

基于 IPCC AR5 的我国常绿阔叶林潜在适宜生境变化分析

雷军成¹, 徐海根², 吴 军², 关庆伟¹ (1. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 了解气候变化情景下我国常绿阔叶林潜在适宜生境的空间变化特征, 对于未来的生物多样性保护、植被修复及区域规划等方面都具有极其重要的作用。利用联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告 (AR5) 发布的最新气候情景数据, 结合物种分布多模型集合预测平台 ModEco, 预测气候变化情景下到 21 世纪 50 年代我国常绿阔叶林潜在适宜生境的变化。结果表明, 气候变化将导致我国常绿阔叶林潜在适宜生境面积增加, 增加的潜在适宜生境主要位于青藏高原南部和东南部地区; 大气中排放的温室气体浓度越高, 我国常绿阔叶林潜在适宜生境的面积增幅越大。

关键词: 气候变化; 情景; 温室气体; 物种分布模型; 集合预测

中图分类号: X176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2015)01-0069-08

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.01.010

IPCC AR5-Based Analysis of Variation of Potential Suitable Habitats for Evergreen Broadleaf Forest in China.

LEI Jun-cheng¹, XU Hai-gen², WU Jun², GUAN Qing-wei¹ (1. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: A better understanding of spatial variation of potential suitable habitats for evergreen broadleaf forest in China will play an extremely significant role in biodiversity conservation, vegetation restoration, and regional planning in the future. Based on the latest climate scenario data derived from the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), changes in potential suitable habitat for evergreen broadleaf forest under predicted changing climate till 2050s were predicted with the aid of ModEco, a multi-model ensemble forecasting platform for prediction of species distribution. Results show that climate change will lead to expansion of the area of potential suitable habitat for evergreen broadleaf forest, mainly in the southeast and south parts of the Qinghai-Tibetan Plateau. The higher the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, the more significant the expansion.

Key words: climate change; scenario; greenhouse gas; species distribution model; ensemble forecasting

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告 (AR5) 显示: 在过去的 100 多年间 (1880—2012 年), 全球地表年平均气温升高 0.85 °C, 其中最近 60 多年间 (1951—2012 年) 升高 0.72 °C。按照 IPCC AR5 预设的温室气体排放情景推算, 21 世纪末全球地表年平均气温将升高 0.3~4.8 °C^[1]。从 1901—2011 年的 100 多年间, 我国地表年平均气温升高 0.99 °C, 其中最近 50 a 间 (1961—2011 年) 增温速率达 0.29 °C · (10 a)⁻¹^[2]。大量的观测事实和研究表明, 气候变化尤其是温度升高能够引起植被分布、物种分布以及动植物物候等一系列生态现象和过程的变化^[3-5]。

我国常绿阔叶林分布广, 面积大, 类型多样, 是全球常绿阔叶林的主体^[6]。同时, 我国还是世界上生物多样性最丰富的国家之一, 全国现有脊椎动物

近 6 500 种, 高等植物 3 万种以上, 分别占世界物种总数的 10% 和 14%, 其中常绿阔叶林中高等植物种类约占全国种类的一半以上^[7-8]。常绿阔叶林还是川金丝猴 (*Rhinopithecus roxellanae*) 和四川山鹧鸪 (*Arborophila rufipectus*) 等我国特有珍稀濒危野生动物的重要栖息生境^[9-10]。因此, 了解气候变化情景下我国常绿阔叶林潜在适宜生境的变化特征对于未来我国的生物多样性保护、植被修复和区域规划等都具有十分重要的作用。

物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 通过量化物种分布与环境因子之间的关系, 能对有限的点状物种分布调查资料进行空间推

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目 (1213114)

① 通信作者 E-mail: guanjanpan999@163.com

算^[11-12]。目前,物种分布模型已被广泛应用,如物种现状评估、生物入侵预警和物种引种等^[13-15]。随着 IPCC 气候情景的发展,利用物种分布模型预测未来气候条件下物种和植被的可能分布,为气候变化形势下珍稀濒危物种的保护提供科学依据,正成为保护生物学和生物地理学等相关学科研究的热点之一^[16-18]。由于物种-环境关系的复杂性和模型本身的局限性,单一物种分布模型的预测结果存在许多不确定性^[19-20]。多模型集合预测采用多个物种分布模型对每一单元是否为研究对象的潜在适宜生境进行重复判断,能够降低单一模型预测的不确定性^[21-23]。该研究利用 IPCC AR5 发布的最新气候情景数据,结合物种分布的多模型集合预测平台 ModEco,预测气候变化情景下到 21 世纪 50 年代我国常绿阔叶林潜在适宜生境的变化,以期为气候变化形势下我国未来的生物多样性保护和植被修复等生态保护工作提供一定的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 常绿阔叶林分布数据的收集与处理

