

•研究报告•

# 濒危物种长柄扁桃的潜在分布与保护策略

褚建民<sup>1</sup> 李毅夫<sup>2</sup> 张雷<sup>1</sup> 李斌<sup>1</sup> 高明远<sup>1</sup>  
唐晓倩<sup>1</sup> 倪建伟<sup>1</sup> 许新桥<sup>1\*</sup>

1 (中国林业科学研究院林业研究所国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

2 (西南林业大学林学院, 昆明 650224)

**摘要:** 长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)在我国分布于内蒙古和陕西, 是一种濒危灌木, 其资源现状只有零星的文献记录, 这限制了对其资源数量和保护现状的评估。为此, 本文通过野外调查来确立其自然分布区范围。我们选择了8个环境因子, 运用基于规则集的遗传算法(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP)模型和最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型进行模拟, 预测了长柄扁桃在中国的潜在适宜分布区; 同时基于4个模型精度评估指标(Kappa、真实技巧统计法、总精度和受试者工作特征曲线下的面积)对模型进行验证, 采用刀切法评估了预测变量的重要性。结果表明, 两种模型均能准确预测长柄扁桃的地理分布规律, 但MaxEnt模型的4个预测精度指标都大于GARP模型。根据模型结果可判断长柄扁桃的适宜分布区以内蒙古中部地区为主, 东起大兴安岭南端, 向西可至贺兰山、乌兰布和沙漠以东, 涵盖了毛乌素沙地、库布齐沙漠和浑善达克沙地, 以及乌拉山、大青山等土石山区。其低适宜分布区可辐射至辽宁、河北、山西、陕西等省部分地区, 另外在宁夏和甘肃中部地区也有零星的低适宜分布区。变量重要性分析结果表明, 与降水相关的变量是决定长柄扁桃地理分布的重要环境因素。

**关键词:** 长柄扁桃; 潜在分布区; 最大熵模型; 基于规则集的遗传算法(GARP)模型; 物种保护

## Potential distribution range and conservation strategies for the endangered species *Amygdalus pedunculata*

Jianmin Chu<sup>1</sup>, Yifu Li<sup>2</sup>, Lei Zhang<sup>1</sup>, Bin Li<sup>1</sup>, Mingyuan Gao<sup>1</sup>, Xiaoqian Tang<sup>1</sup>, Jianwei Ni<sup>1</sup>, Xinqiao Xu<sup>1\*</sup>

1 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

2 College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224

**Abstract:** The endangered shrub species *Amygdalus pedunculata* is distributed in Inner Mongolia Autonomous Region and Shaanxi Province, China. However, little is known about its resource quantity and conservation status. A field investigation was conducted to determine the natural distribution range of *A. pedunculata*. Eight environmental factors were chosen to build models with the genetic algorithm for rule-set prediction (GARP) model and maximum entropy (MaxEnt) model. We predicted the potential distribution of *A. pedunculata* in China. Using four model evaluation metrics (Kappa, true skill statistic (TSS), overall accuracy and area under the receiver operating characteristic curve (AUC)), we assessed the predictive performance of both models. The Jackknife method was used to investigate the most important environmental factors for the distribution of *A. pedunculata*. The results indicated that both models were effective for predicting the distribution of *A. pedunculata*, but MaxEnt performed better than GARP in terms of the four evaluation metrics. The species was predicted to have a broad suitable area, which ranged from the south of Daxing'anling to the east of Helan Mountains and the Ulan Buh Desert. *Amygdalus pedunculata* is mainly distributed in the middle regions of Inner Mongolia, including Mu Us Sandy Land, Kubuqi desert, Otindag Sandy Land, and the Wulashan and Daqingshan Mountains. Low suitable sites occurred in some regions of Liaoning, Hebei, Shanxi and Shaanxi. Besides, and there were some sporadic low suitable areas in the middle regions of the

收稿日期: 2016-11-22; 接受日期: 2017-2-17

基金项目: 林业公益性行业专项(201204307)、科技基础性工作专项(2013FY111700)和国家自然科学基金(41301056)

\*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xqx210@126.com

Ningxia Hui Autonomous Region and Gansu Province. Variable importance analysis showed that the variables relevant to precipitation had more significant effects on the geographic distribution of *A. pedunculata*. These results have important implications for resource conservation and ecology including the revegetation of semi-arid ecosystems.

**Key words:** *Amygdalus pedunculata*; potential distribution area; MaxEnt model; GARP model; species conservation

长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)为蔷薇科桃属扁桃亚属落叶灌木, 又名野樱桃、柄扁桃等, 在我国主要分布于内蒙古和陕西, 在俄罗斯的西伯利亚和蒙古国也有零星分布。长柄扁桃喜光、耐旱、耐瘠薄, 多生长于浅山地带的阳坡、半阳坡和开阔的谷地, 也生长于部分沙漠和草原地带(郭春会等, 2005; 卢琦等, 2012; 许新桥和褚建民, 2013)。作为干旱、半干旱沙地和荒漠化草原的乡土灌木, 长柄扁桃是营造护牧林、防风固沙林和饲料林的优良树种。其果仁含油率高, 油品好, 有很高的经济价值(张萍等, 2007; Chu et al, 2013; 许新桥和褚建民, 2013)。长期以来, 由于环境的破坏和不当利用, 其种群数量不断减少, 自然分布范围也日趋萎缩。1989年内蒙古自治区政府将其认定为三级重点保护植物, 1992年被列为二级濒危植物(傅立国和金鉴明, 1991; 赵一之, 1992)。以往对长柄扁桃的研究主要集中在其亲缘关系、抗旱、耐盐碱、繁育等生物学特征以及油脂含量、药用价值等方面(马艳和马荣才, 2004; 雷根虎等, 2009; 李聪等, 2010), 关于其地理分布及适生条件方面的研究鲜有报导。

