植物资源与环境学报，2020，**29**(2)：55-68
*Journal of Plant Resources and Environment*

# 气候变化下濒危植物半日花在中国的潜在分布

段义忠[1,①]，王海涛[1]，王　驰[1]，杜忠毓[1,2]
（1. 榆林学院生命科学学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室，陕西 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，宁夏 银川 750021）

**摘要**：通过实际调查以及查阅中国数字植物标本馆、全球生物多样性信息网络和相关文献，共收集半日花（*Helianthemum songaricum* Schrenk）在中国的 58 个有效分布记录。基于 MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 模型以及 19 个环境变量，采用受试者工作特征曲线下面积（AUC）检验模型预测精度，预测末次间冰期、末次冰盛期、当代（1950 年至 2000 年）和未来（2050 年）4 个时期半日花在中国的潜在适生区，并采用刀切法（jackknife）和主成分分析法评估影响半日花潜在适生区的主导环境变量。结果显示：MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的 AUC 值分别为 0.984、0.837 和 0.962，预测精度分别为很好、一般和很好。MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的预测结果显示：当代半日花潜在适生区面积分别占中国总面积的 3.19%、7.63% 和 5.62%，主要呈破碎化和狭长间断分布，分布于内蒙古、新疆、宁夏、甘肃、陕西和山西；未来半日花潜在适生区面积分别占中国总面积的 2.95%、9.55% 和 7.09%，其中，高适生区面积分别占中国总面积的 0.42%、0.11% 和 0.49%，潜在适生区向内蒙古鄂托克旗西部和乌海市以及内蒙古阿拉善左旗东部与宁夏北部交界处骤缩。影响半日花潜在适生区的主导环境变量为温度（年均温、最冷月最低温、最热季度均温和最冷季度均温）和降水（最热季度降水量和最湿季度降水量），且温度的影响较大。

**关键词**：半日花；MaxEnt 模型；BIOCLIM 模型；DOMAIN 模型；气候变化；潜在分布

**中图分类号**：Q141；Q948.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-7895(2020)02-0055-14
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2020.02.07

**Potential distribution of endangered plant *Helianthemum songaricum* in China under climate change**

DUAN Yizhong[1,①], WANG Haitao[1], WANG Chi[1], DU Zhongyu[1,2] (1. Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Northern Shaanxi Mining Area, College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, **29**(2): 55-68

**Abstract**: There were 58 valid distribution records of *Helianthemum songaricum* Schrenk in China collected by field investigation and consulting Chinese Virtual Herbarium, Global Biodiversity Information Facility and related literatures. Based on MaxEnt, BIOCLIM and DOMAIN models and 19 environmental variables, prediction accuracy of models was evaluated by area under the receiver operating characteristic curve (AUC), potential suitable areas of *H. songaricum* in China under four periods of Last Interglacial, Last Glacial Maximum, current (from 1950 to 2000), and future (in 2050) were predicted, and dominant environmental variables affecting potential suitable areas of *H. songaricum* were evaluated by jackknife test and principle component analysis. The results show that AUC values of MaxEnt, BIOCLIM, and DOMAIN models are 0.984, 0.837, and 0.962, and their prediction accuracy is good, normal, and good, respectively. The prediction results of MaxEnt, BIOCLIM, and DOMAIN models show that areas of potential suitable areas of *H. songaricum* in current account for 3.19%, 7.63%, and 5.62% of total area of China, respectively, which mainly appear fragmented and narrow disjunction, and distribute in Inner

**收稿日期**：2019-03-08
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(41601059)
**作者简介**：段义忠(1981—)，男，内蒙古多伦人，博士，副教授，主要从事植物谱系地理方面的研究。
①通信作者 E-mail：duanyizhong2006@163.com

Mongolia, Xinjiang, Ningxia, Gansu, Shaanxi, and Shanxi. In future, areas of potential suitable areas of *H. songaricum* account for 2.95%, 9.55%, and 7.09% of total area of China, respectively, in which, areas of high suitable areas account for 0.42%, 0.11%, and 0.49% of total area of China, respectively, potential suitable areas decrease sharply to western Otog Banner and Wuhai City in Inner Mongolia, and the junction of eastern Alagxa Left Banner in Inner Mongolia and northern Ningxia. Main environmental variables affecting potential suitable areas of *H. songaricum* are temperature (annual mean temperature, the minimum temperature of the coldest month, mean temperature of the warmest quarter, and mean temperature of the coldest quarter) and precipitation (precipitation of the warmest quarter and precipitation of the wettest quarter), and the effect of temperature is bigger.

**Key words**: *Helianthemum songaricum* Schrenk; MaxEnt model; BIOCLIM model; DOMAIN model; climate change; potential distribution

全球气候变化带来的极端天气频发是21世纪生物多样性面临的主要威胁之一[1]。近100年来,全球海陆表面平均温度已经升高约0.89 ℃,未来地表温度也呈持续上升趋势[2],这会导致物种因对环境产生不同程度的不适而死亡甚至最终灭绝。了解物种适生分布区受气候变化的影响情况,可为有效开展物种多样性保护和生物学研究提供重要的理论依据和实践指导价值[3]。生态位模型是根据物种已知的实际分布和环境变量,通过一定的算法来预测物种潜在生存范围的模型[4],其模拟的是现实生态位(realized niche)和潜在生态位(potential niche)[5],并且环境变量的挑选、物种自身的迁移能力及所采纳环境变量的分辨率对模拟结果有重要影响[6]。目前,用于预测物种潜在分布的模型主要有CLIMEX[7]、GARP[8]、MaxEnt[9]、BIOCLIM[10]和DOMAIN[11]。MaxEnt模型的预测结果是栅格中某像素单元内与物种分布相关的概率值,不是某一物种分布点的"存在"概率,可以用较少的分布数据得到较为精确的预测结果[12-13];BIOCLIM模型是从已知物种分布区中提取环境因子的限制范围,再将物种的环境需求概括成环境包络的框架模型[14]8-12;DOMAIN模型是利用点之间的环境相似矩阵进行模拟预测[15]。

半日花(*Helianthemum songaricum* Schrenk)隶属于半日花科(Cistaceae)半日花属(*Helianthemum* Mill.),为半灌木或灌木[16],是亚洲中部荒漠特有种和古地中海植物区系的残遗植物,被列为稀有种[17],间断分布于新疆西北部、甘肃中北部、内蒙古西鄂尔多斯及宁夏北部等地[18]。半日花作为草原和荒漠防风、固沙的优良物种,对维持草原化荒漠区的生态系统具有重要作用[19]。已有针对半日花的研究主要包括形态、生理特性、遗传、景观生态、花粉形态性状和花粉谱等[20-25]方面。近年来,受全球气候变化以及开矿、樵采和放牧等人类活动过度干扰的影响,半日花的适生分布区域呈逐渐缩小且破碎化的趋势,其生存与发展受到严重威胁[26],植株的生长发育和繁殖均受到限制,数量日趋减少,群落自然更新困难[27]。半日花在鄂尔多斯地区的分布面积为1 123.8 $km^2$,其生境的退化和分布区面积的缩减对中国西北干旱、半干旱区生物多样性及其生态系统稳定性造成严重影响[28]。

本研究基于MaxEnt、DOMAIN和BIOCLIM 3种模型,并结合ArcGIS 10.0地理信息系统,预测末次间冰期、末次冰盛期、当代(1950年至2000年)和未来(2050年)4个时期半日花在中国的潜在适生区,以确定半日花的重点保护区域,并为其种质资源研究和开发提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 有效分布记录获取

半日花在中国分布记录的主要来源包括:1)中国数字植物标本馆(CVH,http://www.cvh.ac.cn/);2)已公开发表的相关文献;3)全球生物多样性信息网络(GBIF,http://www.gbif.org/);4)实际调查。剔除重复或错误信息,在Google Earth卫星地图中获取58个有效分布记录的经度、纬度和海拔(表1),并保存为".csv"格式文件,备用。

### 1.2 环境变量的筛选和数据处理

基于ArcGIS 10.0软件,以下载自中国测绘网(https://www.cehui8.com/3S/GIS/20130702/205.html)的中国行政区划矢量图(比例尺1∶4 000 000)作为分析的底图。