我国常绿阔叶林分布数据来源于欧洲太空局

(ESA) 发布的 2000 年全球土地覆被数据产品: Global Land Cover 2000 (GLC2000, <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/>)。GLC 2000 采用 WGS-1984 地理坐标系,数据的空间分辨率为 30"×30" (约 1 km×1 km)。为获取用于建模的常绿阔叶林分布点位数据,首先通过如下步骤对 GLC2000 数据进行重采样:(1)采用 ESRI ArcMap 9.3 软件将 GLC 2000 数据重新划分为 2 类,即常绿阔叶林(赋值为 1)和非常绿阔叶林(赋值为 0);(2)通过 ArcMap 9.3 软件将常绿阔叶林分布数据转换为点状矢量格式;(3)通过 ArcMap 9.3 软件将点状格式的常绿阔叶林分布数据由原来的地理坐标系转换为兰伯特等积投影(中央经线为 106.00° E);(4)通过 ArcMap 9.3 软件将投影后点状矢量格式的常绿阔叶林分布数据转换成栅格格式,栅格的空间分辨率设置为 1 km×1 km。通过以上步骤得到常绿阔叶林分布信息损失最少的重采样栅格数据,然后对重采样后的常绿阔叶林分布数据进行规则采样,采样间距设为 25 km×25 km,即 2 个最近采样点之间的距离为 25 km,最终获得我国常绿阔叶林分布点记录共 579 条。我国常绿阔叶林分布和采样点数据如图 1 所示。

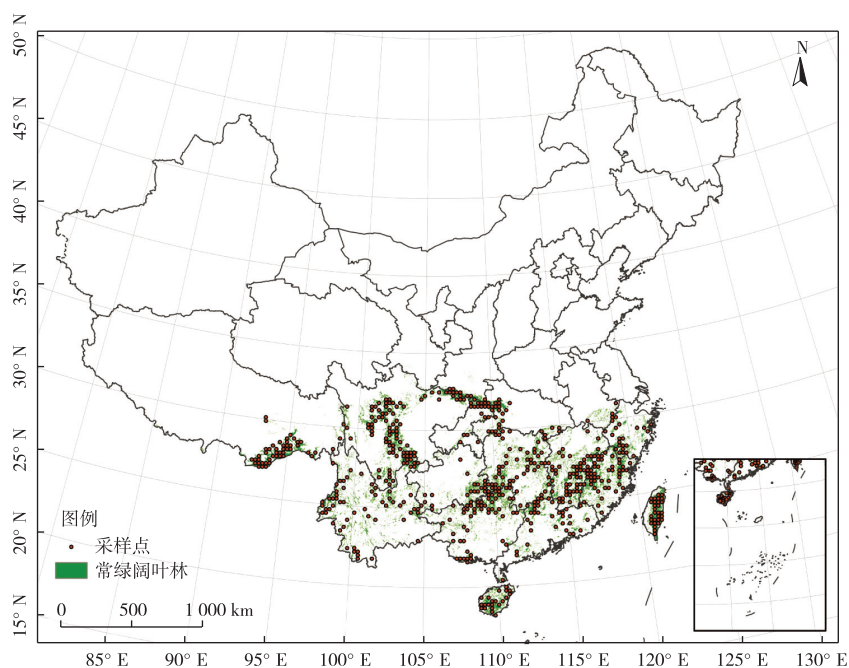


图 1 我国常绿阔叶林分布和采样点示意

Fig. 1 Distribution of evergreen broadleaf forests in China and sampling points of this study

1.2 预测变量的选择与处理

气候被认为是在大尺度上影响植被功能型分布最主要的环境因子^[24]。初步选择年平均气温、气

温、气温季节性变化、最冷季节平均年降水量、降水季节性变化、最干季节降水量、Holdridge 生物温度、吉良(Kira)温暖指数、Kira 寒冷指数和干燥度指数

10 个气候因子作为预测变量。基准气候条件下的年平均气温、气温季节性变化、最冷季节平均气温、年降水量、降水季节性变化和最干季节降水量这 6 个气候因子可以通过 WorldClim 网站 (<http://www.worldclim.org/>) 直接获取; Holdridge 生物温度、温暖指数、Kira 寒冷指数和干燥度指数分别参照文献 [25-27] 的方法, 通过 WorldClim 网站获取的月平均气温和年降水量数据计算获得。

Holdridge 生物温度 (T_B) 的计算公式为

$$T_B = \sum_{i=1}^{12} T_i / 12。 \quad (1)$$

式(1)中, T_i 为第 i 月的平均气温, $^{\circ}\text{C}$ 。当 $T_i > 30^{\circ}\text{C}$ 时, 取 $T_i = 30^{\circ}\text{C}$; $T_i < 0^{\circ}\text{C}$ 时, 取 $T_i = 0^{\circ}\text{C}$ 。

Kira 温暖指数 (I_W) 的计算公式为

$$I_W = \sum_{i=1}^n (T_i - 5)。 \quad (2)$$

式(2)中, T_i 为平均气温在 5°C 以上的第 i 月平均气温, $^{\circ}\text{C}$; n 为月平均气温大于 5°C 的月数。

Kira 寒冷指数 (I_C) 的计算公式为

$$I_C = - \sum_{i=1}^n (5 - T_i)。 \quad (3)$$

式(3)中, T_i 为平均气温在 5°C 以下的第 i 月平均气温, $^{\circ}\text{C}$; n 为月平均气温小于 5°C 的月数。

干燥度指数 (I_A) 的计算公式为

$$I_A = \begin{cases} P/I_W, & I_W \leq 100 \\ 2P/(I_W + 140), & I_W > 100 \end{cases}。 \quad (4)$$

