

# 全球变化背景下南方红豆杉地域分布变化

李艳红, 张立娟, 朱文博, 张静静, 徐帅博, 朱连奇

(河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

**摘要:** 气候是影响植物栖息地的重要因素之一, 预测气候变化对植物潜在分布范围变动的影响, 对促进植物资源的可持续利用具有重要意义。基于最大熵 Maxent 模型结合 11 个环境变量, 预测 2050s 三种气候情景下 (RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5) 南方红豆杉 (*Taxus chinensis* var. *mairei*) 在中国的潜在地理分布状况, 分析影响其分布的主要因素, 探讨其分布格局的改变对我国亚热带北界的指示意义。结果表明: (1) 南方红豆杉的适宜栖息地 (生境指数  $P > 0.2$ ) 主要分布在我国亚热带暖温带季风区, 绝大部分核心栖息地 (生境指数  $P > 0.6$ ) 分布在秦岭大巴山以南地区; (2) Jackknife 测试结果显示, 最冷季降水量 (bio19)、气温平均日较差 (bio2)、气温年变化范围 (bio7)、最暖季平均温度 (bio10) 和海拔 (Elev) 对南方红豆杉空间分布适宜性影响最大; (3) 随气候变化, 2050s 南方红豆杉有沿纬度向北和海拔向上迁移的趋势, 并且我国亚热带北界受气候变化的影响将逐渐向北移动。

**关键词:** 南方红豆杉; 气候变化; 分布格局; Maxent 模型; 地理指示意义

据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告 (AR5) 预测, 全球气候将持续变暖, 到 21 世纪末全球平均表面温度可能比 1986—2005 年间升高  $0.3 \sim 4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。研究普遍认为, 气候变暖将导致物种生境质量变化、增加物种绝灭风险, 尤其是对气候变化反应敏感的濒危物种更易受全球气候变化的影响<sup>[2,3]</sup>。植被作为连接土壤与大气的纽带, 是生态系统中较为活跃的组成部分, 是环境变化的敏感指标<sup>[4]</sup>, 对全球气候变化起重要指示作用<sup>[5]</sup>。气候变化会引起植被生态系统空间分布格局的变化, 确定不同地区植被对气候变化的响应, 可以有效降低或缓解气候变化对生态系统的破坏, 并提高自然资源可持续利用性。除气候变化因素外, 已有研究表明, 地形和土壤因素对物种分布的作用也不容忽视。例如, 不同区域之间的地形小气候、土壤类型和土壤养分含量的差异会影响植物群落的物种丰富度和物种分布<sup>[6-8]</sup>。此外, 物种为应对气候变化, 会改变其分布格局<sup>[9]</sup>。Mathys 等<sup>[10]</sup>研究发现树种幼苗和成熟树木分布差异可以有效反映其生存区域内气候变化状况。Sapta 等<sup>[11]</sup>基于 GIS 和历史气候数据分析显示与实际情况相比, 近年来植被分布格局的变化与生态区划相匹配。因此, 物种分布模式的改变也可以反映气候变化模式。

物种分布模型 (Species Distribution Models, SDMs) 已成为研究全球变化背景下物种与环境之间相关生态问题的一个极其重要的工具<sup>[2,6,12]</sup>。最大熵 Maxent 模型是常用的 SDMs 之一<sup>[13]</sup>。目前 Maxent 模型已广泛应用于预测濒危物种、易受气候变化影响物种的

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671090); 科技基础资源调查专项 (2017FY100902)

作者简介: 李艳红 (1994-), 女, 河南信阳人, 硕士, 主要从事气候变化和山地资源研究。

E-mail: lyh6299@126.com

通讯作者: 朱连奇 (1963-), 男, 河南郸城人, 博士, 教授, 主要从事山地地理环境及资源开发利用的研究。

E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

分布与环境变量之间的关系,并表现出较高的预测能力<sup>[2,12]</sup>。因此,本文选用该模型来预测南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*)在全球变化背景下的其地域分布变化情况。

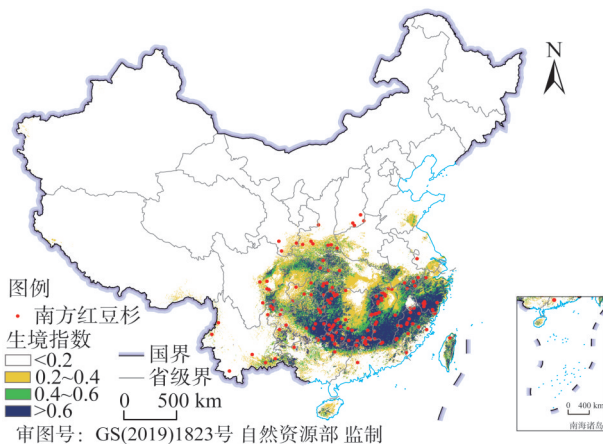
南方红豆杉是我国亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林中分布的特有种和重要的濒危子遗树种之一,是国家Ⅰ级重点保护植物<sup>[14,15]</sup>。南方红豆杉喜湿耐阴,主要分布在我国长江流域、南岭山脉、陕西、甘肃和台湾等地的山地或溪谷处<sup>[14]</sup>。南方红豆杉实用价值较高,其幼苗难以培养,对生境质量要求较高<sup>[16,17]</sup>。目前,一些学者对南方红豆杉的人工培育<sup>[18]</sup>、种群扩散和结构特征<sup>[16,19,20]</sup>,以及小区域尺度上的分布特征和生境质量评价<sup>[17,21]</sup>等进行了研究,但关于全球变化背景下南方红豆杉分布预测的研究鲜有报道,尤其是在大区域研究尺度上。近些年受气候变化和土地利用方式改变等因素的影响南方红豆杉栖息地面积逐渐减少,对其保护已迫在眉睫。本文基于Maxent模型预测2050s气候、地形和土壤三大环境变量对南方红豆杉在中国潜在分布的影响,以揭示全球气候变化背景下南方红豆杉潜在分布范围的变化趋势,以及气候、地形和土壤因子对其分布的作用机理,旨在为南方红豆杉的物种保护和人工培育提供科学的理论依据,并探讨其分布变化对我国亚热带北界的指示意义。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 数据来源和变量筛选

