

DOI: 10.5846/stxb201902210306

段义忠,王驰,王海涛,杜忠毓,贺一鸣,柴乖强.不同气候条件下沙冬青属植物在我国的潜在分布——基于生态位模型预测.生态学报,2020,40(21):7668-7680.

Duan Y Z, Wang C, Wang H T, Du Z Y, He Y M, Chai G Q. Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7668-7680.

不同气候条件下沙冬青属植物在我国的潜在分布 ——基于生态位模型预测

段义忠^{1,*}, 王 驰¹, 王海涛¹, 杜忠毓^{1,2}, 贺一鸣¹, 柴乖强¹

1 榆林学院生命科学学院, 陕西省陕北生态修复重点实验室, 榆林 719000

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:沙冬青属(*Ammopiptanthus*)植物是古地中海第三纪孑遗濒危物种,包括沙冬青(*Ammopiptanthus mgolicus*)和矮沙冬青(*Ammopiptanthus nanus*),主要分布在我国西北干旱、半干旱地区,其不仅具有较高的研究价值,同时对我国西北干旱地区生态环境具有十分重要的作用。近年来由于全球气候变化及人为干扰等因素,沙冬青属植物天然分布面积骤缩,濒临灭绝。本研究利用 MaxEnt 模型、Bioclim 模型和 Domain 模型对沙冬青属植物在我国末次间冰期(Last Interglacial)、末次冰盛期(Last Glacial Maximum)、当代和 2050 年(RCP4.5 和 RCP8.5)4 个时期气候情景下的潜在适生区进行预测。结果表明:MaxEnt 模型对沙冬青属植物潜在分布区的预测具有极高的准确度,所有模型的平均受试者工作特征曲线下面积(AUC 测试值)均高于 0.80。当代沙冬青最佳及高适生区占全国总面积的 2.78%,主要集中在内蒙古中部、宁夏北部和甘肃北部等地;未来沙冬青最佳及高适生区在现有分布范围呈现向外扩张的趋势,主要分布在内蒙古鄂托克旗、鄂尔多斯、阿拉善左旗、宁夏吴忠和甘肃民勤县等地。当代矮沙冬青最佳及高适生区占全国总面积的 2.23%,主要集中在新疆南部;未来矮沙冬青最佳及高适生区向新疆乌恰县南部、乌鲁木齐北部移动和扩大,主要分布在新疆乌恰县、乌苏市、吐鲁番市和乌鲁木齐市。未来 2050 年(RCP4.5 和 RCP8.5)两种气候情景下沙冬青和矮沙冬青的潜在分布总面积均有所增加,与当代相比变化不明显,但不同适生等级的潜在分布面积变化较大,在更高的 CO₂ 排放量(RCP8.5)情景下沙冬青和矮冬青的最佳及高适生区范围的预测结果都将减少。从气候因素角度考虑,研究表明未来气候情景下沙冬青属植物的适生区变化过程中,年均温(Bio1)、最湿月降水量(Bio13)和温度季节性变化(Bio4)是影响沙冬青属植物分布的关键因子,并为我国西北干旱半干旱地区具有重要的经济价值并将持续其生态服务功能。

关键词:沙冬青;矮沙冬青;全球气候变化;适生区分布;生态位模型

Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models

DUAN Yizhong^{1,*}, WANG Chi¹, WANG Haitao¹, DU Zhongyu^{1,2}, HE Yiming¹, CHAI Guaiqiang¹

1 Shaanxi Key Laboratory Ecological Restoration in Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: *Ammopiptanthus* plants, including *Ammopiptanthus mgolicus* and *Ammopiptanthus nanus*, are tertiary endangered species of paleo-Mediterranean origin that are primarily distributed in arid and semi-arid regions in northwestern China. *A. mgolicus* and *A. nanus* not only play an important role in the ecological environment of northwestern China but are also important species for scientific research. Global climate change and anthropogenic activities have caused the distribution of

基金项目:国家自然科学基金项目(41601059)

收稿日期:2019-02-21; 网络出版日期:2020-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duanyizhong2006@163.com

Ammopiptanthus plants to shrink, and currently they are on the verge of extinction. In this study, ecological niche models (MaxEnt model, Bioclim model, and Domain model) were used to predict the past (Last Interglacial and Last Glacial Maximum), current, and future (RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in 2050) potential distributions of *Ammopiptanthus* plants in China. The accuracy of the MaxEnt model for modeling the potential distribution of *Ammopiptanthus* plants was high, and average values of the area under the receiver operator characteristic curve (AUC test value) were higher than 0.80 for all models. The best suitable and high suitable areas for the current potential distribution of *A. mgolicus* accounted for 2.78% of the total area of China and primarily occupied central Inner Mongolia, Ningxia, and Gansu. The best suitable and high suitable areas of the future potential distribution of *A. mgolicus* revealed expansion into central Inner Mongolia, northern Gansu, and northern Ningxia by 2050, with much of the distribution concentrated in Etoke Banner, Ordos, and Alxa Zuoqi of Inner Mongolia; Wuzhong City of Ningxia; and Minle City of Gansu. The best suitable and high suitable areas of the current potential distribution of *A. nanus* accounted for 2.23% of the total area of China and primarily occupied southern Xinjiang. The best suitable and high suitable areas of the future potential distribution of *A. nanus* revealed expansion into southern Wuqia County and north of Urumqi in Xinjiang by 2050, with much of the distribution concentrated in Wuqia County, Wusu City, Turpan City, and Urumqi City in Xinjiang. The potential distributions of *A. mgolicus* and *A. nanus* by 2050 in two climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) were predicted to change little relative to the current potential distribution, but the level of suitability of many areas within the potential distribution was predicted to change substantially. However, suitable areas of habitat for *A. mgolicus* and *A. nanus* were predicted to decrease under the higher CO₂ emissions scenario (RCP8.5). Annual average temperature (Bio1), precipitation of wettest month (Bio13), and variation in temperature seasonality (Bio4) were the most important factors contributing to changes in the potential distributions of *Ammopiptanthus* plants. In the future, *Ammopiptanthus* plants will make important economic contributions and perform vital ecological service functions in arid and semi-arid regions of northwest China.

Key Words: *Ammopiptanthus nanus*; *Ammopiptanthus mgolicus*; global climate change; distribution of suitable areas; ecology niche model

西北干旱区荒漠植物的形成与古地中海退却、喜马拉雅及青藏高原的隆升、荒漠的形成演化及第四纪冰期的气候变化等密切相关。第四纪冰期和间冰期反复交替引起的气候波动对该区域植物地理分布格局产生了重大影响^[1]。地质、气候与生境的巨大变化对西北干旱区植物区系和生物多样性产生了重要影响,更新世以来冰期与间冰期反复作用,进一步影响到该区生物类群的分化、迁移和扩散。西北干旱区植物区系种类相对贫乏,但其广阔的面积、特殊的干旱地理和历史成分,使其在中国植物区系乃至欧亚及北温带植物区系中都占有重要地位。近年来,全球平均温度的上升,对植被的生长及其分布产生了巨大的影响,使全球分布的多个物种面临灭绝的危险^[2-4]。未来气温的持续变化及降水格局改变,诸多生态系统和生物类群将受到气候变化的影响^[5]。因此研究气候变化对该区域物种潜在分布、物种保护及资源利用等具有十分重要的意义^[6]。