式(4)中, P 为年平均降水量, mm 。

WorldClim 网站获取的基准气候数据均为 1950—2000 年的累年平均值, 空间分辨率为 $30'' \times 30''$ 。利用 ArcMap 9.3 软件将基准气候条件下各环境因子均转换为兰伯特等积投影, 栅格的空间分辨率同样设置为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

为消除环境因子之间共线性对模型建模过程和结果解释的影响, 计算上述 10 个环境因子两两之间的 Spearman 相关系数。10 个环境因子两两之间的相关系数如表 1 所示。

表 1 环境因子之间的 Spearman 相关系数

Table 1 Pair-wise Spearman's correlation coefficients of the environmental variables

环境因子	T_{AM}	T_S	T_{MCQ}	P_A	P_S	P_{DQ}	T_B	I_W	I_C
T_S	-0.31*								
T_{MCQ}	0.92*	-0.62*							
P_A	0.57*	-0.53*	0.61*						
P_S	-0.59*	0.28*	-0.56*	-0.44*					
P_{DQ}	0.57*	-0.42*	0.57*	0.91*	-0.64*				
T_B	0.99*	-0.19*	0.85*	0.55*	-0.58*	0.57*			
I_W	0.97*	-0.48*	0.98*	0.61*	-0.59*	0.58*	0.92*		
I_C	0.98*	-0.15*	0.83*	0.53*	-0.57*	0.55*	1.00*	0.90*	
I_A	-0.04*	-0.63*	0.17*	0.70*	-0.16*	0.58*	-0.09*	0.08*	-0.12*

T_{AM} 为年平均气温; T_S 为气温季节性变化; T_{MCQ} 为最冷季节平均气温; P_A 为年降水量; P_S 为降水季节性变化; P_{DQ} 为最干季节降水量; T_B 为 Holdridge 生物温度; I_W 为 Kira 温暖指数; I_C 为 Kira 寒冷指数; I_A 为干燥指数。* 表示在 $\alpha=0.05$ 置信水平上显著相关。

环境因子之间相关系数绝对值大于 0.8, 则认为两者具有很强的相关性^[28-29]。最终选择年平均气温、气温季节性变化、年降水量、降水季节性变化及干燥度指数作为预测变量。

未来气候数据通过国际农业研究磋商组织气候变化、农业和粮食安全研究项目网站 (CCAFS, <http://www.ccafs-climate.org/>) 获取。IPCC AR5 讨论了 4 种具有代表性的气候情景对未来气候的影响, 分别为 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5, RCP 是典型浓度路径 (representative concentration pathways) 的缩写, 后面的数字表示 2100 年相对于 1750 年的辐射强迫, 如 2.6 表示大气的辐射强迫为 $2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[1]。选取其中的 RCP 2.6 和 RCP 8.5 作为未来我国可能的气候情景; 时

间上选择 21 世纪 50 年代 (2046—2065 年); 选用加拿大气候模拟与分析中心的 cccma_canesm2 (cccma) 和澳大利亚联邦科学与工业研究组织的 csiro_mk3_6_0 (csiro) 2 种常用大气环流模型的模拟数据。未来气候数据的空间分辨率选用 $30'' \times 30''$ 。通过上述干燥度指数公式计算 21 世纪 50 年代不同气候情景、不同大气环流模型条件下的干燥度指数。最终将所有环境因子均转换为兰伯特等积投影, 栅格的空间分辨率设置为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

1.3 预测模型软件

ModEco 3.02 (<http://gis.ucmerced.edu/ModEco/>) 软件是一个综合性的物种分布集合预测平台。它将一系列物种分布预测模型 (如生物气候包络模型、人工神经网络模型和支持向量机模型

等)与地理信息系统相结合,方便用户进行数据的分析与建模。它既可以进行单一模型的预测,也能进行多模型预测基础上的集合预测^[23]。根据不同

物种数据类型,可以选用不同物种分布模型进行预测,如表 2 所示。

表 2 ModEco 中集成的物种分布模型^[23]

Table 2 Species distribution models implemented in ModEco

模型类型	模型名称	精度评价
仅需物种分布点	生物气候包络、多曼距离、支持向量机	真阳性率-假阳性率曲线、真阳性率-假阳性率曲线下面积
需物种分布点和伪不分布点	支持向量机、最大似然、人工神经网络、广义线性模型、最大熵、粗糙集	真阳性率-假阳性率曲线、真阳性率-假阳性率曲线下面积
需物种分布点和不分布点	支持向量机、最大似然、人工神经网络、广义线性模型、最大熵、粗糙集	受试工作者曲线、受试工作者曲线下面积、误差矩阵、卡帕值
需物种分布点和背景点	支持向量机、最大熵、广义线性模型	真阳性率-假阳性率曲线、真阳性率-假阳性率曲线下面积
集合预测模型	综合以上各模型	受试工作者曲线、受试工作者曲线下面积、误差矩阵、卡帕值、真阳性率-假阳性率曲线、真阳性率-假阳性率曲线下面积

