

# 不同气候环境的我国白桦潜在分布区预测<sup>1)</sup>

高明龙 萨如拉

铁牛

张丽丽

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010019) (内蒙古自治区林业科学研究院) (内蒙古阿尔山森林工业有限公司)

**摘要** 通过预测过去到未来不同气候条件下中国白桦潜在分布区的变化,确定影响白桦(*Betula platyphylla* Suk.)分布的主要环境变量,对白桦资源的合理开发与低效白桦次生林改造具有重要意义。根据白桦166个分布数据和34个环境因子,利用R语言中ENMeval程序包优化最大熵值(MaxEnt)模型;通过皮尔逊(Person)相关性分析和方差膨胀因子分析(VIF),对参与建模的环境因子进行筛选;利用刀切法(Jackknife),确定白桦潜在分布的主导环境变量;根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的气候模型,预测不同气候环境时白桦分布区的变化趋势。结果表明:当特征组合为片段化特征、乘积型特征和阈值性特征,且调控倍数为2时,受试者工作特性曲线的AUC值为0.933,模型结构简单,预测精度较高。影响白桦分布的主要环境因子为最暖季度降水量、最热月最高气温、年均温、年降水量、最冷月最低气温和海拔。当前白桦潜在分布区主要位于大兴安岭地区、小兴安岭地区、长白山地区、祁连山地区、横断山脉地区,约占我国陆地面积14.7%。在未来白桦适生区预计向更高纬度和更高海拔地区迁移,同时较低纬度和较低海拔地区适生区将逐渐缩减。

**关键词** 白桦;MaxEnt模型;潜在分布区;气候变暖

**分类号** S792.153

**Distribution Pattern of *Betula platyphylla* in China under Climate Change**//Gao Minglong, Sa Rula (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P. R. China); Tie Niu (Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences); Zhang Lili (Inner Mongolia Arxan Forest Industry Company)//Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(2): 54-61, 69.

By predicting the changes in the potential distribution areas of *Betula platyphylla* Suk. in China under different climatic conditions from the past to the future, and determining the main environmental variables affecting the distribution of *B. platyphylla*, which is of great significance to the rational development of *B. platyphylla* resources and the transformation of inefficient *B. platyphylla* secondary forest. This study was with 166 distribution data and 34 environmental factors of *B. platyphylla*. The MaxEnt model was optimized by using the ENMeval packet in R language. Pearson correlation analysis and variance inflation factor analysis (VIF) screened the environmental factors involved in the modeling. The Jackknife method was used to analyze and determine the dominant environmental variables of the potential distribution of *B. platyphylla*. According to the climate model released by the IPCC, the changes in the potential distribution of *B. platyphylla* under different climate scenarios were discussed. The results showed that, when the feature combination was fragmentary feature, product feature, threshold feature, and the regularization multiplier was 2, the AUC value of the receiver operating characteristic curve was 0.933, and the model had a simple structure and high prediction accuracy. The dominant factors affecting the distribution of *B. platyphylla* were the precipitation of the warmest quarter, the maximum temperature, the annual mean temperature, the annual precipitation, and the minimum temperature of the coldest month and elevation. At present, the potential distribution areas of *B. platyphylla* are mainly located in the regions of Daxing'an Mountains, Xiaoxing'an Mountains, the Changbai Mountains, the Qilian Mountains, and the Hengduan Mountains, accounting for approximately 14.7% of China's land area. Under future climatic conditions, the *B. platyphylla* suitable areas are expected to migrate to higher latitudes and higher altitude areas in the future, and the suitable areas in lower latitudes and lower altitudes will gradually shrink.

**Keywords** *Betula platyphylla*; MaxEnt model; Potential distribution area; Global warming

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2023.02.012

全球气候变暖是当今世界面临的主要气候问题之一,从上世纪初至今全球增温 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。根据IPCC第六次气候变化评估报告,在本世纪末期,全球平均温将继续增加 $1.0\sim 5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。全球气候变暖将对自然生态系统造成严重的影响<sup>[3-4]</sup>。研究表明,植物物种分布主要受到气候变化的影响,气候的持续变暖将使温带森林植被向高纬度和高纬度地区迁移<sup>[5-6]</sup>。近年来,物种分布模型逐渐成为分析气

候变化与物种分布关系的一个研究热点<sup>[7]</sup>。物种分布模型依据生态位理论,通过物种实际地理分布数据和环境因子对该物种的潜在分布区进行模拟<sup>[8]</sup>。目前,主要的物种分布模型有最大熵模型(MaxEnt)、分类与回归树模型(CTA)、广义线性模型(GLM)、生境模型(HABITAT)、遗传算法模型(GARP)和生物气候模型(BIOCLIM)等模型。其中,最大熵模型(MaxEnt)相较其他同类模型具有预测结果易读性高、准确度高和灵活性强的优点<sup>[9]</sup>。因此,最大熵模型在酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)和祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)等众多物种的适生区预测中已有较为广泛应用<sup>[10-12]</sup>。白桦(*Betula platyphylla* Suk.)为我国常见桦木属(*Betula*)落叶乔木,是我国

1) 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0067)。

第一作者简介:高明龙,男,1996年5月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail:823512072@qq.com。

通信作者:铁牛,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail:Wang-tieniu@126.com。

收稿日期:2020年12月22日。

责任编辑:韩有奇。

温带地区主要次生林先锋树种之一,白桦形成的白桦次生林在保育土壤、涵养水源及固碳释氧方面具有较高的生态价值,其木材广泛用于建筑、器具和地板等日常生产中,同时白桦汁可用于多种药品和保健饮品的加工生产,具有较高的社会、生态及经济价值<sup>[13-15]</sup>;但以白桦为主体的白桦次生林在林分结构、林木生长、林地生境和生态功能等多个方面均与当地原始林分有较大差异,多表现为生物多样性、稳定性和抗逆性等不同程度的减弱<sup>[16]</sup>。目前,对白桦的研究多为林分生产力特征、生理生化特点和遗传多样性分析等,而关于白桦潜在分布区的研究尚未见报道<sup>[17-19]</sup>。因此,本研究通过优化后的最大熵模型模拟我国白桦不同气候环境下的潜在分布区变化,分析影响白桦分布的主要限制因子,对我国未来白桦资源的进一步开发与保护及低效白桦次生林改造具有重要理论指导意义。

