受能力。植物只有在一定的温度范围内才能进行光合作用和呼吸作用[27]。当平均温日较差在 4 ~ 10℃ 时，最适宜黄枝油杉与江南油杉的分布。此外，最冷月最低温(Bio6)适度升高，会扩大黄枝油杉和江南油杉的分布范围。而当最冷月最低温低于−10℃ 时，就会对黄枝油杉与江南油杉的生长产生不利影响。低温冻害是制约油杉

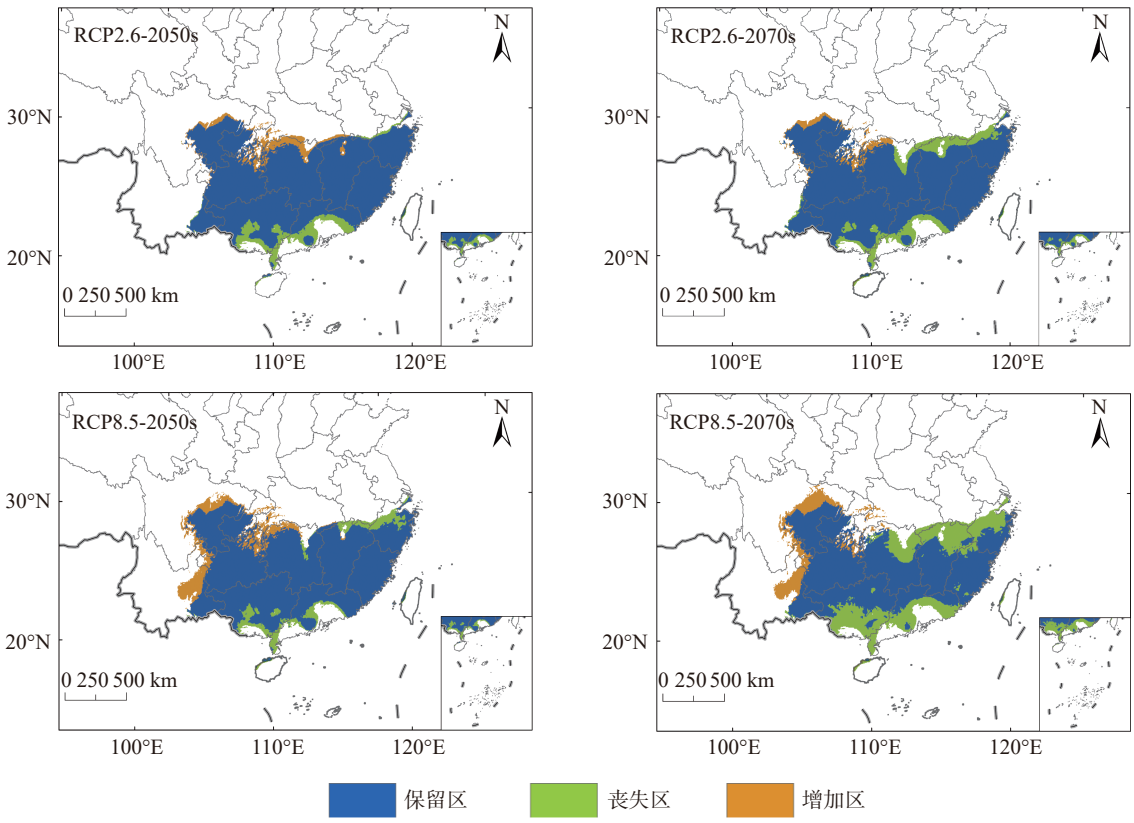


图 8　未来不同气候情景下江南油杉的空间分布格局变化

Fig. 8　Changes of spatial distribution patterns of *K. cyclolepis* under different climate scenarios in the future

属引种到较高纬度地区的重要限制因子，这为确定其越冬生存的极端温度阈值提供了有力依据。

在这些主要影响环境因子中，温度对黄枝油杉和江南油杉分布区的影响大于降水。前人的研究中，限制资源冷杉(*Abies ziyuanensis*)潜在分布区的环境变量主要是最湿季度温度[15]，而青藏高原地区的鳞皮冷杉(*Abies squamata*)和红杉(*Larix potaninii*)对温度的响应更敏感[28]，与本研究结论一致。阐明了温度因子在限制油杉属植物分布中的关键作用。最干月降水量(Bio14)对黄枝油杉与江南油杉的影响也不能忽视，同样也是影响其向更高纬度扩张的关键因子。黄枝油杉主要分布于我国贵州、广西、湖南一带的云贵高原南缘山区，江南油杉主要分布于我国湖南、福建、广西、云南、贵州等东南丘陵一带，这些区域属于亚热带地区，受气流运动影响降水充沛[29]，降水已能满足两种油杉的生长需求，因此温度成为限制其分布的主要因子。

