

DOI: 10.5846/stxb202111103160

甘小玲, 常亚鹏, 江原, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌. 气候变化对祁连山蒙古扁桃潜在适生区的影响. 生态学报, 2023, 43(2): 768-776.

Gan X L, Chang Y P, Jiang Y, Cao F F, Zhao C Y, Li W B. Impact of climate change on potential distribution of *Amygdalus mongolica* in the Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 768-776.

气候变化对祁连山蒙古扁桃潜在适生区的影响

甘小玲, 常亚鹏, 江原, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌*

兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业教育部工程研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

摘要: 气候变化将改变物种的生存环境, 影响其分布范围, 甚至威胁到某些物种的生存。本文通过 ArcGIS 软件和最大熵 (MaxEnt) 模型模拟蒙古扁桃 (*Amygdalus mongolica*) 在祁连山当前 (1970—2000 年) 和未来 (2081—2100 年) 2 个气候时期背景下的地理分布格局, 并分析其主要的的环境影响因素。结果表明: (1) 在当前气候条件下, 蒙古扁桃在祁连山的东南部有较好的适生性; (2) 未来 4 种气候情景下 (SSP126, SSP245, SSP245 和 SSP585), 蒙古扁桃在祁连山南部及东南部的适生区有消失的风险, 扩张区主要集中在祁连山中北部的国家公园附近; (3) 蒙古扁桃的分布格局主要向祁连山北部和高纬度地区迁移; (4) 最湿月降水量 (Bio13)、坡度 (Slope)、最冷季度均温 (Bio11) 和最热月最高温 (Bio5) 的累计贡献率达到了 80% 以上, 是影响蒙古扁桃适生分布的主要因子。本研究模拟、分析、预测了当前和未来不同情景下蒙古扁桃在祁连山的潜在分布及其变化, 为祁连山生态及物种多样性的保护提供科学依据。

关键词: 气候变化; 蒙古扁桃; 最大熵模型; 适生区分布

Impact of climate change on potential distribution of *Amygdalus mongolica* in the Qilian Mountains

GAN Xiaoling, CHANG Yapeng, JIANG Yuan, CAO Fengfeng, ZHAO Chuanyan, LI Weibin*

State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystem, Ministry of Agricultural and Rural Affairs Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Education Engineering Research Center of Grassland Industry, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: Climate change can change the environmental conditions, influence the species distribution, and even threaten the viability of some species. In this paper, we simulate and predict the geographical distribution and their main environmental factors of *Amygdalus mongolica* in the past (1970—2000) and future (2081—2100) climate conditions by using ArcGIS software and MaxEnt (Maximum entropy) model. The results showed that: (1) under the past climatic conditions, *Amygdalus mongolica* had good suitability in the southeast of Qilian Mountains. (2) The suitable areas of *Amygdalus mongolic* under four climate change scenarios (SSP126, SSP245, SSP245, SSP585) had the risk of disappearance in the south and southeast of Qilian Mountains, and the expansion areas were concentrated near the national park in the north-central Qilian Mountains. (3) The distribution pattern of *Amygdalus mongolica* would migrate to the northern and high altitude areas in Qilian Mountains; (4) The contribution of the wettest monthly precipitation (Bio13), slope (Slope), the coldest seasonal average temperature (Bio11), and the maximum temperature of hottest month (Bio5) reached more than 80%, which were the main factors affecting the distribution of *Amygdalus mongolica*. The study

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC0507401); 甘肃省青年科技基金 (21JR7RA517); 优秀研究生“创新之星”项目 (2021ZXCX-138)

收稿日期: 2021-11-03; **采用日期:** 2022-05-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liweibin@lzu.edu.cn

simulated, analyzed and predicted the potential distribution changes of *Amygdalus mongolica* in Qilian Mountains under past and future scenarios, providing scientific basis for the protection of ecology and biodiversity in Qilian Mountains.

Key Words: climate change; *Amygdalus mongolica*; Maximum entropy model; suitable area distribution

近年来,全球工业化和城市化的发展已严重影响了全球气候变化的进程^[1]。有研究表明,气候变化将成为未来生物多样性最大的威胁^[2]。据估计,自 19 世纪末到 21 世纪初全球地表平均温度上升了约 0.85℃,且这种增温将持续上升^[3]。全球变暖和干旱的频繁发生是气候变化的主要形式,主要通过改变环境中的温度和水分^[4-5],干扰或破坏植物的生境,从而影响物种的空间地理分布格局^[6-7],严重时甚至危及全球生态系统的多样性和稳定性^[8]。例如,在全球气候变化的背景下,不仅全球物种的地理分布发生了明显的变化^[9-10],而且预计到 2050 年将有 15% 的物种濒临灭绝^[11]。然而,随着全球物种地理空间分布格局的加速变化,不仅会增加全球濒危物种的数量,更对现有濒危物种的生存造成严重影响^[12],进而改变生态系统的稳定性及其功能^[13]。因此,研究气候变化背景下濒危物种的地理空间分布格局变化,是理解全球物种多样性变化并对其制定保护对策的前提,对生态系统功能的评估提供理论依据。

蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)是我国二级濒危保护植物,隶属于蔷薇科李亚科桃属^[14],主要分布在我国西北部(内蒙古、甘肃以及青海)^[15],是荒漠区特有的强悍生落叶灌木;可为干旱、盐碱地、石质地提供重要的生态服务,如食物供应、防风固沙、药理学资源等^[11]。蒙古扁桃属于异花授粉,主要靠昆虫传播,由于缺乏稳定的传粉者和花粉传播距离的限制,导致其结实率较低^[14]。另外,因蒙古扁桃有坚硬的外壳,使其在自然状况下萌发率较低^[16]。加之,人类活动和气候变化的影响,极大地降低了蒙古扁桃种子在自然状态下的发芽率,使蒙古扁桃的分布范围不断缩小^[17]。因此,对蒙古扁桃响应未来气候变化的深入研究,可为蒙古扁桃的保护以及相关生态环境的稳定和恢复具有重要意义。

祁连山地处我国西北干旱脆弱区,是“一带一路”的关键节点,也是我国重要的生态安全屏障^[18]。在国家的支持下,先后启动并实施了“三北”防护林体系建设、天然林资源保护、水土保持等生态工程^[19]。蒙古扁桃作为石质地治理、保持水土又具有药用价值的荒漠景观植物,对祁连山生态建设具有重要作用^[20]。但由于全球气候变化及人为活动,使蒙古扁桃在祁连山区的生境格局发生改变^[21]。因此,利用模型预测气候变化对祁连山区蒙古扁桃的地理分布及空间格局的变化,已成为相关研究工作者关注的热点和重要区域^[15]。

生态位模型(主要有 BioClim、MaxEnt、ENFA 等)又称为物种分布模型(SDMs),是一种模拟、分析及预测濒危物种适生区地理分布的重要手段^[26]。模型的建立需要结合物种已知的分布数据与相关环境数据,并利用数学模型预测该物种未来的适生区分布^[27-28]。MaxEnt 模型在模拟、分析已知物种分布点,预测其未来适宜生境,模拟精度较高,从而被广泛应用^[29]。相比于第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)提出的典型碳排放路径(RCP),CMIP6 提出的共享社会经济路径(SSPs)^[23],在气候变化问题上同时考虑了社会经济发展模式(SSP)和典型碳排放路径(RCP),弥补了 CMIP5 中 RCP 的空白^[24-25],是目前世界气候数据库(Worldclim)所发表的最新数据。基于此,本研究结合 CMIP6 提出的四种 SSPs,选用最大熵模型,分析了当前与未来气候背景下蒙古扁桃在祁连山区的适生分布格局变化及其主要环境影响因子,从而确定蒙古扁桃栖息地退化/扩张的热点区域,为祁连山蒙古扁桃的保护及管理做出科学调整。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山(35°50'—39°19' N, 94°10'—103°04' E)位于青海省东北部、甘肃省西部,东西长 800 km,南北宽 200—400 km,处于青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的交汇处。由于地形和水热条件复杂,属于大陆性半干旱半湿润气候,年平均气温-3℃—4℃,年降水量约 400 mm 左右,年均蒸发量在 1100 mm 以下^[30]。土壤类

型主要为山地棕钙土、山地灰褐土、山地栗钙土、山地草甸土和山地草原土,局部地区为高山荒漠石质土或高山冰沼土^[31]。受地形和气候条件的影响,祁连山的植被类型丰富,主要以荒漠、草原、森林、草甸和灌丛为主^[32]。

1.2 蒙古扁桃分布数据来源

根据对祁连山区蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)种质资源的野外实地调查,结合相关文献和中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>)在祁连山及附近区域蒙古扁桃在的空间分布数据。为了增加模型输入中蒙古扁桃分布点,提高模型准确性,模型运行时涵盖了图 1 中的所有分布点(共 23 个分布位点)。

