

段义忠, 鱼慧, 王海涛, 杜忠毓. 孑遗濒危植物四合木(*Tetraena mongolica*)的地理分布与潜在适生区预测[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 337~347

Duan YZ, Yu H, Wang HT, Du ZY. Geographical distribution and prediction of potentially suitable regions of endangered relict plant *Tetraena mongolica*[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 337~347

孑遗濒危植物四合木(*Tetraena mongolica*)的地理分布与潜在适生区预测

段义忠^{1*}, 鱼慧², 王海涛¹, 杜忠毓^{3,4}

(1. 榆林学院, 陕西榆林 719000; 2. 榆阳区南郊农场, 陕西榆林 719000; 3. 宁夏大学, 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 4. 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:以孑遗濒危植物四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)为对象, 利用 MaxEnt 模型和 Bioclim 模型预测其在我国的潜在适生区, 结合刀切法及环境变量响应曲线评估影响四合木分布的主导环境因素, 运用 ArcGIS 软件自然间断法对其适生等级进行划分。结果显示: 四合木主要分布于我国新疆、西藏、甘肃、宁夏、内蒙古、青海、陕西、山西、河北、辽宁、吉林和黑龙江等省区; 在中国的适生区面积为 $1.49 \times 10^6 \text{ km}^2$, 高适生区集中在乌海市毛乌素沙地、阿拉善左旗腾格里沙漠、阴山南部和贺兰山低山地区; 2050 年四合木潜在分布区将向内蒙古地区北部和东北地区西部方向缩减; 两个模型的受试者工作特征曲线下的面积(AUC 值)平均值均达到 0.8 以上, 预测结果较准确; 环境因子评估结果显示, 影响四合木分布的主要环境因子是最冷季度的平均降水量和年温的变化范围, 其次是降水量变异系数和温度季节性变化的标准差。

关键词: 四合木; MaxEnt 模型; Bioclim 模型; 潜在适生区; 环境因子

中图分类号: Q948.15; Q949.752.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)03-0337-11

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.30337

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Geographical distribution and prediction of potentially suitable regions of endangered relict plant *Tetraena mongolica*

Duan Yi-Zhong^{1*}, Yu Hui², Wang Hai-Tao¹, Du Zhong-Yu^{3,4}

(1. Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. Yulin District Southern Farm, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The endangered relict plant *Tetraena mongolica* Maxim was studied, with the MaxEnt and Bioclim models used to predict potentially suitable regions. We used the knife-cutting method and environmental variable response curves to evaluate the dominant environmental factors affecting the distribution of *T. mongolica*. Furthermore, we used the ArcGIS natural discontinuity method to divide fitness levels. Results showed that *T. mongolica* was mainly distributed in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Tibet Region, Ningxia Hui Autonomous Region, Inner Mongolia, and the Gansu, Qinghai, Shaanxi, Shanxi, Hebei, Liaoning, Jilin, and Heilongjiang provinces in China, with a total area of $1.49 \times 10^6 \text{ km}^2$. Highly suitable zones were found in the Maowusu Sandy Land of Wuhai city, the Tengger Desert in

收稿日期: 2018-10-29, 退修日期: 2018-12-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601059)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (41601059).

作者简介: 段义忠(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事植物谱系地理研究。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: duanyizhong2006@163.com)。

the Alxa Left Banner, the southeastern part of Yinshan Mountain, and mountains in the Helan range. The potential distribution area of *T. mongolica* will be reduced to north of Inner Mongolia and western Northeast China by 2050. The Area Under Curve (AUC) average values of the two models were all above 0.8, justifying their application for predicting potential areas of *T. mongolica*. Among the 19 environmental variables, the main factors affecting the potential distribution of *T. mongolica* were average precipitation of the coldest quarter and temperature annual range, followed by the coefficient of variation of precipitation seasonality and standard deviation (SD) of temperature seasonality.

Key words: *Tetraena mongolica*; MaxEnt model; Bioclim model; Prediction of potential distribution; Environmental factors

气候是影响植被生长及物种分布的重要环境因素^[1], 据 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)报告显示, 近 130 年以来, 全球地表平均温度已上升 0.85℃, 未来地表温度将呈现持续上升趋势^[2]。全球气候的变化不仅会改变降水格局, 同时也会影响物种的分布范围。现代物种的分布在很大程度上受第四纪冰期和间冰期交替出现的影响^[3], 特别是在高山及高纬度地区^[4], 通过预测气候变化对分析物种潜在的分布格局具有十分重要的意义^[5]。生态位模型是一个以生态位理论为基础的新兴研究领域, 其原理是根据物种的实际分布地点通过一定的算法, 预测可能适合物种生存的区域^[6]。目前, 国内外常用生态位模型主要有生物种群生长模型(CLIMEX)、基于生物气候数据的 Bioclim 和 Domain 模型、生态位因素分析模型(ENFA)、遗传算法模型(GARP)及最大熵值模型(MaxEnt)等^[7]。MaxEnt 模型具有良好的准确性, 目前被广泛应用于预测物种在不同时期气候变化下的潜在分布及外来入侵物种的风险评估等^[8-11]; Bioclim 模型预测精度与物种分布数据呈现正相关, 因此非常适合物种潜在分布区域与可能性的预测。

四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.) 又称四翅, 属蒺藜科(Zygophyllaceae), 是一种较矮、分支较多、具有超强抗旱功能的小灌木, 是我国一级濒危保护植物, 享有植物界“活化石”和“大熊猫”的称号。目前四合木在全世界的分布区主要集中在我国内蒙古乌海市及其周边地区, 在俄罗斯、乌克兰也有零星分布, 其根系发达, 多生于石质低山、山前洪积扇等地, 是我国西北干旱、半干旱区恶劣环境下的重要植物, 其对于维持我国西北干旱、半干旱地区的生态系统、功能及稳定性具有重

要作用。目前国内针对四合木的研究主要有群落结构和经济价值、生态适应性^[12]、生境适宜性变化分析^[13]、分布区景观结构时空变化分析及景观动态与适宜性评价等^[14, 15]。国外分布较少, 研究内容主要集中在煤矿资源分布对四合木种群的限制^[16]、四合木干细胞积累三酰甘油(TAG)的能力^[17, 18]、花粉形态学特征^[19]、孢粉谱分析^[20]、种子脂肪酸的含量测定及分析^[21]和干旱环境下叶片解剖进化学研究^[22]。近年来, 由于全球气候变化的加剧及人类活动对自然环境干扰的增强, 四合木在我国的种群数量不断减少, 其目前在乌海市的分布总面积为 2824.31 km², 近 28 年间减少了 19.36%^[23], 其生境的退化、分布区面积的缩小, 对我国西北干旱、半干旱区生物多样性及其生态系统稳定性造成了一定的影响。鉴于此, 本研究利用 MaxEnt 和 Bioclim 两种模型, 通过预测四合木在末次间冰期(LIG)、末次冰期冰盛期(LGM)、当前时期(Current)和 2050 年的适生区, 结合刀切法及环境变量评估影响四合木分布的主导环境因素, 以期为四合木的合理保护利用、种质资源研究与开发等方面提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据采集

