

杨芙蓉, 张琴, 孙成忠, 谢彩香, 宋经元. 蒙古黄芪潜在分布区预测的多模型比较[J]. 植物科学学报, 2019, 37(2): 136~143

Yang FR, Zhang Q, Sun CZ, Xie CX, Song JY. Comparative evaluation of multiple models for predicting the potential distribution areas of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(2): 136~143

蒙古黄芪潜在分布区预测的多模型比较

杨芙蓉¹, 张琴², 孙成忠³, 谢彩香^{1*}, 宋经元^{1*}

(1. 中国医学科学院北京协和医学院药用植物研究所, 北京 100193; 2. 广州白云山汉方现代药业有限公司, 广州 510240;

3. 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

摘要: 根据蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao)123个样本点数据和19个环境数据, 采用4种生态位模型对蒙古黄芪在中国的潜在适生区进行综合分析, 并采用受试者工作特征曲线ROC和Kappa统计量, 比较不同模型的预测效果。结果显示: 4个模型预测精度良好, 一致性显著。AUC值均达到0.8以上, Kappa值均达到0.6以上; 其中DOMAIN模型的AUC值和Kappa值均最大, 说明该模型的预测精度最佳, 预测结果最稳定。潜在适生区的预测结果发现, GARP模型预测的最适宜区范围最广; MAXENT和BIOCLIM模型预测结果较为相似; DOMAIN模型预测结果比较分散。4个模型预测结果均表明西北一带可以作为蒙古黄芪栽培引种的主要产区。蒙古黄芪潜在适生区主要分布于中国北纬33°以北地区; 最适宜区主要分布于甘肃、宁夏、陕西、山西、河北和内蒙古等地区。

关键词: 蒙古黄芪; 生态位模型; 模型评价; 潜在适生区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)02-0136-08

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.20136

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparative evaluation of multiple models for predicting the potential distribution areas of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*

Yang Fu-Rong¹, Zhang Qin², Sun Cheng-Zhong³, Xie Cai-Xiang^{1*}, Song Jing-Yuan^{1*}

(1. Institute of Medicinal Plant Development, Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China; 2. Guangzhou Hanfang Pharmaceutical Company Limited, Guangzhou 510240, China; 3. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on 123 distribution points of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao and 19 ecological variables, four ecological niche models (i.e., BIOCLIM, DOMAIN, GARP, and MAXENT) were used to predict the potential distribution areas of *Astragalus membranaceus*, with the different models then judged and compared using areas under the receiver operating characteristic curves (AUC) and Kappa values. Results showed that the four models had good prediction accuracy and consistency, with AUC values above 0.8 and Kappa values above 0.6. The DOMAIN model demonstrated the highest AUC and Kappa values, indicating that the prediction accuracy and results of this model were optimal and stable. The predicted suitable area range of the GARP model was the widest, with the MAXENT and BIOCLIM models showing similar prediction ranges and DOMAIN demonstrating relatively dispersed prediction regions. The four models showed that the

收稿日期: 2018-09-10, 退修日期: 2018-11-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(81473304); 国家科技支撑计划(2015BAI05B01)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (81473304) and National Science-Technology Support Plan (2015BAI05B01).

作者简介: 杨芙蓉(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为药用植物地理分布及产地适宜性(E-mail: xn961111@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: caixiangxie@163.com; jysong@implad.ac.cn)。

northwest regions could be used as major production areas for *A. membranaceus* var. *mongholicus* cultivation. The prediction results indicated that the potential distribution areas for *A. membranaceus* var. *mongholicus* were mainly located in north of 33°N, and included Mongolia, Shaanxi, Shanxi, Gansu, Ningxia, Hebei, and the border area of northeastern provinces and Inner Mongolia. In addition, small potentially suitable areas were also located in Xinjiang, Tibet, Qinghai, and Sichuan. However, the most suitable areas were distributed in Gansu, Ningxia, Shaanxi, Shanxi, Hebei and Inner Mongolia Autonomous Region.

Key words: *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*; Ecological niche model; Model evaluation; Potential suitable distribution area

蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* (Fisch.)

Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao) 是中药黄芪的主要来源之一,其药用部位为根,具补气升阳,利水消肿,益卫固表,生津养血等功效,被誉为“补药之长”^[1]。国内市场对蒙古黄芪的需求量极大,约有50%用于生产黄芪饮片,近50%用于中成药和提取物及制剂,以蒙古黄芪为原料的中成药多达200余种^[2,3]。蒙古黄芪曾以野生为主,主要分布在山西、内蒙古、甘肃、河北、宁夏等地区。随着需求量的增加,野生资源被大量采挖,致使其濒临灭绝,目前蒙古黄芪已被列入“中国珍稀濒危植物名录”。目前市场上的蒙古黄芪均以栽培种为主,为保护蒙古黄芪野生资源、满足市场需求,各地对蒙古黄芪进行了大规模的引种栽培^[4],而研究蒙古黄芪的生态位并分析其潜在适生区,探究限制其分布的驱动因子,对于该濒危药用植物的引种栽培、科学管理及保护利用均具有重要的现实意义^[5]。生态位模型的基本原理是利用物种的已知分布数据和环境变量,通过一定的算法构建模型,判断该物种的生态位并将结果投射至研究区域以预测物种实际空间分布和潜在分布^[6]。生态位模型在药用植物潜在适生区预测方面也得到了广泛应用^[7-12]。由于目前对蒙古黄芪的研究主要集中于化学成分、药理作用、育种改良等方面^[13,14],用生态位模型预测蒙古黄芪潜在分布的研究较少,并且不同的生态位模型基于不同的原理和算法,因此模拟出的物种潜在分布图可能会产生一定差异。为了避免单个模型的推算结果产生误差,出现与实际情况不符的现象,本文采用常用的 BIOCLIM、DOMAIN、GARP 和 MAXENT 4 个生态位模型预测蒙古黄芪在中国的潜在适生区,通过对 4 组预测结果的分析对比,得出更加准确可靠的物种潜在空

间分布。本研究通过收集蒙古黄芪分布数据和相关的环境数据,用生态位模型进行预测,比较分析不同模型的预测结果,预测蒙古黄芪的主要产区及适宜其生长的环境特征,以期为其科学的引种栽培提供理论依据。

1 数据来源与处理

1.1 物种分布数据与环境数据

1.1.1 蒙古黄芪分布数据

根据中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、NSII-中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/2017/home.php>)、中国科学院植物标本馆(<http://pe.ibcas.ac.cn>)以及文献检索得到蒙古黄芪的分布数据。由于所获取的分布点来源复杂多样,基于以下方式对其进行核实和修订:保留拉丁名正确和经纬度详细的点,信息不全以及重复的点均删除;有具体地址但无经纬度的点经谷歌地球查询,最后共获得123个蒙古黄芪分布的有效记录。样本主要分布于内蒙古、山西、河北、陕西、甘肃和黑龙江(图1)。

1.1.2 气候变量和地图数据

本文所使用的生物气候变量来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>),包括与温度及降水相关的19个生物气候变量图层^[15],为1970-2000年监测数据的平均值(表1),空间分辨率为2.5 min。中国行政区划矢量图(1:4 000 000)下载自国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>),以此作为本研究中绘图的地图数据。

1.1.3 生态位模型

DIVA-GIS 7.5 软件(<http://www.diva-gis.org/download>)主要用于处理蒙古黄芪样本数据并进行 BIOCLIM 和 DOMAIN 模型预测分析; Desktop

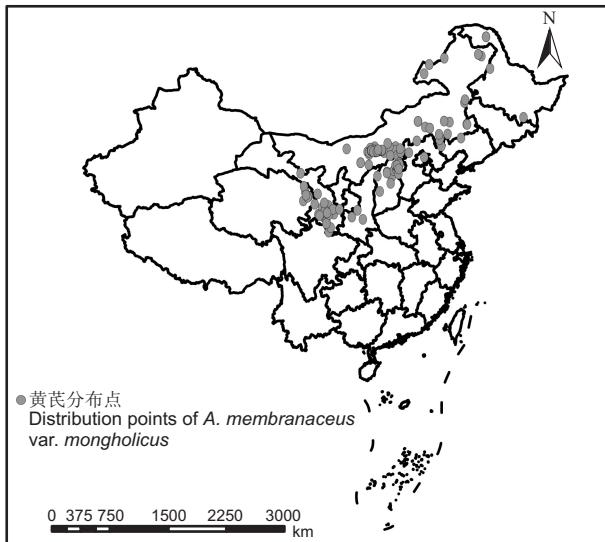


图1 蒙古黄芪样本点分布

Fig. 1 Distribution of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* sampling points

