北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响

刘阳　王鹤松

Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China

Liu Yang, Wang Hesong

引用本文:
刘阳，王鹤松．气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响[J]．北京林业大学学报，2024，46(6):82-92．doi: 10.12171/j.1000-1522.20230072
Liu Yang, Wang Hesong. Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):82-92. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230072

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230072

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测
Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 33-43.　https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200254

基于MaxEnt模型的紫椿适生区预测
Distributional change in suitable areas for *Toona sureni* based on MaxEnt model
北京林业大学学报, 2017, 39(8): 33-41.　https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170002

近55年气候变化对上海园林树种适应性的影响
Adaptability of landscape tree species response to climate change in Shanghai within the past 55 years
北京林业大学学报, 2018, 40(9): 107-117.　https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180113

油松人工林林隙天然更新及与环境相关性分析
Correlation analysis between natural regeneration and environment in canopy gap of Chinese pine (*Pinus tabuliformis*) plantation
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 59-68.　https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180416

气候变化背景下北京浅山区社会生态系统脆弱性评估
Assessment on socio-ecosystem vulnerability in shallow mountain area of Beijing under climate change background
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 132-141.　https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190091

降雨减少对油松人工林凋落叶分解的影响
Effects of rainfall reduction on litter leaf decomposition of *Pinus tabuliformis* plantation
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 68-76.　https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190211

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230072

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响

刘 阳 王鹤松
（北京林业大学生态与自然保护区学院，北京 100083）

摘要:【目的】油松是我国北方地区重要的针叶树种，根系发达，具有较强的水土保持和水源涵养能力，发挥着重要的生态防护功能。研究油松的生态特征及分布边界，探索油松的最佳造林区，了解油松人工林适生区分布在气候变化下的变迁，为气候变化背景下合理规划油松的造林和经营方案提供支持。**【方法】**基于油松人工林在中国地区 221 条有效分布记录和 22 个环境因子变量，结合 ArcGIS，运用 MaxEnt 模型模拟气候变化情景下油松人工林的潜在分布，确定制约油松人工林分布的关键环境因子和适宜区间，预测油松人工林适生区在未来不同气候情景下的地理分布及面积的变化。**【结果】**(1)MaxEnt 模型的 AUC 值达到 0.955，说明模拟的结果可靠。(2)当前油松人工林在我国的适生区面积为 98.90 × 10^4 km^2，集中分布在秦岭以北的地区，包括太行山、黄土高原、燕山和辽西等山地。影响油松人工林分布的主要环境变量为最暖季度降水量、最干季度平均温度、最冷月最低温度和海拔。其中，最暖季度降水量是影响油松人工林分布的首要因子，适宜范围为 223 ~ 389 mm。最干季度平均温度的范围为−5 ~ 5 ℃，最冷月最低温度的范围为−14.5 ~ −3.5 ℃，适合油松生长的海拔高度在 100 ~ 2 100 m 之间。(3)从 1931—2020 年的变化趋势来看，油松适生区的南界基本没发生变化，一直是岷山—秦岭—大巴山一线，向西到达祁连山南端和贺兰山东南侧，并没有向西北扩张。而油松适生区的北界却一直向北延伸，纬度大概向北扩张 3.5°，高适生区重心同样也向北迁移。因此油松适生区面积一直呈增加的趋势。(4)从未来气候变化情景来看，在 2041—2060 年和 2061—2080 年两个时期，油松的潜在适生区继续呈现向北迁移的趋势，高适生区面积呈现先增加再减少的趋势。**【结论】**气候变化会导致油松适生区向北扩张，同时在黄土高原和秦岭地区高适生区呈现破碎化，引种栽培油松时需谨慎。在燕山北部和辽宁西部的高适生区范围比较稳定，适合继续扩大种植。

关键词：气候变化；油松人工林；适生区；最大熵模型；历史分布
中图分类号：S791.254 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)06−0082−11
引文格式：刘阳，王鹤松. 气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(6)：82−92. Liu Yang, Wang Hesong. Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 82−92.

Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China

Liu Yang Wang Hesong
(School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ Chinese pine (*Pinus tabuliformis*) is one of the most important conifer species for afforestation in the northern region of China, with well-developed roots and strong abilities in soil and water conservation, playing an important role in ecological protection. Studying the ecological characteristics and distribution boundaries of Chinese pine, exploring the optimal afforestation area and understanding the changes in the distribution of suitable area under climate change are prominent to formulate reasonable afforestation and management plan for Chinese pine, and to understand the adaptability of Chinese pine plantations to climate change. ［**Method**］ Based on 221 effective distribution records of Chinese pine plantation in China and 22 environmental variables, combined with ArcGIS, the MaxEnt model was used to

收稿日期: 2023−03−31 **修回日期:** 2023−05−15
基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0608103)。
第一作者: 刘阳。主要研究方向：植被动态与过程。Email: liuyang23578@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护区学院。
责任作者: 王鹤松，博士，教授。主要研究方向：全球变化生态学。Email: wanghs119@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

predict the potential distribution of Chinese pine plantation under background of climate change. Meanwhile, the key environmental variables and suitable ranges that constrain the distribution of Chinese pine plantation were determined and the geographical distribution and area changes of Chinese pine plantation in different future climate scenarios were also predicted. [**Result**] (1) The area under curve (AUC) value of the Maxent model reached 0.955, indicating the reliability of the simulation results. (2) The current suitable area of Chinese pine plantation in China was 98.90 × 10^4 km^2, concentrated in the north of Qinling Mountains, Taihang Mountains, the Loess Plateau, Yan Mountains of northern China and western Liaoning Mountains of northwestern China. The main environmental variables affecting the distribution of Chinese pine plantation were the precipitation of the warmest quarter, mean temperature of the driest quarter, min. temperature of the coldest month and altitude. Among them, precipitation of the warmest quarter was the primary variables affecting the distribution of Chinese pine plantation, with a suitable range from 223 to 389 mm. Mean temperature of the driest quarter ranged from −5 to 5 ℃, and min temperature of the coldest month ranged from −14.5 to −3.5 ℃. The suitable altitude for the growth of Chinese pine plantation ranged from 100 to 2 100 m. (3) From the trend of changes in the past 90 years (1931−2020), the southern boundary of suitable area for Chinese pine plantation had remained basically unchanged, along the line of Minshan-Qinling-Daba Mountains, reaching the southern end of the Qilian Mountains and the southern side of the Helan Mountains to the west, without expanding to the northwest. However, the northern boundary of the suitable area for Chinese pine plantation had been extending northward, approximately 3.5° northward, and the center of gravity of the high suitability area had also migrated northward. Therefore, the area of suitable habitat for Chinese pine plantation had been increasing. From the perspective of future climate change scenarios, in the two periods of 2041−2060 and 2061−2080, the potential suitable area of Chinese pine plantation continued to show a trend of northward migration, and the area of high suitable area increased firstly and then decreased. [**Conclusion**] Climate change will lead to the expansion of suitable area for *Pinus tabuliformis* to the north, while high suitability area in the Loess Plateau and Qinling Mountains are fragmented. Therefore, caution should be exercised when introducing and cultivating *Pinus tabuliformis*. The high suitability areas in the northern part of Yanshan Mountain and the western part of Liaoning Province are relatively stable and suitable for further expansion of planting.

