

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170180

防风固沙优良树种欧李的潜在适生区及生态特征

张 琴¹ 宋经元¹ 邵 飞² 傅生辰³ 孙成忠⁴ 袁丽钗¹ 谢彩香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. 济南市勘察测绘研究院, 山东 济南 250101;
3. 对外经济贸易大学, 北京 100124; 4. 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

摘要:【目的】欧李作为我国特有的生态型树种, 在防风固沙、蓄水保土等方面具有重要的生态和经济价值, 因此研究欧李的全球潜在适生区及其生态特征, 对欧李树种的推广种植和防沙治理具有重要意义。【方法】本文根据379个欧李分布点和19个生态因子数据, 采用 BIOCLIM、DOMAIN、MAXENT 和 GARP 4 个生态位模型预测欧李的全球潜在适生区, 并分析欧李分布区的生态特征, 以受试者工作特征曲线 ROC 和 Kappa 两个统计量进行模型评价。【结果】欧李的全球潜在适生区主要分布在 30°~52°N, 102°~137°E 范围内的亚洲, 包括中国、韩国、朝鲜以及与中国东北接壤的俄罗斯远东地区, 另外, 阿富汗和塔吉克斯坦也有少量分布, 其中最适宜区主要分布在中国。模型评估表明, 4 个模型的 AUC 值均达到 0.85 以上, Kappa 值均达到 0.7 以上, 4 个模型预测精度良好, 一致性显著, 均可用来预测欧李潜在适生区。欧李分布区的生态特征为: 年平均温度范围为 3.2~13.9℃, 昼夜温差月均值范围为 10.1~13.0℃, 昼夜温差与年温差比值范围为 24~30, 温度变化方差范围为 9 234~13 581, 最湿月份降水量范围为 115~226 mm, 最干月份降水量范围为 2~10 mm, 雨量变化方差范围为 77~115。【结论】欧李潜在适生区主要位于温带季风气候带, 最适宜区主要分布在中国东北和华北地区, 该地区可大规模种植欧李以实现荒漠化治理, 而韩国、朝鲜、俄罗斯远东区和阿富汗等地适宜性相对较低, 可先进行小规模试种, 再扩大生产。

关键词:欧李; 生态位模型; 潜在适生区; 模型评价; 生态特征

中图分类号:S793.9; R931.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2018)03-0066-09

引文格式:张琴,宋经元,邵飞,等. 防风固沙优良树种欧李的潜在适生区及生态特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(3): 66~74. Zhang Qin, Song Jingyuan, Shao Fei, et al. Potential suitable distribution area and ecological characteristics of *Cerasus humilis*, an excellent tree species for windproof and sand fixation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(3): 66~74.

Potential suitable distribution area and ecological characteristics of *Cerasus humilis*, an excellent tree species for windproof and sand fixation

Zhang Qin¹ Song Jingyuan¹ Shao Fei² Fu Shengchen³ Sun Chengzhong⁴ Yuan Lichai¹ Xie Caixiang¹(1. Institute of Medicinal Plant Development, Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China; 2. Jinan Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Jinan 250101, Shandong, China;
3. University of International Business and Economics, Beijing 100124, China;
4. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100039, China)

Abstract: [Objective] *Cerasus humilis*, a unique ecological tree species in China, has significant ecological value and economic value in windproof and sand fixation, so it is important to predict the global potential habitat of *C. humilis* and analyze its niche, which is beneficial for its cultivation promotion and sand control. [Method] According to 379 distribution points of *C. humilis* and 19 ecological variables, four ecological niche models (BIOCLIM, DOMAIN, GARP, MAXENT) were used

收稿日期: 2017-05-16 修回日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(81473304), “十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAI05B01)。

第一作者: 张琴。主要研究方向:药用植物地理分布及产地适宜性。Email: zhangqin1992yx@163.com 地址: 100193 北京市海淀区马连洼北路 151 号。

责任作者: 谢彩香, 副研究员。主要研究方向:药用植物地理分布及产地适宜性。Email: caixiangxie@163.com 地址: 同上。

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

to predict the potential suitable distribution area of *C. humilis* and analyze its ecological characteristics. The predicted results were evaluated by two statistical criteria, the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) and Kappa value. [Result] The results showed that the potential distribution area of *C. humilis* was mainly located in the range of 30°–52° N and 102°–137° E, including China, South Korea, North Korea, and Russian Far East bordering northeast China. Besides, a small amount of area was located in Afghanistan and Tajikistan as well. Among them, the most suitable area was mainly distributed in China. The model evaluation results showed that the AUC values of the four models were above 0.85 and the Kappa values were above 0.7, indicating their good prediction accuracy and consistency, so they can well predict the potential suitable area of *C. humilis*. The ecological characteristics of the distribution area for *C. humilis* were that the range of annual average temperature was 3.2–13.9 °C, the monthly mean value of diurnal temperature difference (max. temperature – min. temperature) was 10.1–13.0 °C, the range of isothermality was 24–30, SD of temperature seasonality ranged from 9 234 to 13 581, precipitation of the wettest month ranged from 115 to 226 mm, precipitation of the driest month was 2 to 10 mm and the variation range of precipitation seasonality was 77–115. [Conclusion] Potential suitable distributing area of *C. humilis* was mainly in temperate zone monsoon climate and the most suitable area was mainly located in northeastern and northern China, where large-scale cultivation of *C. humilis* can be achieved for desertification management. In Korean, North Korea, Russian Far East and Afghanistan, the suitability was relatively low, so small-scale cultivation trials can be conducted before expanding production.

