

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150516

基于 GARP 和 MaxEnt 的云杉矮槲寄生分布区的预测

张超¹ 陈磊¹ 田呈明¹ 李涛² 汪荣³ 杨启青³

(1 北京林业大学林学院 2 青海省门源县仙米林场 3 青海省森防总站)

摘要:云杉矮槲寄生(*Arceuthobium sichuanense*)是一种寄生性种子植物,主要寄生于云杉属植物,近年来对我国“三江源”地区的云杉天然林和次生林造成严重危害。本研究利用 GARP 和 MaxEnt 生态位模型,基于已报道的云杉矮槲寄生分布点的数据,对其在中国的分布区进行了预测和分析,并采用 ROC 曲线对预测结果进行检验和评价。结果表明:GARP 模型预测的分布范围较广,MaxEnt 内部层次更细致,为得到最佳结果,将 2 个模型的预测结果赋予一定的权重(4:1)从而获得最佳结果;ROC 曲线评价结果表明,GARP-MaxEnt 模型的 AUC 值为 0.937,达到了极高的精度。通过该模型预测可见,云杉矮槲寄生在中国的适生区主要集中在青海、甘肃、四川和西藏地区,其中青海、甘肃、四川交界区域为云杉矮槲寄生的极度适宜分布区。本研究结果有利于全面了解云杉矮槲寄生的分布范围,对云杉矮槲寄生害的调查与监测以及制定科学防治策略具有重要的理论指导意义。

关键词:云杉矮槲寄生; GARP; MaxEnt; 分布区预测

中图分类号:S763.18 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)05-0023-10

ZHANG Chao¹; CHEN Lei¹; TIAN Cheng-ming¹; LI Tao²; WANG Rong³; YANG Qi-qing³. **Predicting the distribution of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) with GARP and MaxEnt models.**

Journal of Beijing Forestry University (2016)**38**(5) 23-32 [Ch, 48 ref.]

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Qinghai, Xianmi Forest Farm, Menyuan, Qinghai, 810300, P. R. China;

3 Forest Pest Control and Quarantine Station of Qinghai Province, Xining, Qinghai, 810007, P. R. China.

Sichuan dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) is a plant that parasitizes *Picea* trees. Recently, this dwarf mistletoe has caused serious damage to spruce trees in Sanjiangyuan area, Qinghai Province. In this study, based on the data on the reported sites, we applied GARP and MaxEnt niche models to predict and analyze the distribution area of *A. sichuanense* in China. The predicted results were then tested by ROC curves. The results showed that the predicted area by GARP model was more extensive while the area by MaxEnt model was more detailed. Thus, GARP and MaxEnt models were combined with a weight ratio 4:1 to predict the distribution area of *A. sichuanense*. The AUC value of GARP-MaxEnt model was 0.937, indicating that the precision of prediction was high. Based on the GARP-MaxEnt prediction model, it is shown that the distribution area of *A. sichuanense* is mainly in Qinghai, Gansu, Sichuan and Tibet. The junction area of Qinghai, Gansu and Sichuan was the most suitable area for *A. sichuanense* parasitism. The results will benefit our understanding of the distribution area of *A. sichuanense*, and have an guiding significance for monitoring the disease and making scientific strategy to control this dwarf mistletoe.

Key words *Arceuthobium sichuanense*; GARP; MaxEnt; potential distribution area

收稿日期:2015-12-28 修回日期:2016-01-19

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD19B0702)、林业公益性行业科研专项(201204503)。

第一作者:张超。主要研究方向:森林病理学。Email:451623688@qq.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者:田呈明,教授,博士生导师。主要研究方向:森林病理学。Email:chengmt@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

云杉矮槲寄生 (*Arceuthobium sichuanense*) 是檀香目 (Santales) 槲寄生科 (Viscaceae) 油杉寄生属 (*Arceuthobium*) 的寄生性种子植物^[1]。云杉矮槲寄生主要寄生于云杉属植物^[1], 目前已报道可以寄生于青海云杉 (*Picea crassifolia*)、紫果云杉 (*P. purpurea*)、西藏云杉 (*P. spinulosa*)、川西云杉 (*P. likiangensis* var. *balfouriana*) 以及青杆 (*P. wilsonii*)^[2-4]。云杉矮槲寄生侵染寄主后, 导致寄主枝条畸形生长, 形成膨大和丛枝, 影响到健康树木的生理过程, 造成木材质量和再生能力下降, 生长量和寿命明显降低, 同时也较大程度地增加了昆虫和病菌的攻击, 发病严重时可致整株死亡^[2,5-7]。在早期的文献中记载了在西藏 (亚东、比如) 和四川 (德格、道孚、稻城、黑水) 发现有云杉矮槲寄生的分布^[2]。近年来, 在青海 (黄南、海北、玉树、果洛)^[5] 和甘肃^[8] 也发现有云杉矮槲寄生分布, 且在青海地区危害最为严重, 造成大片云杉天然林和次生林的死亡, 其中仅在仙米林区云杉矮槲寄生害的发生面积就达 3 867 hm², 导致 1.1 万 m³ 的青海云杉死亡, 全省发生面积达 1.3 万 hm²^[5,9]。尽管目前已经开展了关于云杉矮槲寄生生物学特征、发生规律、侵染过程以及防治等方面的研究^[6-7,10-15], 但由于缺乏对云杉矮槲寄生分布区域的全面了解, 制约了云杉矮槲寄生害的监测与预警。