Key words: climate change; *Pinus tabuliformis* plantation; suitable area; MaxEnt model; historical distribution

油松(*Pinus tabuliformis*)是我国的特有树种，具有抗逆性强、耐干旱、耐贫瘠和改良土壤等特点，是我国华北、西北和东北南部地区主要造林树种之一[1]。温度和降水是影响物种地理分布的重要因素，在气候变化作用下，不同树种的生长趋势和适生范围差异很大[2]。与天然林相比，人工林的林分结构单一且稳定性差，对气候变化可能更为敏感[3−5]。因此，研究油松的空间分布特征与生境环境因子之间的关系，分析气候变化对中国油松人工林适生区分布的影响，预估未来气候情景下油松人工林的分布格局，可为油松等主要人工林的造林规划及其可持续经营提供一定的理论指导。

物种分布模型是预测不同气候情景下物种的潜在地理分布及其生态需求的主要工具，通过分析物种分布与环境之间的关系，以概率的形式表现物种对环境的适宜程度[6−7]。目前基于不同算法已有多个适生区分布模型，包括生态位因子分析模型(ecological-niche factor analysis，ENFA)、随机森林模型(random forests，RF)、最大熵模型(maximum entropy，MaxEnt)、生物气候模型(biological climatic model，BIOCLIM)等[8]。其中，MaxEnt 模型是基于物种已知的实际分布情况与对应的环境变量，通过最大熵原理和机器学习描述物种在生态空间上的适宜性，并以此投射到地理空间中，从而预测物种分布的地理区域[9]。MaxEnt 模型已广泛应用于预测物种的潜在地理分布，李国强等[10]基于 1970—2000 年的 13 个气候变量预测了当前气候条件下油松的潜在造林区域，唐兴港等[11]基于气候因子预测了未来气候情景下油松的潜在分布格局，并且在预测油松适生区分布的研究中均表现出较高的准确性，能够为油松的优先造林区域提供建议。杜倩等[12]使用 MaxEnt 模型研究了我国东北地区 12 个建群种的潜在分布格局，对有效应对气候变化和林木可持续发展具有重要的意义。此外，使用 MaxEnt 模型研究桫椤(*Alsophila spinulosa*)、木莲(*Manglietia fordiana*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、矮牡丹(*Paeonia*

jishanensis)和毛榛(*Corylus mandshurica*)等物种的潜在适生区时也取得了较好的预测效果[13−17]。

油松人工林在提供林产品和改善生态环境等方面具有重要作用,近些年来已有学者对油松人工林进行了大量研究,研究方向集中在油松人工林的生产力[18−19]、生物量[20−21]、根际微生物[22]和主要的影响因子[23]等方面,有关气候变化对油松人工林潜在适生区影响的研究还较少。本研究通过处理当前及历史的气候数据,收集油松人工林分布信息,依靠MaxEnt模型和地理信息技术预测油松人工林的潜在适生区分布以及1931—2020年气候变化对油松潜在适生区范围和面积的影响,预测在未来气候情景下油松人工林的分布格局。主要工作包括:(1)提取影响油松人工林分布的主要环境因子,分析油松对主要环境因子的适应范围;(2)分析当前(1991—2020年)气候条件下油松人工林适生区的空间分布特征;(3)分析1931—1960年、1961—1990年以及当前气候条件下,油松人工林适生区的空间分布与变化;(4)预测在不同气候情景下油松适生区的变化趋势,旨在为油松人工林的合理布局和可持续管理提供理论指导。

1 研究数据和方法

1.1 物种分布数据

通过查阅中国数字植物标本馆(www.cvh.ac.cn)、物种多样性数据平台(http://www.especies.cn/)、全球生物多样性数据库(https://www.gbif.org)和中国国家标本平台(http://www.nsii.org.cn)等,收集油松在中国分布点的经纬度坐标,进而通过知网、科学引文索引数据库等平台搜索油松人工林相关文献,筛选得到油松人工林的具体分布位置,按照1个公里网格内只保留1条有效分布点的原则去除重复点,获得共计221条油松人工林的地理分布记录。

1.2 环境数据

通过国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)下载的中国1 km分辨率逐月平均气温、月最高温度、月最低温度及逐月降水量数据[24−27],据此计算出19个气候变量指标(表1)驱动MaxEnt模型运行[28]。未来气候数据从WorldClim数据库中获取,包括2041—2060年和2061—2080年两个时期,选择了RCP2.6,RCP4.5和RCP8.5共3种情景,分别代表着低排放,中等强度排放和高排放3种不同的碳排放强度。通过地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/home)下载DEM数字高程数据并利用ArcGIS10.8中的空间分析工具计算坡度和坡向。采用1991—2020年的气候数据计算当前气候条件下适生区的分布,以30年为时间间隔计算1961—1990年和1931—1960年的气候数据,数据的空间分辨率重采样为30″。在国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)下载中国地图的底图供分析时使用。

1.3 模型构建

使用MaxEnt Version3.4.4k(https://www.gbif.org/tool/81279/maxent)进行油松适生区的模拟分析。随机选取75%的油松人工林分布点作为训练集,另外25%的分布数据作为测试集。采用刀切法(Jackknife)评价环境变量对模型的重要性,为了避免偶然误差,将replicate设置为10,使模型重复运行10次,结果取10次运行的平均值,模型输出的结果使用ArcGIS10.8进行分析。

1.4 模型精度检验

采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic,ROC)的线下面积(area under curve,AUC)来度量模型的模拟精度[29−30],AUC值越大表示模型模拟的效果越好。一般认为,AUC值大于0.9说明模型模拟效果“极准确(excellent)”[31−32]。在

