

DOI: 10.5846/stxb202008282244

张丹, 刘凯军, 马松梅, 魏博, 王春成, 闫涵. 高山植物天山花楸的适宜分布及其环境驱动因子. 生态学报, 2022, 42(2): 700-709.

Zhang D, Liu K J, Ma S M, Wei B, Wang C C, Yan H. The suitable distribution of alpine plant *Sorbus tianschanica* and its environmental driving factors. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 700-709.

高山植物天山花楸的适宜分布及其环境驱动因子

张 丹¹, 刘凯军², 马松梅^{3,*}, 魏 博¹, 王春成¹, 闫 涵³

1 石河子大学生命科学学院, 石河子 832000

2 内蒙古乌拉特后旗林业和草原局, 巴彦淖尔 015000

3 石河子大学理学院, 石河子 832000

摘要: 气候变化是影响物种分布的决定性因素之一, 研究高山植物天山花楸的适宜分布及其对未来气候变化的可能响应, 为了解西北地区高山植物类群的生态适宜性及其对未来气候情景的响应提供参考案例。利用天山花楸 51 个自然分布点和 10 个环境因子, 整合 GIS 空间分析和 MAXENT 模型, 分析基准气候 (1970—2000) 及未来气候下 (2050 时段, 基于 RCP4.5 情景) 其在西北地区的适宜分布范围与空间分布特征。利用多元环境相似度和最不相似变量分析研究区未来气候相比基准气候的波动情况, 利用环境变量贡献值、置换重要性值及刀切法明晰影响天山花楸分布的关键环境因子。利用 GIS 工具和 R 软件 ggplot2 程序包分析基准和未来气候下天山花楸适宜分布区内关键因子变化的数值范围。研究表明: (1) 基准气候下, 天山花楸的适宜面积占研究区总面积的 13%, 主要集中在阿尔泰山西段、准噶尔西部山地、天山西段及祁连山中段的高海拔山地等区域; (2) 加入归一化植被指数显著提高了天山花楸模型模拟的准确性, 最干月降水量 (0—18mm)、最湿月降水量 (6—127mm) 和平均气温日较差 (8.2—16.3℃) 主要限制了天山花楸的适宜分布; (3) 相对基准气候, 2050 时段下受降水因子影响, 天山花楸的适宜分布在阿尔泰山、准噶尔西部山地、天山及祁连山区域略有扩增, 适宜分布区的质心将向北迁移。本研究的结果表明天山花楸在西北地区的适宜生境面积较小而且破碎, 在未来气候情景下仅在局部适宜山地呈破碎化扩张, 而且将预测的该植物的适宜分布区与其适宜的海拔数值范围叠合分析后, 仅占研究区面积的 4%, 但对该植物尚未建立自然保护区, 本研究结果建议将阿尔泰山西段、准噶尔西部山地、天山西段及祁连山中段作为天山花楸中风险保护区域, 将河西走廊东部、青海南山作为高风险保护区域。

关键词: 天山花楸; 适宜分布; 驱动因子; 未来气候变化; 保护风险评估

The suitable distribution of alpine plant *Sorbus tianschanica* and its environmental driving factors

ZHANG Dan¹, LIU Kaijun², MA Songmei^{3,*}, WEI Bo¹, WANG Chuncheng¹, YAN Han³

1 College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2 Inner Mongolia Urad Rear Banner Forestry and Grassland Bureau, Bayannaoer 015000, China

3 College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract: Climate change is one of the key factors affecting species distribution. In order to understand the ecological suitability of alpine plant in taxa Northwest China and their responses to future climate scenarios, the suitable distribution of *Sorbus tianschanica* and its possible response to future climate change were studied. In this study, 51 natural distribution sites and 10 environmental factors of *Sorbus tianschanica* were used to integrate GIS spatial analysis and MAXENT model to analyze the suitable distribution area and spatial characteristics of *Sorbus tianschanica* in Northwest China under baseline climate (1970—2000) and future climate (2050 period, based on RCP 4.5 scenario). Based on the multivariate

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561007, 41261011); 草原生态修复治理补助项目 (XJCYZZ202007)

收稿日期: 2020-08-28; **网络出版日期:** 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shzmsm@126.com

environmental similarity surface and the least similar variables, the future climate fluctuations in the study area compared with the baseline climate were analyzed. The key environmental factors affecting the distribution of *Sorbus tianschanica* were identified by integrating the contribution value of environmental variables, the replacement importance value and the knife cutting method. GIS tools and R software ggplot2 package were integrated to analyze the numerical range of the changes of key factors in the suitable distribution area of *Sorbus tianschanica* in the future climate. The results show that: (1) under the baseline climate, the suitable area of *Sorbus tianschanica* accounts for 13% of the total area of the study area, which is concentrated in the western part of Altay, the western part of Junggar, the middle and western part of Tianshan, Bogda Mountain, Qilian Mountain, South Mountain of Qinghai, and parts of Pamir Plateau and north part of Karakoram Mountain; (2) The accuracy of the model simulation is significantly improved by adding the Normalized Vegetation Index. The distribution of *Sorbus tianschanica* is mainly limited by the driest monthly precipitation, the wettest monthly precipitation, and the daily range of average temperature. Regarding the suitable distribution range, the driest monthly precipitation is 0—18 mm, the wettest monthly precipitation is 6—127 mm, and the daily range of average temperature is 8.2—16.3 °C; (3) Compared with the baseline climate, influenced by precipitation factors in 2050, the suitable distribution of *Sorbus tianschanica* in Altai Mountain, western Junggar Mountain, Tianshan Mountain, and Qilian Mountain will expand slightly, and the center of mass of suitable distribution area will move northward. The results of the study show that the suitable habitat area of *Sorbus mandshurica* in Northwest China is small and fragmented. In the future climate scenario, only the local suitable mountains will be fragmented and expanded. The predicted suitable distribution area of *Sorbus tianschanica* and its suitable altitude range only account for 4% of the study area. However, there is no nature reserve for this plant. It is suggested that the western part of Altay, the western part of Junggar, the western part of Tianshan Mountain and the middle part of Qilian Mountain should be taken as the risk protection areas of *Sorbus tianschanica*, and the eastern part of Hexi Corridor and the southern mountain of Qinghai should be taken as the high risk protection areas. The suitable and most suitable distribution area of the plant predicted in this study is helpful to guide the protection of the *Sorbus tianschanica*.