## 1 材料与方法

白桦地理分布数据的收集:在2017—2021年,通过野外实地调查,在内蒙古东部和黑龙江北部的白桦分布区域共获取99个白桦分布点数据;再结合国家标本馆(NSII)、中国数字标本馆(CVH)、中科院昆明植物研究所标本馆(KUN)及其他相关文献公开资料,获取白桦101个分布点数据。为避免分布点密集所导致的模拟结果出现偏差,本研究在每10 km网格中仅保留1个白桦分布点<sup>[12]</sup>,最终得到166个分布点(见图1)。

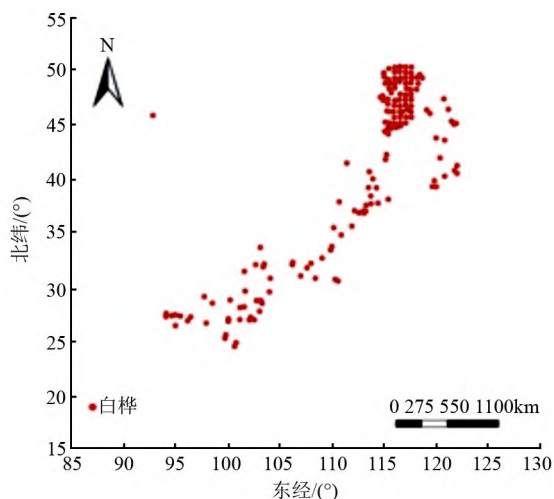


图1 中国白桦地理分布点

### 1.1 环境因子及筛选

本研究选用的34个环境因子是空间分辨率均为30"的19个生物气候因子、14个土壤因子和1个地形因子。气候数据来源于世界气候数据库([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)),包括末次间冰期、末次冰盛期、全新世中期、当前(2000 s)、2050 s和2090 s共6个时期

的最暖季平均气温、月平均昼夜气温差、最热月最高气温、最湿月降水量、年均气温、最湿季平均气温、最干季平均气温、气温变异系数、气温年较差、年降水量、最暖季降水量、等温性、最冷季平均气温、最干季降水量、最冷季降水量、最冷月最低气温、降水量变异系数、最湿季降水量和最干月降水量。土壤和地形数据来源于联合国粮农组织世界土壤数据库(HWSD, <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>),包括表层土砾石体积分、阳离子交换量、土壤质地类型、砂砾质量分数、黏粒质量分数、粉砂质量分数、黏性成分阳离子交换量、土壤密度、pH值、交换性盐基总和、盐基饱和度、可交换钠盐百分比、电导率、有机碳质量分数和海拔。

采用社会经济共享浓度(Shared Socio-economic Pathways, SSP)中提供的过去、当前和未来气候数据。其中以第二代国家(北京)气候中心中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR)作为未来气候系统模式,在未来土壤和地形因子无显著变化的前提下,选择低水平温室气体排放量(SSP126)、中水平温室气体排放量(SSP245)和高水平温室气体排放量(SSP585)三个环境对白桦未来适宜分布区进行预测<sup>[20]</sup>。

为避免各因子间相似性过高导致模型过度拟合,通过方差膨胀因子(VIF)和皮尔逊(Person)相关性分析,结合MaxEnt模型预实验中各个因子贡献率,选择相关系数小于0.8且VIF值小于10的因子中对白桦分布具有较高贡献率和生态学意义的因子<sup>[21]</sup>。最终,保留5个气候因子、3个土壤因子和1个地形因子进行建模(表1)。

表1 参与MaxEnt模型运算的环境因子

环境因子类型	环境因子名称	单位
气候生物因子	年均温	℃×10
	最热月最高温	℃×10
	最冷月最低温	℃×10
	年降雨量	mm
	最暖季度降水量	mm
土壤因子	表层土砾石体积分	%
	有机碳质量分数	%
	表层土壤pH	log(H <sup>+</sup> )
地形因子	海拔	m

### 1.2 模型建立

基于爪哇(Java)语言的MaxEnt模型是一种结合机器学习和统计模型模拟预测物种分布概率的自学习模型,将白桦166个分布点数据和9个环境因子数据导入MaxEnt3.4.1软件,随机选取75%的样点作为机器学习的训练数据集,其余25%的样点作为数据验证集,重复模式为自举法(Bootstrap),进行

10 次以独立重复建模,建模结果以逻辑斯蒂(Logistic)形式输出,按照各环境因子贡献率和置换重要值确定主导环境因子。

根据 Jackknife 法分析评判各环境因子的贡献率,MaxEnt 模型准确度可通过受试者工作特征曲线(ROC)进行检验,利用曲线下面积(AUC)评估所建模型精度,AUC 值在 0.5~1.0,其值越大预测越精确。其中,AUC 值在 0.5~0.7 时表示预测结果较差,0.7~0.8 时表示预测结果一般,0.8~0.9 时表示预测结果较好,0.9~1.0 时表示预测结果非常好<sup>[22]</sup>。

### 1.3 模型优化

本研究模型优化方法采用棋盘格 2 法(Checkerboard2),调整调控倍频(RM)和特征组合(FC)2 个参数改变模型正则化水平。通过改变特征数量和组合方式以及 RM 的数值,将 MaxEnt 模型中的 5 种特征:线性特征(L)、二次型特征(Q)、片段化特征(H)、乘积型特征(P)和阈值性特征(T),与 16 个 RM 值(0.5~8.0,以 0.5 为间隔梯度)排列组合出 148 种组合方式。利用 R 语言中的 ENMeval 程序包对其进行优化测试,结果中各组合更正的赤池信息准则值(delta.AICc)和 10% 测试遗漏率越低,表示模型预测精准度越高<sup>[23-24]</sup>。