Key words: *Cerasus humilis*; niche model; potential suitable distributing area; model evaluation; ecological characteristics

水土流失、土地荒漠化等自然灾害严重威胁着人类的生存发展,根据联合国最新统计,荒漠化造成的全球土地损失高达 3 600 万 km²,每年仍按 6 万 km² 的平均速度扩展,其中非洲和亚洲是土壤荒漠化现象最严重的地区。土地荒漠化已成为全球生态的“头号杀手”,因此寻求具有防风固沙、蓄水保土效果的适生植物以实现荒漠化治理迫在眉睫^[1-2]。欧李(*Cerasus humilis*)是蔷薇科(Rosaceae)樱桃属矮生灌木果树,是我国特有的一种生态型树种,对生存环境适应性强,在气候干旱、寒冷(–40°C),土壤瘠薄甚至盐碱区(pH 值 8.5 以下)均可生存。尤其是欧李根系发达呈网状结构,种植 3 年后保水率和保土率分别可达 25% 和 80%,其生态平衡效果远高于沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和柠条(*Caragana Korshinskii*)等传统植物,是防治水土流失的极佳树种^[3]。此外欧李果实富含人体易吸收的果酸钙而被称为“钙果”,其花色和果色非常艳丽,在景观设计和旅游方面亦可广泛应用,因此欧李所具有的生态价值、经济价值和观赏价值,使其成为一种开发前景广阔的优良树种^[4]。欧李资源主要分布在我国的黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山东、河南等地^[5],全球其他区域的沙漠化可通过引种栽培欧李缓解,但是如何判断某一区域能否种植欧李,仍然缺乏科学指导,因此研究欧李的生态适宜性区划以及

生态特征是解决欧李适种区域问题的关键^[6]。

随着生态位理论以及信息技术的不断发展^[7-8],许多生态位模型被开发并在植物潜在适生区预测方面得到了广泛应用^[9-10]。生态位模型是根据物种的分布样本和相关环境变量信息,得出环境变量对物种分布的约束关系,利用这种关系构建模型,将模拟结果投射到所研究的区域,以判断物种的潜在分布^[11],本文采用常用的 BIOCLIM、DOMAIN、GARP 和 MAXENT 4 个模型模拟欧李在全球的潜在适生区。不同的模型算法原理不同,BIOCLIM 模型是根据已知环境因子对物种分布的限制范围,认为物种的环境特征是一个个多维包络,然后探索研究区域环境因子与已知环境包络之间的非随机关系^[12]; DOMAIN 模型是根据 Gower 算法计算研究区域内点和已知点的环境变量的相似性,根据相似矩阵进行分类,得到物种的分布范围^[13]; GARP 模型是根据遗传算法原理,将物种分布数据和环境数据反复迭代运行,产生不同规则的集合,将最优集合的结果作为物种的潜在分布区^[14]。MAXENT 模型是在已知的约束条件下对未知事物不作任何假设,得到熵值最大的概率分布,根据熵最大时的状态参数确定物种和环境关系来估计物种的分布^[15]。近几年对欧李的研究主要集中在分子^[16-18]、植物生

理^[19-20]、化学品质^[21]及标准制定^[22]方面,对于欧李在全球的潜在适生区鲜少报导。本文应用上述4种常用的生态位模型预测其在全球范围内的潜在分布并分析欧李分布区的生态因子特征,为欧李树种的推广种植和防沙治理,以及响应国家一带一路倡议,实现欧李生态价值最大化提供支持。

1 研究材料

1.1 物种分布信息

本文的欧李样本点来源于中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)、NSII-中国国家标

本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、中国科学院植物研究所植物标本馆(<http://pe.ibcas.ac.cn/>)以及文献检索。由于样本信息来源多样,需进行筛选以保证样本准确性。先核实所有样本点的拉丁名,保留拉丁名准确无误的点;再核查经纬度信息,经纬度信息重复的点只保留一个,经纬度信息缺失但有详细地名的点可根据谷歌地球进行定位,经纬度信息不全且地名不详的点均删除。最终得到379个欧李样本点(图1),时间分布为1956—2006年,将其分布数据保存为shp和csv格式。