常用的生态位模型 BIOCLIM、DOMAIN、GARP、MARS、CLIMEX、MaxEnt 等, 均以生态位理论为基础, 利用物种已知的分布数据和相关环境变量, 根据一定的算法来推算物种的生态需求, 然后将运算结果投射至不同的空间和时间来预测物种的实际分布和潜在分布, 这些模型被广泛应用于预测物种的潜在分布范围和生物入侵风险^[16-20]。其中, GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction) 模型是利用预设规则的遗传算法, 使用物种的已知分布数据和环境数据模拟物种的基本生态需求, 探索物种已知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系, 揭示生物多样性和物种的潜在分布^[21], 而 MaxEnt (Maximum Entropy) 模型则是通过计算物种分布的最大熵的可能值来预测物种的潜在适生区^[22]。与其他模型相比, GARP 和 MaxEnt 生态位模型具有所需样本量少和受样本偏差影响小等优点^[23-25], 已被广泛用于预测物种的地理分布^[16,18,26-31]。

本研究基于云杉矮槲寄生在我国分布的记录, 同时采用 GARP 和 MaxEnt 2 种生态位模型对其生态需求和潜在分布进行模拟, 并结合其寄主植物 (云杉属植物) 的分布范围, 对云杉矮槲寄生在我国分布进行了分析, 以期对云杉寄生害的监测预警

和制定有效的防控治理策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

云杉矮槲寄生已知的分布样点信息来源于各大电子图书馆收藏标本记录、中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn/>)、中国植物志和各类地方植物志等书籍, 以及本实验室实地调查采样记录数据。对有记录的云杉矮槲寄生进行定位、筛选、去重和统计后, 得到 90 个云杉矮槲寄生的分布样点 (图 1)。

环境变量数据来源于美国加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley) 的 worldclim 下载中心 (<http://www.worldclim.org/>)^[32]。主要是 1950—2000 年的温度、降雨、海拔和地形, 包括 19 个生物气候变量 (bio_1 ~ bio_19) 以及 1 个海拔变量 (alt)、1 个坡度变量 (slo) 和 1 个坡向变量 (asp), 共 22 个环境变量因子, 作为主要的环境数据 (表 1、图 2), 其分辨率为 1 km。采用 ArcGIS 10.2 将环境变量转换成 GARP 和 MaxEnt 软件所要求的 asc 格式文件。数据处理底图采用 1:400 万中国行政区划图 (来源于中国基础地理信息系统 <http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。

1.2 生态位模型及参数设置

1.2.1 GARP 模型

采用 Desktop Garp v 1.1.6 (<http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp>) 进行 GARP 模型的运算。将 90 个云杉矮槲寄生分布点中的 50% 作为训练数据集, 剩余 50% 作为测试数据集。创建模型时迭代次数为 100 次, 最大迭代次数为 1 000 次, 收敛极限采用默认的 0.01^[33]。首先选择所有环境变量参与进行 100 次迭代, 再根据输出结果的误差显示, 取 100 个模型的遗漏误差算术平均值作为基础遗漏误差; 然后采用刀切法 (Jackknife test) 逐次省略一个环境变量, 分别运行 50 次, 直至每个变量缺失一遍; 从缺失变量后的误差分析中得到每组遗漏误差的平均值, 作为该组缺失特定变量后的遗漏误差; 最后将基础遗漏误差与缺失变量的遗漏误差对比, 得出某个变量是否参与最终的运算。若去掉一个变量, 对整体遗漏误差的影响小于基础遗漏误差 95% 的, 则该因子对整个结果影响不显著, 可去掉, 反之则保留^[34]。

将筛选出的具有显著影响的变量参与最终运算, 设置好软件参数 (与前面保持一致), 运行 200 次。按照如下原则从 200 个图层中筛选出 100 个最优结果: 1) Omission (int) 不为 0 的舍去。2)

