

## 基于气候变化背景的东北岩高兰潜在分布区预测

付宇<sup>1</sup>, 安慧君<sup>1\*</sup>, 高明龙<sup>1</sup>, 李贺新<sup>2</sup>, 张茹<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区第二林业和草原监测规划院, 内蒙古 兴安盟 137400)

**摘要:**为探究东北岩高兰潜在适生区变化,明确其适宜分布情况,为科学保护和开发利用该物种提供理论依据,以东北岩高兰分布数据和 30"分辨率的环境数据为基础,利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS,通过相关性分析以及 VIF 分析对环境因子进行筛选并建立模型,预测未来不同气候情景下的东北岩高兰潜在分布区。结果表明,受试者工作特征曲线下面积(AUC)为 0.998,达到了优秀水平预测结果;影响东北岩高兰分布的主要环境因素是最干季度平均温度、最冷月最低温和海拔,综合贡献值分别为 50.2%、21.9%和 5.5%,3 项累计贡献率可达 77.6%;东北岩高兰适生区几何中心一直是向南迁移的趋势,相邻 2 个时期最大迁移距离为 76 988 m。气候变化背景下东北岩高兰最终适生区会继续向高海拔高纬度的低温地区迁移。研究结果为探查尚未发现的东北岩高兰分布、规划东北岩高兰引种栽培提供基础。

**关键词:**东北岩高兰;MaxEnt 模型;气候变化;物种分布变迁

**中图分类号:**Q949.754.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)05-0049-08

### Prediction of Potential Distribution Area of *Empetrum nigrum* var. *japonicum* Based on Climate Change Background

FU Yu<sup>1</sup>, AN Hui-jun<sup>1\*</sup>, GAO Ming-long<sup>1</sup>, LI He-xin<sup>2</sup>, ZHANG Ru<sup>1</sup>

(1. Forest College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China, Inner Mongolia;

2. The Second Institute of Forestry Monitoring and Planning of Inner Mongolia, Xinggan League 137400, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** *Empetrum nigrum* var. *japonicum* is a rare plant with important medicinal and economic values growing in northeastern China. It is distributed in the North temperature and Arctic regions. With the intensification of global warming in recent years, the suitable range of *E. nigrum* var. *japonicum* may be further reduced. In order to explore the change of its potentially suitable area, clarify its suitable distribution, and provide a theoretical basis for scientific protection, development and utilization of this species, based on distribution data of *E. nigrum* var. *japonicum* and 30" resolution environmental data in the study area, MaxEnt model and ArcGIS were used to screen environmental factors and establish models through correlation analysis and VIF analysis to predict potentially suitable distribution area of *E. nigrum* var. *japonicum* under different climate scenarios in the future. The model indicated that the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) was 0.998, which reached the excellent prediction result. The main environmental factors affecting the distribution of *E. nigrum* var. *japonicum* were the average temperature in the driest quarter and the minimum temperature and altitude in the coldest month, with comprehensive contributions of 50.2%, 21.9% and 5.5%, respectively. The cumulative contribution of the three factors reached 77.6%. The geometric center of the suitable area of *E. nigrum* var. *japonicum* had always been the trend of southward migration, and the maximum migration distance of the two adjacent periods was

收稿日期:2022-08-05 修回日期:2022-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31660172)。

第一作者:付宇。研究方向:3S技术应用与资源监测评价。E-mail:540953921@qq.com

\*通信作者:安慧君,博士,教授,博士生导师。研究方向:3S技术应用与资源监测评价。E-mail:dean6928@126.com

76 988 m. Under the background of climate change, *E. nigrum* var. *japonicum* final suitable areas would continue to migrate to higher elevations and latitudes. The results provide a basis for exploring the undiscovered distributions of and planning the introduction and cultivation of *E. nigrum* var. *japonicum*.

**Key words:** *Empetrum nigrum* var. *japonicum*; MaxEnt model; climate change; species distribution change

随着人类活动造成的温室气体排放增加,全球气候变暖加剧,植物分布范围也随之受到严重的影响<sup>[1-3]</sup>。系统分析气候变化对植物分布产生的影响,成为当前需要重视的问题<sup>[4-5]</sup>。因此以物种分布模型为主的物种分布区研究已成为生态学领域的一大研究热点<sup>[6]</sup>,目前主要的物种分布模型有 GARP、BIOCLIM、GLM、HABITAT、CLIMEX 和 MaxEnt 等模型,其中 MaxEnt 模型应用最为广泛,该模型不仅具有良好的稳定性、预测结果精准度高等优点,同时在数据样本量残缺或者数据样本量较小的情况下预测效果仍较为优秀<sup>[7-8]</sup>。

东北岩高兰(*Empetrum nigrum* var. *japonicum*)是岩高兰科(Empetraceae)岩高兰属(*Empetrum*)在我国分布的唯一一种,为环北极、中生喜酸常绿匍状矮小灌木<sup>[9-10]</sup>。其具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、喜光及抗风等特性,我国主要分布于大兴安岭北部部分石质山地,常生于树木稀少的偃松(*Pinus pumila*)丛旁,或小片生于落叶松(*Larix gmelinii*)疏林下或石隙间。东北岩高兰在食用、药用及生态保护方面具有重要价值,目前这些方面开展的研究也较多<sup>[11-12]</sup>。但是关于东北岩高兰潜在适生区的研究尚未见报道。

