

基于 MaxEnt 模型对日本落叶松 在中国潜在分布区的预测

申家朋¹, 陈东升¹, 洪奕丰^{1,2}, 孙晓梅¹, 张守攻^{1,①}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 国家林业和草原局华东调查规划设计院, 浙江 杭州 310019)

摘要: 根据日本落叶松 [*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.] 99 个分布记录数据和 19 个气候变量, 利用 MaxEnt 模型预测了日本落叶松在中国当前时期以及未来 2 个时期 (2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年) RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下的潜在分布区。结果表明: 当前时期日本落叶松的适宜区和高适宜区面积分别为 35.59×10^4 和 6.99×10^4 km², 分别占研究区总面积的 3.71% 和 0.73%。其中, 高适宜区主要集中在“秦岭-大巴山区”和“辽东地区”, 二者的面积占高适宜区总面积的 85% 以上。与当前时期相比, 2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 4 种气候情景下日本落叶松的适宜区面积持续增加; RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下高适宜区面积均增加, 而 RCP2.6 情景下高适宜区面积则减少。“秦岭-大巴山区”高适宜区总体表现为缩小趋势, 且破碎化明显, 而“辽东地区”高适宜区则有向东北方向移动的趋势, 纬度向北移动了 0.8°~4.5°, 经度向东移动了 0.9°~5.5°, 吉林为高适宜区面积增加最大的省份。影响日本落叶松分布的主要气候变量为最热季降水量、温度季节变化、降水季节变化和年平均温度, 累计贡献率达 90% 以上。上述研究结果可为未来气候变化背景下日本落叶松的经营管理提供参考。

关键词: MaxEnt 模型; 日本落叶松; 潜在分布区; 气候变化

中图分类号: Q141; Q948.13 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)03-0019-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.03

Prediction on potential distribution areas of *Larix kaempferi* in China based on MaxEnt model

SHEN Jiapeng¹, CHEN Dongsheng¹, HONG Yifeng^{1,2}, SUN Xiaomei¹, ZHANG Shougong^{1,①} (1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. East China Inventory and Planning Institute, State Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(3): 19-25

Abstract: Based on 99 distribution record data of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. and 19 climatic variables, potential distribution areas of *L. kaempferi* in the current period and under the scenarios of RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 in two future periods (from 2041 to 2060 and 2061 to 2080) were predicted by using MaxEnt model. The results show that the areas of suitable area and high suitable area of *L. kaempferi* in the current period are 35.59×10^4 and 6.99×10^4 km², respectively, accounting for 3.71% and 0.73% of the total area of research area. In which, the high suitable area mainly distributes in “Qinling-Daba Mountain” and “Eastern Liaoning Province”, and their area accounts for more than 85% of the total area of high suitable area. Compared with the current period, the area of suitable area of *L. kaempferi* increases continuously under four climate scenarios from 2041 to 2060 and 2061 to 2080; the area of high suitable area all increases under the scenarios of RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5, while

收稿日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31430017)

作者简介: 申家朋 (1987—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事森林生态、人工林培育及经营管理方面的研究。

①通信作者 E-mail: sgzhang@caf.ac.cn

decreases under the scenario of RCP2.6. The high suitable area in “Qinling-Daba Mountain” shows a tendency to decrease in general as well as an obvious fragmentation, while that in “Eastern Liaoning Province” shows a tendency to move toward northeast (moving northward 0.8° – 4.5° at latitude and moving eastward 0.9° – 5.5° at longitude), and the area increment of high suitable area in Jilin Province is the largest. Main climatic variables affecting the distribution of *L. kaempferi* are precipitation of the hottest quarter, temperature seasonality, precipitation seasonality, and annual mean temperature, and the accumulated contribution rate is greater than 90%. The above research results can provide reference for the management of *L. kaempferi* under future climate change background.