**表 1　半日花 58 个居群的基本信息**
**Table 1　Basic information of 58 populations of *Helianthemum songaricum* Schrenk**

| 序号 No. | 位置 Location | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔/m Altitude | 来源[1)] Resource[1)] |
|---|---|---|---|---|---|
| | 内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region | | | | |
| 1 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°11′ | N39°22′ | 1 220 | [29] |
| 2 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°48′ | N39°52′ | 1 300 | [29] |
| 3 | 鄂尔多斯市东胜区 Dongsheng District, Ordos City | E107°12′ | N39°30′ | 1 130 | [29] |
| 4 | 乌海市海勃湾区 Haibowan District, Wuhai City | E106°57′ | N39°20′ | 1 200 | [29] |
| 5 | 乌海市乌达区 Uda District, Wuhai City | E106°40′ | N39°29′ | 1 200 | [29] |
| 6 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°12′ | N39°30′ | 1 537 | [30] |
| 7 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°58′ | N39°54′ | 1 426 | [30] |
| 8 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°55′ | N40°03′ | 1 218 | [31] |
| 9 | 乌海市海勃湾区 Haibowan District, Wuhai City | E106°49′ | N39°36′ | 1 773 | [32] |
| 10 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°04′ | N39°21′ | 1 401 | [33] |
| 11 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°59′ | N39°38′ | 2 144 | [34] |
| 12 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°55′ | N40°03′ | 1 213 | [35] |
| 13 | 鄂尔多斯市海南区 Hainan District, Ordos City | E106°53′ | N39°32′ | 1 299 | [36] |
| 14 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°04′ | N39°22′ | 1 395 | [37]6 |
| 15 | 乌海市海勃湾区 Haibowan District, Wuhai City | E106°58′ | N39°54′ | 1 443 | [37]6 |
| 16 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°05′ | N39°55′ | 1 568 | [38] |
| 17 | 鄂尔多斯市达拉特旗 Dalad Banner, Ordos City | E109°19′ | N40°19′ | 1 129 | CVH, PE01953832 |
| 18 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E106°59′ | N39°38′ | 2 144 | CVH, HIMC0022441 |
| 19 | 乌海市海勃湾区 Haibowan District, Wuhai City | E106°50′ | N39°39′ | 1 200 | CVH, BJFC00012138 |
| 20 | 呼伦贝尔市额尔古纳市 Ergun City, Hulun Buir City | E120°46′ | N51°15′ | 693 | CVH, HIMC0022445 |
| 21 | 乌海市乌达区 Uda District, Wuhai City | E106°43′ | N39°30′ | 1 106 | CVH, XJBI00022071 |
| 22 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°21′ | N38°52′ | 1 293 | CVH, HIMC0022437 |
| 23 | 阿拉善盟阿拉善左旗 Alagxa Left Banner, Alagxa League | E105°56′ | N38°49′ | 3 188 | CVH, WUK0156299 |
| 24 | 呼伦贝尔市牙克石市 Yakeshi City, Hulun Buir City | E121°02′ | N49°04′ | 699 | CVH, HIMC0022446 |
| 25 | 鄂尔多斯市伊金霍洛旗 Ejin Horo Banner, Ordos City | E109°21′ | N39°40′ | 1 408 | CVH, HIMC0022442 |
| 26 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°00′ | N39°49′ | 1 441 | CVH, PE02031622 |
| 27 | 鄂尔多斯市鄂托克旗 Otog Banner, Ordos City | E107°07′ | N39°21′ | 1 404 | 实际调查 Field investigation |
| | 新疆维吾尔自治区 Xinjiang Uygur Autonomous Region | | | | |
| 28 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°59′ | N43°14′ | 1 318 | [39] |
| 29 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°28′ | N43°35′ | 1 010 | [39] |
| 30 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°56′ | N43°12′ | 1 166 | [39] |
| 31 | 伊犁哈萨克自治州新源县 Xinyuan County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°34′ | N43°34′ | 952 | [39] |
| 32 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°45′ | N43°10′ | 1 246 | [39] |
| 33 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°28′ | N43°25′ | 855 | [39] |
| 34 | 伊犁哈萨克自治州新源县 Xinyuan County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°37′ | N43°27′ | 829 | [39] |
| 35 | 伊犁哈萨克自治州伊宁县 Yining County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°03′ | N43°41′ | 1 220 | [39] |
| 36 | 博尔塔拉蒙古自治州博乐市 Bole City, Bortala Mongolian Autonomous Prefecture | E82°03′ | N44°49′ | 566 | GBIF |
| 37 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°15′ | N43°29′ | 1 049 | [29] |
| 38 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°49′ | N43°13′ | 1 250 | [29] |
| 39 | 伊犁哈萨克自治州伊宁县 Yining County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°35′ | N43°43′ | 1 010 | [29] |
| 40 | 伊犁哈萨克自治州新源县 Xinyuan County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E83°13′ | N43°26′ | 1 210 | [29] |
| 41 | 伊犁哈萨克自治州昭苏县 Zhaosu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°10′ | N43°07′ | 1 490 | [29] |
| 42 | 伊犁哈萨克自治州尼勒克县 Nilka County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°31′ | N43°47′ | 1 180 | [29] |
| 43 | 伊犁哈萨克自治州尼勒克县 Nilka County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°31′ | N43°35′ | 792 | CVH, XJBI00022073 |
| 44 | 伊犁哈萨克自治州尼勒克县 Nilka County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°34′ | N43°34′ | 1 197 | CVH, XJBI00022070 |
| 45 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°24′ | N43°29′ | 892 | CVH, XJBI00022064 |
| 46 | 伊犁哈萨克自治州新源县 Xinyuan County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°58′ | N43°30′ | 813 | CVH, XJBI00022067 |
| 47 | 伊犁哈萨克自治州新源县 Xinyuan County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°30′ | N43°20′ | 2 113 | CVH, XJBI00022063 |
| 48 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°54′ | N43°14′ | 1 165 | CVH, XJBI00022062 |

续表1 Table 1 (Continued)

| 序号 No. | 位置 Location | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔/m Altitude | 来源[1)] Resource[1)] |
|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 伊犁哈萨克自治州特克斯县 Tekes County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°20′ | N43°13′ | 1 015 | CVH, XJBI00022066 |
| 50 | 伊犁哈萨克自治州和布克赛尔蒙古自治县 Hoboksar Mongolian Autonomous County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E85°22′ | N46°35′ | 1 415 | CVH, XJBI00022072 |
| 51 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E81°31′ | N43°55′ | 914 | CVH, XJBI00022068 |
| 52 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°00′ | N43°35′ | 1 000 | CVH, PE02229897 |
| 53 | 伊犁哈萨克自治州巩留县 Gongliu County, Ili Kazak Autonomous Prefecture | E82°29′ | N43°25′ | 1 068 | CVH, PE02229900 |
| | 甘肃省 Gansu Province | | | | |
| 54 | 金昌市永昌县 Yongchang County, Jinchang City | E101°58′ | N38°14′ | 1 961 | [40] |
| 55 | 临夏回族自治州永靖县 Yongjing County, Linxia Hui Autonomous Prefecture | E103°01′ | N36°00′ | 1 573 | [41] |
| 56 | 金昌市永昌县 Yongchang County, Jinchang City | E102°16′ | N38°19′ | 1 730 | [42] |
| | 宁夏回族自治区 Ningxia Hui Autonomous Region | | | | |
| 57 | 中卫市沙坡头区 Shapotou District, Zhongwei City | E105°11′ | N37°30′ | 1 226 | [40] |
| 58 | 中卫市沙坡头区 Shapotou District, Zhongwei City | E104°57′ | N37°27′ | 1 300 | [43] |

1) CVH 为中国数字植物标本馆,其后编号为标本的馆藏条码 CVH represents Chinese Virtual Herbarium, and the subsequent code represents bar code of specimen in the herbarium; GBIF 为全球生物多样性信息网络 GBIF represents Global Biodiversity Information Facility.

本文从世界气候数据库(http://www.worldclim.org/)中获取末次间冰期(LIG)、末次冰盛期(LGM)、当代(1950 年至 2000 年)及未来(2050 年)4 个时期与温度和降水相关的 19 个环境变量。该数据库收集 1950 年至 2000 年世界各地气象站记录的气象信息,得到空间分辨率为 2.5′(5 $km^2$)的 19 个环境变量的数据,包括年均温(BIO1)、平均日较差(BIO2)、等温性(BIO3)、温度季节性变化(BIO4)、最热月最高温(BIO5)、最冷月最低温(BIO6)、温度年较差(BIO7)、最湿季度均温(BIO8)、最干季度均温(BIO9)、最热季度均温(BIO10)、最冷季度均温(BIO11)、年降水量(BIO12)、最湿月降水量(BIO13)、最干月降水量(BIO14)、降水量季节性变化(BIO15)、最湿季度降水量(BIO16)、最干季度降水量(BIO17)、最热季度降水量(BIO18)和最冷季度降水量(BIO19)。

### 1.3 模型预测

将半日花的分布数据(".csv"格式)和 19 个环境变量导入 MaxEnt 3.3.3k 软件[44]中建模。为提高模型精确度,随机选取 25%的分布点作为测试样本,75%的分布点作为训练样本,运行 10 次,采用刀切法(jackknife)检验权重和受试者工作特征(ROC)曲线[45]。将受试者工作特征曲线下面积(AUC)的最大值作为预测结果。

BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的预测均在 DIVA-GIS 软件中进行[46],将筛选出的环境数据图层转换为 DIVA-GIS 软件适用的".grd"格式。创建图栈(stack)后依次添加训练样本的".shp"文件和".grd"图栈文件,在 Modeling-BIOCLIM/DOMAIN 模块中进行 BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的预测,选择 CLASS_REP 字段作为匹配项预测最大范围的潜在适生区。

