

阿尔曼·解思斯,努尔巴依·阿布都沙力克,迈迪娜·吐尔逊,等. 基于最大熵模型(Maxent)预测沙生柽柳潜在地理分布及格局[J]. 江苏农业科学,2019,47(2):91-94.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.02.021

基于最大熵模型(Maxent)预测沙生柽柳潜在地理分布及格局

阿尔曼·解思斯^{1,2}, 努尔巴依·阿布都沙力克^{1,2}, 迈迪娜·吐尔逊^{1,2}, 塞依丁·海米提^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院,新疆乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室,新疆乌鲁木齐 830046)

摘要:基于沙生柽柳的现有分布,通过最大熵模型(Maxent)估计其潜在的分布格局,并与其在人类干扰下的分布格局相比较,为我国西部荒漠地区流动沙丘上优良先锋固沙造林树种的保护提供科学依据。结果表明:沙生柽柳的高适宜区主要分布在塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠腹地以及盆地东侧的罗布泊地带和吐鲁番盆地腹地及其盆地东侧的库木塔格沙漠。分布范围大致在 76.0°~89.5°E,37.0°~41.5°N 之间,其分布界线与塔克拉玛干沙漠的流沙范围基本吻合。垂直分布于海拔 800~1 300 m 之间,分布面积达 30 万 km²,基本符合沙生柽柳的实际分布情况。温度和降水量对沙生柽柳分布的影响最大。经受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,简称 ROC)分析法验证,训练集的 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积(area under ROC curve,简称 AUC)值与测试集的 AUC 值均为 0.920,可看出 Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境预测结果具有较高的准确度。将环境影响因子与人类活动因素同时带入模型,训练集的 AUC 值与测试集的 AUC 值均为 0.932,说明 Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境预测结果的准确度提高并具有很高的可信度。

关键词:沙生柽柳;潜在分布;Maxent 模型

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)02-0091-04

沙生柽柳(*Tamarix taklamakanensis* M. T. Liu),别称塔克拉玛干柽柳^[1-4],灌木,稀呈小乔木状,高 3~7 m,是喜光树种,适应少雨、干旱的流沙环境条件,在河漫滩和黏土地区因为土壤透气性不良很难找到其天然实生苗。它具有生长迅速、不怕沙埋、耐盐碱、抗寒冷的特性,分布在新疆塔里木盆地塔克拉玛干沙漠及盆地东部的库木塔格沙漠,一直延伸到甘肃敦煌的西沿^[5],生于远离有水河床和湖盆周围的流沙内部,是我国荒漠地区流动沙丘上最抗旱耐炎热的固定流沙先锋物种^[6],也是中国特有种,属国家 3 级保护植物^[7]。近年来,由于分布区内地下水位逐渐下降和流动沙丘间沙表土壤盐分不断增高,沙生柽柳天然更新受到极大限制,实生苗数量正日趋减少。目前分布区域内的沙生柽柳群落的现状是衰亡性群落,处于濒危状态。再加上其生境因采矿、修路等人为干扰,遭到了严重的破坏,沙生柽柳亟待保护^[8]。

目前已有不少关于沙生柽柳的研究。刘铭庭将沙生柽柳正式更名为塔克拉玛干柽柳,并证实这个新种仅分布在塔克拉玛干流沙内^[9]。杨尧军等选择对沙生柽柳种群具有重要影响的地理、土壤、水分这 3 要素的 7 个因子为指标,采用因

子分析法,对影响沙生柽柳种群生长与分布的环境因子进行分析,并得出植物种群的保护与恢复存在较大难度,尤其是对于面临严重衰退威胁的沙生柽柳更应加强保护力度^[10]。因此利用沙生柽柳的现有分布状况,评估出其潜在的分布格局,并与在人类干扰下的沙生柽柳的分布格局相比较,对保护我国西部荒漠地区流动沙丘上的优良先锋固沙造林树种具有一定的科学意义^[11-12]。

