

DOI: 10. 11913/PSJ. 2095-0837. 2019. 60731

陈陆丹, 胡菀, 李单琦, 程冬梅, 钟爱文. 珍稀濒危植物野生莲的适生分布区预测[J]. 植物科学学报, 2019, 37(6): 731-740

Chen LD, Hu W, Li DQ, Cheng DM, Zhong AW. Prediction of suitable distribution areas of the endangered plant wild *Nelumbo nucifera* Gaertn. in China[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(6): 731-740

珍稀濒危植物野生莲的适生分布区预测

陈陆丹, 胡菀, 李单琦, 程冬梅, 钟爱文*

(中国科学院庐山植物园, 江西省植物迁地保护与利用重点实验室, 江西九江 332900)

摘要: 基于野生莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.) 136个分布点的数据和14个环境因子参数, 运用规则集遗传算法(GARP)和最大熵(MaxEnt)两个生态位模型对他们在我国的适生分布区进行预测。结果显示: 根据GARP和MaxEnt模型计算得到的ROC曲线下面积的AUC均值分别为0.861和0.964, 其中MaxEnt模型的AUC值更大, 预测结果更精准。MaxEnt模型预测结果表明, 莲的最适分布区主要集中在四川、湖北、湖南等地的大部分地区, 江西北部, 以及黑龙江、辽宁、浙江、广东等地的小部分地区。刀切法(Jackknife)检测结果表明, 影响莲适生分布区的主要环境因子包括: 水汽压、海拔、年平均气温、多年平均降水量、最热季节平均温度、最冷季节平均温度、最干月降水量、最冷月最低温和最热月最高温等。适生区环境因子的统计分析结果显示, 野生莲最适宜生长在海拔1~2216 m、年降水量丰富(1202.50 mm)、年均温约为16.19°C、最热月温度范围在24.60°C~35.10°C、最冷月均温不低于-0.53°C的地区。研究结果可为有效保护中国野生莲资源提供有利依据。

关键词: 莲; 潜在适生区; GARP模型; MaxEnt模型; 资源保护

中图分类号: Q948; Q949.746.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)06-0731-10

Prediction of suitable distribution areas of the endangered plant wild *Nelumbo nucifera* Gaertn. in China

Chen Lu-Dan, Hu Wan, Li Dan-Qi, Cheng Dong-Mei, Zhong Ai-Wen*

(Key Laboratory of Plant Ex-situ Conservation and Utilization, Jiangxi Province, Lushan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang, Jiangxi 332900, China)

Abstract: Based on data of 136 distribution points and 14 environmental factor parameters, we applied both the GARP and MaxEnt niche models to predict the suitable distribution areas of wild *Nelumbo nucifera* Gaertn. in China. The average AUC values under the ROC curves from the GARP and MaxEnt models were 0.861 and 0.964, respectively, indicating that the MaxEnt model had more accurate prediction results. Furthermore, the MaxEnt model results showed that the optimal distribution areas of *N. nucifera* were mainly located in Sichuan, Hubei, and Hunan provinces, northern Jiangxi province, and a small part of Heilongjiang, Liaoning, Zhejiang, and Guangdong provinces. The Jackknife test indicated that the main environmental factors determining the potential distribution areas of *N. nucifera* were vapor pressure, elevation, mean annual temperature, annual average precipitation, average temperature in the hottest season, average temperature in the coldest season, the driest monthly precipitation, the lowest temperature in the coldest month, and the highest temperature in the hottest month.

收稿日期: 2019-04-26, 退修日期: 2019-06-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560149)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (31560149).

作者简介: 陈陆丹(1991-), 女, 研究实习员, 研究方向为水生植物生理生态(E-mail: 240573104cld@sina.com)

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: 240573104cld@sina.com; 16887634@qq.com)。

Statistical analysis of the environmental factors related to the potential distribution demonstrated that the most appropriate habitat conditions for *N. nucifera* were an elevation of 1 – 2216 m, high annual average precipitation (1202.50 mm), mean annual temperature of 16.19°C, average temperature in the hottest month from 24.60°C to 35.10°C, and mean tolerated temperature in the coldest month of -0.53°C. These results will provide a favorable basis for the effective conservation of wild resources of *N. nucifera* in China.