Key words: MaxEnt model; *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.; potential distribution area; climate change

全球气候变化对物种地理分布和生存具有重要的影响,在过去的几十年里,由于降水和温度的变化导致许多物种分布范围变窄,甚至灭绝^[1-6]。物种分布模型(species distribution model, SDM)是基于物种的当前存在数据和气候数据,专业预测物种适宜生境和潜在分布的模型^[7-8]。目前物种分布模型已广泛应用于生物多样性保护^[9-10]以及全球气候变化对物种潜在地理分布影响^[11-14]等方面的研究。一般采用的物种分布模型包括广义相加模型^[15]、基于遗传算法的规则组合预测模型^[16]、生态位模型^[17]和 MaxEnt 模型^[18]。其中,MaxEnt 模型通过模拟物种及其气候的概率分布的最大熵,预测物种潜在分布区域,在濒危物种^[19-20]、入侵物种^[21-22]和经济物种^[23-24]等方面广泛应用。

日本落叶松 [*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.] 隶属于松科 (Pinaceae) 落叶松属 (*Larix* Mill.), 树干端直、速生丰产、材性良好,具有很高的经济价值和生态价值。日本落叶松原产地为日本,在欧洲和北美等地均有引种。19 世纪末,中国开始引种日本落叶松,主要在东北、华北、西北和西南等地区栽培^[25]。目前,针对日本落叶松的研究主要集中在优良种质资源、遗传多样性和抚育管理等方面^[25-29],而对于日本落叶松地理分布与气候相关性的研究相对较少^[30-31],特别是对于气候变化背景下日本落叶松地理分布格局发生的变化等问题仍需进一步研究。

本研究基于文献记录和野外实地调查数据,结合 ArcGIS 技术,利用 MaxEnt 模型预测日本落叶松当前时期潜在分布区,并结合未来 2 个时期(2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年)4 种代表性浓缩途径 (representative concentration pathways, RCPs) 情景,分析日本落叶松的潜在分布格局及变化规律,以期为日本落叶松的经营管理及其应对气候变化的措施提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 物种分布数据

日本落叶松在中国的分布记录数据通过中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>)、全球生物多样性信息网络 (<https://www.gbif.org/>) 以及野外实地调查获得,共收集到 99 个日本落叶松分布记录数据。

1.2 气候数据

本研究采用的 19 个气候变量数据来源于 WorldClim 数据库 (<http://worldclim.org/>), 空间分辨率为 $2.5'$, 包括年平均温度 (Bio-1)、平均日温差 (Bio-2)、等温性 (Bio-3)、温度季节变化 (Bio-4)、最热月最高温度 (Bio-5)、最冷月最低温度 (Bio-6)、年温度变化范围 (Bio-7)、最湿季平均温度 (Bio-8)、最干季平均温度 (Bio-9)、最热季平均温度 (Bio-10)、最冷季平均温度 (Bio-11)、年平均降水量 (Bio-12)、最湿月降水量 (Bio-13)、最干月降水量 (Bio-14)、降水量季节变化 (Bio-15)、最湿季降水量 (Bio-16)、最干季降水量 (Bio-17)、最热季降水量 (Bio-18) 和最冷季降水量 (Bio-19)。当前时期 (1950 年至 2000 年) 气候数据以全球各地气象站观测数据为基础,通过 GIS 插值法生成^[32]; 未来 2 个时期 (2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年) 的气候数据采用气候系统模式 CCSM4 生成,分别为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景,分别代表辐射强迫力在 2100 年增加 2.6 、 4.5 、 6.0 和 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, RCP2.6 是暖化减缓的情景, RCP4.5 和 RCP6.0 属于稳定情景,而 RCP8.5 属于温室气体的高度排放情景,将造成全球平均变暖温度分别为 1.6°C 、 2.4°C 、 2.8°C 和 4.3°C ^[32]。将气候变量数据经 ArcGIS 10.2 软件处理后,得到不同时期气候变量的图层数据用于

MaxEnt 模型预测。中国行政区的地图资料从国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>) 获得。