表1 生物气候变量
Table 1 Bioclimatic variables

生物气候变量 Bioclimatic variable	单位 Unit
年平均温度(bio 1: Mean annual temperature)	°C×10
昼夜温差月均值(bio 2: Mean of monthly temperature (max-min temperature))	°C×10
昼夜温差与年温差比值(bio 3: Isothermality (bio 2/bio 7 × 100))	1
温度变化方差(bio 4: SD of temperature seasonality)	1
最热月份最高温(bio 5: Max temperature of warmest month)	°C×10
最冷月份最低温(bio 6: Min temperature of coldest month)	°C×10
年温度变化范围(bio 7: Temperature annual range (bio 5–bio 6))	°C×10
最湿季度平均温度(bio 8: Mean temperature of wettest quarter)	°C×10
最干季度平均温度(bio 9: Mean temperature of driest quarter)	°C×10
最暖季度平均温度(bio 10: Mean temperature of warmest quarter)	°C×10
最冷季度平均温度(bio 11: Mean temperature of coldest quarter)	°C×10
年平均降水量(bio 12: Annual precipitation)	mm
最湿月份降水量(bio 13: Precipitation of wettest month)	mm
最干月份降水量(bio 14: Precipitation of driest month)	mm
雨量变化方差(bio 15: Coefficient of variation of precipitation seasonality)	1
最湿季度降水量(bio 16: Precipitation of wettest quarter)	mm
最干季度降水量(bio 17: Precipitation of driest quarter)	mm
最暖季度平均降水量(bio 18: Precipitation of warmest quarter)	mm
最冷季度平均降水量(bio 19: Precipitation of coldest quarter)	mm

Garp1.1.6 软件 (<http://www.Nhm.ku.edu/desktopgarp/Download.Html>) 用于 GARP 模型预测; MAXENT3.3.3k 软件 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>) 用于最大熵模型预测^[16]。生物地理信息系统平台 ArcGIS 10.1 来源于 ESRI 公司, 主要进行数据的格式转换和图层的重分类。

1.2 研究方法

1.2.1 处理样本数据

在 DIVA-GIS 软件中使用 Sample Points 工具导入样本数据, 设置 75% 的分布点作为训练数据, 以剩余 25% 的分布数据以及另外随机选取的 10 倍于原分布点的数据作为测试数据。随机生成 10 组训练数据和测试数据进行运算, 取平均值以比较不同模型预测的差异性, 训练数据用于模型预测, 测试数据用于模型验证。

1.2.2 环境数据共线性诊断

由于所选取的 19 个气候数据与温度、降水相关, 为避免因子之间共线性过高导致的模型过度拟合^[17], 采用 Spearman 相关性检验比较各气候因子之间的关系。Spearman 系数大于 0.75 时保留生态意义重要的因子, 小于 0.75 时变量均保留^[18], 最终获得 9 个环境变量: 年平均温度(bio 1)、昼夜温差月均值(bio 2)、温度变化方差(bio 4)、最暖季度平均温度(bio 10)、年平均降水量(bio 12)、最湿月份降水量(bio 13)、雨量变化方差(bio 15)、最干季度降水量(bio 17)、最冷季度平均降水量(bio 19)。

1.2.3 模型预测

BIOCLIM 模型和 DOMAIN 模型: 利用 DIVA-GIS 软件将 9 个环境数据转换成 grd 格式并生成 stack 数据集, 然后添加 shp 格式的训练数据, 在 Modeling-Bioclim/Domain 模块中依次进行 BIOCLIM 和 DOMAIN 模型的预测。

GARP 模型: 先将环境数据在 Garp Dataset Manager 中转换成 RAW 格式, 再向 Desktop Garp 软件依次导入 csv 格式的训练数据和 RAW 格式环境数据。模型运行参数设置如下: 训练数据比例为 100%, 循环次数为 20 次, 勾选最优模型集合选项, 输出格式为 asc。

