

DOI: 10.20103/j.stxb.202407221722

乔爽,汪阳东,陈益存,赵耘霄,曾为,金世茂,高暝.气候变化对木姜子属五种植物分布的影响.生态学报,2025,45(7):3401-3420.

Qiao S, Wang Y D, Chen Y C, Zhao Y X, Zeng W, Jin S M, Gao M. Study on the influence of climate change on the distribution and future change of five *Litsea* species. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3401-3420.

## 气候变化对木姜子属五种植物分布的影响

乔爽<sup>1,2</sup>,汪阳东<sup>1</sup>,陈益存<sup>1</sup>,赵耘霄<sup>1</sup>,曾为<sup>2</sup>,金世茂<sup>3</sup>,高暝<sup>1,\*</sup>

1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

2 浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300

3 重庆市万州区林业科学研究所, 重庆 404100

**摘要:**木姜子属是樟科的代表类群,是重要的药用及香料植物资源。预估气候变化对木姜子属植物的影响,对该属植物资源保护、引种栽培及可持续利用具有重要意义。为探究木姜子属五种植物适生区与气候变化的关系,基于 2371 条分布记录和 22 个生物变量,优化预测模型的调控倍频和特征组合参数,应用 MaxEnt 软件预测当前和未来(2050s, 2070s, 2090s)不同气候情景(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)下木姜子属五种植物的潜在地理分布,分析其适生区的空间变化及质心迁移趋势。结果表明:(1)模型预测结果具有较高准确度,优化后各组模型的 AUC 值均高于 0.93。(2)木姜子属五种植物潜在分布受不同环境因素影响,其中最热季度平均降水对五种植物分布均有显著影响。(3)当前气候条件下,木姜子属五种植物的适宜性在区域间存在明显差异,红叶木姜子在我国总适生区的面积最大。(4)未来不同气候变化情景下,木姜子属五种植物的适宜生境将发生不同程度的扩张和收缩变化,其中山鸡椒和毛叶木姜子总适生区呈现完全扩张趋势,毛山鸡椒、天目木姜子和红叶木姜子不同情景下呈现不同程度的收缩和扩张。(5)随着未来全球变暖,各物种质心发生了不同程度的迁移,其中红叶木姜子、山鸡椒的质心将呈现出向高纬度地区迁移趋势。木姜子属五种植物生态适应性及对气候变化的响应为其制定保护策略以及引种栽培提供理论依据。

**关键词:**木姜子;气候变化;最大熵(MaxEnt)模型;适生区

## Study on the influence of climate change on the distribution and future change of five *Litsea* species

QIAO Shuang<sup>1,2</sup>, WANG Yangdong<sup>1</sup>, CHEN Yicun<sup>1</sup>, ZHAO Yunxiao<sup>1</sup>, ZENG Wei<sup>2</sup>, JIN Shimao<sup>3</sup>, GAO Ming<sup>1,\*</sup>

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

3 Chongqing Wanzhou Forestry Institute, Chongqing 404100, China

**Abstract:** *Litsea* is a representative group of Lauraceae and is an important medicinal resource plant. Predicting the impacts of climate change on *Litsea* is helpful for which would promote the resource protection, introduction and sustainable utilization. In order to investigate the relationship between the habitats of five *Litsea* species and climate change, the regularization multiplier (RM) and feature combination (FC) of Maxent predictive model are optimized based on 2371 distribution records and 22 biological variables. Maxent soft was used to predict the potential geographical distribution of the five *Litsea* species and analysed variations in the area of suitable habitats and the movement trends of the center of distribution under current climate and 4 climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) for three future time

**基金项目:**浙江省“十四五”育种专项林木协作组课题(2021C02070-3)

**收稿日期:**2024-07-22; **网络出版日期:**2024-12-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 4862705@163.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

periods(2050s, 2070s, 2090s). The results showed that: (1) the prediction accuracy of the Maxent model was high, and area under the curve(AUC)of each group of the Maxent models was higher than 0.93. (2) The potential distribution of the five *Litsea* species was affected by different environmental factors, and precipitation of the warmest quarter had a significant effect on the distribution of five *Litsea* species. (3) Under the current climatic conditions, there were obvious differences in the suitability of the five *Litsea* species in the same region, and the area, and the total suitable area for *Litsea rubescens* is the largest in China. (4) In the future, the suitable habitats of the five *Litsea* species would expand and reduce to different degrees under different climate change scenarios, among which the total suitable habitat of *Litsea cubeba* and *Litsea mollis* would show a complete expansion trend, and the total suitable habitat of *Litsea cubeba* var *formosana*, *Litsea auriculata* and *Litsea rubescens* would show different degrees of reduction and expansion under different scenarios. (5) With the future global warming, the distribution center of five *Litsea* species have migrated to varying degrees, and the distribution center of *Litsea rubescens* and *Litsea cubeba* would show a trend of shifting to high-dimensional regions. Researching the ecological adaptability of five *Litsea* species and the prediction of their future distribution will provide a theoretical basis for formulating effective protection strategies and the introduction and cultivation.

**Key Words:** *Litsea*; climate change; maximum entropy model; suitable area

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最近发布的一份评估报告称,随着全球变暖加剧,生态系统被严重扰乱,许多物种原本活动范围的气候条件不再适宜生存<sup>[1]</sup>,导致物种发生大规模迁移<sup>[2]</sup>,地理分布发生改变<sup>[3]</sup>。气候变化导致的植物物种分布大范围变化会改变非生物条件,进而影响许多其他物种的地理分布<sup>[4]</sup>。探究气候变化对栖息地及分布范围的影响,有助于识别物种分布范围的限制性环境因素、推断物种分布格局,对规划保护物种和可持续利用资源具有重要价值<sup>[5-6]</sup>。

物种分布模型可预测物种在地理空间中的分布,并更好地了解物种分布规律<sup>[4]</sup>。物种分布模型(species distribution models, SDMs)又称生态位模型<sup>[7]</sup>,其原理是将物种发生记录与环境变量在多个空间和时间尺度上的环境变量进行建模,预测物种过去、现在和未来分布,能够有效的评估未来气候对物种潜在分布的影响<sup>[8]</sup>。目前,物种分布模型已被国内外广泛认可为预测气候变化背景下物种潜在适生区的有效工具<sup>[9]</sup>,尤其是一些价值高的植物如闽楠<sup>[10]</sup>、云南榿<sup>[11]</sup>、崖柏<sup>[12]</sup>、椰子<sup>[13]</sup>等。随着3S技术(GIS、RS、GPS)的迅速发展,已产生多种生态位模型来评估物种环境适宜性<sup>[14]</sup>,其中应用最广泛的模型为最大熵模型(MaxEnt),此模型是以生态位理论为基础,根据已知约束条件,推断熵最大时物种在预测区内的概率分布<sup>[15]</sup>。MaxEnt具有预测精度高、模拟稳定、运行速度快等优势<sup>[16-17]</sup>,相较其他生态位模型,在物种样本数据量小、分布区环境变量不完整的情况下,该模型预测结果准确性和稳定性更高<sup>[9]</sup>。因而,在良种引种生境预测<sup>[18]</sup>、濒危动植物生境预测与保护<sup>[19]</sup>、外来入侵物种风险评估<sup>[20]</sup>等方面被广泛应用。

樟科(Lauraceae)木姜子属(*Litsea*)植物是一个分布广泛、用途多样、生态及经济价值显著的木本植物类群<sup>[21]</sup>。该属落叶组植物富含精油,广泛用于香精香料、食品医药、生态农业等领域<sup>[22]</sup>。王雪<sup>[23]</sup>对木姜子属落叶组植物进行系统发育分析,将其分成三大分支。山鸡椒、毛山鸡椒和毛叶木姜子聚类为一支;红叶木姜子、宝兴木姜子、杨叶木姜子、钝叶木姜子、四川木姜子、秦岭木姜子、峨眉木姜子、滇木姜子、宜昌木姜子、绢毛木姜子和高山木姜子聚为一支;天目木姜子单独聚到一支,属于落叶组濒危物种,而且是国家3级保护植物<sup>[24]</sup>。为了研究当前和未来气候变化对木姜子属植物潜在适宜分布的影响,筛选五种代表植物毛叶木姜子、山鸡椒、毛山鸡椒、红叶木姜子、天目木姜子为研究对象,应用ENMeval优化后的MaxEnt模型对其当前和未来时期气候情景下在全球和中国范围的潜在适生区分布进行预测,以期对木姜子属植物多样性保护、引种栽培、种子调拨提供理论基础;同时,可以通过合理预测和规划,避免盲目引种造成的经济损失和资源浪费。

## 1 材料与方法

### 1.1 物种分布数据来源与处理

本研究所用地图来源于自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),世界地图审图号:GS(2016)1663号,中国地图审图号:GS(2023)2767号。木姜子属植物地理分布坐标主要来自于中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、全球生物多样性信息平台(<http://www.gbif.org/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)以及整理相关文献和野外实地调查位点数据整合获取5种植物共4621个地理分布点(山鸡椒2929个、毛叶木姜子276个、红叶木姜子1258个、毛山鸡椒66个、天目木姜子92个)。按照构建物种分布模型的软件要求,先排除经纬度缺失、无效以及重复记录,再将环境变量以及筛选后的分布点导入ENMTools软件(<https://github.com/danwarren/ENMTools>)去除冗余分布数据,避免模型过度拟合。最后在ArcGIS 10.8中建立10 km×10 km的分辨率网格,确保每个网格单元中只保留一个分布点,最终得到有效地理分布点2371个(山鸡椒1717个、毛叶木姜子216个、红叶木姜子371个、毛山鸡椒42个、天目木姜子25个)。依照MaxEnt 3.4.4文件输入要求,将数据整理为\*.csv格式备用(图1)。

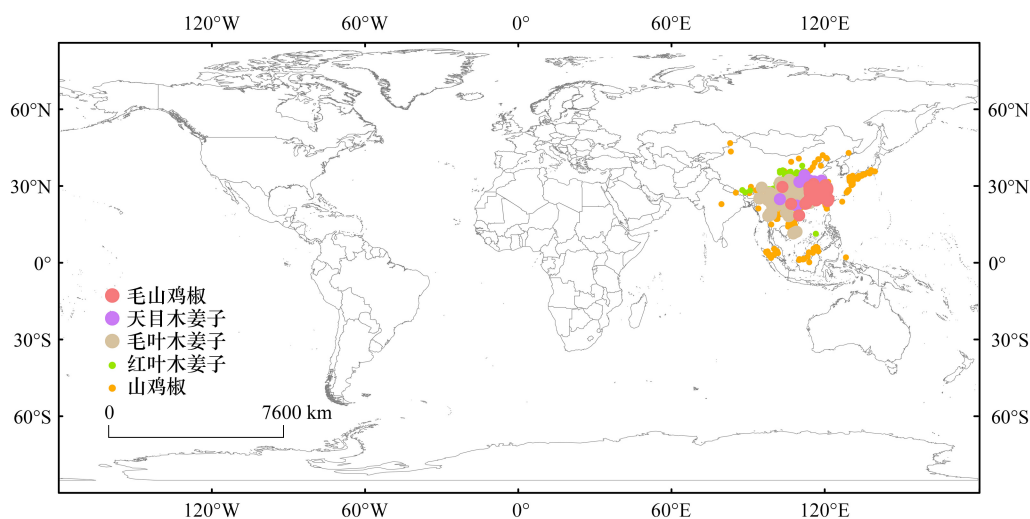


图1 木姜子属五种植物的分布情况

Fig.1 Distribution of five *Litsea* species after screening

### 1.2 环境变量获取与筛选

本研究所用的自然环境数据,包括气候数据和地形数据均来源于全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>;空间分辨率为2.5 arc-minutes);从数据库WorldClim中下载海拔数据和气候数据,地形数据是通过ArcGIS 10.8空间分析模块从海拔中提取坡度和坡向。当前气候是基于1970—2000年的2.0版数据;未来气候数据(即2050s年代的生物气候数据代表2041—2060年的平均值;2070s年代的生物气候数据代表2061—2080年的平均值;2090s年代的生物气候数据代表2081—2100年的平均值)选取第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中国(北京)气候中心中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR),该模型的气候数据最适合中国气候变化研究<sup>[25]</sup>;未来气候变化情景包括四种共享社会经济路径:SSP126、SSP245、SSP370、SSP585。SSP126情景代表低脆弱性、低减缓压力和低辐射强迫的综合影响;SSP245情景代表中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合,SSP370情景代表高社会脆弱性与相对高的人为辐射强迫的组合;SSP585情景代表高强度情景<sup>[20]</sup>。环境变量的选择是建立预测更好的MaxEnt模型的重要环节,对生态位分析结果及其最终潜在分布区的预测结果具有直接影响,过多的环境变量容易增加生态空间的维度,不利于模型预测,因此需要对环境变量进行科学筛选。本研究将22个环境变量在MaxEnt模型中进行模拟预测,剔除贡献率小于1%的环境变量,利用R