1.3 潜在分布区预测

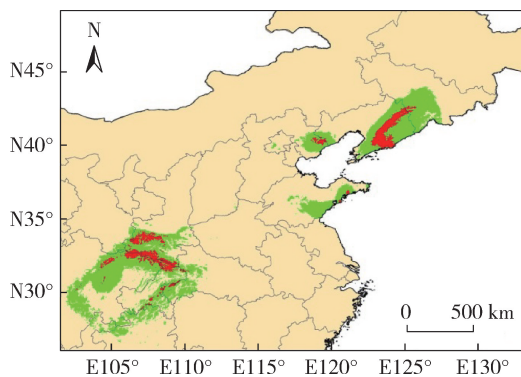
采用 MaxEnt 3.3.3k 软件 (<http://www.cs.princeton.edu/schapiro/MaxEnt>) 预测日本落叶松潜在分布区。随机选取全部数据的 75% 进行训练, 剩余的 25% 数据进行验证。利用 MaxEnt 模型构建日本落叶松地理分布与气候关系模型, 采用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线对模型精度进行评价^[32-33]。同时, 采用刀切法 (jackknife) 检验并评价各气候变量, 判断不同气候变量对日本落叶松潜在分布的影响。将 MaxEnt 模型最终预测结果导入 ArcGIS 10.2 软件绘制地图, 根据适宜生境评价指数 (S) 将日本落叶松生境划分为不适宜区 ($S \leq 50\%$)、适宜区 ($50\% < S < 75\%$) 和高适宜区 ($S \geq 75\%$) 3 类^[33-34]。

2 结果和分析

2.1 不同时期日本落叶松潜在分布格局

基于日本落叶松分布记录数据和 MaxEnt 模型模拟的当前时期日本落叶松潜在分布区, 采用 ROC 曲线分析模型的预测衡量指标, 训练和验证 AUC 值分别为 0.993 和 0.992, 表明 MaxEnt 模型预测结果极准确, 可用于日本落叶松地理分布格局的研究。

2.1.1 当前时期日本落叶松潜在分布格局 当前时期日本落叶松的潜在分布区见图 1。结果显示: 当前



■: 不适宜区 Unsuitable area; ■: 适宜区 Suitable area; ■: 高适宜区 High suitable area.

图 1 当前时期日本落叶松的潜在分布区
Fig. 1 Potential distribution areas of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. in the current period

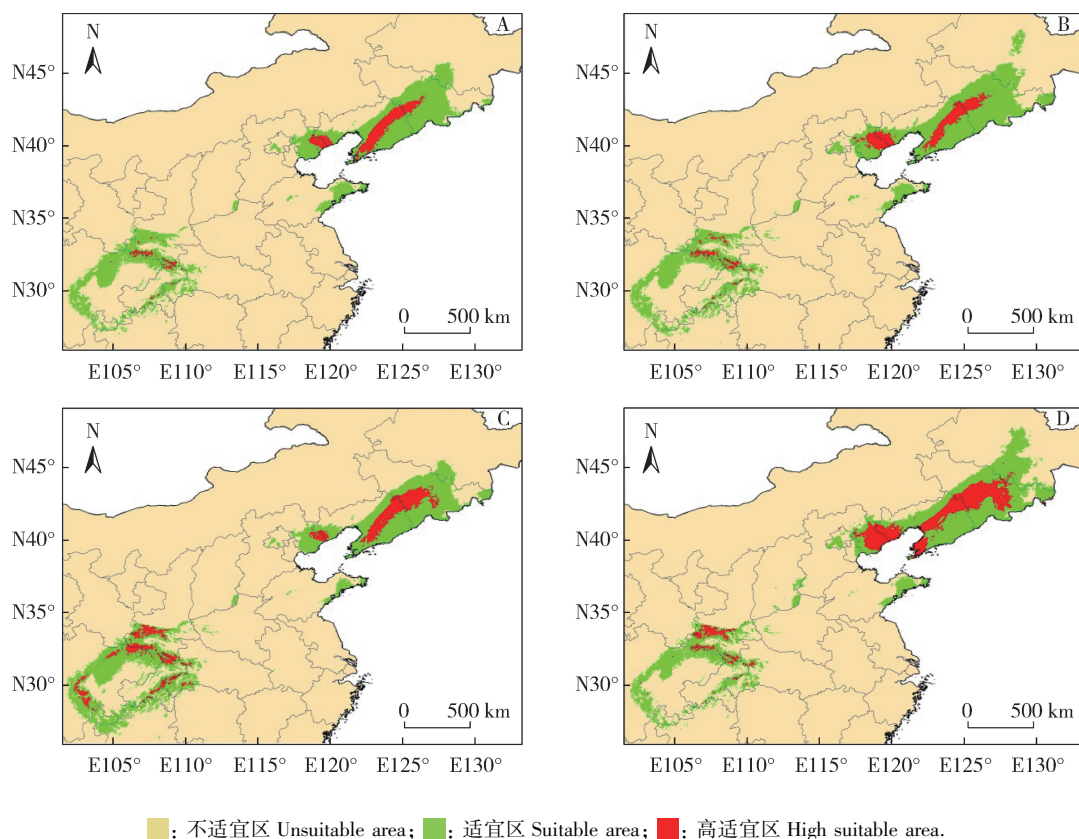
时期, 日本落叶松的适宜区主要集中在吉林东南部、辽宁东部、河北东北部、山东东部、甘肃东南部、陕西南部、重庆、四川中东部、湖北西部和贵州西北部。日本落叶松的高适宜区主要集中在“秦岭-大巴山区”和“辽东地区”, 具体为辽宁东部、陕西南部、四川中东部、重庆和河北东北部, 其中, 辽宁、陕西、四川和重庆的高适宜区面积分别占高适宜区总面积的 34.50%、28.07%、16.41% 和 9.63%, 累积在 85% 以上 (表 1)。