了解物种的空间分布是制订生物多样性保护和资源开发利用策略的基础(Graham, 2001; Zhang & Ma, 2008)。物种分布模型(species distribution models, SDMs)是以生态位理论为基础, 根据物种的已知分布样点数据和对应的各种环境因子数据, 分析影响物种分布的主要因素并对其潜在分布进行预测(Guisan & Thuiller, 2005; 乔慧捷等, 2013; 朱耿平等, 2013)的一种方法。主要是根据研究区的部分取样数据建立模型, 然后预测研究区内该生物的潜在分布; 或对另一个区域内该生物的潜在分布区进行研究; 亦或对过去或未来不同气候情景下生物的分布情况进行研究。目前, 物种分布模型已广泛应用于基础生态学和生物地理学的研究中, 常用模型有: 生物气候包络模型(bioclimate envelope model, BEM; Hampe, 2004)、生态位因子分析

(ecological niche factor analysis, ENFA; Calenge, 2006)、分类与回归树(classification and regression tree, CART; Özkan, 2011)、最大熵(maximum entropy, MaxEnt; Phillips et al, 2004)、基于规则集的遗传算法(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP; Stockwell, 1999)和支持向量机等(support vector machine, SVM; 左闻韵等, 2007)。物种分布模型目前主要用于外来物种入侵的扩散分析(Lavoie et al, 2013)、珍稀物种的分布预测(徐晓婷等, 2008)、自然保护区的选择(Moilanen, 2005)、未来气候变化对物种分布的影响研究(张雷等, 2011), 以及指导植被调查工作、确定珍稀和濒危物种的实际分布、植物地理学研究等方面。其中, 最大熵和基于规则集的遗传算法模型具有较好的预测能力, 而且可以在具有较少分布数据的情况下获得较好的预测结果(van Proosdij et al, 2015; Saupe et al, 2015)。因此, 本研究拟通过实地调查和文献资料收集, 采用GARP模型和MaxEnt模型模拟预测长柄扁桃在我国的潜在适生区域, 为该物种的有效保护和合理利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 分布数据收集

于2011–2013年对我国野生长柄扁桃的分布状况进行实地调查, 借助GPS定位并采集到野生长柄扁桃样本306个。主要调查区域涉及毛乌素沙地周边的陕西省榆阳区、神木县、府谷县, 内蒙古乌拉山、固阳县(大庙村、官府沟、梅令沟、腮忽洞)以及浑善达克沙地周边的苏尼特右旗、苏尼特左旗等地。为防止采样点的空间聚集性对模型预测的影响, 对306个样本的分布点进行筛选。具体过程为: 将306个样本的分布点转化为空间分辨率为8 km的栅格, 共计得到45个栅格。提取每个栅格的中心坐标点, 然后从306个样本分布点数据中选取离每个栅格中心坐标点最近的1个分布点, 共计得到45个分布点, 再随机选取其中的30个点位信息作为模型训练

数据, 剩余的15个点位信息用于模型检验, 此交叉验证过程重复10次。

1.2 环境数据

本文选择的环境因子来源于世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>), 该数据库利用1950–2000年间来自世界各地气象站的气候数据, 采用插值法生成全球气候数据, 空间分辨率可达到30" (1 km) (Hijmans et al, 2005)。使用ArcGIS空间分析工具对19个因子进行相关分析, 确定各因子相关性(相关性矩阵见附录1), 根据各因子间的相关性系数分析并确定参与模型计算的因子。因部分环境因子间有较强的相关性(附录1), 为防止共线性发生, 对相关性大于0.8的变量只保留其中一个, 最终选用平均温度日较差、等温性、最热月最高温度、最冷月最低温度、平均温度年较差、最湿月降水量、最干月降水量和降水量季节性变动系数8个因子参与模型计算(表1)。空间分布分析的底图为1:400万的中国行政区划图, 可从国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>) 下载获得。本研究在空间分辨率为1 km的尺度上开展。

1.3 模型介绍及变量重要性评估

GARP模型是以某物种的已知分布信息及相应的环境影响因子为依据, 运用遗传算法对研究区域和物种已知分布区的非随机关系进行反复迭代, 计算最优种类分布规则。该模型对变量所属总体的统计分布形式没有严格的要求, 能够快速有效地搜索多变量空间, 并集成了不同的变量和规则组合, 通过各类规则之间的互补提高模型的模拟能力, 能够直观地体现出各种生态因子与物种的关系, 是目前应用最广泛的物种分布区预测方法之一(Stockwell

& Peters, 1999)。其特点是充分考虑不同的变量和规则组合, 根据输出结果给出的统计信息选择最优组合。本文在使用Desktop GARP (<http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp/>)建模时, 采用全部30个模型训练数据点用于训练模型, 同时选择原子规则(atomic)、逻辑回归(logistic regression)、生物气候包络(bioclimatic envelope)和逆生物气候包络(negated bioclimatic envelope) 4种类型规则, 模拟计算1,000次(或收敛极限达到0.01后终止运算)。GARP模型的预测结果以布尔值(0表示不分布, 1表示分布)形式表现, 本文GARP模型最终输出结果采用的是最优子集选择方式(best subset selection parameters), 即从1,000个预测结果中选出100个最优模型, 通过ArcGIS进行平均, 生成一幅值域标准化为0.0–1.0的分布图, 以代表物种相对出现的可能性大小。