四合木的地理分布数据来源于目前已发表的相关文献、野外调查及中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>), 经整理后得到共计 56 个有效分布点(表 1), 其中内蒙古 53 个、宁夏 2 个、新疆 1 个。将 56 个数据按照物种名、纬度和经度顺序整理到 Excel 表格中并保存为 CSV 格式,

表 1 四合木 56 个居群分布点的地理位置
Table 1 Geographical distribution of 56 population of *Tetraena mongolica*

地区 Region	群居编号及地点 Number and location of populations	纬度 Latitude	经度 Longitude	数据来源 Data source
NMG	1. 三道坎贺兰山	38°37'19.68"N	105°51'08.68"E	CVH
NMG	2. 浩依拉呼都格	38°40'01.70"N	105°43'15.28"E	CVH
NMG	3. 呼和温都日	39°08'01.99"N	105°36'14.41"E	CVH
NMG	4. 拉僧庙 1	39°19'37.96"N	106°50'10.82"E	CVH
NMG	5. 拉僧庙 2	39°19'54.97"N	106°50'23.30"E	野外调查
NMG	6. 拉僧庙 3	39°21'57.00"N	106°53'43.00"E	文献
NMG	7. 白石架山	39°19'60.00"N	106°43'60.00"E	文献
NMG	8. 二圪塔湾	39°22'08.66"N	106°49'49.22"E	野外调查
NMG	9. 棋盘井	39°23'48.45"N	106°52'59.90"E	文献
NMG	10. 海南	39°24'03.21"N	106°44'16.99"E	文献
NMG	11. 乌达	39°25'60.00"N	106°37'00.00"E	文献
NMG	12. 乌海市黑龙贵矿区	39°27'02.00"N	106°56'09.00"E	文献
NMG	13. 三道坎黄河边	39°28'09.33"N	106°44'53.79"E	CVH
NMG	14. 乌仁都喜嘎查	39°29'26.60"N	107°08'22.14"E	CVH
NMG	15. 四合木保护区	39°29'44.00"N	106°53'11.00"E	文献
NMG	16. 阿勒达	39°30'02.85"N	105°33'14.66"E	CVH
NMG	17. 甘德尔山亚高山荒漠灌丛	39°31'60.00"N	106°50'60.00"E	文献
NMG	18. 甘德尔山四合木保护区	39°31'60.00"N	106°52'00.00"E	文献
NMG	19. 四合木自然保护区	39°32'26.51"N	106°53'48.06"E	野外调查
NMG	20. 海勃湾区高山草垫	39°33'22.61"N	106°52'07.46"E	野外调查
NMG	21. 敦德呼都格	39°33'04.01"N	105°24'15.62"E	CVH
NMG	22. 小中滩	39°34'03.58"N	106°44'28.99"E	CVH
NMG	23. 岗德格尔山	39°36'27.80"N	106°49'59.67"E	文献
NMG	24. 海勃湾区南郊	39°37'52.73"N	106°49'14.41"E	CVH
NMG	25. 千里山 1	39°38'60.00"N	106°49'00.00"E	文献
NMG	26. 千里山 2	39°51'33.75"N	106°50'12.52"E	野外调查
NMG	27. 千里山 3	39°52'48.46"N	106°54'32.97"E	野外调查
NMG	28. 海勃湾区	39°41'16.37"N	106°47'30.73"E	CVH
NMG	29. 千里山北麓	39°41'35.45"N	106°52'40.79"E	文献
NMG	30. 乌海市开发区	39°42'25.00"N	106°50'27.00"E	文献
NMG	31. 乌兰布和沙漠东北部 1	39°43'17.40"N	106°31'08.40"E	文献
NMG	32. 乌海市远郊	39°44'14.00"N	106°52'30.00"E	文献
NMG	33. 王元地附近	39°44'44.40"N	106°46'32.11"E	CVH
NMG	34. 桃司兔 1	39°46'00.00"N	106°46'60.00"E	文献
NMG	35. 桃司兔 2	40°03'05.27"N	106°46'02.62"E	野外调查
NMG	36. 黄河东岸	39°46'04.72"N	106°46'14.29"E	CVH
NMG	37. 乌兰布和沙漠东北部 2	39°53'06.00"N	106°42'15.00"E	文献
NMG	38. 乌加庙	40°06'00.00"N	107°05'60.00"E	文献
NMG	39. 杭锦旗摩林河	40°09'12.86"N	107°49'57.67"E	CVH
NMG	40. 伊克布拉克嘎查	40°09'07.00"N	106°54'44.00"E	文献
NMG	41. 巴拉贡 1	40°14'40.00"N	107°11'44.00"E	文献
NMG	42. 巴拉贡 2	40°14'58.00"N	107°05'36.00"E	文献
NMG	43. 巴拉贡 3	40°16'16.15"N	107°01'29.50"E	CVH
NMG	44. 白音恩格尔 1	40°16'14.59"N	107°11'32.15"E	野外调查
NMG	45. 白音恩格尔 2	40°17'15.32"N	107°14'52.75"E	野外调查
NMG	46. 白音恩格尔 3	44°22'19.31"N	112°22'24.45"E	CVH
NMG	47. 三盛公磴口县	40°17'49.77"N	106°59'43.65"E	CVH
NMG	48. 三盛公黄河东阶段	40°22'48.50"N	107°09'48.72"E	CVH
NMG	49. 磴口县河拐子	40°29'15.95"N	107°04'23.53"E	CVH
NMG	50. 什拉召	40°32'52.58"N	108°39'09.06"E	CVH
NMG	51. 九峰山	40°40'53.97"N	110°35'02.57"E	CVH
NMG	52. 伊肯不拉格	41°12'42.17"N	107°00'38.63"E	CVH
NMG	53. 巴音温都尔山	42°56'26.35"N	115°56'03.37"E	文献
XJ	54. 水磨沟	43°49'16.25"N	087°38'34.45"E	CVH
NX	55. 石嘴山 1	38°49'34.28"N	106°09'45.09"E	CVH
NX	56. 石嘴山 2	39°13'00.00"N	106°46'60.00"E	文献

注：NMG. 内蒙古自治区；XJ. 新疆维吾尔自治区；NX. 宁夏回族自治区。
Note: NMG. Inner Mongolia; XJ. Xinjiang Uygur Autonomous Region; NX. Ningxia Hui Autonomous Region.

