

气候变化下沙冬青适宜分布区预测

牛若恺,高润红*,侯艳青,王旭东,王彩鑫

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要:通过 135 个地理分布数据,利用 MaxEnt 生态位模型,选择 19 项环境因子预测沙冬青未来的分布格局及面积。结果表明:1)模型模拟的训练集和测试集的 AUC 值分别为 0.990 和 0.988,模型的预测结果可靠;2)沙冬青主要分布于内蒙古西部地区、宁夏北部、甘肃东部地区以及蒙古国南部;3)模型模拟当前沙冬青的分布面积为 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$,模拟 2050 年沙冬青的分布面积为 $9.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,沙冬青分布范围和种群面积将呈增加趋势;4)影响沙冬青分布的主要因子为最冷季降水量、最冷月最低气温、最热季降水量、年平均气温、最湿月降水量和年降水。研究结果不仅提供了沙冬青适生分布的划分,也为沙冬青调查与监测提供了重要的科学基础。

关键词:MaxEnt;沙冬青;物种分布;气候变化

中图分类号:S793.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)01-0102-06

Prediction of the Geographic Distribution of *Ammopiptanthus mongolicus* under Climate Change

NIU Ruo-kai, GAO Run-hong*, HOU Yan-qing, WANG Xu-dong, WANG Cai-xin

(College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: *Ammopiptanthus mongolicus* is the only evergreen broad-leaved shrub in the desert areas of Asia. It is of great scientific value to predict the potential distribution area and suitable distribution area of this plant species. Based on 135 geographical distribution data, 19 environmental factors were selected by MaxEnt niche model to predict the future distribution pattern and area of *A. mongolicus*. The results show that 1) the AUC values of training set and test set simulated by the model were 0.990 and 0.988, indicating the reliable results of MaxEnt model. 2) *A. mongolicus* was mainly distributed in Western Inner Mongolia, Northern Ningxia, Eastern Gansu and Southern Mongolia. 3) The current distribution area of *A. mongolicus* was $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, and the distribution area of *A. mongolicus* in 2050 would be $9.1 \times 10^5 \text{ km}^2$. The distribution range and area would increase in the future. 4) The main climatic factors affecting the distribution of *A. mongolicus* were the precipitation in the coldest season, the lowest temperature in the coldest month, the precipitation of the hottest season, the annual mean temperature, the precipitation of the most humid month, and annual precipitation. The results of this study not only provide the division of the suitable distribution of *A. mongolicus*, but also provide important scientific significance for the investigation and monitoring of *A. mongolicus*.

Key words: MaxEnt; *Ammopiptanthus mongolicus*; species distribution; climate change

荒漠植物作为戈壁、沙漠地区的主要生物种质资源,是荒漠生态系统的重要组成部分^[1]。沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 是第三纪孑遗植物,属于豆科 (Leguminosae) 沙冬青属 (*Ammopip-*

收稿日期:2020-01-02 修回日期:2020-07-18
基金项目:国家自然科学基金(31760120)。
作者简介:牛若恺。研究方向:荒漠植物调查。E-mail:1005199271@qq.com
* 通信作者:高润红,教授,博士生导师。研究方向:生态学与生物多样性保育。E-mail:grhzwdm@163.com