南方红豆杉地理分布信息数据通过三种渠道收集:(1)从全球生物多样性数据库(GBIF, [www.gbif.org](http://www.gbif.org))下载;(2)从中国数字植物标本馆(CVH, [www.cvh.org.cn](http://www.cvh.org.cn))查找;(3)查阅其他相关研究文献<sup>[19,22-25]</sup>。首先对上述获得的数据在Excel中进行查找和删除重复或无效的数据;其次,为减少数据空间自相关引起的预测偏差,在ArcGIS 10.2中利用SDMtoolbox 2.4<sup>[26]</sup>工具生成10 km×10 km的网格,自动剔除一些距离相近的点;最后共获得152个南方红豆杉分布点用于Maxent模型预测(图1)。

选取三种环境变量类型,包括19个生物气候变量、1个地形变量和2个土壤变量。为确定不同气候条件下物种的分布,选用由全球气候模型(GCM)生成的当前(1960—1990年)和未来CCSM<sub>4</sub> 2050s(2041—2060年)三种典型浓度路径(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)下的生物气候变量数据。该数据来源于世界气候数据库(WorldClim, [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org));土壤数据和地形数据均下载于世界粮农组织(FAO, [www.fao.org](http://www.fao.org))。经过多次模型运行并结合前人研究<sup>[18,21,22,27]</sup>最终选取两个对南方红豆杉分布影响较大的土壤因子,包括土壤有效含水量(*AWC\_CLASS*)和表



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 南方红豆杉分布点和当前气候条件下分布状况

Fig. 1 Distribution records of *Taxus chinensis* var. *mairei* and its distribution under current climatic conditions

层土（0~30 cm）基本饱和度（ $T_{BS}$ ）。为减少气候数据过多导致模型的多重共线性问题，本文使用ArcGIS 10.2中的SDMtoolbox 2.4工具对19个生物气候变量数据做Pearson相关性分析，保留相关性绝对值<0.80的气候变量，与地形和土壤属性数据相结合，共选用11个环境变量用于预测未来全球变暖背景下南方红豆杉分布的建模（表1）。上述11个环境变量空间分辨率均为30'（≈1 km），地理坐标统一为WGS\_1984。

表1 南方红豆杉环境变量表  
Table 1 Environmental variables of *Taxus chinensis* var. *mairei*

环境变量	描述	贡献率/%	最适范围
bio2	气温平均日较差	21.2	0~11 ℃
bio3	等温性	3.2	>25%
bio6	最冷月最低温度	1.3	<5 ℃
bio7	气温年变化范围	8.1	1~16 ℃
bio10	最暖季平均温度	5.5	3~22 ℃
bio13	最湿月降水量	1.1	>155 mm
bio15	降水季节性变化	0.2	20%~70%
bio19	最冷季降水量	52.8	>25 mm
$T_{BS}$	表层土壤基本饱和度	2.7	4%~60%
AWC_CLASS	土壤有效含水量	0.6	7.5%~15%
Elev	海拔	3.3	>0 m

1.2 研究方法

1.2.1 模型运行和精度评估

在ArcGIS 10.2中将上述11个环境变量图层以中国行政矢量边界数据为基础，采用掩膜提取方法进行裁剪。将南方红豆杉的地理分布数据（csv格式）和11个环境变量数据（bil格式）分别导入Maxent 3.4.1版本中进行模型运算。参数设置：创建受试者工作特征曲线（ROC）、显示预测结果并采用Jackknife预测各环境变量的贡献率；设置全部样本点的25%用于评估模型，其余75%用于训练模型；最大背景值设置为10000，迭代运行500次；模型其余参数选择默认。利用ROC分析方法进行Maxent预测精度的检测，ROC取值范围为[0, 1]，ROC越接近于1表示模型预测结果越好。一般认为，ROC值<0.5表示预测失败，0.5~0.7表示预测较差，0.7~0.9表示一般或中等，0.9~1.0表示非常好<sup>[17]</sup>。