### 1.4 数据处理

运用地理信息系统 10.4.1 软件(ArcGIS 10.4.1)将模型运行后生成的数据进行可视化,根据 MaxEnt 模型生成的白桦适宜性阈值,对自然断点法划分的适宜性等级进行修正,将白桦生境适宜性划分为 4 个等级,依次为不适生区(0~0.1]、较不适生区(0.1~0.3]、一般适生区(0.3~0.5]和高度适生区(0.5~1.0)<sup>[25]</sup>。在 ArcGIS 软件中,根据上述划分的结果,对比不同时期白桦的适生区和非适生区的地理空间变化,计算并绘制各时期气候变化背景下白桦未来空间分布格局变化图;在 ArcGIS 软件中,使用物种分布模型工具箱 2.0(SDMtoolbox2.0)工具包计算白桦在当前和未来 2 个时期 3 种气候环境下的适生区质心位置及其随时间迁移方向,并计算其质心迁移距离。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型优化结果与评价

根据 166 个分布点和 9 个环境因子使用 MaxEnt 模型对白桦的潜在分布区域进行模拟预测。对比 148 类参数组合方式,当 MaxEnt 模型参数设定调控倍频(RM)为 2,特征组合(FC)为片段化特征(H)、乘积型特征(P)和阈值性特征(T)时,赤池信息准则值(delta.AICc)为 0,10% 训练遗漏率相较默

认值降低 18.5%(表 2)。因此,选取该参数作为模型最终参数,使用该参数的 10 次模拟训练 AUC 均值为 0.933(图 2),说明预测结果准确度非常好。

表 2 不同参数 MaxEnt 数模型优化结果

模型评价	特征组合	调控倍频	更正的赤池信息准则值	10% 训练遗漏率
默认	LQHPT	1	86.295	0.221 32
最优	HPT	2	0	0.180 40

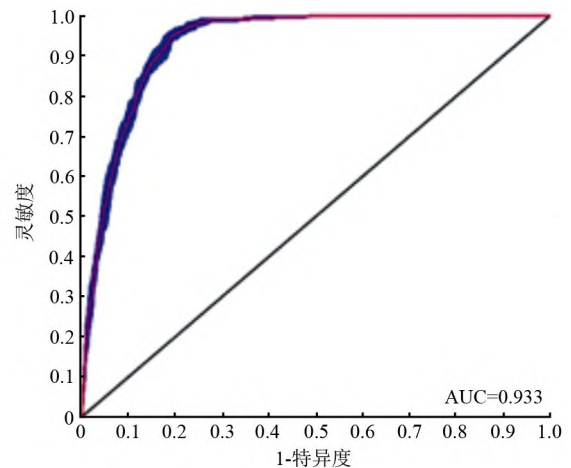


图 2 MaxEnt 模型的 ROC 响应曲线

### 2.2 当前时期我国白桦分布

通过 MaxEnt 模型推算出中国白桦当前时期的适生分布区(图 3),当前总适生区面积(一般适生区面积与高度适生区面积之和)为 1 418 524.3 km<sup>2</sup>,占我国陆地面积约 14.7%,主要分布于大兴安岭地区、小兴安岭地区、长白山地区、祁连山地区以及横断山脉地区,在河北、陕西、山西、甘肃和宁夏等省份也有小面积分布。高度适生区占总适生区面积约 43.5%,其主要位于内蒙古东北部、黑龙江西北部和东南部、吉林省东北部。在河北北部和中部、山西中部、甘肃南部、青海东部、四川西部、西藏东南部、云南西北部等地区呈破碎状分布。

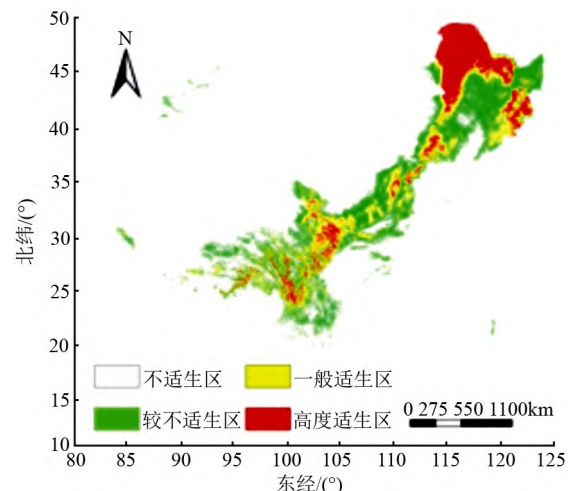


图 3 当前我国白桦潜在分布区

### 2.3 过去时期白桦地理分布

在过去 3 个时期中,白桦在东北大兴安岭地区的分布状况最为稳定,与当前白桦适生区分布基本一致。西南方向白桦适生区在 3 个时期内均向东发生不同程度的收缩。在末次间冰期,白桦在我国具有较为广泛的分布,其适生区主要位于我国青藏高原和东北大兴安岭地区,其中高度适生区占总适生区面积的 67.3%(图 4,表 3)。在末次冰盛期,白桦总适生区面积相较末次间冰期仅有 0.1% 的小幅度增加,但总适生区在我国分布位置出现较大变化,在东北大兴安岭、小兴安岭、长白山地区具有大面积的新增适生区出现,同时西藏西部地区的适生区大面积消失(图 5),仅在青海、西藏、四川 3 省交界处有较大面积留存。在全新世中期,白桦总适生区面积缩减较为明显,仅为末次冰盛期面积的 66.8%,分布范围与当前时期最为相似(图 4),青藏高原大部分地区已不适合白桦生长,西南地区适生区开始呈现出破碎化趋势,东北地区白桦适生区与当前气候条件下基本一致。

### 2.4 未来气候环境下白桦地理分布

根据表 3,在未来时期 3 类气候条件下,白桦总适生区面积均为缩小趋势,2050 s 和 2090 s 总适生区面积相较前一时期均有不同程度的缩减。在 SSP126 未来气候环境下,总适生区面积损失最小,2050 s 总适生区面积相较当前总适生区缩小 23.0%,约合面积为 325 486 km<sup>2</sup>;2090 s 总适生区面积相较