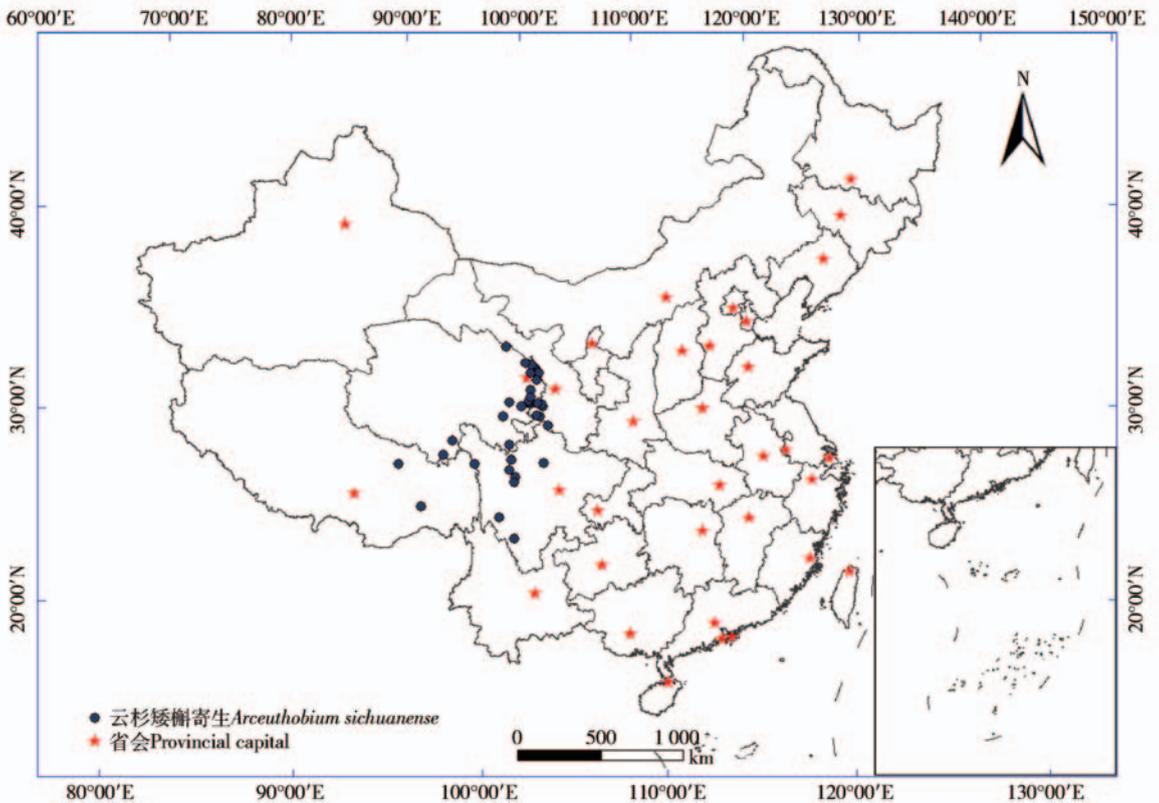


图1 云杉矮槲寄生分布点

Fig. 1 Distribution sites of *Arceuthobium sichuanense*

Omission (ext) 大于 0.05 的舍去。3) 保留存在区域 (presence area) 与整体均值最接近的 100 个模型。4) 将 100 个图层载入 ArcGIS 中, 利用栅格计算器将其属性叠加, 形成属性值为 0 ~ 100 的叠加图层。每个栅格的数值代表了物种在该位置预测为可能的模型数量, 在预测中将该值称为重叠值 (Overlap Value, OV), 重叠值越大则物种分布的机率越高。5) 将重叠值除以 100 得到每个栅格的重叠百分比, 以此百分比作为物种的适生指数, 而后对其进行重分类。其中, $OV < 30\%$ 为不适宜分布区, $30\% \leq OV < 50\%$ 为低适宜分布区, $50\% \leq OV < 70\%$ 为中适宜分布区, $70\% \leq OV < 90\%$ 为高适宜分布区, $OV \geq 90\%$ 为极高适宜分布区^[35]。

1.2.2 MaxEnt 模型

采用 MaxEnt Version 3.3.3 k (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt>)^[36] 进行 MaxEnt 模型的预测, 选用与 GARP 一致的训练数据集和测试数据集比例。将云杉矮槲寄生分布点数据和环境变量数据导入软件中, 设置软件运行参数中的迭代次数为 500 次, 收敛极限为 10^{-5} , 建立预测模型, 然后再利用该模型预测云杉矮槲寄生在中国的分布情况。利用 ArcGIS 的转换工具 (Conversion Tools) 将软件输出的 ASCII 编码文件转化为栅格 (RASTER) 格式, 然后进行重分类, 得到云杉矮槲寄生在中国的

分布图。

1.2.3 GARP-MaxEnt 模型

将 GARP 模型输出结果与 MaxEnt 输出结果对比, 按照百分比赋予 2 个结果一定的权重并叠加显示, 且对叠加结果进行反复验证, 以叠加结果的 AUC 值最大和整体分布区域能较好表达、内部细节较为精细作为标准衡量, 选取最佳叠加比例。经过反复计算对比, 最佳的叠加比例为 GARP 的输出结果占 80%, MaxEnt 的输出结果占 20%。最后, 将云杉矮槲寄生寄主的地理分布范围与云杉矮槲寄生预测结果进行叠加, 得到云杉矮槲寄生在中国的分布区范围。

1.3 模型检验

模型的预测结果采用受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic curve, ROC 曲线) 下的面积 (Area Under Curve, AUC) 进行检验。以假阳性率作为横坐标、真阳性率作为纵坐标构建曲线。AUC 值为 0.5 ~ 0.6, 不及格; 0.6 ~ 0.7, 较差; 0.7 ~ 0.8, 一般; 0.8 ~ 0.9, 良好; 0.9 ~ 1.0, 优秀^[37]。

2 结果与分析

2.1 云杉矮槲寄生的分布区与环境变量的关系

GARP 运算的结果表明, 最优因子集的遗漏误差为 6.14%, 明显小于基础遗漏误差 6.67%, 且 χ^2

检验结果显示 P 值远远小于 0.01, 说明模型的预测能力优于随机模型。刀切法的检验结果表明: 22 个环境变量中有 8 个变量的缺失不能引起整体误差的增大, 因此剔除, 其余变量均参与了最终结果的运算。其中, 年温差 (bio_7) 影响云杉矮槲寄生的分布最为显著, 其次为昼夜温差与年温差比值 (bio_3)、

海拔 (alt)、极端最低温 (bio_6)、最冷季降水量 (bio_19)、最冷季平均温度 (bio_11)、最热季平均温度 (bio_10)、昼夜温差月均值 (bio_2)、温度季节性变动系数 (bio_4)、最干月降水量 (bio_14)、降水量季节性变动系数 (bio_15)、极端最高温 (bio_5)、年平均气温 (bio_1) 和最湿月降水量 (bio_13) (表 1)。

表 1 GARP 预测模型中环境变量的筛选

Tab. 1 Screening of environmental factors in GARP model

编号 NO.	数据简称 Code	环境变量 Environmental variables	遗漏误差 Percentage of omission/%	是否采用 yes or no
1	bio_1	年平均气温 Annual mean temperature	6.49	+
2	bio_2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range	6.89	+
3	bio_3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	7.64	+
4	bio_4	温度季节性变动系数 Temperature seasonality	6.89	+
5	bio_5	极端最高温 Max temperature of warmest month	6.53	+
6	bio_6	极端最低温 Min temperature of coldest month	7.21	+
7	bio_7	年温差 Annual temperature range	7.80	+
8	bio_8	最湿季平均温度 Mean temperature of wettest quarter	6.06	-
9	bio_9	最干季平均温度 Mean temperature of driest quarter	6.31	-
10	bio_10	最热季平均温度 Mean temperature of warmest quarter	7.08	+
11	bio_11	最冷季平均温度 Mean temperature of coldest quarter	7.14	+
12	bio_12	多年平均降水量 Annual precipitation	6.30	-
13	bio_13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	6.44	+
14	bio_14	最干月降水量 Precipitation of driest month	6.67	+
15	bio_15	降水量季节性变动系数 Precipitation seasonality	6.58	+
16	bio_16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	5.42	-
17	bio_17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	6.17	-
18	bio_18	最热季降水量 Precipitation of warmest quarter	6.19	-
19	bio_19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter	7.21	+
20	alt	海拔 Altitude	7.24	+
21	asp	坡向 Aspect	5.91	-
22	slo	坡度 Slope degree	6.36	-

注: + 代表采用, - 代表不采用。Notes: + and - indicate whether the environmental factors are included or not in the final analysis.