1.4 研究方法

1.4.1 潜在适宜生境预测

将常绿阔叶林采样分布数据和预测环境数据按照 ModEco 平台要求整理、导入。多模型集合预测要求单个模型的预测结果为 0~1 的概率形式,这就要求输入的物种分布数据不仅要有分布点数据,还需要有(伪)不分布点数据。因此首先利用仅需物种分布点进行预测的生物气候包络模型生成我国常绿阔叶林分布的气候包络,并在包络外随机生成与采样点数量相等的常绿阔叶林不分布点,使分布点与不分布点在建模过程中具有相同权重。生物气候包络模型的工作原理是通过物种所有分布点对应的各环境变量的最大值和最小值来确定物种“信封”状生态位,然后以此生态位预测物种的潜在适宜生境。应用“需物种分布点和伪不分布点”类模型中的全部 4 个概率模型(最大似然和粗糙集模型预测结果为 0 和 1 的布尔值形式,0 表示不适宜生境,1 表示适宜生境)进行预测,随机选取 75% 的分布数据(包括分布点和不分布点)用于建模,余下的 25% 用于模型验证。最终在上述 4 个模型预测结果的基础上进行集合预测,每个模型预测结果根据受试工作者曲线下面积(AUC 值)大小赋予相应权重。最终预测结果为 0~1 的概率分布形式,0 表示最不适宜,1 表示最适宜。

1.4.2 环境因子重要性分析

为确定在研究尺度上影响我国常绿阔叶林分布的关键环境因子,通过刀切法(jackknife)对各环境因子重要性进行检验。刀切法的基本原理是将每一环境因子依次从全部环境因子中剔除,然后用

余下的全部环境因子进行预测,并将预测结果的遗漏误差与全部环境因子模型预测结果的遗漏误差进行比较,如果某一环境因子被剔除后导致模型预测结果的遗漏误差明显增大,则认为该环境因子对研究对象的分布起关键作用^[30]。

1.4.3 气候变化的影响分析

为进行气候变化的影响分析,通过最大化卡帕值(maximum Kappa value)的阈值选取方法,将集合模型的预测结果转化成不适宜生境(0)和适宜生境(1)的布尔值形式^[23]。通过栅格数据属性表统计基准气候和未来各种气候条件下常绿阔叶林潜在适宜生境栅格数量,与单个栅格面积相乘(该研究中为 1 km²),即得出对应气候条件下的常绿阔叶林潜在适宜生境面积。另外,为空间化表达气候变化对常绿阔叶林潜在适宜生境的影响,基于地图代数原理,对基准气候条件下常绿阔叶林潜在适宜生境与未来不同气候条件下的常绿阔叶林潜在适宜生境进行叠加分析,公式为

$$X = H_C \times 10 + H_F, X \in (0, 1, 10, 11)。 \quad (5)$$

式(5)中, H_C 为基准气候条件下的预测结果; H_F 为未来某一气候情景和某一大气环流模型下的预测结果。 $X=0$ 表示不适宜生境→不适宜生境; $X=1$ 表示不适宜生境→适宜生境; $X=10$ 表示适宜生境→不适宜生境; $X=11$ 适宜生境→适宜生境。

1.4.4 潜在适宜生境变化原因分析

为了解我国常绿阔叶林潜在适宜生境变化的具体气候原因,通过 ArcMap 9.3 软件对我国 3 大自然区(即东部季风区、西北干旱区半干旱区和青藏高原高寒区)中常绿阔叶林潜在适宜生境变化最明显的

自然区气候变化特征进行分析,所分析的气候指标主要为 1.4.2 节中识别的影响我国常绿阔叶林分布的关键环境变量。该研究中使用的自然区划矢量数据通过数字化自然区划图获得^[31]。

2 结果与分析

2.1 模型精度

单模型预测结果中广义线性模型、最大熵模型、神经网络模型及支持向量机模型的受试工作者曲线下面积(AUC 值)、卡帕(Kappa)值和真阳性率(TPR 值)均达 0.9 以上,表明每个模型对我国常绿阔叶林分布的模拟均具有很好的效果。集合模型的 AUC 值、Kappa 值和 TPR 值均达 0.95 以上,表明集合模型对于我国常绿阔叶林分布的模拟同样具有很好的效果(表 3)。

表 3 4 个物种分布模型和集合模型的预测效果

Table 3 Performances of the four species distribution models and the ensemble model

模型	AUC 值	Kappa 值	TPR 值
GLM	0.993	0.965	0.995
MaxEnt	0.995	0.962	0.995
ANN	0.991	0.938	0.959
SVM	0.991	0.922	0.988
集合模型	0.994	0.962	0.990