基于 MaxEnt 3.3.3k 和 DIVA-GIS 软件得到末次间冰期、末次冰盛期、当代和未来 4 个时期半日花在中国的潜在适生区,利用 ArcGIS 10.0 软件重分类工具对其进行适生等级划分[47]。采用自然断点分级法(natural breakpoint classification method)[48]相应产生模拟的适生指数(FI)将半日花潜在适生区划分为 4 个等级,分别为不适生区($FI \leqslant 0.2$)、低适生区($0.2<FI<0.3$)、中适生区($0.3 \leqslant FI<0.6$)和高适生区($FI \geqslant 0.6$)。根据发生概率(occurrence probability, OP)对基于 BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的半日花潜在适生区预测结果进行适生程度评判,DIVA-GIS 软件默认划分为 6 个等级[49],本研究对半日花潜在适生区等级进行调整,将预测结果的".grd"文件转换为".asc"文件在 ArcGIS 10.0 软件中进行可视化处理,并采用自然断点分级法将半日花潜在适生区划分为 4 个等级,分别为不适生区($OP \leqslant 5\%$)、低适生区($5\%<OP<20\%$)、中适生区($20\% \leqslant OP<40\%$)和高适生区($40\% \leqslant OP \leqslant 100\%$)。

### 1.4 模型预测精度检验

AUC 值可以用于评估 MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 模型划分不适生区和适生区的能力[50]。AUC 值的取值区间为[0.50,1.00],越接近 1.00,表示预测结果越准确[51]。模型预测精度的评估标准划分为 4 个等级,分别为较差($AUC \leqslant 0.80$)、一般($0.80<$

AUC≤0.90）、好（0.90<AUC≤0.95）和很好（0.95<AUC≤1.00）[52]。

### 1.5　地理分布与气候的关系

利用 ArcGIS 10.0 软件提取半日花有效分布记录的环境变量，利用 SPSS 20.0 软件对有效分布记录的 19 个环境变量进行主成分分析，结合 MaxEnt 模型预测结果的贡献率、置换重要值和刀切法检验结果进行对比分析，得到对半日花分布起主导作用的环境变量。

## 2　结果和分析

### 2.1　模型预测精度评估

MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 3 种模型的 AUC 值的均值分别为 0.984、0.837 和 0.962（图 1）。MaxEnt 和 DOMAIN 模型的 AUC 值均达到 0.95 以上，预测精度很好，可信度极高；BIOCLIM 模型的 AUC 值较低，但是大于 0.80，预测精度一般，说明 3 种模型均可较准确地预测半日花的潜在适生区。

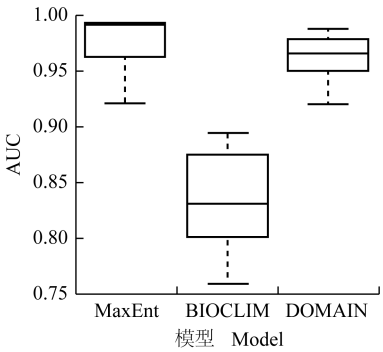



**图 1　MaxEnt、BIOCLIM 和 DOMAIN 模型对半日花潜在适生区预测结果的受试者工作特征曲线下面积（AUC）**

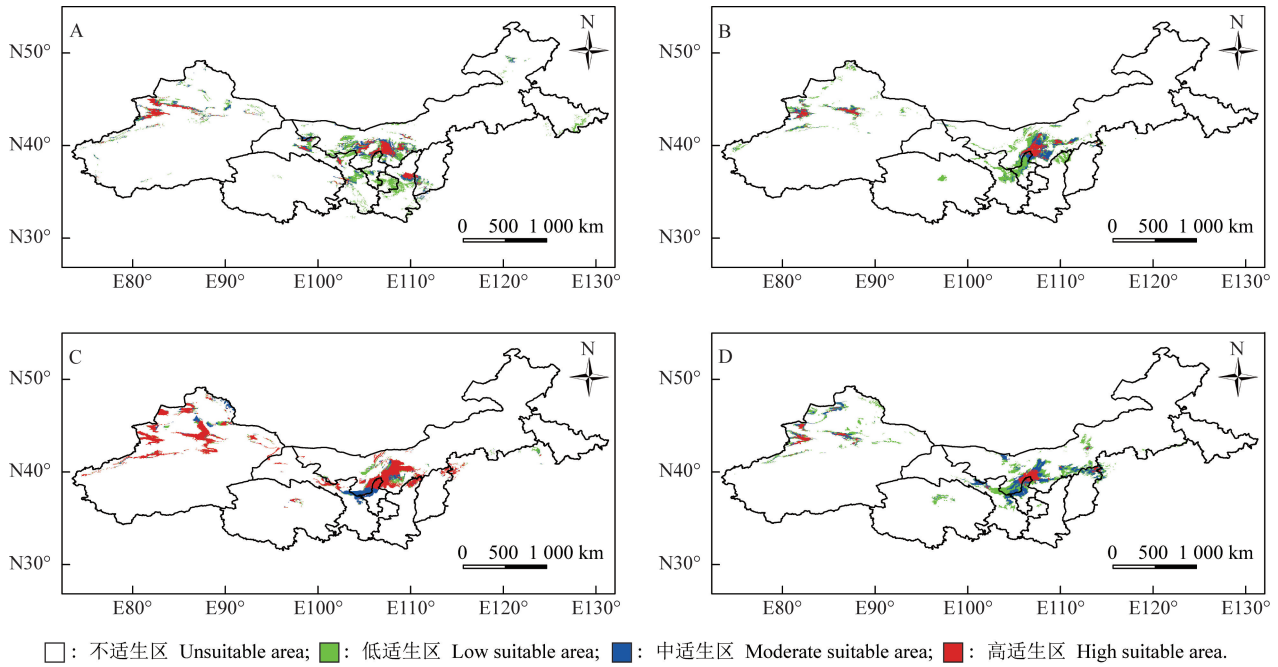
**Fig. 1　Area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of prediction result of potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk by MaxEnt, BIOCLIM, and DOMAIN models**

### 2.2　基于 MaxEnt 模型预测半日花在中国的潜在适生区

MaxEnt 模型预测半日花在中国的潜在适生区见图 2。由图 2 可见：末次间冰期半日花潜在适生区呈间断、破碎化分布，其潜在适生区面积占中国总面积的 3.29%，其中，高适生区面积占中国总面积的 0.79%。高适生区主要分布于内蒙古的阿拉善左旗中东部和北部、乌海市、磴口县南部、鄂托克旗、杭锦旗东南部和西南部、伊金霍洛旗中部以及乌拉特前旗东部，宁夏石嘴山市西部，陕西的延川县、安塞区东南部和延长县西部，甘肃的金塔县北部、嘉峪关市、酒泉市、金昌市、永宁县东南部和武威市西北部，山西永和县至乡宁县一带，以及新疆的博乐市、精河县、克拉玛依市、乌苏市中部、沙湾县中部、玛纳斯县中南部、伊宁县南部、尼勒克县西南部、新源县西北部、巩留县中东部、昭苏县东北部和特克斯县北部。中适生区分布于内蒙古阿拉善左旗西部和中南部，宁夏同心县中部，陕西的安塞区南部、甘泉县北部、延长县东部和延安市南部，甘肃北部和中南部，山西西南部的吉县至乡宁县一带和大宁县，以及新疆的昭苏县、霍城县和木垒哈萨克自治县。低适生区分布于内蒙古的阿拉善右旗北部、乌审旗中部、准格尔旗西部、达拉特旗中部和乌拉特中旗北部，宁夏北部和东南部，陕西中东部，甘肃东南部，山西的浮山县、沁水县和翼城县，以及新疆北部等地。

末次冰盛期半日花潜在适生区面积占中国总面积的 2.48%，较末次间冰期减少 0.81%，其中，高适生区面积占中国总面积的 0.41%，较末次间冰期减少 0.38%。与末次间冰期相比，半日花在内蒙古的分布范围向甘肃皋兰县至内蒙古五原县一带汇聚，且有向东北方向移动的趋势。内蒙古的乌拉特前旗、阿拉善右旗、杭锦旗东部和磴口县东南部的高适生区消失，乌海市的高适生区面积增加，临河区东部、五原县西北部、达拉特旗北部和托克托旗出现高适生区；宁夏石嘴山市的高适生区面积增加；新疆的博乐市、精河县、乌苏市中部和沙湾县中部的高适生区消失，而呼图壁县中部、吉昌市中部和乌鲁木齐市中北部出现高适生区；甘肃南部、山西南部和陕西中部的高适生区、中适生区和低适生区均消失，陕西北部和甘肃中部出现低适生区。

当代半日花潜在适生区面积占中国总面积的 3.19%，较末次冰盛期增加 0.71%，其中，高适生区面积占中国总面积的 2.16%，较末次冰盛期增加1.75%。与末次冰盛期相比，内蒙古的阿拉善左旗、鄂托克旗、达拉特旗和五原县的高适生区面积增加，托克托县的高适生区消失，鄂托克前旗、乌审旗、准格尔旗、乌拉特前旗、乌拉特中旗南部和乌拉特后旗中部出现高适生区；宁夏北部石嘴山市的高适生区面积增加，平罗县至永宁县一带出现高适生区；甘肃的临泽县东部、瓜州县北部、张掖市中北部和南部以及永昌县北部和中东部出现高适生区；陕西榆林市北部出现高适生




A: 末次间冰期 Last Interglacial; B: 末次冰盛期 Last Glacial Maximum; C: 当代(1950 年至 2000 年) Current (from 1950 to 2000); D: 未来(2050 年) Future (in 2050).