2050 s 总适生区小幅度缩小 0.8%,损失面积仅为 9 201 km<sup>2</sup>。在 SSP245 环境下,2050 s 总适生区面积相较当前总适生区缩小 23.7%,约合面积为 336 076 km<sup>2</sup>;2090 s 总适生区面积相较 2050 s 缩小 15.8%,损失面积约为 170 711.9 km<sup>2</sup>。在 SSP585 环境下,总适生区面积损失最大,2050 s 总适生区面积相较当前总适生区缩小 32.9%,约合面积为 467 239.3 km<sup>2</sup>;2090 s 总适生区面积相较 2050 s 缩小 37.4%,约合面积为 355 746.5 km<sup>2</sup>,此时总适生区缩减比例最高。

通过未来各时期适生区变化可以看出,SSP245 和 SSP585 环境下白桦适生区对气候变化的响应最敏感(图 4)。在 SSP245 环境下,2050 s 高度适生区面积相较当前减少 33.9%,面积约为 208 854.2 km<sup>2</sup>;在 2090 s 白桦高度适生区面积的变化幅度最大,高度适生区面积相较当前减少 64.7%,面积约为 399 323 km<sup>2</sup>。在 SSP126 环境下,2050 s 高度适生区面积的变化幅度最小,新增加适生区增加率最低,高度适生区面积相较当前减少 28.3%,面积约为 174 635.5 km<sup>2</sup>;2090 s 高度适生区面积将持续减小,相较当前时期减少 34.9%,减少面积约为 215 312.5 km<sup>2</sup>,但此时期新增适生区面积的增加率最高。在 SSP585 环境下,2050 s 高度适生区面积相较当前时期减少 55.0%,面积约为 339 444.5 km<sup>2</sup>;2090 s 高度适生区面积为当前时期适生区面积的 36.3%,减少面积约为 393 020.9 km<sup>2</sup>。

表 3 不同时期白桦适生区空间变化

未来气候变化	面积/km <sup>2</sup>					面积变化率/%		
	总适生区	高度适生区	丧失区	增加区	保留区	丧失率	增加率	保留率
末次间冰期	1 764 344.0	1 186 958.0	814 804.3	842 139.9	945 474.9	45.5	47.1	52.9
末次冰盛期	1 788 819.0	1 123 229.0	784 022.5	186 302.9	1 006 458.0	65.6	15.6	84.2
全新世中期	1 194 865.0	887 852.8	569 622.8	801 454.9	626 888.9	40.2	54.5	44.2
当前(2000s)	1 418 524.0	616 805.6	-	-	-	-	-	-
SSP126-2050s	1 093 038.0	442 170.1	392 507.2	71 511.2	1 024 658.0	27.6	5.0	72.2
SSP126-2090s	1 083 837.0	401 493.1	129 538.1	122 811.6	957 361.9	29.4	5.5	70.3
SSP245-2050s	1 082 448.0	407 951.4	418 936.9	78 863.3	1 000 951.0	39.9	6.9	60.1
SSP245-2090s	911 736.1	217 482.6	242 767.1	65 336.4	841 709.8	22.7	11.3	77.3
SSP585-2050s	951 284.7	277 361.1	568 914.2	98 146.3	855 937.2	22.5	6.1	78.0
SSP585-2090s	595 538.2	223 784.7	424 168.5	56 608.7	522 797.5	44.6	6.0	54.9

### 2.5 质心迁移趋势

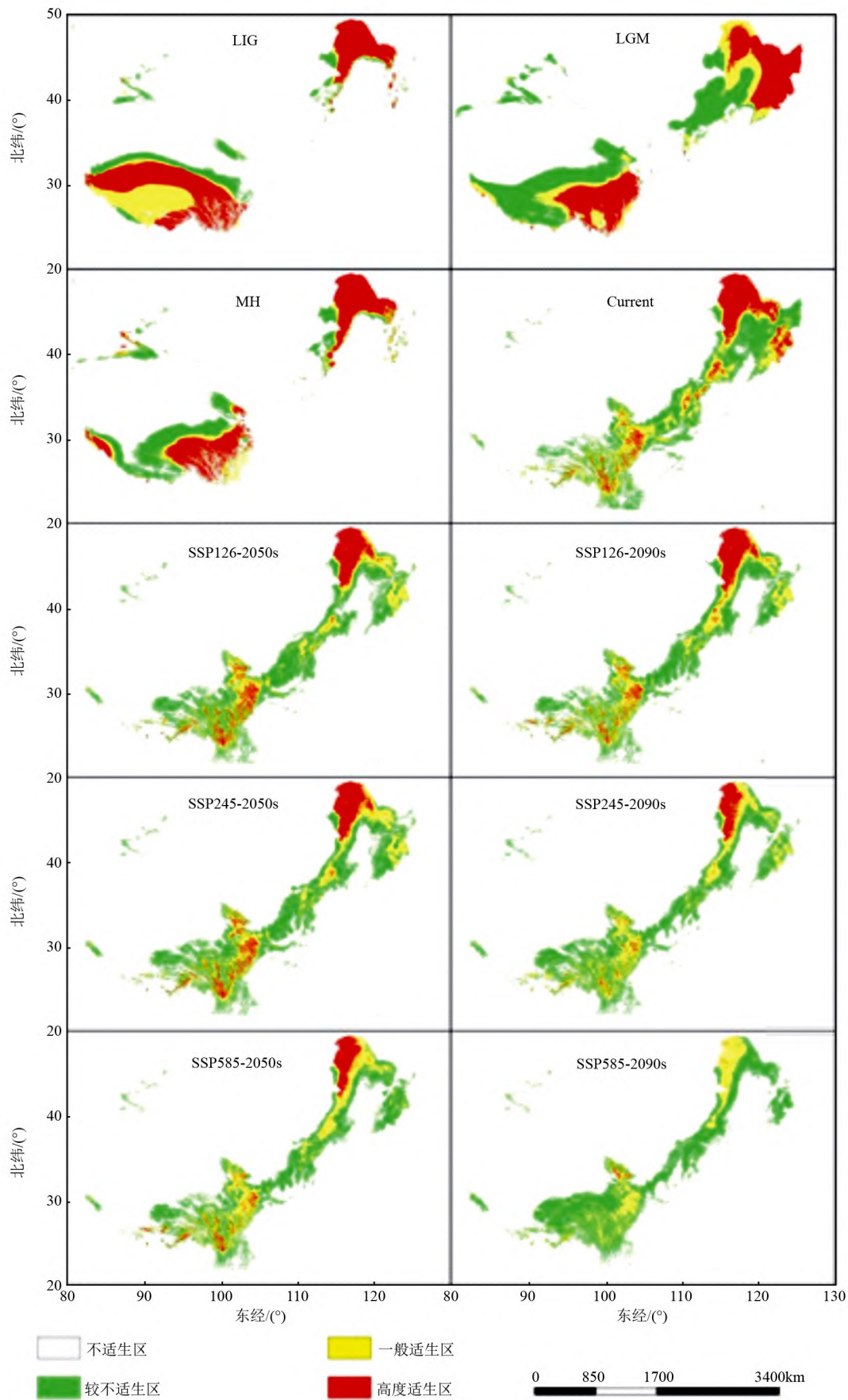
在空间格局方面,过去时期白桦适生区的质心总体向东北迁移,而未来不同气候环境下质心总体向西南迁移,迁移距离随气候变化加剧有进一步扩大的趋势(图 6)。当前时期白桦适生区的质心在河北省张家口市沽源县(115°33'36"E,41°35'24"N)。当气候环境为 SSP126-2090s 时,适生区质心向西迁移至内蒙古自治区乌兰察布市商都县(113°58'12"E,41°40'12"N),迁移距离为 133 121 m;当气候