GLM 为广义线性模型; MaxEnt 为最大熵模型; ANN 为神经网络; SVM 为支持向量机。AUC 值为受试工作者曲线下面积; Kappa 值为卡帕值; TPR 值为真阳性率。

对比每一栅格点上 4 个物种分布模型预测的常绿阔叶林适宜程度可以发现,在很多地区,尤其是常绿阔叶林分布的边界地区,4 个物种分布模型的预测结果存在一定差异(图 2)。利用集合模型预测常绿阔叶林的潜在适宜生境可以降低单一模型预测的随机性。

2.2 气候变化对常绿阔叶林潜在适宜生境的影响

虽然不同气候情景和大气环流模型预测的常绿阔叶林潜在适宜生境面积有些差别,但相对基准气候条件下的预测结果均呈明显增加趋势(表 4)。未来 4 种气候条件下常绿阔叶林潜在适宜生境面积相对基准气候条件下平均增加 28.2 万 km²,平均增长率为 11.6%。同一大气环流模型条件下,RCP 8.5 情景预测的常绿阔叶林潜在适宜生境面积要大于 RCP 2.6 情景的预测结果;RCP 8.5 情景下 2 种大气环流模型预测我国常绿阔叶林潜在适宜生境面积相对基准气候条件下平均增加 33 万 km²,增长率为 13.6%,较 RCP 2.6 气候情景的预测结果分别

多 9.6 万 km² 和 4 个百分点。同一气候情景下,cccma 大气环流模型预测的常绿阔叶林潜在适宜生境面积要大于 csiro 大气环流模型的预测结果;2 种气候情景下 cccma 大气环流模型预测常绿阔叶林潜在适宜生境面积相对基准气候条件下平均增加 39.5 万 km²,增长率为 16.3%,较 csiro 大气环流模型的预测结果分别多 22.8 万 km² 和 9 个百分点。常绿阔叶林潜在适宜生境范围呈明显向高纬度和高海拔地区扩展的趋势。秦岭以东地区常绿阔叶林潜在适宜生境的北部边界无明显变化,增加的潜在适宜生境主要位于青藏高原东南部和南部地区(图 3)。

表 4 不同气候情景和大气环流模型条件下常绿阔叶林潜在适宜生境面积和百分比的变化

Table 4 Variation of potential suitable habitat for evergreen broadleaf forest in area and percentage relative to climate scenario and atmospheric circulation model

气候条件	适宜生境面积/万 km ²	变化百分比/%
基准气候	243.0	0
cccma_RCP 2.6	278.2	14.5
cccma_RCP 8.5	286.9	18.1
csiro_RCP 2.6	254.5	4.8
csiro_RCP 8.5	265.0	9.1

2.3 环境因子重要性

由图 4 可知,5 个气候因子中年降水量为研究尺度上影响我国常绿阔叶林分布最主要的气候因子,其次为气温季节性变化。

2.4 潜在适宜生境变化原因

由表 5 可知,不同气候情景和大气环流模型预测未来青藏高寒区平均年降水量相对于基准气候条件下呈明显增加趋势。同一大气环流模型条件下,RCP 8.5 气候情景预测平均年降水量增加幅度明显大于 RCP 2.6 气候情景。未来 4 种气候条件下,青藏高寒区年降水量增幅越大,预测的常绿阔叶林潜在适宜生境面积增幅越大。

表 5 青藏高寒区年降水量变化及常绿阔叶林潜在适宜生境增加面积

Table 5 Variation of annual perception and increase in area of potential suitable habitat for evergreen broadleaf forest in alpine regions of the Qinghai-Tibet Plateau

气候条件	年降水量变化/mm	适宜生境增加面积/万 km ²
cccma_RCP 2.6	115.0	28.9
cccma_RCP 8.5	148.3	34.3
csiro_RCP 2.6	34.1	13.4
csiro_RCP 8.5	41.7	25.5

