

DOI: 10.20103/j.stxb.202305231091

韩顺鑫,余婷,金正,邓锐,阳蕊灿,陶建平,罗唯学.不同气候情景下三种槐树在中国的潜在分布.生态学报,2025,45(4):1775-1787.

Han S X, Yu T, Jin Z, Deng R, Yang R C, Tao J P, Luo W X. Predicting potential distributions of three locust trees in China under different climate scenarios. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1775-1787.

不同气候情景下三种槐树在中国的潜在分布

韩顺鑫,余婷,金正,邓锐,阳蕊灿,陶建平,罗唯学*

西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,西南大学生命科学学院,重庆 400715

摘要:豆科槐树植物在防风固沙,改良土壤和防止水土流失方面发挥着重要作用,是重要的生态树种。全球气候变化正深刻影响植物的生长状态和地理分布,预测槐树植物的潜在适宜生境有助于深入了解气候变化对槐树植物地理分布格局的影响,对制定保护槐树类植物的科学保护策略至关重要。采用优化 MaxEnt 模型预测刺槐、短绒槐和槐在当前和未来 2070 年四种气候情景下(SSP1_2.6, SSP2_4.5, SSP3_7.0 和 SSP5_8.5)在中国的潜在适宜分布,确定影响三种槐树地理分布的主导环境因子,并使用 ArcGIS 绘制三种槐树的高精度空间分布图。结果表明:(1)温度和降水是影响三种槐树地理分布的主要因素,其中短绒槐和槐对最干季度均温响应最敏感,而等温性是影响刺槐潜在分布的最重要因子;(2)在当前气候条件下,槐的潜在分布区面积最为广阔共 346.49 万 km²,刺槐的潜在分布区面积次之,为 252.4 万 km²,而短绒槐的潜在分布区面积最为狭小共 77.71 万 km²;(3)在未来不同气候情景下,三种槐树的潜在分布区都有不同程度的扩张,并且主要向更高纬度地区扩张。与当前气候相比,刺槐在未来气候下的潜在分布区主要呈现向东北、华北地区扩张的趋势,短绒槐主要向华北地区、西南地区西部、东北地区北部扩张,槐主要向东北、华北、西北地区扩张。绘制了在当前和未来气候情景下三种槐树在中国的潜在适宜分布地图,揭示了三种植物在中国的生态差异,为槐树的种质资源管理和生境保护提供了重要的科学依据。

关键词:槐树;MaxEnt 模型;模型优化;气候变化;潜在分布

Predicting potential distributions of three locust trees in China under different climate scenarios

HAN Shunxin, YU Ting, JIN Zheng, DENG Rui, YANG Ruican, TAO Jianping, LUO Weixue*

Key laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The Fabaceae locust plants are significant ecological tree species which play a crucial role in windbreaks, sand fixation, soil improvement, and prevention of soil erosion. Global climate change has been profoundly affecting the growth status and geographical distribution of plants, and predicting the potential suitable habitat of locust plants is helpful to understand the impact of climate change on the geographical distribution pattern of locust plants, and is very important for formulating scientific conservation strategies for locust plants. In order to identify the dominant environmental factors affecting the geographical distribution of three locust trees, and to map the spatial distribution of three locust trees with high precision using ArcGIS, the optimized MaxEnt model was used to predict the effects of *Robinia pseudoacacia*, *Sophora velutina*, and *Styphnolobium japonicum* under current and future climate scenarios (SSP1_2.6; SSP2_4.5, SSP3_7.0, SSP5_8.5) for the 2070s in China. The results indicated that: (1) temperature and precipitation were the dominant factors influencing the geographical distribution of the three locusts, with *S. velutina* and *S. japonicum* being the most sensitive to the mean temperature of driest quarter, while isothermality being the most important variable in determining the potential distribution of *R. pseudoacacia*. (2) Under current climate conditions, *S. japonicum* had the widest range of potential

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32201312);中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWU-KQ22009)

收稿日期:2023-05-23; **网络出版日期:**2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luowx0305@swu.edu.cn

suitable areas, with a total area of $346.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, *R. pseudoacacia* had the second largest potential distribution area of $252.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, while *S. velutina* had the narrowest range of potential suitable areas, with a total area of $77.71 \times 10^4 \text{ km}^2$; (3) Under different future climate scenarios, the potential suitable zones of all three species exhibited different degrees of expansion, and mainly toward higher latitudes. In comparison to the current climate, the potential distribution area of *R. pseudoacacia* in future climate scenarios exhibited a trend of expansion to northeast China and North China. The *S. velutina* also showed an expansion trend to North China, west Southwest China and a north part of Northeast China. Furthermore, the *S. japonicum* expanded to Northeast China, North China and Northwest China. This study was the first to map the potential suitable distribution of three locusts in China under current and future climate scenarios, revealing the habitat differences in China, which is of great significance for the germplasm management and habitat protection of locust plants.

Key Words: locust tree; MaxEnt model; model optimization; climate change; suitable distribution

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,2011—2020 年全球表面温度比 1850—1900 年高 1.1°C ,其中陆地升高的温度(1.59°C)要高于海洋(0.88°C)^[1]。此外,保持在当前碳排放水平下,21 世纪末期全球平均气温将提高 $2.1\text{—}3.5^\circ\text{C}$,这可能是引起物种季节活动和地理分布等发生显著变化的重要原因^[2]。近二十年来,环境变化引起植物物种分布的区域性变化是生态学关注的热点问题^[3]。大量研究已经证实气候是决定物种分布的重要因素之一^[4–5]。具体而言,随着全球气候持续变化,温度、 CO_2 浓度、降雨等因素通过影响植物的光合作用和呼吸作用,从而对植物的生长产生巨大影响^[6]。其次,土壤是植物生长的载体,土地利用方式或者土壤养分的变化都可能影响植物的生长和分布^[7]。此外,地形因素通过调控太阳辐射、降雨和土壤养分的再分配,可以间接改变植物种群的数量和空间分布^[8]。因此,探究植物种群在未来气候变化下潜在分布区的变化及其关键驱动因子,对生物多样性保护和生态系统可持续发展等方面具有至关重要的作用。

近年来,生态位模型已被广泛用于研究全球气候变化对物种分布的影响,其中 MaxEnt 模型具有运算结果稳定、运算时间短、操作简易等优点^[9]。国内外学者纷纷尝试利用 MaxEnt 模型预测气候变化对动植物潜在分布区的影响,如玫瑰蜗牛^[10]、冷杉^[11]、紫苏^[12]以及萨哈尔^[13]等,并取得了良好效果。这些研究将有助于管理者制定相关的生态保护策略,在气候变化条件下预防病虫害和入侵物种的扩张,以及珍稀濒危物种的栖息地保护等方面起着重要作用。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*),也称洋槐,豆科刺槐属植物,根系浅而发达,适应性强,是优良的固沙保土树种^[14]。在我国西北和华北一带,经常把它用于防风固沙、保持水土、改良土壤等方面^[15]。此外,刺槐对二氧化硫、氯气、化学烟雾等具有一定的抗性,可将其用于工厂、矿区等污染较为严重的地区绿化^[16]。因此,刺槐不仅在改善生态环境、防止水土流失等方面发挥着重要作用,还具有良好的经济价值。短绒槐(*Sophora velutina*),原豆科槐属植物,现被拆分为苦参属植物,灌木,主要生长于中国云贵川地区的山谷、河溪边的灌木林中,海拔 $1000\text{—}2000\text{m}$ ^[14]。槐(*Styphnolobium japonicum*),又称槐树、国槐等,豆科槐属植物,落叶乔木。槐树树冠优美,具有较强的抗病虫能力、耐污染性和环境适应能力,因此被广泛应用于城市绿化计划^[17]。此外,槐树还是一种重要的药用植物,花和果实常用作中药,有清凉收敛、止血降压的作用,并且花蕾中含有芦丁、黄酮等多种可药用成分,被列入中国药典^[18]。