表1 MaxEnt模型使用的环境因子

Tab. 1 Environmental factors used in MaxEnt model

代码 Symbol	环境变量 Environment variable	单位 Unit	代码 Symbol	环境变量 Environment variable	单位 Unit
bio1	年均温度 Annual mean temperature	℃	bio12	年降水量 Annual precipitation	mm
bio2	温差月均值 Monthly mean temperature difference	℃	bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
bio3	等温性 Isothermality (bio2/bio7) × 100		bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
bio4	温度季节变化方差 Temperature seasonal variation variance		bio15	降水季节变异系数 Seasonal CV of precipitation	
bio5	最暖月最高温度 Max. temperature of the warmest month	℃	bio16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
bio6	最冷月最低温度 Min. temperature of the coldest month	℃	bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
bio7	气温年较差 Temperature annual range (bio5−bio6)	℃	bio18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	℃	bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	℃	Altitude	海拔Altitude	m
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	℃	Slope	坡度Slope	°
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	℃	Aspect	坡向Aspect	

本研究中，油松人工林的 AUC 值为 0.955，说明模拟的结果可靠性较高(图 1)。

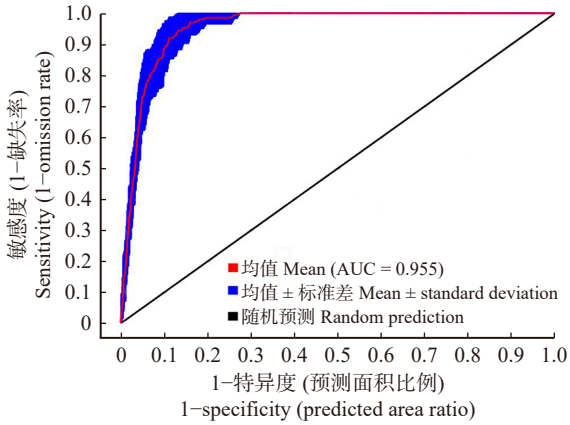
1.5　生态适宜度的划分

MaxEnt 模型输出的是物种分布在研究区上的存在概率，利用地理信息系统对结果进行分级处理，得到油松的生态适宜度区划结果，适宜度指数小于 0.2 的地区表示不适合油松人工林的生长，0.2 ~ 0.4、0.4 ~ 0.6 和 0.6 ~ 1.0，分别对应低适生区、中适生区和高适生区[33]。通过 MaxEnt 模型的 Jackknife 检验、模型贡献率和置换重要值来综合评估环境因子的重要程度，根据环境因子变量响应曲线来判断油松人工林的存在概率与环境因子之间的关系，当油松人工林存在概率大于 0.5 时，认为所对应的环境因子的值有利于油松人工林的生长[34−35]。

2　结果与分析

2.1　影响油松人工林分布的关键因子

由表 2 可见，制约油松分布的主要环境因子分别为最暖季度降水量(贡献率为 22.9%)，最干季度平均温度(贡献率为 22.5%)，最冷月最低温度(贡献率为 13.3%)以及海拔(贡献率为 7.7%)，这 4 个环境因子的累计贡献率为 66.4%。油松对 4 个主导环境因子的适应范围如图 2 所示，最暖季度降水量的范围为 223 ~ 389 mm，最干季度平均温度为−5 ~ 5 ℃，最冷月最低温度为 −14.5 ~ −3.5 ℃，适合油松生长的



AUC. ROC 曲线下与坐标轴围成的面积 Area under ROC curve and enclosed by the coordinate axes

图 1　MaxEnt 模型的受试者工作特征曲线

Fig. 1　Receiver working characteristic curve of MaxEnt model

表 2　主要环境因子的贡献率

Tab. 2　Contribution rates of main environmental factors

环境变量 Environment variable	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	22.9	
最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	22.5	66.4
最冷月最低温度 Min. temperature of the coldest month	13.3	
海拔 Altitude	7.7	

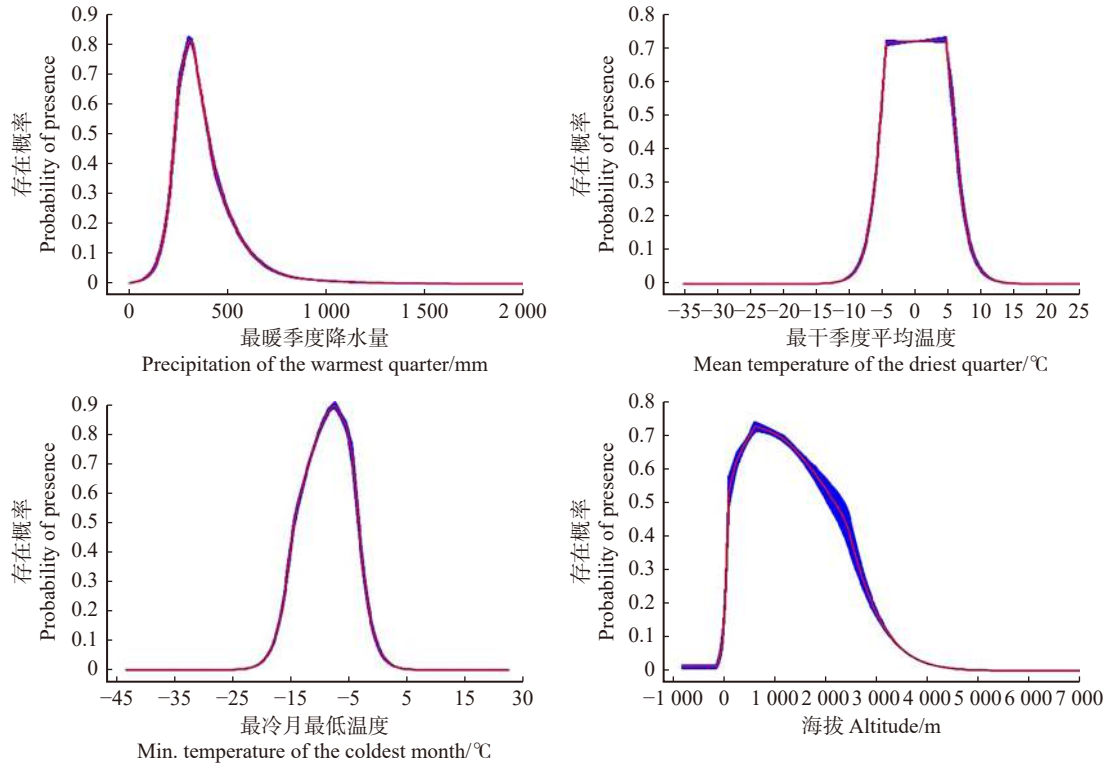


图 2　油松人工林对主要环境因子的响应曲线

Fig. 2　Response curves of *Pinus tabuliformis* plantation to main environmental factors