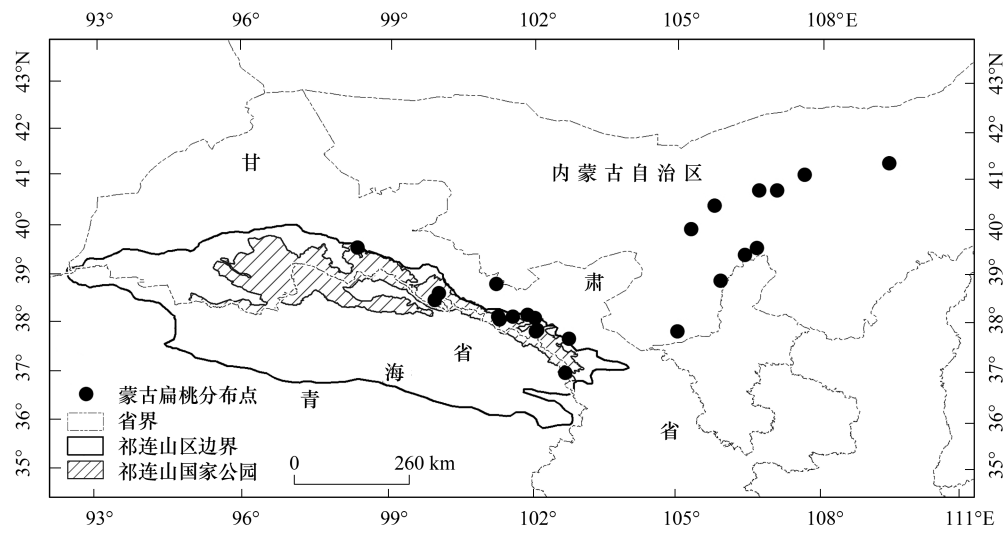


图 1 蒙古扁桃分布图
Fig.1 *Amygdalus mongolica* distribution map

1.3 气候变量的获取与筛选

当代(1970—2000 年)及未来(2081—2100)生物气候因子以及地形因子数据(表 1)均下载于世界生物气候数据集(WorldClim^[33]; <https://www.worldclim.org/>;空间分辨率为 2.5 arc-minutes)。以祁连山为研究区域,对 19 个生物气候变量和地形变量(坡度和坡向)进行相关性检验分析,若相关系数高于 0.85,认为变量之间存在相关性。再结合所选变量对蒙古扁桃的贡献率,选择较高贡献率和相关系数较低的变量^[8],最终筛选出表 1 中的 11 个环境因子。

表 1 用于模型运行的气候因子
Table 1 Climate factors in MaxEnt model

代码 Code	气候因子 climate factors	代码 Code	气候因子 climate factors	代码 Code	气候因子 climate factors
Bio2	平均温度日较差	Bio9	最干季度均温	Bio15	降雨量季节性变化
Bio3	等温性	Bio11	最冷季度均温	Slope	坡度
Bio5	最热月最高温	Bio13	最湿月降水量	Aspect	坡向
Bio7	年温变化范围	Bio14	最干月降水量		

对于未来气候数据(2081—2100 年),本研究选取了世界气候数据库所发布的 CMIP6 的低强迫(SSP126)、中等强迫(SSP245)、中等至高强度(SSP370)以及高强度(SSP585)四个共享经济路径(Shared Socio-economic Pathways)。对于每个共享经济路径,同时选取了 8 种全球气候模式(CC-CSM2-MR、CanESM5、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MIROC-ES2L 以及 MRI-ESM2-0;表 2)以分析不同气候模式模拟得到的未来气候数据对蒙古扁桃分布格局的影响。

表 2 CMIP6 中 8 种气候模式信息
Table 2 Information of 8 climate models in CMIP6

模式名称 Model name	机构 Institution	国家 Country	参考文献 Reference	模式名称 Model name	机构 Institution	国家 Country	参考文献 Reference
BCC-CSM2-MR	BBC	China	[34]	CNRM-CM6-1	CNRM	France	[36]
CanESM5	CCCma	Canada		CNRM-ESM2-1	CNRM	France	
IPSL-CM6A-LR	IPSL	France		MIROC-ES2L	MIROC	Japan	
MRI-ESM2-0	MRI	Japan	[35]				
MIROC6	MIROC						

1.4 MaxEnt 模型运行及评估

MaxEnt 通过寻找随机、不确定的已知目标熵最大值的概率分布来估计未知目标的概率分布,其结果受已知目标分布的不完全信息的约束^[37]。使用 Maxent 软件评估、预测蒙古扁桃的潜在分布,需结合蒙古扁桃已知的分布数据与相关环境变量:将分布位点和环境变量数据导入 MaxEnt 模型软件,创建响应曲线(Create response curves)并设置 75%的蒙古扁桃分布位点作为训练集,25%分布位点作为测试集,并设置 10 次重复。软件其余参数保持默认设置,采用 10 次重复的平均值作为输出结果,栅格数值以逻辑值形式给出物种的存在概率。随后,将模型输出结果导入 ArcGIS 软件中,再利用自然间断法将蒙古扁桃的适生概率进行重分类划分,共划分为 3 个等级:不适宜区(适生概率 $P < 0.3$)、次适宜区(适生概率 $0.3 \leq P < 0.5$)、为适宜区(适生概率 $0.5 \leq P < 1$)^[26]。

Maxent 模型模拟精度采用受试者工作特征曲线(ROC)进行检验,用曲线下面积(AUC)表示,AUC 值在 0—1,其值越大,表明模型预测结果的精度越高。AUC 值为 0.7—0.8 表明预测效果“一般”,为 0.8—0.9 表示预测效果“良好”,0.9—1 为表示预测效果“极好”,可以很好的预测物种适生分布^[38]。根据模型得到当前和未来不同气候情景(SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585)的 AUC 值,依次为 0.919、0.921、0.920、0.920 和 0.921,其 AUC 值均大于 0.9,说明模型预测蒙古扁桃的适生分布效果极好。