目前,关于槐树类植物如何响应气候变化的研究仍然十分缺乏,对其在中国的地理分布及其关键驱动因子仍不清楚。基于其重要的生态价值和经济价值,本研究选取刺槐、短绒槐、槐三种槐树作为研究对象,利用优化的 MaxEnt 模型,探讨气候变化对三种槐树在中国潜在分布的影响。本研究拟解决以下科学问题:(1)在当前气候情景下,三种槐树在中国的潜在适宜分布是怎么样?(2)气候、土壤和地形因子对三种槐树潜在地理分布的相对重要性有何差异?(3)与当前气候情景相比,未来气候情景下三种槐树在中国的潜在地理分布有何变化?本研究可以为保护槐树类植物的种质资源以及生物多样性保护提供科学指导。

1 材料方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 物种分布数据

本文使用的刺槐(*R. pseudoacacia*)、短绒槐(*S. velutina*)、槐(*S. japonicum*)的分布点数据,主要通过三个平台收集,具体包括全球生物多样性信息平台(GBIF 数据库, <https://www.gbif.org>)、中国数字植物标本馆(CVH, <https://www.cvh.ac.cn>)以及中国数字植物标本馆内的教学标本资源共享库(<https://mnh.scu.edu.cn>)。

在网站内检索 1950 年至今三种槐树在中国境内的分布点数据,从中排除了重复标本、人工种植标本以及信息不明的标本信息^[19]。为避免物种采样点不均衡,影响模型的预测精度,将数据进行稀疏化处理,即在每个 5km×5km 的网格内仅保留一个样本分布点(图 1),最后,得到刺槐分布点 444 个,短绒槐分布点 92 个,槐树分布点 361 个。

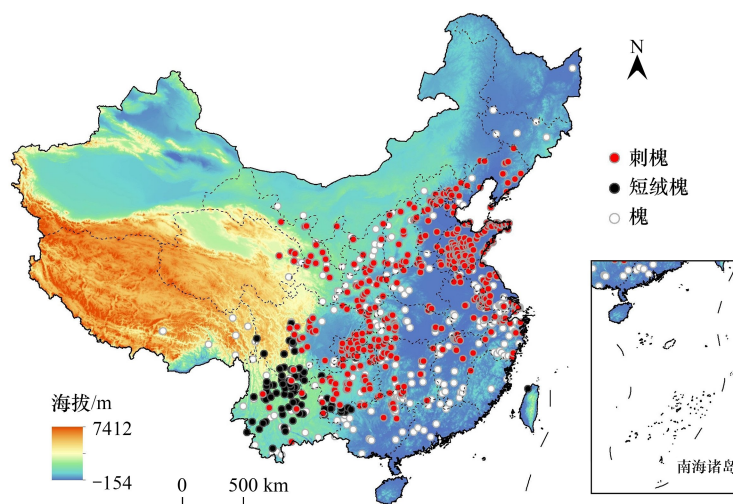


图 1 当前气候下三种槐树在中国的分布点

Fig.1 Distribution points of three kinds of locust trees under the current climate in China

1.1.2 地理和环境数据

地理数据在标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)中下载 1:1400 万的中国行政区划矢量图作为分析的底图,其审图号为 GS(2020)4619。

环境数据包括气候、地形、土壤三类共计 28 个环境变量(表 1)。其中 19 个气候因子和 3 个地形因子来自世界气候数据库(<https://www.worldclim.org>)。为使模拟结果更接近于实际观测^[20],选取当前气候数据(1970—2000 年)及未来(2070s)的 4 种气候情景进行模拟。未来气候情景符合第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的共享经济路径:可持续发展路径(SSP1_2.6)、中度发展路径(SSP2_4.5)、区域竞争路径(SSP3_7.0)和以化石燃料为主的常规发展路径(SSP5_8.5)^[21]。土壤因子来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.2, HWSD)。

1.2 模型的设置和选择

本研究利用 R 语言中的“sdmtune”包中 MaxEnt 模型对三种槐树在我国的潜在地理分布区进行模拟预测。模型输出格式选择“Cloglog”的格式,文件类型选择“Asc”^[22]。为了提高模拟精度,将样本数据随机分为测试数据集(20%)和训练数据集(80%)^[23]。根据三个槐树物种实际分布点数量不同,设置不同的背景点参数,即刺槐背景点为 2000,槐背景点为 1800,短绒槐背景点为 700。同时,选择 5 折交叉验证法来模拟不同气候条件下三个槐树物种的潜在分布区,即将训练数据集切割成 5 份,分为 4 份训练子集和 1 份验证子集,重复

运行 5 次,最大迭代次数有 300、600 和 900,选取最优结果。应用刀切法(Jackknife)对环境因子的重要性进行排序分析。其他参数为系统默认值。

表 1 MaxEnt 模型中的 28 个环境变量

Table 1 The 28 environmental variables in the MaxEnt model

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
bio1	年平均温度 Annual mean temperature	℃
bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean diurnal temperature range	℃
bio3	等温性 Isothermality	—
bio4	温度季节变化标准差 Standard deviation of seasonal variation of temperature	—
bio5	最热月最高温 Maximum temperature of the warmest month	℃
bio6	最冷月最低温 Minimum temperature of the coldest month	℃
bio7	年均温度变化范围 Temperature annual range	℃
bio8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃
bio9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	℃
bio10	最热季均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃
bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
bio12	年均降水量 Annual mean precipitation	mm
bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
bio15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality(Coefficient of variation)	—
bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
bio18	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
bio19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
topo-aspect	坡向 Aspect	—
topo-elev	海拔 Elevation	m
topo-slope	坡度 Slope	°
soil-bhod	土壤容重 Soil bulk density	g/cm ³
soil-ocd	土壤有机碳密度 Soil organic carbon density	kg C
soil-pH	土壤酸碱度 Soil pH	—
soil-sand	土壤含沙量 Soil sand fraction	g/m ³
soil-soc	土壤有机碳含量 Soil organic carbon	g/kg
soil-TN	土壤全氮 Soil total nitrogen	g/kg

MaxEnt 模型的特征包括:线性特征(Linear features,L)、二次型特征(Quadratic features,Q)、片段化特征(Hinge features,H)、乘积型特征(Product features,P)和阈值性特征(Threshold features,T)^[24],本研究共测试了 5 种不同的特征组合:(1)LQ、(2)LH、(3)LP、(4)LQP、(5)LQPH;以及 6 个正规化系数值:0.5、1、1.5、2、2.5和 3;最终得到 3 个槐树物种各自不同的适生区模型的最优组合。