语言包对环境因子进行共线性分析,保留相关性小于|0.8|的环境变量,对于交叉相关系数绝对值超过 0.8 的两个环境变量,只选取贡献率高的环境变量,最终筛选出用于建模的变量如表 1 所示。

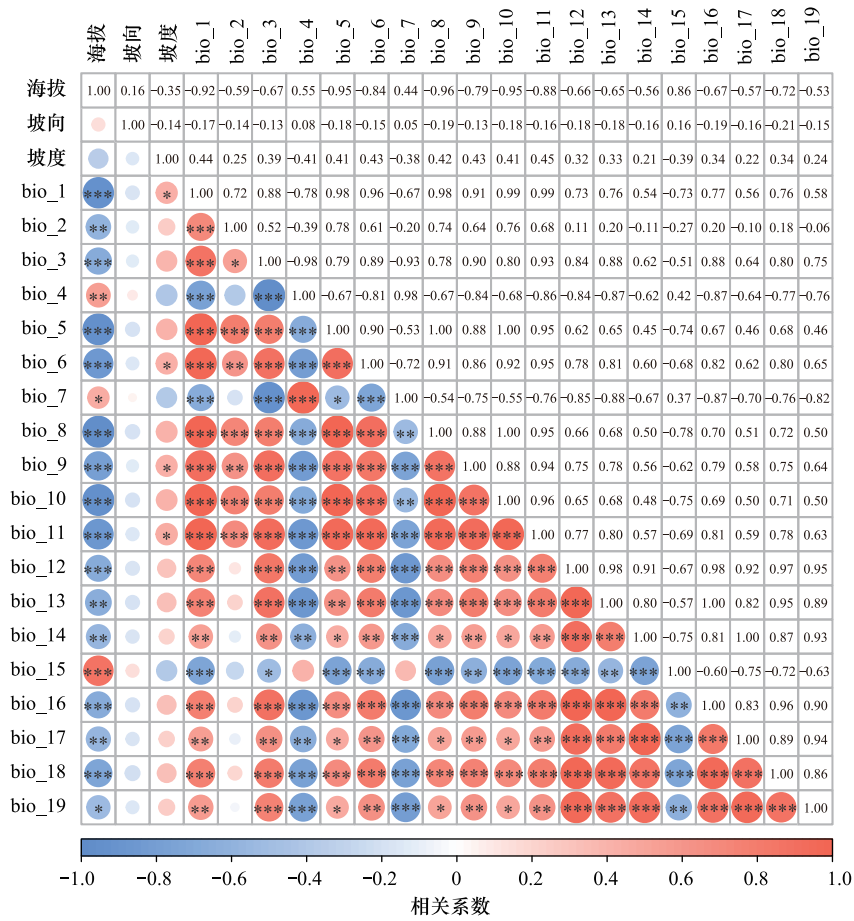


图 2 22 个环境变量的相关性分析  
Fig.2 Correlation analysis of 22 bio-climatic variables  
\*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ ; \*\*\*  $P<0.001$

1.3 MaxEnt 模型构建及参数优化

本研究中使用 ENMeval 数据包用于最佳参数选择,计算调控倍频 (RM) 和特征组合 (FC) 两个关于模型复杂度的重要因素,以免过度拟合导致模型预测结果不可靠。MaxEnt 模型的特征包括:线性 (L)、二次 (Q)、片段化 (H)、乘积型 (P) 和阈值 (T)。利用数据包设定 RM 从 0.5—4,每次增加 0.5,共 8 个调控倍频,同时设置 L、H、LQ、LQH、LQHP 和 LQHPT 六个特征组合,使用“棋盘 2”法和 Akaike 信息量准则 (AIC) 法计算 Akaike 信息标准系数 (AICc),并将最小的 deltaAICc 分数应用于最终优化的 MaxEnt 模型<sup>[26]</sup>。运行 MaxEnt 模型时,调控倍频和特征组合采用优化后的参数,选择 25% 的已知分布点作为随机检验数据集、并设置输出格式为“Cloglog”,重复运行 10 次,重复迭代方式“Crossvalidate”最大迭代次数 5000,并勾选刀切法 (Jackknife)、响应曲线 (response curve) 和输出格式“asc”,其余参数选择默认。MaxEnt 模型的结果准确度采用受试者工作特征曲线 (ROC) 进行检验,ROC 曲线下的面积即 AUC,其数值在 0—1 之间,且数值越大模型预测结果的精度越高。通常 AUC 值为 0.5—0.6 时,代表模型预测失败;当 AUC 值为 0.6—0.7 时,代表模型预测效果较差;当 AUC 值为 0.7—0.8 时,代表模型预测效果一般;当 AUC 值为 0.8—0.9 时,代表模型预测效果良好;当 AUC 值为 0.9—1.0 时,代表模型预测效果优秀<sup>[27]</sup>。



1.4 适生区划分与质心迁移分析

利用 ArcGIS 10.8 中的“重分类”工具,对输出结果为 0—1 的适生逻辑指数( $P$ )进行划分,参考已发表文献<sup>[28]</sup>,结合木姜子属五种植物实际分布,将适生区划分四个等级:高适生区( $P \geq 0.6$ )、中适生区( $0.4 \leq P < 0.6$ )、低适生区( $0.2 \leq P < 0.4$ )、非适生区( $P < 0.2$ )。为了解木姜子属五种植物从当前到未来随时间变化分布区位移的大小和方向,使用 ArcGIS 软件计算不同适生区的占比和面积;将物种不同时期的预测结果文件转换为二进制的分布文件后,利用 SDMTtools 工具分析木姜子属植物适生区的收缩、扩张和稳定区域及适生区质心变化情况,最后绘制出木姜子属五种植物潜在适生区变化图和质心迁移路线。

表 1 气候变量筛选  
Table 1 Climate variables screening

| 环境变量<br>Environment<br>variable | 描述<br>Description | 单位<br>Unit | 是否用于<br>山鸡椒建模<br>Weather to use<br><i>Litsea cubeba</i><br>for Modeling | 是否用于<br>毛山鸡椒建模<br>Weather to use<br><i>Litsea cubeba</i> var<br><i>formosana</i> for<br>Modeling | 是否用于毛叶<br>木姜子建模<br>Weather to use<br><i>Litsea mollis</i><br>for Modeling | 是否用于红叶<br>木姜子建模<br>Weather to use<br><i>Litsea rubescens</i><br>for Modeling | 是否用于天目<br>木姜子建模<br>Weather to use<br><i>Litsea auriculata</i><br>for Modeling |
|---------------------------------|-------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| bio1                            | 年平均温度             | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio2                            | 昼夜温差月均值           | ℃          | 是                                                                       | 否                                                                                                | 是                                                                         | 是                                                                            | 否                                                                             |
| bio3                            | 等温性               | %          | 是                                                                       | 是                                                                                                | 是                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio4                            | 温度季节性             | —          | 否                                                                       | 是                                                                                                | 否                                                                         | 是                                                                            | 是                                                                             |
| bio5                            | 最暖月最高温度           | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio6                            | 最冷月最低温度           | ℃          | 是                                                                       | 否                                                                                                | 是                                                                         | 否                                                                            | 是                                                                             |
| bio7                            | 气温年较差             | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 是                                                                            | 否                                                                             |
| bio8                            | 最湿季平均温度           | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio9                            | 最干季平均温度           | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio10                           | 最暖季平均温度           | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio11                           | 最冷季平均温度           | ℃          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 是                                                                            | 否                                                                             |
| bio12                           | 年降水量              | mm         | 是                                                                       | 是                                                                                                | 是                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio13                           | 最湿季季降水量           | mm         | 否                                                                       | 是                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 是                                                                             |
| bio14                           | 最干月降水量            | mm         | 否                                                                       | 是                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio15                           | 降水季节性             | —          | 否                                                                       | 是                                                                                                | 否                                                                         | 是                                                                            | 是                                                                             |
| bio16                           | 最湿季降水量            | mm         | 是                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| bio17                           | 最干季降水量            | mm         | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 是                                                                             |
| bio18                           | 最暖季降水量            | mm         | 是                                                                       | 是                                                                                                | 是                                                                         | 是                                                                            | 是                                                                             |
| bio19                           | 最冷季降水量            | mm         | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| Altitude                        | 海拔                | m          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 是                                                                         | 否                                                                            | 否                                                                             |
| Aspect                          | 坡向                | °          | 否                                                                       | 否                                                                                                | 否                                                                         | 否                                                                            | 是                                                                             |
| Slope                           | 坡度                | %          | 是                                                                       | 否                                                                                                | 是                                                                         | 是                                                                            | 否                                                                             |

2 结果

2.1 最佳参数及模型精度检验

MaxEnt 建模参数优化结果见表 2,Delta.AICc、Avg.diff.AUC、Mean.OR10 皆小于默认值,AUC 值提高,说明优化后的参数可以降低模型的拟合度和复杂度。基于物种各分布点和环境因子,分别设置各物种 FC、RM 最优模拟参数进行 MaxEnt 模型模拟木姜子属植物当前及未来的潜在适生区,预测结果平均 AUC 值均有所提高且均在 0.93 以上,表示模拟结果具有较高可信度。

2.2 影响木姜子属植物分布的主要环境变量

根据 Jackknife 测试法对影响木姜子属五种植物潜在分布的环境因子进行分析(表 3)。结果表明,影响山鸡椒分布贡献率位居前列的环境因子是最暖季降水量、等温性、最湿季降水量、年降水量、最冷月最低温度、坡度、昼夜温差月均值;影响毛山鸡椒分布贡献率位居前列的环境因子是最暖季降水量、温度季节性、最干月

降水量、最湿月降水量、年降水量、降水季节性、等温性;影响毛叶木姜子分布贡献率位居前列的环境因子是最暖季降水量、最冷月最低温度、等温性、昼夜温差月均值、坡度、年降水量、海拔;影响红叶木姜子分布贡献位居前列的环境因子是最暖季降水量、降水季节性、温度季节性、最冷季平均温度、气温年较差、坡度、昼夜温差月均值;影响天目木姜子分布贡献位居前列的环境因子是最暖季降水量、温度季节性、最湿月降水量、最干季降水量、最冷月最低温度、降水季节性、坡向。由贡献率结果可知,同一变量对每个物种的贡献度方面,存在明显的不同;与其他环境变量相比,对木姜子属五种植物影响最显著的环境变量为降水因子,其次是温度因子,地形因子(海拔、坡度、坡向)分别对木姜子属五种植物有不同的制约性。不同物种各环境因子刀切法的正规化训练增益(图3)表明,当单独使用因子时,最暖季降水量、年降水量对山鸡椒、毛叶木姜子和毛山鸡椒增益最大;最暖季降水量、最冷月最低温度对天目木姜子的增益最大;最暖季降水量、最冷季平均温度对红叶木姜子的增益最大。综上,降水因子变量是影响木姜子属五种植物地理分布的主导环境变量,其次是温度因子变量,地形因子对木姜子属五种植物分别呈现不同程度的制约性。

表 2 MaxEnt 模型 Enmeval 优化评价指标

Table 2 Evaluation metrics of MaxEnt model generated by Enmeval

| 物种<br>Species                         | 类型<br>Type | 调控倍频<br>RM | 特征组合<br>FC | 最小信息<br>准则 AICc<br>Delta.AICc | 训练集 AUC 与<br>测试集 AUC 差值<br>Avg.diff.AUC | 10%训练遗漏率<br>Mean.OR10 | 受试者工作<br>特征曲线下面积<br>AUC |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 山鸡椒                                   | Default    | 1          | LQHP       | 107.740                       | 0.014                                   | 0.114                 | 0.926                   |
| <i>L. cubeba</i>                      | Optimized  | 1          | LQ         | 0.000                         | 0.009                                   | 0.103                 | 0.934                   |
| 红叶木姜子                                 | Default    | 1          | LQHP       | 1175.856                      | 0.059                                   | 0.130                 | 0.977                   |
| <i>L. rubescens</i>                   | Optimized  | 4          | H          | 0.000                         | 0.050                                   | 0.122                 | 0.988                   |
| 毛叶木姜子                                 | Default    | 1          | LQHP       | 173.990                       | 0.089                                   | 0.158                 | 0.986                   |
| <i>L. mollis</i>                      | Optimized  | 0.5        | LQ         | 0.000                         | 0.072                                   | 0.140                 | 0.988                   |
| 天目木姜子                                 | Default    | 1          | LQHP       | 21.810                        | 0.206                                   | 0.317                 | 0.992                   |
| <i>L. auriculata</i>                  | Optimized  | 1          | LQH        | 0.000                         | 0.205                                   | 0.317                 | 0.998                   |
| 毛山鸡椒                                  | Default    | 1          | LQHP       | 89.208                        | 0.183                                   | 0.275                 | 0.995                   |
| <i>L. cubeba</i> var <i>formosana</i> | Optimized  | 2.5        | H          | 0.000                         | 0.099                                   | 0.150                 | 0.996                   |