2 结果与分析

2.1 蒙古扁桃在祁连山区的潜在发生概率

从最大熵(MaxEnt)模型预测蒙古扁桃的平均潜在发生概率(图 2)可以看出,蒙古扁桃在祁连山区当前和未来不同气候情景下有较好的适宜性,其中适宜区的潜在发生率为 50%—100%,次适宜区为 30%—50%,总适宜区达 80%以上。在当前气候条件下,蒙古扁桃的适生分布区主要集中在祁连山的东南部,少量分布在祁连山北部。在未来 SSP126 和 SSP245 气候情景下,蒙古扁桃潜在适生区面积有增加的趋势;在 SSP370 和 SSP585 气候情景下,蒙古扁桃适生区面积有所减小。在各情景下,蒙古扁桃的适生区有向祁连山北部移动的趋势。

2.2 当前和未来气候变化对蒙古扁桃像元个数分布的影响

与当前适宜区的像元个数相比,蒙古扁桃在未来 4 种气候情景下适宜区的最大像元个数均有增加的趋势,其中在 SSP245 情景下达到最大(图 3);而适宜区的平均像元个数逐渐下降,且在 SSP585 情景下的平均像元个数低于当前适宜区的像元个数。在未来气候变化的背景下,蒙古扁桃次适宜区的最大像元个数和平均像元个数均有不同程度下降。除了在 SSP126 情景下少量的增加外,其他情景下均低于当前次适宜区的像元个数。

2.3 未来不同气候情景下蒙古扁桃潜在分布变化

通过比较蒙古扁桃当前和未来的次适宜、适宜分布区(图 2),我们预测了蒙古扁桃在不同 SSP 情景下的潜在变化(图 4)。具体而言,SSP126 情景下,蒙古扁桃分布的保持区主要集中在祁连山南部及北部。SSP245 情景下,保持区有所减小,扩张区有少量的增加。SSP370 和 SSP585 情景下,蒙古扁桃适生分布的保持区幅度

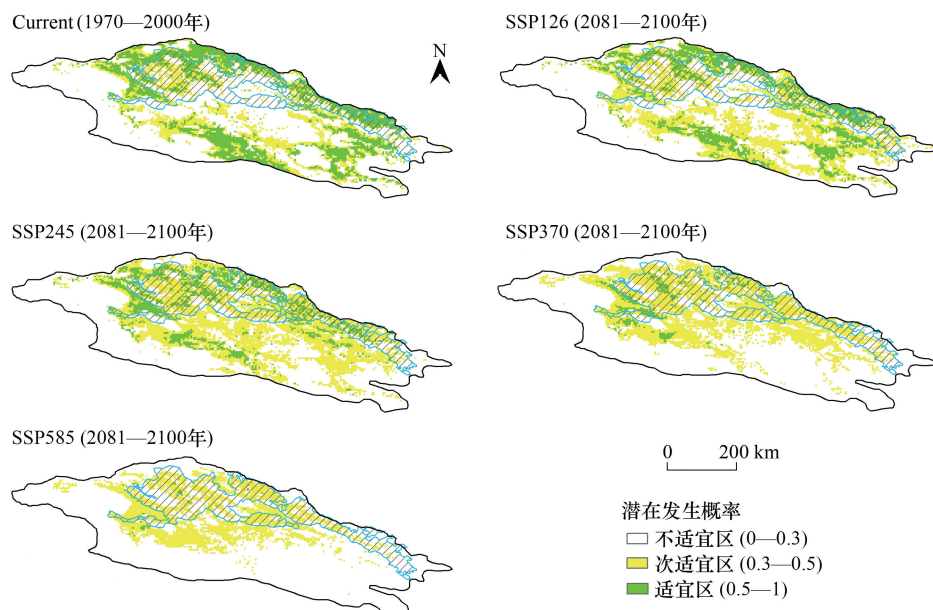


图2 蒙古扁桃在当前气候及未来不同气候情景下的平均发生概率

Fig.2 Average occurrence probability of *Amygdalus mongolica* under current and future climate scenarios

缩减,减少区明显增大。各情景下,蒙古扁桃的潜在适生分布范围表现出不同的空间变化格局(图4)。在SSP126和SSP245情景下,蒙古扁桃在祁连山北部的保持区和扩张区面积较为稳定。在SSP370和SSP585情景下,祁连山北部的适生区有减少的趋势,祁连山国家公园附近有较少的扩张趋势。这些地区将成为蒙古扁桃新的适生分布区。总之,当前气候变化下分布在祁连山南部和东南部的蒙古扁桃有消失的风险,而在祁连山中北部将有新的分布区。