东北岩高兰分布于北温带及北极地区,近些年随着全球气候变暖,其适生范围可能进一步缩小。本研究利用 MaxEnt 模型,建立未来 2050s 和 2090s 2 个时期在 SSP126、SSP245 和 SSP585 3 种气候情景下的东北岩高兰适生区,分析其空间分布格局变化及主要限制因子,预测其适应全球变暖的速度及做出的适应性转移,研究结果对我国珍稀植物东北岩高兰未来制定其保护利用策略等有重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 东北岩高兰地理分布数据的收集

2017—2022 年通过野外实地调查,在大兴安岭北部林区东北岩高兰分布区域获取 21 个东北岩高兰分布点数据;结合国家标本馆(NSII, <http://www.nsii.org.cn>)、中国数字标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn>)及其他相关文献公开资料(中国知网、Springer、WileyInterScience、ScienceDirect 等),获取 21 个东北岩高兰分布点数据。利用图新地球软件对获取的分布点进行比对分析,每 5 km 网格保留 1 个分布点,最终整理得到 34 个分布点(图 1)。

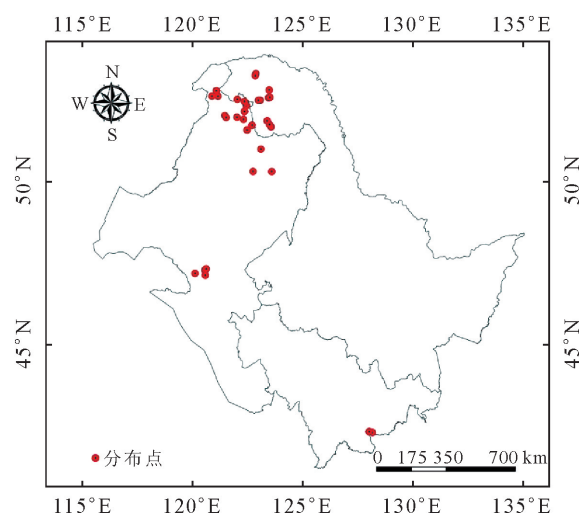


图 1 中国东北岩高兰地理分布点

Fig. 1 Distribution sampling sites of *E. nigrum* var. *japonicum* in northeastern China

### 1.2 环境变量及筛选

选用的 34 个空间分布点的 34 个环境变量均为空间分辨率 30'' 的环境因子,包括 19 个生物气候因子、14 个土壤因子和 1 个地形因子。当前、2050s 和 2090s 3 个时期气候数据来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>),土壤和来源于世界土壤数据(<http://www.fao.org/faostat>),地图数据来源于自然资源部标准地图服务网站(<http://www.mnr.gov.cn/>)的中国标准地图。根据土壤和地形因素在未来几十年保持不变的情况假定<sup>[14]</sup>,本研究中的各个时期只使用气候因素,而土壤和地形因素使用目前数据。以政府间气候变化专门委员会发布的社会经济共享路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)作为气候变化依据<sup>[14]</sup>,在温室气体排放量高水平 SSP585、中水平 SSP245 和低水平 SSP126 3 个气候情景下<sup>[15]</sup>对东北岩高兰未来适宜分布区预测。

为避免各变量因子相互作用,导致因子多重共线性过强,造成模型拟合导致的预测结果准确性降低,本研究利用 Pearson 相关性检验和 VIF 分析,结合各因子贡献率进行筛选和相关性,选择相关小且具有较高贡献率和生态学意义的拟合因子,保留 VIF 值 < 10 并且相关系数 < 0.8 的因子<sup>[16]</sup>。最终得到 7 个气候因子、4 个土壤因子和 1 个地形因子进行建模(表 1)。

表 1 参与 MaxEnt 模型运算的环境变量  
Table 1 Environmental variables for MaxEnt model prediction

类型	因子	单位
气候生物因子	年均温	℃
	等温性	—
	气温季节性变动系数	—
	最热月最高温	℃
	最冷月最低温	℃
	最干季度平均温度	℃
土壤因子	年降水量	mm
	表层土砾石含量	% wt.
	有机碳含量	% wt.
	表层土壤 pH	Log(H+)
地形因子	表层粉沙粒含量	% wt.
	海拔	m

1.3 模型优化及判别标准

基于 Java 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<sup>[17]</sup>,将东北岩高兰 34 个分布点位置数据和 12 个环境因子数据导入 MaxEnt3.4.1 软件,为保证结果的准确性,尽量减少数据自相关对模型系数以及统计推断的影响<sup>[18]</sup>,将分布点数据随机分成 75% 训练数据集和 25% 数据验证集,重复模式为 Bootstrap,进行 10 次独立重复建模,建模结果以 Logistic 形式输出,通过 Jackknife 法根据各环境因子贡献率和置换重要值大小得出主导环境因子。