AICc: Akaike 信息量准则 The akaike information criterion corrected; Delta.AICc: AICc The minimum information criterion AICc value; Avg. diff. AUC: Average difference between the training and teating AUC; AUC: 受试者工作特征曲线下面积 The area under the subject curve; Mean.OR10 : 10%训练遗漏率 10%test omission rate ; LQHP: 线性特征+二次型特征+片段化特征+乘积型特征; LQ : 线性特征+二次型特征; H: 片段化特征; LQH: 线性特征+二次特征+片段化特征

表 3 影响木姜子属五种植物分布环境变量的贡献率

Table 3 Contribution rate of environment variables affecting five species distribution of *Litsea*

| 物种<br>Species                                 | 变量<br>Variable                                                                                     | 贡献率<br>Percent contribution         |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 山鸡椒<br><i>L. cubeba</i>                       | 最暖季降水量 (bio18)、等温性 (bio3)、最湿季降水量 (bio16)、年降水量 (bio12)、最冷月最低温度 (bio6)、坡度 (slope)、昼夜温差月均值 (bio2)     | 84.4%、8.3%、2%、1.3%、1.2%、1.1%、1.1%   |
| 毛山鸡椒<br><i>L. cubeba</i> var <i>formosana</i> | 最暖季降水量 (bio18)、温度季节性 (bio4)、最干月降水量 (bio14)、最湿月降水量 (bio13)、年降水量 (bio12)、降水季节性 (bio15)、等温性 (bio3)    | 43.1%、15.3%、14.8%、7.9%、7.6%、7%、4.3% |
| 毛叶木姜子<br><i>L. mollis</i>                     | 最暖季降水量 (bio18)、最冷月最低温度 (bio6)、等温性 (bio3)、昼夜温差月均值 (bio2)、坡度 (slope)、年降水量 (bio12)、海拔 (altitude)      | 51%、13.4%、12.4%、8.6%、7.3%、5.7%、1.7% |
| 红叶木姜子<br><i>L. rubescens</i>                  | 最暖季降水量 (bio18)、降水季节性 (bio15)、温度季节性 (bio4)、最冷季平均温度 (bio11)、气温年较差 (bio7)、坡度 (slope)、昼夜温差月均值 (bio2)   | 65.9%、11%、8.2%、5.2%、3%、1.7%、1.6%    |
| 天目木姜子<br><i>L. auriculata</i>                 | 最暖季降水量 (bio18)、温度季节性 (bio4)、最湿月降水量 (bio13)、最干季降水量 (bio17)、最冷月最低温度 (bio6)、降水季节性 (bio15)、坡向 (aspect) | 54%、22.1%、7.7%、5.8%、4.9%、2.6%、2%    |

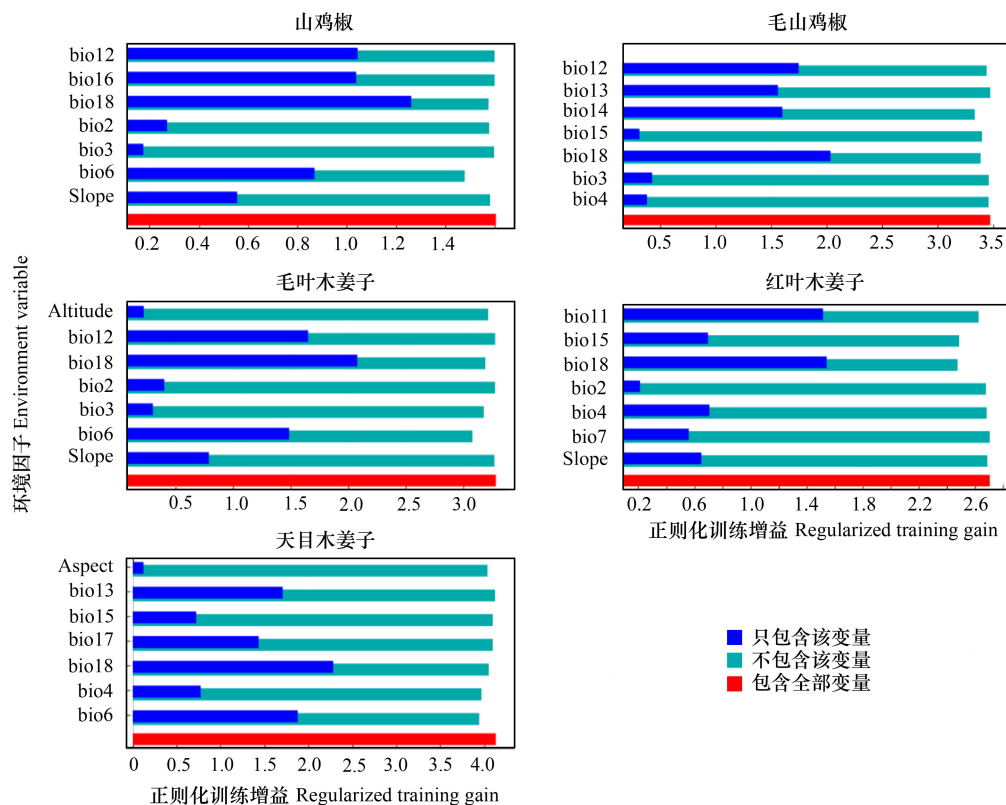


图3 筛选的环境因子对木姜子属五种植物潜在分布预测模型的 Jackknife 检验得分

Fig.3 Jackknife test scores for selected climate factors on the model of potential distribution of plants *Litsea*

bio2:昼夜温差月均值 Mean diurnal range; bio3:等温性 Isothermality; bio4:温度季节性 Temperature seasonality; bio6:最冷月最低温度 Min temperature of the coldest month; bio7:气温年变化范围 Range of annual temperature; bio11:最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter; bio12:年降水量 Annual precipitation; bio13:最湿月季降水量 Precipitation of the wettest month; bio14:最干月降水量 Precipitation of the driest month; bio15:降水季节性 Precipitation seasonality; bio16:最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter; bio17:最干季降水量 Precipitation of the driest quarter; bio18:最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter; slope:坡度; altitude:海拔; aspect:坡向

### 2.3 当前气候条件下木姜子属五种植物潜在的适生区分布

当前气候条件下,木姜子属五种植物在全球的潜在适生区主要分布于中国、日本等国家(图4),其中山鸡椒全球分布较为广泛,主要分布于中国、东南亚等国家,适生区面积约为  $1110 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全球陆地面积的 7.45%,高适生区主要分布在中国的长江以南各地区、越南、尼泊尔、不丹、老挝西部、缅甸和韩国的南部、日本九州、四国和本州的西南部等。根据不同尺度模拟,发现木姜子属五种植物中国适生区面积占比较大(表4),因此以中国为研究对象进行后续分析(图5)。根据 MaxEnt 模型的预测,各物种在适宜区大小和分布位置方面呈现不同特征,当前适宜生境总面积由大到小排列其中面积最大的为红叶木姜子,其适生区总面积约为  $42.34 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 44.10%,山鸡椒和毛叶木姜子的适生区总面积分别为  $29.09 \times 10^5 \text{ km}^2$  和  $23.83 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 30.30% 和 24.82%,天目木姜子和毛山鸡椒的适生区总面积相近分别为  $16.93 \times 10^5 \text{ km}^2$  和  $16.39 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 17.64% 和 17.07%。

当前气候条件下,红叶木姜子高适生区主要分布在四川、重庆、贵州、福建、湖北西部、陕西南部等地区,约占国土面积的 16.34%,中适生区主要分布在安徽省、江苏省、山东省、浙江省西部和南部、广东省和广西省的南部,约占国土面积的 13.21%(图5),在我国各省级行政区中红叶木姜子适生区分布面积预测如表5所示,以四川省红叶木姜子面积适生区面积最大,达到  $48.539 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

当前气候条件下,山鸡椒在中国潜在适生区主要分布于长江以南的部分区域,其中高适生区面积  $15.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 15.74%,主要分布于我国浙江省、湖南省、湖北省、重庆市、江西省、云南省、福建省、贵州省、广东省、广西省、台湾省、四川东部、安徽南部等地区,中适生区面积  $7.01 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的

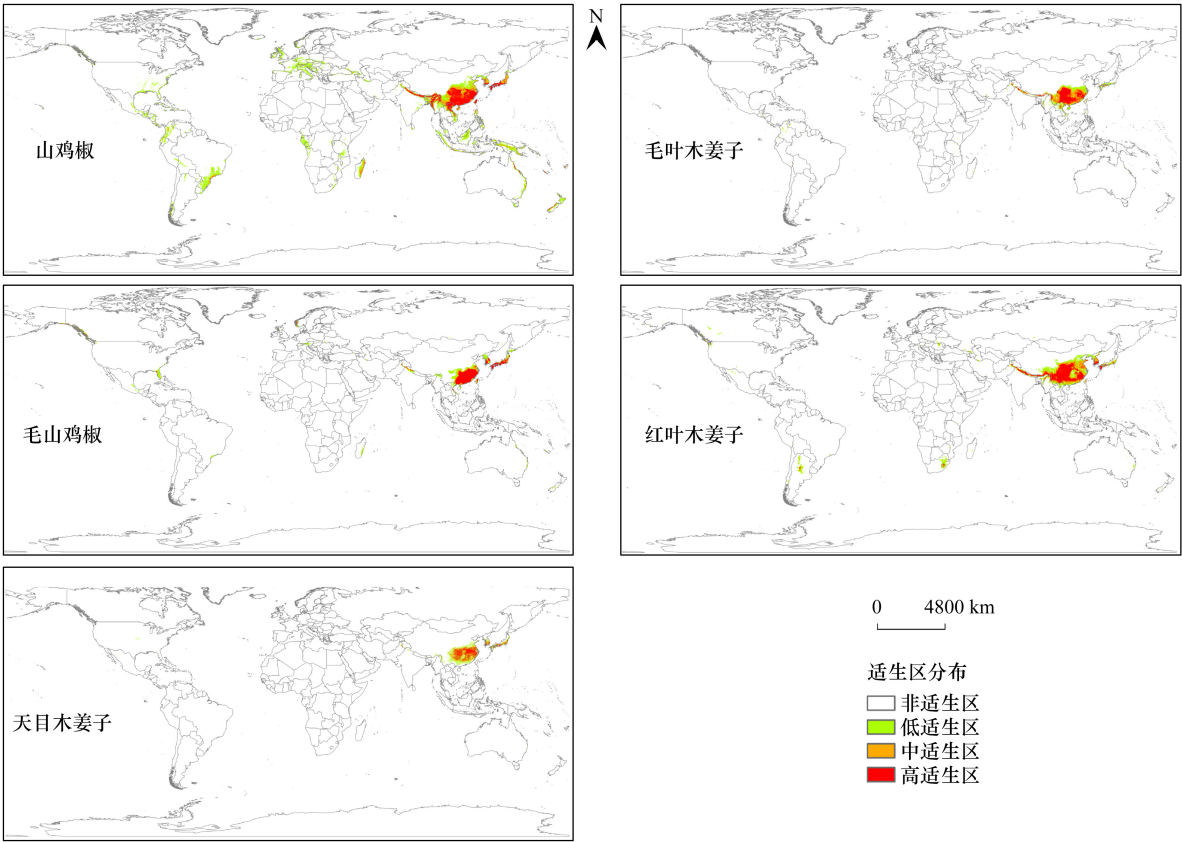


图 4 当前气候条件下木姜子属五种植物在全球的潜在适生区分布  
Fig.4 Potential distribution of *Litsea* in the world under the current climate condition

表 4 当前气候情景下木姜子属五种植物适生区面积/(10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>)