Key Words: *Sorbus tianschanica*; suitable distribution; driving factors; future climate change; protection risk assessment

受气候变化及人类活动的影响,生物多样性的丧失已成为全球面临的最严重的问题之一,尤其是对扩散能力及对气候变化的适应均有限的植物类群^[1],未来气候变化将进一步加剧这些类群的灭绝风险^[2]。目前气候的持续变暖,导致环境因子发生不同程度的改变,引起植物种群作出不同变化或响应^[3-4]。相比低海拔地区,分布于高海拔区域的植物响应更为强烈,如珙桐、附子、油松等,由于温度升高、融雪提前、导致这些植物(珙桐、附子、油松)生长、授粉和繁殖的时间发生变化,生态位发生显著变化,自然分布面积急速缩减,并且表现出向高纬度区域迁移的趋势^[5-7]。高山植物类群对气候变化的不同响应模式,将引起高山生态系统的物种组成和群落结构发生改变,导致区域高山本土植物或特有植物种群消失或消亡。因此,本研究探究西北地区高山植物的生态适宜性及对未来气候变化情景的可能响应,将指导区域高山植物多样性的科学管理与保护。

近些年,随着气候变化情景的深入研究以及地理信息系统(GIS)技术的飞速发展,利用物种分布模型预测不同生物类群在气候变化情景下的适宜生境变化成为解决景观生态学和保护生态学相关热点问题的主要途径之一。物种分布模型(SDMs),基于物种已知分布点和环境因子数据模拟和预测物种在地理空间的分布状况^[8-9],已经成功地应用于生态学、生物地理学、生物多样性保护等领域^[10-11]。目前,被广泛应用的物种分布模型主要有:最大熵模型(MAXENT)、广义线性模型(GLM)、广义加性模型(GAM)、多元自适应回归样条(MARS)、随机森林(RF)等。其中,最大熵采用机器学习算法,是目前最流行的建模方法之一,相比其它物种分布模型,该方法已经被许多研究证实具有较优秀的预测能力和精度^[12-13]。近些年,MAXENT模型与GIS技术结合对很多高山植物开展了未来气候情景下适宜分布区变化的预测,表现出较强的预测准确性与空间表现力,预测结果对高山地区生物多样性的保护具有重要的指导意义^[14-15]。

天山花楸(*Sorbus tianschanica*),蔷薇科(Rosacea),花楸属(*Sorbus*),落叶灌木或小乔木,常生于海拔2000—3200米的高山溪谷或云杉林边缘^[16]。在我国,天山花楸的自然分布主要集中在新疆阿尔泰山、天山以及青海与甘肃高海拔区域的针阔叶林下、林缘^[17]。天山花楸是极具发展前景的高山植物,具有良好的观赏、

药用、经济、生态及科研价值。但是,近些年,由于过量采伐以及种子萌发受限等原因,该植物在森林的比重中大幅降低^[18],原生地生境破碎化严重,资源量显著下降,亟待保护。但是,目前对天山花楸已开展的研究主要体现在化学成分提取、种子育苗栽培等方面^[19–20]。该植物在我国西北地区的生态适宜性、适宜分布特征及其环境驱动机制都并不清楚,成为限制天山花楸资源利用和科学保护的瓶颈。

因此,本研究利用天山花楸的地理分布信息和相关环境数据,基于 MAXENT 模型、GIS 工具、R 程序包,利用统计学和空间统计学方法分析不同气候情境下天山花楸在我国西北地区的适宜分布。主要解决以下科学问题:(1)不同气候情景下,天山花楸在我国西北地区的适宜分布范围与空间分布特征;(2)限制天山花楸分布的关键驱动因子;(3)天山花楸的生态适宜性及其对未来气候变化情景的可能响应。

1 数据与方法

1.1 分布数据来源与处理

本研究通过检索中国数字植物标本馆、全球生物多样性信息网络结合已发表文献^[21–22],共获得 212 个天山花楸的自然分布点。通过 BIGMAP 地图下载器和中国地名录确定详细地理坐标,基于 R 中的 raster 和 biomod2 程序包进一步剔除重复和模糊的分布点,矫正分布点偏差。最终,获得 51 条分布记录用于模型的模拟,覆盖了该植物在新疆、甘肃和青海的自然分布范围(图 1)。