1.2.2 预测结果处理

在ArcGIS 10.2采用重分类工具将Maxent模拟的南方红豆杉当前（1960—1990年）和未来（2041—2060年）栖息地可能分布的概率即生境指数（ $P$ ）进行划分为：不适宜栖息地（ $P \leq 0.2$ ）和适宜栖息地（ $P > 0.2$ ）。适宜栖息地又分为三类，包括边缘栖息地（0.2~0.4）、中等栖息地（0.4~0.6）和核心栖息地（>0.6）。为估计南方红豆杉的分布对气候变化的响应，对栅格数据重投影并通过栅格计算器来计算未来三种气候情景下南方红豆杉适宜栖息地分布范围的扩散或缩减情况，使用SDMtoolbox 2.4计算适宜栖息地分布质心随气候变化迁移的情况。为进一步分析南方红豆杉栖息地分布与海拔之间的关系，将其适宜栖息地（ $P > 0.2$ ）按照中国DEM数据（来源于地理空间数据云，www.gscloud.cn）划分为8个等级：<200 m、200~500 m、500~800 m、800~1200 m、1200~1600 m、1600~2000 m、2000~2500 m和>2500 m，计算每一等级的面积并进行制图分析，统一采

用WGS\_1984\_Albers投影坐标系。

2 结果分析

2.1 模型预测精度评价

Maxent预测的结果显示ROC训练集AUC=0.950,测试集AUC=0.901 ( $SD=0.017$ ),表明Maxent对南方红豆杉地理分布范围预测效果良好,具有很高的精确度和可信度。Jackknife测试了11个环境变量对模型预测结果的贡献率。贡献较大的5个环境变量(贡献率>90%)包括最冷季降水量(*bio19*)、气温平均日较差(*bio2*)、气温年变化范围(*bio7*)、最暖季平均温度(*bio10*)和海拔(*Elev*) (表1)。温度(贡献率=39.4%)和降水(贡献率=54.0%),是限制南方红豆杉地理分布最关键的两个因子,海拔和土壤因子对南方红豆杉栖息地分布的影响与其他两个因素相比作用较弱。

2.2 当前气候条件下南方红豆杉栖息地适宜性

在当前(1960—1990年)气候条件下,Maxent模拟结果与已有研究结果<sup>[27]</sup>基本一致。南方红豆杉适宜栖息地( $P>0.2$ )主要分布在18°~36°N和104°~124°E之间,包括海南、台湾、广东、广西、福建、浙江、江西南部、云南东南部、重庆、四川东部、湖北、湖南南部、河南西南部、陕西南部,安徽、山东、甘肃和西藏也有少量分布,总分布面积约 $148.13\times10^4\text{ km}^2$  (图1)。当前南方红豆杉在中国分布的边缘栖息地(0.2~0.4)、中等栖息地(0.4~0.6)和核心栖息地(>0.6)面积分别为 $57.50\times10^4\text{ km}^2$ 、 $37.89\times10^4\text{ km}^2$ 和 $52.74\times10^4\text{ km}^2$  (表2)。南方红豆杉绝大部分适宜栖息地都分布在我国亚热带和暖温带地区,核心栖息地在秦岭大巴山以南区域分布数量最多,一般认为该区域是南方红豆杉真正分布的区域<sup>[28]</sup>。

表2 南方红豆杉适宜栖息地 ( $P>0.2$ ) 分布面积  
Table 2 Suitable habitats ( $P>0.2$ ) of *Taxus chinensis* var. *mairei* (10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>)

生境指数 $P$	当前 (1960—1990年)	未来 (2050s)		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
0.2~0.4	57.50	60.48	61.82	68.56
0.4~0.6	37.89	40.22	42.40	37.24
>0.6	52.74	49.01	43.46	31.79
合计 (>0.2)	148.13	149.71	147.68	137.59

2.3 全球变暖背景下南方红豆杉栖息地适宜性

CCSM<sub>4</sub> 2050s (2041—2060年) 三种气候变化情景下(RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5)南方红豆杉栖息地潜在适宜性预测结果如图2所示。预计2050s,适宜南方红豆杉生长的栖息地( $P>0.2$ )面积约为 $149.71\times10^4\text{ km}^2$  (RCP2.6)、 $147.68\times10^4\text{ km}^2$  (RCP4.5)、 $137.59\times10^4\text{ km}^2$  (RCP8.5)。从当前(1960—1990年)到2050s随温室效应的增加,南方红豆杉边缘栖息地(0.2~0.4)面积呈增加趋势,增加速率逐渐加快;中等栖息地(0.4~0.6)呈先增后减趋势,且在RCP8.5情景下中等栖息地面积缩减至与当前中等栖息地面积基本相等;核心栖息地(>0.6)面积呈缩减趋势,缩减速率逐渐加大(表2)。整体分析,与当前气候条件下模拟结果相比,2050s在最理想温室气体排放路径下(RCP2.6),南方红豆杉适宜栖息地( $P>0.2$ )面积有所增加,比当前增加了 $1.58\times10^4\text{ km}^2$ ;在RCP4.5和RCP8.5气候情景下,适宜栖息地面积随温室气体浓度的增加逐渐缩小(RCP4.5>