Key words: *Nelumbo nucifera*; Potential distribution; GARP model; MaxEnt model; Resource protection

水生植物是水生生态系统中重要的初级生产者,在物质循环和能量流动中起重要的调控作用^[1]。全球气候变化、水体富营养化和人类活动(如土地开垦、水产养殖等)引起水生植被的丧失已是一种全球性现象^[2-5]。然而水生植被的丧失必将导致水生植物分布区域的改变,物种丰富度和湖泊生物多样性的减少,甚至威胁到濒危水生物种的未来^[6,7]。目前,对于湖泊水体富营养化和人类活动引起的水生植被减少的研究较多,但水温升高、强降水引起的长期洪涝灾害等气候因子的变化对水生植被的影响同样不容忽视^[8,9]。在宏观生态尺度上,气候变量往往是大区域内唯一可用的预测因子,并且在很大程度上决定着物种的分布^[10,11]。因此,在全球气候变化的背景下,研究环境因子对水生植物分布的影响,预测水生植物潜在的适生区对于湖泊生态系统稳定性的维持及生物多样性保护具有重要意义,并可为生态修复及入侵物种的防治提供理论依据。

莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)是被子植物中起源最早的物种之一,早在第三纪已有莲分布的记录,也是第四纪冰期吞噬而幸存的子遗植物之一^[12],属国家Ⅱ级珍稀濒危水生植物。野生莲适宜生长在自然环境良好的河流湖泊中,蕴含着宝贵的遗传资源,是培育优良莲品种的天然基因库^[13]。然而,我国野生莲生存的生态环境面临着严峻的挑战。目前,对莲的研究主要集中在遗传多样性^[14,15]、遗传育种^[16,17]及形态学^[18]等方面。在全球性或区域性环境气候压力下,目前对野生莲生存的区域面积、种群数量和生存环境条件等问题关注极少,同时也缺乏相关的基础研究资料。此外,我国的野生莲种群绝大多数还处于自然生长状态,对其采取的保护措施较少,并且人们对野生莲的保

护意识也相当匮乏。因此,了解我国野生莲种群的分布范围和适宜生境,可以为莲野生种质资源的保护和利用提供有利保障。

物种分布区预测在保护生物学、生物地理学、生态学、进化生物学和外来物种入侵管理等方面的应用较为广泛^[19-21]。生态位模型(ecological niche modelling, ENM)普遍运用于植物潜在适生区的预测中^[22]。生态位模型通过物种已知的分布数据和相关环境变量,依据相应算法判断该物种的生态需求,通过构建模型并将模拟结果投射到所研究的区域,来预测物种的分布情况^[23]。近年来,已开发了 20 多种生态位模型^[24],如 MaxEnt、GARP、CLIMEX、BIOCLIM、DOMAIN、BIOMAPPER 等。其中,最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)可通过物种已知的分布数据和环境因子找出物种分布概率的最大熵,进而对物种的分布进行评估和预测^[25]。规则集遗传算法(genetic algorithm for ruleset production, GARP)模型是依据遗传算法原理,利用物种的已知分布点数据和环境数据运行产生不同规则的集合,将最优集合的结果作为物种潜在分布的一种预测方法^[26,27]。研究表明,MaxEnt 和 GARP 模型具有较好的预测能力,且在只有较少分布数据时依然能获得较好的预测结果^[28,29]。目前,利用生态位模型预测物种分布区,在陆生动植物中应用较为广泛^[30-32],对水生植物分布区预测的研究较少^[33],且主要集中在水生入侵物种的扩散迁移规律和生物入侵防治等方面^[34-36],少有从保护生物学的角度对濒危水生植物进行研究。本文以野生莲在中国的分布数据为依据,采用 MaxEnt 和 GARP 模型预测野生莲的潜在适生区,对其适生等级进行评价,并对影响分布的关键环境因子进行综合分析,旨在为野生莲种质

