

气候变化情景下刺槐人工林潜在 适生区变化及固碳潜力

马云蕾^{1,2,3}, 韩磊^{1,2,3}, 王娜娜^{1,2,3}, 马军⁴, 王苑^{1,2,3}, 马世杰⁴

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021;

3. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021; 4. 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021)

摘要: [目的] 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为我国主要的水土保持造林树种,对改善生态和增加碳储量具有重要作用,预测未来不同排放情景下刺槐林适生区分布和碳储量时空变化,并分析其固碳潜力,为区域人工林发展规划和可持续经营提供科学依据。[方法] 基于最大熵模型,预测未来气候变化情景下刺槐的潜在地理分布,定量研究刺槐未来受威胁的潜在地理分布区域和面积,通过分析综合环境因子变量贡献率及置换重要性,明确制约刺槐人工林潜在地理分布的影响因子;采用蓄积量-林龄模型,结合材积源-生物量法,估算并分析 2090s 刺槐林碳储量空间分布。[结果] 1) 温度因子是影响刺槐潜在适生区分布的最关键气候因素,贡献率达到 64.4%,其次为降水量因子。2) 在当前气候条件下,刺槐的潜在适生区主要分布于黄河流域及淮河流域和长江上游地区,高适生区主要分布在我国北方地区,约占国土总面积的 4.2%。未来气候变化下,SSP245 和 SSP370 情景刺槐丧失区集中性增强,主要位于四川盆地;扩张区主要分布于稳定区周边区域,呈分布破碎化特点。3) 未来 4 种气候情景下刺槐林碳储量及碳密度增加,到 2100 年,SSP585 情景下碳储量达到最大。[结论] 在高排放情景下,碳储量中高值区向西北移动,集中分布于我国西北地区东部。

关键词: 最大熵模型; 潜在适生区; 材积源-生物量法; 固碳潜力; 刺槐

中图分类号: S758.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0260-09

Potential Suitable Area Change and Carbon Sequestration Potential of *Robinia pseudoacacia* Plantation under Climate Change Scenario

MA Yunlei^{1,2,3}, HAN Lei^{1,2,3}, WANG Nana^{1,2,3}, MA Jun⁴, WANG Yuan^{1,2,3}, MA Shijie⁴

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China-Arab Joint International Research

Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 3. Key

Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Region of Ningxia, Yinchuan 750021,

China; 4. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] *Robinia pseudoacacia*, as the main afforestation tree species in China, plays an important role in improving the ecological environment and increasing carbon storage to alleviate climate change. This paper predicts the spatial and temporal changes of the suitable area distribution and carbon storage of *Robinia pseudoacacia* forest under different emission scenarios in the future, and analyzes its carbon sequestration potential, so as to provide scientific basis for regional plantation development planning and sustainable management. [Methods] Based on the MaxEnt model, this study predicted the potential suitable area of *Robinia pseudoacacia* under future climate scenarios, and the potential geographic distribution and area of *Robinia pseudoacacia* were studied quantitatively in the future. By analyzing the contribution rate of comprehensive

收稿日期: 2024-09-12

修回日期: 2024-11-20

录用日期: 2024-11-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-02-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(32460426); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03056)

第一作者: 马云蕾(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态水文过程研究。E-mail: 15604304196@163.com

通信作者: 韩磊(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: layhan@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

environmental factors and the importance of substitution, the influencing factors restricting the potential geographical distribution of *Robinia pseudoacacia* plantation were clarified. The spatial distribution of carbon storage in 2090 s *Robinia pseudoacacia* forest was estimated and analyzed by using the volume stand age model and the volume biomass method. [Results] 1) Temperature factor was the most critical climatic factor affecting the distribution of potential suitable areas of *Robinia pseudoacacia*, with a contribution rate of 64.4%, precipitation factor came second. 2) Under the current climatic conditions, the potential suitable areas of *Robinia pseudoacacia* were mainly distributed in the Yellow River Basin, the Huaihe River Basin and the upper reaches of the Yangtze River, and the high suitable areas were mainly distributed in the northern part of China, accounting for about 4.2% of the total land area. Under the future climate change, the concentration of *Robinia pseudoacacia* loss area will increase under the SSP245 and SSP370 scenarios, mainly located in the Sichuan Basin. The expansion area was mainly distributed in the surrounding area of the stable zone, showing the characteristics of distribution fragmentation. 3) In the future, the carbon storage and carbon density of *Robinia pseudoacacia* forest will increase under the four climate scenarios. By 2100, the carbon storage will reach the maximum under the SSP585 scenario. [Conclusion] Under the high emission scenario, the medium-high value area of carbon storage moves northwestward and is concentrated in the eastern part of Northwest China.