3.3　黄枝油杉与江南油杉的分布格局变化

油杉属植物是第三纪孑遗植物，化石资料表明，白垩纪至中新世曾广泛分布于欧亚大陆和北美洲西部[30]。末次间冰期气候相对较暖，然而随着末次冰盛期的到来，全球平均温度逐渐降低，全球温度总体上比现代低约 5 ~ 12 ℃[31]，全新世中期气候回暖。在遭遇恶劣气候条件时，大多数植物的分布范围都缩小到合适的栖息地以维持生存[32]。从末次间冰期到末次冰盛期再到全新世中期，黄枝油杉和江南油杉的分布范围逐渐扩张。本研究结果和 Stewart 等[33]提出的理论适应寒冷的植物在末次间冰期的分布范围比末次冰盛期小是吻合的，在云杉属植物的生态位模拟研究中也有一致的结论[34]。相比于末次冰盛期，末次间冰期是一个更为温暖湿润且气候相对不稳定的时期[35]，这种环境不利于裸子植物油杉属的生存。相反，末次冰盛期和全新世中期气候条件相比于末次间冰期更适合它们的生存。

随着全球温度持续上升，为了应对气候变化，物种会进行迁移来避免局地灭绝[36]，未来气候波动可能会导致北半球许多物种的分布范围向北(高纬度)或向更高的海拔转移[37]，同时伴随着生境破碎化[38]。在未来 2 种温室气体排放情景下，黄枝油杉和江南油杉总适生区面积呈现扩张趋势，分别向北和向西北方向(高纬度)扩张。影响这两种油杉分布的主导环境因子为平均温日较差与最冷月最低温。随着全球气候变暖，更高纬度地区的最冷月最低温升高，从而形成了适宜黄枝油杉与江南油杉生存的新区域。此外，未来高温高湿环境将使长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)适生分布区不断向西北扩张[39]，而冷杉属(*Abies*)植物受全球气候变化影响适生区会大幅减少，且适生区有北移的趋势[40]。本研究结论与这些

研究结果一致。

麻璨璨等[9]的研究中得出，在未来气候情景下，油杉、铁坚油杉和柔毛油杉的总适生区面积均大于现代总适生区面积，说明油杉属植物具有引种潜质。这与本研究得出的结论一致，黄枝油杉与江南油杉的新增区不断扩大。但是在全球变暖的趋势下，黄枝油杉与江南油杉的高适生区面积均呈现收缩趋势，甚至存在丧失风险。本研究也发现，RCP8.5 路径下的 2070 年代，黄枝油杉出现片段化分布趋势。相较于 RCP8.5 路径，RCP2.6 路径下的气候情景更适于黄枝油杉和江南油杉的分布。

3.4 油杉属的保护建议

油杉属植物全属受到威胁[41]，在未来气候情景下，黄枝油杉与江南油杉虽然总适生区面积呈现扩大趋势，但高适生区面积极度减小。黄枝油杉资源少，分布狭窄，属于濒危物种，已被列为珍稀重点保护植物[11]；江南油杉属于易危物种，由于长期受到人为砍伐以及其他人为因素的破坏，天然资源流失严重[12]。结合油杉属现状与适生区预测结果，提出以下建议：(1)根据已有研究的油杉属潜在分布区等级，更为详细地了解油杉属各个种的实际资源现状，加强科学研究；(2)减少人为干扰与破坏，提高公众意识，制定有效的保护措施并付诸实践，开展就地保护，针对油杉属的适生区开展造林区划；(3)深入研究限制油杉属各个种分布的环境变量，揭示各个种最适宜的生境需求，根据适宜生境变化对油杉属植物开展迁地保护。

4 结　　论

黄枝油杉与江南油杉的分布受平均温日较差与最冷月最低温影响显著，相较于降水，温度是限制其分布的关键环境因子。黄枝油杉与江南油杉从末次间冰期到现代，分布面积均持续扩增，未来气候变化会导致两物种总适生区面积继续扩大，但高适生区面积缩小；未来气候变化影响下，黄枝油杉与江南油杉均有向高纬度迁移的趋势。本研究为制定油杉属植物的综合保护策略，开展就地保护与引种栽培等提供了重要理论依据。

审图号：京审字(2025)G 第 0976 号

参 考 文 献

[1] 吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 等. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响 [J]. 生态学报, 2024, 44(3): 1164−1176.
Lü Z W, Zhu X R, Ye X Z, et al. Impacts of climate change on the suitable habitats and spatial migration of *Tetraena mongolica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1164−1176.