生态位模型是根据物种实际分布范围和环境变量,通过一定的算法来预测物种能否在该区域生存的模型^[7],并能预测植物在全球未来气候变化下的潜在分布^[8],越来越多的生态位模型被应用于物种历史地理分布过程及未来气候变化下分布趋势的研究^[9]。目前应用比较广泛的生态位模型主要有最大熵值模型(MaxEnt),基于生物气候数据的 Bioclim 和 Domain 模型。MaxEnt 模型是通过物种“只存在”的分布数据信息以最大熵原理为基础,统计已知研究物种的分布点,根据物种现实的分布信息和环境变量,推断物种未知概率分布的数学计算方法,再得到目标物种的潜在分布^[10]。Bioclim 模型是一种框架生态位模型^[11],它是通过获取已有的物种分布数据和环境数据,再利用分布百分比算法对物种在一段时间内可能的分布区进行分析,计算每个网格的环境适生度^[12]。Domain 模型是利用 Gower 算法,通过计算环境空间中的点和点之间的最大相似程度,最终确定物种的分布范围^[13]。近年来,生态位模型对于物种生境的适宜性判断运用较为广泛,众多

学者已经通过生态位模型对多个物种的潜在适生区进行模拟,得到了很好的预测效果^[14-16]。

沙冬青属(*Ammopiptanthus*)植物,隶属于豆科(Leguminosae),是古地中海第三纪孑遗珍稀植物、亚洲荒漠区特有的濒危植物、也是我国西北干旱地区唯一的超旱生常绿阔叶灌木^[17-19]。沙冬青属植物具有防风固沙、改良土壤、水土保持、耐干旱、耐严寒、耐盐碱化、耐贫瘠、荒漠防沙治沙、药用和根系发达等特性,而备受研究人员关注^[20-23]。该属包含两个种,沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)和矮沙冬青(*Ammopiptanthus nanus*)。沙冬青又名蒙古沙冬青,主要分布在中国内蒙古阿拉善左旗、甘肃武威市、宁夏等地;矮沙冬青又名新疆沙冬青,主要分布在中国新疆喀什、乌恰县等地区,在天山西部(相邻的吉尔吉斯斯坦)也有分布^[24-26]。尽管国内外针对沙冬青属植物在分子生物学、环境生态学、遗传分子学、区系分布、濒危原因、抗旱抗寒机理和利用价值等基础部分进行了深入细致的研究^[27-33],但目前未发现基于生态位模型对其在我国潜在分布区预测的相关研究报导。基于此,本研究基于 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 3 种模型,结合 ArcGIS 软件对沙冬青属自然种群在末次间冰期(Last Interglacial)、末次冰盛期(Last Glacial Maximum)、当代(Current)和未来(2050s)四个不同时期气候情景下在我国的潜在分布区进行预测,分析其与环境变量之间的联系,揭示影响其潜在分布的主导因子,并为该属植物今后的繁殖、资源利用及保护等提供一定的理论参考依据,同时本研究将对全球气候变化下干旱半干旱地区物种多样性和生态系统稳定性具有重大意义。

1 材料和方法

1.1 物种分布数据的获取

沙冬青和矮沙冬青地理分布数据收集自中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、《Flora of China》、野外调查和公开发表的文献。为保证其样点信息的准确无误,对所选取样点进行筛选,最终得到沙冬青 68 个分布点,矮沙冬青 57 个分布点(图 1)。

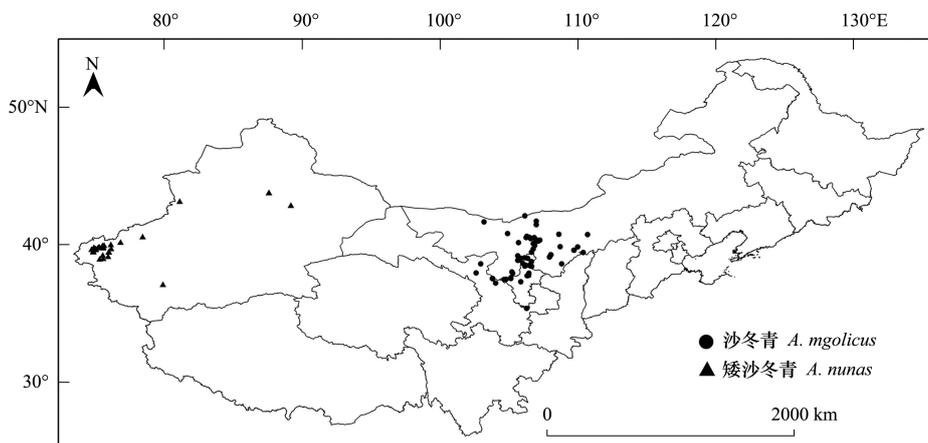


图 1 沙冬青属分布点

Fig.1 The distribution points of *Ammopiptanthus*

1.2 地理和环境数据

地理数据在国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)中下载 1:400 万的中国行政区划矢量图作为分析的底图。末次间冰期(Last Interglacial, 130 ka BP)、末次冰盛期(Last Glacial Maximum, 21 ka BP)、当代(1961—2000 年)、2050 年(2041—2060 年)环境数据从世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)下载,每个时期包括 19 个空间分辨率为 2.5'(1km²)的环境气候数据^[34](表 1)。为模拟未来 2050 年(2050s)气候变化情景下物种的分布,下载 CCSM4 全球气候模式中典型浓度路径 4.5(RCP 4.5)和典型浓度路径 8.5(RCP 8.5)两种温室气体排放情景^[35]的气候数据,环境数据分辨率均为 2.5'^[36]。

表 1 研究使用的环境数据

Table 1 Environmental data used in the research

代号 Code	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年均温 Annual mean temperature	℃
Bio2	平均日较差 Mean diurnal range	℃
Bio3	等温性 Isothermality	—
Bio4	温度季节性变化 Variation of temperature seasonality	—
Bio5	最热月最高温 The maximum temperature of the warmest month	℃
Bio6	最冷月最低温 The minimum temperature of the coldest month	℃
Bio7	温度年较差 Temperature annual range	℃
Bio8	最湿季度均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃
Bio9	最干季度均温 Mean temperature of the driest quarter	℃
Bio10	最热季度均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃
Bio11	最冷季度均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
Bio12	年均降水量 Annual precipitation	mm
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	mm
Bio15	降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality	—
Bio16	最湿季度的降水量 Precipitation of wettest quarter	mm
Bio17	最干季度的降水量 Precipitation of driest quarter	mm
Bio18	最暖季度的平均降水量 Precipitation of warmest quarter	mm
Bio19	最冷季度的平均降水量 Precipitation of coldest quarter	mm

1.3 模型预测及评价

MaxEnt 模型在 MaxEnt 3.3.3k 软件中进行,分别导入沙冬青与矮沙冬青的地理分布数据和 19 个环境变量,选择刀切法(Jackknife)计算变量的贡献率和置换重要性,随机选取 25%的分布数据作为测试样本,75%作为训练样本,设置 10 次重复,其他参数默认^[37]。最终利用 ArcGIS 10.0 软件进行作图。Bioclim 和 Domain 模型在 DIVA-GIS 软件中运行。将 10 组训练集和验证集文件导入 DIVA-GIS 软件,选择 CLASS_REP 字段的全部类别及最大空间范围^[38],再将结果中 AUC 值最大的“.grd”文件,转换为“.asc”栅格文件格式,导入 ArcGIS 10.0 软件中进行可视化。基于 MaxEnt、Domain 和 Bioclim 模型得到沙冬青属在我国分布区的栅格文件,利用自然断点法进行重分类划分。本研究中采用非阈值依赖判断方法类中的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线来评价预测效果^[39-40]。ROC 评价曲线下的面积为 AUC 值,AUC 值可用于判断预测结果的准确性,取值范围为 0—1,AUC 值小于 0.6 时认为模型预测结果失败,0.6—0.7 时,模型预测结果较差,0.7—0.8 时,模型的预测效果一般,0.8—0.9 时,其预测结果良好,当为 0.9—1.0 时,模型预测效果优秀。AUC 值越接近 1 时,模型预测结果越可靠,反应物种的潜在分布能力越准确^[41]。本研究划分为非适生区、边缘适生区、低适生区、中适生区、高适生区和最佳适生区 6 个等级。