Keywords: MaxEnt model; potential suitable area; volume-biomass methods; carbon sequestration potential; *Robinia pseudoacacia*

Received: 2024-09-12

Revised: 2024-11-20

Accepted: 2024-11-26

Online(www.cnki.net): 2025-02-28

随着全球气候变暖不断加剧,森林生态系统在调节全球碳平衡、减缓温室效应等方面的作用日益凸显,而森林碳储量及碳汇潜力的估算与研究是推动全球森林碳汇研究的关键^[1]。在区域乃至全球尺度上,气候是影响物种及植被分布的关键要素,对植被碳源/汇的变化起到重要的驱动作用^[2]。有研究^[3]表明,天然林和人工林的碳储量均呈上升趋势,尽管中国天然林的面积是人工林的4倍,但人工林的固碳量与天然林相差无几,且随着时间的变化,人工林碳储量有一定的提升趋势,碳汇功能将进一步增强。

森林生态系统碳储量的估算是全球气候变化研究领域的一个重要课题,主要有清查法、遥感估算法及模型模拟法等,其中样地清查法又包括生物量法^[4]、蓄积量法^[5]、微气象学方法^[6]和基于蓄积量法、生物量法的生物量扩展因子法^[7]。然而,由于数据来源、估算方法及区域尺度不同使森林碳储量的估算存在显著差异^[8]。目前大部分森林碳储量预测研究均以土地利用变化作为生态系统碳储量变化的重要影响因素,研究土地利用变化与碳储量之间的关系,难以确定土地利用变化的潜在驱动因素,无法动态捕捉各种土地利用类型斑块的演化^[9],特别是自然土地类型斑块的演化,较少考虑气候的显著影响^[10]。总体上,森林碳储量估算还存在较大的不确定性,尤其是在未来气候变化背景下,森林碳储量和固碳潜力的预测仍缺少科学有效的方法^[11]。MaxEnt生态

位模型是一种基于最大熵原理的机器学习软件,可以根据不同的环境约束条件,估计物种发生的分布概率,由于其建模直观、预测精度高、操作简便、解释力强等原因被国内外学者广泛应用^[12]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是一种固碳能力强、防风固沙、保持水土、调节气候的具有代表性的人工林树种,原产于北美洲,于20世纪初从欧洲引入青岛栽培,之后在全国各地广泛栽植,是黄土高原生态恢复建设中的主要树种,对黄土高原地区生态系统碳汇能力的提升起着至关重要的作用^[13]。近年来,由于气候变化和人类干扰,加之缺乏科学的植被建设规划,使部分林分结构稳定性降低,功能退化,出现大面积枯梢,甚至成片死亡的现象^[14]。一直以来,刺槐水土保持功能、群落结构及其环境影响因素、现存刺槐林生物量及碳储量估算等研究^[15-16]受到学者广泛的关注,但气候变化对刺槐人工林适生区分布、碳储量时空变化的影响及预测研究还鲜有报道。因此,本研究基于CMIP6的4种排放情景气候数据,利用MaxEnt模型模拟当前气候条件下刺槐人工林的地理分布及未来2020—2100年不同气候情景下刺槐适生区空间变化格局,以揭示影响刺槐分布的关键气候因子及变化特征,并采用生物量转化因子法预测未来刺槐林碳储量,分析未来不同区域刺槐林固碳潜力,为区域人工林发展规划和可持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据

刺槐的分布数据主要来源于全球生物多样性信息网 (<http://www.cvh.ac.cn/>) 和中国植物标本馆 (<https://www.gbif.org/>) 中已有的刺槐分布点信息, 通过查找相关文献, 得到刺槐的准确分布位置, 最终共获取 196 条分布点信息, 用于分析刺槐的地理分布。

1.2 环境数据的筛选

未来气候数据(2020—2100年)来源于世界气候数据网(<http://www.worldclim.org>), 包括 19 个气候因子(表 1), 分辨率均为 2.5 min, 对数据进行裁剪处理并将数据格式转换为 ASCII 格式驱动 MaxEnt 模型运行。模型运行未来气候数据模式选择第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中在中国具有较强模拟能力的 BCC-CSM2-MR 模式^[17], 未来气候变化情景包括 4 种共享社会经济路径情景, 分别为 SSP126(低强迫情景, 2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m²)、SSP245(中等强迫情景, 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m²)、SSP370(中等至高强度强迫情景, 2100 年辐射强迫稳定在 7.0 W/m²) 和 SSP585(高强度强迫情景, 2100 年辐射强迫稳定在 8.5 W/m²), 所用中国区域的底图来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。

通过 MaxEnt 模型的贡献率和置换重要值对限制刺槐空间分布的环境因子进行综合性评估, 结合多重共线性检验^[18]对环境因子进行筛选。由表 1 可知, 最冷月最低气温(Bio6)、年降水量(Bio12)、最冷季平均温度(Bio11)、温度季节性变化标准差(Bio4)、降水量季节性变异性系数(Bio15)、等温性(Bio3)、最冷季降水量(Bio19)、最干季平均温度(Bio9)、年平均气温(Bio1)、平均气温日较差(Bio2)、最热季平均温度(Bio10)的累计贡献率高达 97%, 置换重要性达到 92.8%。因此, 最终筛选出以上环境变量进行模型建模。

1.3 MaxEnt 模型建立

将刺槐的地理分布数据和筛选出的环境变量数据导入 MaxEnt 软件中, 随机选取 25% 的刺槐林分布点作为随机检验数据集, 另外 75% 的分布数据作为训练集, 最大迭代次数设置为 500 次, 采用交叉验证方法(crossvalidate)验证, 最大背景点数量设置为 10 000。采用刀切法(jackknife)测定变量的重要性, 模型重复运行 10 次, 结果取 10 次的平均值。模型输出结果采用 ArcGIS 10.8 软件分析。