2.4 8种气候模式预测蒙古扁桃在祁连山潜在分布的一致性

本研究选用CMIP6中的8种全球气候模式(CC-CSM2-MR、CanESM5、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MIROC-ES2L和MRI-ESM2-0),对未来(2081—2100年)4种SSP情景下蒙古扁桃在祁连山区的潜在分布结果进行分析。对8种模式预测的结果进行一致性检验表明,SSP126和SSP245气候情景下,8种模式预测蒙古扁桃适生区的一致性比在SSP370、SSP585气候情景下的总一致性高(图5:数值越大说明8种气候模式预测蒙古扁桃在祁连山潜在分布的不确定性越低)。另外,4种SSP情景下,蒙古扁桃在祁连山北部预测的潜在分布结果一致性较高,说明未来时期在祁连山北部蒙古扁桃的分布概率较高。

2.5 蒙古扁桃潜在适宜区分布的影响因子

通过最大熵模型对影响蒙古扁桃在祁连山区适生分布的自然环境因子进行分析,结果表明:最湿月降水量、坡度、最冷季度均温和最热月最高温的累积贡献率达到80%以上,从而推测以上4个气候因子是影响蒙古扁桃潜在分布的主要因子。其中,最湿月降水量是影响蒙古扁桃潜在分布的主导因子,贡献率为31.7%。最干月降水量、等温性、年温变化范围、降雨量季节性变化、平均温度日较差、坡向以及最干季度均温对蒙古扁桃

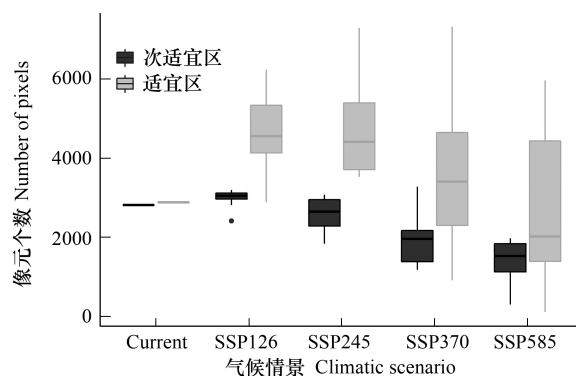


图3 祁连山区蒙古扁桃适宜与次适宜分布区在当前气候及未来不同情景下的分布像元个数

Fig.3 Number of pixels in suitable and sub-suitable distribution regions of *Amygdalus mongolica* in Qilian Mountains under current climate and future scenarios

桃适生变化的贡献率逐渐降低。

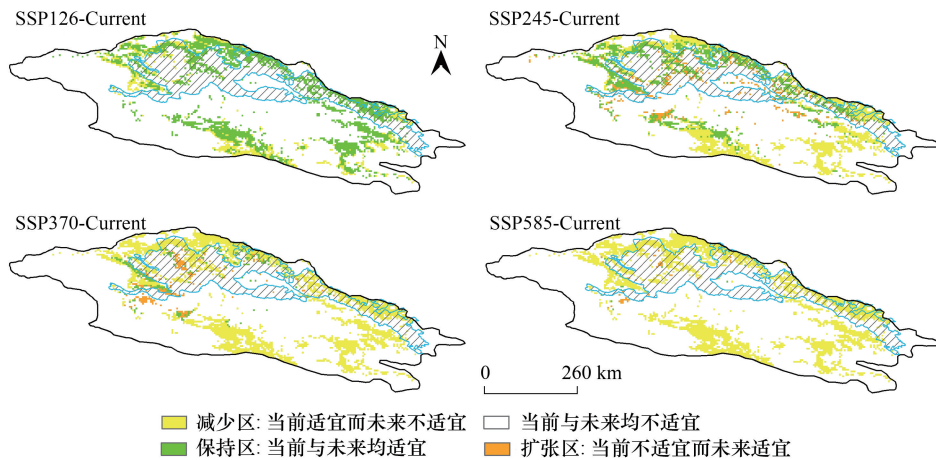


图 4 未来不同 SSP 情景下蒙古扁桃潜在适宜分布区的变化

Fig.4 Changes of potential suitable distribution area of *Amygdalus mongolica* under different SSP scenarios in the future

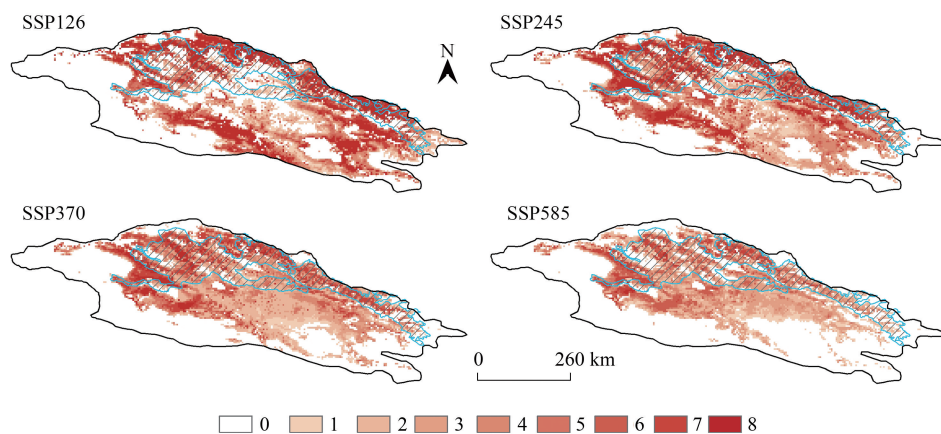


图 5 未来不同气候情景下蒙古扁桃潜在分布的共识图

Fig.5 Consensus map of potential distribution of *Amygdalus mongolica* under different climate scenarios in the future