tanthus),是唯一在亚洲中部荒漠地区分布的常绿阔叶灌木^[2],目前已经被列为国家三级护植物^[3]。沙冬青主要生于河滩边台地、沙质、覆沙型沙质和石质荒漠,常常见于山前阳坡方向、平原河床附近形成连续分布的群落,为良好的固沙物种^[4]。在沙冬青生长地的周围地表通常覆有薄沙,厚度 5~25 cm,与绵刺、梭梭、白刺、木本猪毛菜、霸王、裸果木等形成典型的荒漠群落,并多数处于固定半固定状态,是集观赏、绿化以及蒙医药用为一体的十分重要的资源植物^[5]。如今,由于气候、地理变迁、人为干扰以及其他自身影响,沙冬青的种群数量日益减少,分布面积逐渐缩小^[6]。沙冬青一方面是干旱地区生态环境恢复与保护的重要物种,另一方面也是荒漠地区造林的优良物种,这也就造成了沙冬青在保障整个荒漠区生态平衡与生态环境的重要作用,故明确沙冬青的潜在分布区对我国荒地区域治理以及荒漠地区防护林构建来说具有十分重大的指导意义^[7]。近年来,有专家对沙冬青在我国的潜在分布进行了相关研究,马松梅等^[8]分析整理了沙冬青与矮沙冬青的物种群分布信息,并且模拟了 2 个物种在中国的潜在分布以及潜在分布与气候因子之间的关系。但是该研究只是依靠分布信息模拟了当前气候下沙冬青的地理分布以及环境因子影响,并未对沙冬青的当前面积以及沙冬青在未来气候条件下的扩散程度和适宜生境变化等进行研究和探讨。

物种分布模型(species distribution model, SDM)是一种用于研究模拟物种分布的模型,这种模型常常被用于研究某物种的潜在分布及适宜生境变化和气候变化^[9]。MaxEnt 最大熵模型则是众多物种分布模型中使用最为广泛的一种。S. J. Phillips *et al*^[10]最初利用 MaxEnt 对 6 个不同区域中哺乳动物、鸟类、爬行动物以及植物等类群的 266 个物种进行了模拟测试,并在不断测试中修正了模型的参数,证实了模拟结果物有效。足够真实的点位数据以及准确的研究区环境数据才是能使模拟成功的关键因子。在相同的环境因子条件下,基于最大熵算法的 MaxEnt 模型一般能够模拟得到较好的结果,通过不断试验,发现即使在物种分布点位信息比较少的情况下进行模拟结果依然较为准确^[11]。

近年来,随着模型的不断完善和普及,人们陆续开始使用 MaxEnt 模型对入侵种^[12-13]、濒危种与生物多样性的保护^[14-16]、预防病虫害^[17-19]等领域进行了研究。其中模型运用于干旱区植物适宜生境分布方面也得到了多次成功的结果,从而也证实了对于干旱区物种分布研究在该模型的可靠性。对于中国西北部的干旱区来说,陆地生态系统对气候变化特

别敏感,气候变化必然对该类地区产生影响。亚洲中部干旱区地形多变,不同生态环境类型并存,如果不对其进行保护,原本的环境极易遭到破坏,从而导致物种濒临灭绝。本研究基于马松梅等^[8]研究基础上使用 MaxEnt 模型,利用最新获取的沙冬青种群分布信息及 WorldClim 环境因子数据模拟当前气候条件和未来气候条件下的沙冬青潜在分布,分析其适宜分布区与 19 种环境因子之间的关系,探讨影响沙冬青分布的主要环境因子,更进一步揭示沙冬青的种群扩散程度和适宜区变化,从而为以后制定荒漠地区生态环境的保护管理办法与工程实施提出参考意见。

1 材料与方法

1.1 数据来源

所用的沙冬青地理分布数据主要来自于:1)国内外公开发表的有关沙冬青的文献和研究以及查阅记载沙冬青的书籍;2)2002—2019 年数次野外调查用 GPS 所记录的经纬度和海拔信息;3)中国数字植物标本(<http://www.cvh.org.cn>)、中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/>)和全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org/>)。

选取 WorldClim 世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>)的 19 项环境因子(表 1),当前气候因子为 1980—2010 年的多年平均值,未来气候因子分别为 2050 年(2041—2060 年平均值),分辨率为 30"(1 km)。所使用矢量属均来自中国资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)。