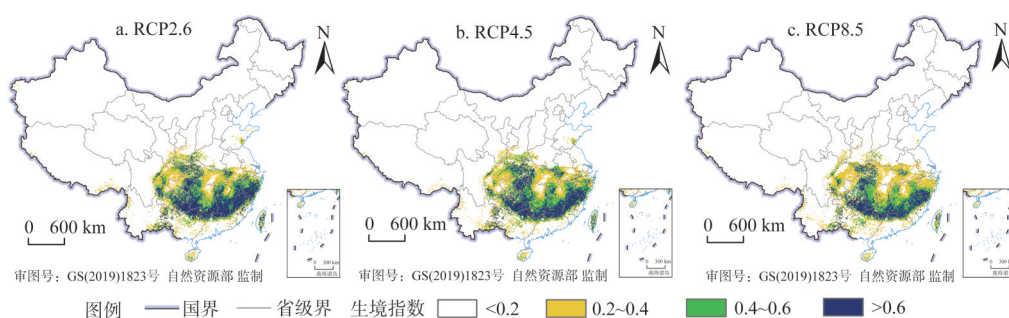


图2 2050s南方红豆杉适宜栖息地分布

Fig. 2 Distribution of suitable habitats for *Taxus chinensis* var. *mairei* in the 2050s

RCP8.5), 分别比当前缩小了  $0.45 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $10.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 表明温度适当升高有利于南方红豆杉生长, 这与吴普等<sup>[20]</sup>的研究结果一致(表2)。未来(2050s)在全球温室效应逐渐增加背景下, 南方红豆杉分布范围的北界有从亚热带逐渐向暖温带移动的趋势, 且核心栖息地(>0.6)分布范围的北界越来越靠近秦岭大巴山北部。

## 2.4 全球变化背景下南方红豆杉栖息地分布格局变化

### 2.4.1 适宜栖息地的扩散和分布质心的迁移

与当前(1960—1990年)气候条件模拟结果相比, 2050s RCP2.6和RCP4.5情景下, 南方红豆杉适宜栖息地( $P>0.2$ )分布范围呈“北扩”“南缩”和“西扩”“东缩”的变化趋势, 并且扩张趋势比缩减趋势更为明显(图3a、图3b)); RCP8.5情景下, 南方红豆杉适宜栖息地分布范围呈“西扩”“东缩”的变化趋势, 而北部缩减和扩张的趋势都比南部明显(图3c)。新增的适宜栖息地主要分布在秦岭—淮河以南地区, 包括四川东部、湖北和湖南北部、河南南部、江西东北部和安徽中部(图3)。

当前南方红豆杉适宜栖息地分布的质心位于湖南湘潭南部(地理坐标为  $27^\circ 34' \text{N}$ ,  $112^\circ 41' \text{E}$ )。在2050s RCP2.6和RCP4.5情景下适宜栖息地分布的质心都向西北方向的中高纬度偏移, 而在RCP8.5情景下, 适宜栖息地分布的质心向西南方向的低纬度偏移。不同情景下其分布质心迁移方向存在差异, 可能是人类活动和气候变暖的程度和不确定性造成的。除迁移方向不同外, 在未来气候背景下南方红豆杉适宜栖息地分布的质心移动距离也不一致, 表现为随温室效应的增加, 分布质心迁移的距离不断加大, 在RCP8.5情景下迁移距离最大。但整体分析, 南方红豆杉适宜栖息地的质心移动速率不大, 基本稳定在湖南东部的  $27^\circ 20' \sim 27^\circ 50' \text{N}$  和  $111^\circ 59' \sim 112^\circ 42' \text{E}$  之间。

### 2.4.2 纬度和海拔分布格局的变化

图4通过用未来(2050s)减去当前(1960—1990年)来计算全球变暖背景下南方红豆杉适宜栖息( $P>0.2$ )分布随纬度和海拔的变化规律。已有研究表明山西是南方红豆杉在我国自然分布的最北界<sup>[27]</sup>, 因此只分析了我国  $18^\circ \sim 41^\circ \text{N}$  范围内南方红豆杉适宜栖息地分布的变化情况。2050s 三种气候情景下, 南方红豆杉在  $18^\circ \sim 25^\circ \text{N}$  和  $26^\circ \sim 28^\circ \text{N}$  范围内表现出随纬度升高、适宜其生长的区域面积都呈先缓慢增加后又逐渐降低的变化趋势; 在  $29^\circ \sim 32^\circ \text{N}$  范围内适宜南方红豆杉分布的面积表现出随纬度升高呈波动增加的变化趋势; 在  $33^\circ \sim 41^\circ \text{N}$  范围内, 南方红豆杉适宜栖息地面积随纬度升高先呈波动增加的变化趋势后又趋于平稳, 在  $39^\circ \sim 41^\circ \text{N}$  范围内未来南方红豆杉适宜栖息地分布面积与当前模拟结果基