海拔高度在 100 ~ 2 100 m 之间。

2.2 油松人工林在当前气候条件下的潜在适生区

图 3 显示：油松的潜在适生区主要聚集在华中地区、华北地区以及东北地区的南部，以岷山—秦岭—大巴山为南界向东北方向延伸到大兴安岭南部，主要包括秦岭北部、太行山、黄土高原、燕山和辽西山地。向北到阴山南侧，向西到达祁连山南端和贺兰山东南侧，向东包括山东中北部和辽宁东部。适生区面积为 98.90 × 10^4 km^2，其中高适生区面积为 33.95 × 10^4 km^2，占总适生面积的 34.33%，集中分布在甘肃、陕西、山西、河北、辽宁、山东、河南 7 个省份，与目前已知的油松分布范围一致。中适生区围绕在高适生区周边，主要集中在山东中部、甘肃和陕西等地区，面积为 24.57 × 10^4 km^2，占总适生面积的 24.84%。低适生区主要包括潜在适生区的边缘地带，包括辽东地区、内蒙古东部、陕西北部和宁夏等地区，面积为 40.39 × 10^4 km^2。

2.3 油松人工林在历史气候下的适生区分布

1931—1960 年，油松适生区分布南界为岷山—大巴山，向北到达黄河以南，东北方向到辽宁西部。适生区面积为 67.19 × 10^4 km^2，其中高适生区面积为 19.39 × 10^4 km^2。与 1931—1960 年期间相比，1961—1990 年期间高适生区纬度向北扩张了 0.5°，甘肃东部、陕西中部、河北东北部和辽宁西部地区的部分中低适生区转变为高适生区，秦岭北部的高适生区面积略微减少，高适生区分布重心向北偏移，高适生区面积增加了 5.67 × 10^4 km^2。辽宁东部地区由非适生区变为低适生区，山东的中东部由低适生区变为中适生区，适生区面积增加了 6.98 × 10^4 km^2（图 4，表 3）。

1961—1990 年期间，油松的适生区南界依旧是岷山—秦岭—大巴山，向北到达黄河以南，东北方向到大兴安岭南端。高适生区集中在秦岭以北，太行山、黄土高原，燕山和辽西山地。适生区面积为 74.17 × 10^4 km^2，其中高适生区面积为 25.06 × 10^4 km^2。与 1961—1990 年期间相比，当前时期油松适生区的北界明显向北扩张，纬度向北移动了 3°。内蒙古东南部、陕西北部和宁夏大部分地区由非适生区变为低适生区，适生区面积增加了 24.74 × 10^4 km^2，高适生区同样也向北扩张，太行山、吕梁山地区的高适生区连成片状，高适生区面积增加了 8.89 × 10^4 km^2（图 5，表 3）。

2.4 油松人工林在未来情景下的适生区分布

在未来气候情景下，油松潜在适生区向北偏移，油松在甘肃省内的适生区丧失严重，位于黄土高原的适生区在未来也存在丧失的风险。2041 年到 2060 年油松潜在适生区集中在秦岭以北，太行山、太岳山、吕梁山、大兴安岭、燕山和辽西山地（图 6a）。油松潜在适生区在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下均呈现向北迁移的趋势，大兴安岭中南部适生区面

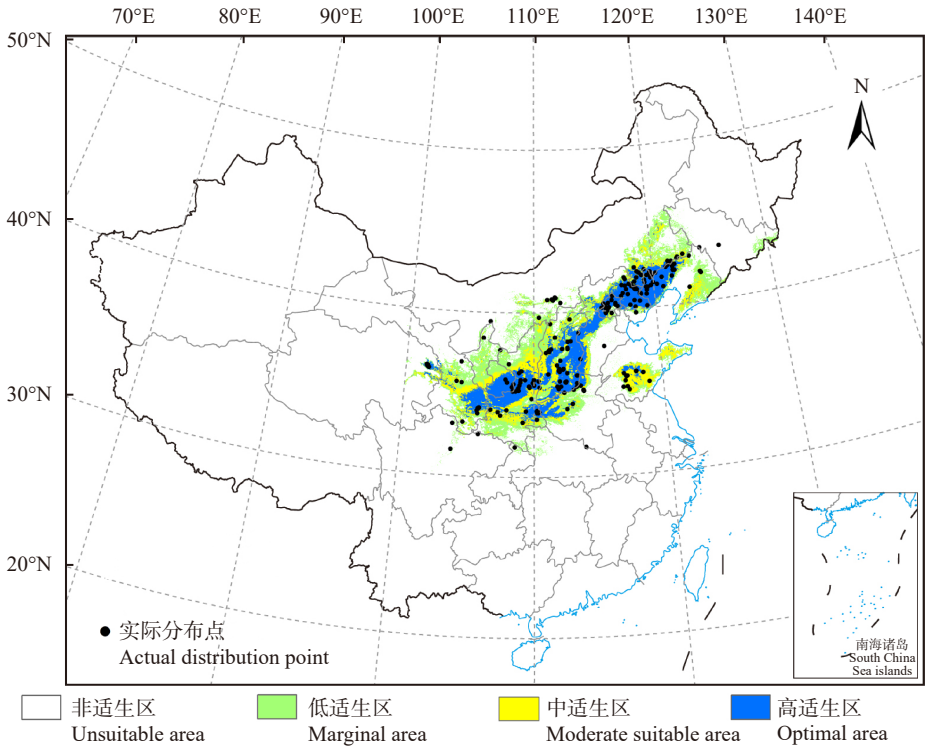


图 3 当前气候条件下油松人工林在中国的潜在适生区

Fig. 3 Potential distribution area of *Pinus tabuliformis* plantation under the current climatic conditions in China