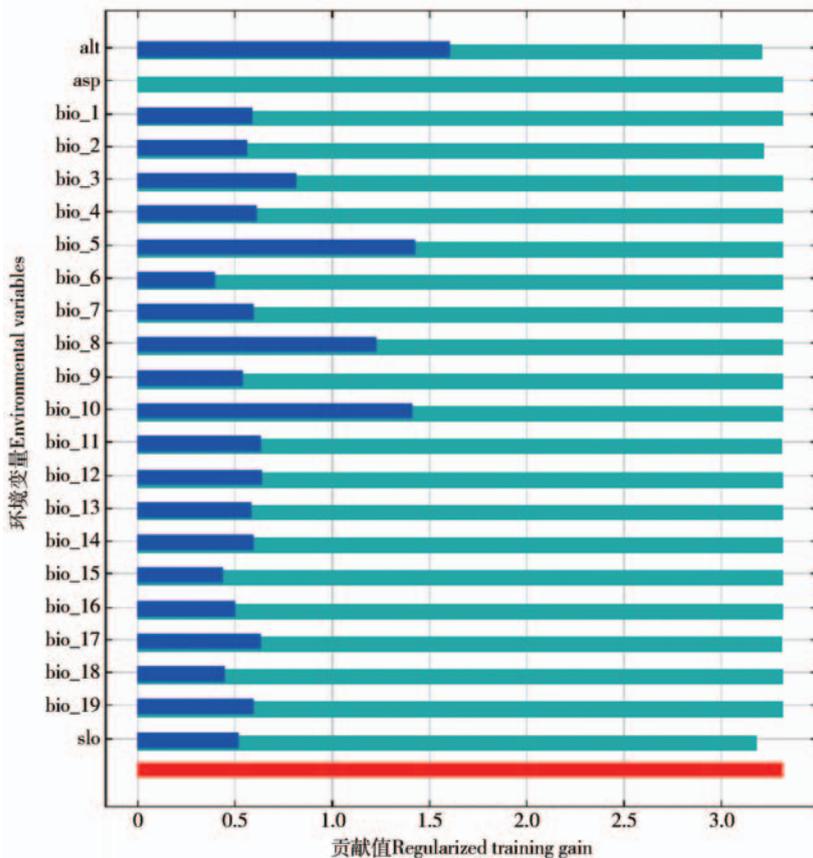
环境变量对 MaxEnt 模型预测云杉矮槲寄生适生性分布的贡献大小表明: 影响云杉矮槲寄生分布的最主要环境因子是海拔 (alt), 其次为极端最高温 (bio_5)、最热季平均温度 (bio_10) 以及最湿季平均温度 (bio_8) (图 2)。

2.2 云杉矮槲寄生在中国的分布区分析

GARP 模型的预测结果表明: 云杉矮槲寄生在青海东部 (海北藏族自治州、海东地区、黄南藏族自治州、果洛藏族自治州、海南藏族自治州、玉树藏族自治州南部以及海西蒙古族藏族自治州东部)、甘肃西部 (张掖、武威、兰州、临夏以及甘南藏族自治州)、四川西部 (甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州、

阿坝藏族羌族自治州)、西藏东部 (昌都地区、林芝地区以及山南地区), 以及宁夏、陕西、山西和云南的少数地区均可适生, 其余地区为不适宜分布区 (图 3A)。MaxEnt 模型的预测结果则表明云杉矮槲寄生仅在青海、甘肃、四川等地沿祁连山脉和横断山脉以及西藏少部分地区适宜分布 (图 3B)。

2 种模型的预测结果具有明显差异, 其中 GARP 预测面积较大, 整体表现性好, MaxEnt 模型预测区域较小, 但在局部的细节层次上, 更分明。因此, 本研究采用 GARP 与 MaxEnt 模型相结合的预测方法分析云杉矮槲寄生的分布区域, 结果表明: 云杉矮槲寄生主要分布在青海、甘肃、四川和西藏 4 个省份



深蓝色表示单一变量,浅蓝色表示除该变量外的其他变量组合,红色表示所有变量。
Dark blue indicates a single factor, light blue indicates other factors except for the factor, and red indicates all factors.

图2 环境变量对 MaxEnt 模型的贡献值

Fig. 2 Importance of environmental factors for MaxEnt model prediction

(自治区), 预测面积分别为 13.39、15.74、24.37 和 16.78 万 km^2 , 占各省总面积的 18.54%、34.70%、50.14% 和 13.66%; 在云南和宁夏也有零星分布, 预测面积分别为 2.88 和 2.10 万 km^2 (图 3C, 图 4)。云杉矮槲寄生的极高适宜分布区位于青海、甘肃、四川的交界地区, 其中青海省面积最大, 其次为甘肃和四川, 预测面积分别为 2.72、2.39 和 1.81 万 km^2 ; 高适宜分布区的分布比较广泛, 以极高适宜分布区为中心向各个方向延伸, 即青海省中东部、甘肃西部和南部、四川西部和北部、西藏东部地区, 面积分别为 7.08、6.16、10.44、9.13 万 km^2 ; 中适宜分布区主要位于四川中部、云南西北部以及宁夏南部零星地区 (图 3C, 图 4)。

