

基于物种分布模型的兴安落叶松林概率分布区动态研究

庞荣荣,刘鸣谦,高露双*,李思杰,韩新宇

(北京林业大学 林学院,森林资源和环境管理国家林草局重点实验室,国家林草局森林经营工程技术研究中心,
国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:全球变暖对森林的地理分布有重要影响,兴安落叶松是北方森林生态系统的重要组成部分。因此,有必要准确评价气候变暖对兴安落叶松天然林地理分布的影响,为制定兴安落叶松林的可持续经营提供依据,基于机械布点的方法在东北地区建立了68个半径为17.85 m、面积为1 000 m²的兴安落叶松天然林临时样圆。从ClimateAP软件获取1950—2017年的气候数据,通过M-K检验判定区域年均温突变点。根据影响兴安落叶松地理分布的8个潜在气候因子变量:年均温(MAT)、最冷月均温(MCMT)、最暖月均温(MWMT)、最冷最暖月温差(TD)、年均降水量(MAP)、秋季降水量(MAPA)、>5 °C年积温(DD>5 °C)和哈格里夫斯水分亏缺(HCMD),利用MaxEnt模型选取突变前后影响兴安落叶松林地理分布的主导气候因子,探讨突变前、后兴安落叶松林的潜在概率分布区的动态变化。结果表明,研究区年均温度在1984年之后发生突变;突变前、后影响兴安落叶松天然林生长概率分布区的主导因子均为DD>5 °C、MWMT和HCMD,且3个因子的累积贡献率均达到85%以上,在突变后主导因子中贡献率最大的因子由>5 °C积温(40.21%)转变为最暖月均温(40.29%),这2个时期温度的累积贡献率均高于降水;气候变暖使得兴安落叶松林的潜在气候生长概率分布区整体呈现北移的趋势,且不同概率分布区变化趋势具有差异性。兴安落叶松林不存在区、中概率区和高概率区的面积在突变后均减少,而低概率区的面积增加,兴安落叶松林适生区的总面积整体上仍呈现增加的趋势,其总面积由突变前的131.31万km²扩大至135.55万km²。本研究表明气候变暖对兴安落叶松林不同概率分布区的影响具有区域异质性,该研究结果可为未来兴安落叶松林的可持续经营管理提供科学依据。

关键词:兴安落叶松;气候变暖;物种分布模型;概率分布区

中图分类号:S791.222 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)06-0001-09

Dynamic Study on Probability Distribution Zone of *Larix gmelinii* Forest Based
on Species Distribution Model

PANG Rong-rong, LIU Ming-qian, GAO Lu-shuang*, LI Si-jie, HAN Xin-yu

(Beijing Forestry University, College of Forestry, National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory
of Forest Resources & Environmental Management; Research Center of Forest Management Engineering
of State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract:Global warming has a significant impact on the geographical distribution of forests. *Larix gmelinii* is an important part of forest ecosystem in Northern China. Therefore, it is necessary to accurately evaluate the impact of climate warming on the geographical distribution of *L. gmelinii* natural forest, and provide a basis for formulating the sustainable development of the forest. In this study, 68 temporary sample circles of *L. gmelinii* natural forest with a radius of 17.85 m and an area of 1 000 m² were established

收稿日期:2022-09-09 修回日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金(32371871);“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFD2201001-04)。

第一作者:庞荣荣。研究方向:森林结构与生长模型模拟。E-mail:prr9811@163.com

*通信作者:高露双,博士,教授。研究方向:森林结构与生长模型模拟。E-mail:gaolushuang@bjfu.edu.cn

in Northern China based on the method of mechanical point placement. The climate data from 1950 to 2017 were obtained from the Climate AP software, and the regional annual mean temperature abrupt point was checked by M-K. Eight potential climate factor variables affecting the geographical distribution of *L. gmelinii* forest were selected: i.e., mean annual temperature (MAT), mean coldest month temperature (MC-MT), mean warmest month temperature (MWMT), temperature difference between MWMT and MCMT (TD), mean annual precipitation (MAP), mean annual precipitation in autumn (MAPA), degree-days above 5 °C (DD>5 °C) and Hargreaves climatic moisture deficit (HCMD), using the MaxEnt model to select the dominant climatic factors affecting the geographical distribution of *L. gmelinii* forest before and after mutation, and dynamic changes of the potential probability distribution area of the *L. gmelinii* forest before and after the mutation were discussed. The results showed that the annual average temperature in the study area changed abruptly after 1984. The dominant factors affecting the growth probability distribution of the natural *L. gmelinii* forest before and after mutation were both DD>5 °C, MWMT and HCMD, and the cumulative contribution rates of the three factors were all reached more than 85%. After the mutation, the factor with the largest contribution rate changed from the degree-days above 5 °C (40.21%) to the mean warmest month temperature (40.29%), and the cumulative contribution rate of temperature in these two periods was higher than those of precipitation. Climate warming made the potential climate growth probability distribution area of *L. gmelinii* forest show a northward trend as a whole, and the change trends of different probability distribution areas were different. The area of non existence, medium probability and high probability areas of *L. gmelinii* forest all decreased after the mutation, while the area of low probability area increased. The total area of *L. gmelinii* forest of suitable area still showed an increasing trend, and its total area expanded from 1.313 1 million km² to 1.355 5 million km². This study shows that the impact of climate warming on different probability distribution areas of *L. gmelinii* forest has regional heterogeneity, and the results can provide a scientific basis for the sustainable management of *L. gmelinii* forest in the future.