1.2 MaxEnt 运行原理

模型软件为 MaxEnt3. 4. 1,统计软件为 Excel 2010 和 R 语言 3. 6. 1,以及 ArcGIS10. 2。MaxEnt 模型是基于最大熵原理而运行的,其原理是利用物种的地理分布信息和环境因子数据,通过计算得出该物种物种概率分布的最大熵,以最大熵为基础得到物种潜在分布的概率,从而绘制潜在分布图形。

1.3 气候变量的选择

从数据属性角度分析 19 个 bio 因子分别为关于和降水量的 2 种因子,数据彼此之间存在着很强的共线性,为了排除由于环境因子数据变量之间的相互影响,产生重复无作用的加权,所以使用方差膨胀因子(VIF)法分析减少多重共线性。除去 VIF 值 >10 的变量,将剩余变量作为建模所用的变量。再对 19 个 bio 因子进行 Spearman 相关性分析,结合 VIF 结果确定最终建模所用变量。

1.4 MaxEnt 模型运行

首先需要汇总好的沙冬青分布点位数据在 Ex-

cel 中,第 1 栏为 specie;第 2 栏为 lon;第 3 栏为 lat。将数据汇总好以后另存为 MaxEnt 可以识别的 csv 文件。其次将所有环境变量数据使用 ArcGIS10.2 将图层掩膜为自己想要的范围,然后输出为 ASCII 格式文件,其中要确保所有使用建模中的环境变量范围一致。最后在设置中,随机取 75% 的地理分布数据作为训练集,将剩余的 25% 地理分布数据作为测试集。

表 1 沙冬青地理分布评价所需指标

Table 1 Indexes for the evaluation of the geographical distribution of *A. mongolicus*

数据简称	描述
bio1	年平均气温/℃
bio2	平均日较差/℃
bio3	等温性
bio4	气温季节性变动系数/℃
bio5	最热月的最高气温/℃
bio6	最冷月的最低气温/℃
bio7	气温年较差/℃
bio8	最湿季平均气温/℃
bio9	最干季平均气温/℃
bio10	最热季平均气温/℃
bio11	最冷季平均气温/℃
bio12	年降水量/mm
bio13	最湿月降水量/mm
bio14	最干月降水量/mm
bio15	降水量的季节性变化
bio16	最湿季降水量/mm
bio17	最干季降水量/mm
bio18	最热季降水量/mm
bio19	最冷季降水量/mm

MaxEnt 与其他物种分布模型一样也是采用 AUC (Area Under receiver operating character Curve)值进行模型精度检验,AUC 值是 ROC(Receiver Operating characteristic Curve)曲线下的面积。AUC 值的范围为 $0 \leq AUC < 1$,AUC 值 < 0.6 表示预测结果无效; $0.6 \sim 0.7$ 表示预测结果差; $0.7 \sim 0.8$ 表示预测结果一般; $0.8 \sim 0.9$ 表示预测结果良好;预测结果越接近 1.0,表示预测结果越完美。将模型重复运行 10 次以便减少一次性建模的不稳定性。

1.5 沙冬青潜在分布区分类

将 MaxEnt 模拟结果所生成的 ASCII 文件加载到 ArcGIS10.2 中进行重分类,绘制沙冬青在当前、2050 年(2041—2060 年)的潜在分布图。按照已选择的类别分为 4 个不同适宜生长区级别,分别为: $0 \sim 0.4$ 为非适宜生长区, $0.4 \sim 0.6$ 为差适宜生长区, $0.6 \sim 0.8$ 为中适宜生长区, $0.8 \sim 1$ 为优适宜生

长区。将 3 种时间段下的沙冬青潜在分布区重分类结果进行面积计算,以当前气候条件下各个适生区分布面积为基础,对比未来 2 种气候下沙冬青潜在分布区面积变化,得出在气候变化下沙冬青的分布趋势走向。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测结果检验

ROC 曲线分析法是通过计算曲线下 AUC 值来判断模型模拟的精确度,AUC 值越接近于 1 则说明预测结果越准确。本研究预测结果:训练集和测试集所得的 AUC 值分别为 0.990 和 0.988(图 1),表示预测结果准确有效,此次分析结果与沙冬青实际分布情况相似度极高,适用于沙冬青的适生区划分研究。