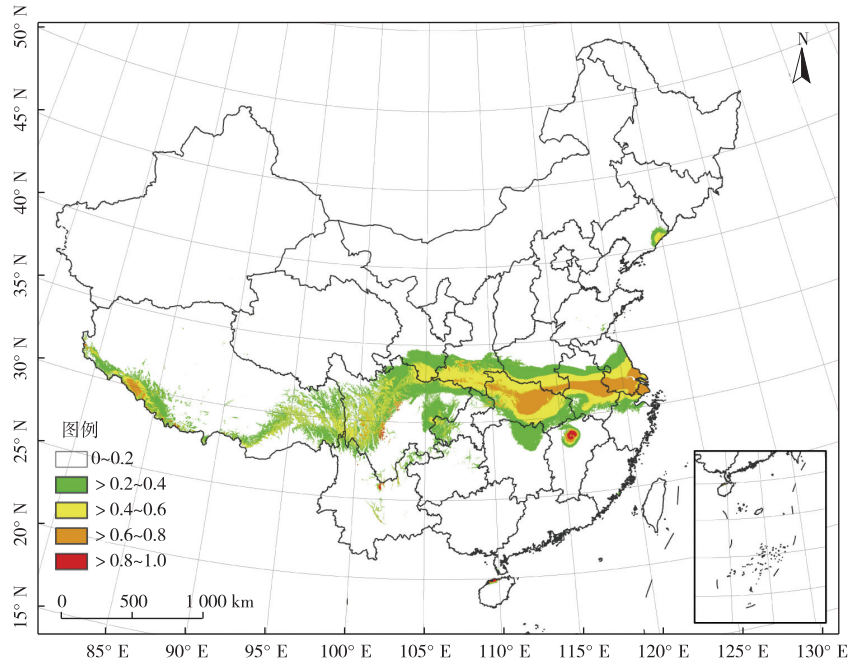


图2 每一栅格点上4个物种分布模型预测常绿阔叶林适宜程度的最大值与最小值之差

Fig. 2 Differences in value between the maximum suitability and the minimum suitability at each grid point predicted by the four species distribution models for evergreen broadleaf forest

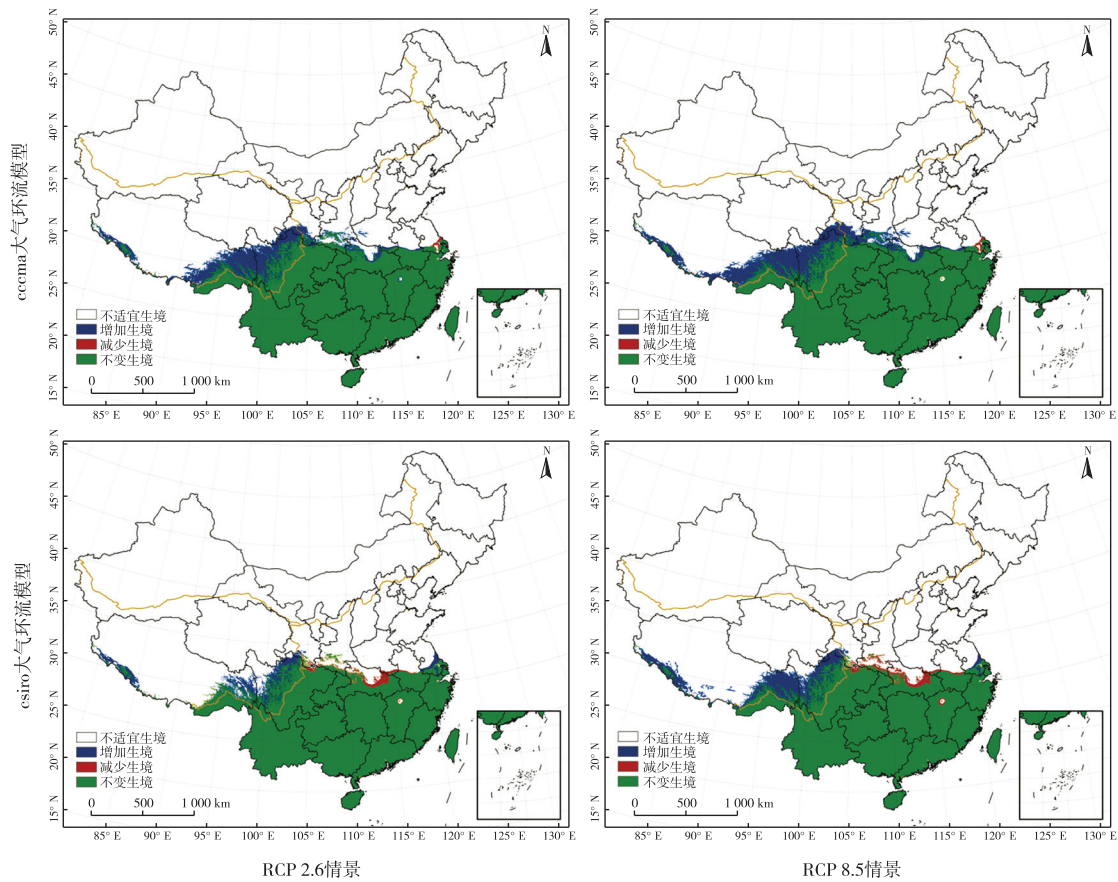


图3 不同气候情景和大气环流模型下常绿阔叶林潜在适宜生境范围的变化

Fig. 3 Variation of potential suitable habitat for evergreen broadleaf forest in scope relative to climate scenario and atmospheric circulation model

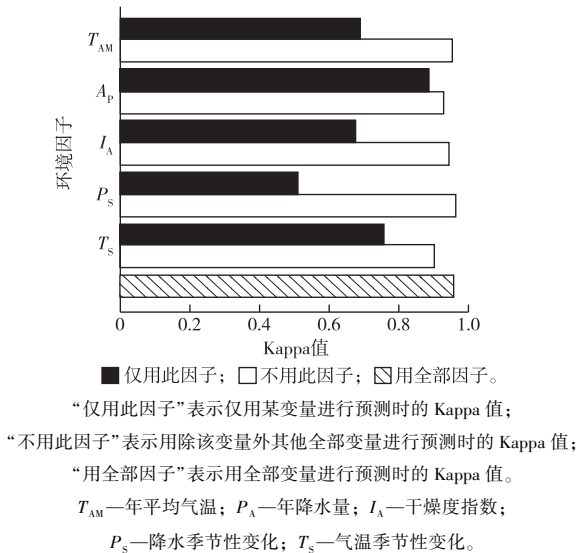


图4 环境因子对常绿阔叶林分布重要性的刀切法检验
 Fig. 4 Jackknife analysis of importance of environmental variables to distribution of evergreen broadleaf forests