Key words: *Larix gmelinii*; climate warming; species distribution model; probability distribution area

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)预测指出,全球气候将持续变暖,预计到21世纪末全球平均表面温度将升高0.3~4.8 °C^[1]。气候变化是影响物种和植被地理分布范围的决定性因素^[2-5],对植被的分布格局将产生极大的影响^[6]。因此,研究植被气候适宜性变得越来越重要^[7-8],物种分布与气候因子关系也成为当前林业研究的热点^[9-11]。随着全球气候变暖,植物的适宜生境分布范围也将发生改变^[12]。已有研究表明,随气候变暖华北落叶松的适宜分布面积扩大,而油松的分布面积减小^[13],我国东北阔叶红松林高适宜区表现为界线北移和面积缩减,而低适宜区面积增加^[14],而寒温带湿润森林将北移出我国东北地区^[15]。

东北天然林区是我国最大的天然林区,兴安落叶松林是该区域主要林型。兴安落叶松林是我国重要的林业资源,对维持东北地区的生态平衡具有重要的作用。研究表明,兴安落叶松林的地理分布范围随气候变化逐渐减小,甚至可能全部北移出境^[16]。气温对主要天然林类型的潜在适生区预测

具有重要影响^[17]。气温每升高1 °C,兴安落叶松林分布将减少12%,并向北退缩400 km左右^[18]。在未来气候情境下,兴安落叶松潜在适生区将呈现衰退的现象^[16,19-20]。但前人相关研究多基于气候数据自身的变化,并未考虑物种实际的地理分布及其与气候因子关系的时间稳定性,因此本研究采用物种分布模型对兴安落叶松林概率分布区动态特征进行研究。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)被广泛应用于研究全球气候变化背景下物种分布和气候之间关系^[21-22],也是研究物种地理分布比较常用的方法,依据物种的地理分布数据及其环境数据的关系,模拟预测物种的潜在分布范围。目前应用较为广泛的物种分布模型,包括广义线性模型(generalized linear model, GLM)、随机森林模型(random forest, RF)、生态位因子分析模型(ecological niche factor analysis, ENFA)、生物气候分析系统(bioclimatic analysis and prediction system, BIOCLIM)以及最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)等^[9,23-29]。其中MaxEnt模型与其他模型

相比,具有较好的预测能力^[30-31],且样本量的大小对MaxEnt模型预测物种空间分布的精度影响不大^[32-34],因此被广泛应用于物种潜在分布区预测^[35-39]。

在气候变暖背景下,利用MaxEnt模型对兴安落叶松林的气候生长概率分布区动态进行研究,试图探讨:不同时期的兴安落叶松林气候生长概率区的主导因子是否改变;突变前后不同时期的兴安落叶松林分布概率分布区是否发生变化。研究结果将有助于揭示气候变化背景下兴安落叶松林分布动态,为制定森林经营中适地适树评价提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国东北内蒙古天然林区,包括黑龙江省、吉林省和内蒙古东部地区,地理位置大致在 $40^{\circ}52' - 53^{\circ}33' N, 93^{\circ}12' - 131^{\circ}19' E$ 。该区域地处欧亚大陆东缘,横跨温带和寒温带,是我国湿润的东部季风区和干旱的内陆之间的过渡带,属温带大陆性季风气候,四季分明、冬长夏短,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨^[40]。研究区年均温在 $-5.15 \sim 6.47$

℃,年降水量在 $243 \sim 1141$ mm,海拔为 $10 \sim 1528$ m,山势较为缓和。

1.2 数据获取

于2017年夏季采用机械布点的方法,在东北天然林区构建半径为 17.85 m,面积为 1000 m^2 的兴安落叶松天然林临时样圆68个(图1)。使用GPS和罗盘仪获取样点的经纬度、海拔、坡向、坡度等。本研究基于前人的研究^[41]选取了可能影响兴安落叶松林地理分布的8个气候因子,其中包括年均温(mean annual temperature, MAT)、最冷月均温(mean coldest month temperature, MCMT)、最暖月均温(mean warmest month temperature, MWMT)、最冷最暖月温差(temperature difference between MWMT and MCMT, TD)、年均降水量(mean annual precipitation, MAP)、秋季降水量(mean annual precipitation in autumn, MAPA)、大于 5°C 年积温(degree-days above 5°C , DD $>5^{\circ}\text{C}$)和哈格里夫斯水分亏缺(hargreaves climatic moisture deficit, HCMD),并从ClimateAP获取研究区1950—2017年区间段分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的气候数据。

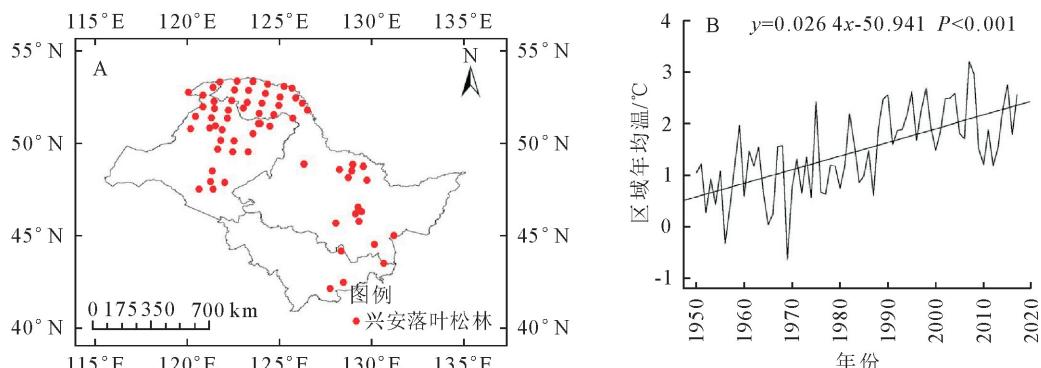


图1 A. 研究区兴安落叶松天然林样点分布;B. 1950—2017年区域年均气温的年际变化

Fig. 1 A. Distribution of *Larix gmelinii* natural forest in study area; B. Interannual variations of regional average annual temperature during 1950—2017