MaxEnt模型是基于热力学第二定律, 以最大熵理论为基础的一种模型方法, 也是当前预测物种分布区的重要方法之一。该方法基于已知的物种分布和环境数据, 通过拟合具有熵值最大化的概率分布, 构建约束条件并建立相互关系, 对物种的潜在适生区作出预测。该模型的突出优点是可以拟合由多种函数类型组合而成的复杂响应变量(Phillips et al, 2004), 可以分析物种与环境变量之间以及各变量之间的非线性相关性和相互作用, 不同的环境变量根据其重要性赋予不同的权重。本文采用MaxEnt模型 Ver.3.3.3k ([http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)), 利用全部30个模型训练点数据建模, 不再对此数据进行预先分割用于模型评估, 而是采用独立的模型评估点数据(见下文评估方法部分)对模型预测结果进行评估。采用刀切法(Jackknife)测算变量的重要性, 其余参数保持默认设置, 最终输出的栅格文件是以逻辑值形式给出的生存概率。MaxEnt模型通过刀切法评估变量重要性的时候, 是通过删除其中一个变量来计算剩余变量对模型表现的影响, 同时也利用单个变量建立模型来评估此变量的重要性, 此外还利用全部变量来建立模型; 通过对比剩余变量和所有变量建立的模型之间的表现差异来评估删除变量的重要性, 即差异越大, 此变量越重要。

GARP模型和MaxEnt模型的输出结果为物种分布概率值, 值越高, 说明物种分布的可能性越大, 适用于对长柄扁桃潜在分布的适宜度进行判定, 可

表1 长柄扁桃分布模型构建所需环境因子  
Table 1 Environmental variables used in the distribution modeling of *Amygdalus pedunculata*

数据代码 Code	环境因子 Environmental variables
BIO2	平均温度日较差 Mean diurnal temperature range
BIO3	等温性 Isothermality
BIO5	最热月最高温度 Max. temperature of the warmest month
BIO6	最冷月最低温度 Min. temperature of the coldest month
BIO7	平均温度年较差 Temperature annual range
BIO13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
BIO14	最干月降水量 Precipitation of driest month
BIO15	降水量季节性 Precipitation seasonality

用作物核心分布区域的确立,以评估现有分布区的保护情况以及对自然保护区功能区进行划分。为比较GARP和MaxEnt两个模型预测生境适生区的面积,根据10套模型预测值的平均值大小对预测结果图进行了主观分类,共划分为4个适生等级:高适宜生长区( $\geq 0.9$ )、次适宜生长区(0.7–0.9)、低适宜生长区(0.5–0.7)和不适宜生长区( $< 0.5$ )。

#### 1.4 模型验证评估

为了验证模型的预测精度,利用上文提到的15个模型验证点数据进行模型评估。因为两个模型的预测结果都是概率型的,而一些典型的模型精度评估指标也需要物种不存在数据来协助进行,如Kappa系数、真实技巧统计法(true skill statistic, TSS)等。为此,本文采用张雷等(2011)的方法生成了15个“真实”不存在点数据,具体步骤为:将所有没有长柄扁桃记录的地点与已知记录地点的环境条件(即8个环境变量)进行对比,如果某地区与已知点环境条件相同(即此地区的环境变量完全包含在所有已知记录地点的8个环境变量阈值范围内),那么这些点可以认为适合长柄扁桃分布,把这些地区从无记录地点中删除;剩余的地区可以认为是“完全”不适宜长柄扁桃分布的地区,这些地区指定为“真实”不存在区。从这些不存在区域中,通过ArcGIS 10.2软件随机生成15个点作为长柄扁桃的“真实”不存在地区,此过程重复10次,然后使用长柄扁桃的15个检验点和15个“真实”不存在点与其模型预测值进行对比,通过混淆矩阵进行模型精度检验,得到10套模型精度评估数据,利用其平均值比较两个模型预测精度的大小。

采用的模型精度评估指标包括:受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUC)、Kappa系数、TSS和总体精度(overall accuracy)。AUC值是指分类方案成功将预测正确的点与预测错误的点分开的概率,在0.5–1.0间变化,0.5对应一个完全随机的预测,1.0对应一个完美的预测。一般而言,如果AUC值在0.5–0.7之间,表示预测精度较差,在0.7–0.9之间表示预测精度中等, $> 0.9$ 则表示模型的预测精度非常高(McCune & Grace, 2002)。Kappa系数被广泛应用于各领域研究中,该系数反映了预测值和观测值之间的接近程度是否大于随机分配的值。一般而言,如果Kappa值在0.85–1.00之间,表示预测效果极好;

在0.70–0.85之间,表示预测结果很好;在0.55–0.70之间,表示预测结果好;在0.40–0.55之间,表示预测结果一般;而 $< 0.40$ 则表示模型预测失败(Monserud & Leemans, 1992)。TSS综合了敏感度(sensitivity)和特异度(specificity)两个指标的特征,它既继承了Kappa系数的优点,又克服了Kappa系数对物种发生率呈单峰曲线响应形式的弱点(Allouche et al, 2006)。总体精度为所有验证数据点正确预测的比例,较为粗略地反映了模型预测结果与观测样本的吻合程度(许仲林等, 2015)。在利用Kappa、TSS和总体精度这3个指标进行模型精度评估的时候,需要把连续(概率)性的结果预测值转换为二元值(存在/不存在),此时需要一个转换阈值。本文选用的阈值确认方法如下:在0.01–0.99区间内,以0.01为间隔进行数据选取,逐步评估每个数据作为转换阈值时得到的模型精度,选用其最大值作为每个指标所指示的模型精度。