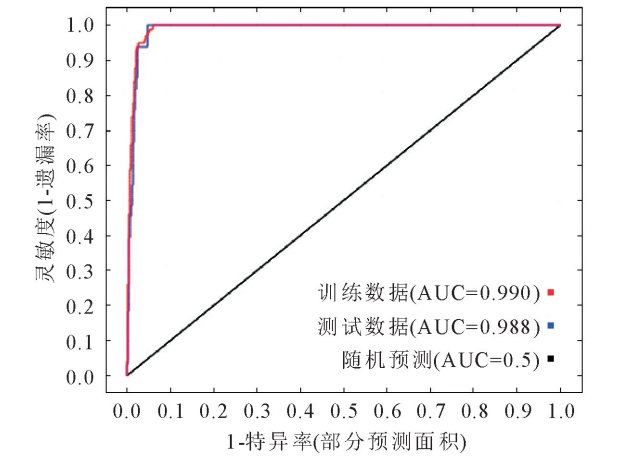


图 1 MaxEnt 模型中沙冬青 ROC 曲线
Fig. 1 Receiver operating characteristic curve of *A. mongolicus* in MaxEnt model

2.2 沙冬青分布数据

通过整理得到 322 条数据,去除重复的点位分布数据、无地理定位信息的数据以及人工栽培沙冬青林的数据。使用 Google Earth 对仅有在地图中的分布点没有具体经纬度信息的数据进行坐标确认,最后得到模拟使用的沙冬青样点 134 个(图 2)。

2.2 气候环境因子筛选结果

一方面通过方差膨胀因子(VIF)分析,VIF 值 > 10 的 4 个因子为:bio3(等温性)、bio4(气温季节性变动系数)、bio6(最冷月的最低气温)和 bio18(最热季降水量);另一方面通过 Spearman 相关分析对 Spearman 相关系数 < 0.75 的变量进行保留获得 9 个环境变量:bio1(年平均温度)、bio2(昼夜温差月均值)、bio4(气温季节性变动系数)、bio10(最暖季度平均温度)、bio12(年平均降水量)、bio13(最湿月份降水量)、bio15(雨量变化方差)、bio17(最干季度降水量

和)bio19(最冷季度平均降水量)。结合二者的分析结果选取 12 个环境因子进行模拟分析。

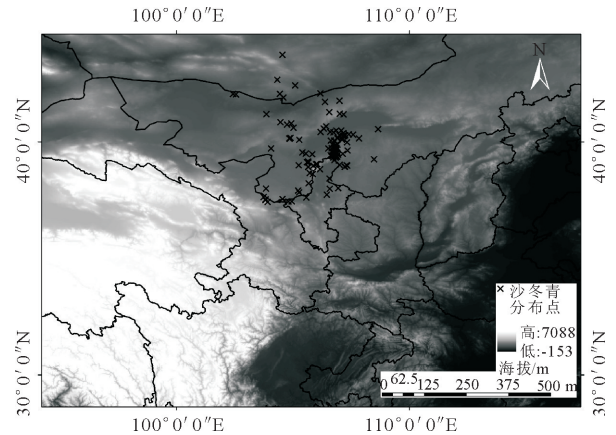


图 2 沙冬青地理分布

Fig. 2 Distribution of *A. mongolicus*

利用 MaxEnt 模型模拟沙冬青潜在分布。MaxEnt 模型的迭代算法计算 12 个环境因子重要值,并且对结果进行从大到小排序。结果表明(表 2),最冷季降水量的贡献率最高(表 2),平均值为 31.4%;其次为最冷月的最低气温,平均值为 22.6%;最热季降水量和年平均气温的贡献率平均值分别为 16.1%、12.6%。这 4 个因子贡献率之和达到了 82.7%,基本可以代表气候因子对沙冬青潜在分布的影响程度。