1.3 模型精度检验

采用MaxEnt模型对突变点前后的兴安落叶松林适宜分布区进行模拟,随机选取样本数据的75%作为训练子集,25%作为测试子集,重复10次。用MaxEnt模型构建兴安落叶松林地理分布与气候关系模型,并依据受试者工作特征曲线(ROC)下的面积,即AUC值($0 \sim 1$)检验模型的预测效果,模型精度的评估标准为: $0.5 \leqslant \text{AUC} < 0.6$ 为较差; $0.6 \leqslant \text{AUC} < 0.7$ 为一般; $0.7 \leqslant \text{AUC} < 0.8$ 为较准确; $0.8 \leqslant \text{AUC} < 0.9$ 为很准确; $0.9 \leqslant \text{AUC} < 1.0$ 为极准确。采用刀切法(Jackknife)和响应曲线分析各气候因子的贡献率及其对分布的影响,确定影响兴安

落叶松林分布的主导气候因子。基于筛选出的主导气候因子空间栅格图和兴安落叶松林分布点地理信息数据再次输入模型迭代运行10次。

1.4 数据处理

本研究对研究区的年均温取平均值得到区域年均温(图1B),采用Mann-Kendall(M-K)检验来检验快速变暖开始的转折点。M-K检验可以根据2个输出序列(UF和UB)确定拐点的时间^[42-43]。如果UF和UB2条曲线有交点且位于置信线内时(当置信水平 $P \leqslant 0.05$ 时,置信水平线为 ± 1.96),则交点对应的时间为拐点开始的时间,本研究将此时间作为气候转折点。

利用 MaxEnt 软件结合兴安落叶松林的分布数据和环境数据,对突变前(1950—1983 年)和突变后(1984—2017 年)2 个不同时期气候的影响下的兴安落叶松林分布进行了模拟,结果以“Cloglog”输出。利用 ArcGIS10.6 将 ASCII 文件转化为栅格数据,并进行重分类,基于气候的生长概率区划分参考 IPCC 标准^[44],即 $P < 0.05$ 为不存在区; $0.05 \leq P < 0.33$ 为低概率区; $0.33 \leq P < 0.66$ 为中概率区; $P \geq 0.66$ 为高概率区,得到突变前后兴安落叶松林的生长概率分布图。统计学上认为,当物种在某区域的存在概率 < 0.05 时,称为小概率事件,即该物种在该区域是不可能存在的。利用 ArcGIS 统计不同时期气候条件下各生境分布区面积及其占研究区总面积的比率,得出研究区兴安落叶松林在气候变化下的潜在空间分布结果,并提取兴安落叶松适生区的几何重心,研究其突变前、后的中心点位置的变迁。

2 结果与分析

2.1 模型适用性分析

研究区在 1950—2017 年研究期间气温呈上升趋势(图 1B)。根据 M-K 检验,UF 和 UB 的交点在置信线之间,可以识别出 1984 年的温度转折点,表明该区域的温度在 1984 年后的上升趋势较为明显(图 2)。

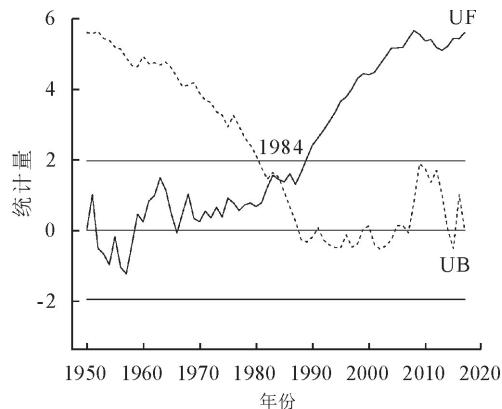


图 2 M-K 温度突变检验

Fig. 2 M-K temperature mutation test

基于 MaxEnt 模型模拟突变前(before mutation, BM; 1950—1983 年)和突变后(after mutation, AM; 1984—2017 年)2 个时期兴安落叶松林潜在气候生长概率分布区,2 个时期的训练集和测试集的 AUC 值均 > 0.85 (表 1),达到了很准确以上的水平,表明预测结果准确有效。综合模型准确性,表明兴安落叶松林预测模型有效性较高,可用于东北天然林区兴安落叶松林气候生长概率区空间分布研究。

2.2 不同时期气候因子对兴安落叶松林分布的影响

不同时期决定兴安落叶松林潜在分布的主导因子均为最暖月均温(MWMT)、哈格里夫斯水分亏缺

(HCMD)和 $> 5^{\circ}\text{C}$ 积温(DD $> 5^{\circ}\text{C}$),其累积贡献率均达到 85% 以上,但在突变前后各因子的贡献比重有所差别(表 2)。突变前 DD $> 5^{\circ}\text{C}$ 贡献最高达到 40.29%,而突变后 DD $> 5^{\circ}\text{C}$ 贡献最低仅为 24.30%,而 MWMT 则上升为 40.21%。因此,气候变暖没有改变主导因子组成成分,但使各主导因子的贡献率发生变化。

表 1 不同时期气候情景下的受试者工作特征
曲线下面积(AUC)

Table 1 Area under the receiver operating characteristic curve (AUC) under different climate scenarios in different periods