MAXENT 模型: 在 MAXENT 软件中依次添加 csv 格式的训练数据和 asc 格式的环境数据, 运算参数和运算规则等采用默认设置, 输出格式

为 asc。

1.2.4 模型评价

常用的模型预测精度的评价方式有2种,分别为阈值依赖性评价和非阈值依赖性评价。受试者工作曲线ROC(receiver operating characteristic curve)下方面积即为AUC值(Area under curve),属于非阈值依赖性指标,是目前认可度较高的诊断试验评价指标^[19]。Kappa统计量是一种阈值依赖评价指标,也被广泛用作模型评价参数^[20,21],其结合了物种分布率、灵敏度和特异度来进行一致性评价。本研究采用ROC和Kappa统计量评价模型的预测精度,在DIVA-GIS中将各个模型的预测图转换成grd格式并生成stack数据集,再导入验证点图层生成评估文件,然后输出AUC值和Kappa值。各评价指标的系数范围及评价标准见表2。

表2 AUC和Kappa系数范围及评价标准
Table 2 Coefficient range and evaluation of AUC and Kappa

AUC		Kappa	
系数范围 Coefficient range	预测精度评价 Prediction accuracy	系数范围 Coefficient range	一致性评价 Consistency
0.5~0.6	失败 Failure	0~0.2	微弱 Very weak
0.6~0.7	较差 Discrepancy	0.2~0.4	弱 Weak
0.7~0.8	一般 General	0.4~0.6	中度 Moderate
0.8~0.9	好 Good	0.6~0.8	显著 Notable
0.9~1	非常好 Very good	0.8~1	极佳 Excellent

1.2.5 不同模型预测结果显示

每个模型均有10组预测结果,选择每个模型AUC值最大的预测结果作为底图,采用GIS进行格式转换及栅格重分类。根据自然间断点分级法(Jenks)对不同模型的预测结果进行等级划分,然后得到不同模型的适生区分布图。

2 结果与分析

2.1 模型预测准确性评估

由DIVA-GIS输出的4个模型的AUC均值和Kappa均值及其标准差可以发现(表3),4

种模型的AUC均值达到0.8以上,Kappa均值达到0.6以上,表明4个模型的预测效果均达到较好的水平,模型一致性显著,因此它们均可用来预测蒙古黄芪潜在适生区分布。比较不同模型的AUC值可知,AUC最大的是DOAMIN模型,达到0.9245;其次是BIOCLIM模型。4个模型AUC值的标准差大小排序为:DOAMIN<GARP< BIOCLIM<MAXENT。AUC值和标准差代表模型预测的总体水平,AUC值越大,标准差越小,表明模型预测越稳定^[22],且随机取样对模型影响小。此研究结果表明对蒙古黄芪来说,DOAMIN模型具有最好的预测效果,其次是BIOCLIM和GARP模型,MAXENT模型预测水平较低。

比较不同模型的Kappa值可知,4个模型的Kappa值大小排序为:DOAMIN>GARP> BIOCLIM>MAXENT,DOAMIN模型的一致性最好。通过比较4个模型Kappa值的标准差发现,DOAMIN和GARP模型的标准差相同且均最小,其次是BIOCLIM和MAXENT模型,DOMAIN模型预测效果更好。各个模型的AUC值和Kappa值具有一定的相关性,AUC值越大,Kappa值也越大,但是BIOCLIM和GARP模型却不太符合这个规律。DOMAIN模型的AUC值和Kappa值在4个模型中均最大。综上,预测蒙古黄芪潜在分布的最适模型是DOMAIN。

2.2 蒙古黄芪潜在适生区

本研究采用4个模型预测得到了蒙古黄芪潜在适生区分布图(图2),结果显示蒙古黄芪主要分布于我国北纬33°以北的地区,包括内蒙古、陕西、山西、甘肃、宁夏、河北以及东北三省和内蒙古交界地区,另外新疆、西藏、青海和四川等地有少量潜在适生区。甘肃、宁夏、陕西、山西、河北和内蒙古是蒙古黄芪最适宜区的集中分布带。从气候带分布来看,蒙古黄芪的潜在分布区主要位于温带大陆性气候带,局部分布区为高原气候,主要涉及祁连山脉、阴山山脉、吕梁山、贺兰山、大兴安岭及小兴安岭等地区。