1.3 模型的预测分析

1.3.1 适生区等级划分

将利用 MaxEnt 模型得到的当前和未来的三种槐树物种模拟分布结果文件导入 ArcGIS 10.8,使用重分类(reclassify)工具将文件转换为栅格数据并进行适生区等级的划分。利用自然间断点分级法(Jenks' naturalbreaks)将适生区分为 4 个等级:非适生区(0—0.2)、低适生区(0.2—0.4)、中适生区(0.4—0.6)、高适生区(0.6—1)^[25]。最后,利用 ArcGIS 软件计算不同等级适生区所占比例以及面积。

1.3.2 环境因子重要性评估

根据三种槐树的生境,选择气候、地形、土壤三类共计 28 个环境变量作为模型的备选变量。选择刀切法

测定各环境变量对模型构建的重要性和贡献值,以重要性>1%、变量之间相关性系数 $\leq \pm 0.8$ 为标准保留具有生物学意义且在初始模型中贡献率较大的环境变量^[26]。然后,对环境变量作多重共线性(Multicollinearity)检验。当方差膨胀因子(VIF) ≥ 10 时,变量之间有严重的多重共线性^[27],会影响预测。因此,仅保留 VIF<10 时的环境变量。根据以上标准,三个槐树物种仅保留 10 个不同的环境变量进行模型预测(表 2)。预测时 MaxEnt 模型会判定各环境变量的置换重要性,置换重要性是随机替换训练样点的气候因子进行模型模拟后结果得到的 AUC 值减少程度,减少值越大表明模型高度依赖该变量^[28]。

表 2 各树种保留用以预测的环境变量
Table 2 Environmental variables reserved by various species for prediction

树种 Species	保留的环境变量 Reserved environmental variables
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	bio3、bio4、bio12、bio15、soil_bhod、soil_pH、soil_sand、topo_aspect、topo_elev、topo_slope
短绒槐 <i>S. velutina</i>	bio3、bio9、bio12、bio15、soil_TN、soil_pH、soil_sand、topo_aspect、topo_elev、topo_slope
槐 <i>S. japonicum</i>	bio3、bio9、bio12、bio15、soil_bhod、soil_pH、soil_sand、topo_aspect、topo_elev、topo_slope

1.3.3 模型准确性评价

本研究采用受试工作者特征(ROC,receiver operating characteristic)曲线分析法对模拟预测结果进行精度检验^[29—30],取 ROC 曲线下的面积值(AUC,area under curve)作为模型预测的衡量标准。AUC 的取值范围为 0—1,取值越大表示预测结果越准确可信。一般认为,AUC<0.70 表示模型精度较低,0.70 $\leq$ AUC<0.80 时可采用预测结果,0.80 $\leq$ AUC<0.90 表示预测结果较好,AUC $\geq$ 0.90 表示预测结果非常准确^[31—32]。

2 结果与分析

2.1 模型预测精度评价

本研究中三种槐树选取的建模参数设置如下:刺槐 FC=LQPH,reg=2.5;短绒槐 FC=LQPH,reg=2.5;槐 FC=LQ,reg=3。在各参数下,刺槐在中国适生区预测模型的测试集 AUC 平均值为 0.87;短绒槐测试集 AUC 平均值为 0.86;槐测试集 AUC 平均值为 0.88(表 3)。三种槐树所有气候情型预测模型的测试集 AUC 值均>0.80,预测效果较好。由此表明,该预测结果拟合程度较高,结果较为可信,可用于几种槐树在中国的潜在分布区预测。

表 3 三种槐树的最优 MaxEnt 模型的特征
Table 3 Characteristic of optimal MaxEnt models for the three locust trees

树种 Species	特征组合 Feature combination	调频倍率 Regularization multiplier	曲线下面积 AUC
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	LQPH	2.5	0.87
短绒槐 <i>S. velutina</i>	LQPH	2.5	0.86
槐 <i>S. japonicum</i>	LQ	3	0.88

AUC:曲线下面积 Area under the curve; LQ:线性特征+二次型特征 Linear features+Quadratic features; LQPH:线性特征+二次型特征+乘积型特征+片段化特征 Linear features+Quadratic features+Product features+Hinge features

2.2 影响三种槐树分布的关键环境因子分析

在当前气候条件下,影响三种槐树分布的关键环境因子存在差异(表 2)。总的来说,气候因子对三种槐树的分布区影响最大,高于土壤因子与地形因子。刺槐的适宜性分布受到温度、降水量和海拔变化的影响,其中温度季节变化标准差(bio4)是影响刺槐的关键气候因子,重要性达 38.1%。短绒槐的适宜性分布受到温度、降水量和海拔变化的影响,其中最干季均温(bio9)的重要性高达 51.6%,是影响短绒槐适宜区分布的关键气候因子,年均降水量(bio12)的重要性为 20.9%,海拔(topo_elve)的重要性较小,为 13.8%。槐的适宜性分布受到温度和降水量变化以及土壤性质的影响,其中最干季均温(bio9)的重要性达 40.1%,海拔(topo_elve)

的重要性为 27%。

模型响应曲线表示各环境变量对三种槐树适生概率的影响趋势(图 2)。在三种槐树的响应曲线中,温度与降水的变化对三种槐树的适生概率影响较大。其中,刺槐的适生概率随着等温性(bio3)的增加而下降的趋势即温度波动范围越大,越不利于刺槐生存。短绒槐和槐对于最干季均温最为敏感,最干季均温对短绒槐和