Table 4 Suitable area of five *Litsea* species in the current climate

| 物种<br>Species        | 适生区<br>Suitable<br>area | 全球适生区<br>Global suitable<br>area | 中国适生区<br>China suitable<br>area | 物种<br>Species                 | 适生区<br>Suitable<br>area | 全球适生区<br>Global suitable<br>area | 中国适生区<br>China suitable<br>area |
|----------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 山鸡椒                  | 低适生区                    | 81.90                            | 6.97                            | 红叶木姜子<br><i>L. rubescens</i>  | 高适生区                    | 15.20                            | 10.39                           |
| <i>L. cubeba</i>     | 中适生区                    | 23.80                            | 7.01                            |                               | 总适生区                    | 40.30                            | 23.83                           |
|                      | 高适生区                    | 28.60                            | 15.11                           |                               | 低适生区                    | 27.90                            | 13.97                           |
|                      | 总适生区                    | 111.00                           | 29.09                           |                               | 中适生区                    | 17.10                            | 12.68                           |
| 毛山鸡椒                 | 低适生区                    | 19.80                            | 3.88                            | 天目木姜子<br><i>L. auriculata</i> | 高适生区                    | 26.30                            | 15.69                           |
| <i>L. cubeba</i> var | 中适生区                    | 8.43                             | 2.21                            |                               | 总适生区                    | 71.30                            | 42.34                           |
| <i>formosana</i>     | 高适生区                    | 19.10                            | 10.30                           |                               | 低适生区                    | 11.10                            | 6.78                            |
|                      | 总适生区                    | 47.40                            | 16.39                           |                               | 中适生区                    | 7.10                             | 4.47                            |
| 毛叶木姜子                | 低适生区                    | 12.60                            | 5.23                            |                               | 高适生区                    | 8.09                             | 5.68                            |
| <i>L. mollis</i>     | 中适生区                    | 12.50                            | 8.21                            |                               | 总适生区                    | 26.30                            | 16.93                           |

7.03%,主要分布于江苏省、海南省、湖北省北部、湖南中部、云南省南部、福建省西南部、陕西省南部等地区,低适生区面积  $6.97\times10^5\text{ km}^2$ ,约占国土面积的 7.26%,主要分布于云南北部、安徽北部、山东省、河南省甘肃省等部分地区;其余区域为非适生区(图 5)。我国各省级行政区中山鸡椒适生区分布面积预测如表 6 所示,以云南省山鸡椒面积适生区面积最大,达到  $36.82\times10^4\text{ km}^2$ ;浙江省、广西省、湖南省、江西省、贵州省、四川省、广东省、福建省、重庆市等地区山鸡椒潜在适生区分布较为集中,约占山鸡椒全国潜在适生区面积的 52%。



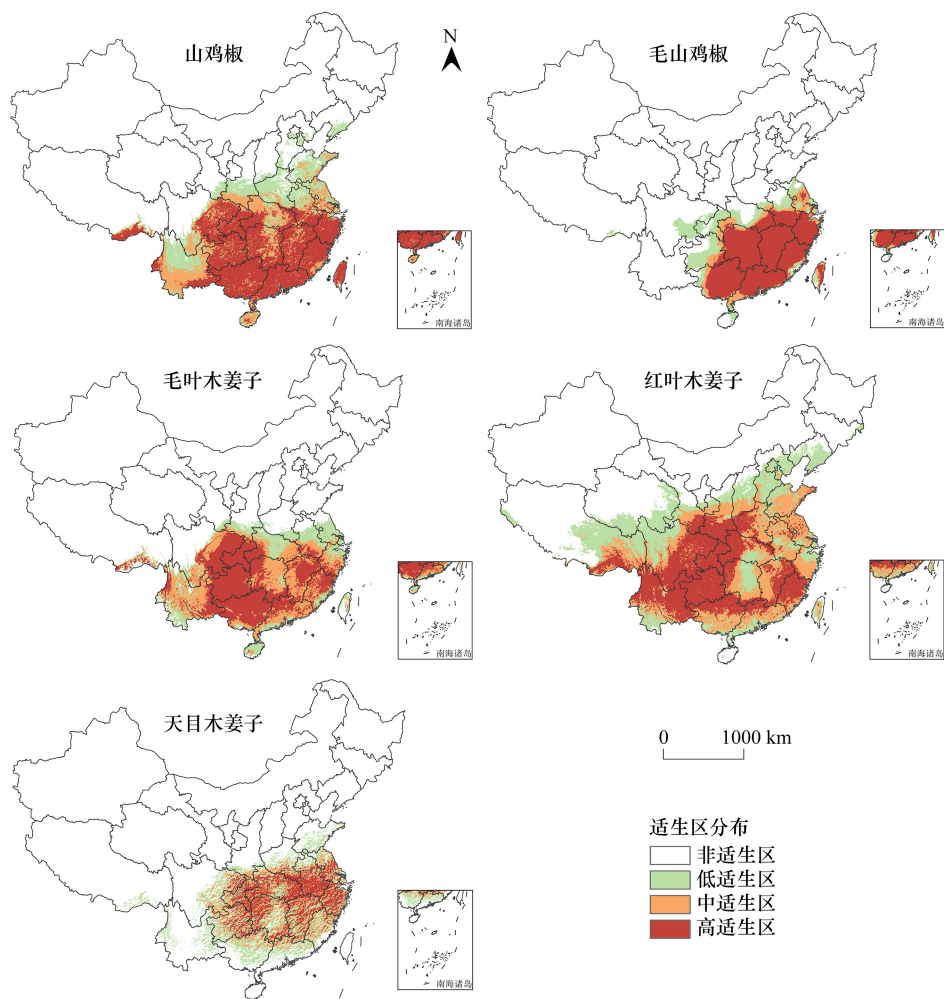


图 5 当前气候条件下木姜子属五种植物在中国的潜在适生区分布

Fig.5 Potential distribution of *Litsea* in the China under the current climate condition

表 5 各省级行政区不同等级红叶木姜子适生区分布面积估计/10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>

| Table 6 Potential suitable area of <i>Litsea rubescens</i> of provincial-level adminstrative regions in China |                                   |                                        |                                    |                                     |                         |                                   |                                        |                                    |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 省行政区名称<br>Province name                                                                                       | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area | 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area |
| 四川省                                                                                                           | 13.434                            | 9.233                                  | 25.872                             | 48.539                              | 河北省                     | 11.762                            | 1.623                                  | 0.008                              | 13.393                              |
| 西藏自治区                                                                                                         | 27.752                            | 11.359                                 | 7.155                              | 46.266                              | 福建省                     | 0.127                             | 2.238                                  | 9.429                              | 11.794                              |
| 云南省                                                                                                           | 5.981                             | 6.684                                  | 25.632                             | 38.297                              | 山西省                     | 6.749                             | 4.195                                  | 0.389                              | 11.333                              |
| 广西壮族自治区                                                                                                       | 2.690                             | 9.859                                  | 10.908                             | 23.457                              | 江苏省                     | 1.558                             | 7.301                                  | 1.149                              | 10.008                              |
| 湖南省                                                                                                           | 6.699                             | 8.619                                  | 5.808                              | 21.126                              | 浙江省                     | 3.163                             | 5.814                                  | 0.943                              | 9.920                               |
| 青海省                                                                                                           | 18.315                            | 0.106                                  | 0.000                              | 18.421                              | 重庆市                     | 0.000                             | 0.120                                  | 8.033                              | 8.153                               |
| 湖北省                                                                                                           | 3.182                             | 4.711                                  | 10.508                             | 18.401                              | 辽宁省                     | 8.032                             | 0.099                                  | 0.000                              | 8.131                               |
| 贵州省                                                                                                           | 0.000                             | 0.276                                  | 17.299                             | 17.575                              | 台湾省                     | 1.539                             | 0.816                                  | 0.056                              | 2.411                               |
| 广东省                                                                                                           | 5.065                             | 7.737                                  | 3.918                              | 16.720                              | 北京市                     | 1.521                             | 0.118                                  | 0.000                              | 1.639                               |
| 江西省                                                                                                           | 0.533                             | 7.789                                  | 8.351                              | 16.673                              | 天津市                     | 0.815                             | 0.259                                  | 0.000                              | 1.074                               |
| 河南省                                                                                                           | 1.676                             | 8.587                                  | 6.318                              | 16.581                              | 宁夏回族自治区                 | 0.885                             | 0.119                                  | 0.000                              | 1.004                               |
| 陕西省                                                                                                           | 2.859                             | 4.088                                  | 9.464                              | 16.411                              | 吉林省                     | 0.963                             | 0.000                                  | 0.000                              | 0.963                               |
| 山东省                                                                                                           | 4.853                             | 9.745                                  | 0.415                              | 15.013                              | 上海市                     | 0.388                             | 0.143                                  | 0.000                              | 0.531                               |
| 甘肃省                                                                                                           | 5.838                             | 5.055                                  | 3.655                              | 14.548                              | 香港特别行政区                 | 0.073                             | 0.013                                  | 0.000                              | 0.086                               |
| 安徽省                                                                                                           | 2.988                             | 9.887                                  | 1.079                              | 13.954                              |                         |                                   |                                        |                                    |                                     |

表 6 各省级行政区不同等级山鸡椒适生区分布面积估计/10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>

Table 6 Potential suitable area of *Litsea cubeba* of provincial-level administrative regions in China

| 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area | 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 云南省                     | 13.191                            | 16.982                                 | 6.650                              | 36.823                              | 江苏省                     | 4.339                             | 4.748                                  | 0.839                              | 9.926                               |
| 四川省                     | 4.700                             | 6.611                                  | 13.425                             | 24.736                              | 浙江省                     | 0.255                             | 0.752                                  | 8.910                              | 9.917                               |
| 广西壮族自治区                 | 0.085                             | 0.917                                  | 22.442                             | 23.444                              | 重庆市                     | 0.071                             | 0.890                                  | 7.191                              | 8.152                               |
| 湖南省                     | 1.052                             | 4.679                                  | 15.446                             | 21.177                              | 西藏自治区                   | 1.482                             | 1.072                                  | 4.075                              | 6.629                               |
| 湖北省                     | 2.453                             | 8.349                                  | 7.774                              | 18.576                              | 甘肃省                     | 2.273                             | 3.281                                  | 0.000                              | 5.554                               |
| 贵州省                     | 0.303                             | 2.563                                  | 14.610                             | 17.476                              | 台湾省                     | 0.118                             | 0.304                                  | 2.825                              | 3.247                               |
| 广东省                     | 0.072                             | 0.928                                  | 16.125                             | 17.125                              | 海南省                     | 0.657                             | 1.930                                  | 0.347                              | 2.934                               |
| 江西省                     | 0.248                             | 2.201                                  | 14.329                             | 16.778                              | 辽宁省                     | 2.327                             | 0.007                                  | 0.000                              | 2.334                               |
| 安徽省                     | 5.504                             | 3.091                                  | 5.160                              | 13.755                              | 河北省                     | 2.026                             | 0.024                                  | 0.000                              | 2.050                               |
| 河南省                     | 11.238                            | 1.693                                  | 0.409                              | 13.340                              | 山西省                     | 1.486                             | 0.000                                  | 0.000                              | 1.486                               |
| 福建省                     | 0.077                             | 1.540                                  | 10.203                             | 11.820                              | 天津市                     | 0.642                             | 0.016                                  | 0.000                              | 0.658                               |
| 山东省                     | 8.163                             | 2.793                                  | 0.004                              | 10.960                              | 上海市                     | 0.168                             | 0.325                                  | 0.027                              | 0.520                               |
| 陕西省                     | 6.302                             | 4.257                                  | 0.035                              | 10.594                              | 北京市                     | 0.453                             | 0.000                                  | 0.000                              | 0.453                               |

毛叶木姜子高适生区面积约为  $10.39 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 10.82%, 主要分布于重庆、贵州、广西、湖南南部和西部、云南西部、广东北部; 中适生区面积  $8.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 8.55%, 主要分布在湖南湖北的东部, 江西西部、云南中部, 广东西部和南部, 四川、安徽、浙江均有零星分布; 低适生区面积  $5.23 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 5.45%, 主要分布于江苏省、海南省、台湾省、湖北和安徽中部、云南南部、陕西南部等部分地区; 其余区域为非适生区(图 5)。我国各省级行政区中毛叶木姜子适生区分布面积预测如表 7 所示, 以云南省毛叶木姜子面积适生区面积最大, 达到  $35.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 重庆市、贵州省、广西省等地区毛叶木姜子潜在适生区分布较为集中, 约占毛叶木姜子全国潜在适生区总面积的 43.59%。

表 7 各省级行政区不同等级毛叶木姜子适生区分布面积估计/10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>