表 1 当前时期日本落叶松适宜区和高适宜区的面积及所占比例¹⁾
Table 1 Area and percentage of suitable area and high suitable area of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. in the current period¹⁾

省(市) Province (City)	适宜区 Suitable area		高适宜区 High suitable area	
	A/km ²	P/%	A/km ²	P/%
四川 Sichuan	9.40×10 ⁴	26.40	1.15×10 ⁴	16.41
辽宁 Liaoning	5.50×10 ⁴	15.45	2.41×10 ⁴	34.50
吉林 Jilin	4.78×10 ⁴	13.42	0.15×10 ⁴	2.21
陕西 Shaanxi	3.79×10 ⁴	10.65	1.96×10 ⁴	28.07
山东 Shandong	2.88×10 ⁴	8.10	0.11×10 ⁴	1.51
湖北 Hubei	2.48×10 ⁴	6.96	0.19×10 ⁴	2.73
重庆 Chongqing	2.28×10 ⁴	6.41	0.67×10 ⁴	9.63
贵州 Guizhou	1.81×10 ⁴	5.09	0.03×10 ⁴	0.50
河北 Hebei	1.39×10 ⁴	3.90	0.26×10 ⁴	3.70
甘肃 Gansu	0.58×10 ⁴	1.64	0.05×10 ⁴	0.70

¹⁾ A: 面积 Area; P: 日本落叶松在各省(市)适宜区(高适宜区)面积占适宜区(高适宜区)总面积的比例 Percentage of area of suitable area (high suitable area) of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. in each province (city) to total area of suitable area (high suitable area).

2.1.2 2041 年至 2060 年日本落叶松潜在分布格局 2041 年至 2060 年 4 种气候情景下日本落叶松潜在分布区见图 2。结果显示: 与当前时期相比, 2041 年至 2060 年, 吉林、辽宁和河北的日本落叶松适宜区和高适宜区面积在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下呈增加趋势, 而甘肃、山东和陕西的适宜区和高适宜区面积呈减少趋势。“秦岭-大巴山区”高适宜区面积在 RCP6.0 情景下变化不大, 而在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下呈缩小、破碎化趋势, 其中, RCP2.6 情景下高适宜区面积减少了 72.55%; “辽东地区”高适宜区面积在 4 种气候情景下均有不同程度的增加, 其中, RCP8.5 情景下的高适宜区面积增加了 174.24%, 此外, “辽东地区”高适宜区面积在不同 RCP 情景下纬度向北移动了 0.8°~2.0°, 经度向东移动了 0.9°~2.8°, 吉林为高适宜区面积增加最大的省份。



A: RCP2.6 情景 RCP2.6 scenario; B: RCP4.5 情景 RCP4.5 scenario; C: RCP6.0 情景 RCP6.0 scenario; D: RCP8.5 情景 RCP8.5 scenario.