表 2 各因子对沙冬青分布的贡献率

Table 2 Contribution rate of each factor to the distribution of *A. mongolicus*

变量	贡献率	重要值
bio19 最冷季降水量	31.4	0.2
bio06 最冷月的最低气温	22.6	33.6
bio18 最热季降水量	16.1	27.1
bio01 年平均气温	12.6	0.1
bio13 最湿月降水量	6.4	17.4
bio12 年降水量	5.6	3.6
bio03 等温性	3	2
bio15 降水量的季节性变化	1.8	14.1
bio17 最干季降水量	0.3	0
bio04 气温季节性变动系数	0.1	0.1
bio10 最热季平均气温	0.1	1.8
bio02 平均日较差	0.1	0.1

为进一步探讨沙冬青适宜生境特征,通过绘制 bio19、bio6、bio18 和 bio1 这 4 个变量各自的单变量响应曲线,分析沙冬青主要气候环境因子的适宜范围,表明 Bio19 的适宜范围为 0~12.6 mm,存在概率>0.7 的范围为 0~7 mm;Bio6 的适宜范围为 -13.80℃~-22.13℃,最优值为 -15.4℃,存在概率>0.7 的范围为 -14.39℃~-17.9℃;Bio18 的适宜范围为 36~183.21 mm,存在概率>0.7 的范

围为 101.13~118.02 mm;bio1 的适宜范围为 2.6℃~10.2℃,最优值为 8.58℃,存在概率>0.7 的范围为 7.9℃~8.75℃(图 3)。从这 4 项数据来分析,沙冬青的生境单一,仅在相同的气候条件下有大概率分布,因此也基本可以定量地描述沙冬青适宜生境的气候环境特征,也证实了沙冬青分布集中的首要原因。

2.3 气候变化下对沙冬青的分布面积变化

使用 ArcGIS 10.2 对 MaxEnt 模拟结果进行分析,绘制出沙冬青在当前、2050 年的潜在分布图(图 4)。利用 ArcGIS 可以计算出各个适生区的面积,当前沙冬青的适宜面积为 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。根据 134 个沙冬青分布数据结合 12 个环境因子,利用 Max-Ent 模型预测当前气条件下沙冬青在我国的潜在分布区统计得出:内蒙古自治区乌海市南北地区均有分布;阿拉善盟东部阿拉善左旗,最西分布地区为阿拉善盟额济纳旗温图高勒镇;鄂尔多斯市西部杭锦旗、鄂托克旗,最东分布于乌审旗;巴彦淖尔市乌拉特后旗、五原县、磴口县、乌拉特中旗。宁夏自治区分布较少,分布于中卫县、贺兰县、盐池县、罗平县、吴中县,最南分布于灵武县;甘肃省分布于民勤县、靖远县、景泰县。另外蒙古国南部也有分布,为最北端分布。其中西鄂尔多斯-东阿拉善地区分布最为集中,也是最适分布区,面积达到了 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

从当前情况来看,沙冬青分布在西北干旱地区,且范围非常广泛,在荒漠草原、沙漠和戈壁滩均有分布,一方面能防风固沙保持水土,另一方面在保持植物多样性功能上也有很大的作用,在一定程度上可以满足于西北干旱荒漠地区相关生态防护工程建设需求。

随着汽车尾气、工厂废气,焚烧化石燃料和砍伐森林所产生的大量温室气体,导致全球气候不断变暖,因此气温不断升高已经是气候变化的主要趋势。到 2050 年,在气候不断升高的情势下,沙冬青的适宜分布区依旧集中于西鄂尔多斯-东阿拉善地区,但是适宜分布面积大大增加,达到了 $9.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,最适分布区面积增加到了 $8.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。而西鄂尔多斯-东阿拉善地区地处黄河两岸,水分条件较好,地下水资源丰富,恰好适合于沙冬青这种直根系植物分布,所以该地区在生态修复和生态保护保护工作中应该优先考虑沙冬青作为绿化树种进行栽种,加大人工栽培力度,改善该地区生态环境。在模拟结果中显示,沙冬青种群有向新疆东部迁移的趋势,假设沙冬青种子可以正常传播,由于新疆东部地处天山山脉水资源较丰富,气温等条件也适合,因此沙冬青有迁移的趋势。