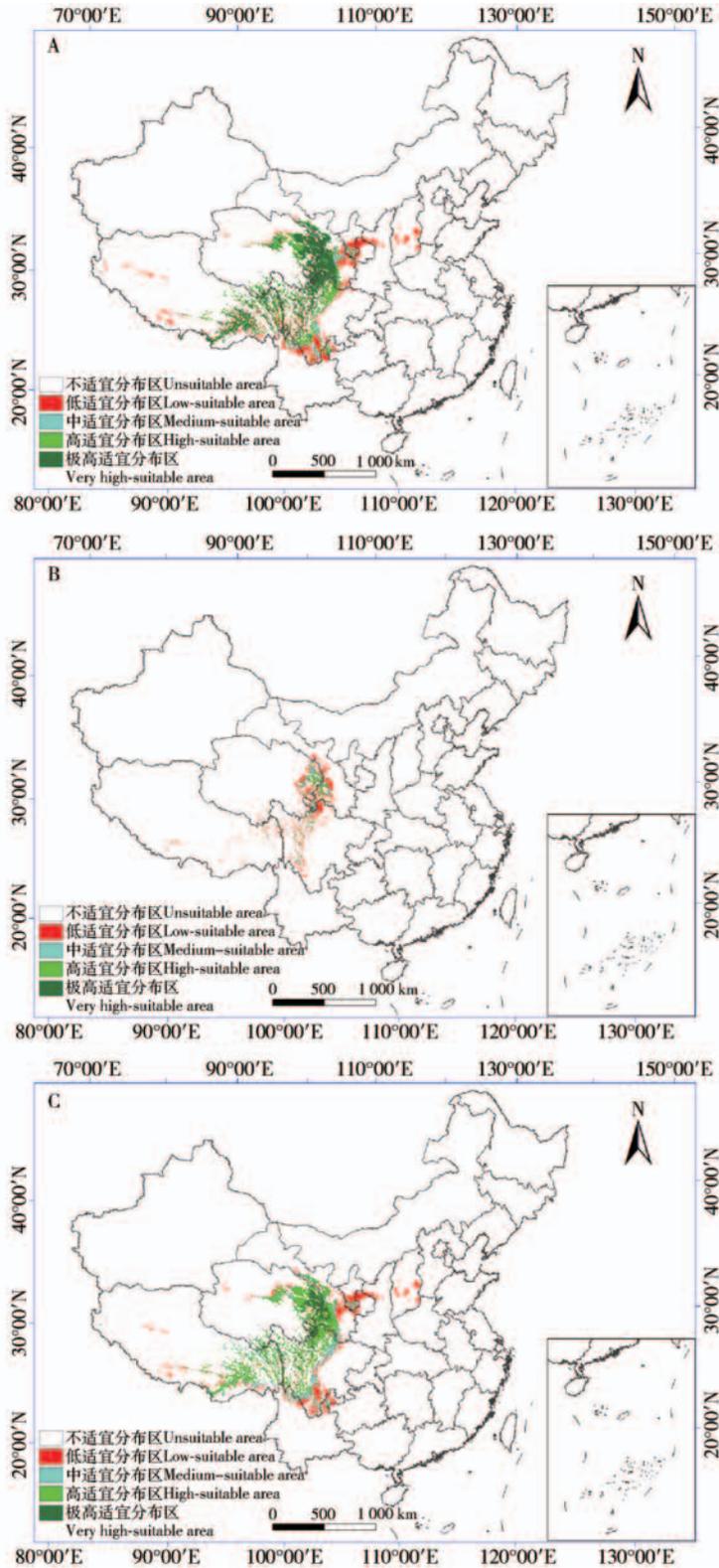
2.3 ROC 曲线的精度检验

采用训练和测试数据集的 ROC 曲线可以验证所用模型的预测能力, 结果表明: 2 个模型的训练和测试数据集的 ROC 曲线均远离随机分布模型的 ROC 曲线; 其中云杉矮槲寄生的 GARP、MaxEnt 和 GARP-MaxEnt 模型 AUC 值分别为 0.879、0.908 和 0.937 (图 5), 均显著高于随机模型的 AUC 值

(0.5), 可见 GARP 和 MaxEnt 模型单独或组合使用的预测结果均可达到较高的精度, 说明模型预测分布区与物种实际分布区的拟合度达到优秀水平。因此, 本研究中采用 GARP、MaxEnt 和 GARP-MaxEnt 预测的云杉矮槲寄生在中国的分布结果是准确可靠的。

3 结论与讨论

本研究基于 GARP 和 MaxEnt 生态位模型, 结合 ArcGIS 地理信息系统预测云杉矮槲寄生在中国的适生性分布区, 并且分析了云杉矮槲寄生在不同地区的适宜分布程度, 这是关于矮槲寄生分布范围预测的首次报道。通过研究, 明确了云杉矮槲寄生分布区集中于青海、甘肃、四川和西藏 4 个省 (自治区), 其中青海、甘肃、四川交界处为云杉矮槲寄生极度适宜的分布区。而在早期的文献中仅记载了云杉矮槲寄生分布于西藏 (亚东、比如) 和四川 (德格、道孚、稻城、黑水) [2]。近年来, 在青海 (黄南、海北、玉树、果洛) [5] 和甘肃 [8] 不断发现有云杉矮槲寄生分布, 且在青海地区危害最为严重, 造成大片云杉天