## 2 结果

### 2.1 长柄扁桃的地理分布区及其气候条件

通过查阅中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)以及与长柄扁桃有关的文献资料(姬钟亮和钱安东, 1981; 苏贵兴, 1987)可知,长柄扁桃主要分布在内蒙古的阴山山脉浅山地区以及内蒙古鄂托克旗、乌审旗到陕西北部长城沿线的沙漠中。相关文献中对野生长柄扁桃分布的有关记录时效性较差,分布范围较粗略,而根据本次的野外调查发现,野生长柄扁桃主要分布于3个区域:(1)内蒙古乌审旗到陕西北部的毛乌素沙地,集中于陕西省的榆林地区;(2)内蒙古大青山、乌拉山山系的土石山区,在包头市固阳县、乌拉特前旗较为集中;(3)浑善达克沙地西北部及西部,在内蒙古苏尼特右旗比较集中(图1)。根据所调查的GPS点位信息及相匹配的环境数据资料,确定长柄扁桃主要地理分布范围为 $109.20^{\circ}$ – $114.29^{\circ}$  E、 $38.32^{\circ}$ – $43.26^{\circ}$  N之间,海拔范围959–2,046 m,气温介于 $-38.8^{\circ}\text{C}$ 到 $41.5^{\circ}\text{C}$ ,年降水量介于189–452 mm。

### 2.2 模型预测结果

根据Kappa、TSS、AUC和总精度对GARP模型和MaxEnt模型的预测精度进行评估,发现两者都具有较好的预测可靠性,各评估指标均大于0.70,

且都表现为MaxEnt模型优于GARP模型(表2), 但配对 $t$ 检验分析表明两者无显著差异。因此两个模型均可用于长柄扁桃的适生区分析。

GARP模型预测的潜在分布区明显大于MaxEnt模型预测的潜在分布区(图1), 但两者的预测结果均包含了文献记载和实地确认的长柄扁桃分布区。两个模型的预测结果都显示长柄扁桃在我国的潜在适宜区东起大兴安岭南部, 向西可至贺兰山、乌兰

布和沙漠以东, 其中以内蒙古中部地区为主, 涵盖了毛乌素沙地、库布齐沙漠和浑善达克沙地, 以及乌拉山、大青山等土石山区, 低适宜区可辐射至辽宁、河北、山西、陕西等地的部分地区, 而在内蒙古西部、甘肃和新疆北部地区预测结果差异较大。其中, GARP模型结果显示在内蒙古西部、甘肃和新疆北部地区仍有较大面积适宜区存在, 而MaxEnt模型则显示这些区域仅有极少低适宜区存在。根据

表2 基于规则集的遗传算法(GARP)模型和最大熵(MaxEnt)模型的预测精度

Table 2 Predictive accuracy of genetic algorithm for rule-set prediction (GARP) model and maximum entropy (MaxEnt) model

模型类型 Model type	Kappa	真实技巧统计法 True skill statistic (TSS)	总体精度 Overall accuracy	受试者工作特征曲线下面积 Area under the receiver operating characteristic curve (AUC)
MaxEnt	0.98 ± 0.01	0.98 ± 0.14	0.99 ± 0.01	1.00 ± 0.002
GARP	0.95 ± 0.01	0.95 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.98 ± 0.01