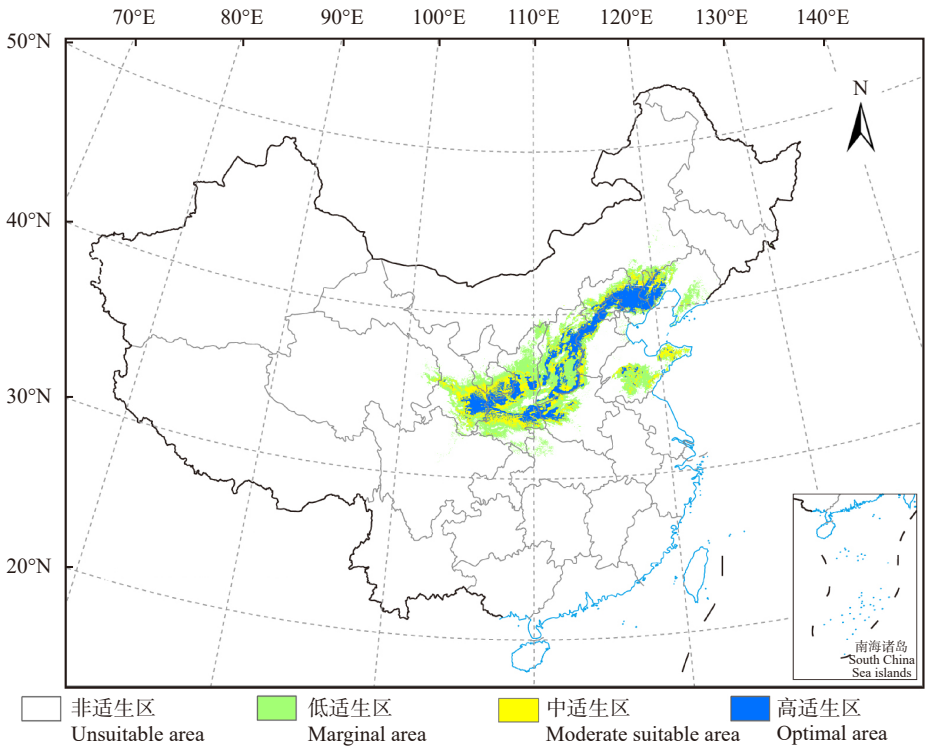


图 4　1931—1960 年期间油松人工林在中国的潜在适生区

Fig. 4　Potential distribution area of *Pinus tabuliformis* plantation in 1931 to 1960 in China

表 3　不同时期油松人工林适生区面积变化

Tab. 3　Change of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in different periods　　10^4 km^2

适宜性 Suitability	当前 Current	1961−1990	1931−1960
低适生区 Marginal area	40.39	28.59	30.70
中适生区 Moderate suitable area	24.57	20.52	17.10
高适生区 Optimal area	33.95	25.06	19.39
总计 Total	98.91	74.17	67.19

积显著增加，位于秦岭、黄土高原地区的高适生区呈现出破碎化的趋势，尤其在 RCP2.6 情景下，油松在秦岭地区的适生区明显丧失，由高适生区转变为低适生区甚至非适生区，且山东地区的中高适生区也转变为非适生区，高适生区分布南界明显北移。RCP2.6 情景下油松的高适生区面积为 34.11 × 10^4 km^2，低于在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的高适生区面积，在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，适生区北界向北扩张明显，到达大兴安岭中部地区，且高适生区面积与当前相比显著增加。

2061—2080 年油松潜在适生区变化不大，油松潜在适生区在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下继续呈现向北移动的趋势，大兴安岭中南部适生区面积同样增加，位于秦岭、黄土高原、太行山和吕梁山地区的高适生区破碎化更加严重，面积显著减少（图 6b）。RCP8.5 情景下在吉林西部的适生区面积显著高于 RCP2.6 和 RCP4.5 情景，分布边界也更偏北。RCP2.6 情景下的黄土高原地区的适生分布区显著低于 RCP4.5 和 RCP8.5 情景。相比于 2041 到 2060 年期间，2061—2080 年期间 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下油松高适生区的面积呈现减少的趋势，所减少的地区主要是黄土高原地区和秦岭地区。大兴安岭南部、燕山山脉和辽宁西部的适生区在未来气候变化情景下是比较稳定的。

3　讨　　论

3.1　油松分布与环境因子的关系

油松人工林对海拔的适应范围较广，能够在海拔 100 ~ 2 100 m 之间生长良好，在油松的潜在适生区范围内海拔由东北向西南逐渐升高，海拔升高引起水热条件的变化使油松能够在我国西北部分地区生长。油松属于深根性树种，根系发达，能够适应较为干旱的环境，环境因子的响应曲线显示油松对年降水量的需求为 400 ~ 700 mm 之间，能够解释其适生区北界与 400 mm 等降水量线相近。按照中国气候区的划分，油松人工林的潜在适生区主要分布在暖温带半湿润区[36]，该区域主要受东南季风和西伯利亚寒流的影响，油松分布的西北边界为祁连山的南端和贺兰山的东南侧，恰好为夏季风能影响的最远位置，影响油松分布最重要的环境因子是最暖季度降水量，生长季降水不足是限制油松向西北方向

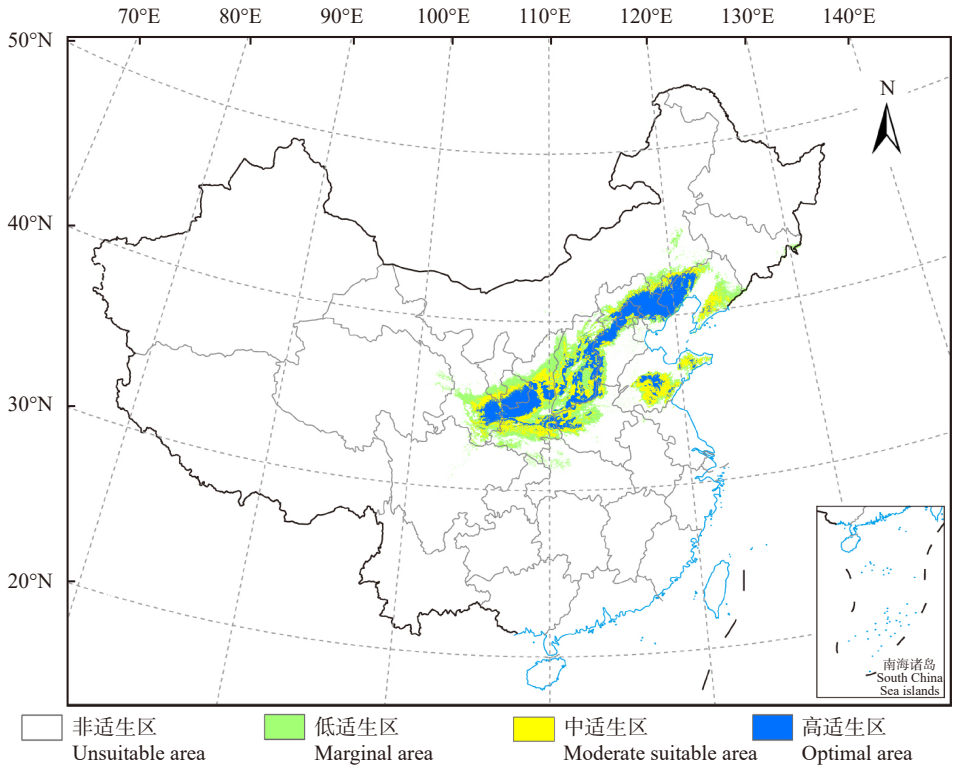


图 5 1961—1990 年期间油松人工林在中国的潜在适生区

Fig. 5 Potential distribution area of *Pinus tabuliformis* plantation in 1961 to 1990 in China