图 2 2041 年至 2060 年 4 种气候情景下日本落叶松潜在分布区
Fig. 2 Potential distribution areas of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. under four climate scenarios from 2041 to 2060

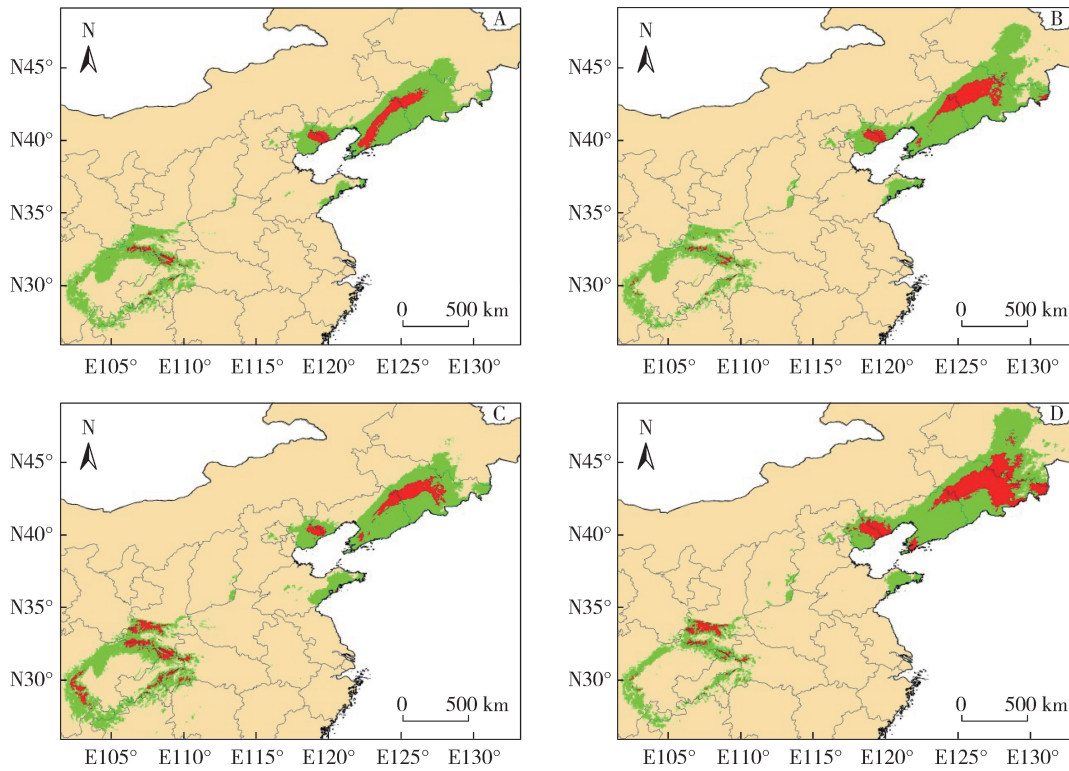
2.1.3 2061 年至 2080 年日本落叶松潜在分布格局
2061 年至 2080 年 4 种气候情景下日本落叶松潜在分布区见图 3。结果显示:与当前时期相比,2061 年至 2080 年,吉林、辽宁和河北的日本落叶松适宜区和高适宜区面积在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下呈增加趋势,甘肃和陕西的适宜区和高适宜区面积呈先增加后减少趋势。RCP6.0 情景下“秦岭-大巴山区”高适宜区面积变化不大,而 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下呈缩小、破碎化趋势,特别是 RCP4.5 情景下,其高适宜区面积减少了 74.66%;RCP2.6 情景下“辽东地区”高适宜区面积呈增加趋势,RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下呈减少趋势,此外,“辽东地区”在不同气候情景下纬度向北移动了 $1.0^{\circ} \sim 4.5^{\circ}$,经度向东移动了 $0.9^{\circ} \sim 5.5^{\circ}$,吉林为高适宜区面积增加最大的省份。