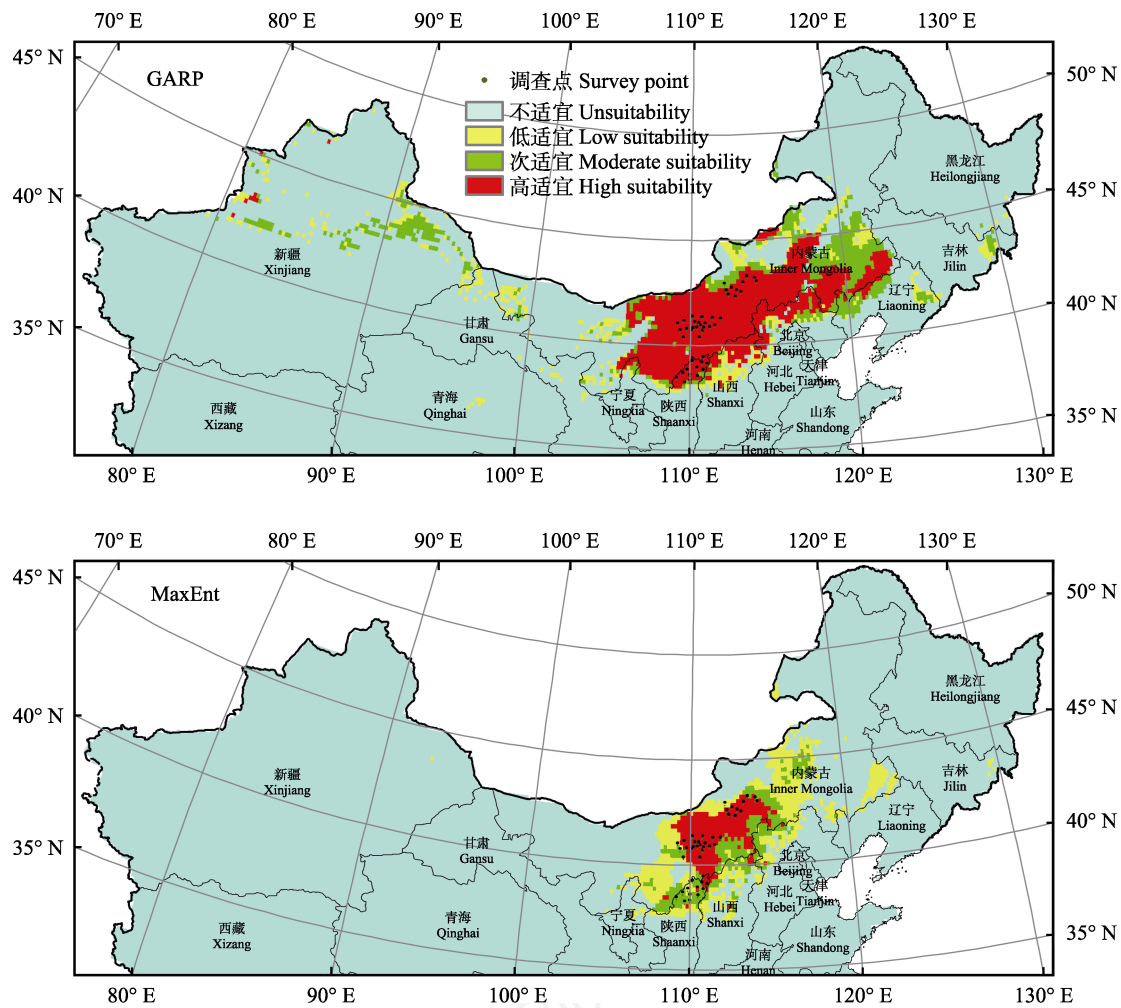


图1 基于规则集的遗传算法(GARP)模型和最大熵(MaxEnt)模型预测的长柄扁桃潜在分布区

Fig. 1 Potential distributions of *Amygdalus pedunculata* predicted by genetic algorithm for rule-set prediction (GARP) model and maximum entropy (MaxEnt) model



预测分布结果对两个模型的预测面积进行初步估计(表3),发现GARP模型预测的高适宜区和次适宜区面积都大于MaxEnt模型的预测结果,但其预测的低适宜区面积小于MaxEnt模型。

2.3 影响长柄扁桃地理分布的因素

MaxEnt模型在运算时,通过刀切法测算变量重要性可以避免各因子间的相关性影响,较为真实地反映了各因子的重要程度。根据MaxEnt模型的10次模拟结果取平均值,获得各环境因子的贡献程度(图2)。从图中可以看出:降水量季节性变动系数、平均温度年较差、最湿月降水量和最干月降水量这4个因子对长柄扁桃的预测可提供较为丰富的信息;最湿月降水量所反映的重要信息是其他变量不可替代的。

表3 GARP模型和MaxEnt模型预测面积对比  
Table 3 Comparison of prediction area between the GARP model and the MaxEnt model

	预测面积 Prediction area (×10,000 km <sup>2</sup> )	
	MaxEnt	GARP
高适宜区 High suitability area	11.9373	48.2647
次适宜区 Moderate suitability area	12.1625	24.2406
低适宜区 Low suitability area	26.0358	18.4617
总计 Total	50.1356	90.9670

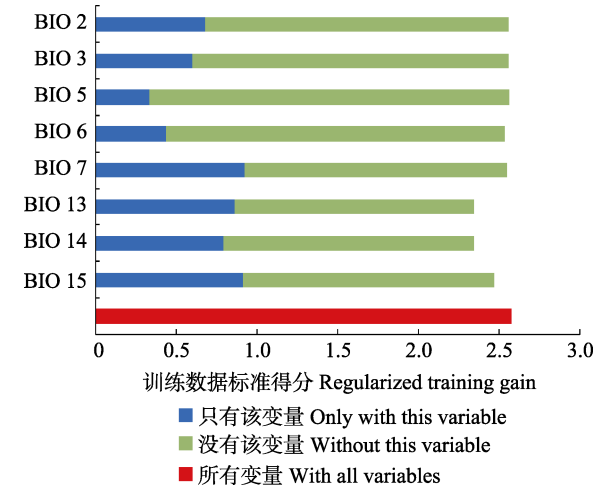


图2 MaxEnt模型中各环境因子变量的重要性。图中深蓝色越长,表示利用该因子单独建模时其重要性越大,而浅绿色表示除该因子外其他环境因子贡献程度的总和。变量含义见表1。  
Fig. 2 Importance of environmental factors estimated by MaxEnt model. Blue bars indicate the importance of the variable of interest. Green bars indicate the importance of all variables without the variable of interest. The longer the bar, the more important the variables. The abbreviations of climatic variables are the same as in Table 1.

3 讨论

3.1 两种模型的预测效果及主导因子

为了预测物种的潜在分布区,人们设计了各种模型,然而没有一种是普适的、完美的(张文驹和陈家宽, 2003; 左闻韵等, 2007)。当前, GARP 模型和 MaxEnt 模型受到普遍认可,但关于环境数据的选择及其对预测精度的影响尚未有统一的认识(Qiao et al, 2015)。由本研究可知, GARP 模型和 MaxEnt 模型均能得出很好的预测结果。通过分析发现, MaxEnt 模型预测的潜在分布区可用于长柄扁桃核心分布区域的研究,便于建立长柄扁桃的资源保护区或对其推广种植,也可评估现有分布区的保护情况以及对自然保护区的功能区进行划分;由 GARP 模型预测的潜在分布区可用于对长柄扁桃分布范围的研究,也可用于长柄扁桃潜在分布区的预测,为目标物种的保护工作提供参考,亦可选育优质、适生的长柄扁桃品种,并适度适时、循序渐进推广种植。本研究采用平均温度日较差、等温性、最热月最高温度、最冷月最低温度、平均温度年较差、最湿月降水量、最干月降水量和降水量季节性变动系数 8 个因子参与模型模拟,经刀切法计算,发现长柄扁桃的分布受平均温度年较差和降水因素影响较大。两种模型的预测精度和准确度均较好,通过这两种模型预测结果的互相对比和补充,可为保护和开发长柄扁桃资源提供重要依据。

当然,由于研究尺度等多方面的原因,本模型尚无法对局部小气候和小地形形成的小尺度空间进行预测,同时,影响其分布的主要环境因子是否全面,各因子间相关性的分析和处理等问题仍需进一步探讨和优化(李巧燕和王襄平, 2013)。

3.2 长柄扁桃的现状与保护策略

我们在调查中发现,大多数长势良好的长柄扁桃分布于人烟稀少的沙地或地势险要的陡坡,而位于林缘、田边及村旁的种群多受到不同程度的人为干扰,长势衰弱,品质低劣。长期以来,人们把长柄扁桃用作薪炭材和牧草资源,再加上生存环境的退化和破碎化,导致其天然种群越来越小,数量越来越少,已绝迹于很多潜在适宜区。随着长柄扁桃的高经济价值被发现,人们采集扁桃果作为药材和油料的力度加大,但保护理念和技术措施未能及时跟上,再加上其自交不亲和、开花结实率低的自身缺