3 讨论

气候变化对世界范围内物种的分布产生了重大影响,导致物种的分布向其他地方迁移或范围缩小,甚至威胁到了一些物种的生存^[39]。因此,利用 MaxEnt 模拟、预测物种的地理分布对生态和保护的各种应用至关重要^[40]。本研究通过最大熵(MaxEnt)模型结合生物气候变量对蒙古扁桃当前和未来不同情景下在祁连山的潜在分布进行分析,结果表明:最湿月降水量(Bio13)、坡度(Slope)、最冷季度均温(Bio11)和最热月最高温(Bio5)是影响蒙古扁桃地理分布的主要环境因子,其中最湿月降水量对蒙古扁桃分布的影响最大。另外,我们得到最冷季度均温(Bio11)和最热月最高温(Bio5)对蒙古扁桃适生分布的累计贡献率大 31.5%以上,说明温度也是影响蒙古扁桃适生分布的重要因子。邹林林^[41]等认为温度影响蒙古扁桃的适生分布,因为温度是影响蒙古扁桃种子萌发的限制因素。因此,本研究得到降水和温度是影响蒙古扁桃分布的主要环境因子。而段义忠^[8]等基于我国西北干旱区探讨了蒙古扁桃分布格局的影响因素,认为温度季节性变化(Bio4)对蒙古扁桃地理分布的影响最大,这与本研究的结果存在差异。但从累计贡献率来看,温度和水分都是影响蒙古扁桃适生分布的主要因子(段义忠等得到温度的累计贡献率为 43.2%,降水的累计贡献率为 35.8%),这与本研

究结果一致。此外,加入了地形对蒙古扁桃分布区的影响,结果表明坡度的贡献率为 20.9%,是影响蒙古扁桃适生分布的第二大环境因子,其扩张区主要集中在祁连山国家公园附近及高纬度地区,这些地区属于祁连山的缓冲地带,地形复杂,垂直落差大,以坡度形成的小气候对蒙古扁桃的生长发育和地理分布的影响较大^[42]。但蒙古扁桃的地理分布不仅受坡度、温度和水分影响,也受海拔、土壤有机质等因素的影响,这些因素可能会导致蒙古扁桃的适宜分布范围进一步缩小。因此,只利用自然环境因子对蒙古扁桃在祁连山的潜在适生区进行预测具有一定的片面性。

与当前相比, SSP126 情景下蒙古扁桃适生分布的保持区面积大(图 4),而减少区缩减最小,像元个数增

加最多(图 3)。在 SSP245 情景下,蒙古扁桃适生分布的扩张区面积最大,且 SSP370 和 SSP585 的扩张区面积逐渐减小,扩张区主要集中在祁连山国家公园附近及高纬度地区。另外,随着排放强度的增加,蒙古扁桃适生的减少区面积逐渐增大,特别在 SSP585 情景下,减少区增大的最明显,像元个数下降最快(图 3)。造成这种现象的原因可能有三种:第一,在全球气候变暖的背景下,大西洋海平面的表面温度指数增大导致祁连山区温度升高及降水总量增加^[43]。温度和水分的增加满足了祁连山区树木生长的需求,从而使其减少区缩减不明显^[44]。第二,祁连山地处我国西北,属于干旱或半干旱地区, SSP585 情景下的温度升高将加剧环境退化,如严重干旱、土地荒漠化以及水土流失^[45]。第三,高排放路径(SSP585),使祁连山区温度的上升幅度大于降雨量的上升幅度,导致其区域出现干旱^[29]。蒙古扁桃是干旱或半干旱地区的旱生植物,所以推测在 SSP585 情景下,水分与温度的比值低于该植物的生理活动范围,从而不利于蒙古扁桃生长、繁衍。在未来气候变暖情景下,升温导致的干旱胁迫会使部分区域旱生植物的生长速率降低,进而减少旱生植物的适宜性分布范围^[32]。