模型准确度可通过受试者工作特征曲线 (ROC) 下面积 AUC 进行评估,AUC 值在 0.5~0.7 时表示预测较差,0.7~0.8 时表示预测结果一般,0.8~0.9 时表示较好,0.9~1.0 时表示非常好<sup>[19-22]</sup>。

采用 Checkerboard2 法,将研究区域分为 4 个掩蔽的地理结构,通过调整模型中调控倍频 (regularization multiplier, RM) 和特征组合 (feature combination, FC) 2 个参数对 MaxEnt 模型进行优化。MaxEnt 软件默认参数为 FC=LQHP, RM=1;调用 EMNeval 数据包优化 MaxEnt 模型,将特征组合 RM 设置为 0.5~8,每次间隔 0.5,共 8 种调控倍频;采用 6 个特征组合,即 L、LQ、H、LQH、LQHP、LQHPT。ENMeval 数据包将上述 48 种参数组合进行测试,最终根据 Akaike 信息量准则模型中的 delta. AICc 和 10% 测试遗漏率检验模型的拟合度与复杂度。

1.4 数据分析处理

将筛选后的环境数据及东北岩高兰分布点数据输入优化后的 MaxEnt 模型后,基于 ArcGIS10.6 将模型运行后结果进行可视化处理。对栅格图层值

域为[0,1]适生图运用自然段点法,分为非适生区(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)<sup>[23]</sup>;根据各时期不同气候背景预测的未来时期东北岩高兰空间格局分布进行可视化处理,得到不同时期的空间格局分布图;在 ArcGIS10.6 中运用 SDMtoolbox2.0 工具包,得到东北岩高兰在当前和未来气候情景下的适生区质心位置,计算质心迁移距离。

2 结果与分析

2.1 模型优化与评价

在当前气候下,当 MaxEnt 为默认参数设置时,调控倍率  $R_M = 1$ ,特征组合  $F_C = L_{QHP}$ , delta. AICc=83.374 1。在 144 类参数组合方式中,当 MaxEnt 模型参数设定为  $R_M = 0.5, F_C = L_{QHPT}$  时, delta. AICc=0, 10% 训练遗漏率相较默认值降低 8.3% (表 2)。选取调控倍频  $R_M = 0.5$ 、特征组合  $F_C = L_{QHPT}$ , 作为模型最终参数,使用该参数的 10 次模拟训练  $A_{UC}$  均值为 0.998 (图 2),说明预测结果相较初始模型精确度有较大提高。

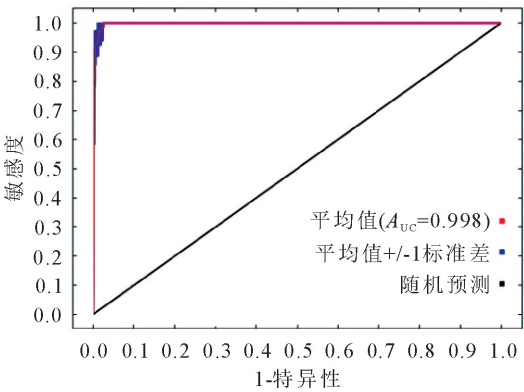


图 2 MaxEnt 模型的 ROC 响应曲线

Fig. 2 ROC response curve of MaxEnt model

表 2 不同参数 MaxEnt 数模型优化结果

Table 2 Environmental results of MaxEnt model under different parameter settings				
模型评价	特征组合	调控倍频	delta. AICc	10% 训练遗漏率
默认	$L_{QHP}$	1	83.374 1	0.317 214 439
最优	$L_{QHPT}$	0.5	0	0.290 593 263

2.2 分布区生态特性及变化

根据 Jackknife 法分析东北岩高兰潜在地理分布的贡献率,超过 3% 的因子分别为最干季度平均温度 (50.2%)、最冷月最低温 (21.9%)、海拔 (5.5%)、最热月最高温 (4.6%)、年均温 (4.0%)、气温季节性变动系数 (3.3%)、年降水量 (3.2%),其中

最干季平均温度贡献率最高,这 7 个环境因子的总贡献率高达 92.7%、总重要值为 87.1%。

在 ArcGis10.6 中根据当前坐标点,提取未来气候背景下影响东北岩高兰分布的主要环境因子,得到不同气候背景下的生境适宜度(表 3)。2050s 对比当前生境适宜度仅 SSP126 气候情景略有下降外,SSP245 气候情景和 SSP585 气候情景下 2050s 与当前环境适宜度变化不大。而在 2090s 时,3 种气候情景条件下生境适宜度均呈下降趋势;与当前

相比,SSP126、SSP245 和 SSP585 3 种气候情景下的最干季平均温度整体呈现升温的趋势,基本和生境适宜度呈负相关;34 个东北岩高兰分布点的年降水量在各个气候情景下均为增长趋势。在 SSP126 气候情景下降水量变化较小,2050s 和 2090s 分别增长了 28.8 mm 和 5.317 7 mm。在 SSP245 和 SSP585 气候情景下 2050s 和 2090s 分别增长了 27.971、51.542 mm 和 39.885、70.345 mm。年降水量整体趋势上同生境适宜度呈负相关。