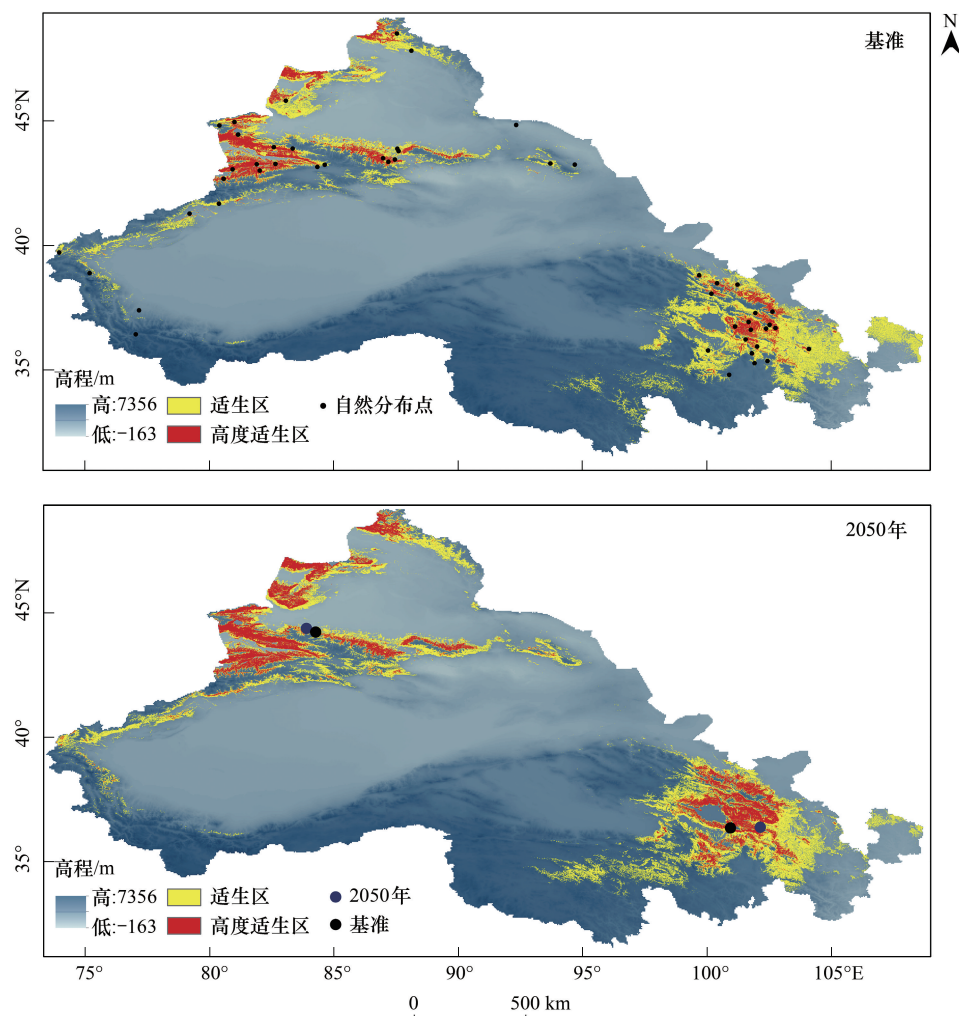


图 1 MAXENT 模型预测的天山花楸的适宜分布区

Fig.1 Suitable distributions areas of *Sorbus tianschanica* predicted by MAXENT model

1.2 环境数据来源与处理

本研究中,19 个气候因子来源于 IPCC 生物气候数据集(<http://www.worldclim.org>)。选取 2050 时段 CCSM4 模型的气候数据。该模式包括 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 四种排放情景,本研究选择中等排放情景(RCP4.5)。坡度、坡向利用 ArcGIS 软件空间分析工具从中国科学院地理空间数据云平台提供的数字高程模型(DEM)中提取。归一化植被指数(NDVI)数据采用平均后的中国科学院地理空间数据云平台提供的所有中国地区 500m 分辨率月值。模型模拟使用的中国省级行政区划底图来源于国家基础地理信息系统网站。

考虑空间环境变量对物种的限制作用,降低变量的空间纬度避免过拟合现象,运用 R 中的 Hmisc 程序包对 23 个环境因子进行 Pearson 相关性分析^[23]。剔除相关性高(>80%)的变量,最终得到 10 个环境因子,包括 7 个气候因子:平均气温日较差(Bio2)、温度季节性变化标准差(Bio4)、最冷月最低气温(Bio6)、最干季平均气温(Bio9)、最湿月降水量(Bio13)、最干月降水量(Bio14)、降水量季节性变化(Bio15);2 个地势因子:坡度、坡向以及 1 个植被因子:NDVI。根据研究区域,利用 ArcGIS 裁剪环境图层数据,用于后续模型的模拟分析。

1.3 模型构建及环境因子分析

MAXENT 模型构建过程中,随机选取 75% 的分布点作为训练模型,剩余 25% 的分布点用于验证模型,进行 10 次重复^[24]。为了方便模型模拟结果的可视化表达,参照已发表的文献^[25],利用 ArcGIS 空间分析工具计算所有分布点在潜在分布图上的适宜性,并计算这些值的标准差 σ 和平均值 μ ,选择 $p = \sigma - \mu$ 作为阈值,区分“适生区”和“不适生区”;选择 $p = \sigma + \mu$ 作为阈值,区分“适生区”和“高度适生区”。进一步明确未来气候变化下天山花楸适宜分布区的迁移趋势,利用 ArcGIS 计算不同气候下该植物适宜分布区的质心。

利用 MAXENT 模型生成的环境变量贡献率和置换重要值分析各环境因子对模型模拟的贡献以及模型对各环境因子的依赖;利用刀切法(Jackknife)分析各环境因子在建立模型时的重要性^[26]。利用 ArcGIS 提取裁剪后环境图层数据,得到上述 7 个气候因子的生态位参数,并通过 R 的 ggplot2 程序包绘制核密度图,量化分析。

1.4 多元环境相似度面和最不相似变量分析

利用多元环境相似度面(MESS)和最不相似变量(MoD)分析未来时段相比基准时段研究区的气候变化及其主要变化因子。利用 MAXENT.jar 文件中的 density.tools.Novel 工具计算基准与 2050 时段研究区内 7 个气候因子的相似度(S),得到多元环境相似度面(MESS)。当 S 值为正值时, S 值越小表示该区域的气候因子的差异越大, S 值为 100.00 时,表示没有差异;当 S 值为负值时,表示该区域至少有 1 个气候因子的不相似度超出了参考范围,该区域的环境差异极大^[27]。同时,提取相似度最低的气候因子,得到最不相似变量(MoD),用 ArcGIS 进行可视化处理。