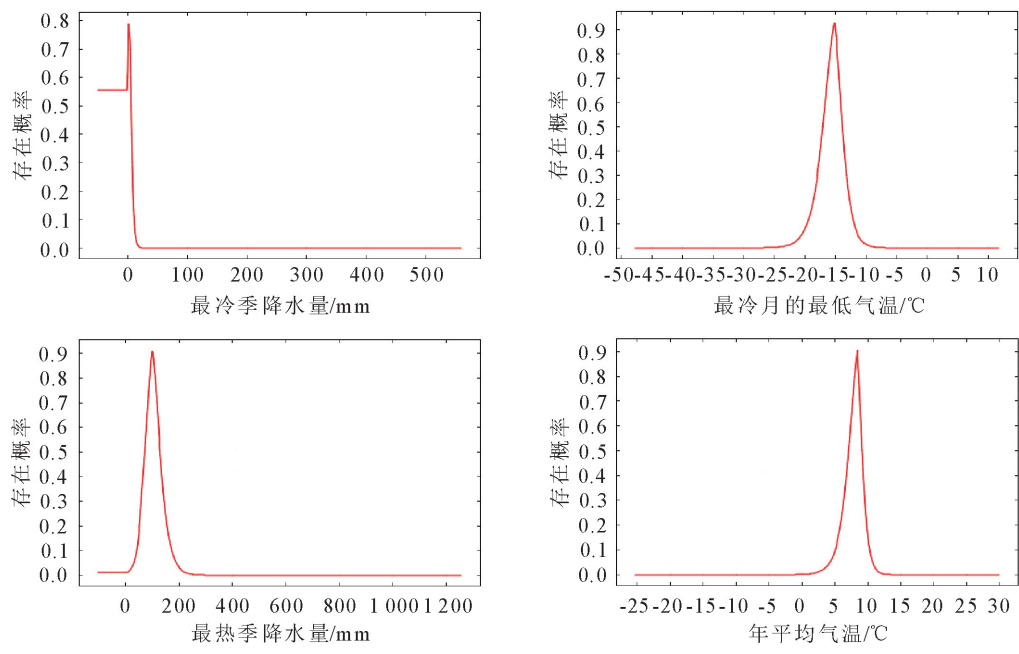


图 3 影响沙冬青分布的主导因子存在概率

Fig. 3 Probability existence of dominant factors affecting the distribution of *A. mongolicus*