**图 2 MaxEnt 模型预测半日花在中国的潜在适生区**

**Fig. 2 Potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in China predicted by MaxEnt model**

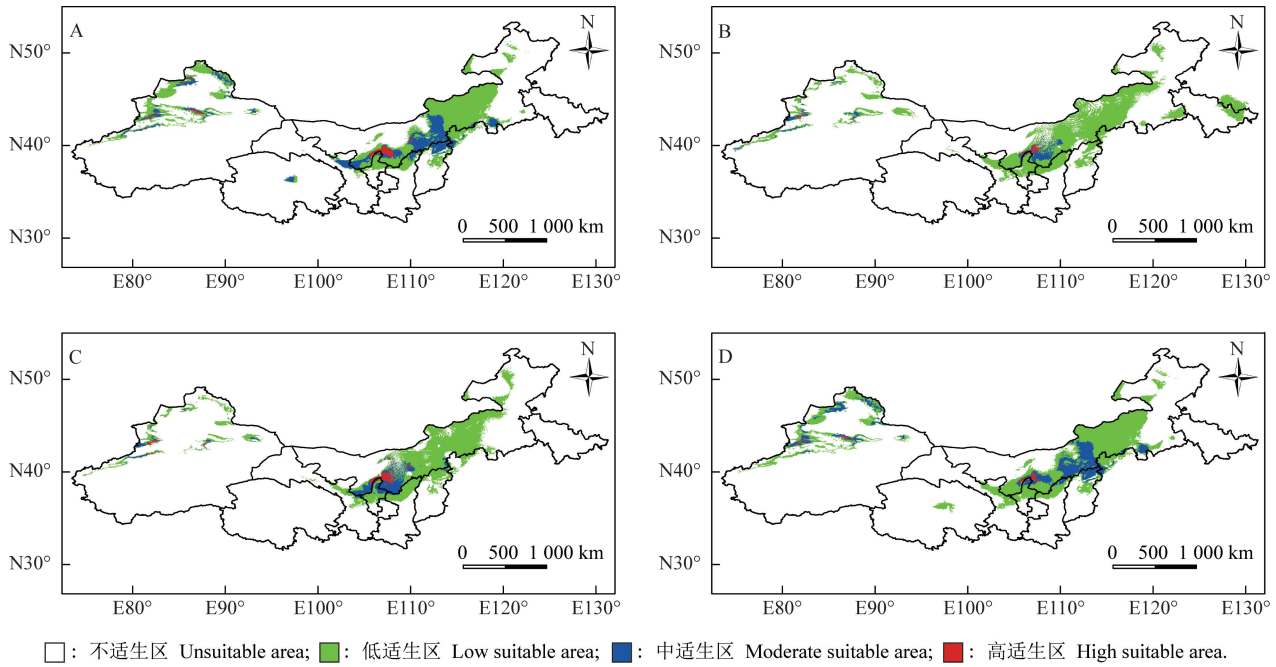
区;山西北部的大同县、阳高县和天镇县出现高适生区;新疆的乌恰县中部至拜城县一带出现高适生区,霍城县、伊宁县、尼勒克县、新源县和巩留县的高适生区面积增加,玛纳斯县中南部至乌鲁木齐市中部一带的高适生区面积增加并向新疆北部移动,新疆西部的中适生区变为高适生区,且在塔城市南部、裕民县北部、额敏县西南部、巴里坤哈萨克自治县和哈密市东部等地出现高适生区;甘肃中部和宁夏中部的低适生区变为中适生区并向北移动。

未来半日花潜在适生区面积占中国总面积的2.95%,较当代减少 0.24%,其中,高适生区面积占中国总面积的 0.42%,较当代减少 1.74%。与当代相比,半日花高适生区面积减少,中适生区和低适生区面积增加且有向东北方向移动的趋势。内蒙古的高适生区向阿拉善左旗东部、乌海市和鄂托克旗西部缩减,苏尼特右旗南部出现高适生区,中适生区和低适生区面积增加;宁夏北部的永宁县、贺兰县和陶乐县的高适生区向平罗县北部和石嘴山市缩减;陕西北部的高适生区消失;甘肃武威市的中适生区降级为低适生区;山西北部的高适生区面积减少,低适生区面积增加。

## 2.3 基于 BIOCLIM 模型预测半日花在中国的潜在适生区

BIOCLIM 模型预测半日花在中国的潜在适生区见图 3。由图 3 可见:与 MaxEnt 模型的预测结果相比,BIOCLIM 模型预测末次间冰期、末次冰盛期、当代和未来 4 个时期半日花的潜在适生区面积明显增加。

末次间冰期半日花潜在适生区面积占中国总面积的 8.97%,其中,高适生区面积占中国总面积的0.23%。高适生区主要分布在内蒙古的阿拉善左旗东部、乌海市、鄂托克旗、达拉特旗中北部和包头市中部,宁夏石嘴山市中北部,以及新疆的巩留县、玛纳斯县中南部至乌鲁木齐市中南部的博罗科努山、特克斯县北部和吉木乃县中部。中适生区分布于内蒙古的东胜区东部、包头市南部、呼和浩特市、锡林浩特市西南部和赤峰市南部,甘肃的武威市中部和金昌市南部,陕西榆林市北部,山西的朔州市和大同市,新疆的伊宁市中部、阿瓦提县北部、沙湾县东南部、玛纳斯县南部、乌鲁木齐市中部、塔城市北部和阿勒泰市东部,以及宁夏石嘴山市北部。低适生区主要集中在宁夏中部、陕西北部和内蒙古东北部。




A：末次间冰期 Last Interglacial；B：末次冰盛期 Last Glacial Maximum；C：当代（1950 年至 2000 年）Current（from 1950 to 2000）；D：未来（2050 年）Future（in 2050）.

**图 3　BIOCLIM 模型预测半日花在中国的潜在适生区**

**Fig. 3　Potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in China predicted by BIOCLIM model**

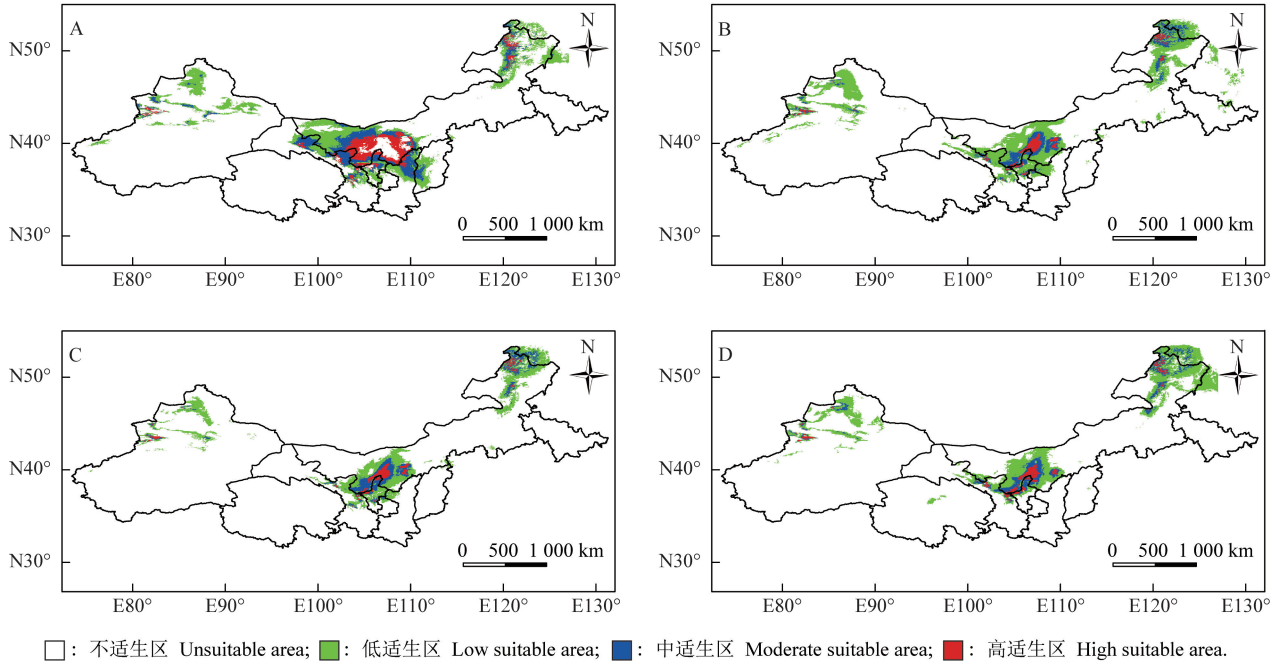
末次冰盛期半日花潜在适生区面积占中国总面积的 8.55%，较末次间冰期减少 0.42%，其中，高适生区面积占中国总面积的 0.10%，较末次间冰期减少 0.13%。与末次间冰期相比，内蒙古达拉特旗的高适生区消失，鄂托克旗的高适生区向西北方向退缩，乌海市的高适生区面积向其东部缩减，阿拉善左旗的高适生区面积减少；宁夏北部的高适生区面积减少；新疆玛纳斯县中南部至乌鲁木齐市中南部的高适生区消失。中适生区分布范围明显减少，内蒙古锡林浩特市、集宁区、呼和浩特市、包头市和赤峰市的中适生区消失，东胜区的中适生区面积增加并向东北方向移动，阿拉善左旗南部的中适生区缩减至其东部；甘肃、陕西和山西的中适生区均消失；新疆阿瓦提县的中适生区面积减少，塔城市和阿勒泰市的中适生区降级为低适生区。