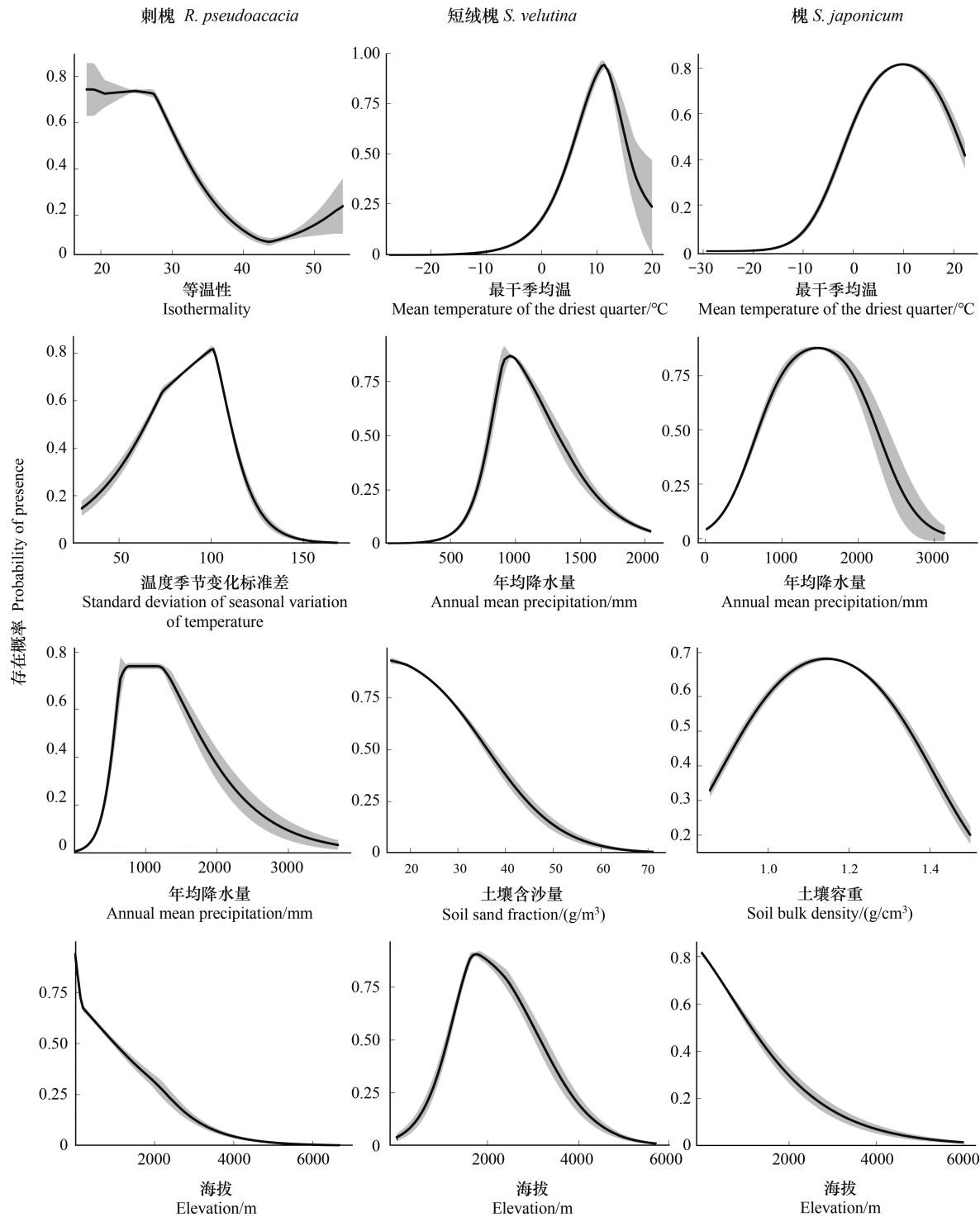


图 2 重要性排序前 4 的环境因子与存在概率的响应曲线

Fig.2 Response curve of environmental factors and probability of existence of the top 4 substitution importance

阴影部分表示存在概率 95% 的置信区间

槐的适生概率影响均呈现单峰响应曲线,最干季均温在-10℃至10℃的范围内时,短绒槐与槐的适生概率皆随其升高而增大。年均降水量对三种槐树适生概率的影响呈单峰曲线,年均降水量为800mm至1200mm时刺槐的适生概率呈峰值阶段,1000mm时短绒槐的适生概率达到峰值,1500mm时槐的适生概率达到峰值。

海拔与刺槐、槐的适生概率呈负相关趋势,而与短绒槐的适生概率呈单峰趋势,在海拔1800m处达到峰值。此外,随着土壤含沙量(soil_sand)的增加,短绒槐的适生概率逐渐减小。槐的适生概率随着土壤容重(soil_bhod)的升高先增大后减小,在土壤容重为1.1—1.2g/cm³之间时达到峰值。

2.3 当前气候条件下三种槐树在我国的潜在分布

经MaxEnt模型运算模拟(图3),槐的适生区范围最为广阔(约3346万km²),短绒槐的适生区范围最为狭小(约78万km²)。刺槐的适生区主要分布在华中、华东地区,以及西南地区、华北地区的部分区域,总面积约为252万km²(表4),其中高适生区约占总适生区的41.3%,中适生区约占总适生区的27.0%,低适生区约占总适生区的31.7%(图4)。

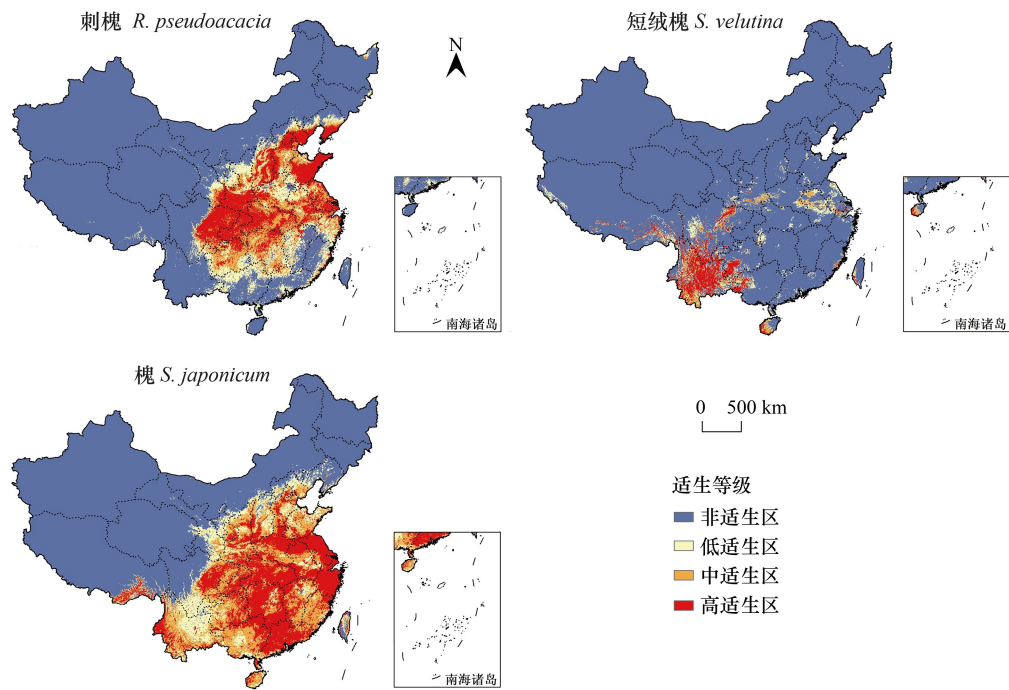


图3 当前气候下三种槐树的适生区分布图

Fig.3 Distribution map of suitable area of three kinds of locust trees under the current climate

表4 当前气候下三种槐树的适生区面积

物种 Species	适生等级 Suitable level/(×10 ⁴ km ²)				适生区总面积 Total area of suitable area
	非适生区 Unsuitable area	低适生区 Low suitable area	中适生区 Medium suitable area	高适生区 High suitable area	
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	707.54	79.97	68.12	104.31	252.4
短绒槐 <i>S. velutina</i>	882.24	32.06	16.93	28.72	77.71
槐 <i>S. japonicum</i>	613.45	76.28	114.76	155.45	346.49

短绒槐的适生区面积较小,主要分布在西南地区,零星分布在华东、华中以及西北地区,总面积约为77.7万km²,其中高适生区约占总适生区的40.0%,中适生区约占总适生区的21.8%,低适生区约占总适生区的41.2%(图3)。

槐的适生区主要分布在华中、华东、华南地区,以及西南地区的部分区域如云南、贵州、重庆等,华北地区的部分区域如山西、河北等,总面积约为 346 万 km²,其中高适生区约占总适生区的 44.9%,中适生区约占总适生区的 33.1%,低适生区约占总适生区的 22.0%(图 3)。

2.4 未来气候条件下三种槐树在我国的潜在分布区

经 MaxEnt 模型运算模拟,预测了刺槐、短绒槐、槐在 2070 年 SSP1_2.6、SSP2_4.5、SSP3_7.0、SSP5_8.5 四种未来气候情景下的潜在地理分布(图 4)。刺槐、短绒槐、槐三个树种在 2070 年 4 种未来气候情景下各自的潜在分布区之间总体相似,仅有细微差别。