目前获得的物种地理分布信息在很大程度上依赖于最大熵模型(maxentropy models,简称 Maxent)^[13]。Maxent 已经在很多地区被成功地应用于预测物种的潜在分布区^[14]。生态位模型中的最大熵模型是最具有代表性的物种分布模型之一^[15-17]。马松梅等曾经选取并同时使用最适用预测的 Maxent 和规则集遗传算法模型(genetic algorithm rule-set production, GARP)^[18]得出结论:相比于 GARP^[19-20],Maxent 更适合于模拟具有较少分布数据的稀有或濒危物种^[21]。因此本研究基于野外调查的实际情况以及试验样本的特殊有限分布数据,选择 Maxent 为预测工具,在地理和生态空间上模拟沙生柽柳的潜在分布,并将其和在人类干扰下的潜在分布作比较,在此基础上分析人类活动对于保护物种分布的影响^[22]。本研究在对沙生柽柳进行野外调查的基础上,利用 Maxent 模拟沙生柽柳的潜在地理分布,旨在解决 2 个问题:(1)模拟沙生柽柳的潜在分布区域;(2)与在人类干扰下的潜在分布相比较,分析人类活动对保护物种分布的影响。

1 研究区域概况

塔克拉玛干沙漠,83°40'E,39°06'N。此区域年降水量

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:41561013)。

作者简介:阿尔曼·解思斯(1992—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事新疆干旱区植被生态学方面的研究。E-mail: 837636003@qq.com。

通信作者:努尔巴依·阿布都沙力克,博士,教授,硕士生导师,主要从事植被生态学教学和科研工作。E-mail: 2251849675@qq.com。

36.6 mm, 其中绝大部分集中在夏季, 年蒸发量达 3 638.6 mm, 1 年内温度变化很大, 1 月平均气温 -8.1℃, 7 月平均气温 28.2℃, 极端最低气温 -22.2℃, 极端最高气温 45.6℃, 全年≥10℃积温为 4 621.8℃, 无霜期 283 d, 年日照时数 2 571.3 h, 属高光热辐射区域; 主导风向是西北风, 平均风速 2.5 m/s, 最大瞬时风速为 24.0 m/s。塔克拉玛干沙漠腹地自然植物组成比较单一, 共 12 种, 分别隶属于 9 科 12 属, 包括沙生柽柳 (*Tamarix taklamakanensis*)、蓼子朴 (*Inula salsoides*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus*)、刺沙蓬 (*Salsola ruthenica*)、花花柴 (*Kareliniacaspica*)、罗布麻 (*Apocynumvenetum*)、牛皮消 (*Cynanchum sibiricum*)、小花天芥菜 (*Heliotropium micranthum*)、管花肉苁蓉 (*Cistanche tubulosa*)、河西苜 (*Hexinia poly dichotoma*)、塔干沙拐枣 (*Calligonum roborovskii*)。

2 数据获取

本研究使用的主要软件为美国 Esri 公司的 ArcGIS 10.2.2、中国地质大学开发的 MapGIS 6.7 等。

2.1 沙生柽柳分布数据

根据标本记载, 笔者于 2016 年 7—10 月对沙生柽柳的大部分自然分布区进行了野外调查, 共调查到 26 个分布点。每个分布点都有 GPS 精确定位的经纬度, 代表一个独立的环境条件。

2.2 环境图层数据

气候数据来源于 Worldclim 数据集 (<http://www.worldclim.org/>), 该数据集分辨率为 1 km, 由 19 个降水量、温度的极值 and 变化范围的变量构成。根据新疆地图对气候数据中的数据进行影像配准、裁剪和叠加。

2.3 人类活动强度数据

根据新疆地图对全球人类足迹 (human footprint) 中的数据进行影像配准、裁剪和叠加。

3 研究方法

3.1 模型模拟

将沙生柽柳分布数据和环境图层数据代入 Maxent 模型, 运行第 1 次, 以识别对沙生柽柳影响的主要环境变量。在第 1 次运行结束后, 将对沙生柽柳分布造成影响的主要环境变量代入 Maxent 模型, 进行第 2 次运行, 初步得到沙生柽柳的分布区图。最后, 模型评估以判断模型的模拟精度和可靠性。