扩张的主要原因。1931—2020 年来油松的适生区面积一直增加，且适生范围向北扩张，主要原因是气候变暖导致适生区北部边缘地区最冷月气温升高，使油松能够避免死于极端低温。分布南界为岷山—秦岭—大巴山，此地区海拔较高、地形复杂，阻挡了部分东南季风携带的水汽，导致该线两侧气候有着显著差异，以北的气候更适合油松的生长，因此形成了明显的界限。分布的北界到达大兴安岭南部地区，限制其继续向北分布的主要原因为冬季低温。

3.2 气候变化对油松分布区的影响

研究表明，在全球气候变化的影响下，温度持续升高以及降水格局变化会导致植物向高纬度或者高海拔地区迁移[37−39]。本研究发现，油松人工林适生区集中分布在秦岭北部，太行山、黄土高原，燕山和辽西山地等地区，1931—2020 年来呈现出向高纬度迁移的趋势，且面积不断增加。在 2041—2060 年期间和 2061—2080 年期间油松适生区继续向北迁移，大兴安岭南部地区的高适生区不断增加，包括西辽河沿岸、七老图山等地区，太岳山、五台山，太行山西部以及燕山北部的适生区比较稳定，适合继续扩大油松人工林的种植。由于气候变暖导致油松在秦岭地区和黄土高原地区的适生区减小且破碎化严重，因此这些地区在未来应减少油松人工林的种植。关于未来气候情景下油松潜在适生区的预测已有学者做了一些工作，唐兴港等[11]预测了未来气候情景下油松潜在适生区的变化，在未来气候变化的背景下油松的分布面积整体将呈现持续增加的趋势。Li 等[10]基于 13 个气候变量和土地覆盖数据，研究了油松的生态需求及分布边界，发现未来气候变暖将导致油松潜在适生区面积增加，所增加的地区主要是适生区东北边缘，所预测的油松适生区分布范围与本研究基本一致。

3.3 油松人工林的生态服务功能与造林建议

油松作为我国的本土树种，在北方地区得到了广泛的种植，虽然这些油松人工林长势不错，但也出现了天然更新困难的问题[40]。油松的天然更新需要有生命力强的种子以及能够使种子萌发和幼苗生长的环境条件。因此本研究将油松人工林成熟后能结实并且可以天然更新的地点作为实际地理分布记录，预测符合油松天然更新条件的区域，发现与模拟的油松适生分布区基本一致(图 7)，从另一方面证明本研究所预测的油松潜在适生区是可靠的。当前我国人工林经营目标不断调整和改善，逐渐从以木材生产为主的单一经营目标向着面向生态系统服务功能提升的经营战略转变。同时大力发展人工林与我国实现“3060”碳达峰碳中和目标内在契合，因此油松作为我国主要的造林树种之一，在未来依旧具有巨大的种植潜力。在油松的引种栽培过程中，忽视地区环境条件的盲目引种会造成人力资源浪费和经济损失，因此本文模拟了油松潜在适生区在

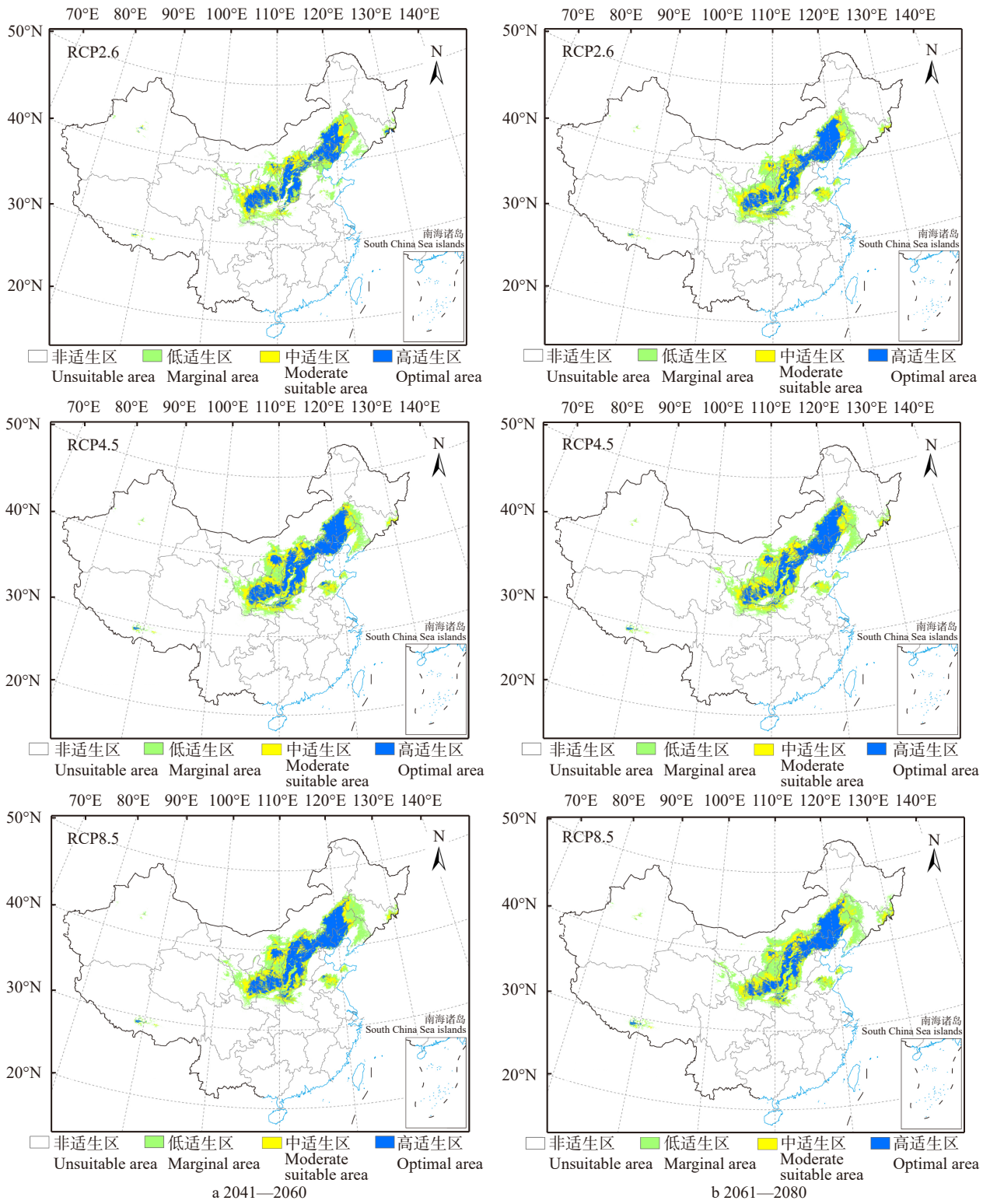


图 6　未来气候情景下油松人工林在中国的潜在适生区

Fig. 6　Potential distribution area of *Pinus tabuliformis* plantation under future climate change scenarios