以便进行潜在分布区预测。

1.2 环境和地理数据

环境数据：末次间冰期 (LIG, 120 – 140 千年)、末次冰期冰盛期 (LGM, 21 千年)、当前 (Current, 1950–2000 年) 及 2050 年 (2050 年) 采用 Worldclim 库 (<http://www.worldclim.org>) 中的 19 个生物气候变量 (表 2)。地理数据：中国地图采用国家基础地理信息系统 (<http://www.ngcc.cn/>) 1 : 400 万的矢量地图，主要包括地级市及省级以上地区。

表 2 用于 MaxEnt 模型的 19 个环境变量
Table 2 Nineteen environmental variables used in the MaxEnt ecological niche model

代码 Code	环境变量 Environment variable
Bio1	年均温 Mean annual temperature
Bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range
Bio3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7 × 100)
Bio4	温度季节性变化的标准差 SD of temperature seasonality
Bio5	最暖月的最高温 Max temperature of warmest month
Bio6	最冷月的最低温 Min temperature of coldest month
Bio7	年温的变化范围 Temperature annual range
Bio8	最湿季度平均温 Mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干季度平均温 Mean temperature of driest quarter
Bio10	最暖季度平均温 Mean temperature of warmest quarter
Bio11	最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter
Bio12	年均降水量 Annual precipitation
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
Bio15	降水量变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality
Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter
Bio18	最暖季度平均降水量 Precipitation of warmest quarter
Bio19	最冷季度平均降水量 Precipitation of coldest quarter

1.3 预测软件模型及分析方法

利用 GPS 技术及具有良好预测精度并广泛用于物种潜在分布区预测的 MaxEnt 模型和 Bioclim 模型，结合地理信息系统 (Geographic information system, GIS) ArcGIS 10.0 软件中的重分类工具，对四合木在我国的地地区分布进行模拟并划分其适生等级 (非适生区、低适生区、中适生区和高适生区)。利用 DIVA-GIS 软件的 Sample Points 工具随机选取 75% 的分布点作为训练样本，剩余的 25% 以及随机选取分布点的 10 倍作为测试样本。训练样本用于预测建模，测试样本用于模型评估^[24]。

MaxEnt 模型主要是通过满足已知的限制条件

且熵最大的情况，对未知情况不做出任何主观推测来预测一个随机事件的分布概率。将 10 组训练样本和 19 个环境变量导入 MaxEnt 模型，选择刀切法确定变量价值 (Do jackknife to measure variable importance) 和响应曲线 (Create response curves)，其余数据均为默认值。刀切法指在模型进行预测中依次减少某一种环境变量，用剩余的环境变量建模，最终使用全部的环境变量建模，迭代 500 次终止^[25]；Bioclim 模型是一种框架生态位模型，通过已知物种的气候参数，将物种的各种生态特征归纳成矩形环境包络。将 19 个环境变量转换成 “.grd” 格式文件并创建环境因子的图栈 (Stack)，再依次添加训练样本的 “.shp” 文件和 “.grs” 图栈文件，进行 Bioclim 模型的预测。

基于 MaxEnt 模型和 Bioclim 模型得到的四合木过去、现在和未来时期的适生区分布图，将得到的 “.asc” 类型文件在 ArcGIS 10.0 软件中使用 “转换工具” 中的 “ASCII 转栅格” 工具得到栅格数据，再利用重分类工具进行适生区划分^[26]。ArcGIS 10.0 软件的划分方法有很多种：例如，白栎 (*Quercus fabri* Hance) 在中国的潜在分布区面积过大且适生等级区分度不高，故选择平均间距法 (Equal Int-erval)^[27]；非洲橘硬蓟马 (*Scirtothrips aurantii* Faure) 根据适生等级指数 (概率) 大小划分为 4 个风险等级^[28]。本文选择自然断点法 (Jack-knife) 划分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区 4 类，得到四合木 4 个时期在中国的潜在适生区。根据 ArcGIS 10.0 软件加载的中国地图各等级适生区和非适生区的单元格，采用字段计算器对 4 个等级面积进行计算^[29]。

最后采用 ROC 曲线 (Receiver operating characteristic curve) 分析法评估 MaxEnt 和 Bioclim 模型的精确度，进行预测结果精度检验。目前，ROC 分析被公认为是诊断试验的最佳评价指标^[30, 31]，ROC 曲线是由横坐标为假阳性率 (1-特异度)、纵坐标为真阳性率 (1-灵敏度) 绘制而成。以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值，由此计算得到相应的灵敏度和特异度。AUC 是 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积的值。基于 56 个四合木分布点和 19 个环境因子预测四合木在中国的潜在分布区，通过 ROC 曲线分析法来评价 MaxEnt 生态位模型的精准度^[32, 33]。

2 结果与分析

2.1 生态位模型精准度预测能力评估

采用 MaxEnt 模型和 Bioclim 模型输出的 ROC 曲线可见(图 1、图 2)，两种模型的 AUC 平均值分别为 0.995 和 0.888，根据 AUC 评价指标可知，MaxEnt 模型预测结果的准确度为极好，Bioclim 模型预测结果的准确度为好，说明这两种模型均可用于预测四合木在我国的适生区，且 MaxEnt 模型相对于 Bioclim 模型更适合预测四合木的潜在适生区。

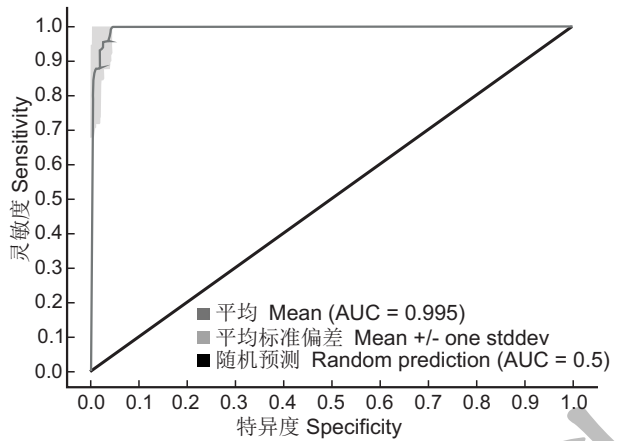


图 1 MaxEnt 模型模拟的 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curve of MaxEnt model simulation results

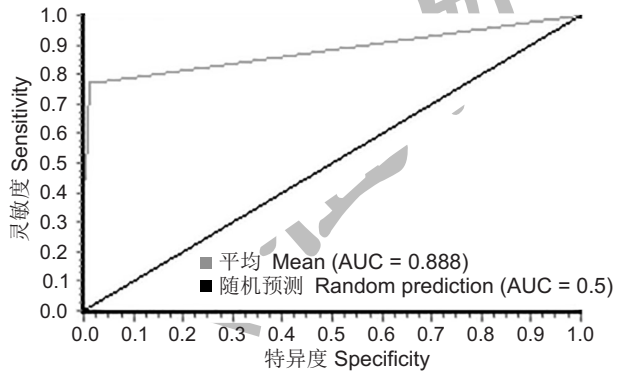


图 2 Bioclim 模型模拟的 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curve of Bioclim model simulation results