资源的保护、利用和推广提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 野生莲分布点数据

野生莲在我国的物种分布数据主要来源于中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn>, 包括 13 所标本馆)、国家自然资源平台教学标本资源共享平台 (<http://mnh.scu.edu.cn>) 的 34 所标本馆、中国物种信息系统 (<http://www.chinabiodiversity.com/>)、教学标本标准化整理整合与资源共享平台 (<http://mnh.scu.edu.cn/>) 及国内公开发表的论文^[37, 38]等。确定标本地理坐标后, 以“县”作为野生莲在我国的发生分布单位, 记录其发生分布信息, 然后通过检索地名数据库查找到相应县级的经纬度信息。其中仅对明确标明为野生的分布点进行统计, 对重复、模糊不清和人工引种栽培的分布点不作记录。为降低采样偏差引起的模型过度拟合, 在每个 $2.5' \times 2.5'$ 网格中只取唯一分布点, 最终共获得野生莲在我国的有效分布记录 136 条。

1.2 环境数据

选择的环境因子包括: 气温、海拔、降水量等 14 个环境因子(表 1)。其中温度、降水、海拔数据从世界气候数据库 World Clim(<http://worldclim>。

表 1 影响莲分布区预测的生态位模型参数
Table 1 Environmental parameters influencing prediction of distribution of *Nelumbo nucifera*

环境因子 Environment parameter	遗漏误差 Omission	影响 Effect	状态 Contain
最干月降水量 Bio14	3.2904	显著	+
坡向 Aspect	3.2728	显著	+
坡度 Slope	3.1800	显著	+
多年平均降水量 Bio12	2.7160	显著	+
水汽压 Vapr-ann	2.5472	显著	+
太阳辐射 Strad-ann	2.4672	显著	+
最热月份最高温度 Bio5	2.3168	显著	+
最冷月份最低温度 Bio6	2.3168	显著	+
汇流累积量 Flowacc	2.1040	一般	+
水流方向 Flowdir	1.8912	一般	+
最热季节平均气温 Bio10	1.8536	一般	+
最冷季节平均气温 Bio11	1.8440	一般	+
年平均气温 Bio1	1.2648	误差	-
海拔 Elevation	1.0656	误差	-

注: “+”和“-”分别表示该环境因子包含或不包含在最终的分析中。

Note: “+” and “-” indicate environmental parameters included or excluded, respectively, in final analysis.

[org/version2](http://www.cvh.org.cn/version2)) 下载获得, 数据年份为 1970–2000 年, 精度为 $30''$ 。表示年度趋势的气候数据如年均温、年均降水量等以 Bioclim 的形式存在, 且由月均数据衍生而来。其它环境数据如坡度、坡向、汇流累积量等由 ArcGIS 软件运算生成。温度、降水量、海拔等气候数据以经纬度为单位计算, 分辨率为 0.1° ; 汇流累积量和水流方向等流域指标以地理栅格为单位计算。中国行政区划图 (1:4 000 000) 从国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 下载获得。

1.3 GARP 模型预测分析

先将物种分布点数据保存为 Excel 格式文件, 再将 .asc 格式的环境数据转换为 .raw 格式文件环境数据。使用 Desktopgarp 1.1.6 软件进行参数设置, 随机选取 80% 的数据作为训练集, 剩余 20% 作为检验集, 设置最大迭代次数 1000 次, 收敛极限为 0.01。将 14 个环境因子进行 100 次模型运算(或者按照结果收敛的情况终止), 计算所得遗漏误差(omission error)的算术平均值作为基础遗漏误差值。然后使用刀切法(Jackknife)依次省略每一个环境因子, 创建 14 组不同的环境因子组。如果一个环境因子的缺失导致遗漏误差显著低于基础遗漏误差(低于 95% 的基础遗漏误差), 则该环境因子将在最终的分析中去除; 反之, 则认为这一因子对预测结果影响显著^[39]。在最终的分析中, 重复创建 500 次模型, 最大迭代次数 1000 次, 收敛极限为 0.01, 输出结果为 ARC/INFO Grids 格式图层文件。按以下原则: (1) 选取 omission 值中间的 300 个; (2) 选取 omission (int) 为零的; (3) 选取训练精度和验证精度均大于 0.65, 筛选出 100 个图层作为最优模型。运用空间分析模块(spatial analysis tools)将预测结果与中国行政区划进行图层叠加, 得到野生莲在我国的潜在分布区。