1931—2020 年的迁移趋势，同时预测了在未来气候情景下油松潜在地理分布的变化范围，得到了最适合油松生长的区域，可为油松的引种栽培以及合理规划提供理论支撑。油松具有强大的根系和独特的耐旱结构，能够在不同的土壤环境中正常生长，同时还具有涵养水源、保持水土的功能[41]，具有重要的经济价值和生态服务功能，了解油松人工林对气候和地形的生态需求及潜在适生分布区，能够对油松的造林工作提供科学指导。但是有研究表明过度植树造林可能会消耗大量的水，对区域水资源造成压力[42]。而且我国的油松人工林普遍以纯林为主，林分结构单一，抗逆性差，导致生态系统服务功能逐渐退化，严重影响人工林生态系统健康稳定发展。因此即使是在本研究中提到的油松潜在适生区，造林

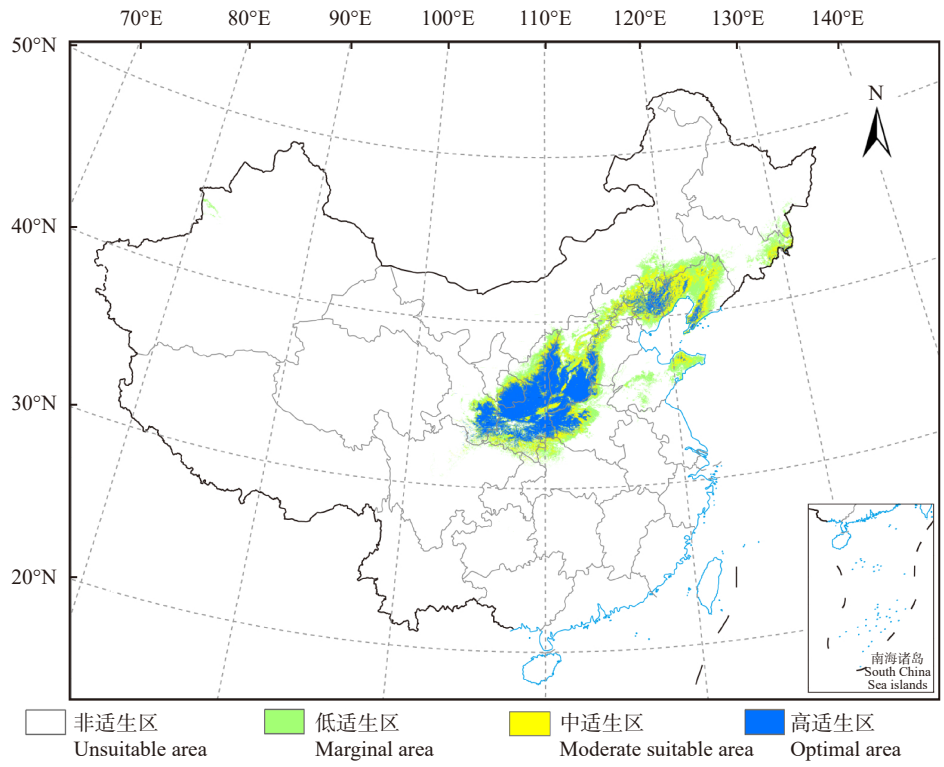


图 7 油松能够天然更新的区域

Fig. 7 Areas where *Pinus tabuliformis* can naturally regenerate

时也要合理规划苗木密度，防止过度消耗土壤水分，营造混交林能够提高人工林生态系统抵御气候变化胁迫的能力和韧性。本研究所预测的油松人工林适生区面积偏大，原因可能是模型没有考虑土壤、人为干扰等因素，在以后的研究中可以加强。虽然物种分布模型具有一定的局限性，但目前依旧是模拟物种潜在分布区比较好的工具。

4 结 论

本研究使用 1931—2020 年的气象数据以及对未来气候情景预测的数据结合地形数据和油松人工林的地理分布数据，对中国油松人工林适生区的空间分布进行了模拟和变化分析。主要结论如下：(1)总体来看，影响油松人工林分布的主要环境因子依次是最暖季度降水量，最干季度平均温度，最冷月最低温度和海拔。(2)油松人工林的适生区主要分布在我国华北、西北以及东北的南部地区。预测的油松能够天然更新的区域与本研究获取的油松潜在适生区基本一致。(3)从 1931—2020 年的变化趋势来看，油松适生区的南界基本没发生变化，一直是岷山—秦岭—大巴山，向西到达祁连山南端和贺兰山东南侧。而北界则一直向北延伸，大概向北扩张了 3.5°，高适生区重心同样也向北迁移。因此适生区面积一直呈增加的趋势。(4)在 2041—2060 年和 2061—2080 年两个时期，油松的潜在适生区继续呈现向北迁移的趋势，高适生区面积呈现先增加再减少的趋势，在黄土高原和秦岭地区高适生区呈现破碎化，在燕山北部和辽宁西部的高适生区比较稳定。

参 考 文 献

[1] Niu S H, Li W, Li Y. Chinese pine (*Pinus tabuliformis* Carr.)[J]. Trends in Genetics, 2022, 38(4): 409−411.

[2] Xue R H, Jiao L, Qi C L, et al. Growth and response patterns of *Picea crassifolia* and *Pinus tabuliformis* to climate factors in the Qilian Mountains, northwest China[J/OL]. Dendrochronologia, 2022, 71, 125905[2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125905.

[3] Suo X H, Cao S X. China's three north shelter forest program: cost-benefit analysis and policy implications[J]. Environment Development and Sustainability, 2021, 23(10): 14605−14618.

[4] Chen G, Shi C, Cheng S, et al. The structure and soil characteristics of a *Pinus tabuliformis* planted forest after 60 years of natural development in North China[J/OL]. Silva Fennica, 2007, 51(1): 1709[2023−09−03]. https://doi.org/10.14214/sf.1709.

[5] Liang B Y, Wang J, Zhang Z Y, et al. Planted forest is catching up with natural forest in China in terms of carbon density and carbon storage[J]. Fundamental Research, 2022, 2(5): 688−696.

[6] Martínez M J, Cameletti M, Conesa D, et al. Species distribution modeling: a statistical review with focus in spatio-temporal issues[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32(11): 3227−3244.