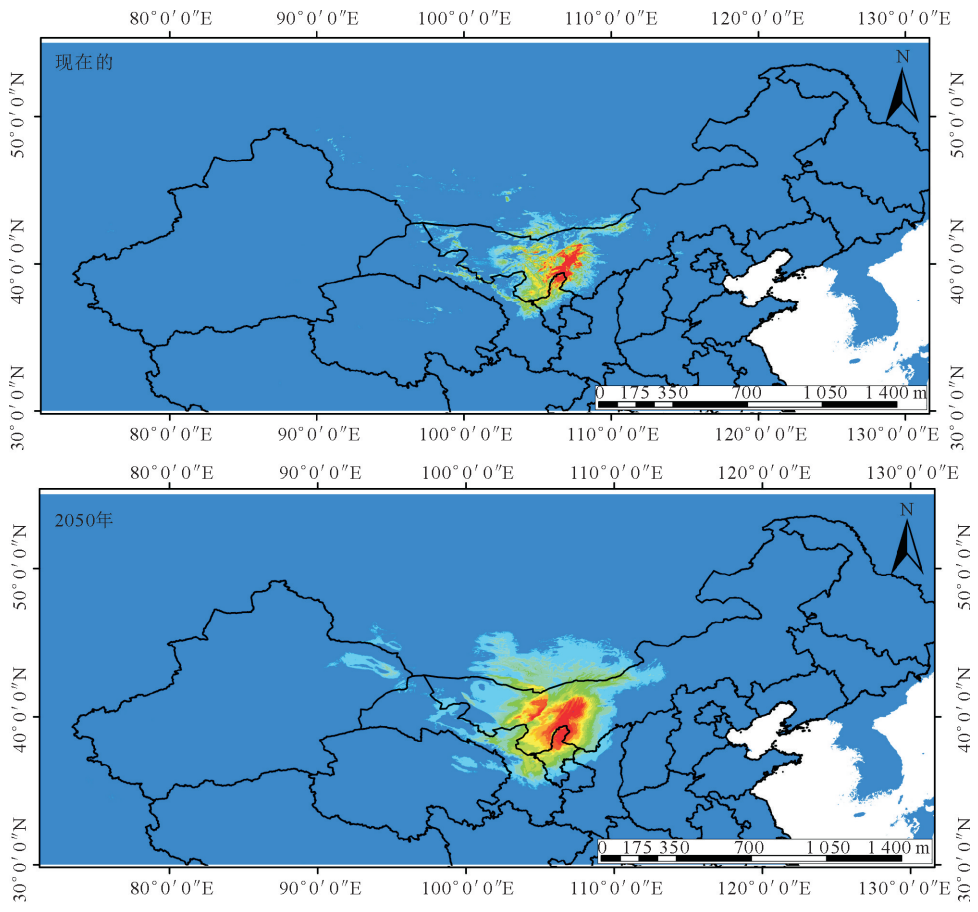


图 4 气候变化下沙冬青适宜分布区变化结果

Fig. 4 Potential distribution of *A. mongolicus* under the climate change

3 结论与讨论

模拟结果表明,训练集和测试集所得的 AUC

值分别为 0.990 和 0.988,模型的预测结果均达到优秀水平($0.95 \leq AUC < 1$),表明预测结果准确有效,此次分析结果与沙冬青实际分布情况相似度极

高。在未来气候条件变化的预设情景下,沙冬青在鄂尔多斯西部、阿拉善东部地区集中分布,适宜生境以及最适生境面积大幅增加,主要分布区包括内蒙古自治区乌海市;阿拉善盟阿拉善左旗、阿拉善盟额济纳旗温图高勒镇;鄂尔多斯市杭锦旗、鄂托克旗和乌审旗;巴彦淖尔市乌拉特后旗、五原县、磴口县和乌拉特中旗;宁夏自治区分布较少,分布于中卫县、贺兰县、盐池县、罗平县、吴中县和灵武县;甘肃省分布于民勤县、靖远县和景泰县;蒙古国南部。沙冬青生长区域广阔,当前沙冬青的适宜面积为 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$;2050 年适宜面积约为 $9.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,最适分布区面积为 $8.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。影响其分布的主导环境因子是最冷季降水量、最冷月最低气温、最热季降水量、年平均气温、最湿月降水量和年降水量。

通过 MaxEnt 模型模拟沙冬青,结果与马松梅等^[8]研究的当前沙冬青分布结果相同,而其并未对环境因子共线性进行处理,因此在主导环境因子上有部分差异。从环境因子的贡献率来看,影响沙冬青分布的主要因子是最冷季降水量、最冷月最低气温、最热季降水量、年平均气温、最湿月降水量和年降水量几个关于水热的因子,这也可以解释沙冬青分布受限制的原因。

在环境条件限制性较高的亚洲中部干旱地区,能够影响物种分布的因子非常多,气温因子、降水因子、风因子、海拔因子、土壤因子以及内陆河流分布等小环境都可以影响到物种的分布。但受限于当前数据库的条件,并没有适用于本研究关于土壤、地形等变化的数据,因此未做参考。如果加上风因子、海拔因子、土壤因子以及内陆河流分布等条件的影响,预测气候变化沙冬青分布的结果将与本研究结果有所不同。从生态学角度来说,环境因子是影响植物分布的关键因子,因此环境因子对当前和未来情景下沙冬青潜在分布的影响才是关键。

参考文献：

[1] 潘晓玲,党荣理,伍光 and 西北干旱荒漠区植物区系地理与资源利用[M]. 北京:科学出版社,2001.