表3 4个模型的AUC和Kappa值
Table 3 AUC and Kappa values of four models

模型	BIOCLIM	DOAMIN	GARP	MAXENT
AUC	0.8868 ± 0.03815	0.9245 ± 0.01729	0.8762 ± 0.02410	0.8058 ± 0.04901
Kappa	0.7061 ± 0.06981	0.7463 ± 0.04541	0.7212 ± 0.04363	0.6115 ± 0.09803

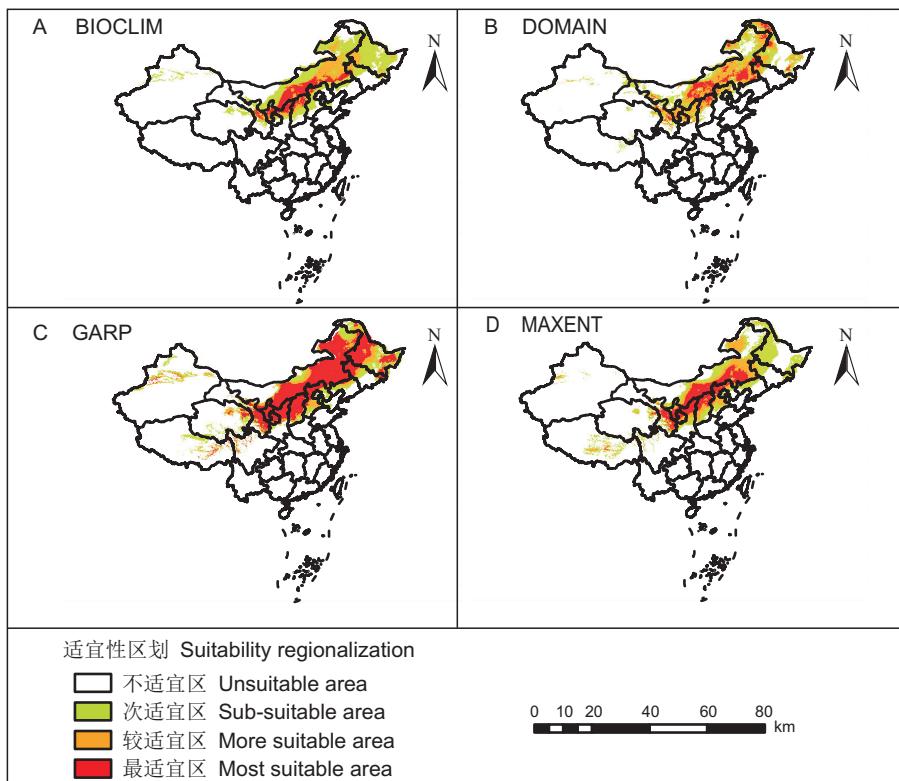


图 2 不同生态位模型预测蒙古黄芪潜在适生区

Fig. 2 Potential distribution areas of *A. membranaceus* var. *mongholicus* based on different ecological niche models

由于不同模型的原理和算法不同，4个模型的预测结果也存在部分差异。BIOCLIM 模型预测结果显示，蒙古黄芪潜在适生区为中国秦岭以北和东北部地区，其中包括甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北及东北等地区，此外新疆和青海局部地区也有分布(图 2: A)。DOMAIN 模型的预测结果显示，蒙古黄芪潜在适生区主要集中在中国北部地区，主要包括甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、北京市及东北地区，新疆、青海、西藏也有少量分布(图 2: B)。GARP 模型预测结果显示，蒙古黄芪潜在适生区主要分布在中国北方地区，此外青藏地区也有少量分布，包括甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、东北地区、新疆、青海和西藏(图 2: C)。根据 MAXENT 模型预测的结果，蒙古黄芪潜在适生区主要分布于中国北方地区，青藏局部地区有分布，主要包括甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、东北地区、新疆、青海和西藏(图 2: D)。总体而言，最适宜区范围最广的是 GARP 模型的预测结果；预测结果较为相似且最适宜区范围重合的是 BIOCLIM 模型和 MAXENT 模型；最适宜区分布比较分散的是 DOMAIN 模型

的预测结果。

3 讨论

在大尺度条件下，短期内气候因素以及蒙古黄芪对环境的适应性无较大改变，这符合生态位模型预测物种分布的前提条件^[23]，因此该气候数据和蒙古黄芪样本点数据可以用于预测蒙古黄芪的分布。