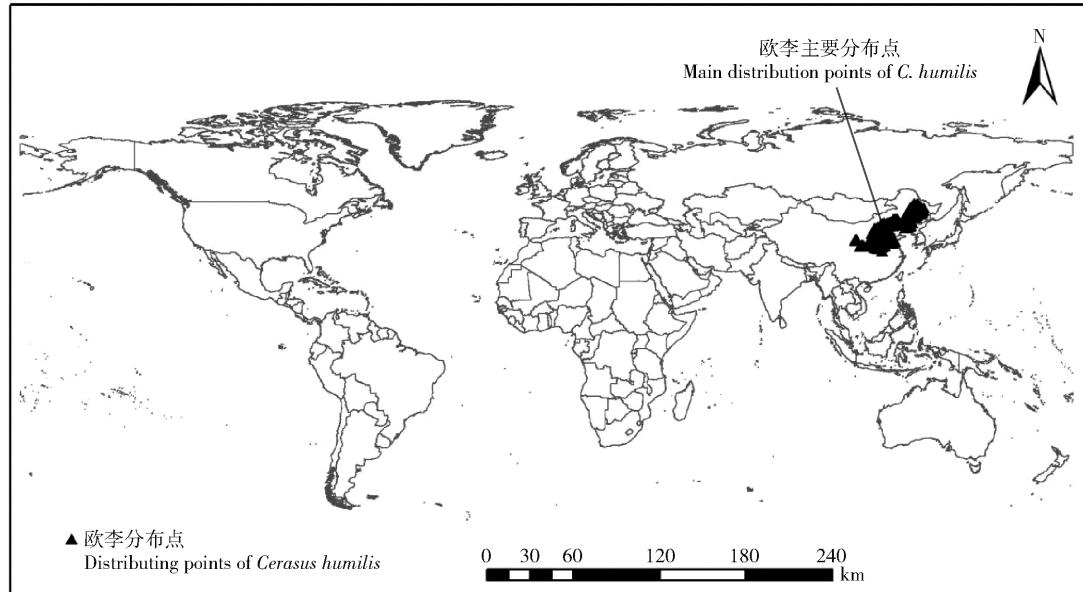


图1 欧李样本点分布图

Fig. 1 Distributing points of *Cerasus humilis*

1.2 生态数据

影响物种分布的因素主要有非生物因素、生物因素以及物种的迁移能力,各种因素在不同空间尺度下发挥作用不同。一般来说,在大尺度范围内,气候(非生物因素)是影响物种分布格局的主要因素,生物因素主要在小尺度空间下影响物种分布^[23-24]。本文基于全球空间尺度下预测欧李潜在分布,因此采用与温度降水相关的19个气候变量作为生态数据,如表1所示。该数据下载于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>),空间分辨率为2'30”,是全球监测数据的平均值(1970—2000年)。此外,从国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>)下载得到地图资料。

1.3 生态位模型

BIOCLIM模型和DOMAIN模型预测主要在DIVA-GIS软件(Version 7.5)中进行,此外DIVA-GIS软件还用于处理欧李样本,该软件下载于<http://www.diva-gis.org/download>; MAXENT软件

(Version 3.3.3 k)用于最大熵模型分析,下载于<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent.>; Desktop Garp软件(Version 1.1.6)用于GARP模型分析,下载自<http://www.Nhm.ku.edu/desktopgarp/download.html>。ArcGIS 10.1主要用于数据格式转换和图层重分类等,该软件来源于ESRI公司。

2 研究方法

2.1 生态因子共线性诊断

物种分布数据可通过查询物种分布数据库、文献以及资源考察获得,其数量有限,而影响物种分布的环境因子较多,因此应用生态位模型时环境变量的选择是首要问题。本文应用的气候变量是影响物种分布的主要因素,采用Spearman系数法对19个变量进行相关性检验以避免变量之间共线性导致模型过度拟合^[25],根据相关性检验结果,两个因子的Spearman系数大于0.75时,选择其中一个生态意义重大的因子,而小于0.75的因子均保留^[26],最终得

表 1 环境变量

Tab. 1 Environmental variables

环境变量	Environmental variable	单位	Unit
年平均温度 Mean annual temperature(bio1)		℃	
昼夜温差月均值 Monthly mean value of diurnal temperature difference (max. temperature - min. temperature) (bio2)		℃	
昼夜温差与年温差比值 Isothermality (bio2/bio7 × 100) (bio3)		1	
温度变化方差 SD of temperature seasonality(bio4)		1	
最热月份最高温 Max. temperature of the warmest month(bio5)		℃	
最冷月份最低温 Min. temperature of the coldest month(bio6)		℃	
年温度变化范围 Annual temperature range(bio5 - bio6) (bio7)		℃	
最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter(bio8)		℃	
最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter(bio9)		℃	
最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest quarter(bio10)		℃	
最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter(bio11)		℃	
年平均降水量 Annual mean precipitation(bio12)		mm	
最湿月份降水量 Precipitation of the wettest month(bio13)		mm	
最干月份降水量 Precipitation of the driest month(bio14)		mm	
雨量变化方差 Variation of precipitation seasonality(bio15)		1	
最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter(bio16)		mm	
最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter(bio17)		mm	
最暖季度平均降水量 Mean precipitation of the warmest quarter(bio18)		mm	
最冷季度平均降水量 Mean precipitation of the coldest quarter(bio19)		mm	

到 7 个环境变量, 分别为年平均温度(bio1)、昼夜温差月均值(bio2)、昼夜温差与年温差比值(bio3)、温度变化方差(bio4)、最湿月份降水量(bio13)、最干月份降水量(bio14)、雨量变化方差(bio15)。

2.2 模型应用

在 DIVA-GIS 软件中导入欧李样本数据(shp 格式), 在 Modeling 模块中采用 Sample Points 工具进行随机取样: 将训练数据集的比例设置为 75%, 再随机选取背景点(数量设为样本点的 10 倍), 将背景点和剩下 25% 的已知点作为测试数据, 训练集用于模型预测, 测试集用于模型验证。为了提高模型预测结果的准确度和比较不同模型的差异性, 随机生成 5 组数据, 包括训练数据集和对应的测试数据集, 生态适宜性分析总体技术路线见图 2。