表 1 生物气候因子
Table 1 Bioclimatic variables

指标	描述	单位	贡献率/%	置换重要性/%
Bio6	最冷月最低气温	℃	22.6	37.2
Bio12	年降水量	mm	20.7	3.2
Bio11	最冷季平均温度	℃	13.3	9.5
Bio4	温度季节性变化标准差	℃	11.6	11.8
Bio15	降水量季节性变异性系数	/	7.1	3.9
Bio3	等温性	/	6.2	0.6
Bio19	最冷季降水量	mm	4.8	3.6
Bio9	最干季平均温度	℃	3.8	3.6
Bio1	年平均气温	℃	3.4	2.2
Bio2	平均气温日较差	℃	2.2	15.9
Bio10	最热季平均温度	℃	1.3	1.3
Bio17	最干季降水量	mm	0.8	0.8
Bio8	最湿季平均温度	℃	0.6	1.5
Bio7	温度年较差	℃	0.5	3.2
Bio14	最干月降水量	mm	0.4	0.5
Bio5	最热月最高温	℃	0.3	0.3
Bio18	最热季降水量	mm	0.2	0.1
Bio13	最湿月降水量	mm	0.1	0.5
Bio16	最湿季降水量	mm	0.1	0.1

1.4 模型的评估与输出

预测结果采用遗漏率和受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)以评估模型精度, ROC 曲线下的面积为 AUC 值(area under curve), AUC 的取值为 0~1, 数值越大, 表示可信度越高。AUC 值<0.6, 预测结果较差; 0.6~0.8, 预测结果一般; 0.8~0.9, 预测结果较好; ≥0.9, 预测结果极好^[19]。

根据 MaxEnt 软件进行建模运算, 得到刺槐的生态适宜度区划结果。采用平均逻辑值将适宜度分为(I: 0~20%; II: 20%~40%; III: 40%~60%; IV: 60%~100%)4 级, 分别表示不适生区、低适生区、中适生区和高适生区, 各分区面积为分级栅格数量与网格面积的乘积。

1.5 碳储量计算

采用不同区域划分的每公顷蓄积量-林龄模型^[20], 计算某一森林类型的某个林龄组的单位面积蓄积。公式为:

$$V = a(1 - e^{-ct})^b \tag{1}$$

式中: V 为蓄积量, m³/hm²; t 为林龄, a; a、b、c 为该森林类型单位面积蓄积与林龄 Logistic 方程的常数。

建立材积源-生物量模型, 通过生物量扩展因子(BEF)将单位面积林分蓄积量转换为单位面积林分

生物量,进而计算碳密度,公式为:

$$C_d = VBEF(1 + R)DCF \tag{2}$$

式中: C_d 为乔木层生物量碳密度, Mg/hm^2 ; V 为单位面积蓄积量, m^3/hm^2 ; D 为将树干蓄积转化为生物量的基本木材密度, Mg/m ; BEF 为将树干生物量转化为地上生物量的扩展因子(无量纲); R 为林木地下生物量与地上生物量的比值; CF 为含碳率。不同区域(东北、华北、西北、中南、西南和东南)碳储量参数(生物量扩展因子、含碳率)来自文献[20-23]。

碳储量基本公式为:

$$C_i = C_dS \tag{3}$$

式中: C_i 为乔木层碳储量, Mg ; S 为乔木林面积, hm^2 。

2 结果与分析

2.1 模型准确性评价

利用 MaxEnt 软件模拟基于刺槐分布点和筛选后的 11 个环境变量的当前值进行模拟预测(表 2)可知,当前气候条件下 ROC 曲线训练集的 AUC 值为 0.935,未来不同气候情景下 MaxEnt 模型预测的 AUC 值均>0.930,表明应用 MaxEnt 模型预测刺槐在中国的潜在地理分布模拟精度较高。

表 2 未来气候情景的刺槐 AUC 值

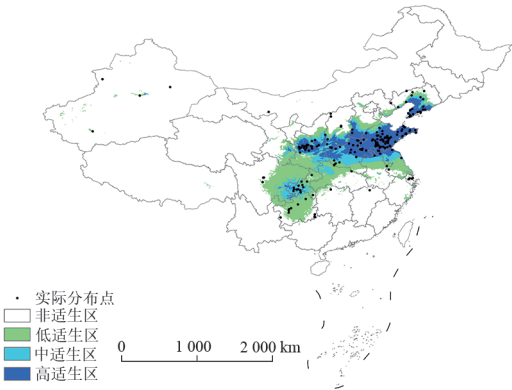
Table 2 AUC values of *Robinia pseudoacacia* under the future climatic scenarios

排放情景	时期/a	AUC 值
SSP126	当前	0.935
	2021—2040	0.937
	2041—2060	0.937
	2061—2080	0.934
	2081—2100	0.934
SSP245	2021—2040	0.940
	2041—2060	0.931
	2061—2080	0.936
	2081—2100	0.930
SSP370	2021—2040	0.935
	2041—2060	0.937
	2061—2080	0.935
	2081—2100	0.934
SSP585	2021—2040	0.934
	2041—2060	0.931
	2061—2080	0.937
	2081—2100	0.934