3.1 蒙古黄芪适生区预测结果的比较

蒙古黄芪的潜在适生区主要分布于中国北方地区，包括内蒙古、陕西、山西、甘肃、宁夏、河北以及东北三省和内蒙古交界的地区，这与文献报道蒙古黄芪的分布一致，且预测结果也与中药材产地适宜性系统预测结果基本重合^[24,25]，最适宜区主要分布于甘肃、宁夏、陕西、山西、河北和内蒙古，因此这几个省区可作为蒙古黄芪的主产区。4个模型均根据有限的样本分布数据预测蒙古黄芪的潜在适生区，并具有较好的预测效果。不同模型预测结果间存在稍许差异，这主要与不同模型的算法有关。GARP 模型预测的最适宜区范围最广，这是因为 GARP 模型是基于遗传算法原理，通过不断

迭代进行规则集的选择、评价、验证、接受或拒绝，形成不同规则的集合，集合中的最优结果则是物种潜在分布区，因此其预测范围会比其他模型要广。MAXENT 模型和 BIOCLIM 模型预测结果较为相似，最适宜区范围较一致，这是由于 MAXENT 模型是基于最大熵理论^[26]，在已知的约束条件下，对未知事物不做任何假设，熵最大时事物最接近真实状态，因此其预测结果比较保守；而 BIOCLIM 模型是基于环境包络原理，假定此环境气候与实际分布区气候相似，某物种能在该环境中正常生长、繁殖后代，故预测结果也相对保守。DOMAIN 模型是根据 Gower 距离算法得到点-点的相似矩阵，受取样点影响较大，其预测结果与分布点关系紧密，分布不连续且均以样本点为中心向周围分散。因此，不同的模型具有自己的优缺点，可根据不同模型预测结果进行对比分析从而选择最佳产区。

ROC 曲线和 Kappa 检验是评价模型预测精度的常用方法^[27,28]，本文结果显示 4 种模型预测精度均达到良好且一致性显著，比较稳定可靠。相比之下，DOMAIN 模型表现出最佳效果，其 AUC 值和 Kappa 值均最大，但 DOMAIN 模型的结果受样本点影响较大，单独应用时应注意样本收集。GARP 模型预测范围较广，其他模型的预测结果均在其范围内。此外 ROC 曲线和 Kappa 检验在评价模型精度上也有一些区别，Kappa 统计量主要反映出点判别能力，为系列阈值判别能力的最大值；而 AUC 值是系列阈值判别能力的综合值，AUC 不受阈值影响，用于同一物种不同模型比较研究更合理^[29]。

3.2 蒙古黄芪地理分布格局

蒙古黄芪适生区主要位于在秦岭以北地区的温带大陆性气候带，局部地区是高原气候。该种气候类型是季风和西风带共同作用的结果。温带大陆性气候的特征是冬季寒冷、夏季温热，气温年较差和日较差均较大，降水量少且季节集中，主要在 7、8 月份，降水的年际变化大，属于半湿润地区，耕地类型多以旱地为主。这种干燥、寒冷、雨水少的气候特征与黄芪主要次生代谢产物积累集中时期、喜冷凉气候、耐旱性强和怕涝的生物学特性相适应^[30]，温带大陆性气候的气温日较差较大，这有利于黄芪中黄芪多糖的积累。从地形地势来看，秦岭以北地形多为大高原和平原，中间有断裂，而秦

岭是由东向西逐渐升高，排列整齐并且呈北边背风南边迎风的地貌，因此秦岭山脉对气流的运行产生了阻滞作用，在夏季阻隔大量湿润的海洋气流进入西北部，进而使北方气候干燥，同时气流在背风坡下沉，也致使降水较少^[31]，满足了蒙古黄芪生长所需的环境气候。蒙古黄芪潜在分布区主要位于祁连山脉、阴山山脉、吕梁山、贺兰山、大兴安岭和小兴安岭等地区，最适宜区主要分布于内蒙古与宁夏、陕西、山西、河北交界处的高原地带，即内蒙古高原和黄土高原的部分地区。这些地区地势西高东低，内蒙古高原位于内陆，与海洋有一定距离，且有山脉阻隔，降水量少，气候干燥；黄土高原由于其特殊的地理位置，受经纬度和地形的影响^[32]，降水稀少，气候干燥。这均与蒙古黄芪适生于高海拔地区且耐旱的生物学特性相适应^[33]，这种地形地势与温带大陆性气候的形成也有着密不可分的关系，因此对蒙古黄芪的分布有着重要影响。此外，虽然蒙古黄芪对土壤要求不甚严格，但土壤质地及土层厚薄不同仍会影响黄芪的产量和质量^[34]，预测结果也表明最适宜分布区多位于排水良好的高地势地区。