A. GARP 模型预测结果; B. GARP 模型预测结果; C. GARP-MaxEnt 模型预测结果。A, GARP model; B, GARP model; C, GARP-MaxEnt model

图3 云杉矮榿寄生在中国的预测分布区

Fig.3 Predicted distribution area of *Arceuthobium sichuanense* in China

然林和次生林的死亡^[5,9]。目前云杉矮榿寄生害仅在青海受到重视,其他地区尚未引起重视^[5,9]。因此,建议加强对云杉矮榿寄生适宜分布区内的调查

和监测,及时了解云杉矮榿寄生害的发生情况。

不同的生态位模型对物种潜在地理分布的预测结果存在较大的差异^[17,38],其原因在于 GARP 模型

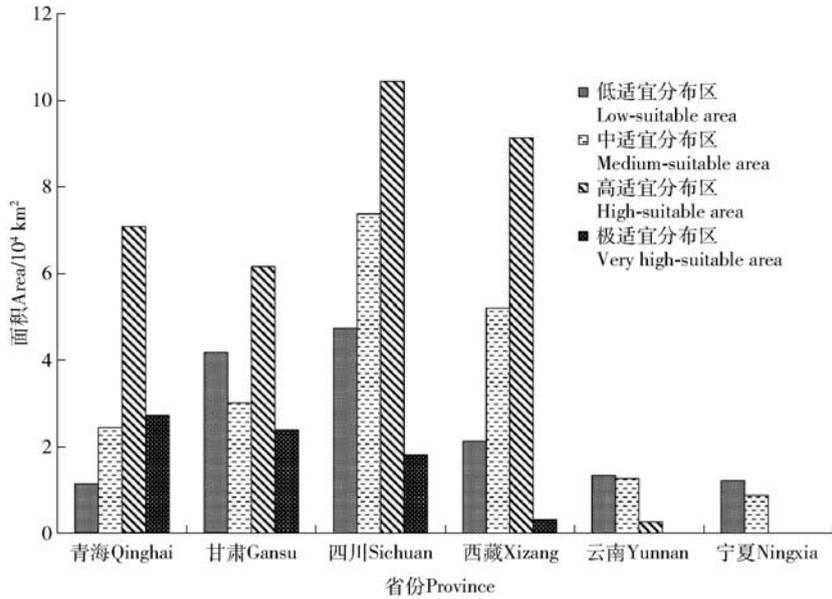
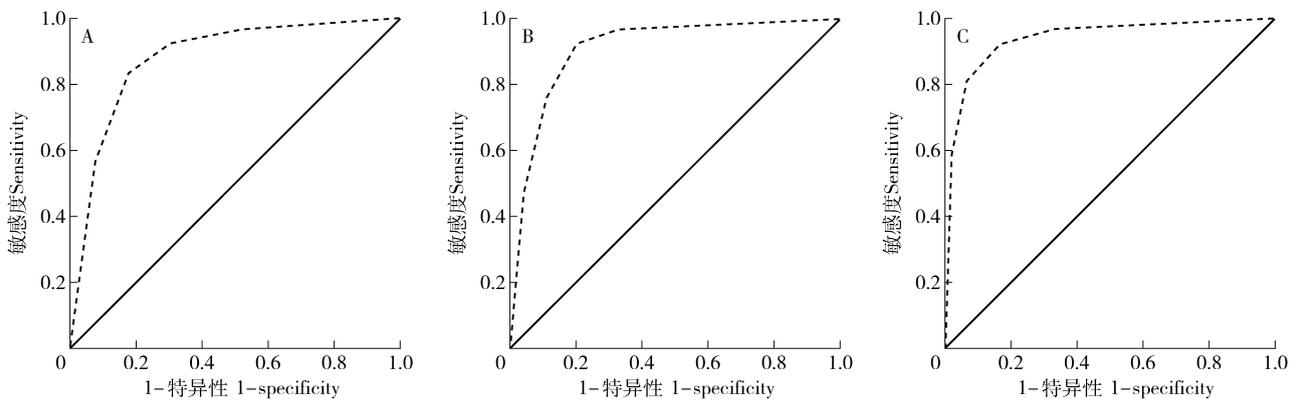


图4 云杉矮槲寄生在各省份的潜在分布面积

Fig. 4 Potential distribution area of *Arceuthobium sichuanense* in 12 provinces



A. Garp 模型; B. MaxEnt 模型; C. Garp-MaxEnt 模型。A, Garp model. B, MaxEnt model. C, Garp-MaxEnt model.

图5 ROC 曲线图

Fig. 5 ROC curve

侧重排除模拟中的遗漏误差 (omission), 而 MaxEnt 模型则侧重于排除模拟中的存在误差 (commission)^[40]。因而研究中可以将二者的预测结果赋予不同的权重, 兼顾预测结果的分布范围与细节显示^[35]。从本研究的结果可以看出, GARP 模型预测的云杉矮槲寄生分布范围整体表现性好于 MaxEnt 模型, 而 MaxEnt 模型的预测结果在细节层次上更分明, 其预测精度 (AUC 值 = 0.908) 高于 GARP 模型的预测精度 (AUC 值 = 0.879)。该结果与已有的报道相符合^[39-40], 因此, 本研究将 GARP 模型与 MaxEnt 模型相结合, 赋予不同的权重 (4:1), 从而获得了整体表现更好、精度更高 (AUC 值 = 0.937) 的预测结果。

气候因素 (尤其是物种特异性的温度阈值和降水阈值) 是影响物种分布的主要决定因素^[41-43]。本

研究中, GARP 和 MaxEnt 生态位模型均表明温度是影响云杉矮槲寄生分布的关键因素, 降水仅起到一般化的作用 (表 1、图 2)。这可能是由于云杉矮槲寄生的种子活力的保持和萌发需要严格的温度阈值。云杉矮槲寄生是寄生在云杉属植物上的寄生性种子植物^[2, 44], 从寄主体内获取水分和营养物质。然而, 从矮槲寄生种子弹射到萌发侵入寄主建立寄生关系, 这段时间需要大约 12 ~ 20 个月^[45]。在这段时间, 矮槲寄生的种子除了依赖自身胚乳储存的营养维持萌发和生命活力外^[44], 温度是影响矮槲寄生种子活力和萌发的关键因素, 空气相对湿度与种子含水量对矮槲寄生种子的活力并没有明显影响^[46]。在研究中还发现海拔也是影响云杉矮槲寄生分布的因素 (表 1、图 2), 这可能是由于海拔上升导致温度下降, 以保持合适的温度阈值。云杉矮槲

寄生为专性寄生性种子植物,其寄主为云杉属植物^[44],因此云杉的分布势必影响云杉矮槲寄生的分布。已有的研究表明,生长季节温度是影响中国云杉林分布的主要气候因子,其次是年降水量和土壤水分含量^[47]。尽管本研究并未考虑寄主分布对云杉矮槲寄生的影响,但这也间接反映了温度是影响云杉矮槲寄生分布的主要因素。