[2] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 389−395.

[3] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427(6970): 145−148.

[4] Zhu K, Woodall C W, Clark J S. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change[J]. Global Change Biology, 2012, 18(3): 1042−1052.

[5] 邹旭, 彭冶, 王璐, 等. 末次盛冰期以来气候变化对中国山荆子分布格局的影响 [J]. 植物科学学报, 2018, 36(5): 676−686.
Zou X, Peng Y, Wang L, et al. Impact of climate change on the distribution pattern of *Malus baccata* (L.) Borkh. in China since the Last Glacial Maximum[J]. Plant Science Journal, 2018, 36(5): 676−686.

[6] 刘菲, 黄荣林, 江珊鸿, 等. 江南油杉人工林生长规律研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(3): 39−52.
Liu F, Huang R L, Jiang S H, et al. Study on the growth rhythm of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3): 39−52.

[7] Hu S Y. The metasequoia flora and its phytogeographic significance[J]. Journal of the Arnold Arboretum, 1980, 61(1): 41−94.

[8] 李楠. 论松科植物的地理分布、起源和扩散 [J]. 植物分类学报, 1995, 33(2): 105−130.
Li N. Studies on the gerogeraphic distribution, origin and dispersal of the family Pinacaea Lindl.[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 1995, 33(2): 105−130.

[9] 麻璨璨, 李媛媛, 王海珍, 等. 油杉属植物的地理分布及潜在分布区预测 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 158−165.
Ma C C, Li Y Y, Wang H Z, et al. Geographical distribution and the prediction of the potential distribution of *Keteleeria*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 158−165.

[10] 符支宏. 桂林黄枝油杉种群生态学研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2014.
Fu Z H. Ecological study of *Keteleeria calcarea* populations of Guilin[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2014.

[11] 谢伟玲. 黄枝油杉遗传多样性、种子萌发和光合特性研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2016.
Xie W L. Studies on genetic diversity, seed germination and photosynthetic characteristics of *Keteleeria calcarea*[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2016.

[12] 何国生. 福建江南油杉 4 种天然林群落物种结构特征 [J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(5): 1−5.
He G S. Community species structure characteristics of four types of *Keteleeria cyclolepis* natural forests in Fujian Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2011, 31(5): 1−5.

[13] Schorr G, Holstein N, Pearman P B, et al. Integrating species distribution models (SDMs) and phylogeography for two species of Alpine *Primula*[J]. Ecology and Evolution, 2012, 2(6):

1260−1277.

[14] 杨善云, 安明态, 刘锋, 等. 基于 MaxEnt 模型的贵州省楠木潜在适生区预测 [J]. 广西植物, 2023, 43(5): 846−857.
Yang S Y, An M T, Liu F, et al. Prediction of potential suitable area of *Phoebe zhennan* in Guizhou Province based on MaxEnt model[J]. Guihaia, 2023, 43(5): 846−857.

[15] 李莎, 莫舜华, 胡兴华, 等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测濒危植物资源冷杉潜在适生区分析 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(2): 533−541.
Li S, Mo S H, Hu X H, et al. Prediction of potential suitable areas of endangered plant *Abies ziyuanensis* based on MaxEnt and ArcGIS[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2): 533−541.

[16] 周炳江, 王玉洁, 马长乐, 等. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 的云南榧树潜在生境分析 [J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4485−4493.
Zhou B J, Wang Y J, Ma C L, et al. Analysis of potential habitat of *Torreya yunnanensis* based on MaxEnt and ArcGIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4485−4493.

[17] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1292−1305.
Guo Y L, Zhao Z F, Qiao H J, et al. Challenges and development trend of species distribution model[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(12): 1292−1305.

[18] 张涛, 胡菀, 贾天娇, 等. 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析 [J]. 广西植物, 2022, 42(3): 349−362.
Zhang T, Hu W, Jia T J, et al. Prediction of potential distribution of *Sophora flavescens* in China under climate change[J]. Guihaia, 2022, 42(3): 349−362.

[19] 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): 1965−1978.

[20] 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.

[21] Li M, He J, Zhao Z, et al. Predictive modelling of the distribution of *Clematis* sect. *Fruticella* s. str. under climate change reveals a range expansion during the Last Glacial Maximum[J]. PeerJ, 2020, 8: e8729.

[22] 张殷波, 刘彦岚, 张晓龙, 等. 气候变化对文冠果适宜生境及空间迁移的影响 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4597−4606.
Zhang Y B, Liu Y L, Zhang X L, et al. Impacts of climate change on the suitable habitats and spatial migration of *Xanthoceras sorbifolia*[J]. China Environmental Science, 2020, 40(10): 4597−4606.