1.4 MaxEnt 模型预测分析

先将物种分布数据转化为 .csv 格式文件, 再通过 ArcGIS 软件将环境数据转换成 MaxEnt 软件可识别的 .asc 格式文件, 使用 MaxEnt 3.3.3k 软件进行参数设置, 随机选取 80% 的数据作为训练集, 剩余 20% 为检验集, 设置最大迭代次数 1000 次, 收敛极限为 0.01。将 14 个环境因子进行 100 次模

型运算,同时选取刀切法选项,获得 cumulative 类型和 .asc 格式的结果输出文件。通过 ArcGIS 软件将输出文件转成 .grids 格式,最后经 Arcmap 软件处理,得到野生莲在我国的潜在分布区^[25]。

1.5 模型精度检验

受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 是一种非阈值依赖性评价指标,为目前认可度较高的模型评价指标^[40]。利用 ROC 曲线下面积 (area under the receiver operating characteristic curve, AUC) 的值可以衡量预测模型的精度。AUC 值的取值范围在 0~1 之间,且 AUC 值越接近 1 表示模型判断力越强^[41]。一般认为 AUC 值在 0.5~0.7 时模型准确性较低,不予采用;AUC 值在 0.7~0.9 时模型准确性较好,可以采用;AUC 值在 0.9 以上时,模型准确性较高,模型预测效果较好^[42]。利用 GARP 模型通过 SPSS19.0 软件绘制得到 ROC 曲线和 AUC 值,而 MaxEnt 软件运行过程中可自行生成 ROC 曲线。通过比较两个模型的 AUC 值以评价不同模型的预测效果。

2 结果与分析

2.1 ROC 精度检验

本研究基于 14 个环境变量建模,采用部分面积 ROC 法计算得到 GARP 和 MaxEnt 模型的 ROC 曲线(图 1),通过计算得到两个模型的 AUC 值分别为 0.861 和 0.979。

2.2 环境因子对模型预测的影响

2.2.1 环境因子对 GARP 模型预测的影响

研究发现,14 个环境因子共同进行模型运算

所获得的基础遗漏误差为 1.5168。其中,最干月降水、坡度、坡向、年均降水量、水汽压、太阳辐射、最热月最高温和最冷月最低温这 8 个环境因子的遗漏误差值对分布预测的影响最为显著;汇流累积量、水流方向、最热季节均温和最冷季节均温的遗漏误差值对分布预测的影响一般;而海拔和年均温会使遗漏误差值增大,进而降低模型预测的准确性(表 1)。因此,这两个环境因子在最终的分析中被去除。选用最优的 12 个环境因子创建 500 次模型,最终获得的遗漏误差值为 1.0858,远小于基础遗漏误差。

2.2.2 环境因子对 MaxEnt 模型预测的影响

MaxEnt 模型中刀切法的预测结果显示(图 2):水汽压、海拔与年平均气温对模型的贡献最大;多年平均降水量、最热季节平均温度、最冷季节平均温度、最干月降水量、最冷月最低温度和最热月最高温度对模型的贡献次之;太阳辐射、坡度、汇流累积量、坡向和水流方向对模型的贡献最小。筛选贡献值大于 0.5 的 9 个环境因子(水汽压、海拔、年均温、年均降水量、最热季节平均温度、最冷季节平均温度、最干月降水量、最冷月最低温度和最热月最高温度),重点分析环境变量对野生莲适宜分布区的影响。

2.3 适生区预测分析

2.3.1 GARP 模型下的莲适生区的预测

按最优模型原则筛选到的 100 个图层,运用空间分析模块将预测结果进行图层叠加,叠加后获得的数值即为重叠值(overlay value, OV)。根据 OV 值大小将莲的预测图划分为 4 个等级(图 3),即:非适生区($0 \leq OV < 50\%$)、低适生区