环境为 SSP585-2090s 时,质心向西南迁移至内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特中旗(109°38'24"E,40°38'24"N),距离为 506 837 m。

### 2.6 环境因子分析

根据 Jackknife 法分析结果(表 4),对白桦潜在地理分布贡献率超过 5% 的因子分别为最暖季度降水量、最热月最高气温、年均温、年降水量、最冷月最低气温和海拔,这 6 个环境因子的总贡献率高达 89.8%,同时这 6 个环境因子的总置换重要

值为 94.4%。



LIG 表示为末次间冰期, LGM 表示为末次冰盛期, MH 表示为全新世中期, Current 表示为当前时期。

图 4 我国不同时期白桦适生区分布

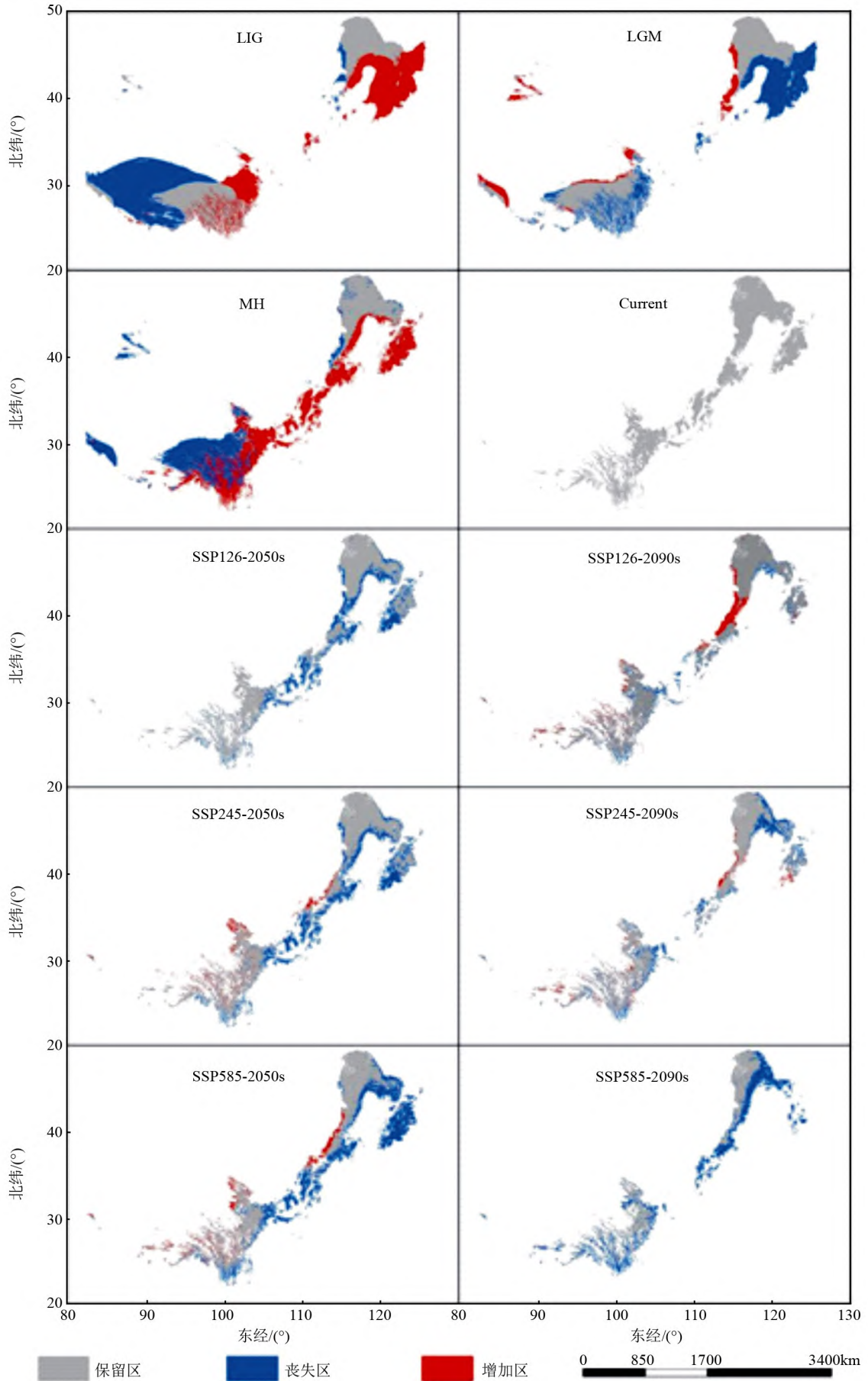


图 5 不同时期白桦空间分布格局变化

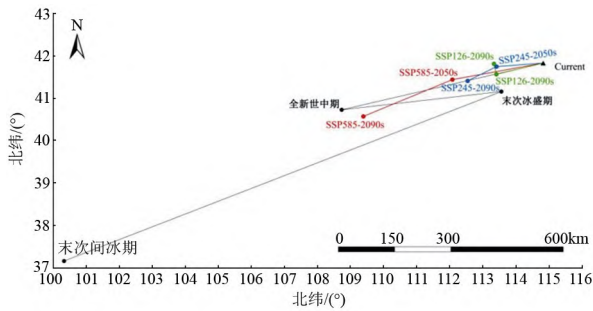


图 6 不同气候变化下白桦适生区质心变化

表 4 参与建模的环境因子贡献率及置换重要值

环境因子	贡献率/%	置换重要值/%
最暖季度降水量	23.2	27.4
最热月最高温	18.1	4.5
年均温	15.8	23.2
年降水量	14.2	11.2
最冷月最低温	7.8	6.0
海拔	10.7	22.1
表层土砾石体积分数	5.0	3.2
表层土 pH 值	4.9	1.8
有机碳质量分数	0.3	0.5

表 5 不同模式情境下白桦适生区环境因子与白桦生境适宜度的变化

未来气候变化	年均温/ $^{\circ}\text{C}$	最热月最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	最冷月最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	年降水量/mm	最暖季度降水量/mm	表层土砾石体积分数/%	表层土 pH 值( $\text{H}_2\text{O}$ )	海拔/m	物种生境适宜度
当前(2000s)	1.23	22.65	-23.30	537.58	332.84	5.7	6.72	1 537.45	0.53
SSP126-2050s	3.18	25.01	-20.55	552.25	342.18	5.7	6.72	1 537.45	0.46
SSP126-2090s	3.40	25.13	-20.72	572.22	355.37	5.7	6.72	1 537.45	0.44
SSP245-2050s	3.76	25.92	-19.73	560.96	344.27	5.7	6.72	1 537.45	0.44
SSP245-2090s	4.86	27.00	-18.45	584.87	369.27	5.7	6.72	1 537.45	0.38
SSP585-2050s	4.48	26.52	-19.43	579.38	362.22	5.7	6.72	1 537.45	0.40
SSP585-2090s	7.29	29.36	-16.32	627.28	402.23	5.7	6.72	1 537.45	0.28