BIOCLIM 模型和 DOMAIN 模型: 先在 DIVA-GIS 软件中导入环境数据图层并进行格式转换, 转换成 grd 格式后生成 stack 数据集, 然后打开 Bioclim/Domain 模块, 加载训练数据集和环境数据的 stack 数据集, 分别进行两个模型的预测。

MAXENT 模型: 打开 MAXENT 软件, 将训练数据集(csv 格式)和环境数据(asc 格式)分别导入, 设置刀切法权重, 预测结果输出栏勾选 asc 格式, 其他参数采用默认设置。

GARP 模型: 先将 asc 格式的环境数据全部转换成 RAW 格式(Garp Dataset Manager 中进行), 再打开 Desktop Garp, 分别添加训练数据集和 RAW 格

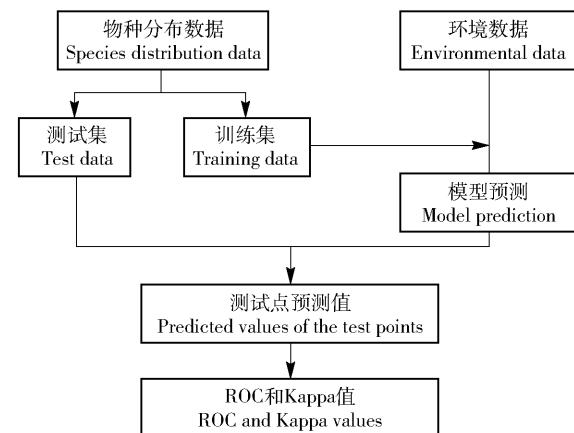


图 2 生态适宜性分析技术路线

Fig. 2 Technical route of ecological suitability analysis

式的环境数据, 训练数据比例设为 100%, 循环次数设为 20 次, 并设置最优模型集合, 以 asc 格式输出预测结果图。

2.3 模型预测评估

为了比较不同模型的预测精度, 本文采用 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)和 Kappa 统计量分别进行评价。将每个模型的 5 个预测结果图分别转换成 grd 格式并创建 stack 数据集, 在 Modeling 模块中导入测试数据和预测结果的 stack 数据集并生成评估文件, 然后输出 ROC 和 Kappa 值。

ROC 曲线是一种非阈值依赖性评价指标, 在模型评价中得到了广泛的应用, 比较不同模型预测结果时更加客观, 目前认可度较高^[27]。ROC 曲线分析

法主要通过计算曲线下面积 (area under curve, AUC), AUC 值范围为 0 ~ 1, 值越大表示预测越精确, AUC 值为 0.7 ~ 0.8, 一般; 0.8 ~ 0.9, 好; 0.9 ~ 1, 非常好。Kappa 统计量是一种阈值依赖指标, 可用来检验模型预测结果的一致性, 也被广泛用作模型评价参数。Kappa 统计量取值范围为 [−1, +1], 当 Kappa 值小于或等于 0 时, 表示模型预测效果较差, 不如随机模型^[28], Kappa 值为 0.4 ~ 0.6, 一般; 0.6 ~ 0.8, 显著; 0.8 ~ 1, 极佳。

2.4 潜在适生区区划

根据生态位模型预测结果, 每个模型均得到 5 个预测图, 选出 AUC 值最大的作为每个模型的最终预测结果。将其转换成 ASCII 格式并导入 GIS 然后进行地图制作, 先进行栅格重分类, 再根据每个模型的默认值, 利用自然间断点分级法 (Jenks) 进行等级划分^[29], 得到各个模型的欧李适生区分布图。

3 结果与分析

3.1 潜在适生区预测

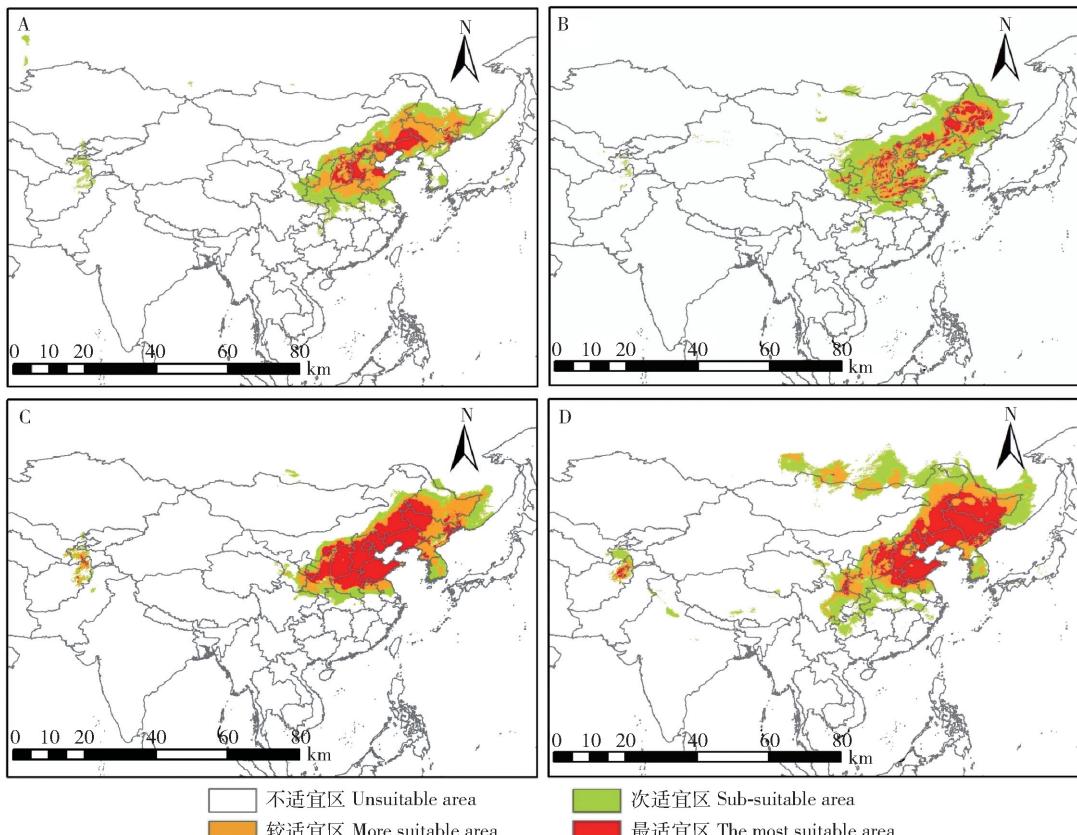
4 个模型的预测结果显示欧李潜在适生区分布基本一致, 主要分布在 30° ~ 52° N、102° ~ 137° E 范围内的亚洲地区, 其中在中国分布较为集中, 韩国、