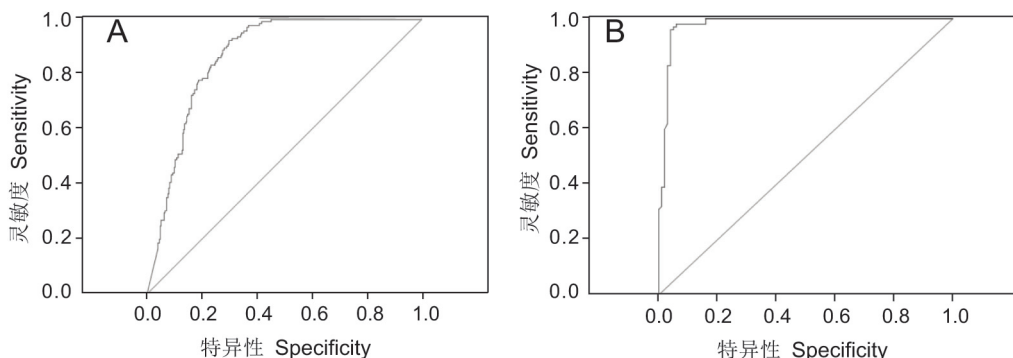
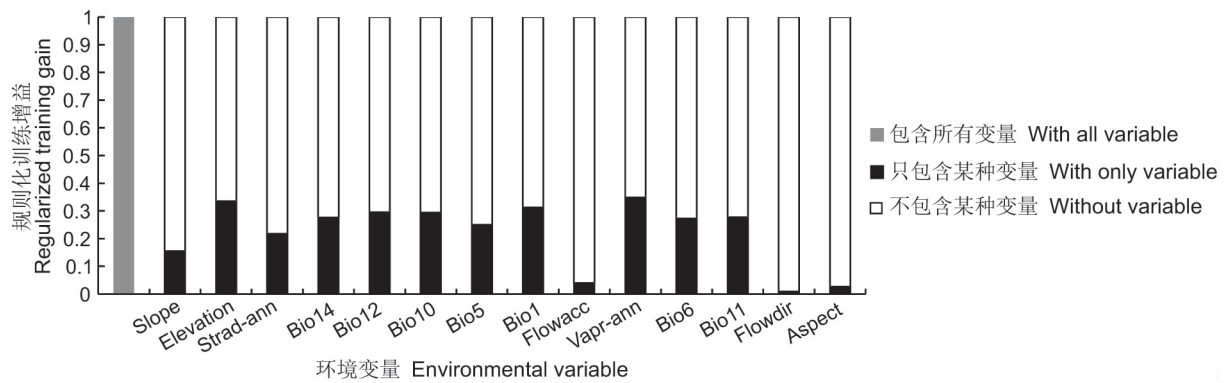


图 1 GARP 模型(A)和 MaxEnt 模型(B)的 ROC 曲线
Fig. 1 ROC curves of GARP model(A) and MaxEnt model(B)



环境因子变量参见表 1。
See Table 1 for environmental factor variables.

图 2 MaxEnt 模型预测各环境因子的贡献比例

Fig. 2 MaxEnt model predictions of contribution ratios of each environmental factor

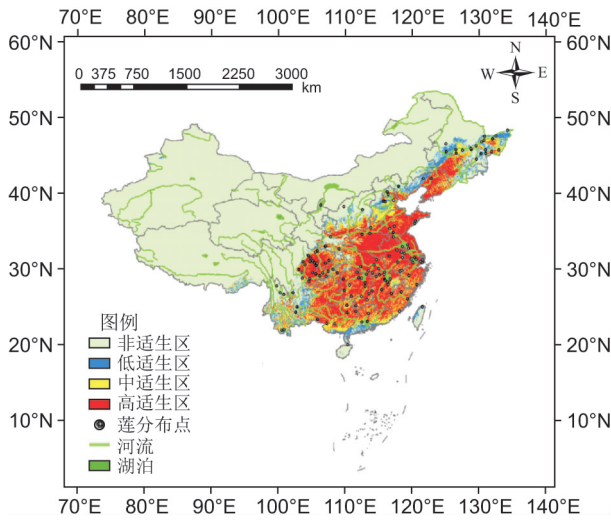


图 3 GARP 模型下莲的适生区预测

Fig. 3 Prediction of suitable areas for *Nelumbo nucifera* under GARP model

($50\% \leq OV < 70\%$)、中适生区($70\% \leq OV < 90\%$)和高适生区($OV \geq 90\%$)。其中，非适生区面积为 $6\,574\,794\text{ km}^2$ ；低适生区为 $477\,917\text{ km}^2$ ；中适生区为 $827\,118\text{ km}^2$ ；高适生区为 $1\,736\,578\text{ km}^2$ (表 2)。在 GARP 模型中，莲最适宜分布的区域主要集中在山东、河南、安徽、江苏、湖北、江西、湖南、四川、贵州、广西等省的大部分地区，以及吉林、辽宁省东部，陕西省中部，山西省南部，广东、福建省的部分地区，另外，云南、黑龙江、天津、河北等地也有小部分地区也适宜莲的生长。