表 3 不同气候背景的生境适宜度

Table 3 Results of the analysis of major environmental variables in *E. nigrum* var. *japonicum* suitable area

因子	当前	2050s			2090s		
		SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
最干季度平均温度/℃	-25.428	-22.500	-22.224	-21.507	-22.470	-21.148	-17.751
最冷月最低温/℃	-34.735	-31.260	-30.803	-30.203	-32.063	-29.669	-27.003
海拔/m	976.030	976.030	976.030	976.030	976.030	976.030	976.030
最热月最高温/℃	22.647	24.971	26.754	27.434	25.509	28.18	29.777
年均温/℃	-4.986	-2.921	-2.231	-1.212	-2.427	-0.914	1.978
气温季节性变动系数	1 613.263	1 560.147	1 603.986	1 599.903	1 566.579	1 615.990	1 577.762
年降水量/mm	506.829	535.629	528.800	546.714	512.200	558.371	577.171
等温性	26.092	26.343	25.918	25.345	25.838	25.563	25.526
表层土砾石含量(%wt.)	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
有机碳含量(%wt.)	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017
表层土 pH/Log(H+)	6.494	6.494	6.494	6.494	6.494	6.494	6.494
表层粉沙粒含量(%wt.)	36.600	36.600	36.600	36.600	36.600	36.600	36.600
物种生境适宜度	0.516	0.504	0.518	0.517	0.436	0.438	0.476

2.3 当前时期我国东北岩高兰分布

东北岩高兰在当前时期中国范围内的适生分布区见图 3,当前总适生区面积为 37 948.96 km<sup>2</sup>,占我国陆地面积约 0.39%,主要为大兴安岭地区,长

白山地区有零星分布。其中高度适生区面积 8 818.88 km<sup>2</sup>,一般适生区面积 29 130.08 km<sup>2</sup>,主要聚集分布于大兴安岭北部林区。

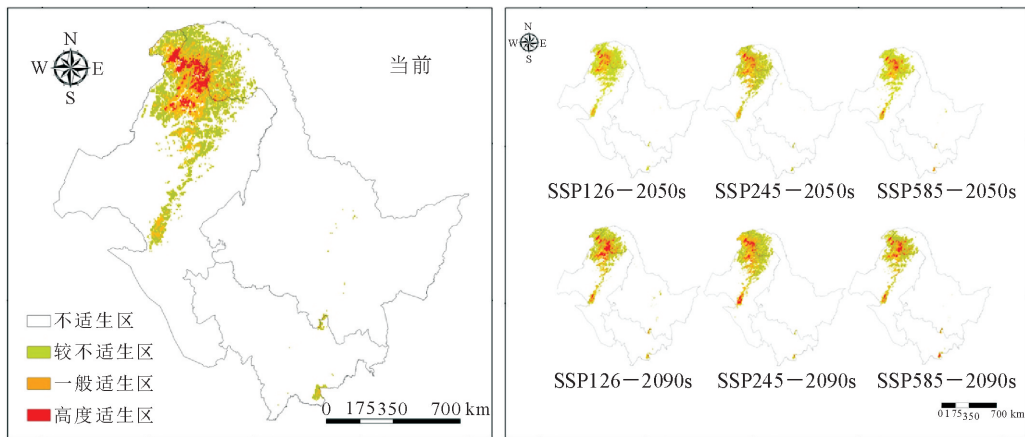


图 3 我国不同时期东北岩高兰适生区分布

Fig. 3 Potential distribution for *E. nigrum* var. *japonicum* during different periods in China

2.4 未来东北岩高兰适生区预测

由表 4 可知,SSP126 情景下,未来东北岩高兰总适生区面积整体变化不大,虽在 2050s 总适生区面积相较前一时期总体缩小,但在 2090s 总适生区

面积将恢复至当前时期的 94.78%;SSP245 情景下,总适生区面积变化最小,且长白山地区将不再适生;SSP585 情景下,2050s 总适生区面积相较当前总适生区增大约 5 382 km<sup>2</sup>,2090s 总适生区面积相



较上一时期缩小 25.92%,损失面积约为 11 232 km<sup>2</sup>。该气候情景下总适生区面积变化最小。除 SSP126 气候情景下 2050s 适生区面积降到 28 296.80 km<sup>2</sup> 以外,其他气候情景各时期的总适生区面积都在 30 000 km<sup>2</sup> 以上。根据预测结果可知,只有在 SSP245 气候情景下 2090s、SSP585 气候情景下 2050s 2 个时期的东北岩高兰适生区较当前有所增加。