在研究区内,蒙古扁桃当前适生分布范围主要在祁连山的东南部(图 2),在未来气候情景下向祁连山北部移动,而在祁连山东、西部的变化较复杂(图 4)。与当前的地理分布相比,蒙古扁桃未来的潜在地理分布格局表现出向祁连山北部及高纬度地区迁移的趋势。在以往基于 MaxEnt 模型预测物种在未来气候变化下适生分布也得到类似的预测结果,如 Wang R 等^[46]探讨枸杞在中国的潜在适宜分布,发现在未来不同气候变化情景下,枸杞高适宜分布范围将向北移动;马松梅等研究气候变化对梭梭植物适宜分布,证明未来梭梭分布范围及重心可能将向西北和东北方向迁移^[47]。其原因可能是温度升高使祁连山区积雪和冰川的融化为祁连山高纬度地区提供了大量水源,导致蒙古扁桃向祁连山高纬度地区迁移^[48]。因此,推测在全球气候变暖的背景下,祁连山高纬度地区将成为蒙古扁桃热点扩张区^[26]。可根据预测蒙古扁桃迁移的热点区域,在其迁移方向上建立生态保护区,以保持蒙古扁桃栖息地的连续性,从而应对气候变化的影响。

4 结论

本研究利用 MaxEnt 模型模拟、预测了蒙古扁桃在祁连山区潜在分布,并借助 ArcGIS 软件绘制其适生区分布图。结果表明,蒙古扁桃在祁连山区的潜在发生概率达 80% 以上,其中最湿月份降水量(Bio13)、坡度(Slope)、最冷季度均温(Bio11)和最热月最高温(Bio5)是影响蒙古扁桃潜在适生分布的主要因子。在 SSP126 和 SSP245 情景下,蒙古扁桃在祁连山的适生性比 SSP370 和 SSP585 情景下的适生性高。从蒙古扁桃的空间分布格局来看,有向祁连山北部及高纬度地区迁移的趋势,而祁连山南部及东南部的适生区可能完全丧失。因此,根据蒙古扁桃当前的分布预测未来(2081—2100 年)时期的适生区分布,为其响应气候变化制定合理的保护策略,并为蒙古扁桃在祁连山扩张区的引种提供理论依据。

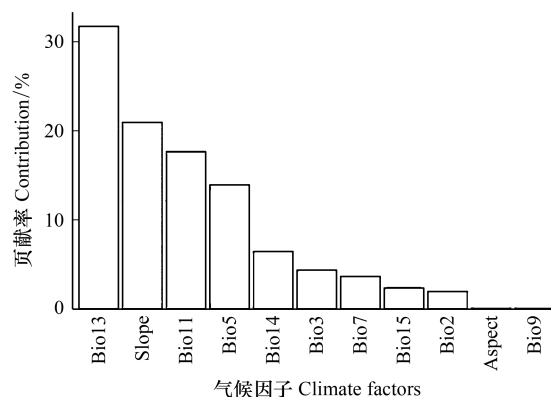


图 6 气候数据的贡献率

Fig.6 Contribution of climate data

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 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.
- [3] Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(4): RG4004.
- [4] Shrestha S, Asch F, Brueck H, Giese M, Dusserre J, Ramanantsoanirina A. Phenological responses of upland rice grown along an altitudinal gradient. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 89: 1-10.
- [5] Knapp A K, Claus B, Briske D, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 2008, 58(9): 811-821.
- [6] Lambert A M, Miller-Rushing A J, Inouye D W. Changes in snowmelt date and summer precipitation affect the flowering phenology of *Erythronium grandiflorum* (glacier lily; Liliaceae). *American Journal of Botany*, 2010, 97(9): 1431-1437.
- [7] Blach-Overgaard A, Svenning J C, Dransfield J, Greve M, Balslev H. Determinants of palm species distributions across Africa: the relative roles of climate, non-climatic environmental factors, and spatial constraints. *Ecography*, 2010, 33(2): 380-391.
- [8] 段义忠, 王佳豪, 王驰, 王海涛, 杜忠毓. 未来气候变化下西北干旱区 4 种扁桃花属植物潜在适生区分析. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2193-2204.
- [9] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [10] Beaumont L J, Hughes L, Pitman A J. Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1135-1146.
- [11] Li J Y, Chang H, Liu T, Zhang C. The potential geographical distribution of *Haloxylon* across central Asia under climate change in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 243-254.
- [12] Manish K, Telwala Y, Nautiyal D C, Pandit M K. Modelling the impacts of future climate change on plant communities in the Himalaya: a case study from eastern Himalaya, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(2): 92.
- [13] 李周园, 叶小洲, 王少鹏. 生态系统稳定性及其与生物多样性的关系. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1227-1139.
- [14] 杜巧珍, 红雨, 包贺喜图. 珍稀濒危植物蒙古扁桃研究进展. *内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版*, 2010, 39(3): 308-312.
- [15] 马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 王荣学. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 262-269.
- [16] 王进, 颜霞, 李军元, 张勇, 谢全刚, 李刚, 顾文豪. 蒙古扁桃种子雨散布及种子萌发特性研究. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 429-434.
- [17] 马松梅, 聂迎彬, 段霞, 余存生, 王荣学. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性. *生态学报*, 2015, 35(9): 2960-2966.
- [18] 马剑, 刘贤德, 金铭, 赵维俊, 敬文茂, 王荣新. 祁连山 5 种典型灌丛土壤生态化学计量特征. *西北植物学报*, 2021, 41(8): 1391-1400.
- [19] 马蓉蓉, 黄雨晗, 周伟, 周际, 白中科, 官炎俊, 郑连福, 詹培元, 杨正, 张艳. 祁连山山水林田湖草生态保护与修复的探索与实践. *生态学报*, 2019, 39(23): 8990-8997.
- [20] 王进, 颜霞, 李军元, 谢全刚, 张勇, 赵刚, 张成国. 蒙古扁桃 (*Amygdalus mongolica*) 种子萌发及幼苗生长对胁迫的响应. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 140-148.
- [21] Zhang H X, Wang Q, Wen Z B. Spatial genetic structure of *Prunus mongolica* in arid Northwestern China based on RAD sequencing data. *Diversity*, 2021, 13(8): 397.
- [22] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J F, Lowe J, Meehl G A, Moss R, Riahi K, Sanderson B M. The scenario model intercomparison project (scenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [23] Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B C, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaresma J C, Ke S, Leimbach M, Jiang L W, Kram T, Rao S, Emmerling J, Ebi K, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Da Silva L A, Smith S, Stehfest E, Bosetti V, Eom J, Gernaat D, Masui T, Rogelj J, Streffer J, Drouet L, Krey V, Luderer G, Harmsen M, Takahashi K, Baumstark L, Doelman J C, Kainuma M, Klimont Z, Marangoni G, Lotze-Campen H, Obersteiner M, Tabeau A, Tavoni M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153-168.
- [24] Tokarska K B, Stolpe M B, Sippel S, Fischer E M, Smith C J, Lehner F, Knutti R. Past warming trend constrains future warming in CMIP6