Table 7 Potential suitable area of *Litsea mollis* of provincial-level administrative regions in China

| 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area | 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly<br>suitable<br>area | 中适生区<br>Moderately<br>suitable<br>area | 高适生区<br>Highly<br>suitable<br>area | 潜在适生区<br>Potential<br>suitable area |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 云南省                     | 8.446                             | 16.474                                 | 10.113                             | 35.033                              | 重庆市                     | 0.000                             | 0.184                                  | 8.049                              | 8.233                               |
| 四川省                     | 2.980                             | 8.179                                  | 13.885                             | 25.044                              | 江苏省                     | 6.266                             | 0.67                                   | 0.000                              | 6.936                               |
| 广西壮族自治区                 | 0.416                             | 2.877                                  | 20.039                             | 23.332                              | 陕西省                     | 3.672                             | 2.061                                  | 0.086                              | 5.819                               |
| 湖南省                     | 0.690                             | 10.750                                 | 9.739                              | 21.179                              | 河南省                     | 2.820                             | 2.718                                  | 0.003                              | 5.541                               |
| 湖北省                     | 7.371                             | 6.876                                  | 4.221                              | 18.468                              | 西藏自治区                   | 1.958                             | 1.524                                  | 1.921                              | 5.403                               |
| 广东省                     | 1.867                             | 9.281                                  | 6.61                               | 17.758                              | 海南省                     | 2.504                             | 0.308                                  | 0.072                              | 2.884                               |
| 贵州省                     | 0.000                             | 0.744                                  | 16.631                             | 17.375                              | 台湾省                     | 1.081                             | 0.387                                  | 0.113                              | 1.581                               |
| 江西省                     | 0.030                             | 6.740                                  | 9.803                              | 16.573                              | 甘肃省                     | 1.175                             | 0.225                                  | 0.000                              | 1.400                               |
| 福建省                     | 1.717                             | 4.194                                  | 6.117                              | 12.028                              | 上海市                     | 0.573                             | 0.029                                  | 0.000                              | 0.602                               |
| 安徽省                     | 5.346                             | 3.458                                  | 2.054                              | 10.858                              | 香港特别行政区                 | 0.082                             | 0.006                                  | 0.000                              | 0.088                               |
| 浙江省                     | 3.330                             | 4.578                                  | 2.475                              | 10.383                              |                         |                                   |                                        |                                    |                                     |

毛山鸡椒高适生区面积约为  $10.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 10.73%, 主要分布于我国江西省、浙江省、福建省、广东省、广西省、湖南省等地, 中适生区面积  $2.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 2.30%, 主要分布于江苏省中南部、贵州省东部、湖北省西部、重庆省东南角等地区, 低适生区面积  $3.88 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 4.04%,

主要分布于四川省、安徽省、重庆省等部分地区;其余区域为非适生区(图 5)。我国各省级行政区中山鸡椒适生区分布面积预测如表 8 所示,以广西壮族自治区毛山鸡椒面积适生区面积最大,达到  $22.078\times 10^4\text{ km}^2$ ;江西省、湖南省、浙江省等地区毛山鸡椒潜在适生区分布较为集中,约占毛山鸡椒全国潜在适生区总面积的 60.83%。

表 8 各省级行政区不同等级毛山鸡椒适生区分布面积估计/ $10^4\text{ km}^2$

Table 8 Potential suitable area of *Litsea cubeba* var *formosanas* of provincial-level administrative regions in China

| 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly suitable area | 中适生区<br>Moderately suitable area | 高适生区<br>Highly suitable area | 潜在适生区<br>Potential suitable area | 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly suitable area | 中适生区<br>Moderately suitable area | 高适生区<br>Highly suitable area | 潜在适生区<br>Potential suitable area |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 广西壮族自治区                 | 1.871                       | 2.469                            | 17.738                       | 22.078                           | 重庆市                     | 5.059                       | 1.159                            | 0.072                        | 6.290                            |
| 湖南省                     | 0.200                       | 0.930                            | 20.040                       | 21.170                           | 台湾省                     | 0.984                       | 0.749                            | 1.553                        | 3.286                            |
| 广东省                     | 0.319                       | 2.673                            | 14.677                       | 17.669                           | 河南省                     | 1.126                       | 0.650                            | 0.040                        | 1.816                            |
| 江西省                     | 0.000                       | 0.000                            | 16.580                       | 16.580                           | 海南省                     | 0.887                       | 0.000                            | 0.000                        | 0.087                            |
| 贵州省                     | 8.314                       | 2.513                            | 1.532                        | 12.359                           | 西藏自治区                   | 0.651                       | 0.048                            | 0.006                        | 0.705                            |
| 福建省                     | 1.149                       | 0.615                            | 10.248                       | 12.012                           | 上海市                     | 0.384                       | 0.235                            | 0.011                        | 0.630                            |
| 湖北省                     | 4.179                       | 3.337                            | 4.324                        | 11.840                           | 云南省                     | 0.256                       | 0.000                            | 0.000                        | 0.256                            |
| 安徽省                     | 2.795                       | 1.390                            | 5.913                        | 10.098                           | 辽宁省                     | 0.128                       | 0.000                            | 0.000                        | 0.128                            |
| 浙江省                     | 0.239                       | 1.171                            | 8.210                        | 9.620                            | 香港特别行政区                 | 0.000                       | 0.097                            | 0.000                        | 0.097                            |
| 江苏省                     | 3.712                       | 4.007                            | 0.818                        | 8.537                            | 山东省                     | 0.075                       | 0.000                            | 0.000                        | 0.075                            |
| 四川省                     | 6.383                       | 0.024                            | 0.000                        | 6.407                            | 吉林省                     | 0.050                       | 0.000                            | 0.000                        | 0.050                            |

天目木姜子中、高适生区面积约为  $10.15\times 10^5\text{ km}^2$ , 占国土面积的 10.58%, 主要分布在我国浙江、安徽、湖南、湖北、贵州、重庆等地, 低适生区面积  $5.68\times 10^5\text{ km}^2$ , 约占国土面积的 5.92%, 主要分布于广东、广西、云南、山东等部分地区; 其余区域为非适生区(图 5)。我国各省级行政区中天目木姜子适生区分布面积预测如表 9 所示, 以湖南省天目木姜子面积适生区面积最大, 达到  $19.20\times 10^4\text{ km}^2$ 。

表 9 各省级行政区不同等级天目木姜子适生区分布面积估计/ $10^4\text{ km}^2$

Table 9 Potential suitable area of *Litsea auriculata* of provincial-level administrative regions in China

| 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly suitable area | 中适生区<br>Moderately suitable area | 高适生区<br>Highly suitable area | 潜在适生区<br>Potential suitable area | 省行政区名称<br>Province name | 低适生区<br>Lowly suitable area | 中适生区<br>Moderately suitable area | 高适生区<br>Highly suitable area | 潜在适生区<br>Potential suitable area |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 湖南省                     | 5.635                       | 5.680                            | 7.885                        | 19.200                           | 江苏省                     | 3.202                       | 2.434                            | 2.901                        | 8.537                            |
| 湖北省                     | 3.474                       | 4.488                            | 9.889                        | 17.851                           | 重庆市                     | 1.743                       | 2.049                            | 4.091                        | 7.883                            |
| 江西省                     | 4.725                       | 4.335                            | 7.441                        | 16.501                           | 广东省                     | 5.026                       | 1.764                            | 0.561                        | 7.351                            |
| 贵州省                     | 5.825                       | 4.372                            | 4.856                        | 15.053                           | 河南省                     | 3.108                       | 2.044                            | 1.935                        | 7.087                            |
| 安徽省                     | 2.499                       | 2.296                            | 7.975                        | 12.770                           | 云南省                     | 5.104                       | 0.617                            | 0.005                        | 5.726                            |
| 四川省                     | 6.434                       | 4.414                            | 1.761                        | 12.609                           | 山东省                     | 3.167                       | 0.078                            | 0.000                        | 3.245                            |
| 广西壮族自治区                 | 8.861                       | 2.997                            | 0.746                        | 12.604                           | 陕西省                     | 1.615                       | 0.976                            | 0.059                        | 2.650                            |
| 浙江省                     | 1.711                       | 2.276                            | 5.553                        | 9.540                            | 西藏自治区                   | 1.347                       | 0.040                            | 0.000                        | 1.387                            |
| 福建省                     | 3.869                       | 3.644                            | 1.137                        | 8.650                            | 上海市                     | 0.235                       | 0.152                            | 0.008                        | 0.395                            |

2.4 气候变化情景下木姜子属植物在中国潜在适生变化

与当前气候条件预测结果相比, 未来气候情景下山鸡椒(图 6)、毛叶木姜子(图 8)潜在适生区面积均在增大, 表明其对气候变化适应性较好。SSP126 情景下 2070s, 山鸡椒总适生区面积增加的最多, 增加量达  $57.5\times 10^4\text{ km}^2$ , 高适生区出现明显扩增, 扩增区域主要集中在云南南部、重庆北部、贵州中部等; 随着全球变暖, 山鸡椒适生区整体呈现向北扩张趋势; 同一气候同一时期, 毛山鸡椒适生区面积有所缩减, 主要为重庆、四

川低适生面有所缩减;在 SSP585 情景下,毛山鸡椒随着时间的推移适生区面积存在持续缩减现象(图 7)。红  
叶木姜子仅在 SSP370 情景下 2050s 适生区面积存在缩减,主要为低、中适生区青海、辽宁、西藏等地面积极  
缩减;其余随着气候和时期的推移面积均存在扩张现象(图 9)。在未来气候变化下,天目木姜子扩增区域主要  
分布在安徽南部、湖北东部和江西北部;SSP370 情景下 2070s 天目木姜子存在缩减,缩减面积为  $13.3\times10^4$   
 $\text{km}^2$ ,主要在湖南西南部、江西南部、福建南部、湖北中部有所缩减(图 10)。

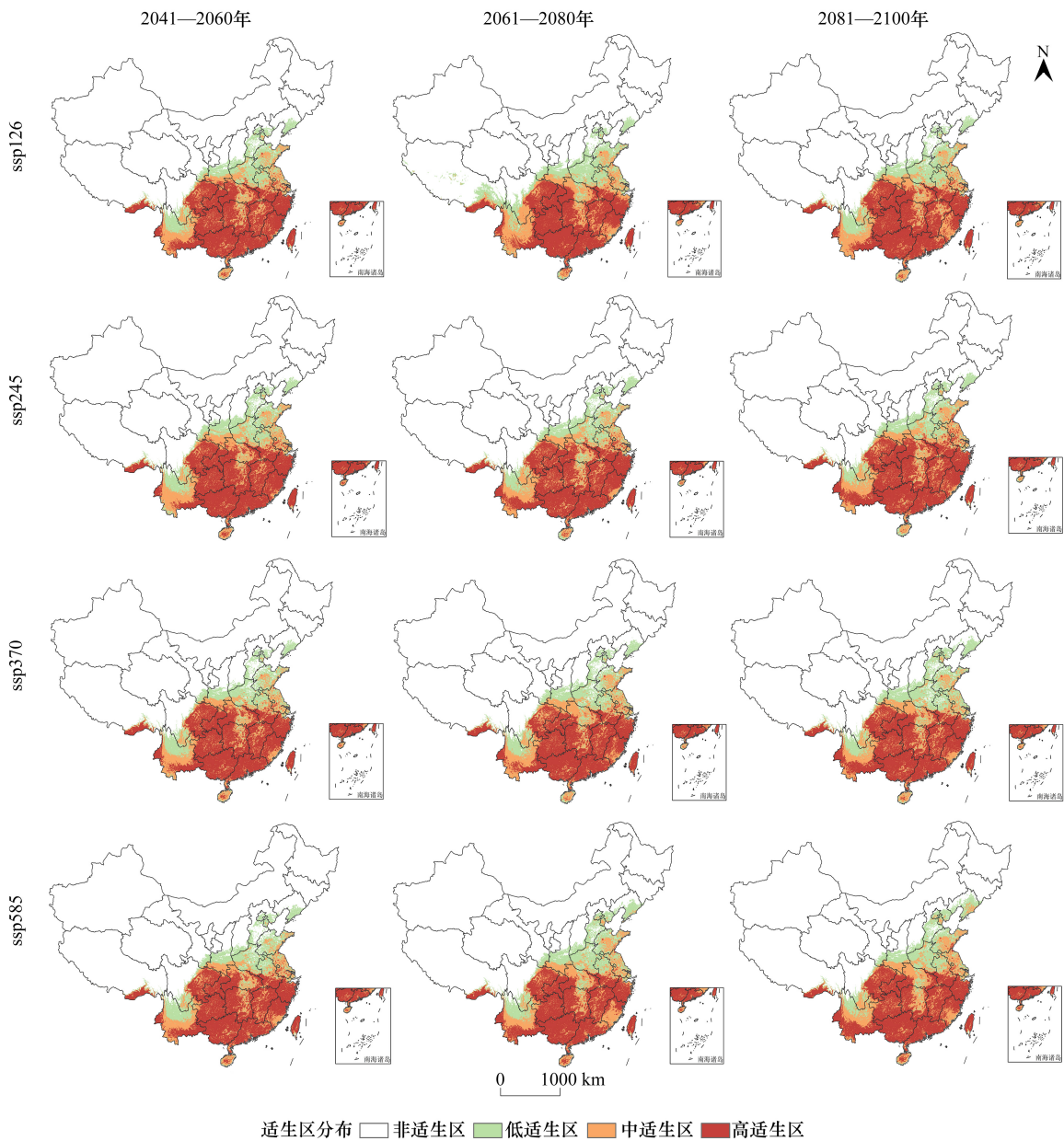


图 6 未来气候情景下山鸡椒在中国的潜在适生区分布范围  
Fig.6 Potential distribution of *Litsea cubeba* in China under future climate scenarios