朝鲜、阿富汗、塔吉克斯坦以及与中国东北接壤的俄罗斯远东地区有少量分布。欧李在中国的潜在适生区主要分布在秦岭以北的山脉附近, 阴山以南, 太行山、燕山以北, 以及东北大兴安岭东面及小兴安岭以南。包含的行政区划有甘肃省、宁夏自治区、陕西省、山西省、河北省、河南省、山东省、北京市、辽宁省、吉林省、黑龙江省、内蒙古自治区。其中最适宜区主要分布在陕西中部、甘肃东北部、陕西省、河南省北部、河北省、山东省、内蒙古南部、辽宁省、吉林省西部。

不同模型预测结果也存在一定的差异性, BIOCLIM 模型 (图 3A), DOMAIN 模型 (图 3B) 和 MAXENT 模型 (图 3C) 预测的欧李潜在适生区整体分布范围较为接近, GARP (图 3D) 模型预测的分布区范围最大。从最适宜区 (红色部分) 分布来看, MAXENT 模型和 GARP 模型分布范围最大, BIOCLIM 模型和 DOMAIN 模型的最适宜区面积较小, 其中 DOMAIN 模型预测的最适宜区面积最小且分布不集中。

3.2 模型评估

4 个模型预测结果的 AUC 值和 Kappa 值统计量如表 2 所示。



A. BIOCLIM 模型; B. DOMAIN 模型; C. MAXENT 模型; D. GARP 模型。A, BIOCLIM model; B, DOMAIN model; C, MAXENT model; D, GARP model.

图 3 欧李全球潜在适生区

Fig. 3 Global potential suitable distributing area of *C. humilis*

表 2 4 个模型 AUC 和 Kappa 统计量

Tab. 2 Statistic values of AUC and Kappa of the four models

模型 Model	AUC 均值 Average of AUC	AUC 标准差 Standard deviation of AUC	Kappa 均值 Average of Kappa	Kappa 标准差 Standard deviation of Kappa
BIOCLIM	0.973	0.01	0.979	0.02
DOAMIN	0.993	0.001	0.983	0.003
GARP	0.897	0.02	0.790	0.04
MAXENT	0.858	0.02	0.716	0.05

4 种模型的 AUC 均值均达到 0.85 以上, Kappa 值均达到 0.7 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 4 个模型均可用来预测欧李潜在适生区分布。比较不同模型的 AUC 值可知, DOAMIN 模型的 AUC 值最大, 达到 0.993, 其次是 BIOCLIM 模型, GARP 模型和 MAXENT 模型。比较不同模型 AUC 值的标准差可知, DOAMIN < BIOCLIM < GARP = MAXENT, AUC 值和标准差代表了模型预测的总体水平, 均值越大, 标准差越小, 表明模型预测越稳定, 标准差表明了样本的离散程度, 标准差越小, 表明样本分布对预测结果的干扰越小。比较不同模型的 Kappa 值可知, 4 个模型的 Kappa 值大小依次为 DOAMIN > BIOCLIM > GARP > MAXENT, DOAMIN 模型的 Kappa 值最大, 表明其一致性最好。4 个模型 Kappa 值的标准差 DOMAIN 模型最小, 其次是 BIOCLIM 模型, GARP 模型, MAXENT 模型。因此对于欧李来说, DOMAIN 模型预测效果更好。综上分析可知各个模型的 AUC 值和 Kappa 值具有一定的相关性, AUC 值越大, Kappa 值也越大。DOMAIN 模型的 AUC 值最大, Kappa 值也最大, 因此 DOMAIN 模型可作为预测欧李潜在适生区的最佳模型。