2 结果与分析

2.1 模型的准确性评价及其预测沙冬青属当代的分布区

2.1.1 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型的准确性评价

基于物种分布数据和环境变量在 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型中对沙冬青和矮沙冬青当代的潜在地理分布范围进行了模拟,10 次重复平均 AUC 值均大于 0.80(图 2),沙冬青分别为 0.991、0.925 和 0.967,矮沙冬青分别为 0.991、0.829 和 0.957,综合发现 MaxEnt 模型在预测沙冬青属潜在地理分布区中表现最佳。此外,末次冰盛期、末次间冰期及未来气候变化下(2050s)的模拟中,AUC 值均高于 0.80,表明预测结果良好准确。

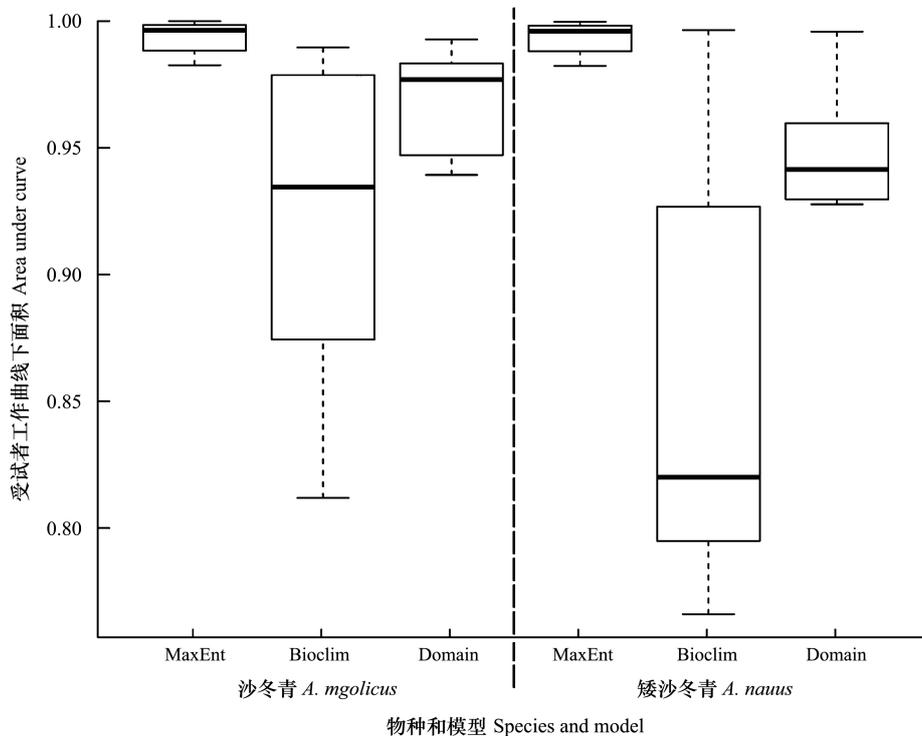


图2 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型对沙冬青和矮沙冬青潜在适生区预测结果的 AUC 值

Fig.2 The AUC value of MaxEnt, Bioclim and Domain models for the prediction results of potential suitable area of *A. mgolicus* and *A. nanaus*

2.1.2 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型预测沙冬青属当代的潜在分布区

利用 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型对沙冬青属在我国潜在分布区进行预测,发现 MaxEnt 和 Bioclim 模型预测结果与沙冬青属当代在我国的实际分布数据最接近,而 Domain 模型偏差极大(图 3),表明 Domain 模型并不适用于沙冬青属在我国的潜在分布。基于 10 次重复的平均 AUC 值,本研究中舍弃 Domain 模型,选择效果较好的 MaxEnt 及 Bioclim 模型对沙冬青和矮沙冬青在我国潜在适生分布区进行预测。

2.2 沙冬青属在我国的潜在适生分布区

MaxEnt 模型预测结果表明,沙冬青在末次间冰期分布区面积占全国总面积的 5.51%,主要分布在内蒙古鄂尔多斯市和阿拉善左旗、甘肃武威、宁夏银川、陕西榆林、新疆吐鲁番和乌鲁木齐等区域。高适生区和最佳适生区主要分布在内蒙古鄂尔多斯、宁夏银川和甘肃武威等区域,占全国总面积的 1.15%;低适生区和中适生区主要分布在内蒙古鄂尔多斯市、阿拉善左旗、甘肃民乐县、新疆乌鲁木齐市以及河北张家口,占全国总面积的 1.81%;边缘适生区主要分布在陕西榆林、甘肃武威、山西太原、内蒙古鄂尔多斯和河北石家庄等区域。末次冰盛期与末次间冰期相比,沙冬青适生分布区面积增加 0.96%,占全国总面积的 6.47%,增加部分主要集中在边缘适生分布区,但最佳适生区和高适生区面积减少 0.02%,主要是陕西榆林市。沙冬青在我国当代时期的潜在分布区总面积与末次冰盛期相比减少 2.46%,但其最佳适生区和高适生区分布面积增加 1.65%,主要集中在内蒙古鄂尔多斯、阿拉善、宁夏石嘴山等区域。边缘适生区分布面积减少 2.46%,低适生区和中适生区分布面积减少为 1.11%,占全国总面积的 0.68%(图 4)。

与当代时期沙冬青在我国的适生分布区相比,其未来(2050s)在我国潜在适生分布区面积均有小幅度的增加。RCP4.5 气候情景下,沙冬青总潜在适生分布区面积占全国面积的 4.03%,较当代适生分布面积仅增加 0.02%;其中最佳适生区及高适生区面积占全国总面积的 2.90%,低适生区及中适生区面积占全国总面积的 0.56%,边缘适生区面积占全国总面积的 0.57%。RCP8.5 气候情景模式下,沙冬青总潜在适生分布区面积占