[7] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual

Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40: 677−697.

[8] 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.

[9] Zhang S, Liu X G, Li R M, et al. AHP-GIS and MaxEnt for delineation of potential distribution of Arabica coffee plantation under future climate in Yunnan, China[J/OL]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108339[2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108339.

[10] Li G Q, Xu G H, Guo K, et al. Geographical boundary and climatic analysis of *Pinus tabulaeformis* in China: insights on its afforestation[J]. Ecological Engineering, 2016, 86: 75−84.

[11] 唐兴港, 袁颖丹, 张金池. 气候变化对油松潜在地理分布时空格局的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 1−7.
Tang X G, Yuan Y D, Zhang J C. Simulation of potential spatial-temporal population dynamics of *Pinus tabuliformis* under climate change[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 1−7.

[12] 杜倩, 魏晨辉, 梁陈涛, 等. 中国东北地区 12 个建群树种对气候变化响应的 MaxEnt 模型分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5674−5684.
Du Q, Wei C H, Liang C T, et al. Future climatic adaption of 12 dominant tree species in Northeast China under 3 climatic scenarios by using MaxEnt modeling[J]. Acta Ecological Sinica, 2020, 40(16): 5674−5684.

[13] 许斌, 朱文泉, 李培先. 不同气候条件下桫椤在中国的潜在适生区分布 [J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6105−6117.
Xu B, Zhu W Q, Li P X. Potential distributions of *Alsophila spinulosa* under different climates in China[J]. Acta Ecological Sinica, 2020, 40(17): 6105−6117.

[14] 邹武, 王渌, 赖童, 等. 木莲 (*Manglietia fordiana*) 的适生分布、影响因子与保护空缺研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1889−1900.
Zou W, Wang L, Lai T, et al. Distribution, influencing factors and gaps analysis of *Manglietia fordiana*: implications of conservation to mountain broad-leaved forests[J]. Acta Ecological Sinica, 2022, 42(5): 1889−1900.

[15] 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.
Zhao G H, Cui X Y, Wang Z, et al. Prediction of potential distribution of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in China under context of climate change[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(6): 158−168.

[16] 王绮, 樊保国, 赵光华. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3774−3784.
Wang Q, Fan B G, Zhao G H. Prediction of potential distribution area of *Corylus mandshurica* in China under climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3774−3784.

[17] 刘维, 赵儒楠, 圣倩倩, 等. 矮牡丹在中国的地理分布及潜在分布区预测 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 83−92.
Liu W, Zhao R N, Sheng Q Q, et al. Geographical distribution and potential distribution area prediction of *Paeonia jishanensis* in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 83−92.

[18] Li Z C, Xiao J, Lu G, et al. Productivity and profitability of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus tabuliformis* plantation forests in Northeast China[J/OL]. Forest Policy and Economics, 2020, 121: 102314[2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102314.

[19] Han C, Li Y G, Dong X X, et al. *Pinus tabulaeformis* forests have higher carbon sequestration potential than *Larix principis-rupprechtii* forests in a dryland mountain ecosystem, Northwest China[J/OL]. Forests, 2022, 13(5): 739[2023−09−03]. https://doi.org/10.3390/f13050739.

[20] Liu Y, Li P, Wang G L, et al. Above- and below-ground biomass distribution and morphological characteristics respond to nitrogen addition in *Pinus tabuliformis*[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2016, 46(1): 1−9.

[21] Zeng W S, Zhang L J, Chen X Y, et al. Construction of compatible and additive individual-tree biomass models for *Pinus tabulaeformis* in China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017, 47(4): 467−475.

[22] Wang H H, Chu H L, Dou Q, et al. Seasonal changes in *Pinus tabuliformis* root-associated fungal microbiota drive N and P cycling in terrestrial ecosystem[J/OL]. Frontiers in Microbiology, 2021, 11: 526898[2023−09−03]. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.526898.

[23] 陈美霖, 韩海荣. 黄土高原地区 4 种常见树种适宜区对气候变化响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(3): 21−33.
Chen M L, Han H R. Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(3): 21−33.

[24] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011–2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183−194.

[25] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. International Journal of Climatology, 2017, 38: 2250−2264.

[26] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11: 1931−1946.

[27] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901–2100[J/OL]. Sustainability, 2020, 12: 477[2023−09−03]. https://doi.org/10.3390/su12020477.

[28] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 4302−4315.

[29] Jimenez-Valverde A. Threshold-dependence as a desirable attribute for discrimination assessment: implications for the evaluation of species distribution models[J]. Biodiversity and

Conservation, 2014, 23(2): 369−385.

[30] 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.
Huang R Z, Yu T, Zhao H, et al. Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 33−43.

[31] Li Y, Shao W, Jiang J. Predicting the potential global distribution of Sapindus mukorossi under climate change based on MaxEnt modelling[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 29(15): 21751−21768.

[32] Gebrewahid Y, Abrehe S, Meresa E, et al. Current and future predicting potential areas of *Oxytenanthera abyssinica* (A. Richard) using MaxEnt model under climate change in Northern Ethiopia[J/OL]. Ecological Processes, 2020, 9(1): 6[2023−09−03]. https://doi.org/10.1186/s13717-019-0210-8.

[33] Wan J Z, Wang C J, Han S J, et al. Planning the priority protected areas of endangered orchid species in northeastern China[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(6): 1395−1409.

[34] Chen W, Wei J, Zhu K. Predicting potential distribution of *Emmenopterys henryi* in Southwest China based on the Maxent model and influencing factors[J]. Tropical Ecology, 2022, 63(4): 572−583.

[35] Ouyang X H, Pan J L, Wu Z T, et al. Predicting the potential distribution of *Campsis grandiflora* in China under climate change[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(42): 63629−63639.

[36] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案 [J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3−12.
Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y. A new scheme for climate regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 3−12.

[37] 唐燕, 赵儒楠, 任钢,等. 基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23−32.
Tang Y, Zhao R N, Ren G, et al. Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 23−32.

[38] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, 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.

[39] Sun S X, Zhang Y, Huang D Z, et al. The effect of climate change on the richness distribution pattern of oaks (*Quercus* L.) in China [J/OL]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140786 [2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140786.

[40] Chen Y M, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 238−245.

[41] Zhao S D, Jiang Y, Wen Y, et al. Frequent locally absent rings indicate increased threats of extreme droughts to semi-arid *Pinus tabuliformis* forests in North China[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308−309(15): 108601[2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108601.

[42] Zhang D N, Zuo X X, Zang C F. Assessment of future potential carbon sequestration and water consumption in the construction area of the Three-North Shelterbelt Programme in China[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108377[2023−09−03]. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108377.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 孟 平）