3.2 模型验证

Maxent 模型带有自检验功能, 利用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, 简称 ROC), 对模型进行检验, 根据 ROC 曲线与横坐标围成的面积值, 即 AUC (area under ROC curve) 值对模型的准确度进行判定^[23-24]。表明在环境变量与模型的相关性方面, AUC 值越大, 预测的效果越好, 评定标准: AUC 值范围为 [0, 0.40), 不及格; [0.40, 0.60), 较差; [0.60, 0.80), 一般; [0.80, 1.00), 优秀^[25-26]。

4 结果与分析

4.1 主要环境变量对 Maxent 模型预测沙生柽柳分布的贡

献率

从表 1 中可以看出, 影响沙生柽柳分布的主要有 2 个环境因子, 即降水量和温度。沙漠环境恶劣, 气候极度干旱, 早晚温差大, 这说明沙生柽柳生长在塔克拉玛干大沙漠内部生境最严酷的、不生长其他植物的流动沙丘上。作为我国柽柳属最为抗旱的 1 个种类, 沙生柽柳已经形成对抗沙漠极端气候的调节机制, 这对进一步研究其的抗旱性、抗高温性有一些启发, 另一方面, 充分考虑沙生柽柳对于环境因子, 尤其是对降水量和温度的需求也非常重要, 因为本研究旨在在保护原有沙生柽柳分布的基础上, 预测其适宜分布区, 为沙生柽柳的大面积种植和推广提供一些理论基础。

表 1 主要环境变量对 Maxent 模型预测沙生柽柳分布的贡献率

| 变量 | 对预测的贡献率 (%) | 变量 | 对预测的贡献率 (%) |
|---------|-------------|-----------|-------------|
| 最干月降水量 | 36.9 | 最湿季平均温度 | 2.8 |
| 最冷季平均温度 | 18.1 | 极端最低温 | 2.6 |
| 最干季降水量 | 14.6 | 极端最高温 | 2.3 |
| 最冷季降水量 | 8.7 | 降水量的季节性变化 | 1.3 |
| 年均温 | 8.6 | 最湿季平均温度 | 1.0 |

4.2 沙生柽柳在新疆的适生分布

根据 Maxent 模型预测, 得到沙生柽柳在新疆地区的适生分布区 (图 1), 采用等距法, 按高适生、中适生、低适生、不适生 4 个级别划分, 图中灰色表示不适宜区, 黄色表示低适宜区, 绿色表示中适宜区, 红色代表高适宜区。从图中可以看出, 沙生柽柳的高适宜区主要分布在塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠腹地以及盆地东侧的罗布泊地带, 还有吐鲁番盆地腹地以及盆地东侧的库木塔格沙漠。这基本符合沙生柽柳的实际分布情况。

4.3 沙生柽柳的结果验证

Maxent 模型运行结果可以自动生成 ROC 曲线, 在模型预测的第 2 次运行后生成沙生柽柳预测结果的 ROC 曲线 (图 2)。

从图 2 中可以看出, 测试数据的 AUC 值为 0.920。说明 Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境预测结果具有较高的准确度。但正由于物种的存在生境是错综复杂的, 在运行 Maxent 时, 环境因子的选择对预测结果有很大的影响。沙生柽柳尽管本身就属于沙漠特有植物, 其生境也较单一。但将沙生柽柳引种到吐鲁番后, 因吐鲁番夏季太干热, 花期比南疆原产地推迟了大概 1 个月, 因而结果不正常。因此本研究选用的 19 个环境因子仍有一定的局限性。因此有关环境因子的选择, 还需要进一步的探讨。除此之外, 人为活动因子也是需要考虑的指标之一。本研究通过对全球人类足迹中的数据进行影像配准、裁剪和叠加, 得到新疆地区所在的人类足迹 (图 3)。通过进一步裁剪, 将环境影响因子与人类活动因素同时带入模型, 在第 1 次运行结束后, 筛选出对沙生柽柳分布造成影响的主要变量 (表 2), 随后代入 Maxent 模型, 进行第 2 次运行, 初步得到沙生柽柳的分布区 (图 4)。最后, 模型评估以判断模型的模拟精度和可靠性。