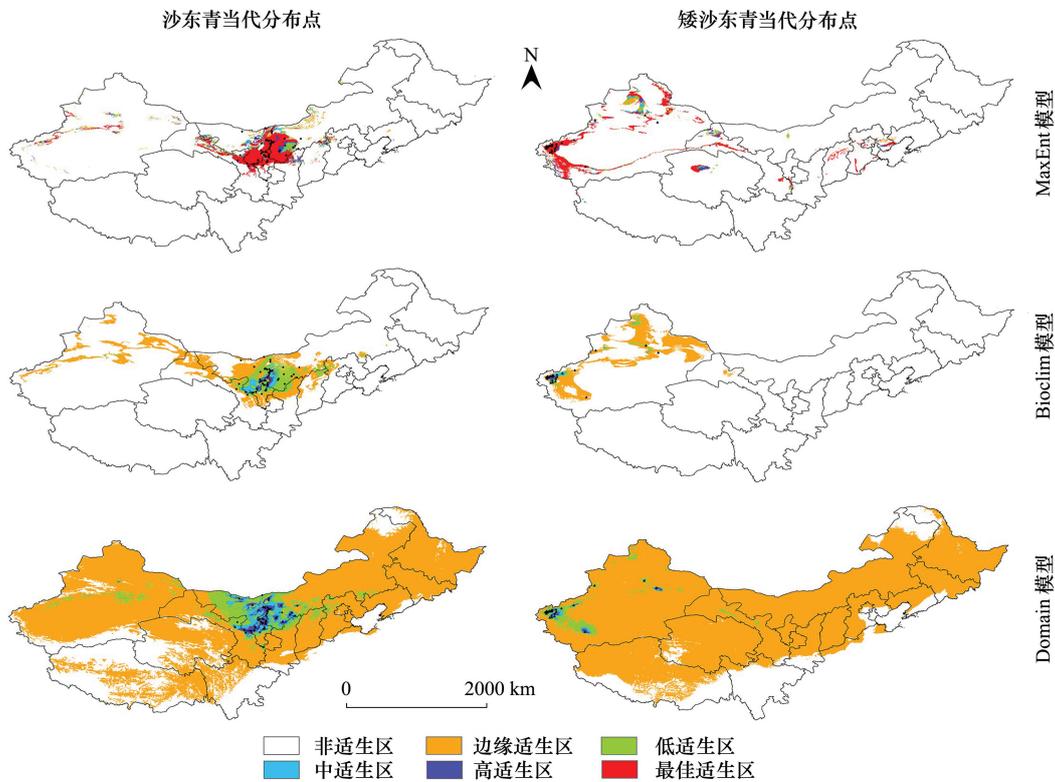


图3 沙冬青和矮沙冬青当代分布点和 MaxEnt、Bioclim 和 Domain 模型预测沙冬青和矮沙冬青当代的潜在分布区

Fig.3 Distribution points of *A. mgolicus* and *A. nunas* and the predict potential distribution area by MaxEnt, Bioclim and Domain

全国总面积的 4.15%,较当代时期总潜在适生分布面积增加 0.14%。最佳及高适生分布区面积占全国总面积的 2.88%,低适生区及中适生区面积占全国总面积 0.67%,边缘适生区面积占全国总面积 0.60%。两种气候情景下沙冬青在我国潜在适生分布区域均以宁夏贺兰山为中心向内蒙古西部地区 and 甘肃东部地区扩散(图 4)。

基于 MaxEnt 模型预测矮沙冬青在我国的潜在适生分布区发现,随时间变化有扩张趋势(图 5)。其在末次间冰期适生分布区占全国总面积的 0.78%,高适及最佳适生区主要集中在新疆中西部乌恰县及喀什地区,占我国总面积的 0.30%。中适及低适生分布区仅仅占我国总面积的 0.18%,零散分布在我国西藏自治区、青海省,边缘适生分布于我国的甘肃省、陕西省和山西省。与末次间冰期相比,末次冰盛期总分布面积增加了 0.39%。主要增加新疆塔城、西藏阿里及青海共和县等中低适生分布区,有向我国东部迁移趋势,如陕西省、山西省、河北省等地出现边缘适生区。矮沙冬青当代在我国潜在适生分布区占全国总面积的 2.91%,较末次冰盛期增加 1.79%。主要是高适及最佳适生区有所扩张,占全国总面积的 2.23%,主要分布在新疆乌恰县、甘肃张掖、青海格尔木一带。分布区范围多集中在 $36^{\circ}\text{--}44^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{--}101^{\circ}\text{E}$ 。

未来(2050s)不同气候情景下,矮沙冬青的潜在适生分布区域有所不同。RCP 4.5 情景下矮沙冬青潜在适生区域占全国总面积的 3.01%,与当代适生分布区相比总适生区面积增加 0.05%,高适生区主要集中在新疆乌恰县南部、乌鲁木齐北部及宁夏等周边地区。但在 RCP 8.5 情景下矮沙冬青适生分布区占全国总面积的 2.86%,与当代适生分布区相比总适生区面积减少 0.10%(图 5)。未来(2050s)两种气候情景下矮沙冬青潜在适生分布区均有向北迁移趋势。

Bioclim 模型预测沙冬青末次间冰期在我国的潜在分布区占全国总面积的 4.48%(图 6)。高适及最佳适生区面积约占全国总面积的 0.58%。与末次间冰期相比,沙冬青在我国的潜在适生区面积增加 4.75%,主要分布在我国西北地区,占全国总面积的 9.23%。沙冬青当代在我国的潜在分布区主要分布在以内蒙古、甘肃、

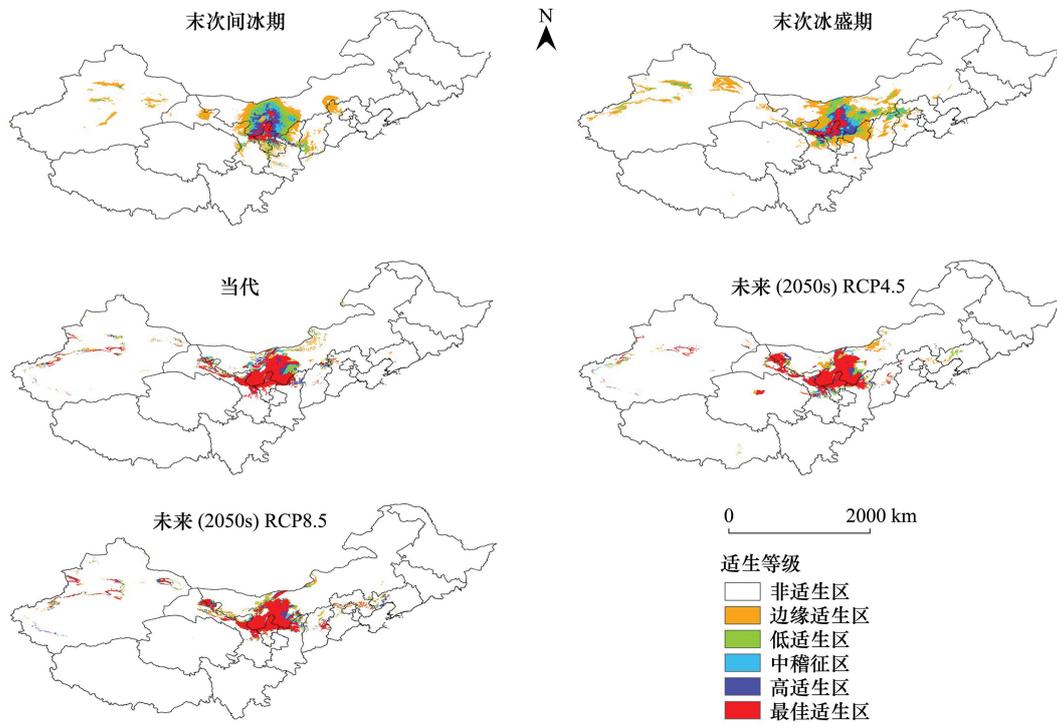


图 4 MaxEnt 模型预测的不同时期沙冬青在我国的潜在适生分布区

Fig.4 Potential suitable area of *A. mgolicus* in China predicted by MaxEnt model in different period