2.2 刺槐在当前条件下的适生区

当前气候条件下,刺槐在中国的潜在适生区主要分布于黄河流域、淮河流域和长江上游地区(图 1),总适生区面积为 $140.01 \times 10^4 km^2$,约占我国国土面积的 14.5%。刺槐中高适生区面积为 $40.8 \times$

$10^4 km^2$,约占国土总面积的 4.2%,主要分布于辽宁北部、山东、河南北部、河北南部、山西南部、陕西中部、甘肃东部、江苏北部和安徽北部地区;中适生区面积为 $29.2 \times 10^4 km^2$,约占国土面积的 3.0%,集中分布于高适生区周边区域及重庆西部地区;低适生区面积为 $70.1 \times 10^4 km^2$,占国土面积的 7.3%,除在中适生区周边区域外,在陕西北部、湖北西部、重庆北部、贵州中部、四川东部有较大面积分布;此外,在新疆、宁夏、浙江有零星分布。



注:审图号为 GS(2024)0650 号。下同。

图 1 当前气候条件下刺槐在我国的分布及潜在适生区

Fig. 1 Distribution and potential suitable area of *Robinia pseudoacacia* under the current climate conditions

2.3 未来排放情景下刺槐在中国的潜在适生区分布

与当前的气候条件相比,未来 4 种排放情景下刺槐的总适生面积呈先减小后增大趋势(表 3),高适生区面积减小最大,中适生区和低适生区面积呈增大趋势。2090s 的 SSP126 情景下,相较于当代总适生面积减小 $19.11 \times 10^4 km^2$,高适生面积减小 $16.67 \times 10^4 km^2$,中适生区和低适生区分别增加 2.53×10^4 、 $4.99 \times 10^4 km^2$;在 SSP245 情景下,相较于当代总适生面积减小 $2.04 \times 10^4 km^2$,高适生面积减小 $20.61 \times 10^4 km^2$,中适生区和低适生区分别增加 1.96×10^4 、 $16.6 \times 10^4 km^2$,其中 2090s 的高适生区面积减少最多,减少量 $11.85 \times 10^4 km^2$;在 SSP370 情景下,相较于当代总适生面积减小 $6.8 \times 10^4 km^2$,高适生面积减小 $18.33 \times 10^4 km^2$,中适生区和低适生区分别增加 3.28×10^4 、 $8.24 \times 10^4 km^2$;在 SSP585 情景下,相较于当代总适生面积增加 $4.29 \times 10^4 km^2$,高适生面积减小 $21.01 \times 10^4 km^2$,中适生区和低适生区分别增加 10.02×10^4 、 $15.27 \times 10^4 km^2$,其中 2090s 的低适生区面积增加最多,相较于当代增加 $19.28 \times 10^4 km^2$ 。

表3 不同排放情景不同时期刺槐各适生区面积
Table 3 The suitable area of *Robinia pseudoacacia* in different climate scenarios and different periods

10 ⁴ km ²					
排放情景	时期/a	高适生区	中适生区	低适生区	总适生区
SSP126	当前	40.77	29.16	70.10	140.02
	2021—2040	22.78	30.47	71.18	124.43
	2041—2060	21.05	33.93	75.10	130.09
	2061—2080	21.54	38.20	74.73	134.47
	2081—2100	24.10	31.69	65.11	120.91
SSP245	2021—2040	23.63	30.07	78.96	132.66
	2041—2060	20.99	33.32	80.38	134.69
	2061—2080	32.01	32.33	80.38	141.43
	2081—2100	20.16	31.12	86.70	137.98
SSP370	2021—2040	21.12	35.84	69.71	126.67
	2041—2060	21.15	34.17	77.99	133.32
	2061—2080	19.54	37.60	77.25	134.40
	2081—2100	22.44	32.44	78.34	133.22
SSP585	2021—2040	20.24	33.47	70.83	124.53
	2041—2060	21.16	37.61	76.19	134.97
	2061—2080	20.93	39.88	66.09	126.90
	2081—2100	19.76	39.18	85.37	144.31

2.4 未来排放情景下刺槐在中国的潜在适生区变化
2021—2100年,4种不同的排放情景下(图2),SSP585高排放情景下,扩张面积最大,为19.19×10⁴ km²,丧失面积最小,仅为3.84×10⁴ km²,扩张区域主要集中在辽宁北部的阜新和沈阳,河北的秦皇岛、唐山、沧州,山西中部的吕梁、太原、晋中,河南与湖北的交界区,陕西与四川和重庆的交界区,四川的乐山和雅安,丧失地区主要集中在四川与重庆交界区。SSP126低排放情景下,扩张面积最小,为5.81×10⁴ km²,丧失区面积为6.77×10⁴ km²,扩张区主要集中在河北的保定、石家庄、衡水,山东的聊城和陕西南部零星区域,丧失区主要分布在四川东部零星地区和重庆东南部零星地区等;高排放情景下的降水量高于低排放情景降水量,表明高排放情景下的较高降水量可以解决或者降低水分因子对物种分布的限制;相反,低排放情景下的降水量不能满足植物生长所需水分,成为物种分布的限制因子,进而影响其扩张。SSP245中等排放情景下,扩张面积为10.71×10⁴ km²,丧失区面积最大,为9.39×10⁴ km²,扩张区域主要集中在江苏中部地区,河南的南阳,湖北的十堰和襄阳,四川东南部地区,陕西和甘肃零星区域,丧失区主要集中在山东的滨州,河北的保定、石家庄、邢台,重庆西部与四川东部交界区域,贵州的遵