2.5 适宜生境质心变化

当前山鸡椒适宜生境质心位于湖南省(110.67°N,28.3°E),在未来气候变化下总体呈现向北迁移,仅在  
SSP126 情景下呈现出向西发生迁移,但适生区质心变化幅度不大,均在湖南省内变化。毛叶木姜子当前适宜  
生境质心位于贵州省(106.63°N,26.97°E),在未来气候变化下呈现东西往复交替迁移,在 2070s 总体呈现向



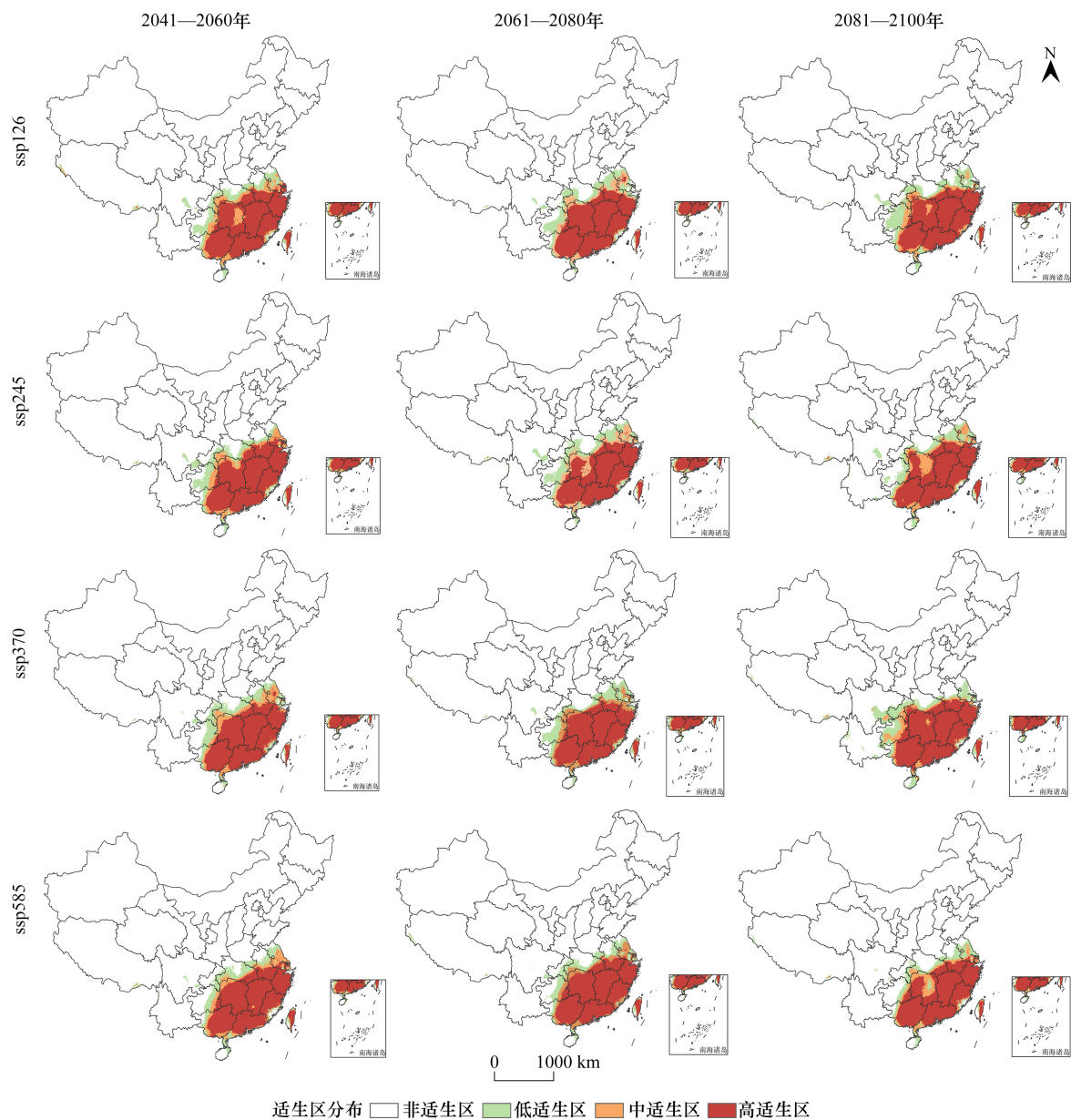


图 7 未来气候情景下毛山鸡椒在中国的潜在适生区分布范围

Fig.7 Potential distribution of *Litsea cubeba* var *formosana* in China under future climate scenarios

西北方向发生迁移,在 2090s 的 SSP585 情景下向西南方向发生迁移。毛山鸡椒当前适宜生境质心位于江西省(114.10°N, 28.72°E),从当前到未来质心变化方向大体是先向西南方向迁移,再向东南方向迁移,整体呈现向湖南省发生迁移。红叶木姜子当前适宜生境的质心位置位于湖北省(109.57°N,29.88°E),从当前到未来质心的变化方向大体是先向西南方向迁移,再向东北方向迁移;质心先从湖北省迁移到湖南省,后又迁回湖北省。天目木姜子当前适宜生境的质心位置位于湖南省(112.10°N,28.89°E),从当前到未来质心的变化方向大体是先向东北方向迁移,再向东南方向迁移;未来气候情景下,适生区质心变化幅度不大,均在湖南省内(图 11)。

### 3 讨论

#### 3.1 MaxEnt 模型优化与预测结果可靠性分析

生态位模型预测结果可靠性主要依赖于三个核心要素:生态位模型的选择、样本量的大小及覆盖度、环境

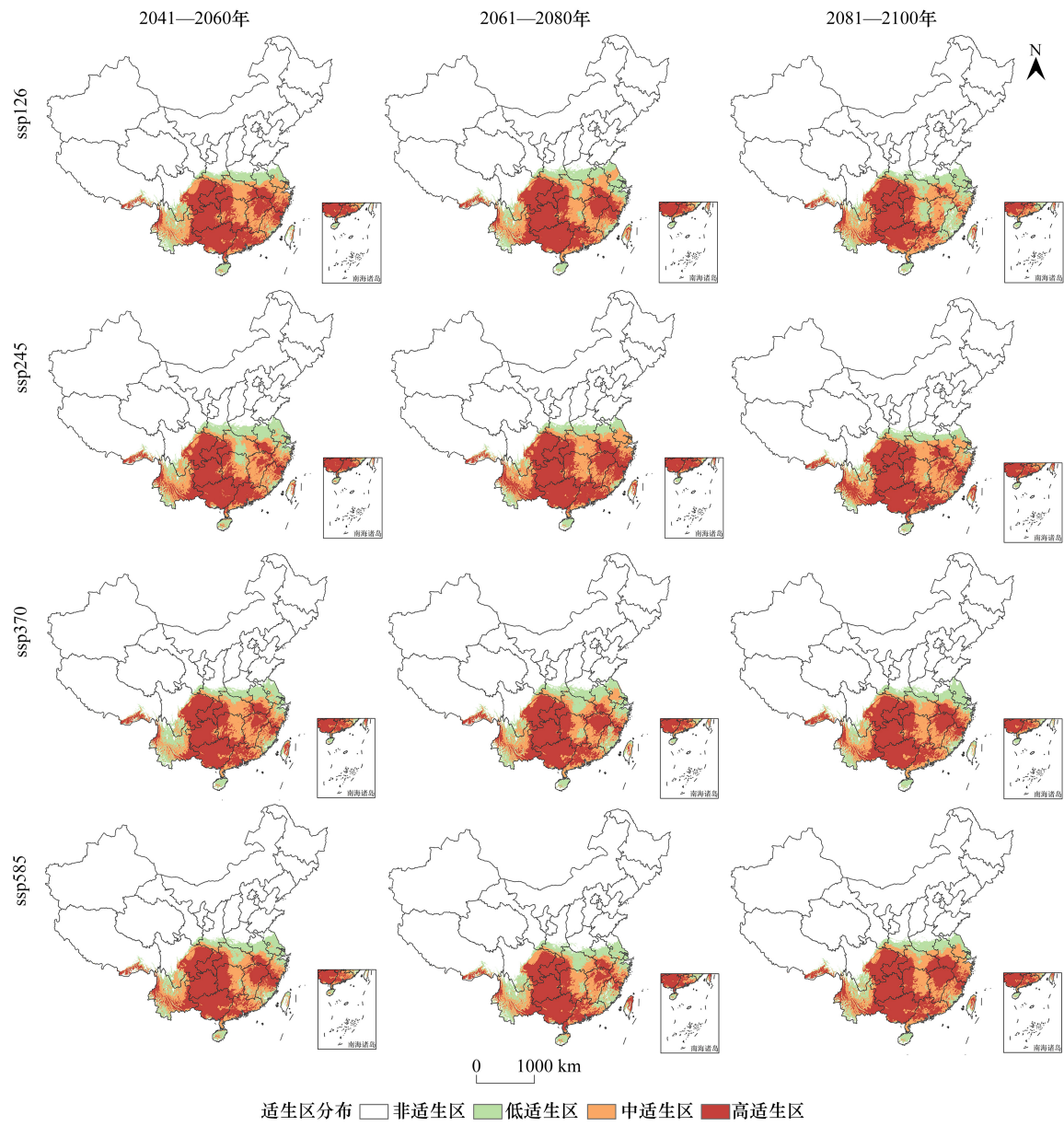


图8 未来气候情景下毛叶木姜子在中国的潜在适生区分布范围  
Fig.8 Potential distribution of *Litsea mollis* in China under future climate scenarios

因子的种类和数量<sup>[10]</sup>。首先,不同生态位模型预测精度差异较大,其中 MaxEnt 模型由于对样本需求小、预测精度高、稳定性好等特点被广泛用于物种潜在适生区研究,如入侵物种<sup>[29]</sup>、濒危物种<sup>[30]</sup>等应用该模型进行适生区研究,并取得较好的预测结果。MaxEnt 模型已被证明优于其他方法,即使在有限的物种发生记录情况下,也具有一贯的高准确性<sup>[31]</sup>。此外,使用 ENMeval 数据包来优化 MaxEnt 模型调控倍频和特征组合参数,与默认参数相比,优化后可降低拟合程度、模型预测效果较好、响应曲线较为平滑,能够较为实际地反映物种对环境因子的响应<sup>[32]</sup>。其次,样本数量的大小导致预测结果不同,足够的样本量能够减少抽样偏差对模型性能的影响。选取适当数量的样本点并接近物种真实分布情况,预测精度越高<sup>[33]</sup>。第三,环境因子数量和种类越多,预测精度越高。例如,MaxEnt 模型模拟物种的生态位时,选择的环境因子对模型模拟效果有直接影响,采用的与生态位相关的因子越全面,模拟的结果越好<sup>[11]</sup>。本研究对木姜子属五种植物的分布点和环境变量进行了科学筛选,收集的木姜子属五种植物分布数据尽可能覆盖了物种的分布范围,使用 ENMeval 数据包优化