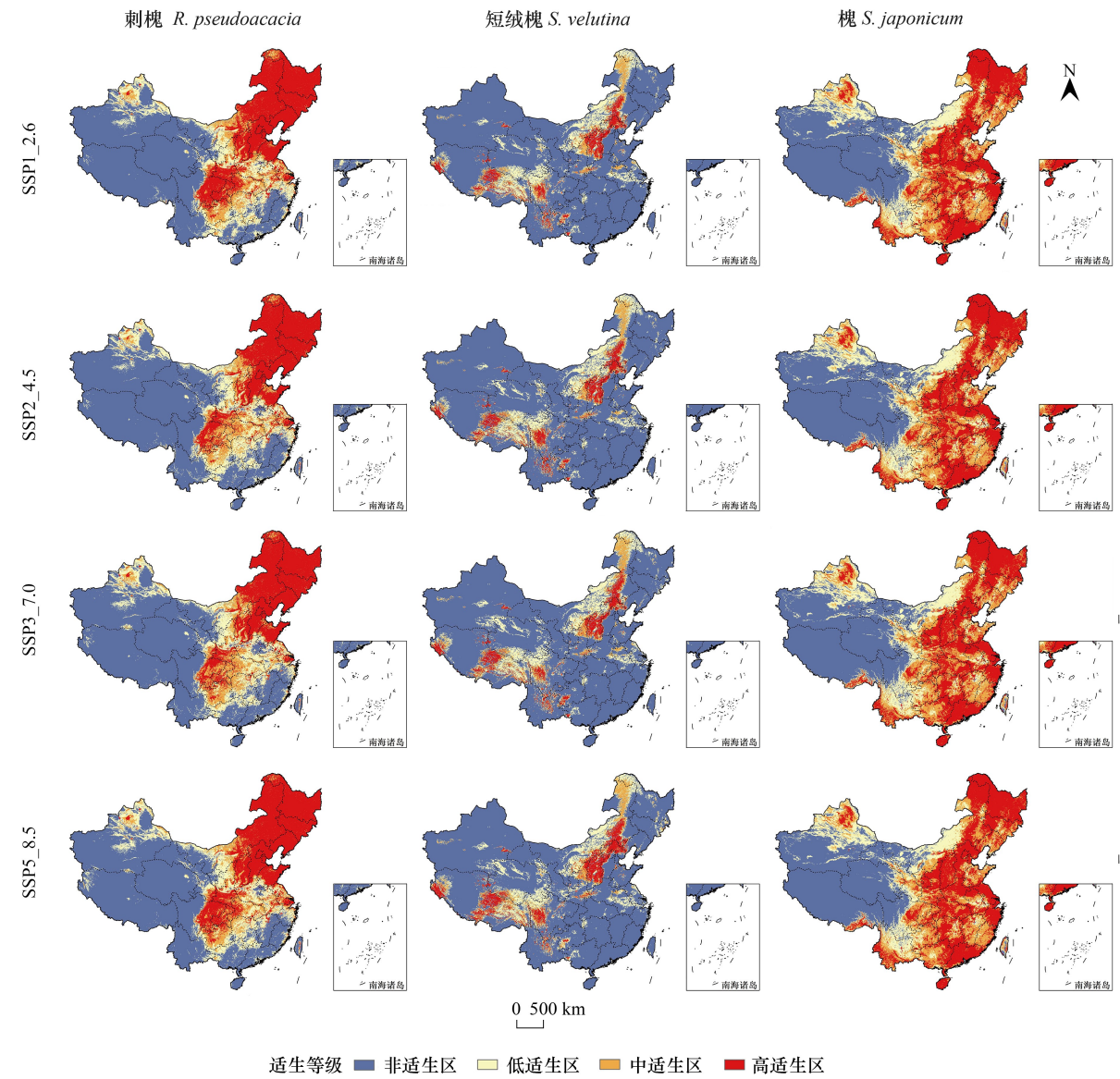


图 4 三种槐树 2070 年不同气候情境下的潜在分布区

Fig.4 Potential distribution areas of three locust trees under different climatic conditions in 2070

刺槐在 2070 年的潜在分布区面积较广,主要集中在华北、东北、华中、华东地区,少部分在西北、西南地区。其中高适生区面积最广,主要分布在黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山东、河北、四川等省份,低适生区分布较为散落。短绒槐在 2070 年的潜在分布区面积最小,且在各省零星分布,较为集中的潜在分布区主要在华北地区以及西北、西南地区接壤区域。三者相比,槐在 2070 年的潜在分布区面积最广,除部分的西北和西南

地区以外,其他地区均有其适生区的分布。且大部分区域都为高适生区,中低适生区面积占比较小。由图 4 可知,仅在西藏、青海以及甘肃,槐的潜在分布区面积较少。

2.5 未来气候情景下三种槐树适生区空间格局变化

与当前气候相比,2070 年不同气候情景下几种槐树表现出不同的潜在地理分布区变化趋势,运用 ArcGIS 10.8 绘制变化趋势图(图 5),并计算适生区收缩或扩张的面积(表 5)。