基于基础生态位的研究对云杉矮槲寄生的科学监测与治理具有重要意义。生态位模型描述的是物种的基础生态位,包括许多制约物种长期生存的因素,而实际生态位则是物种真实占据的基础生态位的部分,诸如生物互作(竞争、捕食或者寄生)、地理隔绝以及人类活动等因素均会影响物种实际生态位的大小,因此实际生态位小于基础生态位^[48]。然而,早期文献中仅记载在川西云杉和西藏云杉上发现云杉矮槲寄生^[2,44],近年来不断报道在青海云杉、紫果云杉和青杆上均发现有云杉矮槲寄生的存在^[5,7]。云杉矮槲寄生从最初2种寄主到目前多个寄主的发现,可以看到它的寄主范围在不断扩大。因此,基于基础生态位的研究具有一定价值,可推测在生长环境适宜范围内的云杉属植物均有可能受到云杉矮槲寄生的危害,提高对环境适宜区域内的非寄主云杉属植物的关注势在必行。本研究结果对云杉矮槲寄生的调查与监测具有重要参考价值,也为制定云杉矮槲寄生的科学防治策略提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 吴征镒. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 240-245.
WU Z Y. Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 2003: 240-245.
- [2] 丘华兴. 中国槲寄生亚科植物新资料[J]. 中国科学院大学学报, 1984, 22(3): 205-208.
QIU H S. Materials for Chinese viscoideae [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 1984, 22(3): 205-208.
- [3] 高国平. 我国针叶树上的寄生性种子植物[J]. 森林病虫通讯, 1990(3): 34-36.
GAO G P. Parasitic seed plants on conifers of China [J]. Forest Pest and Disease, 1990(3): 34-36.
- [4] 周在豹. 矮槲寄生的生物学特性及管理策略[J]. 中国森林病虫, 2007, 26(4): 37-39.
ZHOU Z B. Biological characteristics and management strategies of dwarf mistletoe [J]. Forest Pest and Disease, 2007, 26(4): 37-39.
- [5] 马建海, 淮稳霞, 赵丰钰. 云杉矮槲寄生-危害青海云杉的寄生植物[J]. 中国森林病虫, 2007, 26(1): 19-21.
MA J H, HUAI W X, ZHAO F Y. *Arceuthobium sichuanense*, a parasitic plant attacking spruce in Qinghai Province [J]. Forest Pest and Disease, 2007, 26(1): 19-21.
- [6] XIA B, TIAN C M, LUO Y Q, et al. The effects of *Arceuthobium sichuanense* infection on needles and current-year shoots of mature and young Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) trees [J]. Forest Pathology, 2012, 42(4): 330-337.
- [7] 高发明, 陈磊, 田呈明, 等. 云杉矮槲寄生的侵染对青杆光合与蒸腾作用的影响[J]. 植物病理学报, 2015, 45(1): 14-21.
GAO F M, CHEN L, TIAN C M, et al. Effects of *Arceuthobium sichuanense* infection on photosynthesis and transpiration of *Picea wilsonii* [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2015, 45(1): 14-21.
- [8] 高发明. 云杉矮槲寄生的发生特征分析及其对青杆光合与蒸腾作用的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
GAO F M. Occurrence characteristics analysis of *Arceuthobium sichuanense* and effects of its infection on photosynthesis-transpiration of *Picea wilsonii* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [9] 李涛, 马明呈, 谭建萍. 仙米林区云杉矮槲寄生为害状况及防治[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 69-72.
LI T, MA M C, TAN J P. Damage situation and control of *Arceuthobium sichuanense* in Xianmi forest area [J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2010, 28(3): 69-72.
- [10] 周在豹, 许志春, 田呈明, 等. 促使云杉矮槲寄生果实提前脱落药剂筛选[J]. 中国森林病虫, 2007, 26(3): 39-41.
ZHOU Z B, XU Z C, TIAN C M, et al. Screening of plant hormones causing the fruit pre-abscission of *Arceuthobium sichuanense* [J]. Forest Pest and Disease, 2007, 26(3): 39-41.
- [11] 夏博, 田呈明, 骆有庆, 等. 云杉矮槲寄生开花特性及化学防控[J]. 林业科学, 2010, 46(4): 98-102.
XIA B, TIAN C M, LUO Y Q, et al. Flowering characteristics and chemical control of the buds of *Arceuthobium sichuanense* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(4): 98-102.
- [12] 胡阳, 田呈明, 才让旦周, 等. 青海仙米林区云杉矮槲寄生空间分布格局及其与环境的关系[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 102-108.
HU Y, TIAN C M, CAI R D Z, et al. Spatial distribution pattern of *Arceuthobium sichuanense* and its correlation with environment in Xianmi forest region of Qinghai, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1): 102-108.
- [13] 孙秀玲, 许志春, 才让旦周, 等. 云杉矮槲寄生种子雨的时空分布格局[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 65-68.
SUN X L, XU Z X, CAI R D Z, et al. Spatiotemporal patterns of the seed rain of *Arceuthobium sichuanense* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 65-68.
- [14] 周在豹, 许志春, 田呈明, 等. 除草剂防治云杉矮槲寄生效果初报[J]. 植物保护, 2014, 40(4): 198-200.
ZHOU Z B, XU Z C, TIAN C M, et al. Preliminary report on efficiency of herbicides on controlling *Arceuthobium sichuanense* [J]. Plant Protection, 2014, 40(4): 198-200.
- [15] 朱宁波, 陈磊, 白云, 等. 云杉矮槲寄生内寄生系统的解剖学研