2 研究结果与分析

2.1 天山花楸的适宜分布及其对未来气候变化的响应

基准及 2050 气候情境下,天山花楸预测模型的 AUC 值分别为 0.9336 和 0.938,表明模型模拟效果较准确。基准气候下,天山花楸的适宜分布较破碎,占研究区总面积的 13%,适宜分布集中于高山及高海拔区域。基于本研究的阈值划分原则,将研究区划分为不适生区(0—0.279)、适生区(0.279—0.734)和高度适生区(0.734—1)。具体看,在新疆,天山花楸的适生区主要分布于阿尔泰山中西段、准噶尔西部山地、天山中西段、博格达山以及帕米尔高原和喀喇昆仑山北段的片段化区域;在甘肃和青海,该植物集中分布于河西走廊中东部、祁连山以及南山。其中,高度适生区均为较小的破碎斑块,占研究区总面积的 2.39%,分布于新疆阿尔泰山西段、准噶尔西部山地、天山西段及祁连山中段(图 1)。

2050 时段,天山花楸的适宜分布范围相比基准气候将略微增加(3.65%),将在阿尔泰山中段、准噶尔西部山地、天山中西段及祁连山中段扩增,且整体适宜分布呈向北迁移趋势。具体表现为:该植物在其适宜区北

部的阿尔泰山及准噶尔西部山地的面积明显增加,而在适宜区南部河西走廊东部的面积显著减少。此外,天山花楸在 新疆的适生区将向西北方向迁移;在甘肃和青海的适生区将向东北方向迁移。(图 1)。

2.2 研究区的气候波动及影响天山花楸的关键因子分析

多元环境相似度面显示,2050 时段比基准气候研究区绝大部分地区的气候波动较明显,气候因子相似度 低于 20 的区域占研究区总面积的 72%。2050 时段相比基准气候,准噶尔西部山地、天山西段、塔里木盆地东 南部均表现出强烈的气候波动,气候因子相似度均低于 0(图 2)。天山花楸的已知分布区域也表现出明显的 气候波动,气候因子的平均相似度为 17。最不相似变量显示,最冷月最低气温、温度季节性变化标准差和降水量 季节性变化将发生显著变化,是造成研究区内 67%的区域发生气候波动的主要因子(图 2)。最干月降水量、最湿 月降水量、平均气温日较差和温度季节性变化标准差是影响天山花楸 82%的分布点气候波动的主要因子。

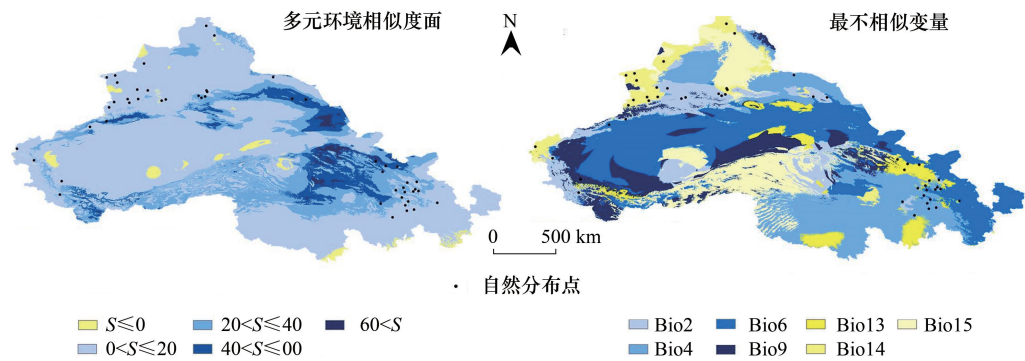


图 2 2050 时段与基准气候下影响天山花楸分布的 7 个气候因子的多元环境相似度面和最不相似变量

Fig.2 Analysis on multivariate environmental similarity surface and most dissimilar variable of the study area of seven climatic factors in 2050 and baseline climate

2.3 影响天山花楸分布的驱动因子及其变化范围

MAXENT 模拟结果显示,最干月降水量、最湿月降水量和平均气温日较差是影响天山花楸适宜分布的关 键驱动因子。用于模型模拟的 10 个环境因子中,归一化植被指数、最干月降水量和最湿月降水量对模型的 贡献较大,累积贡献率达 71.7%。置换重要性值的结果表明,模型对归一化植被指数、最干月降水量和坡向的依 赖性更强(表 1)。刀切法检验结果也表明(图 3):归一化植被指数对天山花楸模型模拟结果的影响较大;降 水因子(bio13、bio14、bio15)在正则化训练增益、测试增益及受试者工作特征曲线下面积的贡献都高于气温因 子(bio2、bio4、bio6、bio9)。其中,降水因子的最湿月降水量贡献最高,气温因子的平均气温日较差贡献最高; 地势因子中,坡度对模型的重要性较高,表明这些因子对天山花楸适宜分布的模拟结果影响较大。

表 1 最大熵模型模拟的各环境因子的贡献率及其置换重要值

Table1 Contribution rate and replacement value of each environmental factor in MAXENT modeling					
环境因子 Environmental factors	贡献率/% Contribution rate	置换重要值/% Replacement importance value	环境因子 Environmental factors	贡献率/% Contribution rate	置换重要值/% Replacement importance value
归一化植被指数 NDVI	43.4	33.8	温度季节性变化标准差 Bio4	4.5	5.4
最干月降水量 Bio14	15.5	32.8	坡向 Aspect	3.3	8.5
最湿月降水量 Bio13	12.8	5.5	降水量季节性变化 Bio15	1.8	5.1
坡度 Slope	11.8	4.8	平均气温日较差 Bio2	0.5	1.5
最冷月最低气温 Bio6	6.3	1.6	最干季平均气温 Bio9	0.1	0.8