不同时期	训练 AUC	测试 AUC
BM	0.895	0.871
AM	0.901	0.881

注:BM 为突变前; AM 为突变后。

表 2 各环境变量对物种分布的贡献率

Table 2 Contribution of environmental variables
to species distribution

环境变量	贡献率(%)	
	BM	AM
MAT	2.48	0.68
MWMT	19.78	40.21
MCMT	0.60	0.50
TD	0.20	0.43
DD $> 5^{\circ}\text{C}$	40.29	24.30
MAP	3.24	0.52
MAPA	6.60	5.25
HCMD	26.80	27.94

兴安落叶松林的存在阈值为 $P \geq 0.05$,概率 < 0.05 的区域,即为不存在区。通过 MaxEnt 模型得到不同时期各主导因子气候变量与存在概率的反应曲线,该曲线可反映单个气候因子变量值与存在概率间的响应关系。随着最暖月均温的升高,存在概率呈现下降的趋势,不同时期 MWMT 的适宜区间基本相同,其值为 16~22 °C(图 3A、图 3D)。随着年积温的升高,存在概率也呈现下降的趋势,不同时期 DD $> 5^{\circ}\text{C}$ 的适宜区间有所差异,其分别为 850~2 100 °C(BM)和 1 000~2 200 °C(AM)(图 3B、图 3E)。但随着哈格里夫斯水分亏缺值的升高,存在概率呈现先升高后降低的趋势,不同时期 HCMD 的适宜区间基本相同,其值为 50~300 mm(图 3C、图 3F)。研究区突变前、后各主导环境因子的年均值均发生改变(图 4),其中 MWMT、DD $> 5^{\circ}\text{C}$ 和 HCMD 的变化范围分别为 0.19~0.83 °C、94.80~164.28 °C 和 -40.84~46.45 mm。因此,气候变暖后,尽管部分区域的 HCMD 值有所下降,但研究区域的气候变化整体上呈现暖干化的趋势。

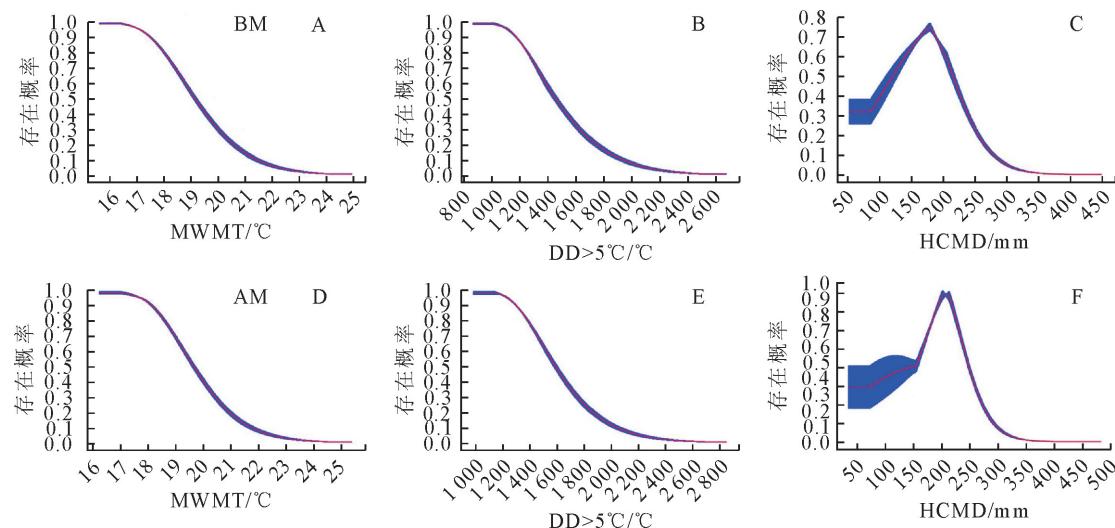


图3 突变前后主导气候因子与兴安落叶松概率分布的关系

Fig. 3 Relationship between dominant climatic factors and probability distribution of *L. gmelinii* before and after mutation

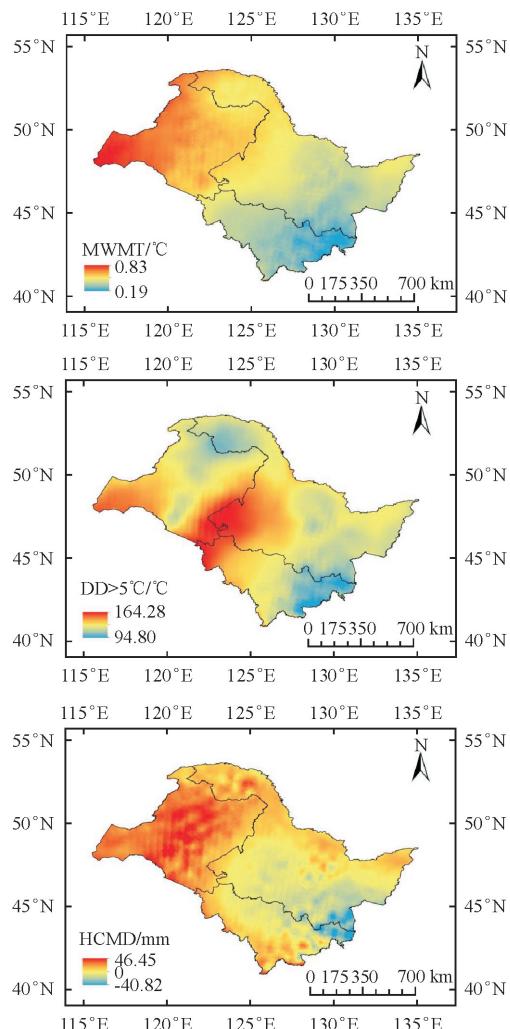


图4 温度突变后各主导环境因子的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of the main environmental factors after temperature mutation