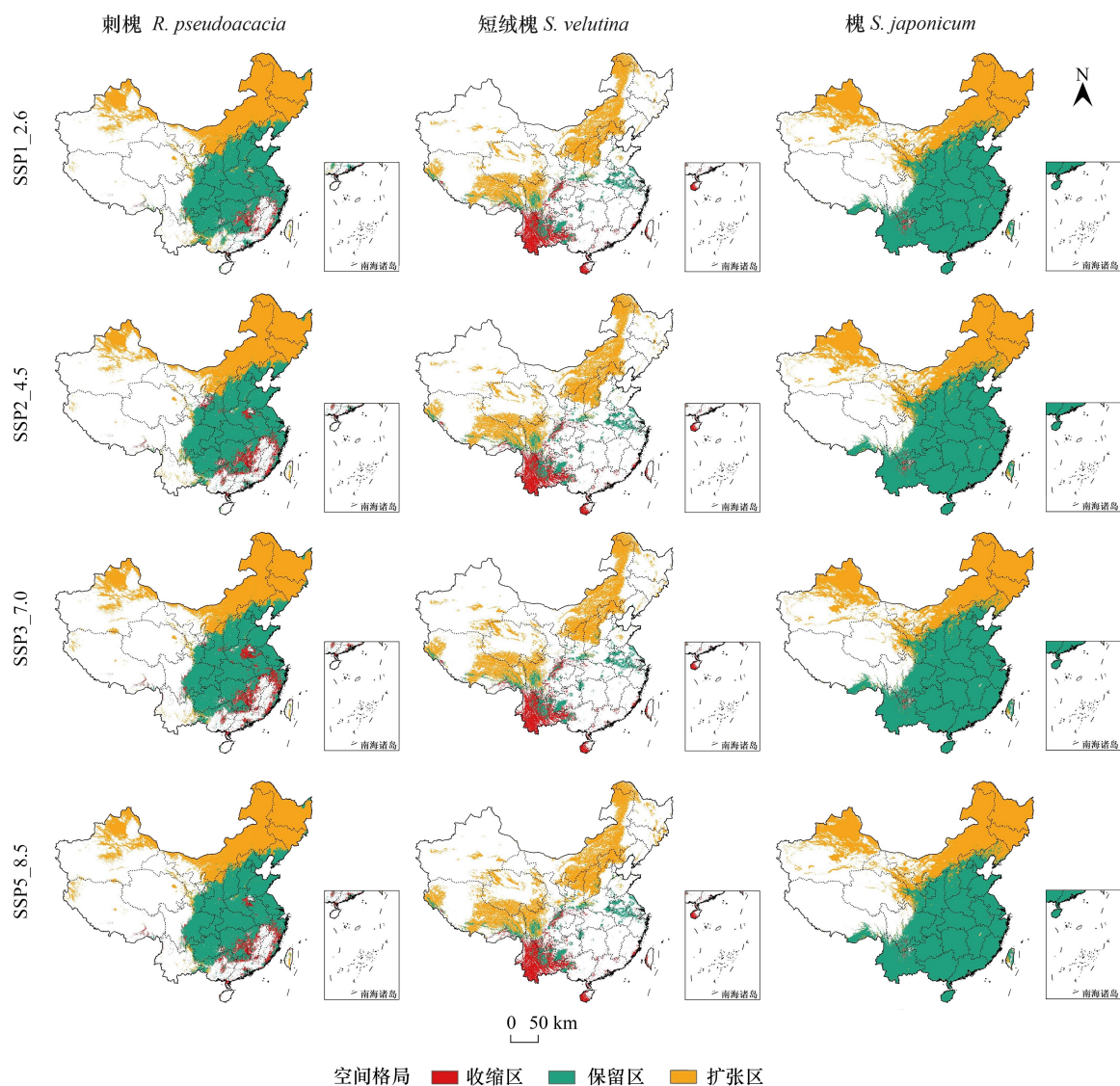


图 5 三种槐树在未来气候条件下潜在分布区的变化趋势

Fig.5 Change trend of potential distribution areas of three kinds of locust trees under future climatic conditions

与当前气候相比,刺槐在未来气候下的潜在分布区主要呈现向东北、华北地区扩张的趋势,新疆也有少部分区域由非适生区扩张为中低适生区,总体扩张面积较大,4 种气候情景下的扩张面积均超过 210 万 km^2 。只有较少区域收缩为非适生区,SSP3_7.0 情景下收缩面积最大,约为 30 万 km^2 。华中、华东地区为保留区,仍是刺槐潜在分布的主要区域。

与当前气候的分布区相比,短绒槐在未来气候下的潜在分布区区域较小,总体呈现扩张的趋势,主要向华北地区、西南地区西部、东北地区北部扩张,其中 SSP5_8.5 情景下的潜在分布区面积最大,为 229 万 km^2 。西南地区南部即云南省为主要收缩区域,保留区则较为零散。

槐在未来气候下的潜在分布区同当前气候相比,仍然呈现扩张的趋势。槐的潜在分布区向东北、华北、西北地区扩张,总体扩张面积最大,4 种气候情景下的扩张面积均超过 261 万 km²。其中,SSP5_8.5 情景下扩张面积最大,达 267 万 km²。收缩区较小,4 种气候情景下的收缩面积均不超过 3 万 km²。华中、华东、华南地区以及部分西南地区仍保留槐的适生区域。

表 5 2070 年不同气候情景下三种槐树适生区面积变化

Table 5 Changes in the suitable area of three species of locust trees under different climate scenarios in 2070

物种 Species	气候情景 Climate scenario	变化趋势 Change trend/(×10 ⁴ km ²)			
		收缩区 Contraction area	保留区 Reserved area	扩张区 Expansion area	非适生区 Unsuitable area
刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	SSP1_2.6	13.70	238.72	228.71	478.70
	SSP2_4.5	26.27	226.14	215.84	491.57
	SSP3_7.0	29.75	222.66	224.39	483.03
	SSP5_8.5	22.57	229.84	231.81	475.60
短绒槐 <i>S. velutina</i>	SSP1_2.6	38.45	39.26	161.40	720.72
	SSP2_4.5	37.57	40.14	164.58	717.54
	SSP3_7.0	37.24	40.47	170.07	712.05
	SSP5_8.5	38.69	39.03	189.65	692.46
槐 <i>S. japonicum</i>	SSP1_2.6	2.77	343.73	261.84	351.48
	SSP2_4.5	2.22	344.27	264.04	349.29
	SSP3_7.0	2.23	344.27	265.58	347.75
	SSP5_8.5	1.54	344.95	267.22	346.11

3 讨论

3.1 主导环境因子对三种槐树适生区分布的影响

植物的潜在分布区特征是气候、地形等因素共同作用的结果,也是植物对环境响应的体现。在前人对水曲柳^[33]和沙棘^[34]潜在分布区预测的研究中,发现影响最大的环境因子是年均降水量。这与本研究结果一致,即年均降水量对刺槐、短绒槐、槐的地理分布格局均具有主导作用,并且与三种槐树适生等级均呈现单峰格局。这进一步表明降水量过高或过低都会使槐树植物的适生等级降低。在高明龙等^[35]对白桦的研究中,过量降水也会对白桦的分布产生负面影响,这是因为降水量过多会让植物处于水涝状态,氧气供应不足从而影响植物呼吸,令植物营养失调等^[36]。另外,降水量过低,也会引起水分亏缺,会使植物光合作用降低,从而影响植物生长分布。此外,本研究发现海拔对三种槐树的适生分布区具有较强的调控作用,这可能是海拔通过光照、温度和降水来间接影响三种槐树的生长。高海拔地区光照强度高,但降水较少,低海拔地区光照强度低,但降水较多^[37]。因此,三种槐树在海拔>2000m 时,随着海拔升高,适生程度降低。

此外,本研究中最干季均温对短绒槐、槐的地理分布格局起主导作用。这表明降水与温度之间存在强烈的交互作用,进而使短绒槐与槐的生长与分布受到影响。在最干季条件下,植物体内水分较少,此时温度过高会对植物造成热害,令植物通过蒸腾作用大量失水,极度缺水条件下植物生长发育受到抑制^[38]。温度过低会导致植物遭受冷害或者冻害,生长发育缓慢。在当前气候下,短绒槐与槐主要分布在我国南部,这表明南部地区降水较多且温度适宜两种槐树的生长。

除此之外,刺槐的分布格局还受到等温性、年平均温度范围的影响,短绒槐的分布格局受到土壤含沙量的影响,槐的分布格局受到土壤容重的影响。这表明温度变化范围对刺槐的生长分布也有较大影响。气候因子并非相互独立地影响生物的生长和分布,而是多种气候因子共同作用的结果^[33]。