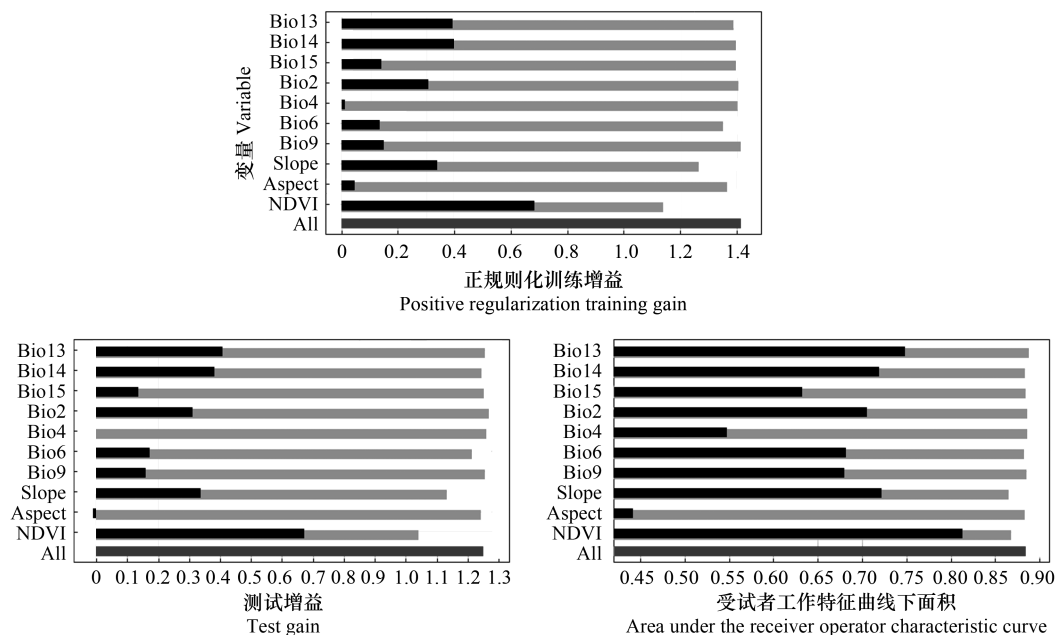


图 3 用于 MAXENT 模型预测的 10 个环境变量的刀切法检验结果

Fig.3 Jackknife test results of 10 environmental variables used for MAXENT model

黑色、浅灰色和深灰色条形图分别表示使用某一生物气候变量、排除某一生物气候变量和使用所有生物气候变量的 MAXENT 模型预测结果

天山花楸适宜分布区 7 个关键气候因子的数值范围(图 4)分析结果表明:基准气候下,天山花楸适宜分布区气候因子的数值范围为:最湿月降水量 6—127mm;最干月降水量 0—18mm;气温日较差 8.2—16.3℃。2050 时段,相对基准气候,天山花楸适宜分布区的降水量明显增加,极端气温因子将略有升高,最干季平均气温和最冷月最低气温将分别上升 0.7℃和 0.15℃。

3 讨论

3.1 天山花楸的适宜分布及其驱动因子

本研究表明,基准气候下,天山花楸的适宜分布面积较小且破碎,主要集中在阿尔泰山西段、准噶尔西部山地、天山西段及祁连山中段的高海拔山地区域(图 1),这与天山花楸主要分布于高山高海拔区域的记载相符^[28]。其中,模型模拟的天山花楸在甘肃祁连山东中段区域具有高度适生生境,文献记载也表明该植物在祁连山东中段具有大片的天然分布^[29]。相关研究表明天山花楸在天山一带未发现纯林,均与天山野苹果、天山云杉等植物混生,天山野苹果与天山云杉常分布于天山北麓的西坡、北坡、西北坡以及昆仑山北坡^[30],而本研究的模型识别出该植物在上述区域均具有适宜和高度适宜分布,说明本研究模型的预测具有较高的准确性。

本研究的环境因子分析均表明 NDVI 对天山花楸模型的模拟结果影响较大,响应曲线表明植被指数与模拟的适生程度存在显著正相关关系(图 5)。本研究模型构建时加入 NDVI,显著提升了模型的模拟精度和空间表现,模型识别的适宜分布区的关键气候变量的数值范围相比未考虑该因子的模拟结果更接近该植物实际的分布条件^[31]。相关研究表明植被遥感数据在区域尺度上能显示出较高的空间异质性,和气候变量结合能大大提高生态位模型的应用效果^[32]。此外,本研究模拟中加入坡度因子也进一步提高了天山花楸模型模拟的识别度(表 1),这可能是因为地形起伏造成的小生境异质性进一步区分了研究区环境的异质性,使获得的模型模拟结果更加精细、破碎。土壤因子、地形因子等非生物因子的加入也被表明能提高环境异质性,从而提升模型对植物类群模拟的准确度^[33]。