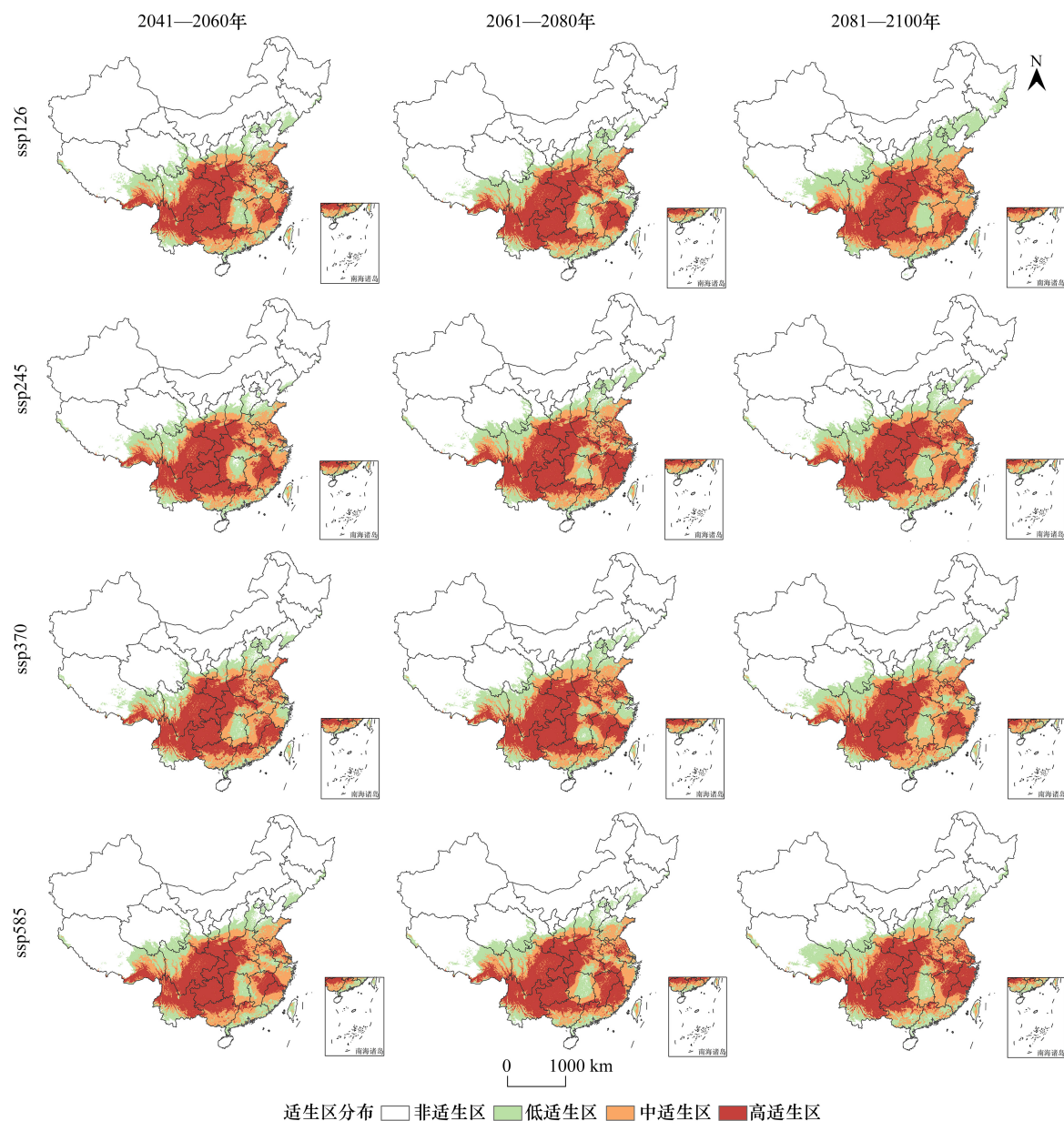


图9 未来气候情景下红头木姜子在中国的潜在适生区分布范围

Fig.9 Potential distribution of *Litsea rubescens* in China under future climate scenarios

MaxEnt 模型调控倍频和特征组合参数;MaxEnt 模型预测结果显示,AUC 值均在 0.9 以上,表明 MaxEnt 模型预测效果较为精确,可用于预测木姜子属五种植物潜在适生区分布变化状况。

### 3.2 影响木姜子属五种植物分布的主要环境因子

根据模型输出结果所得的贡献率、训练增益值以及单因子响应曲线,揭示了影响木姜子属五种植物不同的主导环境因子,最暖季降水量是木姜子属五种植物的重要环境因子,对五种植物同时有着显著的影响。由此可见,木姜子属不同种由于生态习性差异对环境因子有不同的响应,其中降水是影响木姜子属五种植物的共同且主要的环境因子。Qin 等研究发现极端季节的降水如最暖季降水量,是决定东亚亚热带地区木姜子复合属群分布的关键气候因子<sup>[34]</sup>。与本研究中最暖季降水量是制约木姜子属五种植物分布格局的关键因子结论相吻合,加强了此结论的可靠性。最暖季降水量直接影响木姜子属五种植物在生长旺季的水分供应,充足的降水量有助于维持植物的高光合速率和生长速度,促进植株的繁茂和果实成熟<sup>[35]</sup>。最暖季降水量对毛山



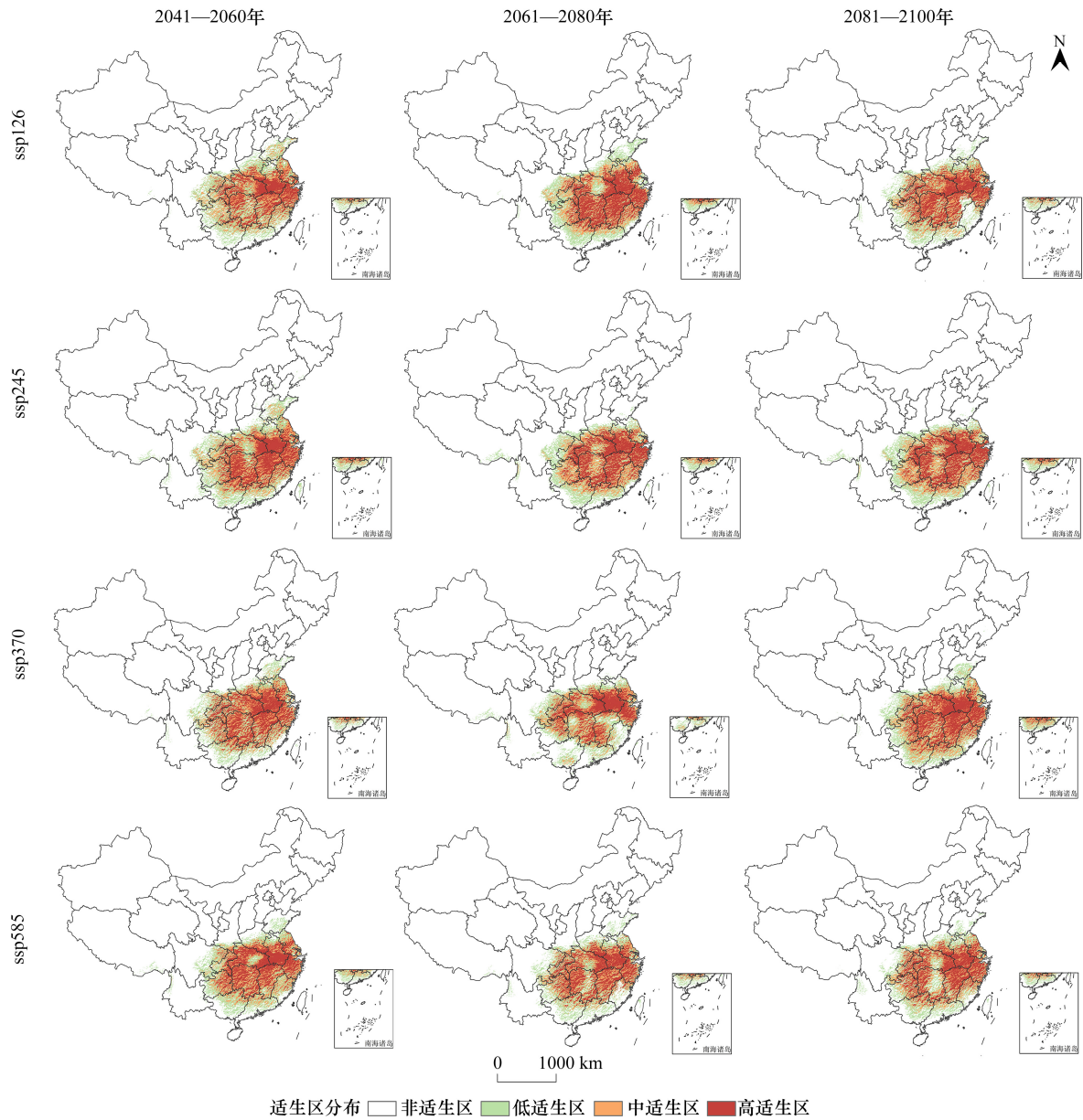


图 10 未来气候情景下天目木姜子在中国的潜在适生区分布范围  
Fig.10 Potential distribution of *Litsea auriculata* in China under future climate scenarios

鸡椒分布影响贡献率达 43% 以上,说明毛山鸡椒需要适量的水分来维持其生长。在湿润温暖的气候环境下,毛山鸡椒能够更好地生长和结果<sup>[23]</sup>。温度和降水对维持植物正常生长发育和生理活动有着重要保障<sup>[36]</sup>。郑维艳等<sup>[37]</sup>研究发现山鸡椒的分布主要受年平均降水量、最干月份降水量的影响。Shi 等<sup>[28]</sup>研究发现山鸡椒的分布主要受最干季降水量、年降水量、年温差、最冷月最低温度的影响;唐梦等<sup>[38]</sup>研究发现山鸡椒分布主要受最暖季降水量、温度季节性、最湿季降水量的影响;Guo 等<sup>[39]</sup>研究发现山鸡椒分布主要受年温差的影响;这均与山鸡椒喜温暖湿润气候相符,山鸡椒要求的气候条件为四季温暖湿润,雨量充沛,冬季不过于严寒,年降水量在 1300—1800mm,年平均温度在 10—18℃。温度是影响植物开花和结果的重要因素之一。根据环境因子分析可知,红叶木姜子地理分布受温度影响贡献率达 43.4%。较大的温度季节性对红叶木姜子的生长造成压力,在适宜的温度条件下,红叶木姜子能够正常开花授粉,提高结实率<sup>[40]</sup>。天目木姜子除受降水影响外,受温度影响较大。天目木姜子适生于温暖湿润的天目山,此分布区气候特点是云雾多、湿度大<sup>[41]</sup>,推测此气





油中的柠檬醛含量时,可以对最冷月最低温这一气候因子进行关注。综上所述,环境对植物的生长和物种分布有着显著影响。因此,有必要利用生态模型来预测适宜生境分布、适宜栽培区以及对植物生境分布和增强有效成分形成起决定性作用的环境因子。

### 3.3 木姜子属五种植物不同时期潜在适生区变化

气候对植物的生长和繁殖产生重大影响,已成为决定植物物种地理分布的主要变量<sup>[48]</sup>。本文研究木姜子属五种植物的分布区预测发现,每个物种由于适宜性不同在空间分布区间上存在明显差异。山鸡椒的潜在适宜生境主要在长江以南分布,这与郑维艳等<sup>[37]</sup>利用物种分布模型预测山鸡椒主要分布在热带亚热带地区的结果存在吻合,但具有一定差异。郑维艳<sup>[37]</sup>预测的结果中山鸡椒中适生区面积最大,高适生区和低适生区面积分布占比较小,但本研究结果中山鸡椒高适生区面积占比较大,中、低适生区占比面积较小。Shi 等<sup>[28]</sup>研究发现山鸡椒在中国潜在适生区主要分布在长江流域及其南部地区的结果有一定相似之处,但也存在一定差异,本研究结果中发现山鸡椒当前潜在适宜生境面积  $290.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的 30.30%, 分布面积较之前研究的当前潜在适宜生境面积大,造成以上差异可能是因为所选用的环境变量和分布数据不同,本文选取的分布数据来源于全球分布区域,样本点较为全面,预测可以较好体现木姜子属五种植物的适宜性。毛叶木姜子与山鸡椒在分布区域上存在一定的相似之处,但山鸡椒高适生区的面积较毛叶木姜子高适生区面积大,这与郑维艳等<sup>[37]</sup>研究发现的毛叶木姜子、山鸡椒适生区结论相似。郑维艳<sup>[37]</sup>研究发现毛叶木姜子高适生区主要集中分布在贵州省和重庆市,本研究发现毛叶木姜子高适生区除分布在贵州省、重庆市之外,在广西省也有一定的集中分布。毛叶木姜子和山鸡椒在未来不同时期和不同气候情景下潜在适宜区有所区别,但总体趋势一致,表现为总适生区扩大,说明预测的山鸡椒和毛叶木姜子潜在适宜生长区域可能会很好地适应未来气温和降水的增加,它们对未来气候的响应及地理分布的相似性可能与亲缘关系进化有关,后续研究可将潜在生境分布与植物形态、遗传分子等方面工作进行比较研究<sup>[11]</sup>。在 SSP585 情景下,毛山鸡椒各时期的总适生区面积缩减,推测毛山鸡椒的生存环境无法有效地适应此情景下的气候变化,或是人类活动的过度干扰导致其生存环境的稳定性遭受威胁。鉴于现存的毛山鸡椒资源数量有限,建议采取有效措施对毛山鸡椒植物资源进行保护,以应对不利的气候变化挑战;并优先考虑不同情景多时期下均为毛山鸡椒高适生区的区域进行合理的引种栽培,以确保毛山鸡椒种群的持续繁衍与生态平衡。