2.3 不同时期兴安落叶松林潜在气候生长概率分布区的变化

将生长低概率区、中概率区和高概率区统称为

适生区,不同时期(BM 和 AM)的适生区总面积分别为 131.31 万 km^2 和 135.55 万 km^2 ,其分别占研究区总面积的 64.34% 和 66.41%(表 3)。突变前、后各等级潜在生长概率区的面积由大到小排序分别为:不存在区($72.79 \text{ 万 } \text{km}^2$)>低概率区($50.75 \text{ 万 } \text{km}^2$)>高概率区($44.13 \text{ 万 } \text{km}^2$)>中概率区($36.43 \text{ 万 } \text{km}^2$);不存在区($68.56 \text{ 万 } \text{km}^2$)>低概率区($58.26 \text{ 万 } \text{km}^2$)>高概率区($42.29 \text{ 万 } \text{km}^2$)>中概率区($35.00 \text{ 万 } \text{km}^2$)。气候变暖增加了兴安落叶松林的低概率区面积,其面积增加了 $7.51 \text{ 万 } \text{km}^2$,减少了不存在区、中概率区和高概率区的面积(表 3、图 5C),其面积分别减少了 4.23 、 1.43 、 $1.94 \text{ 万 } \text{km}^2$ 。突变后兴安落叶松林的潜在气候生长概率区发生变化,其气候适生区在突变后整体呈现向北移的趋势(图 5C),其分布中心纬度由 50.89° 迁移至 51.06° ,迁移幅度为 0.17° 。综上,气候变暖使得兴安落叶松林的潜在气候生长概率分布区整体呈现北移的趋势,但其适生区的总面积却呈现增加的趋势。

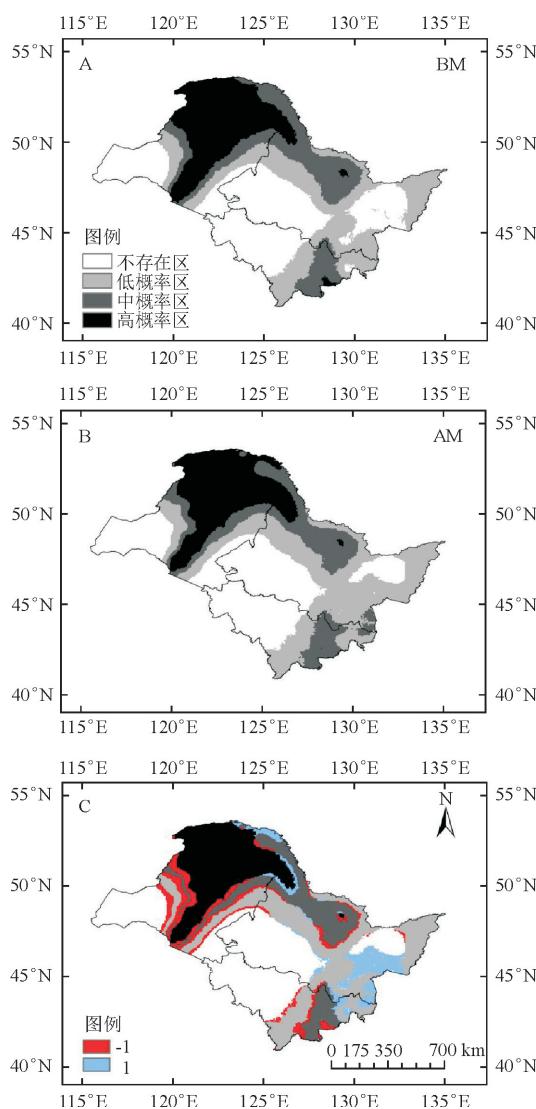
3 结论与讨论

通过实地调查获取兴安落叶松林的天然分布样点,利用 MaxEnt 模型分析气候变暖对兴安落叶松林的气候生长概率分布区动态的变化。研究结果表明,MWMT、DD>5 °C 和 HCMD 是影响兴安落叶松林分布的关键气候要素。气候变暖并未改变影响兴安落叶松林气候生长概率区的主要因子,且温度的重要性比降水大;气候变暖后,兴安落叶松天然林分布区的南界呈现北移的趋势,且不同概率分布区变化趋势具有差异性。兴安落叶松林不存在区、中概率区和高概率区的面积在突变后均减少,而低概率区的面积增加,兴安落叶松林适生区的总面积整

表 3 不同时期各生长概率区面积统计结果

Table 3 Statistical results of growth probability area in different periods

生长概率区等级	面积/万 km ²	
	BM	AM
不存在区	72.79	68.56
低概率区	50.75	58.26
中概率区	36.43	35.00
高概率区	44.13	42.29



A 为突变前时期;B 为突变后时期;C 为突变后基于 BM 时期生长概率区的等级变化;−1 为分布等级下降一级;1 为分布等级升高一级。

图 5 不同时期兴安落叶松林气候生长概率分布区变化

Fig. 5 Changes of climatic growth probability distribution area of *L. gmelinii* forest in different periods

体上仍呈现增加的趋势。因此,气候变化背景下兴安落叶松林的经营还需要考虑气候变化造成的区域气候差异,应依据各区域的气候变化特点,有针对性地采取合理的经营管理措施,以期实现对森林的可持续经营管理。