3 讨论

利用 IPCC AR5 发布的最新气候情景数据,结合物种分布多模型集合预测平台 ModEco,分析未来不同气候变化特征下我国常绿阔叶林潜在适宜生境的变化。结果表明,气候变化将导致我国常绿阔叶林潜在适宜生境面积增加,增加的潜在适宜生境主要位于青藏高原南部和东南部地区;不同温室气体排放情景下常绿阔叶林潜在适宜生境面积变化表明,大气中排放的温室气体浓度越高,我国常绿阔叶林潜在适宜生境面积将增加越大;气候变化导致青藏高原地区年降水量增加是该区域常绿阔叶林潜在适宜生境面积增加的主要原因。

与传统单一模型和单一气候变化特征的物种潜在适宜生境预测方法相比,该研究通过多模型集合预测方法,分析不同气候变化特征下我国常绿阔叶林的潜在适宜生境,降低了预测结果的不确定性,提高了预测结果的可信度。由于物种分布模型建模过程中需要物种的“不分布点”数据,通常的解决方案是在研究区内随机生成一定数量的伪不分布点^[32-33]。但是,由于我国特殊的历史背景,大量的常绿阔叶林被砍伐,并最终被马尾松等速生针叶林所替代,随机生成的不分布点必然不能反映实际的植被自然分布规律。首先通过建立我国常绿阔叶林的生物气候包络,然后在生物气候包络外生成常绿阔叶林的不分布点数据,降低了不分布点数据的误差,提高了模型预测结果的可信度^[34]。

虽然气候是大尺度上影响植被功能型分布最主要的环境要素,但实际植被分布还受土壤中有机质含量、种间竞争和人为干扰等多种因素之间复杂交互作用的影响^[3,35]。另外,由于植被对于气候变化的响应通常具有一定的滞后性^[18]。因此,该研究预测的结果是“理想”状态下未来我国常绿阔叶林的分布。受制于环境数据的空间分辨率、数据插值方法以及地区小气候条件的影响,可能存在研究结果在局部地区与实际并不一致的情况。

常绿阔叶林是由不同树种组成的一种地带性森林类型。不同的物种对气候变化的响应也并不完全一致,未来需要加强不同物种对气候变化响应敏感性的研究。该研究结果表明,气候变化将导致我国常绿阔叶林潜在适宜生境向青藏高原腹地扩展,其中青藏高原东部边缘地区为常绿阔叶林潜在适宜生境变化的主要地区。青藏高原东部边缘地区是目前我国生物多样性热点地区,植被类型的改变将会对该区域生物多样性格局产生巨大的影响^[36]。另外,青藏高原作为我国与东亚气候系统稳定的重要屏障,分布着丰富多样、独具特色的特殊生态系统类型和珍稀动植物种类,尤其是高原冰冻圈以及高寒环境条件下的脆弱生态系统对全球环境变化和人类干扰响应十分敏感^[37]。因此,未来需要加强对青藏高原及其东部边缘地区植被和生物多样性气候变化响应的监测与研究。

参考文献:

- [1] IPCC Working Group I. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. Geneva: IPCC, 2013: 5-57.
- [2] 邓玉娇, 匡耀求, 黄宁生, 等. 温室效应增强背景下城市热环境变化的遥感分析: 以广东省东莞市为例 [J]. 地理科学, 2008, 28(6): 814-819.
- [3] 吕佳佳, 吴建国. 气候变化对植物及植被分布的影响研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6): 85-95.
- [4] 陈瑜, 马春森. 气候变暖对昆虫影响研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2159-2172.
- [5] 吴伟伟, 徐海根, 吴军, 等. 气候变化对鸟类影响的研究进展 [J]. 生物多样性, 2012, 20(1): 108-115.
- [6] 丁圣彦, 宋永昌. 常绿阔叶林植被动态研究 [J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1769-1779.
- [7] LIU J G. Complex Forces Affect China's Biodiversity [M] // RAVEN P H, SODHI N S, GIBSON L. Conservation Biology: Voices From the Tropics. New York, USA: John Wiley and Sons Ltd, 2013: 207-215.
- [8] 中国国家履行《生物多样性公约》办公室. 森林的生物多样性 [EB/OL]. (2007-11-18) [2014-05-23]. http://www.biodiv.gov.cn/images_biodiv/ecosystems/forests-zh.htm.
- [9] 顾志宏, 金崑, 刘世荣, 等. 四川省白河自然保护区川金丝猴生