2.2 基于 MaxEnt 模型四合木在中国的适生区

基于 MaxEnt 模型预测结果，利用 ArcGIS 10.0 软件优化得到四合木在中国的潜在适生区(图 3)。在末次间冰期(图 3: C)，四合木适生区分布范围较广，主要集中在甘肃、内蒙古、甘肃酒泉等地。末次冰期冰盛期(图 3: D)，分布区域主要汇聚在内蒙古西部和新疆塔城等地区，适生区面积占全国

面积的百分比由 7.5% 缩减至 5.3%。中适生区面积占比减少 0.4%。当前时期(图 3: A)，分布区面积增加 6.03%，高适生和中适生区面积均有所增加，主要分布在阿拉善盟左旗、毛乌素沙地、阴山南部和贺兰山低山地区。

当前时期(图 3: A)四合木的适生区位于 40.71° ~ 43.81°N、87.61° ~ 110.73°E，面积为 1.49×10^6 km²，占全国总面积的 15.47%。高适生区面积 1.16×10^5 km²，占全国总面积的 1.20%，主要集中于内蒙古西南部、宁夏西北地区和甘肃中部地区；中适生区面积 2.81×10^5 km²，占全国总面积的 2.92%；低适生区面积 1.09×10^6 km²，占全国总面积的 11.35%。基于当代 56 个分布点建立气候情景模拟。2050 年(图 3: B)四合木的适生区占全国总面积的 6.13%。2050 年四合木分布范围向东北方向移动，适生区面积向鄂尔多斯市、呼和浩特市和包头市缩减，低适生区分布向西北部骤缩。甘肃、内蒙古地区不再完全适生，新疆、陕西、辽宁、吉林、甘肃等地不再适合四合木生长。2050 年四合木的分布范围将在现代基础上缩减 4.5% ~ 4.9%。

2.3 基于 Bioclim 模型四合木在中国的适生区

Bioclim 模型预测四合木在 4 个时期气候条件下的分布范围呈先增加、后减少、再增加的趋势(图 4)。与 MaxEnt 模型预测的结果基本一致，但存在一定的差异。Bioclim 模型预测得到的四合木潜在分布区多呈带状分布于内蒙古中东部且偏向于沿海地区，新疆的局部地区也有零碎分布。末次间冰期(图 4: C)高适生区分布于乌海市、杭锦旗西部和鄂托克旗，中适生区和低适生区呈团状分布于内蒙古中部地区。末次冰期冰盛期(图 4: D)，中适生区向巴彦淖尔市东北部、包头市和乌兰察布市北部推进；低适生区向锡林郭勒盟中部、新疆西北部漂移。当代时期(图 4: A)高适生区集中在乌海市地区，中适生区和低适生区呈带状分布于内蒙古中部地区。2050 年(图 4: B)高适生区和低适生区面积在贺兰山周边有小幅增加；中适生区面积减少并且向乌海市和苏尼特右旗集中。

2.4 四合木的适生分布区与环境变量的关系

MaxEnt 模型的刀切法分析与环境变量的训练集增益 (Environmental variables and its training gain) 被用于判断主导物种分布的主要环境变量因

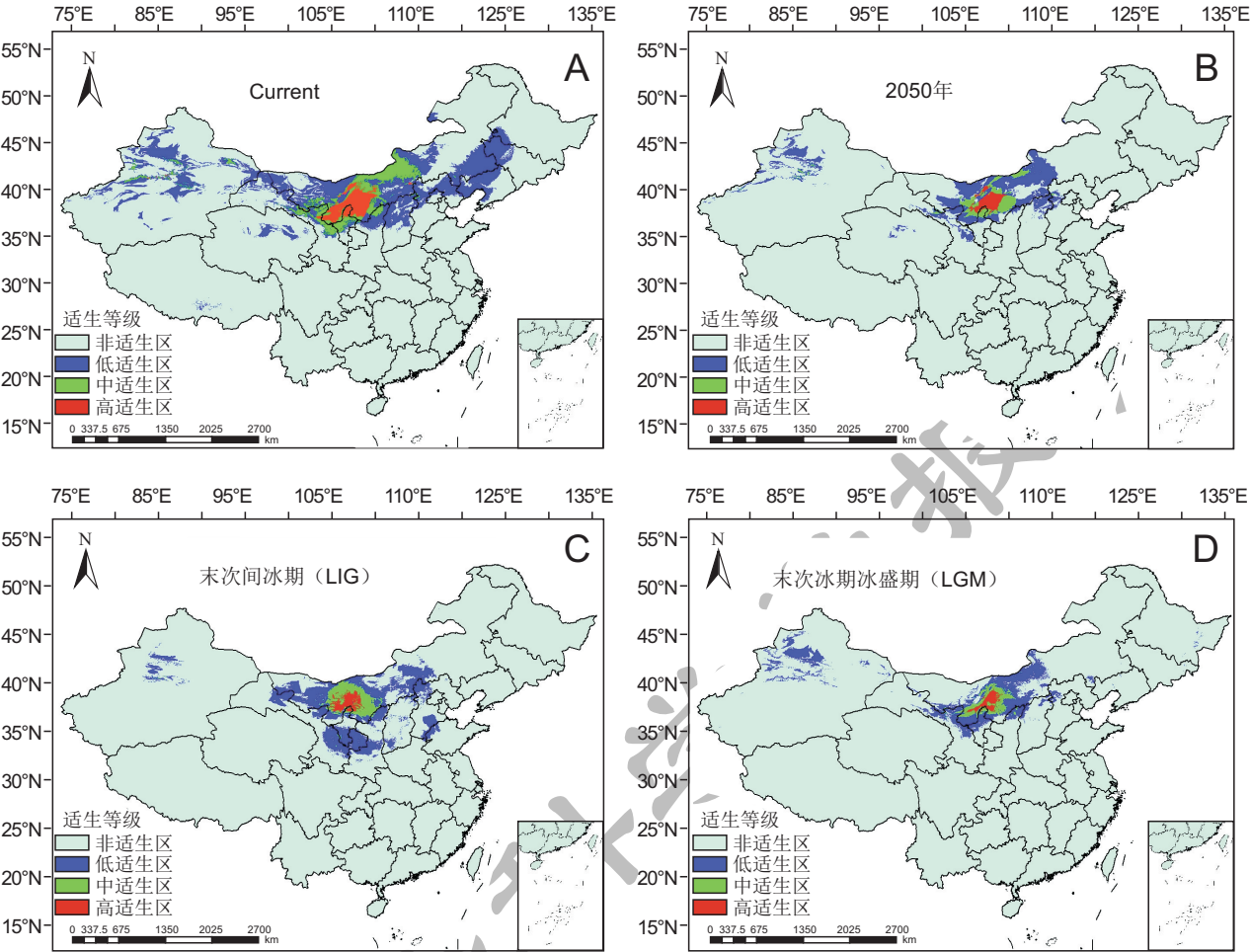


图 3 基于 MaxEnt 及 ArcGIS 预测的末次间冰期 (LIG)、末次冰期冰盛期 (LGM)、当前时期 (Current) 及 2050 年四合木的潜在分布