3.3 欧李生态特征

利用 ArcGIS 软件提取欧李 379 个分布点的生态因子数据, 然后根据 R 软件得到 7 个主要生态因子的生态位(图 4)。欧李实际分布点上各个生态因子的生态位符合欧李生长条件, 因此根据数据的统计分布情况, 排除异常值, 以数据上下限范围作为因子的生态位范围: 年平均温度(bio1) 3.2 ~ 13.9 °C, 昼夜温差月均值(bio2) 10.1 ~ 13.0 °C, 昼夜温差与年温差比值(bio3) 24 ~ 30, 温度变化方差(bio4) 9 234 ~ 13 581, 最湿月份降水量(bio13) 115 ~ 226 mm, 最干月份降水量(bio14) 2 ~ 10 mm, 雨量变化方差(bio15) 77 ~ 115。欧李主要分布在秦岭以北年均降水量在 50 ~ 800 mm 之间地区。由于该地区身居内陆, 受海洋影响小, 且少水少植被覆盖, 多沙粒, 因此昼夜温差较大在 10 °C 左右。

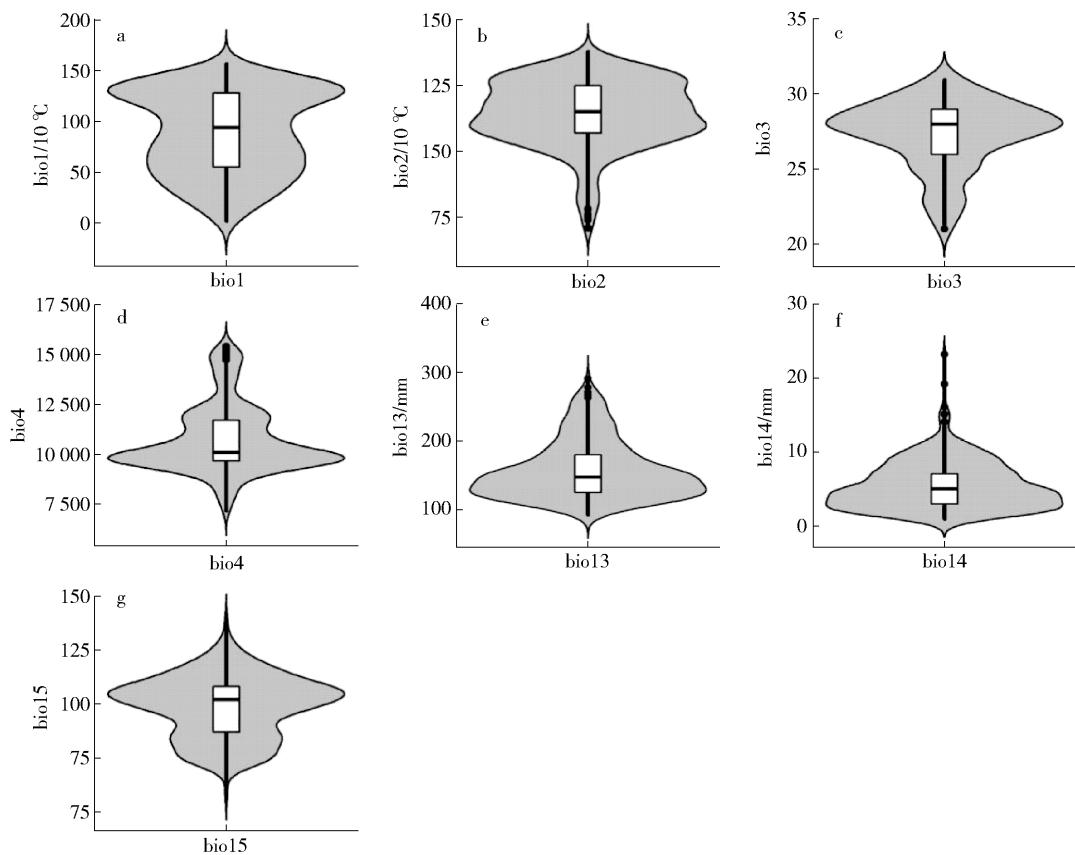
4 结论和讨论

4.1 结 论

本研究首次基于 4 个生态位模型预测欧李的全球潜在适生区, 并分析了欧李分布区的生态特征, 可为欧李的引种扩种以及全球荒漠化治理提供参考。欧李的全球潜在适生区主要分布在 30° ~ 52° N、102° ~ 137° E 范围内的亚洲地区, 包括中国、韩国、朝鲜和与中国东北接壤的俄罗斯远东地区, 阿富汗和塔吉克斯坦也有少量分布, 其中最适宜区主要分布在中国。欧李生态特征为: 年平均温度范围为 3.2 ~ 13.9 °C, 昼夜温差月均值范围为 10.1 ~ 13.0 °C, 昼夜温差与年温差比值范围为 24 ~ 30, 温度变化方差范围为 9 234 ~ 13 581, 最湿月份降水量范围为 115 ~ 226 mm, 最干月份降水量范围为 2 ~ 10 mm, 雨量变化方差范围为 77 ~ 115。模型评估表明, 4 个模型的 AUC 值均达到 0.85 以上, Kappa 值均达到 0.7 以上, 4 个模型预测精度良好, 一致性显著, 均可用来预测欧李潜在适生区。