本文基于气候因素在全国尺度对蒙古黄芪的地理分布进行预测^[35]，但局部地区环境因素对蒙古黄芪生长也有重要的影响，在实际栽培生产过程中，除了考虑气候因素外，土壤、地形、海拔以及蒙古黄芪自身的遗传变异等因素也需要综合考虑，才能实现蒙古黄芪的高产优产。

参考文献：

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：一部 [S]. 北京：中国医药科技出版社，2015.
- [2] 冯学金，刘根科，梁素明. 蒙古黄芪种质资源研究进展 [J]. 山西农业科学，2010，38(8)：95–98.
- [3] Feng XJ, Liu GK, Liang SM. Review of studies on germplasm resources of Mongolia milkvetch [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(8) : 95–98.
- [4] 张兰涛，郭宝林，朱顺昌，冯国志. 黄芪种质资源调查报告 [J]. 中药材，2006，29(8)：771.
- [5] Zhang LT, Guo BL, Zhu SC, Feng GZ. Investigation report on *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2006, 29(8) : 771.
- [6] 秦雪梅，李震宇，孙海峰，张丽增，周然，等. 我国黄芪药材资源现状与分析 [J]. 中国中药杂志，2013，38(19)：3234–3238.

- Qin XM, Li ZY, Sun HF, Zhang LZ, Zhou R, et al. Status and analysis of *Astragalus Radix* resource in China [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, 38(19): 3234–3238.
- [5] 谢彩香, 宋经元, 韩建萍, 黄林芳, 李西文. 中药材道地性评价与区划研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2016, 18(6): 950–958.
- Xie CX, Song JY, Han JP, Huang LF, Li XW. Research on genuineness evaluation and regionalization of Chinese medicinal materials [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology*, 2016, 18(6): 950–958.
- [6] Kulhanek SA, Leung B, Ricciardi A. Using ecological niche models to predict the abundance and impact of invasive species: Application to the common carp [J]. *Ecol Appl*, 2011, 21(1): 203–213.
- [7] 张琴, 曾凡琳, 张东方, 谢彩香, 陈士林. 基于最大熵模型的三七生态适宜区及生态特征[J]. 药学学报, 2016, 51(10): 1629–1637.
- Zhang Q, Zeng FL, Zhang DF, Xie CX, Chen SL. Ecology suitability regions and ecological characteristics of *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen based on maximum entropy model [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2016, 51(10): 1629–1637.
- [8] 文检, 宋经元, 谢彩香, 张琴, 曾凡琳, 张艺. 基于最大信息熵模型的能源物种麻疯树潜在适宜区[J]. 植物科学学报, 2016, 34(6): 849–856.
- Wen J, Song JY, Xie CX, Zhang Q, Zen FL, Zhang Y. Identification of potential distribution areas for energy plant *Jatropha curcas* L. using the Maxent Entropy Model [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(6): 849–856.
- [9] Busby JR. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system[J]. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6(1): 8–9.
- [10] Carpenter G, Gillison AN, Winter J. DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals[J]. *Biodivers Conserv*, 1993, 2(6): 667–680.
- [11] Stovkwell D, Peters D. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction[J]. *Int J Geogr Inf Sci*, 1999, 13(2): 143–158.
- [12] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190: 231–259.
- [13] 刘增辉, 曹晓虹. 栽培黄芪的研究综述[J]. 甘肃农业科技, 2014(6): 54–56.
- Liu ZH, Cao XH. Review on cultivation of *Radix Astragalus* [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2014(6): 54–56.
- [14] 孙政华, 邵晶, 郭政. 黄芪化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中医临床研究, 2015, 7(25): 22–25.
- Sun ZH, Shao J, Guo M. A review on chemical components and pharmacological effects of Huangqi [J]. *Clinical Journal of Chinese Medicine*, 2015, 7(25): 22–25.
- [15] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉藻. 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, Bu WJ, Gao YB. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(1): 90–98.
- [16] 张海涛, 罗渡, 牟希东, 徐猛, 韦慧, 等. 应用多个生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1277–1284.
- Zhang HT, Luo D, Mou XD, Xu M, Wei H, et al. Predicting the potential suitable distribution area of the apple snail *Pomacea canaliculata* in China based on multiple ecological niche models [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1277–1284.
- [17] Graham MH. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression [J]. *Ecology*, 2003, 84(11): 2809–2815.
- [18] Zhang MG, Slik JWF, Ma KP. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China [J]. *Sci Rep-UK*, 2016, 3: 1–9.
- [19] Vanagias G. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems [J]. *Interact Cardiov Th*, 2004, 3(2): 319–322.
- [20] Manel S, Williams HC, Ormerod SJ. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence [J]. *J Appl Ecol*, 2001, 38(5): 921–931.
- [21] Segurado P, Araujo MB. An evaluation of methods for modelling species' distributions [J]. *J Biogeogr*, 2004, 31(10): 1555–1568.
- [22] 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, 2013.
- [23] 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, 2007.
- [24] 索风梅, 丁万隆, 谢彩香, 董梁, 林余霖, 等. 蒙古黄芪的生态适宜性数值分析[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2010, 12(3): 480–485.
- Suo FM, Ding WL, Xie CX, Dong L, Lin YL, et al. GIS-Based ecological evaluation of suitable areas of *Astragalus membranaceus* Growth [J]. *World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica*, 2010, 12(3): 480–485.
- [25] 刘德旺, 谷彩梅, 杨庆珍, 黄林芳, 谢彩香. 内蒙古地区道地药材蒙古黄芪资源调查及产地适宜性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 838–844.
- Liu DW, Gu CM, Yang QZ, Huang LF, Xie CX. Resource surveys and suitability of origin for genuine medicinal