Fig. 3 Potential distribution map of *Tetraena mongolica* in LIG, LGM, current period, and 2050 based on MaxEnt model and ArcGIS

子。研究结果显示(图 5)，使用单变量最湿月降水量 (Bio13) 正规化训练增益最小，表明该变量对四合木现代地理分布预测重要性较小。测试增益和正规化训练增益的最大值均是最冷月的最低温 (Bio6)，训练增益超过 2.5。AUC 值最高的依次是最冷季平均温 (Bio11)、最冷月的最低温 (Bio6) 和年均温 (Bio1)，这些环境变量具有较高重要性，对数据有良好匹配性。结合贡献率分析，表明水分和温度两个环境因子对四合木适宜性分布影响最大。

对四合木适生分布区与环境变量关系的研究显示(表 3)，最冷季度的平均降水量 (Bio19)、年温的变化范围 (Bio7)、降水量变异系数 (Bio15)、温

度季节性变化的标准差 (Bio4) 的贡献率分别为 18.5%、17.1%、15.4% 和 9.9%，累积贡献率高达 60.9% 以上，正规化训练增益为 4.457。综上分析，影响四合木现代地理分布的主要气温因子为年温的变化范围 (Bio7)、年均温 (Bio1) 和最干季度平均温；主要的降水因子为最冷季度的平均降水量 (Bio19) 和降水量变异系数 (Bio15)。

利用 MaxEnt 模型绘制出主导四合木分布区的 4 个环境因子响应曲线(图 6)，可见，温度季节性变化的标准差、年温的变化范围、降水量变异系数和最冷度的平均降水量对四合木分布的影响均为单峰值，说明四合木对这些环境因子存在适应性^[26]。

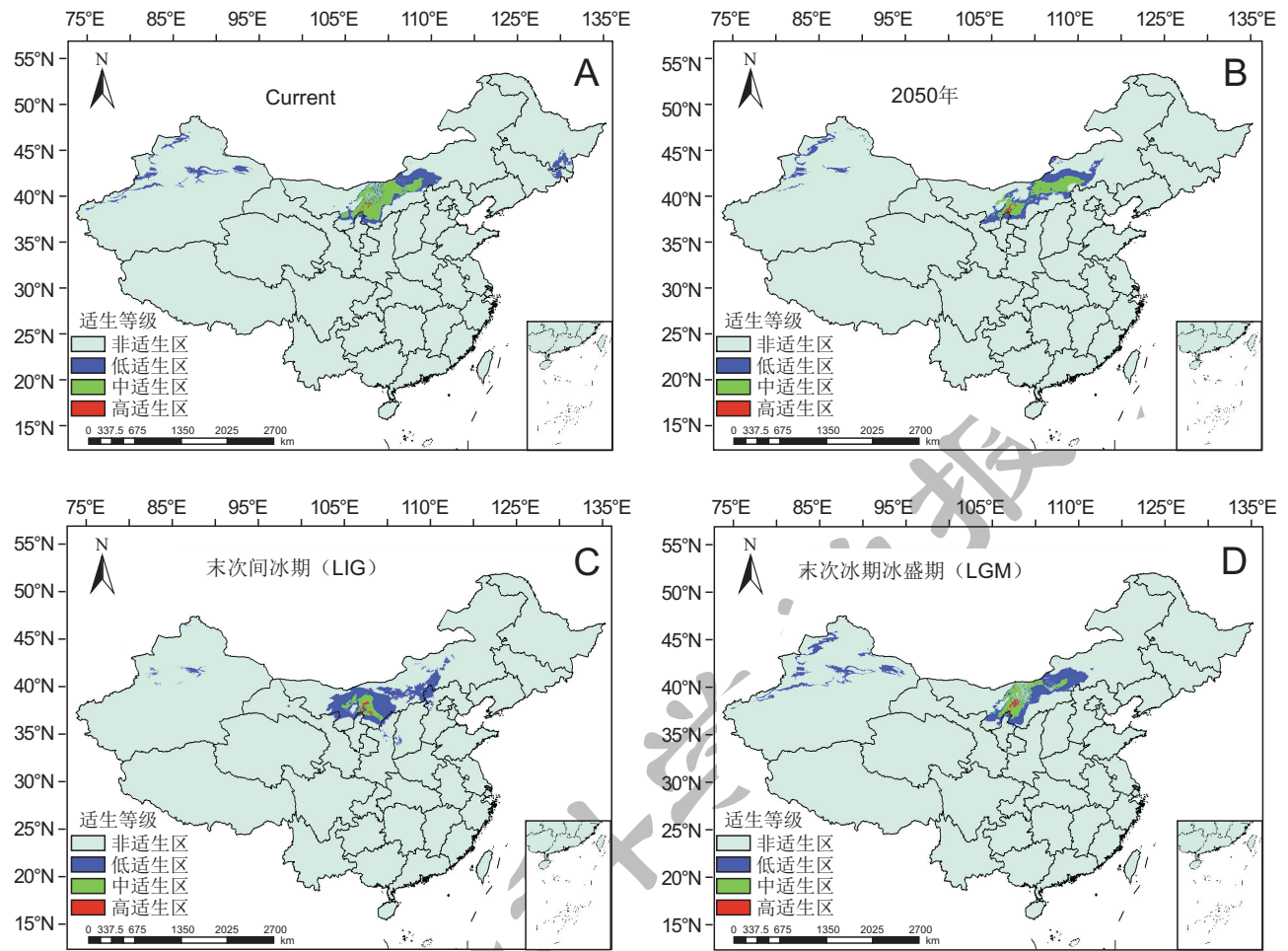


图 4 基于 Bioclim 及 ArcGIS 预测的末次间冰期 (LIG)、末次冰期冰盛期 (LGM)、当前时期 (Current) 及 2050 年四合木的潜在分布

Fig. 4 Potential distribution map of *Tetraena mongolica* in LIG, LGM, current period, and 2050 based on Bioclim model and ArcGIS