陷, 严重影响了长柄扁桃种群的更新(张大勇和姜新华, 1999; 郝伟祺和赵鑫峰, 2011)。将长柄扁桃的潜在分布图与我国年均降水量分布图对比可以发现, 长柄扁桃主要集中于年降水量200–400 mm的范围内, 这个范围恰恰是我国荒漠化较严重的地区(吴波等, 2007), 所以本研究对长柄扁桃的保护以及荒漠化防治均有参考意义。这主要体现在两个方面: 首先, 对规模较大的长柄扁桃天然残余种群应尽快采取就地保护措施, 如在榆林、乌拉山、固阳、苏尼特右旗划定长柄扁桃天然林保护区、生态保护区, 这样既能保护当地生态环境, 又能保护长柄扁桃野生资源, 为引种驯化和资源开发储备天然种质资源。另外, 在保护区外围和其他的潜在适生区积极推广长柄扁桃的优质品种, 将其作为沙地和土石山坡生态修复的主要树种, 并指导当地群众科学管理、适度利用, 从而使物种保护、荒漠治理和经济发展进入协调、可持续状态。

## 参考文献

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, Kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232.
- Calenge C (2006) The package “adehabitat” for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecological Modelling*, 197, 516–519.
- Chu JM, Xu XQ, Zhang YL (2013) Production and properties of biodiesel produced from *Amygdalus pedunculata* Pall. *Bioresource Technology*, 134, 374–376.
- Fu LG, Jin JM (1991) China Plant Red Data Book, Vol. 1: Rare and Endangered Plants. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅立国, 金鉴明 (1991) 中国植物红皮书: 稀有濒危植物(第一册). 科学出版社, 北京.]
- Graham B (2001) Neutral macroecology. *Science*, 293, 2413–2418.
- Guisan A, Thuiller W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993–1009.
- Guo CH, Luo M, Ma YH, Ma XW (2005) Advances of characteristic research of threatened long carpodoid almond. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 33(12), 125–129. (in Chinese with English abstract) [郭春会, 罗梦, 马玉华, 马小卫 (2005) 沙地濒危植物长柄扁桃特性研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 33(12), 125–129.]
- Hampe A (2004) Bioclimate envelope models: what they detect and what they hide. *Global Ecology and Biogeography*, 13, 469–471.
- Hao YQ, Zhao XF (2011) Distinguishing early-acting inbreeding depression from late-acting ovarian self-incompatibility. *Biodiversity Science*, 19, 106–112. (in Chinese with English abstract) [郝伟祺, 赵鑫峰 (2011) 被子植物早期近交衰退与晚期自交不亲和. 生物多样性, 19, 106–112.]
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Ji ZL, Qian AD (1981) Investigation of the resources of *Amygdalus pedunculata* Pall. and *Prunus mongolica* Maxim. from the natural distribution in China. *China Fruits*, (2), 38–40. (in Chinese) [姬钟亮, 钱安东 (1981) 长柄扁桃和蒙古扁桃在我国自然分布区的调查. 中国果树, (2), 38–40.]
- Lei GH, Liu LT, Han C, Shen YH, Huo YM (2009) Analysis of tocopherol content in endangered long carpodoid almond nutlet. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39, 777–779. (in Chinese with English abstract) [雷根虎, 刘丽婷, 韩超, 申烨华, 霍艳敏 (2009) 沙地濒危植物长柄扁桃仁中维生素E含量分析. 西北大学学报(自然科学版), 39, 777–779.]
- Li C, Li GP, Chen Q, Bai B, Shen YH, Zhang YL (2010) Fatty acid composition analysis of the seed oil of *Amygdalus pedunculata* Pall. *China Oils and Fats*, 35(4), 77–79. (in Chinese with English abstract) [李聪, 李国平, 陈俏, 白斌, 申烨华, 张应龙 (2010) 长柄扁桃油脂脂肪酸成分分析. 中国油脂, 35(4), 77–79.]
- Li QY, Wang XP (2013) Elevational pattern of species richness in the Three Gorges region of the Yangtze River: effect of climate, geometric constraints, area and topographical heterogeneity. *Biodiversity Science*, 21, 141–152. (in Chinese with English abstract) [李巧燕, 王襄平 (2013) 长江三峡库区物种多样性的垂直分布格局: 气候、几何限制、面积及地形异质性的影响. 生物多样性, 21, 141–152.]
- Lu Q, Wang JH, Chu JM (2012) Desert Plants in China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [卢琦, 王继和, 褚建民(2012) 中国荒漠植物图鉴. 中国林业出版社, 北京.]
- Ma Y, Ma RC (2004) Identification of genetic relationship of almond by AFLP. *Journal of Fruit Science*, 21, 552–555. (in Chinese with English abstract) [马艳, 马荣才 (2004) 扁桃种质资源的AFLP分析. 果树学报, 21, 552–555.]
- McCune B, Grace J (2002) Analysis of Ecological Communities. MjM Software Design, Glenden Beach, OR.
- Moilanen A (2005) Reserve selection using nonlinear species distribution models. *The American Naturalist*, 165, 695–706.
- Monserud RA, Leemans R (1992) Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling*, 62, 275–293.
- Özkan K, Mert A, Şentürk Ö (2011) Estimation of potential distribution of non-wood trading species richness using classification and regression tree technique: A case study from the Lakes District, Turkey. 2<sup>nd</sup> International Non-Wood Forest Products Symposium, Isparta, Turkey.