义。SSP370排放情景下,扩张面积为12.73×10⁴ km²,丧失面积为8.92×10⁴ km²,扩张区域主要分布于辽宁北部的阜新和沈阳,河北与山西交界区域,长江下游地区,湖北的襄阳和十堰,贵州与四川的交界区,甘肃与陕西和四川的交界区零星分布,丧失区主要分布在辽宁与河北沿海区域,江苏中部地区,陕西的榆林北部地区,重庆西部与四川东部交界区域。

预测结果总体表明,与当代相比,2090s的4种排放情景中SSP245和SSP370排放情景下丧失区集中性增强,破碎化程度降低,刺槐潜在地理分布丧失区集中位于四川盆地,但扩张区呈分布破碎化特点,可能是由于在2种排放情景下气温和降水变化剧烈且不规律,物种呈不同程度的退化,导致生境呈破碎化特点。

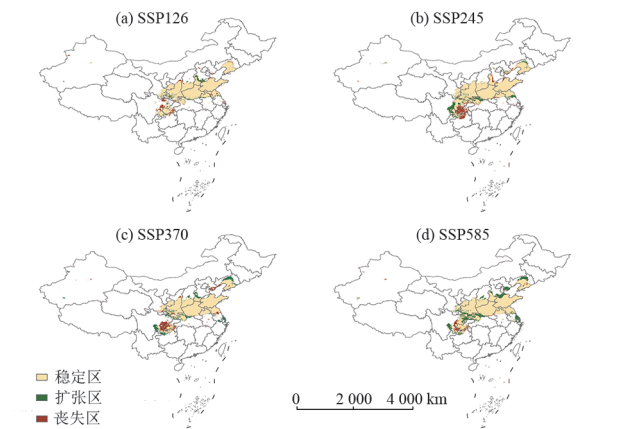


图2 2021—2100年不同气候变化情景下刺槐在中国的潜在适生区分布变化

Fig. 2 Suitable distribution changes of *Robinia pseudoacacia* under different climate change scenarios from 2021 to 2100 in China

2.5 未来排放情景下刺槐林固碳潜力
根据我国刺槐林固碳潜力预测结果(表4)可知,未来4种排放情景下刺槐林碳储量及碳密度均在增大,至2100年,SSP585情景下碳储量达到最大,为30.90 Tg,碳密度为52.34 Mg/hm²,与2021年相比分别增加108.7%和84.42%;SSP126情景下碳储量最小,为26.73 Tg,碳密度为51.16 Mg/hm²,与2021年相比分别增加80.26%和81.35%;在SSP585情景下,2040—2060年碳汇量最大,为0.35 Tg/a;在SSP126情景下,2080—2100碳汇量最小,仅为0.01 Tg/a;在SSP126和SSP370情景下,年碳汇量均呈逐年减小趋势,表明碳汇能力逐渐减弱;在SSP245和SSP585情景下,年碳汇量呈先减小后增大趋势,说明刺槐林在未来仍具有较大的碳汇潜力。

表 4 2021—2100 年不同排放情景下刺槐林固碳潜力
Table 4 Carbon sink potential of *Robinia pseudoacacia* forest under different climate changes from 2021 to 2100

排放情景	年份	碳储量/ Tg	年碳汇量/ (Tg·a ⁻¹)	碳密度/ (Mg·hm ⁻²)
SSP126	2040	14.82	—	28.21
	2060	21.36	0.32	39.39
	2080	26.41	0.25	46.67
	2100	26.73	0.01	51.16
SSP245	2040	15.72	—	28.45
	2060	21.46	0.29	38.68
	2080	25.19	0.17	46.06
	2100	29.00	0.19	52.08
SSP370	2040	15.27	—	28.57
	2060	21.50	0.31	38.89
	2080	26.11	0.23	46.92
	2100	29.02	0.15	52.36
SSP585	2040	14.80	—	28.38
	2060	21.90	0.35	38.77
	2080	25.19	0.16	46.30
	2100	30.90	0.29	52.34

2.6 2100 年不同排放情景下的碳储量空间差异

2090s 的 4 种排放情景碳储量空间分布(图 3)来看,不同强迫情景下刺槐林碳储量差异不大,在空间分布上存在异质性。

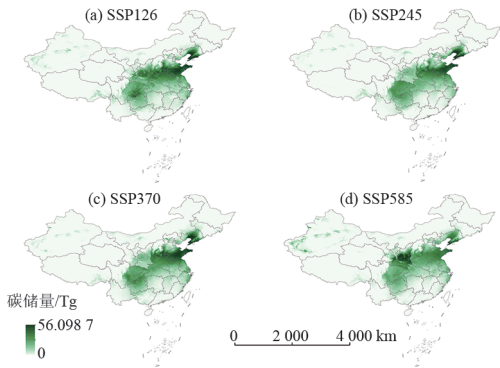


图 3 2100 年不同气候变化情景下刺槐林碳储量空间分布
Fig. 3 Suitable distribution changes of carbon storage in *Robinia pseudoacacia* under different climate change scenarios in 2100