[2] 刘果厚. 阿拉善荒漠特有植物沙冬青濒危原因的研究[J]. 植物研究,1998,18(3):341-345.

[3] 傅立国. 中国植物红皮书[M]. 北京:科学出版社,1992.

[4] 肖星卉. 沙冬青生态地理分布与区域环境特点分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[5] 张小燕. 西北地区植被背景值及演替规律研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2003.

[6] 麦尔哈巴·阿布拉,刘博,等. 蒙古沙冬青群落组成与结构研究

[J]. 中央民族大学学报:自然科学版,2019,28(2):12-16.

[7] 李晓燕,廖里平,高永,等. 沙冬青属植物研究进展[J]. 草地学报,2017,25(5):921-926.

LI X Y, LIAO L P, GAO Y, *et al.* Research progress on am-mopiptauthus[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(5): 921-926. (in Chinese)

[8] 马松梅,张明理,陈曦. 沙冬青属植物在亚洲中部荒漠区的潜在地理分布及驱动因子分析[J]. 中国沙漠,2012,32(5):1301-1307.

[9] ELITH J, LEATHWICK J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual Re-view of Ecology Evolution Systematics, 2009, 40(1):677-697.

[10] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259

[11] 张琳琳. 黄芩属药用植物资源适宜性评价及基因组大小测定[D]. 西安:陕西师范大学,2014.

[12] 塞依丁·海米提,努尔巴依·阿布都沙力克,阿尔曼·解思斯,等. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响[J]. 生态学报,2019,39(2):629-636.

SAYIT H, NURBAY A, ARMAN J, *et al.* Impact of human activities on potential distribution of solanum rostratum dunal in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 629-636. (in Chinese)

[13] 刘金雪. 气候变化对外来入侵植物互花米草潜在分布区的影响[D]. 南京:南京师范大学,2016.

[14] 阿尔曼·解思斯. 濒危植物裸果木(*Gymnocarpus przewalskii*)在新疆的潜在地理分布研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2019.

[15] 塞依丁·海米提,努尔巴依·阿布都沙力克,许仲林,等. 基于 MaxEnt 模型对新疆地区的蒙古沙拐枣潜在分布预测及适生性分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(4):71-77.

ASYIT H, NURBAY A, XU Z L, *et al.* Analysis of potential distribution and suitable and area of *Calligonum mongolicum* in Xingjiang based on MaxEnt model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 71-77. (in Chinese)

[16] 朱妮. 气候变化下蒙古沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)适宜生境预测[J]. 中国沙漠,2019,39(3):136-144.

ZHU N. Predicting the geographic distribution of *Calligonum mongolicum* underclimate change[J]. Journal of Dessert Research, 2019, 39(3): 136-144. (in Chinese)

[17] 周浩. 灰茶尺蠖在中国的潜在适生区预测[D]. 福州:福建农林大学,2019.

[18] 时鹏,王壮,曾辉,石娟. 低温条件下松墨天牛在我国适生区分布预测[J]. 西北林学院学报,2019,34(4):156-161.

SHI P, WANG Z, ZENG H, *et al.* Tolerance to temperature stresses on *Monochamus alternatus* and its potential range in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 156-161. (in Chinese)

[19] 陈燕婷. 湿地松粉蚧在中国的潜在适生区预测及扩散预警[D]. 福州:福建农林大学,2015.