从表 2 中可以看出, 影响沙生柽柳分布的主要还是 2 个环境因子, 即降水量和温度。除此之外, 人类活动强度也对沙生柽柳适生区分布有一定的影响, 但是对于沙生柽柳, 其生境很特殊, 尤其是在极度干旱的沙漠内部, 其人类活动强度也相

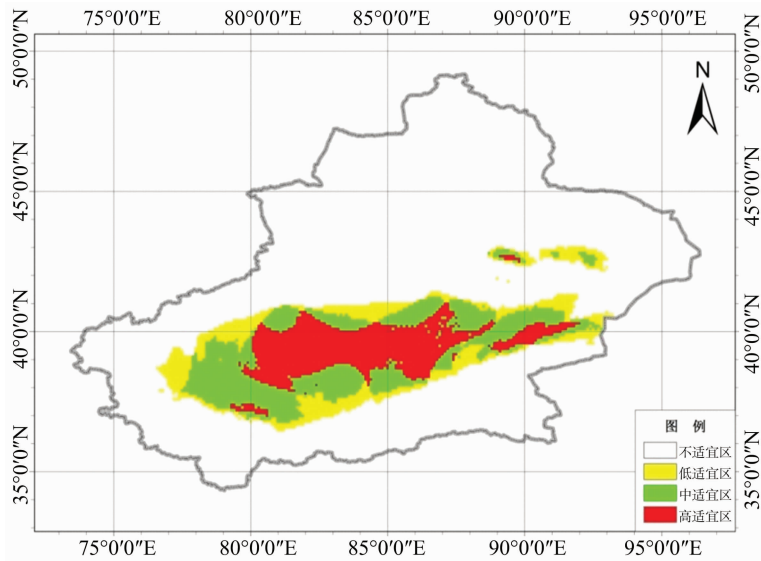


图1 Maxent 模型预测沙生柽柳在新疆的适生分布

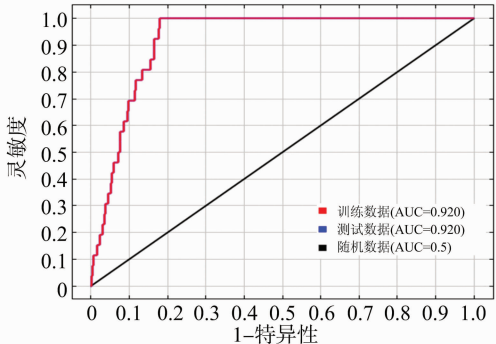


图2 沙生柽柳的 AUC 值及其 ROC 曲线

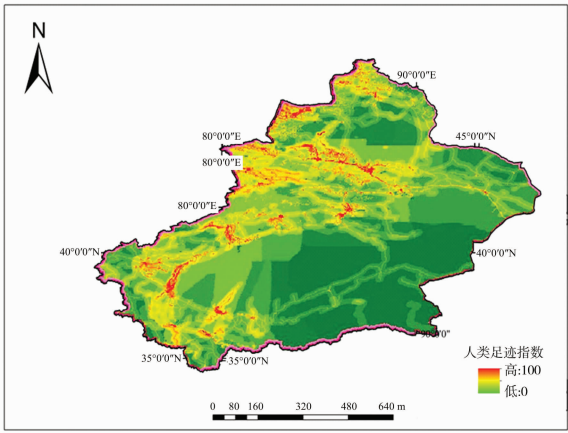


图3 新疆地区人类活动强度分布

表 2 主要环境变量及人类活动强度对 Maxent 模型预测沙生柽柳分布的贡献率

| 变量 | 对预测的贡献率 (%) |
|---------|----------------|
| 最干月降水量 | 31.7 |
| 最冷季平均温度 | 20.0 |
| 最干季降水量 | 18.3 |
| 最冷季降水量 | 10.3 |
| 年均温 | 9.4 |
| 人类活动强度 | 6.0 |
| 极端最低温 | 2.5 |