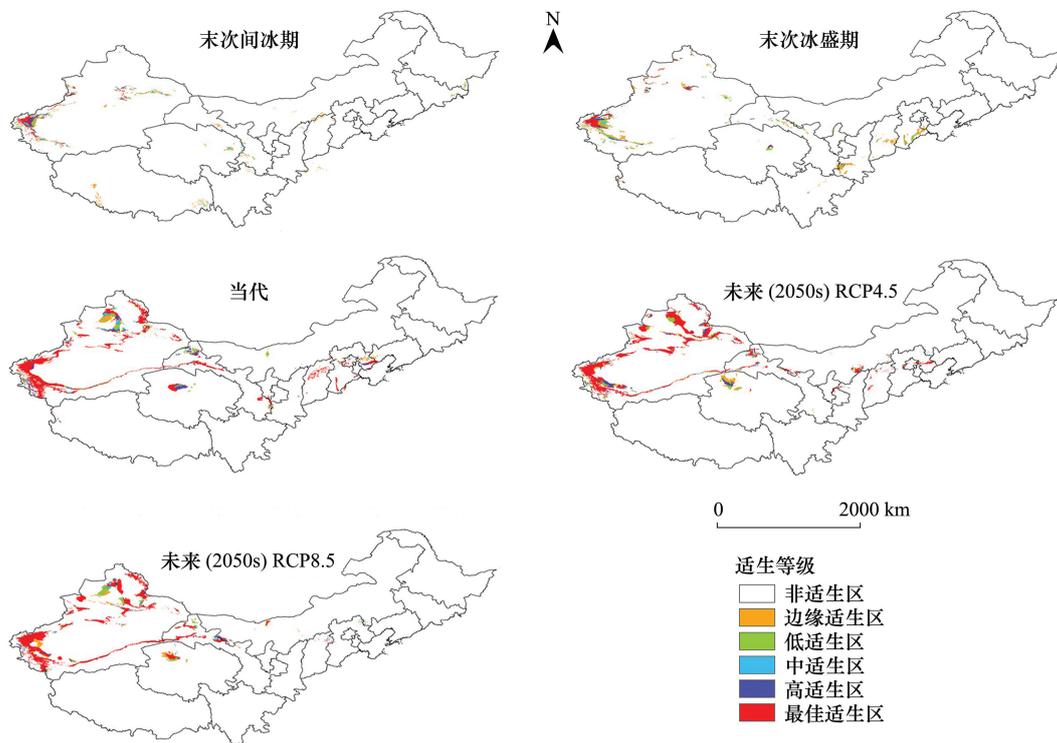


图 5 MaxEnt 模型预测的不同时期矮沙冬青在我国的潜在适生分布区

Fig.5 Potential suitable area of *A. nunas* in China predicted by MaxEnt model in different period

宁夏、陕西交界地区,占全国总面积的 8.30%。未来 RCP4.5 情景下,沙冬青在我国潜在适生分布区总面积占我国总面积的 8.08%,与当代相比减少 0.22%。未来 RCP8.5 情景下,沙冬青在我国潜在适生分布区总面积占我国总面积的 7.63%,与沙冬青当代在我国潜在适生面积相比减少 0.67%。两种不同情景下,沙冬青在我国潜在适生分布区面积均有所减少,未来 RCP8.5 情景下沙冬青在我国潜在适生分布区缩减面积更大(图 6)。

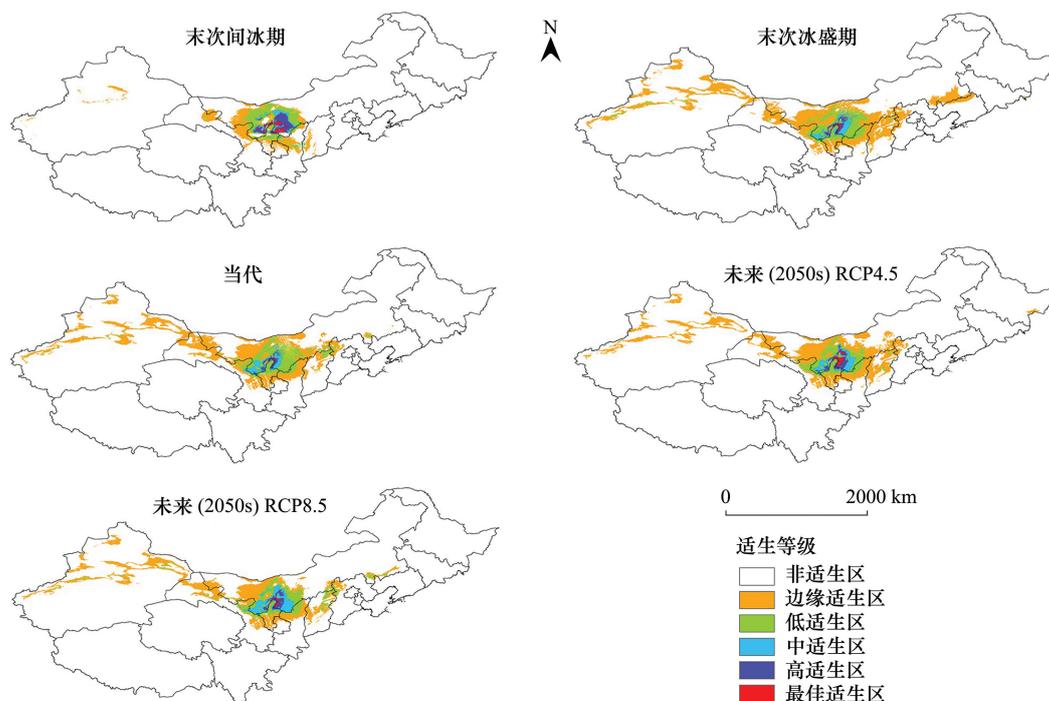


图 6 Bioclim 模型预测的不同时期沙冬青在我国的潜在适生分布区

Fig.6 Potential suitable area of *A. mgolicus* in China predicted by Bioclim model in different period

与 MaxEnt 模型预测矮沙冬青在我国潜在分布区相似, Bioclim 模型预测矮沙冬青末次间冰期在我国潜在适生分布区面积占全国总面积的 2.19%, 高适及最佳适生区面积仅为全国总面积的 0.04%。与末次间冰期相比, 矮沙冬青末次冰盛期适生分布区面积增加 0.65%, 占全国总面积的 2.84%, 主要分布在我国新疆地区, 总体分布区向我国北部迁移。矮沙冬青当代在我国潜在适生分布区占全国总面积的 4.39%, 主要分布在我国新疆乌恰县。未来 RCP4.5 情景下, 矮沙冬青在我国潜在适生区分布面积占全国总面积的 3.42%。与当代潜在适生分布区面积相比, 矮沙冬青在我国潜在适生区分布面积减少 0.97%。未来 RCP8.5 情景下, 矮沙冬青在我国潜在适生区分布面积占全国总面积的 4.29% (图 7)。

2.3 影响沙冬青属潜在分布的主导环境变量

利用 Jackknife 刀切法分析各环境变量对沙冬青属分布适宜度(图 8), 结合各环境变量对沙冬青属分布影响的贡献率(表 2)表明: 温度是影响沙冬青属分布的主要因素。具体而言, 年均温(Bio1)的贡献率 14.4%、温度年较差(Bio7)贡献率 10.5%、最冷月的最低温(Bio6)贡献率 9.7%、最湿季度均温(Bio8)贡献率 9.1%、降水量季节性变化(Bio15)贡献率 8.7%以及最冷季度的平均降水量(Bio19)贡献率 8.5%, 其累积贡献率达 61.5%。说明上述 6 个环境变量是影响沙冬青适宜分布生境的主导环境变量。