2.2 不同时期和气候情景下日本落叶松潜在分布区变化分析

不同时期和气候情景下日本落叶松潜在分布区

的面积及所占比例见表 2。结果显示:当前时期日本落叶松适宜区和高适宜区的面积分别为 35.59×10^4 和 6.99×10^4 km^2 ,分别占研究区总面积的 3.71% 和 0.73%。与当前时期相比,2041 年至 2060 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下日本落叶松适宜区面积增加了 7.75%~27.37%;RCP2.6 情景下高适宜区面积减少了 11.02%,而 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下高适宜区面积分别增加了 8.30%、61.23% 和 119.31%。与当前时期相比,2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下日本落叶松适宜区面积增加了 16.61%~33.72%;RCP2.6 情景下高适宜区面积减少了 9.44%,RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下高适宜区面积分别增加了 17.45%、44.78% 和 144.49%。

与当前时期相比,2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下日本落叶松适宜区面积均有不同程度的增加,这 4 种气候情景下适宜区面积增加幅度由大到小依次为



■: 不适宜区 Unsuitable area; ■: 适宜区 Suitable area; ■: 高适宜区 High suitable area.

A: RCP2.6 情景 RCP2.6 scenario; B: RCP4.5 情景 RCP4.5 scenario; C: RCP6.0 情景 RCP6.0 scenario; D: RCP8.5 情景 RCP8.5 scenario.

图 3 2061 年至 2080 年 4 种气候情景下日本落叶松潜在分布区
Fig. 3 Potential distribution areas of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. under four climate scenarios from 2061 to 2080

表 2 不同时期和气候情景下日本落叶松适宜区和高适宜区的面积及所占比例¹⁾
Table 2 Area and percentage of suitable area and high suitable area of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. in different periods and climate scenarios¹⁾

时期和气候情景 Period and climate scenario	适宜区 Suitable area		高适宜区 High suitable area	
	A/km ²	P/%	A/km ²	P/%
当前 Current	35.59×10 ⁴	3.71	6.99×10 ⁴	0.73
2041-2060				
RCP2.6	38.35×10 ⁴	4.00	6.22×10 ⁴	0.65
RCP4.5	45.33×10 ⁴	4.73	7.57×10 ⁴	0.79
RCP6.0	42.27×10 ⁴	4.41	11.27×10 ⁴	1.17
RCP8.5	42.47×10 ⁴	4.43	15.33×10 ⁴	1.60
2061-2080				
RCP2.6	41.50×10 ⁴	4.33	6.33×10 ⁴	0.66
RCP4.5	47.59×10 ⁴	4.96	8.21×10 ⁴	0.86
RCP6.0	44.55×10 ⁴	4.64	10.12×10 ⁴	1.05
RCP8.5	46.17×10 ⁴	4.81	17.09×10 ⁴	1.78

¹⁾ A: 面积 Area; P: 不同时期和气候情景下日本落叶松适宜区(高适宜区)面积占研究区总面积的比例 Percentage of area of suitable area (high suitable area) of *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. in different periods and climate scenarios to total area of research area.

RCP4.5 情景、RCP8.0 情景、RCP6.0 情景、RCP2.6 情景,表明随着全球温度的升高,将会有更多的地区适宜日本落叶松分布。与当前时期相比,2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下日本落叶松高适宜区面积均有不同程度的增加,这 3 种气候情景下高适宜面积增加幅度由大到小依次为 RCP8.5 情景、RCP6.0 情景、RCP4.5 情景,但 RCP2.6 情景下高适宜区面积减少,表明全球温度升高小于等于 1.6 °C 时,日本落叶松高适宜区面积减少,而当全球温度升高 1.6 °C 以上时,日本落叶松高适宜区面积将会增加。

2.3 影响日本落叶松分布的主导气候变量

MaxEnt 模型中主要气候变量的贡献率见表 3。结果显示:根据 MaxEnt 模型中主要气候变量对模拟预测日本落叶松地理分布的贡献率,最热季降水量、温度季节变化、降水量季节变化和年平均温度的累计贡献率达到 90% 以上,说明这 4 个气候变量是影响日本落叶松分布的主要气候变量。

表 3 MaxEnt 模型中主要气候变量的贡献率
Table 3 Contribution rate of main climatic variables in MaxEnt model