在低强迫情景下,高碳储量主要分布在我国辽宁的中部及南部、山东的中部及东部,中碳储量主要分布在河北南部、山西南部、陕西南部、甘肃东部、河南北部及四川与重庆和贵州交界处;在中等强迫情景下,高碳储量主要分布在我国辽宁的中部及南部、山东的中部及东部,中碳储量主要分布在河南的北部、山西的南部及贵州东部地区;在中等至高强迫情景下,高碳储量主要分布在辽宁中部及南部、山东的中部及东部、河北南部、山西南部,中碳储量主要分

布在四川的东南部、重庆南部、贵州北部;在高强迫情景下,高碳储量主要分布在辽宁南部沿海地区、陕西中部、甘肃东部,中碳储量主要分布在山东省、陕西南部、四川中部、新疆准噶尔西部山地、天山山脉中部、天山南脉、昆仑山脉。整体来看,SSP126, SSP245, SSP370 情景下碳储量中高值区集中分布于我国华东北部地区及东北南部地区,SSP585 情景下碳储量中高值区分布于我国西北地区东部。

3 讨论

3.1 气候变化对刺槐人工林分布的影响

根据 MaxEnt 贡献率和置换重要性得出最冷月最低气温、年降水量、最冷季平均温度、温度季节性变化标准差等 11 个气候因子是影响刺槐人工林分布的主要环境变量,其中与温度相关的变量贡献率达到 64.4%,是影响刺槐人工林分布最重要的环境因子。刘亚玲等^[24]研究发现,黄土丘陵区不同海拔刺槐径向生长与上一年生长季、休眠期和当年生长季平均气温、最低气温和最高气温呈显著正相关,其中最低气温影响最显著,与本研究结果较为一致。环境因子变量响应曲线可以判断刺槐的存在概率与环境因子之间的关系(图 4),当最冷月最低气温低于-20℃时,刺槐的分布概率几乎为 0,随着最冷月最低气温的升高,刺槐分布概率达到峰值,之后随着最冷月最低气温降低,分布概率也随之下降低,存在概率>0.5,即可视为环境因子有利于林木的生长^[19]。植物必须在一定的温度范围内才能进行正常的生理活动,且每种植物都需要一个最适宜温度阈值^[25],过低的温度可能导致树木遭受冻害,影响其正常生长,从而限制分布。温度升高则加剧干旱胁迫的风险,植物的光合作用不能满足呼吸需求,最终导致碳饥饿现象^[26]。低于或者高于最适温度阈值,均导致树木生理功能退化,丧失部分适生区。适合刺槐生长的最冷月最低气温最适宜温度为-11.4~-2.4℃,阈值为-7.5℃。与最冷月最低气温类似,刺槐分布概率随年降水量、最冷季平均温度、温度季节性变化标准差的增加而提高,达到分布概率的峰值后随年降水量、最冷季平均温度、温度季节性变化标准差的增加而降低,刺槐年降水量为 558~1 100 mm,阈值为 712.5 mm。最冷季平均温度为-3.9~4.1℃,阈值为-0.3℃,温度季节性变化标准差为 877~1 140。相比于温度,刺槐分布对降水量变化的敏感性相对较低,可能是由于刺槐具有较强的干旱适应性,在不同水分条件下适应性调整水分利用深度^[27],因此,降水量并不是制约刺槐林分布的最主要要素。