3.1 气候因子对兴安落叶松林地理分布的影响

气候是影响物种分布的决定性因素^[45],其中温度和降水起着重要作用^[46-47]。本研究发现 MaxEnt 模型能够准确有效模拟气候变暖后兴安落叶松天然林在我国东北地区的潜在气候分布区的变化(AUC 值均在 0.85 以上),最暖月均温、>5 °C 积温和哈格里斯夫水分亏缺是影响兴安落叶松的潜在生长概率分布区的主导因子。本研究结果进一步证明了温度和降水对落叶松属分布的重要限制作用^[18]。与本研究不同,杨志香等^[41]基于全国尺度和兴安落叶松历史地理分布数据,认为兴安落叶林分布范围与最冷月均温、最暖与最冷月温差、年辐射量和≥5 °C 积温有关,未发现水分的限制作用。而石慰^[19]在探讨气候变化对兴安落叶松分布的潜在影响时则提出春季最高温度(55.9%)是影响兴安落叶松分布的最重要环境因子,其次是年均温(31.2%)、春季降水(7.1%)和 5 月降水(2.1%)。物种分布与气候环境关系的空间转换和时间外推的均一性会影响模拟结果^[48]。本研究区域气候暖干化趋势明显,水分对兴安落叶松生长的限制作用也随之凸显^[49],因此,水分作用不可忽略。同时,针对新环境条件下,物种分布是否仍与原环境条件之间保持原有的关系,本研究对比分析了温度突变点前后兴安落叶松林地理分布的主要限制因子。研究发现温度突变并未改变影响兴安落叶松林地理分布的主要气候因子,但对其贡献率最大的因子发生了改变。在温度突变前>5 °C 积温主导兴安落叶松天然林生长概率区,而温度突变后其主要贡献因子由>5 °C 积温转变为最暖月均温(表 2)。尽管各主导因子的贡献率在不同时期存在差异,其突变前、后贡献率最大的因子分别为>5 °C 积温(40.29%)和最暖月均温(40.21%),但在这两个时期中温度对兴安落叶松贡献率都要比水分大。虽然兴安落叶松是耐寒、耐旱的浅根树种,但温度对落叶松属物种气候适宜性的影响更显著^[50]。总体而言,气候变暖不会改变影响兴安落叶松天然林的分布的主导因子,其地理分布受温度和降水因子的共同制约,兴安落叶松天然林的适生区主要分布在最暖月均温 16~22 °C、>5 °C 积温 1 000~2 100 °C、哈格里斯夫水分亏缺 50~300 mm 的区域内。

3.2 兴安落叶松林潜在地理分布区的动态变化

物种分布范围的变化是气候变化最直接、最清晰的反映^[51]。本研究进一步验证在气候暖干化趋势下兴安落叶松林的南界随气候变化呈现北移的趋势(图 5C,北纬 50.89°(BM) 和 北 纬 51.06°(AM))。研究表明,南部和中部兴安落叶松生长与温度呈显

著负相关关系呈下降趋势^[52]、北部兴安落叶松生长则呈升高趋势^[53]。南部和中部地区生长季高温(图4)造成的干旱事件抑制兴安落叶松的生长,使得位于该区域的部分兴安落叶松生长发生衰退^[54],土壤水分亏缺,进而加剧对树木生长的限制^[49]。兴安落叶松林不存在区、中概率区和高概率区的面积在突变后均呈现减少的现象,这与前人的研究一致^[18-20,23],即兴安落叶松林的部分适生区会随气候变暖而逐渐衰退。气候变暖后,该区域内气候特征呈现出暖干化的现象,区域内的 MWMT、DD>5 °C 和 HCMD 在整体上呈现增加的趋势。温度升高和降水减少将限制林木的生长速度^[55],导致兴安落叶松林的面积减少^[18]。然而,本研究还发现兴安落叶松林低概率区的面积随气候变暖则呈现出增加的现象。贾翔等^[14]在研究气候变化背景下东北阔叶红松林地理分布区时,发现当温度和降水增加时,其低度适宜区面积呈现出增加的趋势。气候变暖后,新增适生区的区域气候呈现出暖湿化的现象。尽管新增区域的温度有所增加,但其增加的温度相对较小(Δ MWMT<0.4 °C)且湿润度增加(Δ HCMD<0 mm),从而有利于兴安落叶松林的生长。在快速变暖时期,如果树木在生长季节的关键时期有充足的水分可以利用时,其生长不仅不会受到限制,甚至会出现加速生长的现象^[56]。低概率区部分面积的增加导致兴安落叶松适生区的分布面积总体上呈现出增加的趋势,其面积由突变前的 131.31 万 km² 扩大至 135.55 万 km²。因此,在全球气候变暖背景下,树木生长对气候变化的响应具有区域异质性^[57],气候变暖对不同概率分布区的影响也具有区域异质性。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds) Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. IPCC, Geneva, 2014.
- [2] 冉巧,卫海燕,赵泽芳,等.气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响[J].生态学报,2019,39(7):2481-2493.
- [3] 秦媛媛,鲁客,杜忠毓,等.气候变化情景下孑遗植物绵刺在中国的潜在地理分布变化[J].生态学报,2022(11):1-12.
- [4] LAWLER J J, SHAFFER S L, WHITE D, et al. Projected climate-induced faunal change in the western hemisphere[J]. Ecology, 2009, 90(3):588-597.
- [5] CHURCH J, CLARK P, CAZENAVE A, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[D]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [6] GUITERREZ E, TREJO I. Effect of climatic change on the potential distribution of five species of temperate forest trees in Mexico[J]. Revista Mexicana de Biodiversidad, 2014, 85(1): 179-188.
- [7] 李飞,赵军,赵传燕,等.中国潜在植被空间分布格局[J].生态学报,2008(11):5347-5355.
- [8] LI F, ZHAO J, ZHAO C Y, et al. The potential vegetation spatial distributions and patterns in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11):5347-5355. (in Chinese)
- [9] 温仲明,焦峰.自然植被分布预测研究进展.中国水土保持科学,2009,7(5):117-124.
- [10] WEN Z M, JIAO F. Review of the studies on the prediction of natural vegetation distribution[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5):117-124. (in Chinese)
- [11] CHAKRABORTY A, JOSHI P K, SACHDEVA K. Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region[J]. Ecological Engineering, 2016, 97:593-609.
- [12] DYDERSKI M K, PAŽ S, FRELICH L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? [J]. Global Change Biology, 2018, 24 (3): 1150-1163.
- [13] WANG C, LIU C, WAN J, et al. Climate change may threaten habitat suitability of threatened plant species within Chinese nature reserves[J]. Peer J, 2016, 4(6):e2091.
- [14] 吕振刚,李文博,黄选瑞,等.气候变化情景下河北省 3 个优势树种适宜分布区预测[J].林业科学,2019,55(3):13-21.
- [15] LV Z G, LI W B, HUANG X R, et al. Predicting suitable distribution area of three dominant tree species under climate change scenarios in Hebei Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3):13-21. (in Chinese)
- [16] 贾翔,马芳芳,周旺明,等.气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响[J].生态学报,2017,37(2):464-473.
- [17] JIA X, MA F F, ZHOU W M, et al. Impacts of climate change on the potential geographical distribution of broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2):464-473. (in Chinese)
- [18] 栾兆平.气候变化与中国北方森林恢复和经营[J].内蒙古林业调查设计,2007(5):47-49,74.
- [19] LUAN Z P. Climate change and forest restoration and management in Northern China[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2007(5):47-49,74. (in Chinese)