3.2 三种槐树未来适生区的变化

在未来气候情景下,三种槐树的分布区都呈现显著扩张趋势,并且均向高纬度地区扩张,这与前人的研究

结果一致^[39-40]。大量研究表明温度可能是纬度梯度上限制物种分布的关键环境因子^[41],全球气候变暖对喜暖性植物的扩张有积极作用^[42]。生态位越窄的物种更容易受到气候变化的影响,而生态位越宽的物种的资源利用性更强,展现出相对较强的环境适应能力。三种槐树环境适应力强,耐寒抗旱,对土壤条件要求不高,即使在石灰性、酸性以及轻盐碱土上也能够正常生长^[15,43],出色的环境适应能力以及温度限制的解除有利于三种槐树向高纬度地区扩张。其中,当前气候情景下刺槐和槐的潜在分布区相似,且在未来四种气候情景下均向东北、华北和部分西北地区扩张。基于多个 CMIP6 气候模型对中国的地表气温时空变化的分析表明,未来中国地区将会持续变暖^[44],而东北地区 and 西北地区降雨增加^[45-46],温度和降水条件的改变促进了植物的生长,进而使得刺槐和槐在该地区扩张其潜在适宜生境。此外,在未来温度大幅增长而降雨量减少的情况下,云南省干旱情况加剧^[47],形成脆弱的干热河谷生态系统。由于水热矛盾突出,降雨集中造成水土流失严重,土壤肥力下降^[48],导致植物在干热河谷地区难以定殖,因而可能导致短绒槐的潜在适宜生境在未来气候情景下出现收缩趋势。与刺槐和槐不同,在未来气候情景下短绒槐的潜在适宜生境在青藏高原地区有所扩张,这可能与该属植物的具有较强的抗旱能力有关^[49]。为了更好地理解不同的社会经济发展模式与气候变化风险之间的相关性,CMIP6 基于辐射强迫水平和当前的国家环境,提出了四种共享的社会经济路径(SSPs),从 SSP1_2.6 至 SSP5_8.5 表明气候变化的复杂情况加剧。但总体而言,三种槐树在未来 4 种气候情景下的潜在分布区无显著差异,这与植物对气候变化的生理生态响应的复杂性有关^[50],进而导致气候变化对物种分布产生多种效应。

3.3 三种槐树的种质资源保护

刺槐、短绒槐、槐都是重要的生态树种,能防风固沙、改良土壤等,在改善生态环境、防止水土流失方面发挥着重要作用。尤其是刺槐和槐具有较强的环境适应能力,能够在多种土壤条件中正常生长,如石灰性、酸性以及轻盐碱土壤等,是黄土高原地区水土保持的先锋物种^[15,51]。党的十八大以来,“绿水青山就是金山银山”的理念成为全国上下的共识,各界都积极行动推进绿色发展^[52]。在保护生态文明行动中,对森林物种尤其是重要的生态树种的保护更需引起重视。

对三种植物的资源保护可以根据未来气候情景下的空间格局变化的差异采取不同措施^[53]。具体而言,保留区可以成为植物应对气候变化的“避难所”,建议将保留区列为优先保护区域^[54],注重保留区的保护与管理,杜绝滥砍滥伐,保护原有的植物林地,使植物在保留区内继续生长,从而保护植物资源。收缩区面临植物种群消失的风险,应该加强收缩区域内种质资源保护。此外,应重点分析植物分布区收缩的原因,积极开展相关研究,以达到减少收缩面积的目的。扩张区可以作为植物的引种区,减少人类活动的影响并制定有效的监管措施,促进植物资源开发,使植物最终在扩张区生存定殖。最后,加强不同地区间三种槐树资源的合理统筹利用,有利于实现经济与生态双收益^[55]。因此,对于刺槐和槐树而言,我们建议优先在东北地区和部分的新疆地区进行科学的引种栽培;对于短绒槐,优先在云南省进行种质资源收集,在部分的华北地区、西南地区和内蒙古自治区进行引种栽培。

3.4 局限与展望

近年来,MaxEnt 模型已被广泛运用于物种潜在分布区的模拟预测。MaxEnt 的默认参数是早期开发人员测试 6 个不同地理区域的 266 个物种的数据时设定的最优模型参数^[31],盲目使用 MaxEnt 模型的默认参数预测物种的潜在分布区,可能会发生过拟合,使得模型预测结果不够准确^[56]。因此,在不同的研究中需要根据物种的样本情况对 MaxEnt 模型进行参数调整,本研究根据三种槐树的物种分布点数量设置了不同的背景点、选择了不同的环境变量进行模型的模拟预测,优于默认参数的预测结果。同时,在未来的研究中可以考虑采用多种物种分布模型进行预测,例如广义线性模型、随机森林模型等,筛选出最优模型进行预测。此外,虽然气候、土壤和地形因素在物种分布中发挥着关键作用,但土地利用变化、生物相互作用、扩散限制和人类活动等因素也会影响物种分布模式。然而,由于技术条件限制,目前尚且不能将所有变量纳入一个模型进行物种适宜分布区预测,过多变量引入模型可能会导致严重的共线性问题,从而降低模型的拟合效果^[57]。因此,本

研究主要关注自然条件下关键环境因子对三种槐树潜在适宜分布的影响,这对于气候变化背景下三种槐树的管理和抚育具有重要参考价值。尽管本研究与实际情况存在一些偏差,但本研究采用 MaxEnt 模型对当前三种槐树的潜在适宜分布区的预测结果基本涵盖了其实际地理分布,且本研究的 AUC 值均大于 0.8,表明我们的实验结果具有较高的可靠性,能够对未来气候条件下三种槐树的潜在适宜分布进行准确预测。