表 4 不同气候情景下我国东北岩高兰适生区面积

Table 4 Suitable growing area of <i>E. nigrum</i> var. <i>japonicum</i> under different climate scenarios in China				km <sup>2</sup>
气候变化情景	高度适生区	一般适生区	较不适生区	总适生区
当前	8 818.88	29 130.08	65 724.96	37 948.96
SSP126—2050s	2 847.04	25 449.76	77 824.88	28 296.80
SSP126—2090s	12 533.92	27 394.08	67 773.44	39 928.00
SSP245—2050s	5 832.96	30 136.96	78 258.88	35 969.92
SSP245—2090s	10 606.96	32 723.60	82 963.44	43 330.56
SSP585—2050s	3 975.44	26 109.44	70 360.08	30 084.88
SSP585—2090s	9 530.64	22 568.00	61 471.76	32 098.64

由表 5 可知,不同气候变化对东北岩高兰造成的影响存在一定的差异。SSP126 情景下,尤其是 2090s 时期东北岩高兰增加区变化幅度最大,高达 15 294.16 km<sup>2</sup>。2090s 高度适生区面积相较 2050s 增加 54.05%。SSP585 情景下 2050s 东北岩高兰适生区面积增加幅度较小,新增加适生区面积仅为 3 628.24 km<sup>2</sup>,适生区面积相较当前减少 30.28%,面积约为 11 492.32 km<sup>2</sup>;到 2090s 适生区面积相较当前减少 34.90%,比 2050s 增加 23.89%,面积约为 7 187.04 km<sup>2</sup>;SSP245 情景下保留率最高,2 个时期保留率均在 80% 以上。2050s 适生区面积相较当前保留 80.15%,面积约为 30 414.72 km<sup>2</sup>;2090s 适生区面积相较 2050s 保留 84.03%,面积约为 30 223.76 km<sup>2</sup>。SSP245 情景下东北岩高兰适生区变化不大,在 SSP585 情景下适生区面积缩小最为明显,响应也最敏感。

由图 4 可以看出,不同气候变化对东北岩高兰

造成的影响存在一定的差异。在 SSP5245 情景下,高度适生区面积的变化幅度最大,2050s 为所有预测时期中高度适生区面积最小的时期,但是在 2090s 面积又较当前增长 42.13%,约为 3 715 km<sup>2</sup>;在 SSP126 情景下,2050s 高度适生区面积相较当前减少 67.71%,面积约为 5 971 km<sup>2</sup>,2090s 高度适生区面积相较 2050s 变化较大,增加了 104.88%,面积约为 2 985.92 km<sup>2</sup>;在 SSP585 情景下,2050s 高度适生区面积相较当前增加 20.28%,面积约为 1 788 km<sup>2</sup>,在 2090s 高度适生区增加 8.07%,约 712 km<sup>2</sup>。在未来 3 种气候情景下,东北岩高兰适生区域因气候情景变化而出现不同变化趋势,并且在 SSP245 情景下对气候变化的响应敏感性最高。由图 4 可以看出,东北岩高兰 3 种气候情景下 2050s 和 2090s 2 个时期主要适生区在大兴安岭北部地区。在未来不同气候背景下各个时期阿尔山地区也均有新的适生区增加。

表 5 不同时期东北岩高兰适生区空间变化

Table 5 Dynamic changes in the suitable area for <i>E. nigrum</i> var. <i>japonicum</i> under different combination of climates scenarios						
气候变化情景	面积/km <sup>2</sup>			面积变化率(%)		
	增加区	丧失区	保留区	增加率	丧失率	保留率
末次冰盛期	729.12	32 411.12	43 400.00	0.96	42.75	57.25
全新世中期	39 928.00	5 728.80	32 220.16	105.22	15.10	84.90
SSP126—2050s	2 517.20	12 169.36	25 779.60	6.63	32.07	67.93
SSP126—2090s	15 294.16	3 662.96	24 633.84	54.05	12.94	87.06
SSP245—2050s	5 555.20	7 534.24	30 414.72	14.64	19.85	80.15
SSP245—2090s	13 106.80	5 746.16	30 223.76	36.44	15.97	84.03
SSP585—2050s	3 628.24	11 492.32	26 456.64	9.56	30.28	69.72
SSP585—2090s	7 187.04	5 173.28	24 911.60	23.89	17.20	82.80

2.5 质心迁移

由图 5 可以看出,不同气候情景下质心迁移略有不同。当前时期东北岩高兰适生区的质心在内蒙古自治区呼伦贝尔市根河市牛耳河林场附近(122°1′

11.56″E,51°27′47.18″N);当气候情景为 SSP126—2090s 时,东北岩高兰适生区质心向西迁移,此时适生区质心位于内蒙古自治区呼伦贝尔市根河市开拉气林场附近(122°13′23.25″E,50°57′10.74″N),迁移距离

为 58 460 m; 当气候情景为 SSP585-2090s 时, 适生区质心向西南迁移至内蒙古自治区呼伦贝尔市根河市喀喇其林场 ( $122^{\circ}18'4.21''\text{E}$ ,  $50^{\circ}47'36.88''\text{N}$ ), 距离为 76 988 m。当气候情景为 SSP245-2090s 时, 东北岩高兰适生区质心向西南迁移至内蒙古自治区呼伦