- [16] 李峰,周广胜,曹铭昌.兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J].应用生态学报,2006,17(12):2255-2260.
- LI F,ZHOU G S,CAO M C. Responses of *Larix gmelinii* geographical distribution to future climate change a simulation study[J]. Chinese Journal of applied ecology, 2006, 17 (12):2255-2260. (in Chinese)
- [17] 刘丹,李玉堂,洪玲霞,等.基于最大熵模型的吉林省主要天然林潜在分布适宜性[J].林业科学,2018,54(7):1-15.
- LIU D,LI Y T,HONG L X,*et al*. The suitability of potential geographic distribution of natural forest types in Jilin Province based on maximum entropy models[J]. *Scientia Silvae Sinicae*,2018,54(7):1-15. (in Chinese)
- [18] 冷文芳,贺红士,布仁仓,等.中国东北落叶松属3种植物潜在分布对气候变化的敏感性分析[J].植物生态学报,2007(5):825-833.
- LENG W F,HE H S,BU R C,*et al*. Sensitivity analysis of the impacts of climate change on potential distribution of three Larch (*Larix*) species in Northeastern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5):825-833. (in Chinese)
- [19] 石慰.气候变化对中国东北兴安落叶松分布的影响[D].北京:北京林业大学,2013.
- [20] 张喜娟,陈琛,郜飞飞,等.中国东北兴安落叶松林空间分布及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2022,41(6):1041-1049.
- ZHANG X J,CHEN C,GAO F F,*et al*. Spatial distribution of *Larix gmelinii* forests in Northeast China and its response to climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41 (6):1041-1049. (in Chinese)
- [21] 蒋霞,倪健.西北干旱区10种荒漠植物地理分布与大气候的关系及其可能潜在分布区的估测[J].植物生态学报,2005,29 (1):98-107.
- JIANG X,NI J. Species-climate relationships of 10 desert plant species and their estimated potential distribution range in the arid lands of Northwestern China[J]. *Acta Phytogeographica Sinica*,2005,29(1):98-107. (in Chinese)
- [22] ANDERSON R P,RAZA A. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela[J]. Journal of Biogeography, 2010, 37(7):1378-1393.
- [23] LENG W F,HE H S,LIU H J. Response of larch species to climate changes[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 1 (3): 203-205.
- [24] GUISAN A,ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. Ecological Modelling, 2000, 135 (2-3):147-186.
- [25] HIRZEL A H,HAUSSER J,CHESSEL D,*et al*. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? [J]. Ecology, 2002,83(7):2027-2036.
- [26] BUSBY J R. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system[J]. Plant Protection Quarterly,1991,6:8-9.
- [27] ZHANG Z D,ZANG R G,CONVERTINO M. Predicting the distribution of potential natural vegetation based on species functional groups in fragmented and species-rich forests[J]. Plant Ecology and Evolution,2013,146(3):261-271.
- [28] YANG X Q,KUSHWAHA 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.
- [29] 麻璐璐,李媛媛,王海珍,等.油杉属植物的地理分布及潜在分布区预测[J].西北林学院学报,2022,37(4):158-165.
- MA C C,LI Y Y,WANG H Z,*et al*. Geographical distribution and the prediction of the potential distribution of *Keteleeria*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37 (4):158-165. (in Chinese)
- [30] 王娟,倪健.植物种分布的模拟研究进展[J].植物生态学报,2006,30(6):1040-1053.
- WANG J,NI J. Review of modelling the distribution of plant species[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30 (6): 1040-1053. (in Chinese)
- [31] 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.
- ZHANG L,LIU S R,SUN P S,*et al*. Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(11):1091-1105. (in Chinese)
- [32] 陈新美,雷渊才,张雄清,等.样本量对MaxEnt模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J].林业科学,2012,48(1):53-59.
- CHEN X M,LEI Y C,ZHANG X Q,*et al*. Effects of sample sizes on accuracy and stability of maximum entropy model in predicting species distribution [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012,48(1):53-59. (in Chinese)
- [33] MARIYA S,ROBERT P A. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes[J]. Ecological Modelling, 2013, 269 (1771):9-17.
- [34] WISZ M S,HIJMANS R J,LI J,*et al*. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. Diversity & Distributions,2010,14(5):763-773
- [35] ZHANG K,YAO L,MENG J,*et al*. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change[J]. Science of The Total Environment,2018,634:1326-1334
- [36] 兰雪涵,王金玲,付聪,等.基于优化MaxEnt模型的天女木兰在中国适生区预测[J].西北林学院学报,2022,37(4): 100-106.
- LAN X H,WANG J L,FU C,*et al*. Prediction of suitable distribution area of *Magnolia sieboldii* in China based on the optimized MaxEnt model[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(4):100-106. (in Chinese)
- [37] 李尤,唐雪海,王雷宏,等.基于MaxEnt模型的不同气候情景下白蜡树中国适生区预测[J].西北林学院学报,2021,36(6): 100-107.
- LI Y,TANG X H,WANG L H,*et al*. Prediction of suitable areas of *Fraxinus chinensis* in China under different climate scenarios based on MaxEnt[J]. Journal of Northwest Forestry University,2021,36(6):100-107. (in Chinese)
- [38] NAROUEI-KHANDAN H A,HARMON C L,HARMON P,*et al*. Potential global and regional geographic distribution