[23] 应邦肯, 田阔, 郭浩宇, 等. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情境下红树秋茄 (*Kandelia obovata*) 在中国潜在适生区的变化 [J]. 生态学报, 2024, 44(1): 224−234.
Ying B K, Tian K, Guo H Y, et al. Predicting potential suitable habitats of *Kandelia obovata* in China under future climatic scenarios based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 224−234.

[24] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161−175.

[25] Punyasena S W, Eshel G, McElwain J C. The influence of climate on the spatial patterning of neotropical plant families[J]. Journal of Biogeography, 2008, 35(1): 117−130.

[26] 李晓笑, 陶翠, 王清春, 等. 中国亚热带地区 4 种极危冷杉属植物的地理分布特征及其与气候的关系 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1154−1164.
Li X X, Tao C, Wang Q C, et al. Characteristics of geographic distribution of four critically endangered species of *Abies* in subtropical China and its relationship with climate [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(11): 1154−1164.

[27] 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化 [J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6590−6604.
Wang X F, Duan Y X, Jin L L, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6590−6604.

[28] 张萌, 石松林, 石春明, 等. 川西高原 4 种典型针叶树径向生长对气候因子的响应 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1947−1957.
Zhang M, Shi S L, Shi C M, et al. Radial growth responses of four typical coniferous species to climatic factors in the western Sichuan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(7): 1947−1957.

[29] 蔡琦琪, 安明态, 余江洪, 等. 气候变化下华南五针松在中国的适生区预测 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2024, 52(1): 90−102.
Cai Q Q, An M T, Yu J H, et al. Suitable habitat prediction of *Pinus kwangtungensis* in China under climate change[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2024, 52(1): 90−102.

[30] Zhu Y, Li Y, Tian N, et al. A new species of *Keteleeria* (Pinaceae) from the Lower Cretaceous of Inner Mongolia, Northeast China, and its palaeogeographic and palaeoclimatic implications[J]. Cretaceous Research, 2024, 156: 105805.

[31] 陈冬梅, 康宏樟, 刘春江. 中国大陆第四纪冰期潜在植物避难所研究进展 [J]. 植物研究, 2011, 31(5): 623−632.
Chen D M, Kang H Z, Liu C J. An overview on the potential quaternary glacial refugia of plants in China mainland[J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(5): 623−632.

[32] 管毕财, 陈微, 刘想, 等. 四照花物种分布格局模拟及冰期避难所推测 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(12): 2541−2547.
Guan B C, Chen W, Liu X, et al. Distribution pattern and glacial refugia of *Cornus kousa* subsp. *chinensis* based on MaxEnt model

and GIS[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(12): 2541−2547.

[33] Stewart J R, Lister A M, Barnes I, et al. Refugia revisited: individualistic responses of species in space and time[J]. Proceedings Biological Sciences, 2010, 277: 661−671.

[34] Shen T T, Ran J H, Wang X Q. Phylogenomics disentangles the evolutionary history of spruces (*Picea*) in the Qinghai-Tibetan Plateau: implications for the design of population genetic studies and species delimitation of conifers[J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2019, 141: 106612.

[35] Liu S, Zhou X. The PMIP4 simulated dryland aridity changes during the Last Interglacial[J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(9): 094056.

[36] Bell D M, Bradford J B, Lauenroth W K. Mountain landscapes offer few opportunities for high-elevation tree species migration[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1441−1451.

[37] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science, 2011, 333(6045): 1024−1026.

[38] Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, et al. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests[J]. Nature, 2011, 479(7374): 517−520.

[39] 张淑宁, 陈俊兴, 敖敦, 等. 气候变化背景下我国长柄扁桃潜在适生区预测 [J]. 林业科学, 2023, 59(12): 25−36.
Zhang S N, Chen J X, Ao D, et al. Prediction of potential suitable areas of *Amygdalus pedunculata* in China under climate change[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(12): 25−36.

[40] 刘然, 王春晶, 何健, 等. 气候变化背景下中国冷杉属植物地理分布模拟分析 [J]. 植物研究, 2018, 38(1): 37−46.
Liu R, Wang C J, He J, et al. Analysis of geographical distribution of *Abies* in China under climate change[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(1): 37−46.

[41] 覃海宁, 杨永, 董仕勇, 等. 中国高等植物受威胁物种名录 [J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 696−744.
Qin H N, Yang Y, Dong S Y, et al. Threatened species list of china's higher plants[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(7): 696−744.

（责任编辑 孟 瑶 李 契
责任编委 孟 平）