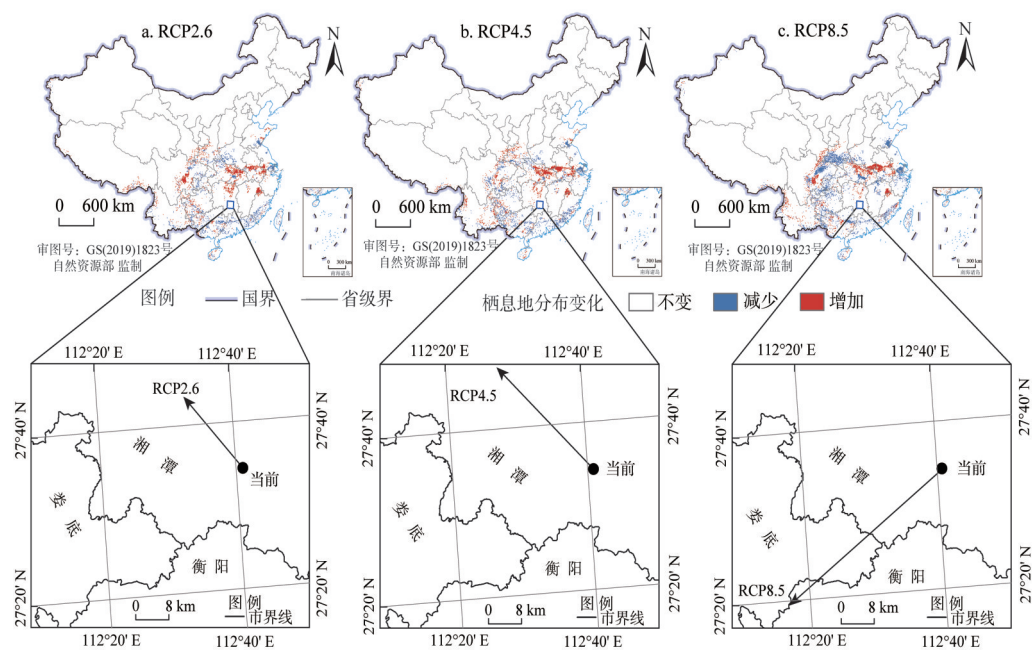


图3 2050s南方红豆杉适宜栖息地分布变化和分布质心的迁移

Fig. 3 Suitable habitat distribution change and centroid migration of *Taxus chinensis* var. *mairei* in the 2050s

本相等 (图4a)。在全球变化背景下南方红豆杉分布有由低纬度向中纬度移动的趋势, 在  $28^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  范围内沿纬度向北移动趋势比  $36^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$  更明显。

2050s 预测结果显示: 在不同气候情景下南方红豆杉适宜栖息地 ( $P>0.2$ ) 面积在不同海拔等级下增减趋势表现出一致性; 与当前模拟结果相比, 南方红豆杉适宜栖息地面积在海拔  $<200\text{ m}$  和  $>1200\text{ m}$  范围内随气候情景变化都呈增加趋势; 在  $200\sim 1200\text{ m}$  海拔范围内都呈缩减趋势; 在  $500\sim 800\text{ m}$  海拔范围内南方红豆杉适宜栖息地面积丢失最为严重; 随温室效应的增加, 在海拔  $1200\sim 2500\text{ m}$  范围内 RCP8.5 情景下南方红豆杉适宜栖息地面积增加不明显, 但在海拔  $<200\text{ m}$  和  $>2500\text{ m}$  范围内明显增加 (图4b)。随气候变化, 南方红豆杉向高海拔地区移动和向平原地区聚集的趋势比较明显。

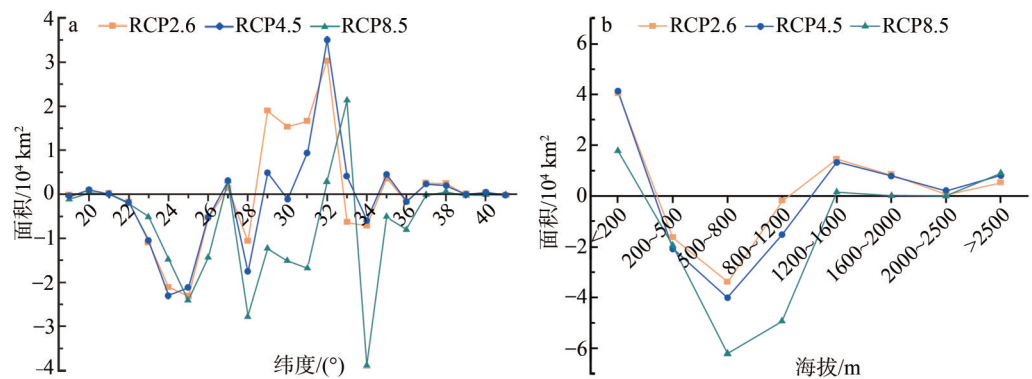


图4 2050s南方红豆杉适宜栖息地分布面积随纬度和海拔的变化规律

Fig. 4 Suitable habitat distribution changes of *Taxus chinensis* var. *mairei* with latitude and altitude in the 2050s

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文采用 Maxent 模型模拟和预测了当前 (1960—1990 年) 和未来 (2050s) 三种典型浓度路径下 (RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5) 南方红豆杉在中国的潜在分布范围, 并分析了气候、海拔和土壤因素对南方红豆杉分布适宜性的影响。

(1) Maxent 结果显示 AUC=0.901 表明模型预测精度高、预测结果可信。说明 Maxent 建模可以为南方红豆杉的保护和培育提供强有力的科学依据。

(2) Jackknife 测试影响南方红豆杉分布的主要有气候和地形两大环境因素 (累计贡献率>90%), 包括最冷季降水量 (*bio19*)、气温平均日较差 (*bio2*)、气温年变化范围 (*bio7*)、最暖季平均温度 (*bio10*) 和海拔 (*Elev*)。