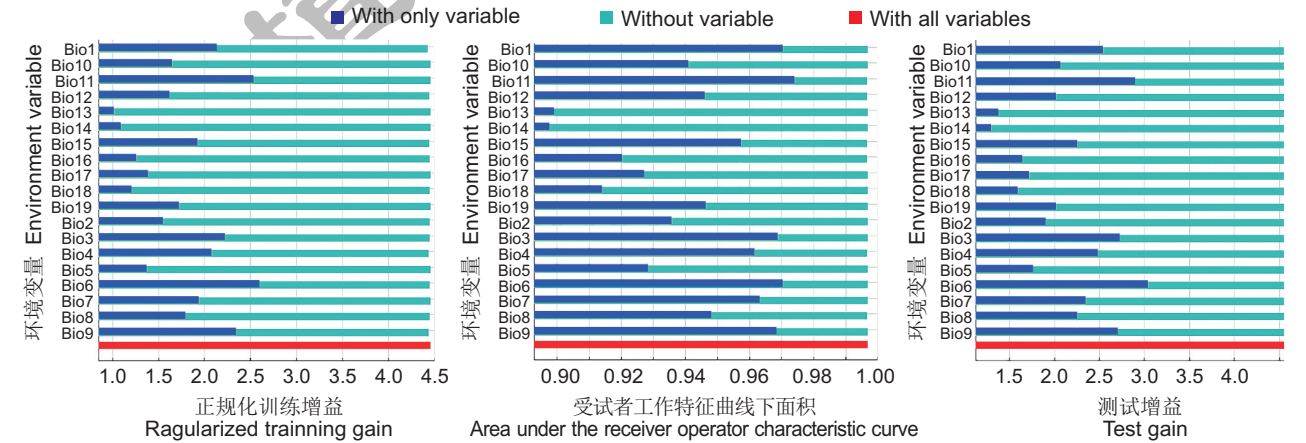


图 5 利用刀切法检测环境变量对四合木分布增益的百分比

Fig. 5 Percentage of environmental variables on gain of distribution using Jackknife test in *T. mongolica*

表 3 环境变量的贡献率、训练增益和置换重要值
Table 3 Contribution rate, training gain, and permutation importance of environmental variables

环境变量 Environment variable	变量描述 Variable description	贡献率(%) Rate of contribution	仅此变量 Only variable	置换重要值(%) Permutation importance
Bio19	最冷季度的平均降水量 Precipitation of coldest quarter	18.5	1.5471	3.1625
Bio7	年温的变化范围 Temperature annual range	17.1	1.7896	0.0051
Bio15	降水量变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality	15.4	1.2554	0.072
Bio4	温度季节性变化的标准差 SD of temperature seasonality	9.9	1.3728	0.4959
Bio12	年均降水量 Annual precipitation	8.9	1.6187	0.1622
Bio6	最冷月的最低温 Min temperature of coldest month	8.4	1.9401	0.1449
Bio9	最干季度平均温 Mean temperature of driest quarter	8.3	2.3472	44.9796
Bio1	年均温 Mean annual temperature	5.9	2.1320	35.634
Bio18	最暖季度的平均降水量 Precipitation of warmest quarter	4.9	1.7170	0.1244
Bio10	最暖季度平均温 Mean temperature of warmest quarter	1.1	1.6480	0.0043
Bio16	最湿季度的降水量 Precipitation of wettest quarter	0.9	1.3836	0.2203
Bio2	昼夜温差均值 Mean diurnal range	0.4	2.2226	0.0435
Bio8	最湿季度平均温 Mean temperature of wettest quarter	0.1	2.3472	0.316
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	0.1	1.9217	5.4499
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	0	1.0911	0.1398
Bio3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7 × 100)	0	2.0748	0.4581
Bio17	最干季度的降水量 Precipitation of driest quarter	0	1.2031	8.5873
Bio5	最暖月的最高温 Max temperature of warmest month	0	2.5963	0
Bio11	最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter	0	2.5316	0

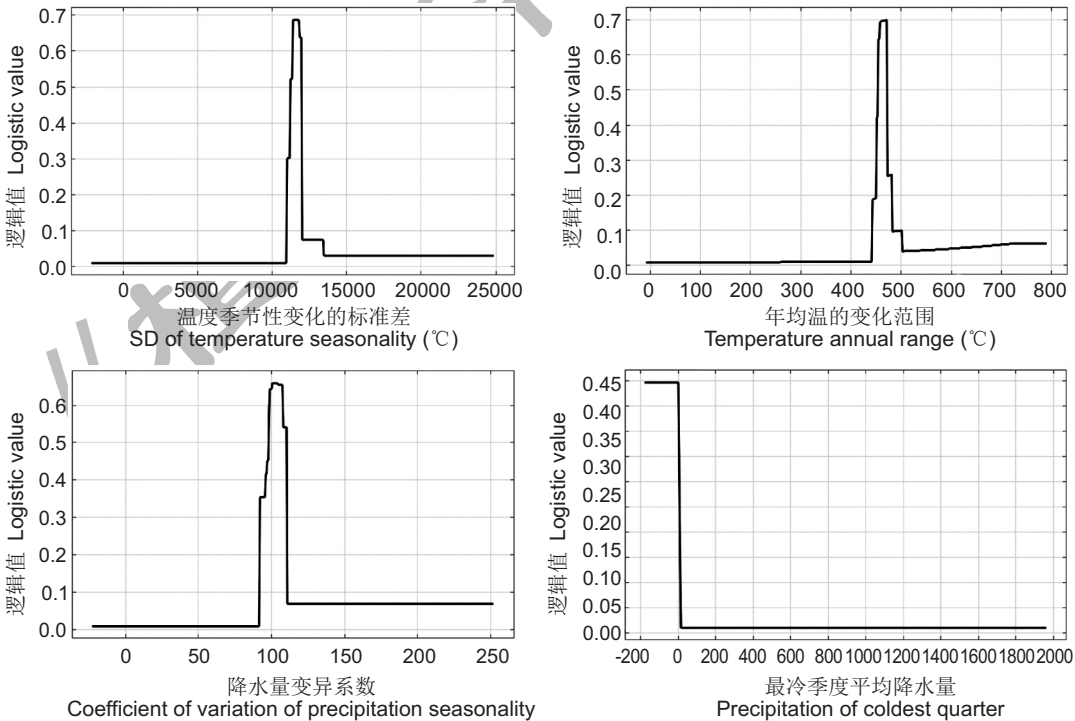


图 6 四合木分布对 4 个环境因子的响应曲线
Fig. 6 Response curve of *Tetraena mongolica* distribution to four environmental factors

3 讨论

3.1 四合木当代地理分布范围

本研究基于 MaxEnt 模型和 Bioclim 模型, 结合 ArcGIS 软件对四合木在中国的潜在适生区进行了预测。通过野外调查和软件模拟分析, 发现四合木的地理分布为狭长间断分布, 主要集中在西鄂尔多斯高原的西北部。众多当代学者认为, 现代物种的分布受距今 26500–19000 年的第四纪末次盛冰期的影响^[34]。温度对四合木的影响极大, 徐庆等^[35]对四合木种群的繁殖情况进行了研究, 发现四合木生长过程中, 环境越严酷, 其繁殖能力越强, 这就解释了四合木在我国西鄂尔多斯高原狭长分布的原因。甄江红^[15]利用 1971–2005 年气象数据对四合木数量及其适应环境能力方面进行了研究, 发现气候变化对四合木种群数量的变化有十分明显的规律, 但地形和气候不是其生长的限制因素, 真正限制其种群数量的因素是快速发展的工业及人类活动, 而目前四合木所分布的西鄂尔多斯高原也正是我国重点保护的对象, 该地区也被世界植物组织誉为“残遗植物的避难所”。