- 境评价[J].林业科学,2007,43(8):96-99.
- [10] DAI B, DOWELL S D, GARSON P J, *et al.* Habitat Utilisation by the Threatened Sichuan Partridge *Arborophila rufipectus*: Consequences for Managing Newly Protected Areas in Southern China [J]. Bird Conservation International, 2009, 19(2): 187-198.
- [11] AUSTIN M P. Spatial Prediction of Species Distribution: An Interface Between Ecological Theory and Statistical Modelling [J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2): 101-118.
- [12] JACKSON C R, ROBERTSON M P. Predicting the Potential Distribution of an Endangered Cryptic Subterranean Mammal From Few Occurrence Records [J]. Journal for Nature Conservation, 2011, 19(2): 87-94.
- [13] WILSON C D, ROBERTS D, REID N. Applying Species Distribution Modelling to Identify Areas of High Conservation Value for Endangered Species: A Case Study Using *Margaritifera margaritifera* (L.) [J]. Biological Conservation, 2011, 144(2): 821-829.
- [14] ADHIKARI D, BARIK S K, UPADHAYA K. Habitat Distribution Modelling for Reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a Critically Endangered Tree Species of Northeastern India [J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 37-43.
- [15] LIANG L, CLARK J T, KONG N, *et al.* Spatial Analysis Facilitates Invasive Species Risk Assessment [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 315: 22-29.
- [16] EVANGELISTA P H, KUMAR S, STOHLGREN T J, *et al.* Assessing Forest Vulnerability and the Potential Distribution of Pine Beetles Under Current and Future Climate Scenarios in the Interior West of the US [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262: 307-316.
- [17] PLISCOFF P, ARROYO M T K, CAVIERES L. Changes in the Main Vegetation Types of Chile Predicted Under Climate Change Based on a Preliminary Study: Models, Uncertainties and Adapting Research to a Dynamic Biodiversity World [J]. Anales Instituto Patagonia, 2012, 40(1): 81-86.
- [18] WONG M H G, LI R Q, XU M, *et al.* An Integrative Approach to Assessing the Potential Impacts of Climate Change on the Yunnan Snub-Nosed Monkey [J]. Biological Conservation, 2013, 158: 401-409.
- [19] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图: 以油松为例 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5749-5761.
- [20] 翟天庆, 李欣海. 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2361-2370.
- [21] ARAÚJO M B, NEW M. Ensemble Forecasting of Species Distributions [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2007, 22(1): 42-47.
- [22] THULLER W, LAFOURCADE B, ENGLER R, *et al.* BIOMOD: A Platform for Ensemble Forecasting of Species Distributions [J]. Ecography, 2009, 32(3): 369-373.
- [23] GUO Q H, LIU Y. Modeco: An Integrated Software Package for Ecological Niche Modeling [J]. Ecography, 2010, 33(4): 1-6.
- [24] WOODWARD F I, WILLIAMS B G. Climate and Plant Distribution at Global and Local Scales [J]. Vegetatio, 1987, 69(1/2/3): 189-197.
- [25] HOLDRIDGE L R. Life Zone Ecology [M]. San Jose: Tropical Science Center, 1967: 206.
- [26] YIM Y, KIRA T. Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula; 1. Distribution of Some Indices of Thermal Climate [J]. Japanese Journal of Ecology, 1975, 25(2): 77-88.
- [27] YIM Y, KIRA T. Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula; 2. Distribution of Climatic Humidity/Aridity [J]. Japanese Journal of Ecology, 1976, 26(3): 157-164.
- [28] LEMKE D, HULME P E, BROWN J A, *et al.* Distribution Modelling of Japanese Honeysuckle (*Lonicera japonica*) Invasion in the Cumberland Plateau and Mountain Region, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262: 139-146.
- [29] YANG X Q, KUSHWAHA S P S, SARAN S, *et al.* Maxent Modeling for Predicting the Potential Distribution of Medicinal Plant, *Justicia Adhatoda* L. in Lesser Himalayan Foothills [J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [30] 刘建宏, 熊小真, 潘涌智, 等. 滇柏大瘿小蜂 *Megastigmus dulouxiana* Roques & Pan 的潜在分布区预测 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 39-43.
- [31] 赵济. 中国自然地理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 176-187.
- [32] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3): 231-259.
- [33] TORRES R, JAYAT J P, PACHECO S. Modelling Potential Impacts of Climate Change on the Bioclimatic Envelope and Conservation of the Maned Wolf (*Chrysocyon brachyurus*) [J]. Mammalian Biology, 2013, 78(1): 41-49.
- [34] BARBET-MASSIN M, ROME Q, MULLER F, *et al.* Climate Change Increases the Risk of Invasion by the Yellow-Legged Hornet [J]. Biological Conservation, 2013, 157: 4-10.
- [35] 刘华民, 吴绍洪, 郑度, 等. 潜在自然植被研究与展望 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 62-70.
- [36] 徐海根, 曹铭昌, 丁晖, 等. 中国生物多样性本底评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 22-92.
- [37] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.

作者简介: 雷军成(1984—), 男, 江苏连云港人, 博士生, 主要研究方向为生物多样性保护。E-mail: ljctnt@126.com

(责任编辑: 陈 昕)