(3) 当前模拟结果显示, 南方红豆适宜栖息地 ( $P>0.2$ ) 主要分布在我国  $18^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$  和  $104^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$  之间, 总面积约为  $148.13\times 10^4\text{km}^2$ ; 全球变化背景下, 南方红豆杉适宜栖息地在 RCP2.6 路径下有所增加, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下都有不同程度的缩减。

(4) 随气候变化南方红豆杉适宜栖息地范围整体呈“北扩”“南缩”和“西扩”“东缩”的变化趋势, 分布质心在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下向西北方向迁移, 在 RCP8.5 情景下向西南方向迁移。在全球逐渐变暖背景下, 南方红豆杉逐渐向中高纬度和高海拔地区迁移, 这也表明我国亚热带北界逐渐向北移动。

#### 3.2 讨论

##### 3.2.1 南方红豆杉的分布特征

Maxent 模拟的当前和未来南方红豆杉的潜在分布区域主要位于旱季较不显著的亚热带湿润地区。这与谢伟东<sup>[22]</sup>通过 Penman 植被—气候分类系统、Holdridge 生命地带分类系统和 Kira 温度指标对南岭山地南方红豆杉分布规律研究结果一致。Maxent 模拟结果显示, 南方红豆杉潜在适生区分布在我国亚热带暖温带季风区, 核心适生区分布的北界基本与秦岭大巴山的北部边界保持一致, 西界基本与青藏高原东部边界一致; 并且随气候变化, 南方红豆杉有沿海拔上升和纬度北移的趋势, 但移动速率和扩散范围较小。这主要与我国气候类型和南方红豆杉的生态特征及其分布区域内的地形因子<sup>[17]</sup>有关。2060 年以前, 南方红豆杉稳定分布的区域主要在秦岭大巴山以南, 包括四川东部、重庆、湖北、湖南、贵州、江西、浙江、福建西北、广东和广西东部和台湾东部, 因为该区域地形复杂易形成区域小气候, 而小气候可以减缓区域内气候变化<sup>[7]</sup>, 给植物创造稳定的气候条件。除此之外, 该地区水热条件充足, 冬季无霜, 温度和降水均表现出适度季节性, 与中新世气候相似, 适合孑遗植物生存<sup>[29]</sup>。

##### 3.2.2 南方红豆杉分布格局的地理指示意义

当前 (1960—1990 年) 气候条件下, 南方红豆杉核心栖息地 ( $P>0.2$ ) 分布的北界地理位置特殊, 与我国亚热带与暖温带分界线—秦岭淮河线位于相同纬度范围内, 且南方红豆杉对气候变化反应敏感<sup>[20]</sup>, 表明用南方红豆杉分布格局变化来指示我国亚热带北界迁移的趋势具有较高的可信度。近年来通过植被空间分布特征来建立我国气候区划的研究较多, 但多数都是基于历史气候数据和植被分布特征进行气候带划分<sup>[30]</sup>。本文基于历史气候数据和 GCM 预测到 2050s 南方红豆杉分布的北界逐渐向北移动大约 1 个纬度, 南部栖息地丢失明显, 南界有北移趋势但不明显, 表明到 21 世纪中期受气候变化影响我国亚热带北界将会向北移动, 热带范围有向北扩张的趋势。杨强等<sup>[31]</sup>基于 HadCM3 模式



对我国主要气候区划界限预测时也得出相同结论。并且本文发现降水（贡献率>50%）是制约南方红豆杉栖息地扩散的最重要气候因子，随着全球气候变暖南方红豆杉适生区面积逐渐缩小，表明我国受全球变化的影响干旱面积将有所增加，这与莫兴国等<sup>[32]</sup>基于GCM情景预测21世纪我国干旱演变趋势的研究结果一致。

### 3.2.3 对南方红豆杉的保护建议

南方红豆杉授粉易受阻隔，种子产量少保存率低且萌发周期长，其幼苗易受生境条件限制和人类活动的影响<sup>[27]</sup>。因此，其在地理分布上有很大的局限性，是导致南方红豆杉濒危的重要原因之一。Jackknife测试结果显示水热条件（累计贡献率>90%）是限制南方红豆杉生长的主要因素。温度和降水影响植物种子的萌发、植物光合作用的效率和土壤含水量，适宜的水热条件有利于南方红豆杉有机质的积累和种子的萌发<sup>[33,34]</sup>。根据Maxent模拟输出的物种响应性曲线显示，南方红豆杉适宜（ $P>0.4$ ）生存在最冷季降水量（*bio19*）> 25 mm、气温平均日较差（*bio2*）0~11℃、气温年变化范围（*bio7*）1~16℃的气候区域范围内（表1）。此外，有研究表明南方红豆杉适宜生存在土壤较为湿润、肥沃且透水性较好的环境中<sup>[27]</sup>，因此表层土壤基本饱和度（ $T\_BS$ ）和土壤有效含水量（ $AWC\_CLASS$ ）将限制南方红豆杉的生长和分布。物种响应性曲线显示土壤有效含水量在7.5%~15%，表层土壤基本饱和度在4%~60%范围内南方红豆杉分布的概率较高（ $P>0.4$ ）（表1）。随气候变化，南方红豆杉有向高海拔地区迁移的趋势，尤其是在温室气体浓度较高（RCP8.5）情况下。因此，在进行人工培育和建立物种保护区时应选取水热条件、土壤含水量和土壤养分含量在上述范围的区域内较为适宜，并且在未来气候变暖加剧情况下应考虑在高海拔地区建立人工保育基地。结合图2分析，在我国四川东部、重庆、湖北、湖南、贵州、江西、浙江、福建西北部、广东和广西北部建立南方红豆杉保育基地最为适宜。

### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2014: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] PACIFICI M, VISCONTI P, BUTCHART S H M, et al. Species' traits influenced their response to recent climate change. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 205-208.
- [3] PANETTA A M, STANTON M L, HARTE J. Climate warming drives local extinction: Evidence from observation and experimentation. *Science Advances*, 2018, 4: eaq1819, Doi: 10.1126/sciadv.aq1819.
- [4] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [5] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438. [DENG C H, BAI H Y, GAO S, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438.]
- [6] ZHU S D, PENG H S, GUO L P, et al. Regionalization of Chinese material medical quality based on Maximum Entropy Model: A case study of *Atractylodes lancea*. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42417.
- [7] SUGGITT A J, WILSON R J, ISAAC N J B, et al. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 713-717.
- [8] WALTHERT L, PANNATIER E G, MEIER E S. Shortage of nutrients and excess of toxic elements in soils limit the distribution of soil-sensitive tree species in temperate forests. *Forest Ecology & Management*, 2013, 297: 94-107.
- [9] LENOIR J, GÉGOUT J C, PIERRAT J C, et al. Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986-2006). *Ecography*, 2009, 32(5): 765-777.
- [10] MATHYS A S, COOPS N C, SIMARD S W, et al. Diverging distribution of seedlings and mature trees reflects recent climate change in British Columbia. *Ecological Modelling*, 2018, 384: 145-153.
- [11] SAPTA S, SULISTYANTARA B, FATIMAH I S, et al. Geospatial approach for ecosystem change study of Lombok Island under the influence of climate change. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 24: 165-173.
- [12] MORAITIS M L, VALAVANIS V D, KARAKASSIS L. Modelling the effects of climate change on the distribution of



- benthic indicator species in the Eastern Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 16-24.
- [13] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [14] 包维楷, 陈庆恒. 中国的红豆杉资源及其开发研究现状与发展对策. *自然资源学报*, 1998, 13(4): 375-380. [BAO W K, CHEN Q H. Present status, problems, and further development strategies on natural *Taxus* resource and their exploitation in China. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(4): 375-380.]
- [15] 廖文波, 张志权, 苏志尧. 抗癌植物南方红豆杉保护生物学价值的评价. *生态科学*, 1996, 15(2): 17-20. [LIAO W B, ZHANG Z Q, SU Z Y. Importance and exigency on study of protection biology of anticancer plant *Taxus mairei*. *Ecological Science*, 1996, 15(2): 17-20.]
- [16] 高润梅, 石晓东, 樊兰英, 等. 山西省南方红豆杉自然分布与群落生态学特征. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1820-1828. [GAO R M, SHI X D, FAN L Y, et al. Natural distribution and community ecological characteristics of *Taxus chinensis* var. *mairei* in Shanxi province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1820-1828.]
- [17] 罗宁, 欧建德, 吴志庄. 福建南方红豆杉林生境质量评价研究. *西南林业大学学报*, 2016, 36(6): 52-57. [LUO N, OU J D, WU Z Z. Evaluation of habitat quality for *Taxus chinensis* var. *mairei* in Fujian province. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36(6): 52-57.]
- [18] 朱志军. 南方红豆杉造林关键技术研究. 杭州: 浙江农林大学, 2011. [ZHU Z J. *Taxus mairei* development use essential camp afforestation engineering research. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011.]
- [19] 王艺, 张蕊, 冯建国. 不同种源南方红豆杉生长差异分析及早期速生优良种源筛选. *植物资源与环境学报*, 2012, 21(4): 41-47. [WANG Y, ZHANG R, FENG J G. Analysis on growth difference of *Taxus wallichiana* var. *mairei* from different provenances and selection of fast-growing provenances at early age. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2012, 21(4): 41-47.]
- [20] 吴普, 王丽丽, 黄磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性. *地理研究*, 2006, 25(1): 43-52. [WU P, WANG L L, HUANG L. A preliminary study on the tree-ring sensitivity to climate change of five endemic conifer species in China. *Geographical Research*, 2006, 25(1): 43-52.]
- [21] 陈涵, 张超, 余树全. 基于Stacking模型集成算法的莲都区南方红豆杉潜在分布区. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(3): 69-75. [CHEN H, ZHANG C, YU S Q. Potential distribution area of *Taxus chinensis* var. *mairei* in Liandu district based on a Stacking algorithm. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2019, 36(3): 69-75.]
- [22] 谢伟东. 南岭山地南方红豆杉遗传变异与气候因子相关性研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2017. [XIE W D. Research on the correlation of genetic variation and climate factors of *Taxus chinensis* var. *mairei* in Nanling Mountain. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.]
- [23] 程蓓蓓. 中国红豆杉属分子谱系地理学与遗传多样性研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2016. [CHENG B B. Molecular phylogeographic and genetic diversity of *Taxus* L. (*Taxaceae*) in China. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.]
- [24] 付晓峰, 张桂萍, 吴伟, 等. 不同产地南方红豆杉根际AMF多样性. *菌物学报*, 2017, 36(8): 1061-1071. [FU X F, ZHANG G P, WU W, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in rhizosphere soil of *Taxus chinensis* var. *mairei* from different areas. *Mycosystema*, 2017, 36(8): 1061-1071.]
- [25] 张雪梅, 李德铎, 高连明. 南方红豆杉谱系地理学研究. *西北植物学报*, 2012, 32(10): 1983-1989. [ZHANG X M, LI D Z, GAO L M. Phylogeographical study on *Taxus chinensis* var. *mairei* (Lemée & Lévêillé) L.K.Fu & Nan Li. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(10): 1983-1989.]
- [26] BROWN J L. SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [27] 茹文明. 濒危植物南方红豆杉生态学研究. 太原: 山西大学, 2006. [RU W M. Study on the ecology of endangering plant *Taxus chinensis* var. *mairei*. Taiyuan: Shanxi University, 2006.]
- [28] GUO Y L, LI X, ZHAO Z F, et al. Predicting the impacts of climate change, soils and vegetation types on the geographic distribution of *Polyporus umbellatus* in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1-11.
- [29] TANG C Q, MATSUI T, OHASHI H, et al. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia. *Nature Communications*, 2018, 9: 4488.
- [30] 张静静, 王岩松, 朱连奇, 等. 近50年来豫西山地亚热带北界变化分析. *河南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(1): 40-49. [ZHANG J J, WANG Y S, ZHU L Q, et al. Study on change of northern subtropical border in mountainous regions in Western Henan province. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2016, 46(1): 40-49.]
- [31] 杨强, 郑西楠, 何立恒. 基于HadCM3模式的我国主要气候区划界线时空预测研究. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 17-25. [YANG Q, ZHENG X N, HE L H. Spatial-temporal shift for major boundary of climate regionalization based on meteorological data stimulated by HadCM3 during from 1950-2059 in China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 17-25.]
- [32] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM预测情景下中国21世纪干旱演变趋势分析. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1244-