### 3 讨论

#### 3.1 优化后模型对白桦适生区预测

优化后的 MaxEnt 模型预测结果与白桦实际地理分布高度一致,表明经过优化后的 MaxEnt 模型用于白桦的分布区预测时,预测结果较为准确、可靠。当前白桦主要分布于内蒙古东部、黑龙江、吉林、河北、河南、陕西、宁夏、甘肃、青海、四川、云南和西藏东南部等地区<sup>[26]</sup>,通过对比分析各参数组合预测结果和实际分布区域的拟合程度以及对地理预测图进行视觉检查来判断模型预测精度<sup>[27]</sup>,优化后的 MaxEnt 模型对白桦适生区的预测结果也恰好位于上述地区。

#### 3.2 环境因子对白桦地理分布制约

水热因子是影响白桦分布的决定性因子。在本研究中,白桦高度适生区的平均最热月最高气温为  $22.7^{\circ}\text{C}$  和最冷月最低气温为  $-23.3^{\circ}\text{C}$ ,与我国白桦连续分布面积最大的大兴安岭北部地区最热月最高气

#### 2.7 未来分布区生态特征变化

影响白桦分布的主要环境因子与白桦生境适宜度关系见表 5。在 SSP126 气候环境下,2050 s 和 2090 s 白桦生境适宜度分别比当前降低了 0.07 和 0.09;在 SSP245 气候环境下,2050 s 和 2090 s 白桦生境适宜度分别比当前低 0.09 和 0.15;在 SSP585 气候环境下,2050 s 白桦生境适宜度比当前低 0.13,2090 s 白桦生境适宜度相较当前大幅降低 47.2%,仅为 0.28。

166 个白桦分布点的年平均气温与白桦生境适宜度的变化呈相反趋势。在 SSP126、SSP245 和 SSP585 气候环境下,2050 s 的年平均气温相较当前时期分别增加 158.5%、205.7% 和 264.2%;2090 s 相较 2050 s 年平均气温分别增加 6.9%、29.3% 和 62.7%。年降水量与年平均气温相似,均与白桦生境适宜度变化相反。在 SSP126、SSP245 和 SSP585 环境下,2050 s 的年降水量相较当前分别增加 14.67、23.38 和 41.80 mm;2090 s 与 2050 s 相比,年降水量分别增加 19.97、23.91 和 47.9 mm。

温  $16.0\sim 17.9^{\circ}\text{C}$  和最冷月最低气温  $-25.4\sim -30.0^{\circ}\text{C}$  相比较略高<sup>[28]</sup>,这是由于本研究在分析白桦最适环境因子时将各地白桦高度适生区对应环境因子数值按分布区面积进行加权平均,所以导致整体平均值有所提高。同时,降水作为影响白桦地理分布的主要环境因子之一,白桦高度适生区最暖季度降水量占年降水量的 69.1%,这说明白桦喜生于夏季较为湿润的立地环境,但我国东南沿海地区白桦分布较少的现象也说明过量降水也会对白桦的分布存在一定的限制。

本研究白桦分布高度适生区平均海拔为 1 537.5 m,与先前研究得出白桦主要分布在 400~4 100 m 的结论存在一定差异<sup>[26]</sup>,这是因为本研究中白桦在东北海拔 1 000 m 以下地区和华北海拔 1 300~1 900 m 地区的高度适生区面积占比最大,而西南高海拔地区白桦高度适生区呈小面积破碎状分布,这种分布格局导致白桦分布高度适生区平均海拔相较先前研究有所降低<sup>[29-30]</sup>。参与建模的土壤因子对白桦分