根据未来不同的气候条件,随着时间的推移,山鸡椒、红叶木姜子质心总体呈现向高纬度地区迁移。在气候变暖的影响下有研究发现许多物种潜在适生区均有向高纬度扩散趋势,这是植物通过改变分布来适应气候变化<sup>[49]</sup>。天目木姜子面对未来气候响应,生境破碎化有加强的趋势,尤其是 2070sSSP370 情景下,天目木姜子适生区丧失面积最大,生境破碎化严重,说明气候变暖对天目木姜子分布构成较大威胁。孙林<sup>[50]</sup>,利用 SSR 分子标记方法对天目木姜子进行遗传多样性分析,发现天目木姜子遗传变异较低,种群间遗传分化较大、基因流较低;并推断生态因素是主要导致天目木姜子濒危的原因,具体包括生境破坏及破碎化、过度砍伐、虫害等。因此,建议应尽快对天目木姜子天然种群采取迁地保护和就地保护相结合,同时应建立天目木姜子保护小区,定期巡查<sup>[10]</sup>。本研究选取 22 个环境因子预测木姜子属五种植物当前及未来气候变化下适宜生境较为全面,但土壤理化性质、紫外线照射、物种间相互作用等其他因素可能对木姜子属植物分布格局有影响,今后可进一步增加土壤因子、紫外线因子等环境变量进行研究,从而为木姜子属植物的保育工作提供更科学的理论依据。

## 4 结论

基于物种分布数据和优化后的 MaxEnt 最大熵模型,模拟不同气候背景下木姜子属五种植物潜在适生区。研究结果显示 MaxEnt 模型的模拟结果 AUC 值均大于 0.9,能够准确预测五种植物的生态适宜性。降水因子是影响木姜子属五种植物地理分布最大的环境因子,其次是温度,地形因子(坡度、坡向、海拔)分别对五种植物有不同的制约性。当前气候条件下,木姜子属五种植物在全球潜在适生区分布中,中国和日本地理分布适

宜度较高,由于五种植物适宜性不同在空间分布区间上存在明显差异。未来气候变化情景下,随着全球变暖的加剧对木姜子属五种植物适生区及空间迁移会产生一定影响,山鸡椒、毛叶木姜子总适生区面积呈现完全扩张趋势,毛山鸡椒、天目木姜子和红叶木姜子总适生区面积在不同气候情景下呈现不同程度的收缩和扩张趋势。SSP370 气候情景下,天目木姜子总适生区缩减程度达到最大值。SSP585 气候情景下,毛山鸡椒总适生区面积存在持续缩减现象。此外,各物种质心将呈现不同程度的迁移,进行引种栽培时应优先考虑多时期下均为高适生区的区域,以减少适宜性下降造成的损失。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Howarth C, Viner D. Integrating adaptation practice in assessments of climate change science: The case of IPCC Working Group II reports. *Environmental Science & Policy*, 2022, 135: 1-5.
- [ 2 ] Jorda G, Marbà N, Bennett S, Santana-Garcon J, Agusti S, Duarte C M. Ocean warming compresses the three-dimensional habitat of marine life. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 4(1): 109-114.
- [ 3 ] Kellner J R, Kendrick J, Sax D F. High-velocity upward shifts in vegetation are ubiquitous in mountains of western North America. *PLOS Climate*, 2023, 2(2): e0000071.
- [ 4 ] Feng X, Peterson A T, Aguirre-López L J, Burger J R. Rethinking ecological niches and geographic distributions in face of pervasive human influence in the Anthropocene. *Biological Reviews*, 2024; brv.13077.
- [ 5 ] Stein B A, Staudt A, Cross M S, Dubois N S, Enquist C, Griffis R, Hansen L J, Hellmann J J, Lawler J J, Nelson E J. Preparing for and managing change: climate adaptation for biodiversity and ecosystems. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2013, 11.
- [ 6 ] Jiang R P, Zou M, Qin Y, Tan G D, Huang S P, Quan H G, Zhou J Y, Liao H. Modeling of the Potential Geographical Distribution of Three *Frutillaria* Species Under Climate Change. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 749838.
- [ 7 ] Guisan A, Tingley R, Baumgartner J B, Naujokaitis-Lewis I, Sutherland P R, Tulloch A I, Regan T J, Brotons L, McDonald-Madden E, Mantyka-Pringle C, Martin T G, Rhodes J R, Maggini R, Setterfield S A, Elith J, Schwartz M W, Wintle B A, Broennimann O, Austin M, Ferrier S, Kearney M R, Possingham H P, Buckley Y M. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 2013, 16(12): 1424-1435.
- [ 8 ] Elith J, Leathwick J R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40(1): 677-697.
- [ 9 ] 吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 文国卫, 蒋天雨, 赖文峰, 施晨阳, 黄秋良, 张国防. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响. *生态学报*, 2024, 44(3): 1164-1176.
- [ 10 ] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [ 11 ] 周炳江, 王玉洁, 马长乐, 樊智丰, 郑进烜. 基于 MaxEnt 模型与 ArcGIS 的云南榿树潜在生境分析. *生态学报*, 2022, 42(11): 4485-4493.
- [ 12 ] Qin A L, Liu B, Guo Q S, Bussmann R W, Ma F Q, Jian Z J, Xu G X, Pei S X. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation* 10 (2017): 139-146.
- [ 13 ] Hebbar K B, Abhin P S, Sanjo J V, Neethu P, Santhosh A, Shil S, Prasad P V V. Predicting the potential suitable climate for Coconut (*Cocos nucifera* L.) cultivation in India under climate change Scenarios using the MaxEnt model. *Plants (Basel)*. 2022 Mar 9; 11(6): 731.
- [ 14 ] Yang A, Tu W Q, Yin B F, Zhang S J, Zhang Q, Huanng Y J, Han Z L, Yang Z Y, Zhou X B, Zhuang W W, Zhang Y M. Predicting changes in the suitable habitats of six halophytic plant species in the arid areas of Northwest China. *Journal of Arid Land*. 2024; n. pag.
- [ 15 ] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [ 16 ] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, Howell C A, Snyder M. Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(supplement\_2): 19729-19736.
- [ 17 ] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 杜兰英. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析. *生态学报*, 2020, 40(16): 11.
- [ 18 ] 刘济铭, 贾黎明, 王连春, 孙操稳, 王昕, 郑玉琳, 翁学煌. 基于 MaxEnt 的中国无患子属适生区区划及生态特征. *林业科学*, 2021, 57(5): 1-12.
- [ 19 ] Ye P C, Zhang G F, Zhao X, Chen H, Si Q, Wu J Y. Potential geographical distribution and environmental explanations of rare and endangered plant species through combined modeling: A case study of Northwest Yunnan, China. *Ecology and Evolution*, 2021; 11(19).
- [ 20 ] 张彦静, 斯琴, 胡洁, 陈菁, 王晨彬, 谢锐, 马方舟. 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布预测. *生态学报*, 2023, 43(21): 8852-8864.
- [ 21 ] Chen Y C, Li Z, Zhao Y X, Gao M, Wang J Y, Liu K W, Wang X, Wu L W, Jiao Y L, Xu Z L, He W G, Zhang Q Y, Liang C K, Hsiao Y Y, Zhang D Y, Lan S R, Huang L Q, Xu W, Tsai W C, Liu Z J, Van de Peer Y, Wang Y D. The *Litsea* genome and the evolution of the laurel family. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1675.

- [22] Gao M, Chen Y C, Wang Y D. Evaluation of the Yields and Chemical Compositions of the Essential Oils of Different *Litsea cubeba* Varieties. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2016, 19(8): 1888-1902.
- [23] 王雪. 木姜子属落叶组植物系统进化和叶片化学指纹图谱研究. 中国林业科学研究院, 2019.
- [24] 王凤枝, 谢方, 张明东, 袁淑华. 天目木姜子全光照喷雾扦插试验研究. *河南林业科技*, 2011, 31(3): 7-8+17.
- [25] 李福珑, 李瑞, 马长乐, 杨建欣, 王李娟, 柴勇, 孙永玉. 气候变化情景下百日青在中国的潜在适生区预测. *西部林业科学*, 2024, 53(2): 38-44+63.
- [26] Zhu G P, Qiao H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [27] 颜尉珂, 雷宇, 王磊, 张新宇, 刘强. 人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响. *生态学报*, 2023, 43(24): 10387-10398.
- [28] Shi X D, Wang J E, Zhang L, Chen S X, Zhao A L, Ning X D, Fan G R, Wu N S, Zhang L, Wang Z D. Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110093.
- [29] 曾晓丽, 喻三鹏, 田茂娟, 张念念, 班启明, 邱建生. 入侵植物薇甘菊在贵州的潜在适生区及其变化趋势. *生物安全学报(中英文)*, 2024, 33(2): 169-176.
- [30] 徐慧, 佟珂珂, 姚霞珍, 邢震. 基于 MaxEnt 模型的濒危植物大花黄牡丹潜在适生区预测. *高原农业*, 2023, 7(3): 278-290.
- [31] Gogal-prokurat M. Predicting habitat suitability for rare plants at local spatial scales using a species distribution model. *Ecological Applications*, 2011, 21(1): 33-47.
- [32] 朱耿平, 乔慧捷. MaxEnt 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. *生物多样性*, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [33] Wan J Z, Wang C J, Yu F H. Effects of occurrence record number, environmental variable number, and spatial scales on MaxEnt distribution modelling for invasive plants. *Biologia*, 2019, 74:757-766.
- [34] Qin S Y, Zuo Z Y, Guo C, Du X Y, Liu Y S, Yu X Q, Xiang G X, Rong J, Liu B, Liu F Z, Ma F P, Li D Z. Phylogenomic insights into the origin and evolutionary history of evergreen broadleaved forests in East Asia under Cenozoic climate change. *Molecular ecology*, 32(11), 2850-2868.
- [35] 王晓悦, 许艺馨, 李春环, 余海龙, 黄菊莹. 长期降水量变化下荒漠草原植物生物量、多样性的变化及其影响因素. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 479-490.
- [36] 黄安玲, 姜金香, 任志琴, 胡优琼, 王志威. 基于 MaxEnt 模型的玉竹潜在适生区及关键生态因子分析. *中国实验方剂学杂志*: 1-9.
- [37] 郑维艳, 曹坤芳. 未来气候变化对四种木姜子地理分布的影响. *广西植物*, 2020, 40(11): 1584-1594.
- [38] 唐梦, 陈静, 杨灵懿, 贾翔, 刘济铭, 段劼. 气候变化下中国主要生物燃油树种分布与变迁. *生态学报*, 2023, 43(24): 10156-10170.
- [39] Guo Y L, Zhao Z F, Zhu F X, Li X. Climate change may cause distribution area loss for tree species in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 511: 120134.
- [40] 贾朝霞. 红桉木姜子的观赏价值及繁殖技术. *现代农业科技*, 2010, (13): 223-224.
- [41] 丁炳扬. 模式标本产地为西天目山的植物. *植物杂志*, 1990, (3): 36-37.
- [42] 袁雪丽, 汪阳东, 黄兴召, 陈益存, 吴立文, 余孟杨, 王民炎, 熊仕发, 高暝. 基于数量化理论对山苍子立地类型划分及评. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 91-96.
- [43] 简才源, 袁丛军, 刘娜, 戴晓勇, 郭贵明, 李永荣, 丁访军, 刘发明. 黔产毛叶木姜子苗木质量评价与分级. *广西林业科学*, 2022, 51(3): 326-330.
- [44] Long T, Gu R H, Linghu C, Long J Y, Kennelly E J, Long C L. UPLC-QTOF-MS-based metabolomics and chemometrics studies of geographically diverse *Acer truncatum* leaves: A traditional herbal tea in Northern China. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135873.
- [45] 田胜平. 山苍子形态学性状和主要经济性状变异研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [46] 袁雪丽, 汪阳东, 高暝, 陈益存, 吴立文, 余孟杨, 王民炎, 孙梦娇, 黄兴召. 山苍子林分和环境因子与其经济指标的关联特征. *经济林研究*, 2021, 39(1): 161-167.
- [47] Fan G R, Ning X D, Chen S X, Zhong L, Guo C C, Yang Y L, Liu J, Tang M, Liao G X, Wang X F, Wang Z D, Wang J W. Differences in fruit yields and essential oil contents and composition among natural provenances of *Litsea cubeba* in China and their relationships with main habitat factors. *Industrial Crops and Products*. 2023, 194: 116285.
- [48] Wei B, Wang R L, Hou K, Wang X Y, Wu W. Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16: e00477.
- [49] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*. 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [50] 孙林. 中国特有珍稀植物天目木姜子遗传多样性与亲缘地理学研究. 南京大学, 2014.