贝尔市根河市会河附近 ( $121^{\circ}49'2.58''\text{E}$ ,  $51^{\circ}3'22.10''\text{N}$ ), 距离为 47 240 m。在未来气候变化情景下, 全球增温使中国东北岩高兰适生区的质心小幅度向南迁移, 根据预测结果来看, 随着气候变化的加剧有进一步扩大的趋势。

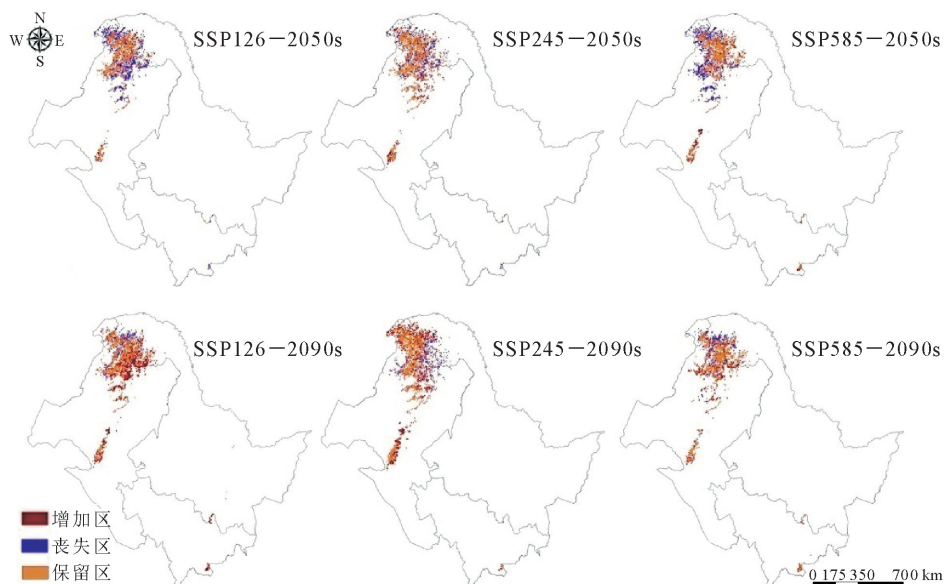


图 4 不同时期东北岩高兰空间分布格局变化

Fig. 4 The spatial pattern changes of *E. nigrum* var. *japonicum* in different periods

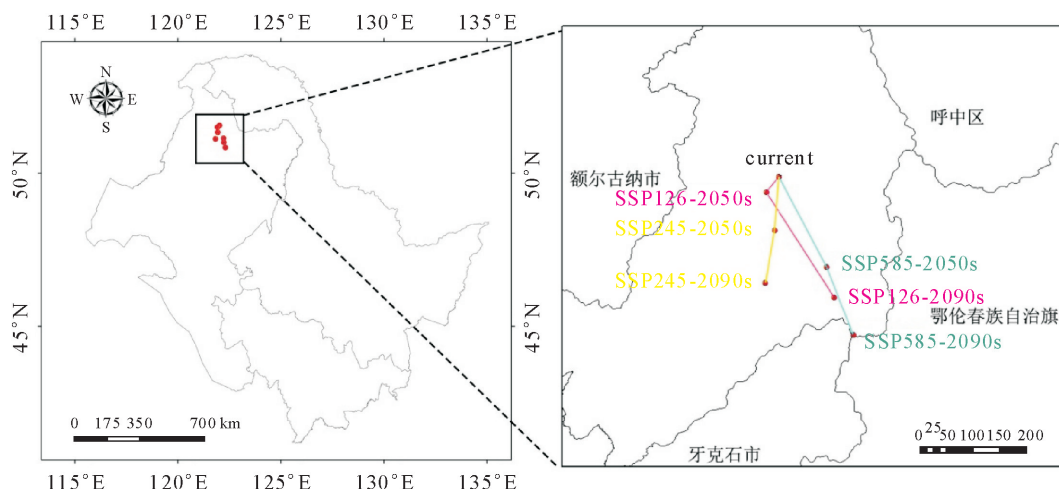


图 5 不同气候变化情景下东北岩高兰适生区质心变化

Fig. 5 Core distributional shifts under different climate scenario periods for *E. nigrum* var. *japonicum*

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

通过外业调查与资料查询进行数据采集与整理, 利用 MaxEnt 模型预测在未来不同气候情景下的东北岩高兰适生区变化, 经过模型参数优化后 ROC 响应曲线波动较小, AUC 均值为 0.998, 模型准确度评估结果为“非常好”, 表明预测结果准确度较高。当前东北岩高兰一般适生区和高度适生区主

要为大兴安岭北部, 极少的一般适生区分布于吉林长白山, 均为高纬度及分布地的高海拔地区。在全球气候变暖情景下, 东北岩高兰对温度变化最敏感, 其适生范围将会缩小, 有向更高纬度、更高海拔的更低温度区域迁移的趋势, 且分布格局的变化主要在大兴安岭区域; 因此, 在大兴安岭北部林区加强东北岩高兰的就地保护, 或将是十分必要的最有效措施之一。由于东北岩高兰具有较高的药用价值, 且对研究植物区系以及植物地理有较高科学价值, 建议