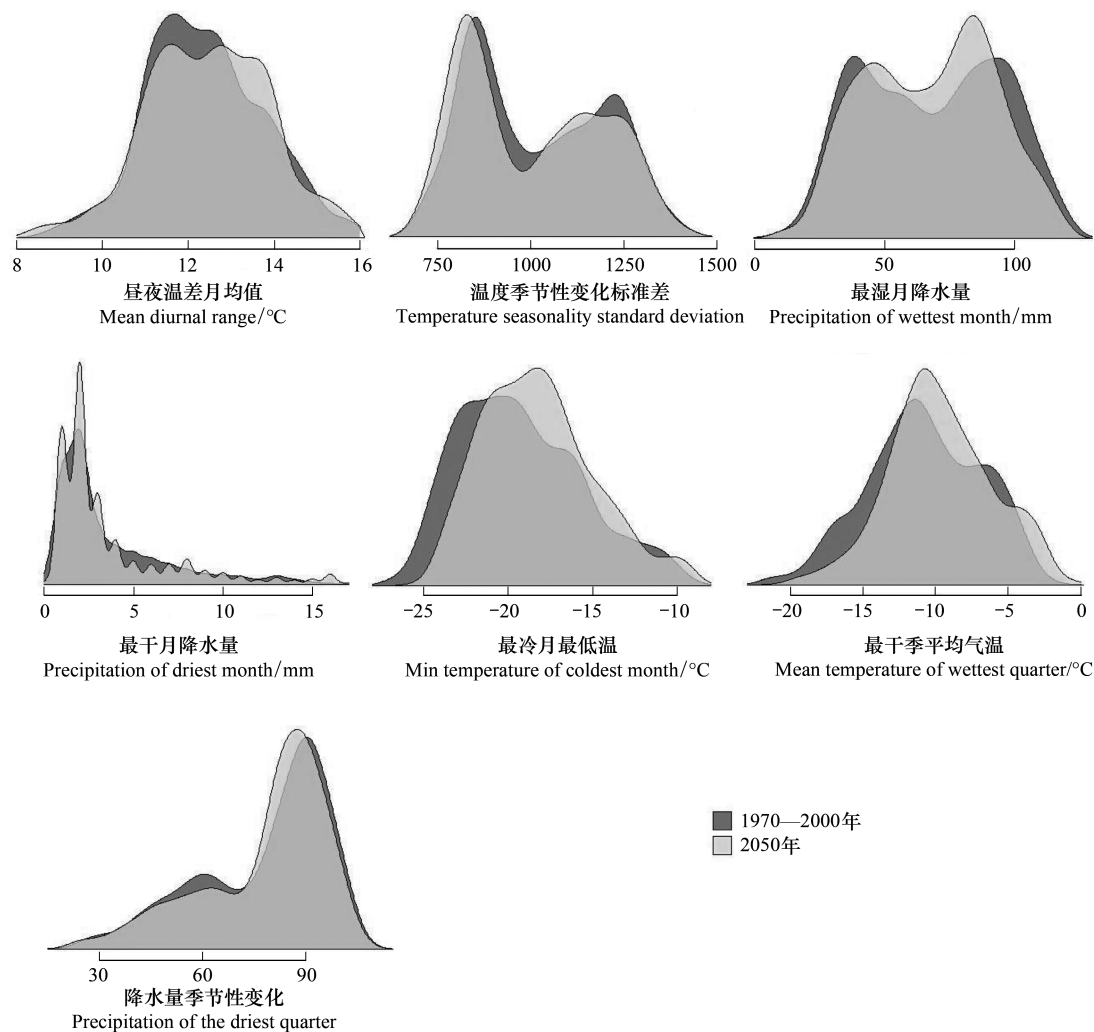


图4 影响天山花楸分布的7个气候变量的数值范围变化

Fig.4 Numerical range variation of 7 climate variables of *Sorbus tianschanica*

本研究表明主要限制天山花楸适宜分布的气候因子为降水条件(表1、图3)。这与天山花楸自身的生物学特性有关,天山花楸属浅根系树种,根系多分布在0.3—0.6m的土层内,不能深入土层汲取水分,且叶片具皮孔,水分蒸腾快,不能很好地储存水分^[34—35]。相关文献记载,天山花楸分布的生境多集中于永久性或季节性流水的小溪旁,对含水量低的环境适应能力较差^[36]。此外,天山花楸面积扩增区域的最不相似变量也为降水因子,且核密度图显示最干月降水量和最湿月降水量明显增加(图4),表明降水量的增加利于天山花楸适宜分布区的局部扩展,如准噶尔西部山地,祁连山中段由于2050时段降水量的增加高度适生区显著扩张。这可能由于西北地区作为全球同纬度最干旱的地区之一^[37],降水因子也是影响该地区植物生长的主要环境因素。此外,温度因子对天山花楸的局部适宜生境也有一定的影响,累积贡献率达11.4%,如天山花楸在天山、河西走廊、帕米尔高原的片段化适宜分布区的温度2050时段将明显升高(图2、图4),将导致该植物在天山北坡中段、河西走廊东部及帕米尔高原中段区域的适宜分布进一步破碎、减少。

3.2 天山花楸对未来气候变化的可能响应

2050时段,天山花楸的适宜分布将向高纬度高海拔地区迁移,适生范围仅在局部高海拔山地:阿尔泰山及准噶尔西部山地、天山及祁连山区略有扩展,这可能与未来气候下降水将在中亚北部地区略有增加有关^[38]。在气候变化背景下,北半球大多数高山植物的分布区将发生迁移,如:对美国东北部134种乔木树种