布的影响相对较小,说明白桦对土壤不敏感,这也是白桦在我国有较为广泛分布的一个重要原因。

### 3.3 各时期气候变化对中国白桦分布影响

通过对白桦历史时期分布区模拟表明,在末次间冰期,白桦作为一种耐寒树种,广泛分布于此时较为寒冷的青藏高原和大兴安岭地区;在末次盛冰期,青藏高原地区的白桦适生区向东较暖地区进行了大幅度迁移;在全新世中期,由于气候与当前时期类似,白桦适生区也呈现出与当前适生区相似的分布情况<sup>[31-32]</sup>。古植被研究表明,在末次间冰期,温带树种在北半球广泛分布,具有良好的生态适应性;到末次冰盛期,其在高纬度地区分布范围发生收缩;在全新世中期,温带树种适宜生境有一定程度的扩大<sup>[33-35]</sup>。白桦过去时期适生区变化基本印证了这一结论。在3个历史时期中,大兴安岭地区均保留有大面积白桦适生区,因此本研究推断白桦在冰川期的气候避难所为大兴安岭地区。

在未来 SSP126、SSP245 和 SSP585 气候变化下,白桦适生区面积均有不同程度的缩小,并且对 SSP245 和 SSP585 气候变化环境下的影响最敏感。白桦在我国东北适生区分布范围向北收缩尤为明显,与其混交林常见树种兴安落叶松向北迁移趋势基本一致<sup>[36]</sup>。在西南部的适生区面积也随高温高湿的加剧而收缩,但西南适生区收缩速率明显低于东北适生区。在温室气体排放浓度相同时,除 SSP126 环境下的 2090 s 白桦适生区质心点向西北小幅度迁移外,在 SSP245 和 SSP585 两种较高温室气体排放浓度下,由于东北地区的白桦适生区面积相较西南地区白桦适生区收缩幅度更大,2090 s 和 2050 s 白桦适生区质心均向西南方向迁移,并且迁移距离随温室效应加剧而进一步加大。这与我国温带森林树种地理分布在未来全球变暖下向高纬度区域和高海拔地区迁移的趋势基本相符<sup>[37]</sup>。

## 4 结论

当 MaxEnt 模型参数特征组合为片段化特征、乘积型特征和阈值性特征,且调控倍频为 2,此设置下模型的复杂程度较低,对白桦潜在分布区预测精度最高。

中国白桦当前适生区主要分布于大兴安岭地区、小兴安岭地区、长白山地区、祁连山地区以及横断山脉地区,均为高纬度或较高海拔地区,其中大兴安岭地区自末次间冰期以来一直为白桦主要适生区。

在影响白桦分布的环境因子中,白桦分布对水热因子的变化最为敏感,土壤和地形因子的影

响较小。

在全球变暖的环境下,全国各地白桦适生区均发生不同程度的收缩,并向更高海拔或更高纬度地区迁移。白桦在我国东北地区和西南较低海拔地区的适生区将大面积消失,且几乎无新增加适生区出现。

将白桦作为目标树种进行造林时,应结合当地白桦生境适宜度变化趋势,制定合理造林方案,避免因未来气候变暖造成白桦林大面积退化带来的损失。

## 参 考 文 献

- [1] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书(2021)[M].北京:科学出版社,2021.
- [2] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] LI X H, TIAN H D, WANG Y, et al. Vulnerability of 208 endemic or endangered species in China to the effects of climate change[J]. Regional Environmental Change, 2013, 13(4): 843-852.
- [4] SHARMA E, CHETTRI N, TSHE R K, et al. Climate change impacts and vulnerability in the eastern Himalayas[M]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2009.
- [5] 王春晶.气候变化背景下中国野生植物地理分布格局及优先保护[D].北京:北京林业大学,2017.
- [6] BEZENG B S, MORALES C I, VAN DER BANK M, et al. Climate change may reduce the spread of non-native species[J]. Ecosphere, 2017, 8(3).doi: 10.1002/ecs2.1694.
- [7] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. Ecography, 2006, 29(2): 129-151.
- [8] 刘晓彤,袁泉,倪健.中国植物分布模拟研究现状[J].植物生态学报, 2019, 43(4): 273-283.
- [9] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [10] 赵光华,崔馨月,王智,等.气候变化背景下我国酸枣潜在适生区预测[J].林业科学, 2021, 57(6): 158-168.
- [11] 牛若恺,高润红,侯艳青,等.气候变化下沙冬青适宜分布区预测[J].西北林学院学报, 2021, 36(1): 102-107.
- [12] 张伟萍,胡云云,李智华,等.气候变化情景下祁连山圆柏在青海省的适宜分布区预测[J].应用生态学报, 2021, 32(7): 2514-2524.
- [13] 李金霞,储博彦,尹新彦,等.白桦研究现状综述[J].湖北农业科学, 2019, 58(2): 5-9, 32.
- [14] 刘建荣.利用多孔菌开发桦树汁生物保鲜剂的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [15] 周梅,曾楠,赵鹏武,等.大兴安岭南段白桦次生林生态系统服务价值评估[J].林业资源管理, 2014(1): 120-126.
- [16] 董灵波,田栋元,刘兆刚.大兴安岭次生林空间分布格局及其尺度效应[J].应用生态学报, 2020, 31(5): 1476-1486.
- [17] 王楚,王阳,邹建军,等.转 BpCCR1 基因白桦生长适应性分析及优良株系选择[J].北京林业大学学报, 2022, 44(7): 52-62.
- [18] ZHANG X, LIN X, CHEN S, et al. Overexpression of BpERF1.1 in *Betula platyphylla* enhanced tolerance to multiple abiotic stresses[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2022, 28(6): 1159-1172.
- [19] PAN L, WANG X W. Additive root biomass equations for *Betula platyphylla* Suk. plantations in northeast China[J]. Forests, 2022, 13(5).doi: 10.3390/f13050661.
- [20] 翁宇威,蔡闻佳,王灿.共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望[J].气候变化研究进展, 2020, 16(2): 215-222.
- [21] 张天蛟,刘刚.提高生态位模型时间转移能力的方法研究[J].中国农业大学学报, 2017, 22(2): 98-105.