- Phillips SJ, Miroslav K, Schapire RE (2004) A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 95, 655–662.
- Qiao HJ, Hu JH, Huang JH (2013) Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models. *Scientia Sinica Vitae*, 43, 915–927. (in Chinese with English abstract) [乔慧捷, 胡军华, 黄继红 (2013) 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. *中国科学: 生命科学*, 43, 915–927.]
- Qiao HJ, Soberón J, Peterson AT (2015) No silver bullets in correlative ecological niche modeling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 1126–1136.
- Saupe EE, Qiao HJ, Hendricks JR, Portell RW, Hunter SJ, Soberón J, Lieberman BS (2015) Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales. *Global Ecology & Biogeography*, 24, 1159–1169.
- Stockwell D, Peters D (1999) The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13, 143–158.
- Su GX (1997) Germplasm resources of almonds in China. *China Seeds*, 2, 6–8. (in Chinese) [苏贵兴 (1987) 我国的扁桃种质资源. *作物品种资源*, 2, 6–8.]
- van Proosdij ASJ, Sosef MSM, Wieringa JJ, Raes N (2015) Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*, 39, 542–552.
- Wu B, Su ZZ, Chen ZX (2007) A revised potential extent of desertification in China. *Journal of Desert Research*, 27, 911–917. (in Chinese with English abstract) [吴波, 苏志珠, 陈仲新 (2007) 中国荒漠化潜在发生范围的修订. *中国沙漠*, 27, 911–917.]
- Xu XQ, Chu JM (2013) Analysis on development potential and countermeasures of *Amygdalus pedunculata* industry. *Forest Resources Management*, 1, 22–25. (in Chinese with English abstract) [许新桥, 褚建民 (2013) 长柄扁桃产业发展潜力分析及对策研究. *林业资源管理*, 1, 22–25.]
- Xu XT, Yang Y, Wang LS (2008) Geographic distribution and potential distribution estimation of *Pseudotsuga chienii*. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1134–1145. [徐晓婷, 杨永, 王利松 (2008) 白豆杉的地理分布及潜在分布区估计. *植物生态学报*, 32, 1134–1145.]
- Xu ZL, Peng HH, Peng SZ (2015) The development and evaluation of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 557–567. (in Chinese with English abstract) [许仲林, 彭焕华, 彭守章 (2015) 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 35, 557–567.]
- Zhang DY, Jiang XH (1999) Progress in studies of genetic diversity and conservation biology of endangered plant species. *Chinese Biodiversity*, 7, 31–37. (in Chinese with English abstract) [张大勇, 姜新华 (1999) 遗传多样性与濒危植物保护生物学研究进展. *生物多样性*, 7, 31–37.]
- Zhang L, Liu SR, Sun PS, Wang TL (2011) Comparative evaluation of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1091–1105. [张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立 (2011) 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较. *植物生态学报*, 35, 1091–1105.]
- Zhang P, Shen YH, Wang XL, Hou RT (2007) Determination of amygdalin in *Amygdalus pedunculata* Pall by high performance liquid chromatography. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 26(10), 80–83. (in Chinese with English abstract) [张萍, 申烨华, 王晓玲, 侯睿婷 (2007) 高效液相色谱法测定长柄扁桃仁中的苦杏仁甙. *分析实验室*, 26(10), 80–83.]
- Zhang WJ, Chen JK (2003) Advances in study of the distribution area of species. *Biodiversity Science*, 11, 364–369. (in Chinese with English abstract) [张文驹, 陈家宽 (2003) 物种分布区研究进展. *生物多样性*, 11, 364–369.]
- Zhang YB, Ma KP (2008) Geographic distribution patterns and status assessment of threatened plants in China. *Biodiversity and Conservation*, 17, 1783–1798.
- Zhao YZ (1992) *Atlas of Endangered Rare Plants in Inner Mongolia*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [赵一之 (1992) 内蒙古珍稀濒危植物图谱. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB (2013) Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21, 90–98. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆 (2013) 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 21, 90–98.]
- Zuo WY, Lao N, Geng YY, Ma KP (2007) Predicting species' potential distribution—SVM compared with GARP. *Chinese Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 711–719. (in Chinese with English abstract) [左闻韵, 劳逆, 耿玉英, 马克平 (2007) 预测物种潜在分布区——比较SVM与GARP. *植物生态学报*, 31, 711–719.]