- of *Phomopsis vaccinii* on *Vaccinium* species projected by two species distribution models[J]. European Journal of Plant Pathology, 2017, 148(4): 919-930.
- [39] 李璇,李垚,方炎明.基于优化的MaxEnt模型预测白栎在中国的潜在分布区[J].林业科学,2018,54(8):153-164.
- LI X, LI Y, FANG Y M. Prediction of potential suitable distribution areas of *quercus fabri* in China based on an optimized Maxent model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(8): 153-164. (in Chinese)
- [40] 贺伟,布仁仓,熊在平,等.1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.
- HE W, BU R C, XIONG Z P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 0519-0531.
- [41] 杨志香,周广胜,殷晓洁,等.中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性[J].生态学杂志,2014,33(6):1429-1436.
- YANG Z X, ZHOU G S, YIN X J, et al. Geographic distribution of *Larix gmelinii* natural forest in China and its climatic suitability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1429-1436. (in Chinese)
- [42] KENDALL M G. Rank Correlation Methods. 4th edition[D]. Charles Griffin, London, U. K, 1975.
- [43] MANN H B. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [44] IPCC. Climate Change 2007. Synthesis report. contribution of Working Groups I, II & III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva:IPCC, 2007.
- [45] TRINDADE W C F, SANTOS M H, ARTONI R F. Climate change shifts the distribution of vegetation types in south Brazilian hotspots[J]. *Regional Environmental Change*, 2020, 20(3), 90.
- [46] DU Z. Potential geographical distribution and habitat shift of the genus *Ammopiptanthus* in China under current and future climate change based on the MaxEnt model[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 184(9), 104328.
- [47] ZHAO Y, DENG X, XIANG W, et al. Predicting potential suitable habitats of Chinese fir under current and future climatic scenarios based on Maxent model[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 64(15): 101393.
- [48] 许仲林,彭焕华,彭守璋.物种分布模型的发展及评价方法[J].生态学报,2015,35(2):557-567.
- XU Z L, PENG H H, PENG S Z. The development and evaluation of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 557-567. (in Chinese)
- [49] 常永兴,陈振举,张先亮,等.气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应[J].植物生态学报,2017,41(3):279-289.
- CHANG Y X, CHEN Z J, ZHANG X L, et al. Responses of radial growth to temperature in *Larix gmelinii* of the Daxing'anling under climate warming[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(3): 279-289. (in Chinese)
- [50] 王战.中国落叶松林[M].北京:中国林业出版社,1992.
- WANG Z. *Larch Forest in China*[M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [51] 倪健,宋永昌.中国常绿阔叶林壳斗科主要种的分布与气候.华东师范大学学报:自然科学版,1997(2):100-107.
- [52] JIANG Y, ZHANG J, HAN S, et al. Radial growth response of *Larix gmelinii* to climate along a latitudinal gradient in the greater Khingan Mountains, Northeastern China[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 295.
- [53] 张朋磊,刘滨辉.气候变化对不同纬度兴安落叶松径向生长的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(3):10-13,22.
- ZHANG P L, LIU B H. Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(3): 10-13, 22. (in Chinese)
- [54] 韩艳刚,盖学瑞,邱思玉,等.大兴安岭兴安落叶松径向生长对气候响应的时空变化[J].应用生态学报,2021,32(10):3397-3404.
- HAN Y G, GAI X R, QIU S Y, et al. Spatial and temporal variation of the response of radial growth of *Larix gmelinii* to climate factors in the Daxing'anling Mountains of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(10): 3397-3404. (in Chinese)
- [55] 张先亮,崔明星,马艳军,等.大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系[J].应用生态学报,2010,21(10):2501-2507.
- ZHANG X L, CUI M X, MA Y J, et al. *Larix gmelinii* tree-ring width chronology and its responses to climate change in Kuduer, Great Xing'an Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2501-2507. (in Chinese)
- [56] ZHANG X, RUBÉN D M, D'ORANGEVILLE L, et al. Snowmelt and early to mid-growing season water availability augment tree growth during rapid warming in Southern Asian boreal forests[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10).
- [57] HELLMANN L, AGAFONOV L, LJUNGQVIST F C, et al. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074021.