4.2 讨 论

本文研究结果显示欧李的生态适宜区主要位于温带季风气候带的中国东北和华北地区, 与文献的实际分布区比较一致, 另外, 预测结果还显示在朝鲜, 韩国和俄罗斯远东地区有部分区域属于欧李的适生范围, 因此这些地区可考虑种植。欧李主要生态适宜区位于秦岭以北, 也是我国固定沙丘和半固定沙丘的主要分布区, 因此在该地区推广种植欧李, 不仅可充分发挥欧李树种的抗旱、抗寒、耐盐碱、耐瘠薄的生态价值, 有效遏制该地区土地荒漠化的严峻趋势, 而且该地区降水量少, 昼夜温差在 10 °C 左右且光照较强, 有利于植物生长和瓜果糖分的积累^[30], 从而提高欧李的经济价值。欧李生态位结果显示, 其生长区年平均温度范围为 3.2 ~ 13.9 °C, 最干月份降水量为 2 ~ 10 mm, 最湿月份降水量为 115 ~ 226 mm, 这与欧李的生长期对温度和降水的要求基本一致, 6 月上旬至 8 月初为欧李果实发育和成熟期, 欧李营养生长期降水量在 10 mm 左右,



bio1. 年平均温度; bio2. 昼夜温差月均值; bio3. 昼夜温差与年温差比值; bio4. 温度变化方差; bio13. 最湿月份降水量; bio14. 最干月份降水量; bio15. 雨量变化方差。bio1, mean annual temperature; bio2, monthly mean value of diurnal temperature difference; bio3, isothermality; bio4, SD of temperature seasonality; bio13, precipitation of the wettest month; bio14, precipitation of the driest month; bio15, variation of precipitation seasonality.

图4 7个主要因子生态特征

Fig. 4 Ecological characteristics of seven main factors

生殖生长期降水量在200 mm左右,表明欧李适宜于北方地区春旱秋雨的气候,该生态位特征可作为考察其他地区能否满足欧李分布的基本条件。

物种分布样本点数据通常比较有限,样本量的大小也是影响生态位模型预测精度的一个因素。Hernandez等^[31]用18个物种研究了不同样本量(5、10、25、50、75、100)分别对生态位模型预测准确性的影响,结果显示在一定限度内,随着样本量增加预测的准确性不断增加,当样本量超过一定值时,预测精度便趋于某一值不再增加;本文采用了379个欧李样本点,符合生态位模型预测的样本量要求。此外,样本分布年份为1956—2006年,而生态因子的年份范围为1970—2000年,二者在时间尺度上基本一致,且短期内欧李的生态位并无较大变化,因此该数据的预测结果可以反应欧李的潜在适生区。4个生态位模型预测结果虽然也存在一些差异,但是预测结果基本都能反映出欧李在全球的适生区分布情况。结合欧李的生长特性,预测结果显示的最适宜区最接近欧李真实生态位的地区,可作为欧李的重

点发展地区,随着适宜程度降低,可考虑进行小规模引种试种。

每种模型因原理不同各有优缺点,遗传算法原理导致GARP模型每次结果都需根据预设规则得到最优集合,根据最优集合的结果得到物种潜在分布区,所以其预测结果会比较大。但同时,GARP的迭代运算使得运算量呈级数增长,加重了模型的运算负担,增加了模型的运算时间。MAXENT模型主要是对分布概率进行预测,遵循给定的环境约束条件,选择信息熵最大的概率分布作为最优分布,因此其预测结果比较保守。BIOCLIM模型是根据环境包络原理,其对研究区域的环境条件要求比较苛刻,完全位于包络内的点较少,因此该模型预测的最适宜区面积最小。DOMAIN模型利用点-点的相似矩阵计算目标点与离它最近的分布样本点之间的相似程度,在环境变量空间中确定的环境超矩形并不一定是连续的,因此其预测区域会出现断断续续且适宜区分布以分布点为中心,同时在样本较少的情况下,DOMAIN模型会存在生态位空间缩小的现象。采用

不同的评价方法评价模型的预测精度,也会得出不同的结果,此外模型预测结果还与物种的实际分布有关,如果物种本身分布范围较小,用生态位模型对其潜在适生区进行空间分布模拟时,模型之间的差异较大,如果所研究物种的本身分布比较广泛,则用不同指标对模型性能进行评价时可表现出较高的一致性^[32-33]。