影响矮沙冬青适宜分布生境的关键环境变量有温度季节性变化(Bio4)、等温性(Bio3)、最冷季度的平均降水量(Bio19)、最湿月降水量(Bio13)、平均日较差(Bio2)和温度年较差(Bio7), 贡献率分别为 17.9%、16.8%、9.8%、6.3%、5.2%和 5.2%, 累积贡献率达 61.2%。说明矮沙冬青适宜的分布生境主要由上述 6 个环境变量控制。

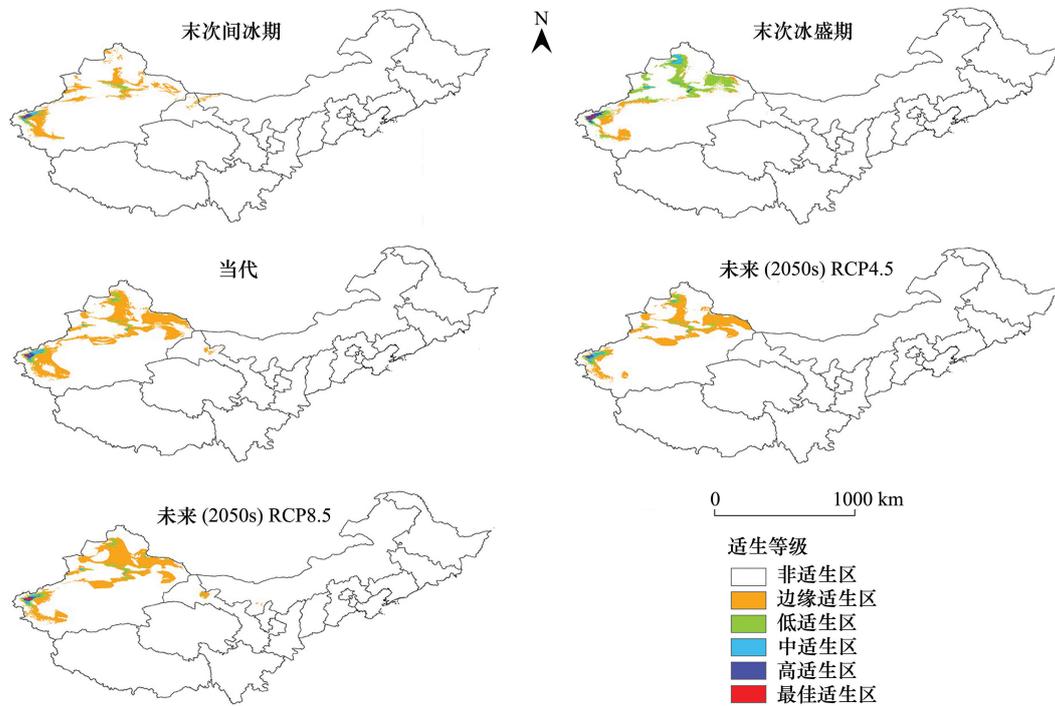


图7 Bioclim 模型预测的不同时期矮沙冬青在我国的潜在适生分布区

Fig.7 Potential suitable area of *A. nunas* in China predicted by Bioclim model in different period

表2 基于 MaxEnt 模型预测的影响沙冬青和矮沙冬青分布的环境变量的贡献率

Table 2 Contribution rate of environmental variables affecting potential suitable area of *A. nunas* and *A. mgolicus* Schrenk in current predicted by MaxEnt model

环境变量 Environment variable	贡献率 Contribution rate/%		环境变量 Environment variable	贡献率 Contribution rate/%	
	沙冬青 <i>Ammopiptanthus mgolicus</i>	矮沙冬青 <i>Ammopiptanthus nanus</i>		沙冬青 <i>Ammopiptanthus mgolicus</i>	矮沙冬青 <i>Ammopiptanthus nanus</i>
Bio1	14.4	2.6	Bio11	3.4	3.7
Bio2	3.7	5.2	Bio12	5.7	4.1
Bio3	2.7	16.8	Bio13	1.2	6.3
Bio4	0.6	17.9	Bio14	0.9	4.1
Bio5	1.8	1.2	Bio15	8.7	3.5
Bio6	9.7	4.5	Bio16	4.3	1.1
Bio7	10.5	5.2	Bio17	0	1.9
Bio8	9.1	2.8	Bio18	4.8	3.8
Bio9	7.2	2.4	Bio19	8.5	9.8
Bio10	2.8	2.9	总计	100	100

3 讨论

随着全球物种分布数据的共享和快速发展的空间分析技术,生态位模型在生物多样性保护的多个领域得到开拓和应用,其中相关性方案的生态位模型利用物种已知的分布数据和相关环境变量,根据一定的算法运算来构建模型,判断物种的生态需求,并将运算结果投射至不同的时间和空间中以预测物种的实际和潜在分布,被越来越多地应用在入侵生物学、保护生物学、全球气候变化对物种分布的影响,生物地理学及传染病空间传播的研究中。例如在入侵生态学研究上,岳茂峰等^[42]利用 MaxEnt 模型对刺轴含羞草入侵植物在我国的潜在分布进行了模拟,得出刺轴含羞草在我国的适生区主要分布在云南、海南、广东西南部以及中国台湾地