对较弱,因此 6% 的人类活动强度对预测沙生柽柳分布的贡献率也合理,将进一步从对比分布图来判断人类活动对预测沙生柽柳分布的影响。

从图 1 和图 4 对比中发现,沙生柽柳的实际适生区明显减少,说明在沙生柽柳繁殖栖息地附近,人类的交通运输、道路建设、土地利用等一系列活动对沙生柽柳适宜区分布的影响也比较明显。

4.3 沙生柽柳的结果验证

从图 5 可以看出,测试数据的 AUC 值为 0.932。说明

Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境预测结果准确度提高。因此也可以说明人类活动对沙生柽柳适生区分布有一定影响且影响不可忽视。

5 结论与讨论

模型模拟研究结果表明,第 1 次运行得到了 5 个主要环境影响因子,分别为最干季降水量(36.9%)、最冷季平均温度(18.1%)、最干季降水量(14.6%)、最冷季降水量(8.7%)、年均温(8.6%),其累计贡献率为 86.9%。对第 2 次运行结果采用 AUC 评价方法,对模型运行结果进行模型评价,其 AUC 的值为 0.920。说明该模型的诊断价值达到了优秀,Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境概率预测具有很高的可信度。其模拟结果与现实沙生柽柳的实际生长区比较吻合。

从以上分析结果可以看出,温度和降水量对沙生柽柳的分布贡献最大,这是沙生柽柳与原有的特殊恶劣的生境长期适应的结果,体现了沙生柽柳对沙漠环境的特殊适应性,也从另一方面解释了沙生柽柳能够成为我国荒漠地区流动沙丘上最为抗旱耐炎热物种的原因。

人类活动强度虽然对植株分布影响贡献率只有 6%,但 Maxent 模型对沙生柽柳的潜在生境预测结果准确度提高,因此不能忽略了人类活动强度对沙生柽柳分布格局影响。

刘铭庭研究员指出,沙生柽柳的人工栽培成活,将有助于丰富防风固沙植物物种^[27]。通过这一预测结果,可以将理论预测结果与现实沙生柽柳的引种驯化情况相结合,在保护现有沙生柽柳分布区的基础上,反复试验,从而确定最适宜沙生柽柳人工种植的区域,并大量培育和栽植,扩大种植面积。值得一提的是,这保护了沙生柽柳,也保护了寄生该植物的名贵草药——管花肉苁蓉(*Cistanche tubulosa*)^[28-30],还保护了该植物分布区内的野骆驼,实现由物种到生态系统、景观全面综合保护的作用。

参考文献:

[1]何兴东,赵爱国,段争虎,等. 极端干旱沙漠中无沙埋干扰时几种固沙植物栽植试验研究[J]. 中国沙漠,2003,23(3):246-251.