3.2 2050 年四合木在中国分布区域的变化

气候变化对物种的地理分布具有十分重要的作用, 国内外许多学者对此开展了研究。吴建国^[36]、McKenney 等^[37]、Lenoir 等^[38]、Engler 等^[39]研究一致认为, 气候变化会影响物种的分布格局, 未来不同时间段, 物种的分布区会不同程度的减少或向高海拔区域扩张。本研究中四合木在 2050 年分布区域将会减少, 当代分布区将继续向我国西北地区骤缩, 一部分将会向我国东北地区西部迁移, 这与国内外学者对全球变化与物种分布关系的研究基本一致。本研究用两种模型模拟四合木 2050 年的分布范围, 与当代气候条件下四合木的分布相比, 其将呈现破碎化分布、向东北、向西北高纬度地区迁移的趋势, 陕西、甘肃等中纬度地区将不再适宜四合木的生长, 这可能与我国未来气候整体变暖、变湿的影响有关^[40], 也与四合木的生长特性相吻合^[41]。

3.3 影响四合木潜在地理分布的气候因子

MaxEnt 分析结果显示: 温度(年均温和年温的变化范围)和降水(最冷季度的平均降水量)是影响四合木当前分布的主要环境变量。本研究基于贡

献率、置换重要值、正规化训练增益中仅此变量和除此变量外的所有变量、受试者工作曲线下面积和测试增益 6 个指标(表 4, 图 5)进行排序, 评估影响四合木潜在分布范围的主导环境变量。结果表明, 目前与温度有关的环境变量(最冷月最低温、最冷季平均温、最暖月最高温、年温的变化范围、年均温和最干季平均温)5 次位列第 1, 6 次位列第 2; 而与水分有关的环境变量(最冷季度的平均降水量)仅 1 次位列第 1。综合来看, 当代气候条件下温度的影响大于降水, 许多学者对四合木群落中其他植物的研究也得出类似结论。有研究显示, 沙生针茅(*Stipa glareosa* P. Smirn.)等针茅属植物受温度的影响要大于降水^[42]; 年平均气温与年降水量是影响豆梨(*Pyrus calleryana* Dcne.)分布的决定性因子, 年均温是首要因子, 年降水量次之^[43]。四合木作为古老孑遗种之一, 能够生存至今说明已经适应了荒漠地区水热条件的影响, 但是由于极限温度和水分等限制性环境因子的影响使其只能分布在此地区。

3.4 四合木群落及分布区保护建议

目前四合木在我国的分布地区十分有限, 仅在西鄂尔多斯高原狭长分布, 近年来也面临种群衰退、分布区域面积骤减等许多严峻的问题, 这不仅与全球气候变化有关, 同时人类活动也是影响四合木分布区骤减的一个关键因素。本研究通过对孑遗植物四合木在我国的潜在适生区分布的预测结果, 可为四合木的保护和种群发展提供一定的理论基础。我们建议应对现有四合木群落进行就地保护, 减少人类活动的破坏, 同时工厂选址等应选择远离四合木生长的地区。另外, 可对四合木进行人工培育, 使四合木珍稀资源得到更好地保存。

4 结论

研究表明, 2050 年四合木在我国的适生区面积将向东北方向缩减。影响四合木分布的主导环境因子是最冷季平均温(Bio11)和最冷季度的平均降水量(Bio19)。气候变化对四合木在我国的潜在地理分布及变化趋势产生一定的影响, 这对我国四合木的保护、引种及维持我国西北干旱、半干旱区生物多样性及生态系统的稳定性具有极其重要的作用。

参考文献:

- [1] Kozak KH, Graham CH, Wiens JJ. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology[J]. *Trends Ecol Evol*, 2008, 23(3): 141–148.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Working group I to the Fifth Assessment Report[M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 邹旭, 彭冶, 王璐, 李垚, 张往祥, 刘雪. 末次盛冰期以来气候变化对中国山荆子分布格局的影响[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(5): 676–686.
Zou X, Peng Y, Wang L, Li Y, Zhang WX, Liu X. Impact of climate change on the distribution pattern of *Malus baccata* (L.) Borkh. in China since the Last Glacial Maximum[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(5): 676–686.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 18.
- [5] 刘文胜, 游简龄, 曾文斌, 齐丹丹. 气候变化下青藏苔草地分布的预测[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(5): 43–49.
Liu WS, You JL, Zeng WB, Qi DH. Prediction of the geographical distribution of *Carex moorcroftii* under global climate change based on MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(5): 43–49.
- [6] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战[J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(11): 915–927.
Qiao HJ, Hu JH, Huang JH. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2013, 43(11): 915–927.
- [7] 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[J]. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90–98.
Zhu GP, Liu GQ, Pu WJ, Gao YB. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(1): 90–98.
- [8] 徐家文, 史家浩, 任强, 李绍勤. 基于 BIOCLIM 模型的扶桑绵粉蚧在中国的适生性分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(11): 2631–2633.
Xu JW, Shi JH, Ren Q, Li SQ. Potential distribution of *Phenacoccus solenopsis* in China by the BIOCLIM model[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(11): 2631–2633.
- [9] 艾科拜尔·木哈塔尔, 热木图拉·阿卜杜克热木, 马合木提·哈力克. 基于生态位模型的艾比湖国家级自然保护区马鹿生境评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3919–3925.
Akbar Muhtar, Rahmutulla Abdukerim, Mahmut Halik. Assessing habitat suitability for *Cervuselaphus* in the Ebinur Lake National Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3919–3925.
- [10] 付贵全, 徐先英, 马剑平, 徐梦莎, 刘江, 丁爱强. 基于 MaxEnt 下梭梭潜在地理分布对水热条件的响应[J]. *草业科学*, 2016, 33(11): 2173–2179.
Fu GQ, Xu XY, Ma JP, Xu MS, Liu J, Ding AQ. Responses of *Haloxylon ammodendron* potential geographical distribution to the hydrothermal conditions under MaxEnt model[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2173–2179.
- [11] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究[D]. 湖南: 湖南农业大学, 2007.
- [12] 杨持, 智颖飙, 征荣. 四合木种群的生态适应性[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 91–96.
Yang C, Zhi YB, Zheng R. An analysis of ecological adaptability on *Tetraena mongolica* Maxim. populations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 91–96.
- [13] 甄江红, 陈德喜, 玉山, 刘果厚. 濒危植物四合木生境适宜性变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(7): 188–195.
Zheng JH, Chen DX, Yu S, Liu GH. Habitat suitability change for endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environmen*, 2011, 25(7): 188–195.
- [14] 张云飞, 杨持, 陈家宽. 四合木(*Tetraena mongolica*)分布区景观结构时空变化分析[J]. *武汉植物学研究*, 2001, 19(1): 25–30.
Zhang YF, Yang C, Cheng JK. Spatial-temporal change of landscape structure in the distribution region of *Tetraena mongolica*[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2001, 19(1): 25–30.
- [15] 甄江红. 濒危植物四合木生境的景观动态与适宜性评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [16] Wang WF, Hao WD, Bian ZF, Lei SG, Wang XS, Sang SX, Xu SC. Effect of coal mining activities on the environment of *Tetraena mongolica* in Wuhai, Inner Mongolia, China: A geochemical perspective[J]. *Int J Coal Geol*, 2014, 132(1): 94–102.
- [17] Wang GL, Lin QQ, Xu YN. *Tetraena mongolica* Maxim. can accumulate large amounts of triacylglycerol in phloem cells and xylem parenchyma of stems[J]. *Phytochemistry*, 2007, 68(15): 2112–2117.
- [18] Weselake RJ. Industrial Oil Crops[M]. New York: AOCS Press, 2016: 413–434.
- [19] Lu KQ, Xie G, Li M, Li JF, Trivedi A, et al. Dataset of pollen morphological traits of 56 dominant species among desert vegetation in the eastern arid central Asia[J]. *Data in Brief*, 2018, 18: 1022–1046.
- [20] Lu KQ, Gan Xie, Li M, Li JF, Anjali Trivedi, David K, et al. Pollen spectrum a cornerstone for tracing the evolution of the eastern central asian desert[J]. *Quaternary Sci Rev*, 2018, 186: 111–122.
- [21] Wei XB, Xue JQ, Wang SL, Xue YQ, Lin H, Shao XF, et al. Fatty acid analysis in the seeds of 50 *Paeonia ostii* individuals from the same population[J]. *J Integr Agr*, 2018, 17(8): 1758–1767.
- [22] Lauterbach M, van der Merwe PW, Keßler L, Pirie MD, Bellstedt DU, Kadereit G. Evolution of leaf anatomy in arid environments: A case study in southern African *Tetraena* and *Roepera* (Zygophyllaceae)[J]. *Mol Phylogenet Evol*, 2016, 97: 129–144.