当代半日花潜在适生区面积占中国总面积的 7.63%，较末次冰盛期减少 0.92%，其中，高适生区面积占中国总面积的 0.22%，较末次冰盛期增加0.12%。与末次冰盛期相比，内蒙古的阿拉善左旗、杭锦旗、乌海市和鄂托克旗的高适生区面积增加，包头市、乌拉特中旗、五原县、乌拉特前旗和达拉特旗北部出现高适生区；宁夏北部出现中适生区，吉林的潜在适生区消失，新疆东部和西南部的低适生区升级为中适生区。

未来半日花潜在适生区面积占中国总面积的 9.55%，较当代增加 1.92%，其中，高适生区面积占中国总面积的 0.11%，较当代减少 0.11%。与当代相比，高适生区主要分布于内蒙古的阿拉善左旗、乌海市和鄂托克旗西部，宁夏石嘴山市，以及新疆的特克斯县、昭苏县、巩留县和玛纳斯县至乌鲁木齐市一带的中南部。与当代相比，未来内蒙古地区的中适生区明显向东部方向移动，阿拉善左旗南部的中适生区退缩至东部，东胜区的中适生区缩减至中部，包头市、呼和浩特市、赤峰市、集宁区和锡林浩特市出现中适生区；陕西榆林市北部出现中适生区；山西的大同市和朔州市出现中适生区。低适生区面积增加，分布范围变化不大。

### 2.4　基于 DOMAIN 模型预测半日花在中国的潜在适生区

DOMAIN 模型预测半日花在中国的潜在适生区见图 4。由图 4 可见：与 MaxEnt 和 BIOCLIM 模型相比，DOMAIN 模型预测末次间冰期、末次冰盛期、当代




A: 末次间冰期 Last Interglacial; B: 末次冰盛期 Last Glacial Maximum; C: 当代(1950 年至 2000 年) Current (from 1950 to 2000); D: 未来(2050 年) Future (in 2050).

**图 4 DOMAIN 模型预测半日花在中国的潜在适生区**

**Fig. 4 Potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in China predicted by DOMAIN model**

和未来 4 个时期半日花的高适生区面积明显增加。

末次间冰期半日花潜在适生区面积占中国总面积的 9.58%,其中,高适生区面积占中国总面积的 1.53%。半日花在内蒙古、甘肃、新疆、宁夏、陕西和山西均有分布,主要集中在内蒙古南部、宁夏北部和陕西北部。高适生区主要分布于内蒙古的阿拉善左旗中部和南部、杭锦旗、鄂托克前旗以及乌审旗等地。中适生区主要分布于内蒙古阿拉善右旗东部、新疆博乐市和博罗科努山中部、甘肃北部金塔县和民勤县以及陕西北部。低适生区主要分布于内蒙古西部、山西西部和新疆中北部。

末次冰盛期半日花潜在适生区面积占中国总面积的 8.21%,较末次间冰期减少 1.37%,其中,高适生区面积占中国总面积的 0.48%,较末次间冰期减少 1.05%。高适生区分布于内蒙古与宁夏交界处及周边地区,如内蒙古的乌海市、鄂托克旗西北部和杭锦旗西部地区。中适生区分布于内蒙古的临河区、五原县和磴口县等地。新疆博罗科努山的中适生区降级为低适生区。

当代半日花潜在适生区面积占中国总面积的 5.62%,较末次冰盛期减少 2.59%,其中,高适生区面积占中国总面积的 0.45%,与末次冰盛期相比变化不大,仅减少 0.03%。与末次冰盛期相比,内蒙古阿拉善右旗,陕西志丹县和安塞区,甘肃玉门市、嘉峪关市、金塔县和临泽县以及新疆阿合奇县、柯坪县和乌什县的低适生区消失;内蒙古东北部和新疆西北部低适生区面积减少。

未来半日花潜在适生区面积占中国总面积的 7.09%,较当代增加 1.47%,其中,高适生区面积占中国总面积的 0.49%,较当代增加 0.04%。与当代相比,内蒙古北部的低适生区面积增加。

### 2.5 影响半日花当代潜在地理分布的主导环境变量分析

2.5.1 基于 MaxEnt 模型 用于 MaxEnt 模型预测的影响半日花当代潜在适生区的环境变量的贡献率和置换重要值见表 2。由表 2 可见:19 个环境变量中,年均温(BIO1)、温度季节性变化(BIO4)和最干季度均温(BIO9)的贡献率位居前 3,分别为 10.34%、9.91%和 9.15%,其累计值为 29.40%。置换重要值位居前 3 位的环境变量分别为 BIO9、最冷季度降水量(BIO19)和 BIO1,分别为 20.56%、15.20%和 15.17%,其累计值达 50.93%。

**表 2　用于 MaxEnt 模型预测的影响半日花当代潜在适生区的环境变量的贡献率(CR)和置换重要值(PI)**

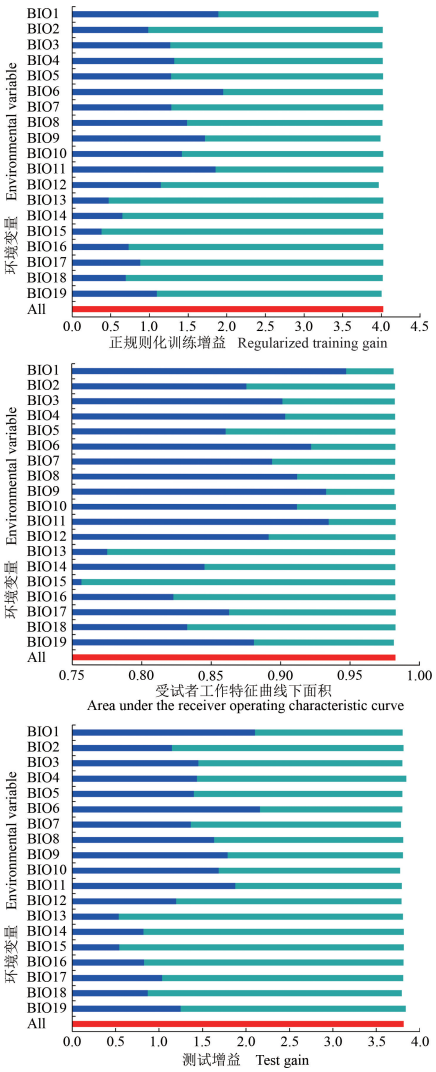
**Table 2　Contribution rate (CR) and permutation importance (PI) of environmental variables affecting potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in current used for MaxEnt model prediction**

| EV[1)] | CR/% | PI/% | EV[1)] | CR/% | PI/% |
|---|---|---|---|---|---|
| BIO1 | 10.34 | 15.17 | BIO11 | 1.83 | 0.27 |
| BIO2 | 3.26 | 4.48 | BIO12 | 7.59 | 3.85 |
| BIO3 | 3.39 | 4.05 | BIO13 | 0.64 | 0.25 |
| BIO4 | 9.91 | 3.42 | BIO14 | 0.05 | 0.00 |
| BIO5 | 1.70 | 5.52 | BIO15 | 5.45 | 2.45 |
| BIO6 | 9.14 | 1.78 | BIO16 | 6.67 | 0.88 |
| BIO7 | 1.77 | 0.28 | BIO17 | 8.59 | 15.02 |
| BIO8 | 4.33 | 5.53 | BIO18 | 8.11 | 0.92 |
| BIO9 | 9.15 | 20.56 | BIO19 | 6.59 | 15.20 |
| BIO10 | 1.49 | 0.36 | | | |

[1)] EV：环境变量 Environment variable. 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 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 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.