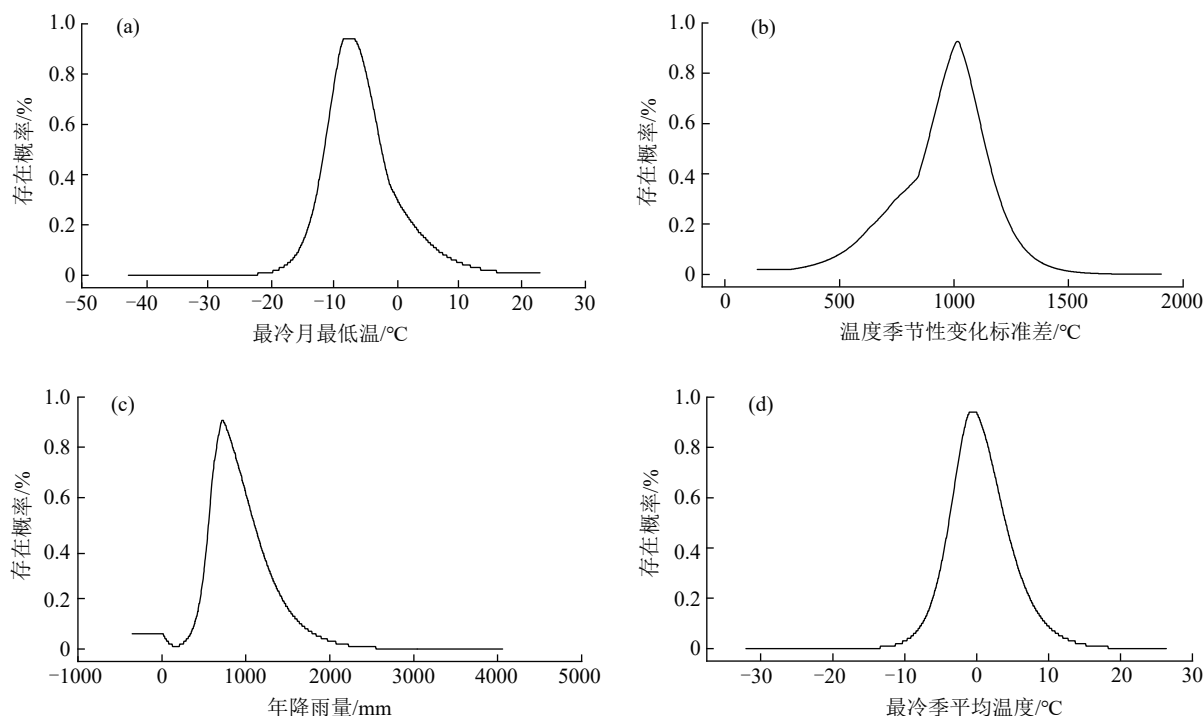


图 4 刺槐存在概率对主要气候因子的响应曲线

Fig. 4 Response areas for *Robinia pseudoacacia* under different climate change scenarios

3.2 不同排放情景下碳储量中高值区空间分布变化及影响因素

从预测结果(图 3)来看, SSP125、SSP246、SSP370 排放情景碳储量中高值区分布变化不大,其中西北地区为碳储量的低值区。该区域生态环境脆弱,对气候变化响应敏感。有研究^[28]发现, SSP125、SSP246、SSP370 排放情景下西北地区干旱次数增加,干旱趋势加重,干旱频率提高,加之西北地区多数区域年降水量低于刺槐的需求阈值,进而影响刺槐林的固碳潜力。碳储量中高值区变化较为稳定,主要位于我国东北地区、华北地区及西南地区。随着排放升高,东北、华中及西南地区降水频率及降水强度增加^[29],而降水量的增加一定程度上可以缓解干旱因子对树种分布的限制,加之该区域水热条件较好,未来刺槐人工林分布及碳储量优势则会凸显。在 SSP585 高排放情景下,碳储量中高值区向西北地区移动,表明西北地区刺槐人工林固碳潜力有所改善,华东地区碳储量损失严重。山建安等^[28]研究发现,未来西北地区气温和降水均有明显增加的趋势, SSP585 情景下“西北地区暖湿化”表征尤为明显。西北地区暖湿化可以改善区域水热条件和水循环机制,使得植被净初级生产力增加^[30],进而实现西北地区植被碳储量增加的趋势。牟莎^[31]基于 CMIP6 通过对不同情景下复合极端事件发生频率空间变化研究发现,复合强降水高温发生频率从东南向西北递减,西北地区较参考期发生的复合极端事件频率较小,

尤其西南地区出现年平均降水减小、而极端降水增加的情况。然而极端气候的频率和强度不断增强对陆地植被生产力造成更大压力,导致我国东北、华中及西南地区碳储量损失严重。

4 结论

1)影响刺槐林分布的主要环境因子由小到大依次为最冷月最低气温、年降水量、最冷季平均温度、温度季节性变化标准差、降水量季节性变异性系数、等温性、最冷季降水量、最干季平均温度、年平均气温、平均气温日较差、最热季平均温度,温度因子是限制刺槐潜在适生区分布的关键因素,贡献率达到 64.4%。

2)刺槐在当前的气候条件下的潜在适生区主要分布于黄河流域及淮河流域和长江上游地区,高适生区主要分布在我国北方地区,约占国土总面积的 4.2%。未来气候情景下的 SSP245 和 SSP370 情景刺槐丧失区集中性增强,主要位于四川盆地;扩张区主要分布于稳定区周边区域,呈分布破碎化特点。

3)未来 4 种气候情景下刺槐林碳储量及碳密度增加,到 2100 年, SSP585 情景下碳储量达到最大。而在 SSP126 和 SSP370 情景下,年碳汇量均呈逐年减小趋势,在 SSP245 和 SSP585 情景下,年碳汇量呈先减小后增大趋势。整体来看, SSP126、SSP245、SSP370 情景下碳储量中高值区集中分布于我国华东北部地区及东北南部地区, SSP585 情景下碳储量中高值区分布于我国西北地区东部。

参考文献:

- [1] ZHAO J, HU H, WANG J L. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): e15925.
- [2] 郎明翰, 张日升, 凡胜豪, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林碳汇及对气候因子的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 236-245.
- LANG M H, ZHANG R S, FAN S H, et al. Carbon sequestration function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and its responses to climate factors on the southern edge of Horqin sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 236-245.
- [3] LI L, ZAYITI A, HE X M. Evaluating the stand structure, carbon sequestration, oxygen release function, and carbon sink value of three artificial shrubs alongside the Tarim Desert highway[J]. Forests, 2023, 14(11): e2137.
- [4] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Estimation of land vegetation carbon sequestration in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China (Series D (Earth Sciences)), 2007, 37(6): 804-812.
- [5] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4002-4010.
- LIU Y C, GAO X L, FU C, et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on national forest resources inventory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4002-4010.
- [6] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学(地球科学), 2022, 52(6): 1010-1020.
- PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(6): 1010-1020.
- [7] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- WANG X K, FENG Z W, OUYANG Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13-16.
- [8] SUN W L, LIU X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. Forest Ecosystems, 2020, 7: e4.
- [9] FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ M, VICCA S, JANSSENS I A, et al. Addendum: Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance [J]. Nature Climate Change, 2014, 4: e643.
- [10] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.
- YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [11] QIU Z X, FENG Z K, SONG Y N, et al. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: e119715.
- [12] WANG T X, ZHANG Z Y, LIU L, et al. Simulation of the potential distribution of the glacier based on maximum entropy model in the Tianshan Mountains, China [J]. Water, 2021, 13(11): e1541.
- [13] 王丹丹, 许海超, 单志杰, 等. 黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 83-89.
- WANG D D, XU H C, SHAN Z J, et al. Effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 83-89.
- [14] 李宗善, 陈维梁, 焦磊, 等. 黄土高原健康和衰退刺槐林径向生长对气候的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 757-769.
- LI Z S, CHEN W L, JIAO L, et al. The climate-response pattern of radial growth for the health and decline black locust plantations on the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 757-769.
- [15] 芦东旭, 耿雪琪, 崔子怡, 等. 黄土丘陵区不同林龄刺槐养分利用特征和林分质量研究[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 90-99.
- LU D X, GENG X Q, CUI Z Y, et al. Nutrient utilization characteristics and stand quality of *Robinia pseudoacacia* at different stand ages in the loess hilly region of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 90-99.
- [16] 刘林, 于博威, 王小平, 等. 黄土丘陵沟壑区人工刺槐林生长特征与生物量研究[J]. 中国水土保持, 2023(11): 19-22.
- LIU L, YU B W, WANG X P, et al. Growth characteristics and biomass of artificial *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly and gully areas [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(11): 19-22.

- [17] LI W P, ZHANG Y W, SHI X L, et al. Development of land surface model BCC_AVIM2.0 and its preliminary performance in LS3MIP/CMIP6 [J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(5): 851-869.
- [18] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.
- YE X Z, ZHANG M Z, LAI W F, et al. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [19] CHEN W D, WEI J, ZHU K, et al. 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.
- [20] 付晓, 张煜星, 王雪军. 2060 年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J]. 林业科学, 2022, 58(2): 32-41.
- FU X, ZHANG Y X, WANG X J. Prediction of forest biomass carbon pool and carbon sink potential in China before 2060 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(2): 32-41.
- [21] 李奇. 2010—2050 年中国乔木林碳储量与固碳潜力 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- LI Q. Forest carbon storage and carbon sequestration potential during 2010—2050 in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [22] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9483-9498.
- HOU R P, XIA C Z, CHEN J, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River economic belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9483-9498.
- [23] 朱念福, 郑晔施, 童冉, 等. 长三角地区乔木林碳汇及其对“双碳”目标贡献预测[J]. 生态学杂志, 2024, 43(12): 3817-3827.
- ZHU N F, ZHENG Y S, TONG R, et al. Prediction of carbon sink and contribution to the carbon peaking and carbon neutrality goals of arbor forests in the Yangtze River delta region of China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12): 3817-3827.
- [24] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 黄土丘陵区小流域不同海拔刺槐径向生长对气候的响应差异[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10119-10130.
- LIU Y L, XIN Z B, LI Z S, et al. Radial growth responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to climate at different elevations in a Loess Plateau watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10119-10130.
- [25] MA W H, LIU Z L, WANG Z H, et al. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: Evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland [J]. Journal of Plant Research, 2010, 123(4): 509-517.
- [26] YAN W M, ZHONG Y, SHANGGUAN Z P. Elevated temperature exacerbates the effects of drought on the carbon and hydraulic characteristics of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280: e107794.
- [27] ADAMS H D, GUARDIOLA-CLARAMONTE M, BARRON-GAFFORD G A, et al. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(17): 7063-7066.
- [28] 山建安, 朱睿, 尹振良, 等. 基于 CMIP6 模式的中国西北地区干旱时空变化[J]. 干旱区研究, 2024, 41(5): 717-729.
- SHAN J A, ZHU R, YIN Z L, et al. Spatial and temporal variation of drought in Northwest China based on CMIP6 model [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(5): 717-729.
- [29] XU H W, CHEN H P, WANG H J. Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(1): 635-651.
- [30] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374.
- TONG L J, LIU Y Y, WANG Q, et al. Spatial and temporal dynamics of net primary productivity and its driving factors in Northwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 367-374.
- [31] 牟莎. 基于 CMIP6 的中国复合极端事件时空变化及未来预估 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
- MOU S. Spatiotemporal variation and projection of the compound extreme events over China by CMIP6 models [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2023.