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 19个环境因子相关性矩阵

Appendix 1 Correlation matrix of 19 environmental factors

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015218-1.pdf>



附录 1 19 个环境因子相关性矩阵

Appendix 1 Correlation matrix of 19 environmental factors

	BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7	BIO8	BIO9	BIO10	BIO11	BIO12	BIO13	BIO14	BIO15	BIO16	BIO17	BIO18	BIO19
BIO1	1	−0.6407	−0.13122	−0.32192	0.81758	0.91502	−0.45133	0.85066	0.89328	0.88764	0.9133	0.64593	0.57018	0.63063	−0.5384	0.58384	0.61987	0.54875	0.59271
BIO2	−0.6407	1	0.31783	0.38107	−0.35843	−0.7414	0.59513	−0.42164	−0.61252	−0.49154	−0.66365	−0.80322	−0.73079	−0.77286	0.58836	−0.73765	−0.76737	−0.70507	−0.73224
BIO3	−0.13122	0.31783	1	−0.71642	−0.53211	0.12141	−0.54335	−0.47056	0.21473	−0.49393	0.2012	0.01224	0.02635	−0.18267	0.24164	0.06607	−0.16107	0.09188	−0.12842
BIO4	−0.32192	0.38107	−0.71642	1	0.26827	−0.65554	0.96786	0.19095	−0.66787	0.1484	−0.67876	−0.52514	−0.45072	−0.3838	0.21188	−0.49837	−0.3982	−0.48531	−0.40445
BIO5	0.81758	−0.35843	−0.53211	0.26827	1	0.5293	0.1367	0.9698	0.51675	0.98442	0.51937	0.28269	0.23449	0.37992	−0.41938	0.22406	0.36088	0.19052	0.33226
BIO6	0.91502	−0.7414	0.12141	−0.65554	0.5293	1	−0.76811	0.586	0.97095	0.64	0.9923	0.75509	0.65679	0.70496	−0.54934	0.68509	0.70241	0.64806	0.68096
BIO7	−0.45133	0.59513	−0.54335	0.96786	0.1367	−0.76811	1	0.04771	−0.74366	−0.00431	−0.76662	−0.66828	−0.58988	−0.53637	0.3249	−0.6308	−0.54776	−0.61287	−0.54432
BIO8	0.85066	−0.42164	−0.47056	0.19095	0.9698	0.586	0.04771	1	0.55486	0.98053	0.57752	0.35365	0.33854	0.36981	−0.36643	0.32284	0.34837	0.31458	0.31432
BIO9	0.89328	−0.61252	0.21473	−0.66787	0.51675	0.97095	−0.74366	0.55486	1	0.60942	0.98022	0.6739	0.56406	0.65042	−0.52872	0.59758	0.65096	0.55643	0.64266
BIO10	0.88764	−0.49154	−0.49393	0.1484	0.98442	0.64	−0.00431	0.98053	0.60942	1	0.62534	0.42013	0.37662	0.47847	−0.45798	0.36607	0.46063	0.33462	0.42838
BIO11	0.9133	−0.66365	0.2012	−0.67876	0.51937	0.9923	−0.76662	0.57752	0.98022	0.62534	1	0.7268	0.63531	0.65967	−0.50771	0.6654	0.6577	0.6316	0.63923
BIO12	0.64593	−0.80322	0.01224	−0.52514	0.28269	0.75509	−0.66828	0.35365	0.6739	0.42013	0.7268	1	0.95133	0.84378	−0.47126	0.97137	0.84693	0.937	0.83188
BIO13	0.57018	−0.73079	0.02635	−0.45072	0.23449	0.65679	−0.58988	0.33854	0.56406	0.37662	0.63531	0.95133	1	0.70092	−0.26366	0.99084	0.70263	0.98088	0.68794
BIO14	0.63063	−0.77286	−0.18267	−0.3838	0.37992	0.70496	−0.53637	0.36981	0.65042	0.47847	0.65967	0.84378	0.70092	1	−0.64033	0.72072	0.99327	0.63845	0.973
BIO15	−0.5384	0.58836	0.24164	0.21188	−0.41938	−0.54934	0.3249	−0.36643	−0.52872	−0.45798	−0.50771	−0.47126	−0.26366	−0.64033	1	−0.31214	−0.64542	−0.25269	−0.62473
BIO16	0.58384	−0.73765	0.06607	−0.49837	0.22406	0.68509	−0.6308	0.32284	0.59758	0.36607	0.6654	0.97137	0.99084	0.72072	−0.31214	1	0.723	0.98538	0.70846
BIO17	0.61987	−0.76737	−0.16107	−0.3982	0.36088	0.70241	−0.54776	0.34837	0.65096	0.46063	0.6577	0.84693	0.70263	0.99327	−0.64542	0.723	1	0.63958	0.98162
BIO18	0.54875	−0.70507	0.09188	−0.48531	0.19052	0.64806	−0.61287	0.31458	0.55643	0.33462	0.6316	0.937	0.98088	0.63845	−0.25269	0.98538	0.63958	1	0.61621
BIO19	0.59271	−0.73224	−0.12842	−0.40445	0.33226	0.68096	−0.54432	0.31432	0.64266	0.42838	0.63923	0.83188	0.68794	0.973	−0.62473	0.70846	0.98162	0.61621	1

BIO1, 年平均温度; BIO2, 平均温度日较差; BIO3, 等温性; BIO4, 温度季节性; BIO5, 最热月最高温度; BIO6, 最冷月最低温度; BIO7, 平均温度年较差; BIO8, 最湿季平均温度; BIO9, 最干季平均温度; BIO10, 最热季平均温度; BIO11, 最冷季平均温度; BIO12, 年降水量; BIO13, 最湿月降水量; BIO14, 最干月降水量; BIO15, 降水季节性; BIO16, 最湿季降水量; BIO17, 最干季降水量, Precipitation of Driest Quarter; BIO18, 最热季降水量; BIO19, 最冷季降水量。

BIO1, Annual mean temperature; BIO2, Mean diurnal range (mean of monthly (max. temp. – min. temp.)); BIO3, Isothermality (BIO2/BIO7) (\* 100); BIO4, Temperature seasonality (standard deviation \*100); BIO5, Max. temperature of warmest month; BIO6, Min. temperature of coldest month; BIO7, Temperature annual range (BIO5–BIO6); BIO8, Mean temperature of wettest quarter; BIO9, Mean temperature of driest quarter; BIO10, Mean temperature of warmest quarter; BIO11, Mean temperature of coldest quarter; BIO12, Annual precipitation; BIO13, Precipitation of wettest month; BIO14, Precipitation of driest month; BIO15, Precipitation seasonality

褚建民, 李毅夫, 张雷, 李斌, 高明远, 唐晓倩, 倪建伟, 许新桥. 濒危物种长柄扁桃的潜在分布与保护策略. 生物多样性, 2017, 25 (8): 799–806.  
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015218>

(Coefficient of Variation); BIO16, 最湿季降水量, Precipitation of Wettest Quarter; BIO17, 最干季降水量, Precipitation of Driest Quarter; BIO18, 最热季降水量, Precipitation of Warmest Quarter; BIO19, 最冷季降水量, Precipitation of Coldest Quarter.