2.3.2 MaxEnt 模型下的莲适生区预测

在 MaxEnt 模型下，将模型输出的 ASC II 文件导入 ArcGIS 中，并按照专家经验法将莲的适生区

表 2 GARP 模型和 MaxEnt 模型预测的莲在我国适生区等级划分面积

Table 2 GARP and MaxEnt model predictions of suitable areas for *Nelumbo nucifera* in China

区域 Area	GARP (km^2)	MaxEnt (km^2)
不适生区 Not suitable	6 574 794	6 536 721
低适生区 Low suitable	477 917	1 945 497
中适生区 Medium suitable	827 118	736 378
高适生区 Highly suitable	1 736 578	393 236

划分为 4 个等级(图 4)：非适生区(0.00~0.05)、低适生区(0.05~0.25)、中适生区(0.25~0.45)和高适生区(0.45~1)。其中，非适生区面积为 $6\,536\,721\text{ km}^2$ ；低适生区为 $1\,945\,497\text{ km}^2$ ；中适生区为 $736\,378\text{ km}^2$ ；高适生区为 $393\,236\text{ km}^2$

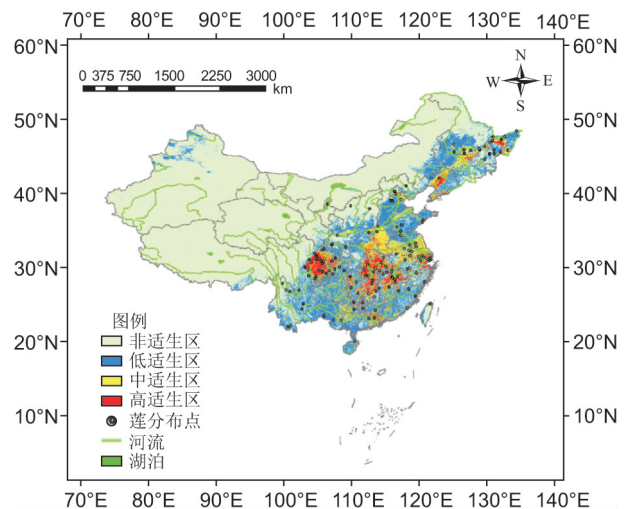


图 4 MaxEnt 模型下莲的适生区预测

Fig. 4 Prediction of suitable areas for *Nelumbo nucifera* under MaxEnt model

(表 2)。从莲的等级划分区域图可以看出, 莲最适宜分布的区域主要集中在四川、湖北、湖南等省的大部分地区, 江西省北部, 黑龙江、辽宁、浙江、广东等省的小部分地区。

2.4 影响莲地理分布的因素

以 MaxEnt 模型运行获得的正则化训练增益值(regularized training gain)为依据, 从 ArcGIS 模块的 Spatial Analyst Tools 中提取各等级生态位参数, 对 MaxEnt 模型各等级适生区的 9 个主要

环境参数进行统计分析。结果显示(表 3), 随着莲适生等级的提高, 水汽压、海拔、年均温、年均降水量等 9 个环境因子的变化范围和标准差逐渐缩小, 表明莲随着适生等级的提高, 对生境中环境参数的要求也越来越苛刻。莲适宜分布在海拔 1~2216 m、年均降水量 454~3471 mm、年均温约 16.19°C、最热月温度范围为 24.60°C~35.10°C、冬季最冷月温度范围为 -27.3°C~16.70°C 的地区。

表 3 莲不同适生区 9 个主要环境变量统计分析

Table 3 Statistical analysis of nine environmental variables in different suitable areas for *Nelumbo nucifera*