- [23] 王光明. 近二十年人为干扰对乌海市四合木景观格局影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [24] Vanagas G. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems[J]. *Interact Cardio Th*, 2004, 3(2): 319–322.
- [25] 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 基于最大熵生态位元模型的人入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2970–2976.
Zhang Y, Li J, Lin W, Qiang S. Prediction of potential distribution area of *Erigeron philadelphicus* in China based on MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2970–2976.
- [26] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, 50(11): 9–12.
Zhang L. Application of the MAXENT maximum entropy model in predicting the potential distribution of species[J]. *Bulletin of Biology*, 2015, 50(11): 9–12.
- [27] 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[J]. 林业科学, 2018, 54(8): 153–164.
Li X, Li Y, Fang YM. Prediction of potential suitable distribution areas of *Quercus fabri* in China based on an optimized MaxEnt model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(8): 153–164.
- [28] 王茹琳, 高晓清, 王闫利, 姜滢, 沈沾红, 林娜. 基于 Max-Ent 的非洲橘硬蓟马在全球及中国的潜在分布区预测[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 315–320.
Wang RL, Gao XQ, Wang YL, Jiang G, Shen ZH, Lin S. Potential distribution of *Scirtothrips aurantii* in China and the world predicted by MaxEnt[J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(28): 315–320.
- [29] 陈铁柱, 刘建辉, 周先建, 张美, 辜彬, 廖述吉. 基于 Max-Ent 和 ArcGIS 预测合欢潜在分布及适宜性评价[J]. 北方园艺, 2017, 41(16): 191–195.
Chen TZ, Liu JX, Zhou XJ, Zhang M, Gu B, Liao SJ. Potential distribution prediction and suitability evaluation of *Albizia julibrissin* Durazz. based on maxent modeling and GIS[J]. *Northern Horticulture*, 2017, 41(16): 191–195.
- [30] 陈林. 红火蚁 (*Solenopsis invicta*) 在我国的潜在分布研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [31] 洪波. 基于 GIS 的有害生物空间分布预测系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [32] 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[J]. 第二军医大学学报, 2006, 27(5): 562–563.
Song HL, He J, Yu HT, Li L. Area under ROC curves in evaluation and comparison of two correlated diagnostic tests[J]. *Academic Journal of Second Military Medical University*, 2006, 27(5): 562–563.
- [33] 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[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372.
Wang YS, Xie BY, Wan FH, Xiao QM, Dai LY. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 365–372.
- [34] Hewitt GM. The genetic legacy of the Quaternary ice ages[J]. *Nature*, 2000, 405: 907–913.
- [35] 徐庆, 刘世荣, 臧润国, 郭泉水, 郝玉光. 中国特有植物四合木种群的生殖生态特征: 种群生殖值及生殖分配研究[J]. 林业科学, 2001, 37(2): 36–41.
Xu Q, Liu SR, Zang RG, Guo QS, Hao YG. The characteristics of reproductive ecology of endemic species *Tetraena mongolica* population in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(2): 36–41.
- [36] 吴建国. 气候变化对我国 7 种植物潜在分布的影响[J]. 广西植物, 2011, 31(5): 595–607, 694.
Wu JG. The potential effects of climate change on the distributions of 7 plants in China[J]. *Guihaia*, 2011, 31(5): 595–607, 694.
- [37] Mckenney DW, Pedlar JH, Lawrence K, Campbell K. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees[J]. *BioScience*, 2007, 57: 939–948.
- [38] Lenoir J, Gegout JC, Marquet PA, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. *Science*, 2008, 320: 1768–1771.
- [39] Engler R, Randin CF, Thuiller W, Dullinger S. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe[J]. *Global Change Biol*, 2011, 17(7): 2330–2341.
- [40] 张兴旺, 李垚, 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[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(4): 31–41.
Zhang XW, Li Y, Xie YP, Bao XM, Fang YM. Effect of climate change on potential geographical distribution of *Sorbus amabilis*[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, 27(4): 31–41.
- [41] 孙平. 四合木 (*Tetraena mongolica*) 保护遗传学研究及三种西鄂尔多斯濒危植物微卫星标记的筛选[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [42] 杨超. 蒙古高原和青藏高原针茅属植物适宜分布区及其与气候因子的相关性[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [43] 刘超, 霍宏亮, 田路明, 董星光, 齐丹, 张莹, 等. 基于 Max-Ent 模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3696–3704.
Liu C, Huo HL, Tian LM, Dong XG, Qi D, Zhang Y, et al. Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the Max-Ent model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3696–3704.