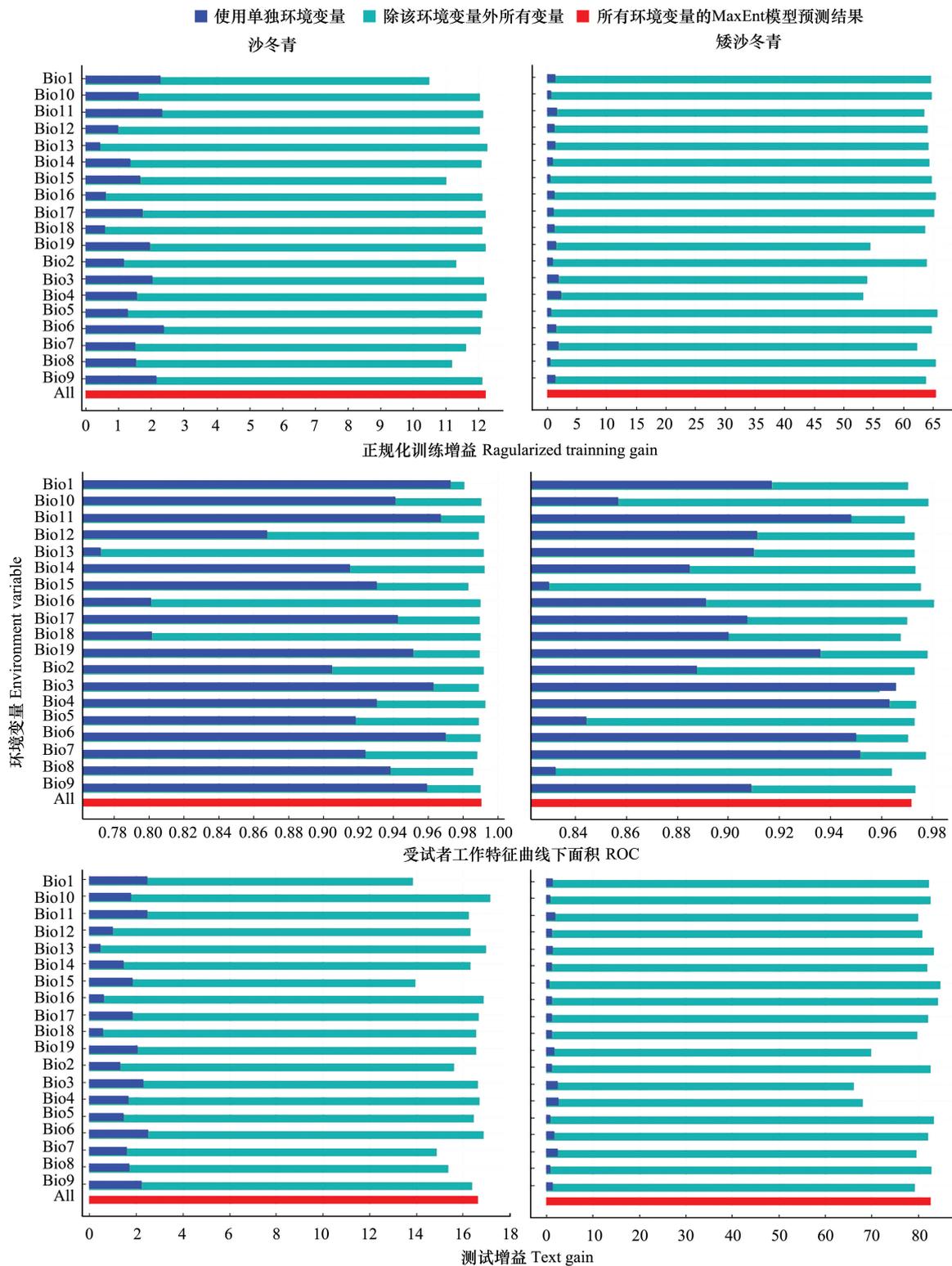


图 8 基于刀切法的潜在环境变量对沙冬青和矮沙冬青分布的贡献率

Fig.8 Contribution rate of potential environmental variables based on Jackknife to the *A. mgolicus* and *A. nanus*

Bio1: 年均温 Annual mean temperature; Bio2: 平均日较差 Mean diurnal range; Bio3: 等温性 Isothermality; Bio4: 温度季节性变化 Variation of temperature seasonality; Bio5: 最热月最高温 The maximum temperature of the warmest month; Bio6: 最冷月最低温 The minimum temperature of the coldest month; Bio7: 温度年较差 Temperature annual range; Bio8: 最湿季度均温 Mean temperature of the wettest quarter; Bio9: 最干季度均温 Mean temperature of the driest quarter; Bio 10: 最热季度均温 Mean temperature of the warmest quarter; Bio11: 最冷季度均温 Mean temperature of the coldest quarter; Bio12: 年降水量 Annual precipitation; Bio13: 最湿月降水量 Precipitation of the wettest month; Bio14: 最干月降水量 Precipitation of the driest month; Bio15: 降水量季节性变化 Variation of precipitation seasonality; Bio16: 最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter; Bio17: 最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter; Bio18: 最热季度降水量 Precipitation of the warmest quarter; Bio19: 最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter

区,到 2050 年,在温室气体 A1 排放模式下其在全球适生区面积与当代相似,但在我国的适生区略有减少;在保护生物学研究上,张文秀等^[43]运用生态位模型对 5 个时期濒危植物白豆杉的潜在分布区进行重建,表明在未来气候变暖条件下,白豆杉适宜分布区减少,该物种往高海拔山地收缩,低海拔(约 600 m 以下)的适宜区基本消失。

本研究基于三种生态位模型,MaxEnt、Bioclim 和 Domain 在空间尺度上和时间尺度上对沙冬青属植物在我国的潜在适生区进行预测。结果表明,MaxEnt 模型、Bioclim 模型和 Domain 模型相比较,其 MaxEnt 模型对沙冬青属的分布区预测较为准确,更有利于对该物种的长期保护和研究。MaxEnt 模型预测出沙冬青最适生区主要分布在我国内蒙古鄂尔多斯市、阿拉善左旗、甘肃中东部及宁夏北部等干旱地区;矮沙冬青最适生区主要分布在我国新疆乌恰县和乌鲁木齐地区,这与目前对沙冬青属植物的研究分布保持一致^[44]。MaxEnt 模型预测沙冬青属的潜在分布区可用于对该物种的核心分布区进行研究,这对于沙冬青和矮沙冬青两种濒危植物的资源保护及其推广种植具有重要的意义。

气候环境是物种分布的决定性因素,而物种的分布变化也是气候变化的最直接,最明显的反应。全球变暖已经改变了陆地生态系统的结构,这反过来又改变了物种的栖息地和地理分布函数^[45]。如气候、地形、土壤、人为干扰和空间限制因素对不同空间尺度的分布具有重要意义^[1]。预测结果表明沙冬青和矮沙冬青的空间分布差异明显,并且呈现不连续分布,与先前的研究结果保持一致^[46]。影响沙冬青潜在地理分布的最主要环境变量是年均温,影响矮沙冬青潜在分布的最主要环境变量是温度季节性变化,如在最湿月份和最干月份等,这可能是由于沙冬青所处海拔要低于矮沙冬青所处海拔,且沙冬青地理环境处于荒漠带与草原带交汇地,也是多种植物区系交汇的地区,且由于其位于荒漠带东部的的水分条件较好,造成了两者之间的差异^[47]。沙冬青属植物的分布范围会受气候变化的影响,随着时间推移,该属的两个物种分布会进行不同程度的减少或扩张^[48]。沙冬青属植物在 2050 年(RCP4.5 和 RCP8.5)的最佳适生区及高适生分布相比,在高等 CO₂ 浓度下(RCP8.5)最佳适生区及高适生范围有所缩减,呈现破碎化分布,这可能受我国气候整体呈现变暖、变湿的影响^[49];也进一步说明了沙冬青属植物未来分布是受到其主导环境变量水分及温度的影响。

在调查中我们发现,仅利用环境变量预测沙冬青属植物的潜在分布还存在一定的误差,实际上在我国西北干旱区人为活动、土壤养分等也会影响沙冬青属植物的生长与分布;目前在人烟稀少的沙地和黄河滩前平原分布较多,且长势较好,群落更新较快;然而在靠近矿区、铁路及放牧区等被破坏较为严重,仅剩年龄较大的沙冬青属植物存在,这说明人为破坏因素成为沙冬青属植物分布区日渐缩减的主要因素之一。通过 3 种模型预测,沙冬青属植物目前的分布主要在我国西北干旱半干旱地区,其中沙冬青在我国内蒙古西部及宁夏北部地区分布最为集中,矮沙冬青仅在我国新疆喀什地区南部昆仑山与帕米尔交界的狭长地带分布集中^[50],研究结果对沙冬青属自然保护区建立及其应用治理环境问题具有十分重要的意义。

4 结论

研究结果表明当代沙冬青最适生区主要集中在内蒙古中部、宁夏和甘肃等地;未来沙冬青最适生区在内蒙古中部、宁夏北部和甘肃北部呈现向外扩张的趋势。矮沙冬青最适生区主要集中在新疆南部;未来矮沙冬青最适生区向新疆乌恰县南部、乌鲁木齐北部移动和扩大。未来气候环境变化将极大的影响植物的分布,在 2050 年 CO₂ 浓度为 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,沙冬青属植物的潜在适生区面积都有所增加,但在高浓度 CO₂ (RCP8.5) 情景下,沙冬青属植物在最佳及高适生区将减少,建议对沙冬青属植物最佳及高适生区建立自然保护区。影响沙冬青分布的主要环境变量是年均温、最冷月最低温和最冷季度的平均降水量;影响矮沙冬青分布的主要环境变量是最冷季度的平均降水量、最湿月降水量和温度季节性变化。

参考文献 (References):

- [1] 谭雪,张林,张爱平,王毅,黄丹,伍小刚,孙晓铭,熊勤犁,潘开文. 孑遗植物长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)分布格局对未来气候变化的响应. 生态学报, 2018, 38(24): 8934-8945.