根据东北岩高兰分布变化趋势,制定合理的保护方案,选择适宜地区或实验室进行栽培,并进行合理开发利用,最大程度避免因未来气候变暖造成东北岩高兰减少。

### 3.2 讨论

#### 3.2.1 优化后模型对东北岩高兰地理分布预测

当前东北岩高兰在我国主要分布于东北大兴安岭地区,长白山也有少量分布<sup>[25]</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>[26]</sup>,发现本研究优化后的 MaxEnt 模型东北岩高兰适生区的预测结果,与当前发现的东北岩高兰存在区域相符,预测结果与东北岩高兰实际地理分布高度一致;表明经过优化后的 MaxEnt 模型用于东北岩高兰的分布区预测时,预测结果准确、可靠。

3.2.2 环境因素对东北岩高兰地理分布制约 根据 Jackknife 法分析结果可知,温度和海拔是东北岩高兰分布的 2 个主要限制因子,其中温度对东北岩高兰未来适生区分布影响更大,是制约东北岩高兰地理分布的最重要的环境因素。最干季度平均温度和最热月最高气温的贡献率与置换重要值的比重在所有温度因素里面最大,累计贡献率高达 72.1%,在很大程度上制约着东北岩高兰的分布。虽然本研究表明温度对东北岩高兰未来适生区的变化制约最大,但海拔与温度之间存在一定的负相关性,因此在讨论温度对东北岩高兰生长分布的影响时,不可忽略海拔的重要性。东北岩高兰在大兴安岭北段分布的海拔约 654~1 520 m,平均海拔约 937 m,在其中部阿尔山一带分布的平均海拔约 1 364 m;在吉林省长白山平均海拔约 1 431.0 m 处有极少的分布,均为当前分布区的高海拔区域。Root 等<sup>[28]</sup>研究认为,东北岩高兰在全球气候变暖的背景下,当前某些适生区如长白山地区已经不再适宜东北岩高兰生长,与东北岩高兰在我国适生范围将进一步缩小、适生区平均海拔 976.03 m 的结果具有一致性。本研究筛选出 3 个参与建模的土壤因子和降水因子重要值总仅为 13.4%,表明土壤因子和降水因子对东北岩高兰分布的影响较小,也从另一方面证明东北岩高兰对土壤和降水条件具有较宽的适应范围<sup>[27]</sup>。虽然温度和海拔对东北岩高兰分布起主要限制作用,但有研究表明,单一一类环境因素并不能孤立地影响植物的生长及分布,因此东北岩高兰适生区潜在分布格局是多种环境因素通过相互作用综合影响的结果。

3.2.3 各时期环境气候变化对东北岩高兰地理分布格局变化影响 研究表明,中国东北岩高兰主要

分布在黑龙江省大兴安岭地区、内蒙古大兴安岭国有林区,以及黑龙江省黑河市和伊春市(即小兴安岭国有重点林区的中北部),与陈辉<sup>[25]</sup>通过实地调查得出的中国东北岩高兰当前分布区结果相近,但分布区范围稍大。

未来气候情景下,东北岩高兰原有适生区面积减少,适生区丧失率 12.94%~32.07%,主体位于大兴安岭北部林区,其次为阿尔山地区,分布区质心(几何中心)整体向南迁移,张喜娟等<sup>[29]</sup>对兴安落叶松的研究发现,2050 年我国兴安落叶松适宜分布面积将减少 15.06%,到 2100 年,将减少 38.87%。这一结论与东北岩高兰常见伴生树种相同分布区的兴安落叶松的变化趋势具有一定相似性。虽然本研究中东北岩高兰适生区面积减小速率略低于兴安落叶松,但两者整体趋势高度一致,这种现象说明在未来气候变化下,我国大兴安岭地区原有植物分布区的变化并不是以单一物种孤立进行,而是作为群落中的一部分随原有群落整体一同衰退。

### 参考文献:

- [1] 丁文广,肖俊豪,汪霞.气候变化对我国森林自然灾害影响[J].西北林学院学报,2010,25(5):117-120  
DING W G, XIAO J H, WANG X. Influence of climate changes on natural disaster in forests in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 117-120. (in Chinese)
- [2] LI X, TIAN H, 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.
- [3] SHARMA E, CHETTRI N, TSHE-RING K, *et al.* Climate change impacts and vulnerability in the eastern Himalayas [M]. Patan: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2009.
- [4] 付永硕,李昕熹,周轩成,等.全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望[J].中国科学:地球科学,2020,50(9):1206-1218.  
FU Y S, LI X X, ZHOU X C, *et al.* Progress in plant phenology modeling under global climate change[J]. Science China Earth Science, 2020, 50(9): 1206-1218. (in Chinese)
- [5] 吴建国,吕佳佳,周巧富.我国珍稀濒危物种适应气候变化的对策探讨[J].中国人口资源与环境,2011,21(Supp. 1):566-570.  
WU J G, LÜ J J, ZHOU Q F. Strategies of adaptation to climate change for rare or endangered species in China. [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21 (Supp. 1): 566-570. (in Chinese)
- [6] 昌秋霞,钟云芳,张哲,等.基于 Citespace 的物种分布预测研究进展的可视化分析[J].林业调查规划,2022,47(2):20-33.  
CHANG Q X, ZHONG Y F, ZHANG Z, *et al.* Visual analysis of research progress on species distribution prediction based on Citespace[J]. Forest Inventory and Planning, 2022, 47(2): 20-33. (in Chinese)
- [7] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum

- entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.
- [8] 施晨阳, 赖文峰, 文国卫, 等. 基于 MaxEnt 模型预测水曲柳的潜在适生区[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(2): 149-156.
- SHI C Y, LAI W F, WEN G W, *et al.* Prediction of the potentially suitable area of *Fraxinus mandchurica* based on Max-Ent model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(2): 149-156. (in Chinese)
- [9] 刘果厚. 内蒙古属于国家级珍稀濒危保护植物的地理分布及其区系特征[J]. *内蒙古林学院学报*, 1995, 17(3): 39-45.
- LIU G H. Geographical distribution and floristic characteristics of rare and endangered plants in Inner Mongolia. [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1995, 17(3): 39-45. (in Chinese)
- [10] 刘哲荣, 刘果厚, 高润宏. 内蒙古珍稀濒危植物濒危现状及优先保护评估[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1974-1982.
- LIU Z R, LIU G H, GAO R H. Assessment of the endangered status and conservation priorities for the endangered plant species in Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 1974-1982. (in Chinese)
- [11] 德永军, 张艳雨, 安慧君, 等. 东北岩高兰芽和花的结构及其特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(4): 189-196.
- DE Y J, ZHANG Y Y, AN H J, *et al.* Bud and flower structure and characteristics of *Empetrum nigrum* var. *japonicum* [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(4): 189-196. (in Chinese)
- [12] 杜君, 刘永志, 王金海, 等. 大兴安岭地区濒危植物东北岩高兰研究进展与保护[J]. *国土与自然资源研究*, 2021(6): 86-87.
- DU J, LIU Y Z, WANG J H, *et al.* Research progress and protection of the endangered plant *Empetrum nigrum* in the Greater Xing'an Mountains [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2021(6): 86-87. (in Chinese)
- [13] ZHAN P, WANG F, XIA P, *et al.* Assessment of suitable cultivation region for *Panax notoginseng* under different climatic conditions using MaxEnt model and high-performance liquid chromatography in China [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 176: 176.
- [14] 景丞, 姜彤, 苏布达, 等. 共享社会经济路径 (SSPs) 在土地利用、能源与碳排放研究的应用[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 397-413.
- JING C, JIANG T, SU B D, *et al.* Multiple application of shared socioeconomic pathways (SPSS) in land use, energy and carbon emission research [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(3): 397-413. (in Chinese)
- [15] 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.
- WENG Y W, CAI W J, WANG C. The application and future direction of shared socioeconomic pathways (SSPs) [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 215-222. (in Chinese)
- [16] 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.
- ZHANG T J, LIU G. Study of methods to improve the temporal transferability of niche model [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 98-105. (in Chinese)
- [17] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295-302.
- XING D L, HAO Z Q. The principle of maximum entropy and its applications in ecology [J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(3): 295-302. (in Chinese)
- [18] OLIVEIRA G, RANGEL T F, LIMA-RIBEIRO M S, *et al.* Evaluating, partitioning, and mapping the spatial autocorrelation component in ecological niche modeling: a new approach based on environmentally equidistant records [J]. *Ecography*, 2014, 37(7): 637-647.
- [19] MORENO R, ZAMORA R, MOLINA J R, *et al.* Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forests using maximum entropy (MaxEnt) [J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6(6): 364-370.
- [20] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. *Radiology*, 1982, 143(1): 29-36.
- [21] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(24): 9033-9043.
- XIONG Q L, HE Y Q, DENG F Y, *et al.* Assessment of alpine mean response to climate change in southwest China based on MaxEnt Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9033-9043. (in Chinese)
- [22] RONG Z, ZHAO C, LIU 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): 62.
- [23] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter [J]. *Ecography*, 2013, 36(10): 1058-1069.
- [24] 张晓华, 高云, 祁悦, 等. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 14-19.
- [25] 陈辉. 东北岩高兰的分布及保护利用价值[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2011, 34(6): 119-121.
- [26] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, DUDÍK M, *et al.* Opening the black box: an open-source release of MaxEnt [J]. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893.
- [27] 安慧君, 德永军, 张智杰, 等. 东北岩高兰及其生态适应性初探[J]. *内蒙古林业科技*, 2016, 42(1): 27-29.
- AN H J, DE Y J, ZHANG Z J, *et al.* Preliminary exploration of *Empetrum nigrum* var. *japonicum* and its ecology adaptation [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2016, 42(1): 27-29. (in Chinese)
- [28] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, *et al.* Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 2003, 421(2): 57-60.
- [29] 张喜娟, 陈琛, 郇飞飞, 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 gamelinii* forests in northeast China and its response to climate change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6): 1041-1049. (in Chinese)