用于 MaxEnt 模型预测的影响半日花当代潜在适生区环境变量的刀切法检验结果见图 5。由图 5 可见：仅使用单独环境变量时，最冷月最低温(BIO6)的正规则化训练增益和测试增益的得分最高，BIO1 和最冷季度均温(BIO11)的正规则化训练增益和测试增益的得分也较高，说明这 3 个环境变量对半日花的分布影响较大；BIO1、BIO11 和 BIO9 的受试者工作特征曲线下面积较大，说明这 3 个环境变量对于 MaxEnt 模型预测准确性的评估有重要影响。综合来看，影响半日花当代潜在地理分布的主导环境变量为温度(BIO1、BIO4、BIO9、BIO6 和 BIO11)和降水(BIO19)。

2.5.2　基于主成分分析　提取半日花 58 条有效分布记录的环境变量并进行主成分分析，结果见表 3。由表 3 可见：前 3 个主成分的方差贡献率分别为 44.95%、30.50% 和 13.77%，累计方差贡献率达 89.22%，说明前 3 个主成分可以代表 19 个环境变量的一般信息量。




■,■,■：分别表示使用单独环境变量、除该环境变量外所有环境变量以及所有环境变量的预测结果 Representing prediction results using only environmental variable, all environmental variables except this environmental variable, and all environmental variables, respectively.

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 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 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.

**图 5　用于 MaxEnt 模型预测的影响半日花当代潜在适生区环境变量的刀切法检验结果**

**Fig. 5　Jackknife test result of environmental variables affecting potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in current used for MaxEnt model prediction**

第1主成分中,BIO1、最热季度降水量(BIO18)、最湿季度降水量(BIO16)和最热季度均温(BIO10)的得分系数较高,说明第1主成分中降水和温度对半日花的分布均有较大影响;第2主成分中,最干月降水量(BIO14)、最干季度降水量(BIO17)和BIO19的得分系数最高,说明第2主成分中降水对半日花的分布有较大影响;第3主成分中,温度年较差(BIO7)、BIO4和平均日较差(BIO2)的得分系数较高,说明第3主成分中温度对半日花的分布有较大影响。

影响半日花当代潜在适生区的6个主导环境变量的响应曲线见图6。由图6可见:当代半日花高适生区的BIO1介于6.4 ℃~7.2 ℃之间,BIO6介于-19.4 ℃~-15.9 ℃之间,BIO10介于20.8 ℃~22.5 ℃之间,BIO18介于71~124 mm之间,BIO16介于71~132 mm之间,BIO11介于-9.0 ℃~7.2 ℃之间。

**表3 前3个主成分中19个环境变量的主成分分析结果[1)]**
**Table 3 Result of principal component analysis on 19 environment variables of the first three principle components[1)]**

| 主成分 Principal component | 各环境变量的得分系数 Score coefficient of each environment variable | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BIO1 | BIO2 | BIO3 | BIO4 | BIO5 | BIO6 | BIO7 | BIO8 | BIO9 | BIO10 | BIO11 |
| 1 | 0.96 | -0.10 | 0.11 | -0.35 | 0.85 | 0.84 | -0.30 | 0.83 | 0.81 | 0.87 | 0.83 |
| 2 | 0.11 | 0.41 | 0.84 | -0.71 | -0.16 | 0.43 | -0.63 | -0.18 | 0.51 | -0.09 | 0.48 |
| 3 | 0.00 | 0.51 | -0.18 | 0.60 | 0.42 | -0.30 | 0.70 | 0.44 | -0.22 | 0.39 | -0.24 |

| 主成分 Principal component | 各环境变量的得分系数 Score coefficient of each environment variable | | | | | | | | E | VCR/% | CVCR/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BIO12 | BIO13 | BIO14 | BIO15 | BIO16 | BIO17 | BIO18 | BIO19 | | | |
| 1 | -0.84 | -0.83 | 0.10 | -0.36 | -0.89 | 0.08 | -0.90 | 0.08 | 8.54 | 44.95 | 44.95 |
| 2 | -0.01 | 0.44 | -0.86 | 0.83 | 0.30 | -0.86 | 0.29 | -0.86 | 5.80 | 30.50 | 75.45 |
| 3 | -0.32 | 0.05 | -0.40 | 0.36 | -0.05 | -0.41 | -0.02 | -0.41 | 2.62 | 13.77 | 89.22 |

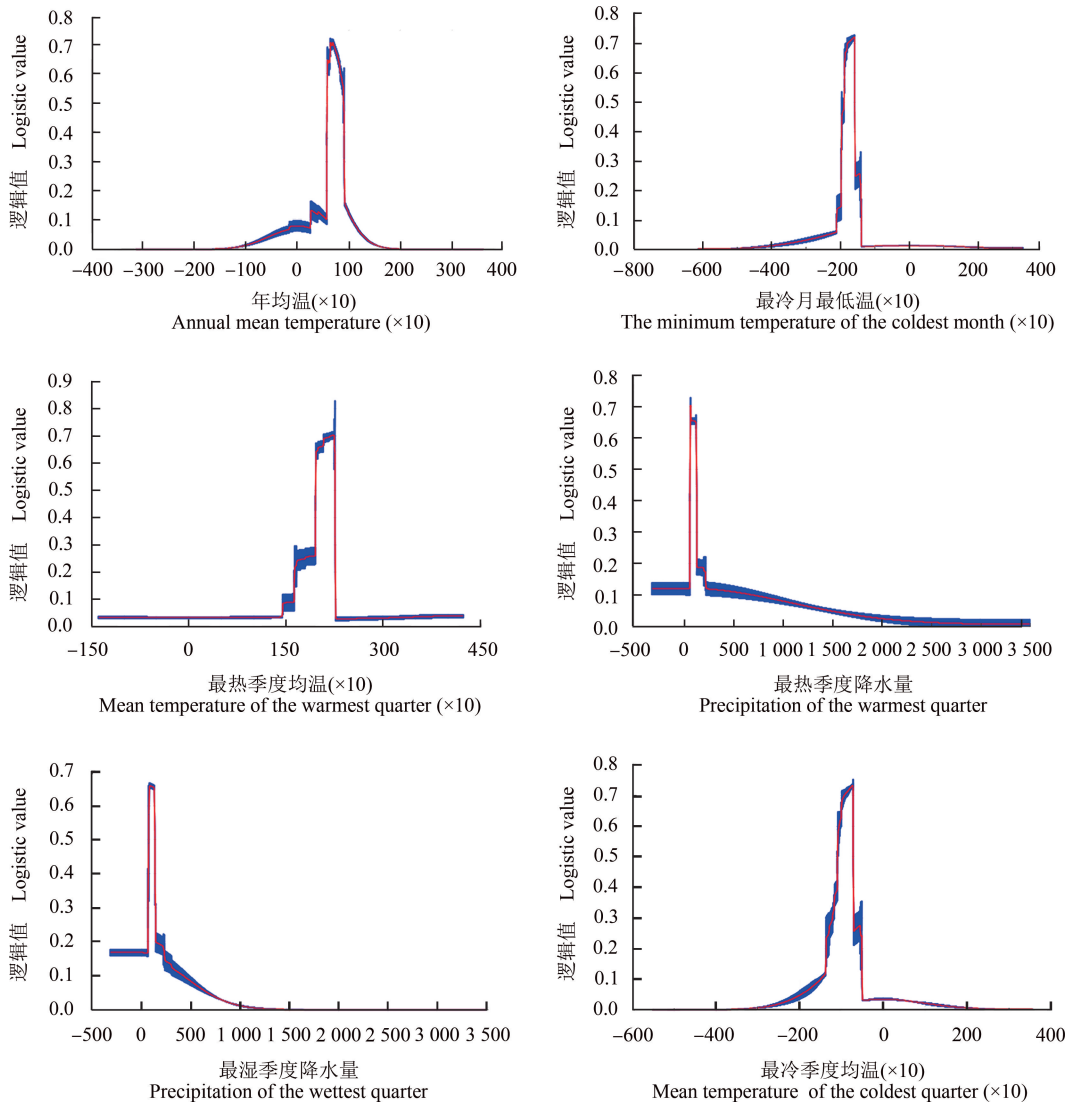
[1)] BIO1:年均温 Annual mean temperature; BIO2:平均日较差 Mean diurnal range; BIO3:等温性 Isothermality; BIO4:温度季节性变化 Temperature seasonality; BIO5:最热月最高温 The maximum temperature of the warmest month; BIO6:最冷月最低温 The minimum temperature of the coldest month; BIO7:温度年较差 Temperature annual range; BIO8:最湿季度均温 Mean 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 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. E:特征值 Eigenvalue; VCR:方差贡献率 Variance contribution rate; CVCR:累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate.