- models. *Science Advances*, 2020, 6(12): eaaz9549.
- [25] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295-302.
- [26] Peterson A T, Papeş M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 2007, 30(4): 550-560.
- [27] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 2011, 21(2): 335-342.
- [28] 张伟萍, 胡云云, 李智华, 冯雪萍, 李登武. 气候变化情景下祁连圆柏在青海省的适宜分布区预测. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2514-2524.
- [29] 贾文雄, 赵珍, 俎佳星, 陈京华, 王洁, 丁丹. 祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应. *生态学报*, 2016, 36(23): 7826-7840.
- [30] 马剑, 刘贤德, 何晓玲, 王顺利, 贺永岩, 武秀荣, 赵晶忠, 马雪娥. 祁连山典型灌丛群落结构特征及其多样性研究. *干旱区地理*, 2021, 44(5): 1427-1437.
- [31] 金敏艳, 李进军, 车宗玺, 王放, 张军周, 勾晓华. 祁连山中部祁连圆柏年内径向生长对气候因子的响应. *生态学报*, 2020, 40(21): 7699-7708.
- [32] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1 - km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [33] Wang B, Jin C H, Liu J. Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. *Journal of Climate*, 2020, 33(15): 6471-6489.
- [34] Martinez A, Iglesias G. Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. *Science of the Total Environment*, 2021, 806: 150580.
- [35] Zhang S B, Chen J. Uncertainty in projection of climate extremes: a comparison of CMIP5 and CMIP6. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(4): 646-662.
- [36] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [37] Rong Z L, Zhao C Y, Liu J J, Gao Y F, Zang F, Guo Z X, Mao Y H, Wang L. Modeling the effect of climate change on the potential distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia* Kom.) in Qilian Mountains. *Forests*, 2019, 10(1): 62.
- [38] Velásquez-Tibatúa J, Salaman P, Graham C H. Effects of climate change on species distribution, community structure, and conservation of birds in protected areas in Colombia. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(2): 235-248.
- [39] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [40] 邹林林, 红雨, 任国学. 濒危植物蒙古扁桃和柄扁桃种子萌发率和幼苗生长比较研究. *内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版*, 2008, 37(6): 791-794.
- [41] 逯颖, 王涛, 田阳. 秦岭山地森林植被变化及对气候响应的地形影响. *江苏农业科学*, 2018, 46(1): 214-218.
- [42] 温煜华, 吕越敏, 李宗省. 近 60a 祁连山极端降水变化研究. *干旱区地理*, 2021, 44(5): 1199-1212.
- [43] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 邵雪梅, 喻树龙, 陈峰, 张同文, 尚华明, 范子昂. 不同生境和去趋势方法下的祁连圆柏径向生长对气候的响应. *生态学报*, 2013, 33(24): 7827-7837.
- [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: 17-35.
- [45] Wang R L, Yang H, Wang M T, Zhang Z, Huang T T, Wen G, Li Q. Predictions of potential geographical distribution of *Diaphorina citri* (Kuwayama) in China under climate change scenarios. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9202.
- [46] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [47] Chen Y N, Li W H, Deng H J, Fang G H, Li Z. Changes in central Asia's water tower: past, present and future. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35458.