1256. [MO X G, HU S, LU H J, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM Projections. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1244-1256.]
- [33] FANG X W, ZHANG J J, XU D H, et al. Seed germination of *Caragana* species from different regions is strongly driven by environmental cues and not phylogenetic signals. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11248.
- [34] REICH P B, SENDALL K M, STEFANSKI A, et al. Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, 2018, 562: 263-267.

## Changes of *Taxus chinensis* var. *mairei* habitat distribution under global climate change

LI Yan-hong, ZHANG Li-juan, ZHU Wen-bo, ZHANG Jing-jing,  
XU Shuai-bo, ZHU Lian-qi

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Climate is an important factor affecting plant habitat. It is of great significance to promote the sustainable use of natural resources and predict the impact of climate change on the potential distribution of plants. The potential geographical distribution of *Taxus chinensis* var. *mairei* in China was simulated by the maximum entropy model (Maxent), based on 11 environmental variables under three climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5) in the 2050s. And we discussed the significance of its distribution patterns to the northern boundary of subtropical China. The results showed that AUC=0.950, indicating that Maxent had high accuracy and reliability in prediction of the potential distribution for *Taxus chinensis* var. *mairei*. Jackknife test results showed that the main environmental variables affecting the distribution suitability of *Taxus chinensis* var. *mairei* were the precipitation of coldest quarter (*bio19*), mean diurnal range (*bio2*), temperature annual range (*bio7*), mean temperature of warmest quarter (*bio10*) and altitude (*Elev*), and the cumulative contribution of >90%. The suitable habitats ( $P>0.2$ ) of *Taxus chinensis* var. *mairei* are mainly distributed in the subtropical and warm temperate monsoon areas of 18°-36°N and 104°-124°E in China, and most of the core habitats ( $P>0.6$ ) were distributed to the south of Qinling- Daba Mountains. With the increase of greenhouse gas concentrations in the 2050s, the suitable habitats of *Taxus chinensis* var. *mairei* increased in RCP2.6 scenario, and decreased in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. With the climate warming in the future, the suitable habitats range of *Taxus chinensis* var. *mairei* in RCP2.6 and RCP4.5 scenarios are expanding north- and westward, while shrinking south- and eastward. In the RCP8.5 scenario, the suitable habitats distribution of *Taxus chinensis* var. *mairei* are "expanding westward", and "shrinking eastward". With climate change, the centroid of *Taxus chinensis* var. *mairei* distribution moved to the northwest under the scenarios of RCP2.6 and RCP4.5, and moved to the southwest in the RCP 8.5 scenario. The distribution of *Taxus chinensis* var. *mairei* presents a rising trend as the altitude and the latitude increase in the 2050s, but the migration rate is low and the spread range is small. And the northern boundary of subtropical China will move northward under climate change.

**Keywords:** *Taxus chinensis* var. *mairei*; climate change; distribution pattern; Maxent; geographical indication