- [2] Kozak K H, Graham C H, Wiens J J. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23 (3): 141-148.
- [3] 高斌. 生物多样性适应气候变化的途径研究. *科技展望*, 2016, 26(6): 314-314.
- [4] IPCC. *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.
- [5] 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.
- [6] 刘文胜, 游简龄, 曾文斌, 齐丹卉. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测. *中国草地学报*, 2018, 40(5): 43-49.
- [7] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//*Proceedings of the 21th International Conference on Machine Learning*. New York: ACM, 2004, 21: 83-83.
- [8] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟. *生态学报*, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [9] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90-98.
- [10] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. *生物学通报*, 2015, 50(11): 9-12.
- [11] Nix H A. A Biogeographic Analysis of Australian Elapid Snakes. In: Longmore, R., Ed., *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. Australian Flora and Fauna Series Number 7. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1986: 4-15.
- [12] Busby J R. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6(1): 8-9.
- [13] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity & Conservation*, 1993, 2(6): 667-680.
- [14] 孙杰杰, 江波, 朱锦茹, 吴丹婷, 叶诺楠, 邱浩杰, 袁位高, 吴初平, 黄玉洁, 焦洁洁, 沈爱华. 应用生态位模型预测檫木在浙江省的潜在适生区与主导环境因子. *东北林业大学学报*, 2020, 48(2): 1-6.
- [15] 陈陆丹, 胡苑, 李单琦, 程冬梅, 钟爱文. 珍稀濒危植物野生莲的适生分布区预测. *植物科学学报*, 2019, 37(6): 731-740.
- [16] 闫东, 刘冠纯, 候芝林, 康东梅, 杨顺林, 兰晓宇. 利用两种生态位模型预测长爪沙鼠鼠疫源地动物间疫情潜在风险. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2020, 31(1): 12-15.
- [17] 马毓泉. *内蒙古植物志-第三卷(第三版)*. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1989: 188-190.
- [18] 刘家琼, 邱明新, 杨堃, 石庆辉. 沙冬青植物群落研究. *中国沙漠*, 1995, 15(2): 109-115.
- [19] 王庆锁, 李勇, 张灵芝. 珍稀濒危植物沙冬青研究概况. *生物多样性*, 1995, 3(3): 153-156.
- [20] 高见. 荒漠珍品——沙冬青. *中国野生植物资源*, 2001, 20(4): 34-34.
- [21] 刘媛心. *中国沙漠植物志-第二卷*. 北京: 科学出版社, 1987: 178-180.
- [22] Jin M, Guo M Y, Yue G Z, Li J L, Yang S Y, Zhao P S, Su Y H. An unusual strategy of stomatal control in the desert shrub *Ammopiptanthus mongolicus*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 125: 13-26.
- [23] 刘果厚. 阿拉善荒漠特有植物沙冬青濒危原因的研究. *植物研究*, 1998, 18(3): 341-345.
- [24] 中国科学院中国植物志编辑委员会. *中国植物志(第 42 卷第 2 分册)*. 北京: 科学出版社, 1998: 394-397.
- [25] Ge X J, Yu Y, Yuan Y M, Huang H W, Cheng Y. Genetic diversity and geographic differentiation in endangered *Ammopiptanthus* (Leguminosae) populations in desert regions of Northwest China as revealed by ISSR analysis. *Annals of Botany*, 2005, 95(5): 843-851.
- [26] 李新蓉, 谭敦炎, 郭江. 迁地保护条件下两种沙冬青的开花物候比较研究. *生物多样性*, 2006, 14(3): 241-249.
- [27] 段义忠, 杜忠毓, 亢福仁. 西北干旱区子遗濒危植物蒙古沙冬青群落特征及与环境因子的关系. *植物研究*, 2018, 38(6): 834-842.
- [28] 王雪, 周佳熠, 孙会改, 禹瑞敏, 高飞, 周宜君. 新疆沙冬青基因组调查测序与基因组大小预测. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(1): 143-149.
- [29] 周启龙, 王立, 廖空太, 杨国洲, 王大为. 北碚山沙冬青种群分布格局与群落特征. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 302-305, 312-312.
- [30] 王祯又, 王洁. 矮沙冬青濒危原因及保护策略研究进展. *现代农业科技*, 2016, (13): 187-187, 190-190.
- [31] 赵鹏, 雍晓鹏, 胡国臣, 吕婷, 焦培培. 濒危植物新疆沙冬青遗传多样性的 RAPD 分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3): 74-79.
- [32] 任美艳, 唐宽刚, 薛敏, 郭慧琴, 王茅雁. 沙冬青 AmNAC3 转录因子基因在抗旱性和抗寒性中的功能鉴定. *中国生物工程杂志*, 2019, 39(8): 32-39.
- [33] 陶波, 方梅, 张嘉男, 欧宇文, 贾宁. 沙冬青种子总黄酮测定方法及纯化工艺研究. *生物技术通报*, 2017, 33(5): 63-70.
- [34] 李杰, 张军, 刘陈立, 张涵. 基于 MODIS-NDVI 的云南怒江流域植被覆盖时空变化特征研究. *林业资源管理*, 2018, (4): 90-99.
- [35] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634(SPI.1): 1326-1334.
- [36] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- [37] Zhang M G, Slik J W F, Ma K P. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of

- China. Scientific Reports, 2016, 6(1): 22400.
- [38] 曹向锋. 外来入侵植物黄顶菊在中国潜在适生区预测及其风险评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [39] 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.
- [40] 宋花玲, 贺佳, 虞慧婷, 李玲. 应用 ROC 曲线下面积对两相关诊断试验进行评价和比较. 第二军医大学学报, 2006, 27(5): 562-563.
- [41] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [42] 岳茂峰, 冯莉, 田兴山, 杨彩宏. 基于 MaxEnt 的入侵植物刺轴含羞草的适生分布区预测. 生物安全学报, 2013, 22(3): 173-180.
- [43] 张文秀, 寇一翻, 张丽, 曾卫东, 张志勇. 采用生态位模拟预测濒危植物白豆杉 5 个时期的适宜分布区. 生态学杂志, 2020, 39(2): 600-613.
- [44] 李晓燕, 廖里平, 高永, 党晓宏, 尉迟文思, 程波, 张岑. 沙冬青属植物研究进展. 草地学报, 2017, 25(5): 921-926.
- [45] Ghini R, Hamada E, Angelotti F, Costa L B, Bettio W. Research approaches, adaptation strategies, and knowledge gaps concerning the impacts of climate change on plant diseases. Tropical Plant Pathology, 2012, 37(1): 5-24.
- [46] 刘美, 吴世新, 潘伯荣, 王丹. 中国沙冬青属植物的地理分布及生境特征. 干旱区地理, 2017, 40(2): 380-387.
- [47] 李昌龙, 尉秋实, 李爱德. 孑遗植物沙冬青的研究进展与展望. 中国野生植物资源, 2004, 23(5): 21-23.
- [48] 吴建国. 气候变化对我国 7 种植物潜在分布的影响. 广西植物, 2011, 31(5): 595-607, 694-694.
- [49] 张兴旺, 李焱, 谢艳萍, 包先明, 方炎明. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 31-41.
- [50] 石丽丽, 蒋志荣, 方向文. 新疆沙冬青 (*Ammopiptanthus nanus*) 和蒙古沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 叶片解剖特征及抗旱性. 中国沙漠, 2018, 38(1): 157-162.