- materials, *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* in Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 838–844.
- [26] 马松梅, 张明理, 张宏祥, 孟宏虎, 陈曦. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸果木的潜在地理分布及格局[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1327–1335.
Ma SM, Zhang ML, Zhang HX, Meng HH, Chen X. Predicting potential geographical distributions and patterns of the relic plant *Gymnocarpus przewalskii* using Maximum Entropy and Genetic Algorithm for Rule-set Prediction[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(11): 1327–1335.
- [27] 王娟, 倪健. 中国北方温带地区5种锦鸡儿植物的分布模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 12–24.
Wang J, Ni J. Modelling The distribution of five *Caragana* species in temperate northern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 12–24.
- [28] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1091–1105.
Zhang L, Liu SR, Sun PS, Wang TL. Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(11): 1091–1105.
- [29] 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 and Science*, 2007, 15(4): 365–372.
- [30] 赵月春. 黄芪的规范化栽培技术[J]. 山西科技, 2015, 30(3): 155–157.
Zhao YC. Standardized cultivation techniques of *Astragalus membranaceus*[J]. *Shanxi Science and Technology*, 2015, 30(3): 155–157.
- [31] 黄建军. 秦岭构造带对陕西气候和生态环境的控制作用[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 81–86.
Huang JJ. Control of Qinling tectonic zone on climate and eco-environment in Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(3): 81–86.
- [32] 张建香, 张多勇, 张勃, 赵一飞, 刘万锋. 黄土高原植被景观多尺度变化及其与地形的响应关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 611–620.
Zhang JX, Zhang DY, Zhang B, Zhao YF, Liu WF. Vegetation landscape change and its multi-scale response relationship with terrain in loess plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 611–620.
- [33] 杨宏昕, 张春霞, 魏慧, 王建华. 黄芪栽培研究进展[J]. 临床合理用药, 2015, 8(1): 180–181.
Yang HX, Zhang CX, Wei H, Wang JH. Progress in *Astragalus* cultivation[J]. *Chinese Journal of Clinical Rational Drug Use*, 2015, 8(1): 180–181.
- [34] 侯颖. 种植黄芪的关键技术[J]. 特种经济动植物, 2012, 15(11): 39.
Hou Y. Key techniques for growing *Astragalus membranaceus*(Fisch.) Bunge[J]. *Special Economic Animal and Plant*, 2012, 15(11): 39.
- [35] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

(责任编辑: 张平)