编号 Code	气候变量 Climatic variable	贡献率/% Contribution rate
Bio-18	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter	52.0
Bio-4	温度季节变化 Temperature seasonality	19.6
Bio-15	降水量季节变化 Precipitation seasonality	10.8
Bio-1	年平均温度 Annual mean temperature	7.8
Bio-11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	2.9
Bio-19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter	2.6
Bio-16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	1.0

3 讨论和结论

根据 MaxEnt 模型预测结果,当前时期,日本落叶松在中国的适宜区主要集中在吉林东南部、辽宁东部、河北东北部、山东东部、甘肃东南部、陕西南部、重庆、四川中东部、湖北西部和贵州西北部,与前人调查结果基本一致^[30-31]。日本落叶松原产地气候凉爽,空气湿度相对较大^[30],预测分布范围的气候环境与之相符合。马常耕等^[25]分析了中国 30 份日本落叶松人工林的树高和胸径,认为“秦岭-大巴山区”最适合其栽培。本研究结果显示:日本落叶松高适宜区主要集中在“秦岭-大巴山区”和“辽东地区”,这 2 个区域的高适宜区面积占高适宜区总面积的 85% 以上。

在气候变化背景下不同植物适宜区的变化规律不同,对气候变化的响应存在差异,植被适宜区面积增加或减少的趋势并不一致。高文强等^[34]发现,RCP4.5 情景下栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.) 分布面积增加,而 RCP8.5 情景下栓皮栎分布面积缩小。刘建锋等^[35]预测未来气候变化将会导致杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 分布面积缩小。马松梅等^[36]研究认为,蒙古扁桃 [*Amygdalus mongolica* (Maxim.) Ricker] 在 2050 年和 2070 年的潜在分布面积为当前时期的 137% 和 142%。本研究认为,随着全球气候变暖,与当前时期相比,2041 年至 2060 年以及 2061 年至 2080 年 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下日本落叶松适宜区面积以及 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下高适宜区面积增加,RCP2.6 情景下高适宜区面积减少。“秦岭-大巴山区”高适宜区总体表现为缩小趋势,且破碎化明显,这是因为西部和高海拔地区植被较东部和低海拔

地区更容易受全球气候变化的影响,植被类型也更容易变化^[37]。而“秦岭-大巴山区”为高海拔地区,气候变化导致这些地区温度升高,不再适于日本落叶松生长和分布。全球气候变化会导致北半球的植被向高纬度地区迁移^[38-39]。本研究结果表明:未来气候变化将导致“辽东地区”高适宜区向东北方向移动,纬度向北移动了 0.8°~4.5°,经度向东移动了 0.9°~5.5°,吉林为日本落叶松高适宜区面积增加最大的省份。“秦岭-大巴山区”高适宜区未表现出明显的纬度迁移,而表现为缩小、破碎化的趋势,这可能是由于该地区为高海拔山区,地形复杂,而气候本身随地区变化的差异很大,导致“秦岭-大巴山区”高适宜区的日本落叶松无法向高纬度迁移。

李焱等^[23]认为,气温季节变化和降水季节变化是对小叶栎 (*Quercus chenii* Nakai) 地理分布影响最大的气候因子。高文强等^[34]认为,主导栓皮栎地理分布的气候因子为最冷月最低气温、最冷季平均气温和年降水量。郭杰等^[24]发现,影响党参 [*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.] 分布的主要气候因子为年均温和降水的季节性、最冷季平均温以及最干季降水量。本研究也得到类似结论,认为温度和降水可能是影响日本落叶松地理分布格局的气候因子,其中,最热季降水量、温度季节变化、降水量季节变化和年平均温度的累计贡献率达 90% 以上,是制约日本落叶松分布的主要气候变量。除了气候因子外,土壤条件、人为干扰、物种进化及其对气候环境的适应性改变等也影响物种分布,但由于目前技术条件等限制,本研究未做考虑。本研究可为日本落叶松在未来气候变化背景下的经营管理提供参考。

参考文献:

- [1] POUNDS J A, FOGDEN M P L, CAMPBELL J H. Biological response to climate change on a tropical mountain [J]. *Nature*, 1999, 398(6728): 611-615.
- [2] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [3] SVENNING J-C, SKOV F. Limited filling of the potential range in European tree species [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(7): 565-573.
- [4] 毛俐慧, 李焱, 刘畅, 等. 基于 MaxEnt 模型预测小叶小羽藓在中国的潜在分布区 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 54-60.
- [5] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生