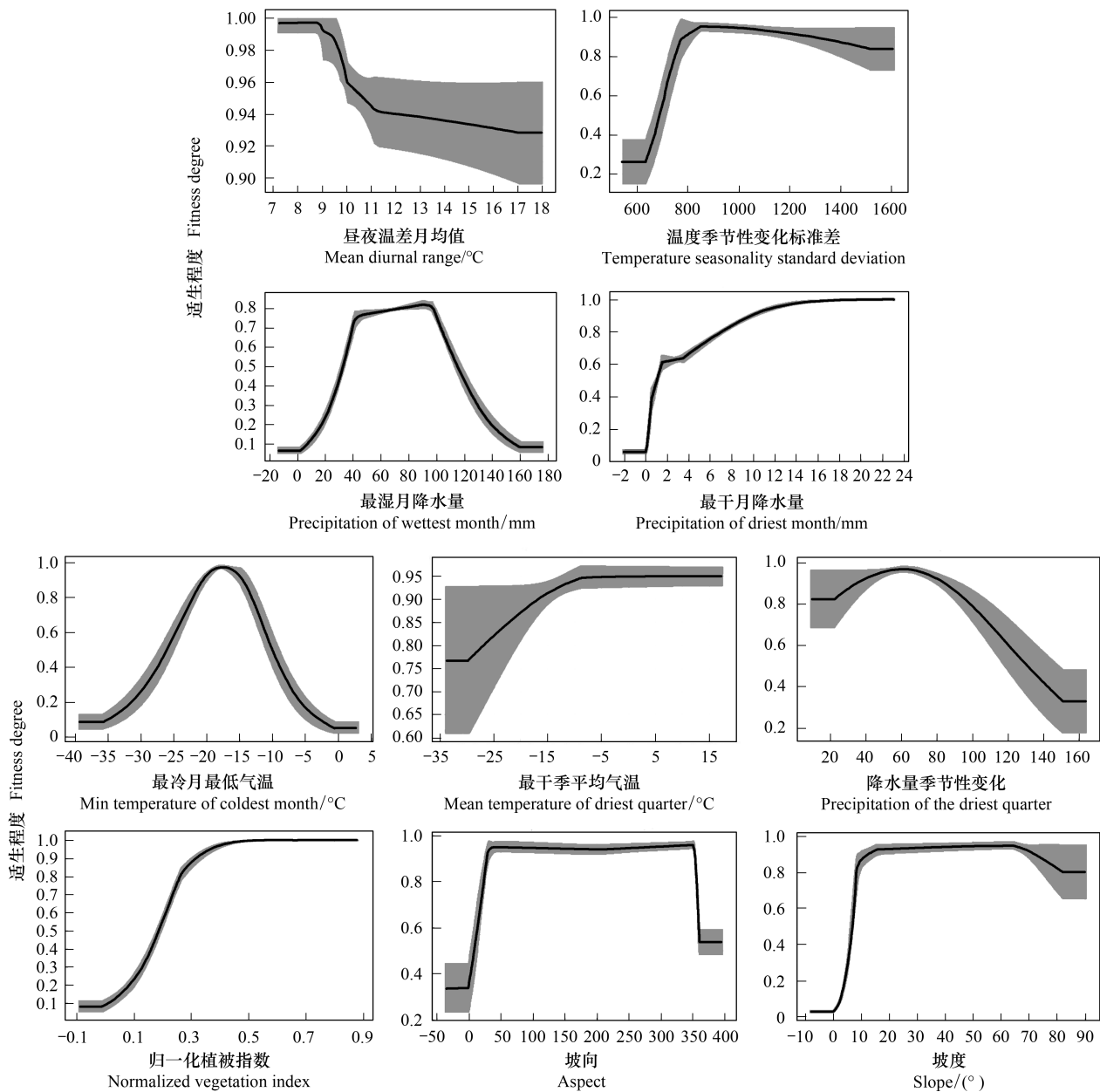


图 5 10 个环境变量的响应曲线

Fig.5 Response curves of 10 environmental variables

的适宜分布的研究结果表明,受未来气候变化的影响,超过 3/4 的物种的适生区将向北迁移^[39];运用响应面曲线分析的未来气候变化情景下美国西北部乔木和灌木类群不仅向高纬度和高海拔地区扩散,还将向多个方向迁移^[40]。

预测天山花楸对未来气候变化的可能响应,能够有针对性的对其进行保护。本研究的结果表明未来气候情景下天山花楸适生分布区的面积有少量增加,但物种的实际分布受到多种因子的制约,实际增加面积未必能达到模型的预测值。此外,将获得的该植物的适宜分布区与其适宜分布的海拔范围(2000—3200m)叠合、残余分析后的适生区更加破碎,适宜面积和高度适宜面积仅占研究区总面积的 4%和 0.84%(图 5)。然而,目前,天山花楸植物资源十分稀少,需要通过人工繁育扩大种植数量,才能满足药用资源、城市绿化等的需要,且天山花楸原生地无纯林,多年生老树周围也极少发现幼树,属于萌发困难、更新能力较差的树种^[41],加之被过

度采挖,天山花楸自然资源量正迅速下降。尽管如此,天山花楸目前尚未存在自然保护区,仅在祁连山地区有研究者引种栽培,但天山花楸的自然分布大多集中在新疆天山。因此,为保护该植物资源,本研究建议将模型识别的天山花楸在阿尔泰山西段、准噶尔西部山地、天山西段及祁连山中段的适宜分布区,都应作为保护与管理的重点区域。并且,该物种在河西走廊东部、青海南山的高度适宜区在 2050 时段气候情景下将显著减少,这些敏感性区域更应作为对该植物进行保护的高风险区域,很有必要开展原地和异地保护。因此,本研究模拟预测的天山花楸的适宜分布区及其生态适宜性变化直接服务于该植物资源的科学管理和保护,也利于高山区域的生态修复。

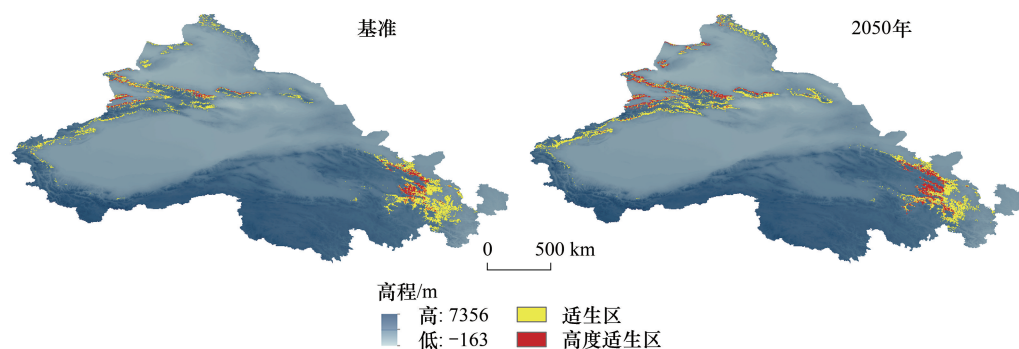


图 6 天山花楸海拔范围 2000—3200m 范围内的适生区与高度适生区

Fig.6 The suitable areas and height suitable area of *Sorbus tianschanica* within the altitude range of 2000—3200m