参 考 文 献

- [1] 郭瑞霞,管晓丹,张艳婷. 我国荒漠化主要研究进展[J]. 干旱气象,2015,33(3):505-514.
Guo R X, Guan X D, Zhang Y T. Main advances in desertification research in China[J]. Arid Meteorology, 2015, 33 (3):505-514.
- [2] 田卫堂,胡维银,李军,等. 我国水土流失现状和防治对策分析[J]. 水土保持研究,2008,15(4):204-209.
Tian W T, Hu W Y, Li J, et al. The status of soil and water loss and analysis of countermeasures in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 204-209.
- [3] 薛晓芳,杜俊杰. 浅谈欧李的开发利用价值[J]. 落叶果树,2012,44(3):23-26.
Xue X F, Du J J. Introduction to the development and utilization value of the *Cerasus humilis*[J]. Deciduous Fruits, 2012,44(3): 23-26.
- [4] Li W D, Li O, Zhang A R, et al. Genotypic diversity of phenolic compounds and antioxidant capacity of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*) in China [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 175 (1):208-213.
- [5] 王有信,何卫军,李学凤. 欧李区域分布、种群演变与潜在价值研究[J]. 山西果树,2015(4):12-14.
Wang Y X, He W J, Li X F. Study on regional distribution, evolution of population and potential value of *Cerasus humilis*[J]. Shanxi Fruits, 2015(4):12-14.
- [6] 谢彩香,宋经元,韩建萍,等. 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 C X, Song J Y, Han J P, et al. 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.
- [7] 李雪梅,程小琴. 生态位理论的发展及其在生态学各领域中的应用[J]. 北京林业大学报,2007, 29(增刊2): 294-298.
Li X M, Cheng X Q. Development of niche theory and its application in each fields of ecology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Suppl.2): 294-298.
- [8] 李翠,朱金兆,朱清科. 生态位理论及其测度研究进展[J]. 北京林业大学报,2003, 25(1): 100-107.
Li J, Zhu J Z, Zhu Q K. A review on niche theory and niche metrics[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(1): 100-107.
- [9] 张琴,曾凡琳,张东方,等. 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 F L, Zhang D F, et al. 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.
- [10] 张东方,张琴,郭杰,等. 基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究[J]. 生态学报,2017, 37 (15):5111-5120.
Zhang D F, Zhang Q, Guo J, et al. Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15):5111-5120.
- [11] Kulhanek S A, Leung B, Ricciardi A. Using ecological niche models to predict the abundance and impact of invasive species: application to the common carp [J]. Ecological Applications, 2011, 21(1): 203-213.
- [12] Busby J R. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system [J]. Plant Protection Quarterly, 1991, 6(1): 8-9.
- [13] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals[J]. Biodiversity & Conservation, 1993, 2(6): 667-680.
- [14] Stockwell D, Peters D. The GARP modeling system:problems and solutions to automated spatial prediction[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143-158.
- [15] 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.
- [16] 王鹏飞,李立锋,杜俊杰,等. 不同地域野生欧李及其近缘植物亲缘关系的 RAPD 分析[J]. 植物遗传资源学报,2015, 16 (1):119-126.
Wang P F, Li L F, Du J J, et al. Genetic diversity among wild Chinese dwarf cherry from different regions and its closely related plant species based on RAPD analysis [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(1):119-126.
- [17] Mu X P, Liu M, Wang P F, et al. Agrobacterium-mediated transformation and plant regeneration in Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2016, 91 (1):71-78.
- [18] 王鹏飞,薛晓芳,穆晓鹏,等. 不同酸度欧李果实有机酸积累特性与相关代谢酶活性分析[J]. 中国农业科学,2013, 46(19): 4101-4109.
Wang P F, Xue X F, Mu X P, et al. Analysis of organic acid accumulation characteristics and organic acid-metabolizing enzyme activities of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*) fruit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(19):4101-4109.
- [19] Yin Z P, Ren J, Zhou L J, et al. Water deficit mechanisms in perennial shrubs *Cerasus humilis* leaves revealed by physiological and proteomic analyses[J]. Proteome Science, 2016 , 15:9.
- [20] 尹麟鹏,刘雪梅,商志伟,等. 不同干旱胁迫下欧李光合及叶绿素荧光参数的响应[J]. 植物生理学报,2011, 47 (5):452-458.
Yin Z P, Liu X M, Shang Z W, et al. Response of photosynthesis and chlorophyll II fluorescence parameters to different drought stress in *Cerasus humilis*[J]. Plant Physiology Communications, 2011, 47(5):452-458.
- [21] Wang P F, Mu X P, Du J J, et al. Flavonoid content and radical

- scavenging activity in fruits of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*) genotypes[J]. Journal of Forestry Research, 2017(25): 1–9.
- [22] 文浩,任广喜,高雅,等. 欧李种子质量检验规程及分级标准研究[J]. 中国中药杂志,2014, 39(21):4191–4196.
Wen H, Ren G X, Gao Y, et al. Procedure of seed quality testing and seed grading standard of *Prunus humilis*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(21):4191–4196.
- [23] 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.
- [24] Hortal J, Roura N, Sanders N J, et al. Understanding (insect) species distributions across spatial scales[J]. Ecography, 2010, 33(1): 51–53.
- [25] Graham M H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression[J]. Ecology, 2003, 84(11): 2809–2815.
- [26] Zhang M G, Ferry Slik J W, Ma K P. Using species distribution modeling to delineate the botanical richness patterns and phytogeographical regions of China[J]. Scientific Reports, 2016, 3: 1–9.
- [27] Vanagas G. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems [J]. Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery, 2004, 3 (2): 319–322.
- [28] Manel S, Williams H C, Ormerod S J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence [J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 38(5): 921–931.
- [29] 文检,宋经元,谢彩香,等. 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 J Y, Xie C X, et al. 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.
- [30] 杨建莹,梅旭荣,严昌荣,等. 华北地区气候资源的空间分布特征[J]. 中国农业气象,2013,31(增刊1):1–5.
Yang J Y, Mei X R, Yan C R, et al. Study on spatial pattern of climatic resources in North China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 31(Suppl. 1): 1–5.
- [31] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods[J]. Ecography, 2006, 29 (5): 773–785.
- [32] Anderson R P, Lew D, Peterson A T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models[J]. Ecological Modelling, 2003, 162: 211–232.
- [33] Aguirre-Gutiérrez J, Carvalheiro L G, Polce C, et al. Fit-for-purpose: species distribution model performance depends on evaluation criteria - Dutch hoverflies as a case study[J/OL]. PLoS One, 2013, 8 (5): e63708 [2017-05-03]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3653807/>.

(责任编辑 范娟
责任编委 杨晓晖)