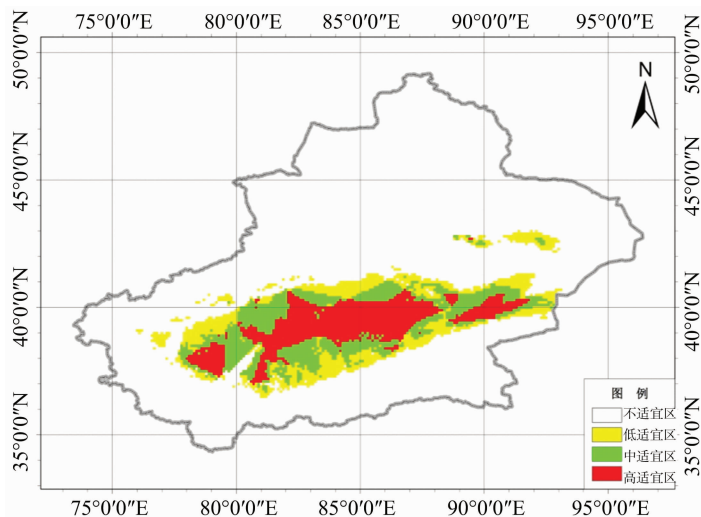


图4 在人类干扰强度下 Maxent 模型预测沙生柽柳在新疆的适生分布

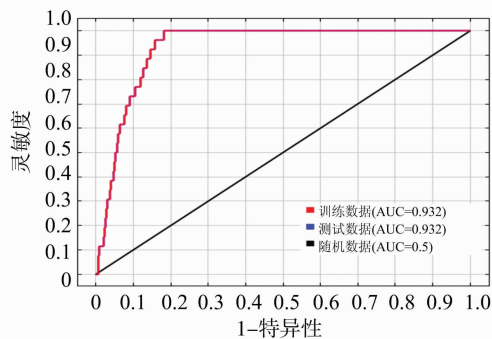


图5 人类活动干扰下的沙生柽柳的 AUC 值及其 ROC 曲线

- [2] 张锦春, 郭春秀, 王芳琳, 等. 沙生柽柳扦插苗生根条件优化研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(19): 7-12.
- [3] 韩 炜, 曹 玲, 海米提·依米提, 等. 塔干柽柳的叶绿素荧光对沙尘暴天气的响应[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 86-91.
- [4] 刘名廷. 优良的固沙造林树种——塔克拉玛干柽柳[J]. 林业实用技术, 1978(8): 7-8.
- [5] 何兴东. 塔克拉玛干沙漠腹地天然植被调查研究[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 144-148.
- [6] 张锦春, 郭春秀, 王芳琳, 等. 沙生柽柳扦插苗生根条件优化研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(19): 7-12.
- [7] 汪智军, 李行斌, 郭仲军. 新疆 14 种珍稀濒危植物资源现状及保护[J]. 中国野生植物资源, 22(2): 15-16.
- [8] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 252-256.
- [9] 刘铭庭. 沙生柽柳的新发现[J]. 新疆农业科学, 1960(2): 37-39, 18.
- [10] 杨尧军, 袁宏波, 刘淑娟, 等. 库姆塔格沙漠沙生柽柳种群与环境因子分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 827-831.
- [11] 何兴东. 塔克拉玛干沙漠腹地天然植被调查研究[J]. 中国沙漠, 1997, 12(2): 144-148.
- [12] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 252-256.
- [13] 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.
- [14] Stockwell D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143-158.
- [15] Pena J C D C, Kamino L H Y, Rodrigues M, et al. Assessing the conservation status of species with limited available data and disjunct distribution[J]. Biological Conservation, 2014, 170(1): 130-136.
- [16] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [17] 高 惠, 滕丽微, 汪 洋, 等. 阿拉善马鹿 (*Cervus alashanicus*) 生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3926-3931.
- [18] 马松梅, 张明理, 张宏祥. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测子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.
- [19] Wang R, Wang Y Z. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China[J]. Diversity and Distributions, 2006, 12(4): 397-408.
- [20] Anderson R P, Lew D, Peterson A T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models [J]. Ecological Modelling, 2003, 162(3): 211-232.
- [21] 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.
- [22] 褚建民, 李毅夫, 张 雷, 等. 濒危物种长柄扁桃的潜在分布与保护策略[J]. 生物多样性, 2017, 25(8): 799-806.
- [23] 李明阳, 席 庆, 徐海根. 基于 WEB 数据库和 Maxent 模型的白头叶猴潜在生境评价研究[J]. 林业资源管理, 2010(4): 31-36, 57.
- [24] 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.
- [25] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 等. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价[J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 343-352.
- [26] Araújo M B, Pearson R G, Thuiller W, et al. Validation of species-climate impact models under climate change [J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1504-1513.
- [27] 张 兵. 主要防风固沙植物及其应用价值[J]. 内蒙古林业调查设计, 2012, 35(5): 62-65.
- [28] 屠鹏飞, 陈庆亮, 姜 勇, 等. 管花肉苁蓉及其寄主柽柳栽培技术[J]. 中国现代中药, 2015, 17(4): 349-358.
- [29] 赵东平, 郭玉海, 骆 翔, 等. 植物生长调节剂对柽柳及管花肉苁蓉生长的影响[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(13): 1718-1719.
- [30] 郭东锋, 郭玉海, 黄 勇. 管花肉苁蓉的寄生对柽柳光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11293-11295.