参考文献 (References):

- [1] 马克平, 钱迎倩. 生物多样性保护及其研究进展[综述]. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1): 95-99.
- [2] 薛达元. 《生物多样性公约》新里程碑: 《名古屋 ABS 议定书》(下). 环境保护, 2010(24): 76-78.
- [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] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.
- [5] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学报, 2019, 38(4): 1230-1237.
- [6] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [7] 闫宇航, 岑云峰, 张鹏岩, 张宇, 刘欣, 李仓宇, 徐翔. 基于 MaxEnt 模型的中国马尾松分布格局及未来变化. 生态学报, 2019, 38(9): 2896-2901.
- [8] Araújo M B, Peterson A T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. Ecology, 2012, 93(7): 1527-1539.
- [9] Warren D L. In defense of 'niche modeling'. Trends in Ecology & Evolution, 2012, 27(9): 497-500.
- [10] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [11] Galante P J, Alade B, Muscarella R, Jansa S A, Goodman S M, Anderson R P. The challenge of modeling niches and distributions for data - poor species; a comprehensive approach to model complexity. Journal of Mammalogy, 2013, 94(1): 726-736.
- [12] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [13] Panda R M, Behera M D. Assessing harmony in distribution patterns of plant invasions: a case study of two invasive alien species in India. Biodiversity and Conservation, 2019, 28(8/9): 2245-2258.
- [14] 张晨星, 张炜, 徐晶晶, 杨新兵. 基于 GIS 和最大熵模型的河北省油松适宜性分布分析. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 18-25.
- [15] 韦洁敏. 基于 Maxent 的附子潜在分布区预测及影响有效成分的环境因子分析[D]. 延安: 延安大学, 2020.
- [16] 马俊鹏, 常军民, 卢冬梅. 天山花楸水提取液镇咳平喘作用的实验研究. 西北药学杂志, 2007, 22(5): 257-258.
- [17] 庄凤君, 王继丰, 王臣. 国产及引进花楸属植物研究与应用进展. 国土与自然资源研究, 2008, (1): 94-96.
- [18] 顾庆和, 王一龙. 注意保护花楸资源. 北方园艺, 1993, (2): 36.
- [19] 张芹, 刘保刚, 李鹏, 唐辉. 天山花楸中总黄酮和槲皮素测定. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(6): 709-712.

- [20] 陆彪, 吕美青, 田娟, 牛玉玲. 天山花楸直播育苗繁育技术. 农村科技, 2017, (7): 57.
- [21] 杨晓东, 姬盼盼, 热依沙, 李宏侠. 31 种木本植物开花物候与系统发育的关系. 生态学报, 2018, 38(3): 1003-1015.
- [22] 苏辉明, 王贵忠, 沈剑. 天山花楸生境调查与育苗技术初报. 新疆林业, 2010, (6): 23.
- [23] Parolo G, Rossi G, Ferrarini A. Toward Improved Species Niche Modelling: *Arnica montana* in the Alps as a Case Study. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(5): 1410-1418.
- [24] 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.
- [25] 魏博, 马松梅, 宋佳, 贺凌云, 李晓辰. 新疆贝母潜在分布区域及生态适宜性预测. 生态学报, 2019, 39(1): 228-234.
- [26] 徐军, 曹博, 白成科. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3354-3359.
- [27] Elith J, Kearney M, Phillips S. The art of modelling range - shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, 1(4): 330-342.
- [28] 林天杰. 野生天山花楸的育苗技术. 农村科技, 2009, (3): 72.
- [29] 陈刚, 吕东, 赵明. 天山花楸在祁连山区东中段的天然分布. 林业科技通讯, 2020, (10): 100-103.
- [30] 邢菲, 李虎, 李建贵, 张乃明, 刘玉峰, 陈冬花. 基于 3S 技术的天山历史云杉林空间分布的提取. 干旱区研究, 2019, 36(2): 451-458.
- [31] 熊中人, 张晓晨, 邹旭, 赵洋, 陈昕. 中国天山花楸适生区预测及其对气候变化的响应. 生态科学, 2019, 38(5): 44-51.
- [32] Buermann W, Saatchi S, Smith T B, Zutta B R, Chaves J A, Milá B, Graham C H. Predicting species distributions across the Amazonian and Andean regions using remote sensing data. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(7): 1160-1176.
- [33] 桑满杰. 环境变量对物种分布模型的影响与评价——以山茱萸潜在地理分布预测为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [34] 李鹏, 王鲁石, 唐辉. 天山花楸的生药学研究. 时珍国医国药, 2007, 18(8): 1845-1846.
- [35] 张薇, 常军民, 艾尔肯·依不拉音. 维药天山花楸果实化学成分研究. 新疆医科大学学报, 2013, 36(8): 1075-1076, 1081.
- [36] 陈刚, 赵明, 吕东, 王咏梅. 天山花楸嫁接引种试验. 现代农业科技, 2020, (2): 106-107.
- [37] 刘引鸽. 西北干旱灾害影响因子分析. 灾害学, 2003, 18(2): 18-22.
- [38] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [39] Iverson L, Prasad A, Matthews S. Modeling potential climate change impacts on the trees of the northeastern United States. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008, 13(5/6): 487-516.
- [40] Shafer S L, Bartlein P J, Thompson R S. Potential changes in the distributions of western north America tree and shrub taxa under future climate scenarios. *Ecosystems*, 2001, 4(3): 200-215.
- [41] 崔炜杰, 肖中琪, 陈虹, 宋亚伟. 天山花楸种子破除休眠方法的研究. 黑龙江农业科学, 2020, (3): 62-64.