- 物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [6] 钟永德, 李迈和, KRAEUCHI N. 地球暖化促进植物迁移与入侵[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 347-356.
- [7] FITZPATRICK M C, GOVE A D, SANDERS N J, et al. Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: the *Banksia* (Proteaceae) of Western Australia[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1337-1352.
- [8] CARROLL C, DUNK J R, MOILANEN A. Optimizing resiliency of reserve networks to climate change: multispecies conservation planning in the Pacific Northwest, USA [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 891-904.
- [9] FIELDING A H, BELL J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models [J]. *Environmental Conservation*, 1997, 24(1): 38-49.
- [10] 曹铭昌, 周广胜, 翁恩生. 广义模型及分类回归树在物种分布模拟中的应用与比较 [J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2031-2040.
- [11] 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[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [12] PEARSON R G, DAWSON T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12(5): 361-371.
- [13] 王闰利, 王茹琳, 姜 淦, 等. 2050 年 3 种气候模式下稻纵卷叶螟对我国风险分析[J]. 江西农业学报, 2016, 28(6): 76-81.
- [14] 程 军, 沈 阳, 郭水良. 气候变暖对花叶藓属植物在中国的潜在分布范围影响的预测[J]. 生态科学, 2015, 34(1): 9-16.
- [15] HASTIE T, TIBSHIRANI R. *Generalized Additive Models* [M]. Stanford: Chapman and Hall, 1990: 2-16.
- [16] STOCKWELL D, PETERS D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(2): 143-158.
- [17] CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals [J]. *Biodiversity and Conservation*, 1993, 2(6): 667-680.
- [18] PHILIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.
- [19] 徐卫华, 罗 翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用[J]. 森林工程, 2010, 26(2): 1-3.
- [20] MATYUKHINA D S, MIQUELLE D G, MURZIN A A, et al. Assessing the influence of environmental parameters on Amur tiger distribution in the Russian Far East using a MaxEnt modeling approach[J]. *Achievements in the Life Sciences*, 2014, 8(2): 95-100.
- [21] PADALIA H, SRIVASTAVA V, KUSHWAHA S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: comparison of MaxEnt and GARP [J]. *Ecological Informatics*, 2014, 22: 36-43.
- [22] 张熙骛, 隋晓云, 吕 植, 等. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 182-188.
- [23] 李 垚, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1164-1178.
- [24] 郭 杰, 刘小平, 张 琴, 等. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 992-1000.
- [25] 马常耕, 王建华. 我国发展日本落叶松区域的探讨[J]. 林业实用技术, 1990(4): 26-28.
- [26] 杨秀艳, 张守攻, 孙晓梅, 等. 北亚热带高山区日本落叶松自由授粉家系遗传测定与二代优树选择[J]. 林业科学, 2010, 46(8): 45-50.
- [27] 张新叶, 白石进, 黄敏仁. 日本落叶松群体的叶绿体 SSR 分析 [J]. 遗传, 2004, 26(4): 486-490.
- [28] 孙晓梅, 楚秀丽, 张守攻, 等. 落叶松种间及其杂种木材物理力学性质评价[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 153-159.
- [29] 王景章, 丁振芳, 曾凡顺. 日本落叶松育种[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2008: 1-8.
- [30] 邵先倬. 日本落叶松生态调查研究[J]. 山东林业科技, 1985(1): 9-19.
- [31] 田志和. 日本落叶松育林学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995: 1-7.
- [32] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [33] 胡理乐, 张海英, 秦 岭, 等. 中国五味子分布范围及气候变化影响预测[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2445-2450.
- [34] 高文强, 王小菲, 江泽平, 等. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [35] 刘建锋, 康峰峰. 杉木潜在适生区及其对气候变化的响应 [J]. 西南林学院学报, 2010, 30(5): 22-24.
- [36] 马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 等. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 262-269.
- [37] MAHLSTEIN I, DANIEL J S, SOLOMON S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(8): 739-743.
- [38] 张 雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1091-1105.
- [39] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.

(责任编辑: 张明霞)