4 结论

本研究证实了刺槐、短绒槐、槐三种槐树在我国潜在分布的生境差异。在当前气候下,刺槐适生区主要分布在中国的华中、华东地区,短绒槐的适生区面积较小,主要分布在中国的西南地区,而槐的适生区主要分布在中国的华中、华东、华南地区。在未来四种气候情景下,三种槐树的分布区都呈现向北方扩张的趋势,其中槐的潜在分布区面积最大,短绒槐的潜在分布区面积最小。气候因子对三种槐树的适生分布起关键作用,其中年平均温度范围、等温性是影响刺槐分布的主要环境因子;最干季均温、土壤含沙量是影响短绒槐分布的主要环境因子;最干季均温、土壤容重是影响槐分布的主要环境因子。此外,年均降水量和海拔对三种槐树的生长分布皆有影响。本研究结果可为刺槐、短绒槐、槐的种质资源保护和森林经营管理工作提供科学的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022-Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 曾子航. 全球气候变化对森林的影响与启示. 绿色中国, 2022(8): 60-63.
- [3] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365-377.
- [4] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 李润洁, 吴森焱, 王姗姗. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系. 地理科学, 2020, 40(5): 823-832.
- [5] 方利, 王文杰, 蒋卫国, 陈民, 王永, 贾凯, 李延森. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应. 地理科学, 2017, 37(11): 1745-1754.
- [6] 薛鹏飞, 宋冰, 赵英. 草地生态系统植物群落及碳交换对气候变暖的响应研究进展. 生态科学, 2023, 42(2): 257-265.
- [7] 马建国, 朱怀德, 李玉满, 杨小倩, 姚梦凡, 杨振辉, 王晓波. 土壤水分影响青藏高原东部高寒草地植物群落特征及生态系统多功能性. 生态学杂志, 2024, 43(1): 1-7.
- [8] Cantón Y, Del Barrio G, Solé-Benet A, Lázaro R. Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain. Catena, 2004, 55(3): 341-365.
- [9] 赵梓伊, 肖能文, 刘高慧, 李俊生. 五种齿突蟾在横断山南潜在地理分布预测. 生态学报, 2022, 42(7): 2636-2647.
- [10] 殷颖璇, 徐安远, 潘筱雯, 何晴, 吴银娟, 李学荣. 基于优化 MaxEnt 模型预测玫瑰蜗牛 (*Euglandina rosea*) 在中国的潜在分布区. 中国媒介生物学及控制杂志, 2023, 34(2): 137-144.
- [11] 李莎, 莫舜华, 胡兴华, 邓涛. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测濒危植物资源冷杉潜在适生区分析. 生态学杂志, 2024, 43(2): 533-541.
- [12] 魏吉珍, 马晓丽, 王世雄. 全球气候变化背景下紫苏在中国的潜在分布区预测. 青海科技, 2022, 29(5): 118-124, 160.
- [13] Khanghah S S, Moameri M, Ghorbani A, Mostafazadeh R, Biswas A. Modeling potential habitats and predicting habitat connectivity for *Leucanthemum vulgare* Lam. in northwestern rangelands of Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(2): 109.
- [14] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1993[2024-10-20]. [https://www.iplant.cn/frps/vol/42\(1\)](https://www.iplant.cn/frps/vol/42(1)).
- [15] 王尚雄, 张生鹏. 刺槐的应用价值及栽培技术探究. 农家参谋, 2022(21): 126-128.
- [16] 郑晓宇. 刺槐生长特征与栽培技术. 新农业, 2023(2): 44-46.
- [17] 郑西平, 张启翔. 北京城市园林绿化植物应用现状与展望. 中国园林, 2011, 27(5): 81-85.
- [18] Lei W X, Wang Z F, Cao M, Zhu H, Wang M, Zou Y, Han Y C, Wang D D, Zheng Z Y, Li Y, Liu B B, Ru D F. Chromosome-level genome assembly and characterization of *Sophora Japonica*. DNA Research, 2022, 29(3): dsac009.
- [19] Huang J H, Li G Q, Li J, Zhang X Q, Yan M J, Du S. Projecting the range shifts in climatically suitable habitat for Chinese Sea buckthorn under climate change scenarios. Forests, 2017, 9(1): 9.
- [20] Fan X W, Miao C Y, Duan Q Y, Shen C W, Wu Y. The performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(18): e2020jd033031.
- [21] 杨启杰, 李睿. 桫欏的潜在适生区及其变化. 应用生态学报, 2021, 32(2): 538-548.
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. Ecography, 2017,

- 40(7): 887-893.
- [23] 胡秀, 吴福川, 郭微, 刘念. 基于 MaxEnt 生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测. 林业科学, 2014, 50(5): 27-33.
- [24] 王艳君, 高泰, 石娟. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析. 北京林业大学学报, 2021, 43(9): 59-69.
- [25] 宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 韩淑梅, 钟云芳. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟. 植物生态学报, 2018, 42(9): 946-954.
- [26] 王爱君, 路东晔, 张国盛, 黄海广, 王颖, 呼斯楞, 敖民. 基于 MaxEnt 模拟欧亚大陆气候变化下叉子圆柏的潜在分布. 林业科学, 2021, 57(8): 43-55.
- [27] 高阳. 对多重共线性检测指标的一些研究[D]. 甘肃: 兰州大学, 2019.
- [28] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 李同艳, 余岚. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9033-9043.
- [29] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. Global Change Biology, 2011, 17(1): 377-389.
- [30] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [31] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [32] Wiley E O, McNyset K, Peterson T, Robins R, Stewart A. Niche modeling perspective on geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. Oceanography, 2003, 16(3): 120-127.
- [33] 施晨阳, 赖文峰, 文国卫, 蒋天雨, 朱晓如, 吕增伟, 张国防. 基于 Maxent 模型预测水曲柳的潜在适生区. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 149-156.
- [34] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1420-1428.
- [35] 高明龙, 萨如拉, 铁牛, 张丽丽. 不同气候环境的我国白桦潜在分布区预测. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 54-61, 69.
- [36] 迟晓峰, 韩琳. 对植物逆境胁迫的研究. 种子科技, 2019, 37(13): 122-124.
- [37] 董欣, 倪相. 西南地区不同海拔极端降水时空变化特征. 西南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(9): 110-121.
- [38] 张亚军, 王丽学, 陈超, 王堃. 植物对逆境的响应机制研究进展. 江西农业学报, 2011, 23(9): 60-65.
- [39] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [40] 樊信, 盘金文, 何嵩涛. 气候变化背景下基于 MaxEnt 模型的刺梨潜在适生区分布预测. 西北植物学报, 2021, 41(1): 159-167.
- [41] Qian H, Ricklefs R E. Latitude, tree species diversity and the metabolic theory of ecology. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(2): 362-365.
- [42] 郑维艳, 曹坤芳. 未来气候变化对四种木姜子地理分布的影响. 广西植物, 2020, 40(11): 1584-1594.
- [43] 邹蓉, 陈宗游, 史艳财, 孔德鑫, 韦记青, 蒋运生, 蒋莉玲. 药用植物槐树研究进展. 安徽农业科学, 2014, 42(4): 976-980.
- [44] You Q L, Cai Z Y, Wu F Y, Jiang Z H, Pepin N, Shen S S P. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. Climate Dynamics, 2021, 57(1): 17-35.
- [45] 王旻忆, 李治军. 基于 CMIP6 多模式的东北未来气候变化预估. 吉林水利, 2024(2): 1-10.
- [46] 李学武, 张京朋, 赵天保, 李福原, 赵廷宁. 我国西北地区干湿变化特征及其未来预估. 气候与环境研究, 2024, 29(1): 59-74.
- [47] 谢孟, 张学星, 罗燕, 马永鹏, 李伟, 杨琳祥, 柳文, 赵培仙, 李正红, 马宏. 基于 MaxEnt 模型的云南干热河谷适生树种选择应用. 生态学报, 2024, 44(9): 3689-3707.
- [48] 赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊. 云南干热河谷生态环境特性研究. 林业调查规划, 2006, 31(3): 114-117.
- [49] 王进, 罗光宏, 颜霞, 陈叶, 张新慧. 干旱胁迫对苦豆子种子吸胀萌发和幼苗生长的影响. 中草药, 2011, 42(9): 1807-1811.
- [50] 李明财, 朱教君, 孙一荣. 植物对气候变化生理生态响应的不确定性分析. 西北植物学报, 2009, 29(1): 207-214.
- [51] 王喜勇. 国槐在武威市城市绿化中的应用. 中国林副特产, 2022(5): 44-45.
- [52] 杨舒, 常河, 丁一鸣. 生态文明托起美丽中国梦. 光明日报, 2023(9): 2.
- [53] Kong F, Tang L, He H, Yang F X, Tao J, Wang W C. Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using Maxent. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(26): 34655-34663.
- [54] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [55] 陈禹光, 乐新贵, 陈宇涵, 程武学, 杜金贵, 钟全林, 程栋梁. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1207-1214.
- [56] Li Y C, Li M Y, Li C, Liu Z Z. Optimized maxent model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China. Forests, 2020, 11(3): 302.
- [57] Liu J M, Xu Y Y, Sun C W, Wang X, Zheng Y L, Shi S L, Chen Z, He Q Y, Weng X H, Jia L M. Distinct ecological habits and habitat responses to future climate change in three east and Southeast Asian *Sapindus* species. Forest Ecology and Management, 2022, 507(9): 119982.