(下转 69 页)



- 候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [34] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局及其气候解释[J]. 生物多样性, 2008, 16(5): 470-476.
- [35] 张晨星, 张炜, 徐晶晶, 等. 基于 GIS 和最大熵模型的河北省油松适宜性分布分析[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 18-25.
- [36] 黄红兰, 种沃谷, 衣德萍, 等. 未来气候变化对我国毛红椿适生区分布格局的影响预测[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 163-170.
- [37] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 等. 末次盛冰期以来红豆树在不同气候变化情景下的分布动态[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 3016-3026.
- [38] 吴中伦. 杉木[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.
- [39] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [40] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421: 57-60.
- [41] 孟艺宏, 徐瑀, 姜小龙, 等. 双花木属植物潜在分布区模拟与分析[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2816-2825.
- [42] 吴建国. 气候变化对 7 种荒漠植物分布的潜在影响[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(5): 650-661.
- [43] 黄睿智, 于涛, 赵辉, 等. 气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33-43.
- [44] 马东旭, 周一, 陆双飞, 等. 基于 MaxEnt 模型的 11 种云南常见阔叶树种气候适宜性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(5): 64-72.
- [45] KELLY A E, GOULDEN M L. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, 2008, 105(33): 11823-11826.

### (上接 42 页)

- [13] 侯鑫源. 湖北神农架自然保护区不同海拔高度巴山冷杉径向生长对气候的响应[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [14] 张芳芳, 郑永宏, 潘国艳, 等. 神农架地区树轮  $\delta^{18}\text{O}$  序列的气候指示意义[J]. 地理科学进展, 2018, 37(7): 946-953.
- [15] WIGLEY T M L, BRIFFA K R, JONES P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. Journal of Climatology & Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.
- [16] JEVŠENAK J, LEVANIĆ T. Dendro Tools: R package for studying linear and nonlinear responses between tree-rings and daily environmental data[J]. Dendrochronologia, 2018, 48: 32-39. doi: 10.1016/j.dendro.2018.01.005.
- [17] DANG H S, ZHANG K R, ZHANG Y J, et al. Tree-line dynamics in relation to climate variability in the Shennongjia Mountains, central China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(10): 1848-1858.
- [18] ZHENG Y H, SHAO X M, LU F, et al. February-May temperature reconstruction based on tree-ring widths of *Abies fargesii* from the Shennongjia area in central China[J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(8): 1175-1181.
- [19] SANG W G, WANG Y X, SU H X, et al. Response of tree-ring width to rainfall gradient along the Tianshan Mountains of north-western China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21): 2954-2962.
- [20] 侯鑫源, 史江峰, 李玲玲, 等. 湖北神农架巴山冷杉径向生长对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 689-696.
- [21] CHABOT B F, HICKS D J. The ecology of leaf life spans[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982, 13(1): 229-259.
- [22] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [23] DANG H S, ZHANG Y J, ZHANG K R, et al. Climate-growth relationships of subalpine fir (*Abies fargesii*) across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China[J]. Climatic Change, 2013, 117(4): 903-917.
- [24] 郑煜烽, 靳立亚, 李金建, 等. 树轮记录的 1808 年以来神农架地区平均气温的变化[J]. 第四纪研究, 2021, 41(2): 334-345.

### (上接 61 页)

- [22] RONG Z L, ZHAO C Y, LIU J J, et al. Modeling the effect of climate change on the potential distribution of Qinghai Spruce (*Picea crassifolia* Kom.) in Qilian Mountains[J]. Forests, 2019, 10(1). doi: 10.3390/f10010062.
- [23] 赵光华, 樊保国. 末次间冰期以来濒危植物藤枣适生区空间迁移预测[J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 174-182, 229.
- [24] 李安, 李良涛, 高萌萌, 等. 基于 MaxEnt 模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测[J]. 农学学报, 2020, 10(1): 60-67, 76.
- [25] ZHAO G H, CUI X Y, SUN J J, et al. Analysis of the distribution pattern of Chinese *Ziziphus jujuba* under climate change based on optimized biomod2 and MaxEnt models[J]. Ecological Indicators, 2021, 132. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108256.
- [26] 匡可任, 郑斯绪, 李沛琼. 中国植物志(第二十一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [27] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, DUDIK, et al. Opening the black box: an open-source release of MaxEnt[J]. Ecography, 2017, 40(7): 887-893.
- [28] 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.
- [29] 杨慧, 娄安如, 高益军, 等. 北京东灵山地区白桦种群生活史特征与空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2007(2): 272-282.
- [30] 李金霞, 储博彦, 尹新彦, 等. 白桦研究现状综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(2): 5-9, 32.
- [31] DIAS J M A, BOSKI T, RODRIGUES A, et al. Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present—a synthesis[J]. Marine Geology, 2000, 170(1/2): 177-186.
- [32] TARASOV P, BEZRUKOVA E, KARABANOV E, et al. Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian-interglacials derived from Lake Baikal pollen records[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2007, 252(3/4): 440-457.
- [33] 白伟宁, 张大勇. 植物亲缘地理学的研究现状与发展趋势[J]. 生命科学, 2014, 26(2): 125-137.
- [34] 倪健, 宋永昌. 中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种的分布与 Kira 指标的关系[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 248-262.
- [35] ZHENG Z, HUANG K Y, DENG Y, et al. A similar to 200 ka pollen record from Okinawa Trough: Palaeoenvironment reconstruction of glacial-interglacial cycles[J]. Science China-Earth Sciences, 2013, 56(10): 1731-1747.
- [36] 李峰. 兴安落叶松林分布及生产力对气候变化的响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院植物研究所), 2006.
- [37] CHEN X W. Modeling the effects of global climatic change at the ecotone of boreal larch forest and temperate forest in northeast China[J]. Climatic Change, 2002, 55: 77-97. doi: 10.1023/A: 1020273107954.