## 3 讨 论

### 3.1 末次间冰期、末次冰盛期和当代半日花的分布范围

采用MaxEnt、BIOCLIM和DOMAIN模型预测半日花适生区,利用地理信息系统ArcGIS 10.0软件将半日花在中国的潜在地理分布区分为4个等级。3种模型的预测结果表明:与末次冰盛期相比较,末次间冰期半日花在中国的潜在适生区面积略大,且较靠近南方,主要集中在宁夏北部石嘴山市和贺兰山,内蒙古的乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地和腾格里沙漠以及新疆博罗科努山南部山脉的新源县、特克斯县和尼勒克县等地。末次冰盛期半日花潜在适生区面积减少,分布于宁夏石嘴山市和贺兰山以及内蒙古库布齐沙漠一带。

按照"末次间冰期—末次冰盛期—当代—未来"的顺序,MaxEnt模型预测半日花潜在适生区面积呈先减少后增加再减少的趋势,BIOCLIM和DOMAIN模型预测半日花潜在适生区面积呈先减少后增加的趋势,但MaxEnt和BIOCLIM模型预测半日花高适生区面积的变化趋势一致,均呈先减少再增加再减少的趋势,而DOMAIN模型预测半日花高适生区面积呈先减少后增加的趋势,推测这是由于3种模型的算法不同造成的,但DOMAIN模型的预测精度一般,且3种模型预测半日花的主要适生区重叠,总的适生区移动趋势基本一致。邵慧等[53]通过BIOCLIM模型预测12种中国特有落叶栎属(*Quercus* Linn.)树种的适生区发现,样本量在75~100之间,模型的准确度最高,BIOCLIM模型可用于样本量较小的物种预测。




—: MaxEnt 模型重复运行 10 次的平均响应值 The mean response value by MaxEnt model running for 10 replicates; ■: ±1 平均标准偏差 The mean ±1 standard deviation.

**图 6　影响半日花当代潜在适生区的 6 个主导环境变量的响应曲线**

**Fig. 6　Response curve of 6 dominant environmental variables affecting potential suitable area of *Helianthemum songaricum* Schrenk in current**

DOMAIN 模型受样本量的影响也比较大，且在样本量较少时会出现生态位空间缩小的现象[54]。MaxEnt 模型具有较好的精确性和稳定性[55-57]。王运生[14]102 利用 6 种生态位模型研究胜红蓟（*Ageratum conyzoides* Linn.）的生态位漂移也得出相似的结论。本研究中，MaxEnt 模型预测半日花在当代呈破碎化和狭长间断分布，主要集中于内蒙古的鄂托克旗、阿拉善盟左旗和桌子山，新疆伊宁县、巩留县和特克斯县以及甘肃永昌县北部等地。BIOCLIM 模型预测结果显示：与末次间冰期相比，末次冰盛期半日花的中适生区和低适生区面积向东北方向偏移增大，这与 MaxEnt 模型预测的中适生区和低适生区偏移结果一致。

半日花多生长在海拔 1 200～1 500 m，低山和丘陵的砾石、石质坡面的中部和顶部[37]14。作者在内蒙古鄂托克旗（东经 107°07′、北纬 39°21′，海拔 1 404 m）的野外调查结果显示：半日花生长在荒漠平缓山坡，土壤类型为沙砾质红土土壤，其伴生种有长叶红砂（*Reaumuria trigyna* Maxim.）、猫头刺（*Oxytropis aciphylla* Ledeb.）、白刺（*Nitraria tangutorum* Bobr.）、三芒草（*Aristida adscensionis* Linn.）、霸王〔*Sarcozygium xanthoxylon* (Bunge) Maxim.〕、无芒隐子草〔*Cleistogenes songorica* (Roshev.) Ohwi.〕和中亚细柄

茅〔*Ptilagrostis pelliotii* (Danguy) Grub.〕,其中,长叶红砂与半日花同为优势种,这与陈育等[58]对西鄂尔多斯地区半日花灌木层片植株密度和重要值的研究结论一致。

研究表明:对当代物种地理分布影响较大的地质事件发生在末次冰盛期,生境的气温和水分等因子对于半日花的分布影响极大[59]。半日花在长期进化中适应了高温和干旱的气候条件,形态上也发生了很大的变化以抵御恶劣生境,表现出与气候相一致的生物学特征[60-61]。陈育等[30]采用半日花植株体积的立方根(d)表示植株体积结构,用植株体积结构代替年龄结构,发现半日花龄级Ⅱ(3 cm<d≤9 cm)的个体较多,龄级Ⅰ(d≤3 cm)的个体较少,种群更新困难导致幼苗稀缺,这也是半日花呈破碎化和狭长间断分布的原因之一。谭会娟等[43]通过对半日花的光合生理动态特征的分析得出气温和气孔导度是半日花光合作用和蒸腾作用的主要影响因子,高温和高光照条件导致半日花产生"午休"的现象,这为半日花的保护提供了可靠的依据。

### 3.2 未来半日花潜在适生区的变化

气候变化对物种分布具有重要作用。温度和降水是决定物种地理分布、生长和繁衍的主要因子。温度升高、水分条件变化以及极限气候事件对生物多样性和物种分布格局造成了广泛影响[62-65]。在未来不同时间段,全球大部分动植物的分布格局明显呈由低纬度、低海拔地区向高纬度、高海拔地区迁移的趋势,并且伴随不同程度的减少或扩张[66-67]。与当代相比,未来半日花在中国的潜在适生区整体呈由内蒙古与宁夏北部汇聚处向东部沿海地区扩散的趋势,推测沿海地区的低适生区和中适生区将成为半日花适宜引种的地区。半日花潜在适生区呈现破碎化分布且向东北和西北高海拔地区迁移的趋势,这不仅由于半日花长期适应严酷的干旱条件,而且与其他荒漠、半荒漠草原地带植物相比,半日花对水分较不敏感有关[34],这也与半日花的生理特性相吻合[68]。

### 3.3 影响半日花潜在地理分布的环境变量

主成分分析结果表明:第1主成分中,得分系数较高的环境变量中年均温(BIO1)、最热月最高温(BIO5)、最冷月最低温(BIO6)、最湿季度均温(BIO8)、最热季度均温(BIO10)和最冷季度均温(BIO11)的得分系数为正值,说明半日花的分布与温度呈正相关关系;年降水量(BIO12)、最湿月降水量(BIO13)、最湿季度降水量(BIO16)和最热季度降水量(BIO18)的得分系数为负值,说明半日花分布与降水呈负相关关系。得分系数较高的环境变量的得分系数绝对值由高到低依次为BIO1,BIO18,BIO16,BIO10,BIO5,BIO6和BIO12,BIO8、BIO11和BIO13,说明温度是影响半日花在中国分布的主导环境变量,降水次之。

MaxEnt模型模拟结果显示:温度〔BIO1、温度季节性变化(BIO4)、最干季度均温(BIO9)、BIO6和BIO11〕和降水〔最冷季度降水量(BIO19)〕是影响半日花当代地理分布的主要环境变量。与温度有关的环境变量(BIO1、BIO4、BIO9、BIO6和BIO11)5次位列第1,4次位列第2;与降水有关的环境变量(BIO19)1次位列第2。

张兴旺等[69]研究气候变化对黄山花楸(*Sorbus amabilis* Cheng ex Yü)潜在适生区的影响,杨超[70]对比年平均温度和年平均降水量对针茅属(*Stipa* Linn.)植物潜在地理分布影响的贡献率,均认为温度较降水的影响更大。李新荣[34]从种群生态学角度应用模糊相似优先比聚类分析也得出温度是影响半日花分布的主导因子。综合上述研究结果,影响半日花潜在适生区的6个主导环境变量分别为BIO1、BIO6、BIO18、BIO16、BIO10和BIO11,且当代气候条件下温度对半日花分布的影响大于降水。

## 4 结 论

全球气候变化对半日花在中国的潜在地理分布及变化产生一定影响,未来半日花主要潜在适生区整体上呈由内蒙古与宁夏北部汇聚处向东部沿海地区扩散的趋势,潜在适生区的面积较当代增加。影响半日花分布的主导环境变量为年均温(BIO1)、最冷月最低温(BIO6)、最热季度降水量(BIO18)、最湿季度降水量(BIO16)、最热季度均温(BIO10)和最冷季度均温(BIO11)。半日花对中国西北干旱和半干旱地区环境及生态系统稳定具有极其重要的作用,因此,建议对中国半日花高适生区采取有效保护措施,并在潜在适生区进行引种试验。

**参考文献:**

[1] United Nations Environment Programme. Global Biodiversity Outlook 4: A Mid-Term Assessment of Progress Towards the Implementation of the Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020[M]. Montreal:

Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014: 155.

[2] HARTMANN D L, KLEIN TANK A M G, RUSTICUCCI M. Chapter 2: observations: atmosphere and surface[R]//STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G-K, et al. IPCC, 2013: 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: 39.

[3] 刘文胜，游简艅，曾文斌，等. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测[J]. 中国草地学报，2018，40(5)：43-49.

[4] 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.

[5] 朱耿平，刘国卿，卜文俊，等. 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.

[6] SOBERÓN J. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1115-1123.

[7] KRITICO D J, MAYWALD G F, YONOW T, et al. CLIMEX. Version 4: Exploring the Effects of Climate on Plants, Animals and Diseases[M]. Canberra: CSIRO, 2015: 156.

[8] STOCKWELL D R B, NOBLE I R. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of data analysis[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1992, 33(5/6): 385-390.