- 究[J]. 西北植物学报, 2015, 35(7): 1342-1348.
- ZHU N B, CHEN L, BAI Y, et al. Anatomical study on endophytic system of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(7): 1342-1348.
- [16] YUAN H S, WEI Y L, WANG X G. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of Sanghuang, an important group of medicinal fungi in China [J]. Fungal Ecology, 2015, 17: 140-145.
- [17] QIN Z, ZHANG J E, DITOMMASO A, et al. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc with MaxEnt and GARP models [J]. Journal of Plant Research, 2015, 128(5): 1-13.
- [18] REMYA K, RAMACHANDRAN A, JAYAKUMAR S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India [J]. Ecological Engineering, 2015, 82(9): 184-188.
- [19] HAVERKOST T R, GARDNER S L, PETERSON A T. Predicting the distribution of a parasite using the ecological niche model, GARP [J]. Revista Mexicana De Biodiversidad, 2010, 81(3): 895-902.
- [20] PETERSON, TOWNSEND A. Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence [J]. Journal of Biogeography, 2011, 38(5): 817-827.
- [21] 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.
- [22] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [23] SHCHEGLOVITOVA M, ANDERSON R P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes [J]. Ecological Modelling, 2013, 269: 9-17.
- [24] WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, et al. Effects of sample size on the performance of species distribution models [J]. Diversity & Distributions, 2008, 14(5): 763-773.
- [25] PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, et al. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar [J]. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [26] 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 & Computers in Simulation, 1992, 33(5-6): 385-390.
- [27] 李红梅, 韩红香, 薛大勇. 利用 GARP 生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布[J]. 昆虫学报, 2005, 48(1): 95-100.
- LI H M, HAN H X, XUE D Y. Prediction of potential geographic distribution areas for the pine bark scale, *Matsucoccus matsumurae* (*Kuwana*) (*Homoptera: Margarodidae*) in China using GARP modeling system [J]. Acta Entomologica Sinica, 2005, 48(1): 95-100.
- [28] 薛大勇, 李红梅, 韩红香, 等. 红火蚁在中国的分布区预测[J]. 应用昆虫学报, 2005, 42(1): 57-60.
- XUE D Y, LI H M, HAN H X, et al. A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China [J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2005, 42(1): 57-60.
- [29] 余岩, 陈立立, 何兴金. 基于 GARP 的加拿大一枝黄花在中国的分布区预测[J]. 植物分类与资源学报, 2009, 31(1): 57-62.
- YU Y, CHEN L L, HE X J. Potential distributions of *Solidago canadensis* (*Asteraceae*) in China as predicted by GARP [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2009, 31(1): 57-62.
- [30] 张静秋, 陈克, 张立, 等. 基于 GARP 的烟草霜霉病在中国的适生性分析[J]. 植物检疫, 2014, 28(1): 20-24.
- ZHANG J Q, CHEN K, ZHANG L, et al. Prediction of potential geographic distribution of blue mold (*Peronospora tabacina* Adam) in China using GARP modeling system [J]. Plant Quarantine, 2014, 28(1): 20-24.
- [31] 韩阳阳, 王焱, 项杨, 等. 基于 MaxEnt 生态位模型的松材线虫在中国的适生区预测分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 6-10.
- HAN Y Y, WANG Y, XIANG Y, et al. Prediction of potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China based on MaxEnt ecological niche model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(1): 6-10.
- [32] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. WORLDCLIM: very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [33] 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.
- [34] 王瑞. 我国严重威胁性外来入侵植物入侵与扩散历史过程重建及其潜在分布区的预测[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006.
- WANG R. Historical reconstruction of invasion and expansion and potential spread of some threatening invasive alien species in China [D]. Beijing: The Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [35] 刘欣. 基于 GARP 和 MAXENT 的空心莲子草在中国的入侵风险预测[D]. 山东: 山东师范大学, 2012.
- LIU X. Prediction of the Invasion Risk for *Alternanthera Philoxeroides* in China based on the GARP and MaxEnt Model [D]. Shandong: Shandong Normal University, 2012.
- [36] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, et al. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [37] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240: 1285-1293.
- [38] 朱耿平, 刘晨, 李敏, 等. 基于 MaxEnt 和 GARP 模型的本双棘长蠹在中国的潜在地理分布分析[J]. 昆虫学报, 2014, 57(5): 581-568.

- ZHU G P, LIU C, LI M, et al. Potential geographical distribution of *Sinoxylon japonicum* (Coleoptera: Bostrichidae) in China based on MaxEnt and GARP models [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57(5):581-568.
- [39] 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.
- WANG Y S, XIE B Y, WAN F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4):365-372.
- [40] PETERSON A T, PAPES M, EATON M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt [J]. *Ecography*, 2007, 30(4):550-560.
- [41] CRIC K, HUMPHREY Q P, SPARKS, et al. Climate change related to egg-laying trends [J]. *Nature*, 1999, 399:423.
- [42] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts [J]. *Science*, 2000, 289:2068-2074.
- [43] GIAN-RETO W, ERIC P, PETER C, et al. Ecological responses to recent climate change [J]. *Nature*, 2002, 416:389-395.
- [44] HAWKSWORTH F G, BRIAN F, WIENS D. Dwarf mistletoes: biology, pathology, and systematics [M]. Washington DC: United States Department of Agriculture Forest Service, 1996.
- [45] BRANDT J P. Life cycle of *Arceuthobium americanum* on *Pinus banksiana* based on inoculations in Edmonton, Alberta [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36:1006-1016.
- [46] SCHARPF R F. Seed viability, germination and radicle growth of dwarf mistletoe in California [R]. Pacific southwest forest and range experiment station, Forest Service U. S. Department of Agriculture, 1970.
- [47] 李贺, 张维康, 王国宏. 中国云杉林的地理分布与气候因子间的关系[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(5):372-381.
- LI H, ZHANG W K, WANG G H. Relationship between climatic factors and geographical distribution of spruce forests in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 36(5):372-381.
- [48] 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.
- ZHU G P, LIU G Q, BU W J, et al. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(1):90-98.

(责任编辑 李 契 冯秀兰
责任编辑 石福臣)