[9] 妙旭华，赵晓冏，孟浩贤. 气候变化对秦岭太白红杉分布影响预测[J]. 中国水土保持，2018(10)：48-52.

[10] BOOTH T H, NIX H A, BUSBY J R, et al. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies[J]. Diversity and Distributions, 2014, 20(1): 1-9.

[11] CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals[J]. Biodiversity and Conservation, 1993, 2(6): 667-680.

[12] 刘　丹. 基于分布适宜性和潜在生产力的定量适地适树研究[D]. 北京：中国林业科学研究院林业研究所，2018：25-27.

[13] 张晓芹. 西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究[D]. 北京：中国科学院大学，2018：10-11.

[14] 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]. 长沙：湖南农业大学植物保护学院，2007.

[15] GUISAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. Ecological Modelling, 2000, 135(2/3): 147-186.

[16] 赵一之，曹　瑞，朱宗元. 半日花属一新种[J]. 植物分类学报，2000，38(3)：294-296.

[17] 傅立国. 中国植物红皮书——稀有濒危植物(第一册)[M]. 北京：科学出版社，1992：218-219.

[18] 李紫晶，莎　娜，史亚博，等. 内蒙古西鄂尔多斯地区半日花荒漠群落特征及其分类[J]. 植物生态学报，2019，43(9)：806-816.

[19] 韩宝翠. 珍稀濒危植物半日花谱系地理学研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学草原与资源环境学院，2017：1-2.

[20] 莫日根，白学良，马毓泉，等. 半日花花粉形态种内变异及其花粉地理研究[J]. 西北植物学报，1997，17(4)：528-532.

[21] 曹　瑞，段飞舟，马　虹，等. 残遗植物半日花与四合木生理生态学特征的比较研究[J]. 西北植物学报，2001，21(1)：184-187.

[22] 魏　磊，白沙如拉，厖　磊，等. 基于 ISSR 标记的珍稀濒危植物内蒙古半日花(*Helianthemum ordosicum*)遗传多样性和遗传结构研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2014，35(1)：30-36.

[23] 韩春荣. 鄂尔多斯半日花景观动态及其濒危原因分析[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学沙漠治理学院，2010：12-22.

[24] LU K Q, XIE G, LI M, 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.

[25] LU K Q, XIE G, LI M, et al. Pollen spectrum, a cornerstone for tracing the evolution of the eastern Central Asian desert[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 186: 111-122.

[26] 陈　育. 西鄂尔多斯半日花群落生态学研究[D]. 呼和浩特：内蒙古大学生命科学学院，2014：2-5.

[27] 高天鹏，张　勇，晋　玲，等. 珍稀濒危植物半日花研究进展[J]. 中国沙漠，2006，26(2)：312-316.

[28] 韩春荣，刘果厚，韩宝龙，等. 基于 RS 和 GIS 的鄂尔多斯半日花景观动态变化研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2010，31(2)：109-115.

[29] 韩宝翠，魏　磊，杨新英，等. 濒危植物半日花的遗传多样性和谱系地理结构研究[J]. 内蒙古林业科技，2017，43(2)：16-19.

[30] 陈　育，杨　劼，张璞进，等. 西鄂尔多斯半日花(*Helianthemum soongoricum*)种群结构和点格局分析[J]. 中国沙漠，2014，34(1)：75-82.

[31] 高　永，张瀚文，虞　毅，等. 基于“三温模型”的珍稀濒危荒漠植物半日花蒸腾速率研究[J]. 生态学报，2014，34(20)：5721-5727.

[32] 韩秀珍，马建文，布和敖斯尔，等. 利用卫星 ETM 与样方统计数据研究西鄂尔多斯珍稀濒危植物种群分布规律[J]. 遥感学报，2002，6(2)：136-141，165.

[33] 李清河，高婷婷，李慧卿，等. 荒漠珍稀灌木半日花种群数量动态的谱分析[J]. 武汉植物学研究，2009，27(2)：171-175.

[34] 李新荣. 我国珍稀荒漠灌木半日花的适宜气候生态引种区的研究[J]. 生态学杂志，1998，17(2)：16-19，25.

[35] 党晓宏. 西鄂尔多斯地区荒漠灌丛生态系统固碳能力研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学沙漠治理学院，2016：30-31.

[36] 陈　婕. 内蒙古西鄂尔多斯荒漠珍稀濒危植物水分利用策略[D]. 北京：中国林业科学研究院林业研究所，2016：15-16.

[37] 清　华. 西鄂尔多斯半日花(*Helianthemum soongoricum*

Schrenk)群落特征与水分利用研究[D]. 呼和浩特：内蒙古大学生命科学学院，2007.

[38] 额尔敦格日乐. 3S技术在西鄂尔多斯国家级自然保护区研究中的应用[D]. 呼和浩特：内蒙古师范大学林学院，2007：20-21.

[39] 苏志豪，李文军，卓 立，等. 新疆濒危植物半日花居群的遗传变异及遗传结构分析[J]. 植物资源与环境学报，2017，26(4)：67-73.

[40] 刘生龙，王理德，高志海. 八种珍稀濒危植物引种试验[J]. 甘肃林业科技，1995(3)：10-14.

[41] 李小英，段争虎，陈小红，等. 黄土高原西部人工灌木林土壤水分分布规律[J]. 干旱区研究，2014，31(1)：38-43.

[42] 马 骥，李新荣，李俊祯，等. 西北荒漠区6种珍稀濒危植物的种子微形态特征[J]. 中国沙漠，2005，25(2)：275-280.

[43] 谭会娟，周海燕，李新荣，等. 珍稀濒危植物半日花光合作用日动态变化的初步研究[J]. 中国沙漠，2005，25(2)：262-267.

[44] PHILLIPS S J，DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent：new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography，2008，31(2)：161-175.

[45] 郭 杰，刘小平，张 琴，等. 基于MaxEnt模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报，2017，28(3)：992-1000.

[46] 曹向锋，钱国良，胡白石，等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报，2010，21(12)：3063-3069.

[47] 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.

[48] 黄晓君，颉耀文，包玉海，等. 雅氏落叶松尺蠖在蒙古高原适生区的分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018，46(4)：98-106.

[49] 吕 飞，王 洁，周奕景，等. 检疫性林木害虫南部松齿小蠹适生区分析[J]. 应用昆虫学报，2017，54(6)：1023-1030.

[50] 孙荣喜. 中国枫香树遗传多样性及谱系地理研究[D]. 北京：中国林业科学研究院林业研究所，2017：77-79.

[51] 宋花玲，贺 佳，虞慧婷，等. 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.

[52] 王运生，谢丙炎，万方浩，等. 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.

[53] 邵 慧，田佳倩，郭 柯，等. 样本容量和物种特征对BIOCLIM模型模拟物种分布准确度的影响：以12个中国特有落叶栎树种为例[J]. 植物生态学报，2009，33(5)：870-877.

[54] PETERSON A T. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling[J]. The Condor，2001，103(3)：599-605.

[55] 陈 亚. 何首乌质量评价及产地适宜区划研究[D]. 广州：广州中医药大学中药学院，2013：59-61.

[56] 许仲林，彭焕华，彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报，2015，35(2)：557-567.

[57] 张 琴，张东方，吴明丽，等. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区[J]. 植物生态学报，2017，41(7)：770-778.

[58] 陈 育，杨 劼，张璞进，等. 西鄂尔多斯濒危植物半日花群落数量分类与排序研究[J]. 中国草地学报，2013，35(4)：88-95.

[59] HEWITT G. The genetic legacy of the Quaternary ice ages[J]. Nature，2000，405(6789)：907-913.

[60] 马学平，赵程亮，宋玉霞. 濒危植物半日花的研究现状及其保护对策[J]. 农业科学研究，2007，28(1)：72-75.

[61] 胡文凤. 中国珍稀濒危植物半日花、四合木、绵刺茎、叶解剖学的研究[J]. 江苏林业科技，1995，22(2)：29-31，50.

[62] 曹 瑞，段飞舟，马 虹，等. 残遗植物半日花与四合木生理生态学特征的比较研究[J]. 西北植物学报，2001，21(1)：184-187.

[63] 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.

[64] LENOIR J，GÉGOUT J C，MARQUET P A，et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century[J]. Science，2008，320：1768-1771.

[65] ENGLER R，RANDIN C F，THUILLER W，et al. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe[J]. Global Change Biology，2011，17：2330-2341.

[66] PARMESAN C，YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature，2003，421(6918)：37-42.

[67] ROOT T L，PRICE J T，HALL K R，et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature，2003，421(6918)：57-60.

[68] 刘果厚，高润宇，赵培英. 珍稀濒危植物沙冬青、四合木、绵刺和半日花等四种旱生灌木在环境胁迫下的生存对策分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2001，22(3)：66-69.

[69] 张兴旺，李 垚，谢艳萍，等. 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.

[70] 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：内蒙古大学生命科学学院，2016：70-71.

(责任编辑：张明霞)