气候变量 Climate variables	不适生 Not suitable			低度适生 Low suitable		
	范围 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation	范围 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation
Bio5	-15.50~40.30	23.09	7.80	0~40.20	29.53	2.71
Bio6	-45.10~18.30	-19.52	7.78	-38.70~21.16	-5.24	11.43
Bio14	0~190	3.50	6.66	0~206	16.21	14.20
Bio11	-41.85~21.12	-11.19	7.38	-27.8~23.75	1.20	9.92
Bio10	-18.53~31.82	15.23	7.86	0~31.77	23.74	2.90
Bio12	9~4870	358.44	356.46	13~4597	1004.12	475.99
Bio1	-31.64~25.24	2.56	6.96	-5.05~26.90	13.13	5.70
Elevation	-153~8563	2429.79	1714.67	-144~5217	582.32	596.79
Vapr-ann	0.03~2.61	0.51	0.29	0.40~2.87	1.28	0.45

气候变量 Climate variables	中度适生 Medium suitable			高度适生 Highly suitable		
	范围 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation	范围 Range	平均值 Average	标准差 Standard deviation
Bio5	17.10~35.40	31.25	2.12	24.6~35.10	31.88	1.93
Bio6	-32.6~18.20	-4.43	9.99	-27.3~16.70	-0.53	7.43
Bio14	0~190	3.50	6.66	0~206	16.21	14.20
Bio11	-41.85~21.12	-11.19	7.38	-27.8~23.75	1.20	9.92
Bio10	11.02~29.35	25.39	2.35	18.68~29.35	26.53	1.90
Bio12	146~3477	1019.79	392.03	454~3471	1202.50	327.46
Bio1	-31.64~25.24	2.56	6.96	-5.05~26.90	13.13	5.70
Elevation	-153~8563	2429.79	1714.67	-144~5217	582.32	596.79
Vapr-ann	0.03~2.61	0.51	0.29	0.40~2.87	1.28	0.45

注: 环境因子变量参见表 1。

Note: See Table 1 for environmental factor variables.

3 讨论

3.1 模型的选择

3.1.1 ROC 精度检验

近年来, 运用物种分布模型来预测物种潜在分布区的研究逐年增多^[43], 物种分布模型已然成为生物地理研究和物种保护的有效工具^[44], 而 MaxEnt 和 GARP 模型是应用较为广泛的两个模型^[45]。本研究中, GARP 和 MaxEnt 模型的 ROC 值均在

0.8 以上, 表明两个模型的预测结果均能较好地反映野生莲的分布。但 MaxEnt 模型获得的 AUC 值远大于 GARP 模型, 能更精准地预测莲的适生区分布。郑卉和何兴金^[46]通过对苋属(*Amaranthus*) 4 种入侵杂草适生区预测的研究也发现, 相比 GARP 模型, MaxEnt 模型能更好地进行适生区预测。

3.1.2 野生莲在中国潜在分布区的预测

本研究从 GARP 和 MaxEnt 模型预测的莲的适

生区可以发现,两种模型对莲适生区的划分存在差异。GARP模型预测的结果中,野生莲高适生区域面积较大,主要集中在吉林、辽宁、山东、河南、江苏、安徽、湖北、浙江、重庆、湖南、江西、贵州、广西等地区,面积约占总面积的18.06%;而MaxEnt模型预测结果中,野生莲高适生区域面积相对较小,主要集中在黑龙江、辽宁、湖北、江西、湖南、重庆等地区,其面积仅占总面积的4.09%。由于不同模型的运算原理各不相同,因而造成模型的预测结果存在差异。一般而言,GARP模型的预测会导致适生区范围扩大,原因是由于GARP模型在预测过程中会将更多的验证点预测为存在,而MaxEnt模型是直接输出发生概率,预测结果较为细腻,其预测的适生区范围较为保守。朱耿平等^[23]对日本双棘长蠹(*Sinoxylon japonicum*)在中国的潜在地理分布分析中也发现,两种模型的预测存在差异,MaxEnt模型预测适生区范围较GARP模型小,本研究结果与之一致。因此,GARP模型预测较适用于入侵物种的预测,而MaxEnt模型适用于濒危保护植物的预测。

本研究依据MaxEnt模型预测发现,野生莲最适分布区主要集中在四川、湖北、湖南等省的大部分地区,江西省北部,黑龙江、辽宁、浙江、广东等省的小部分地区。综合ROC精度检验结果和分布图的预测结果,本研究主要参考MaxEnt软件模型预测的适生分布区进行分析。

3.2 环境因子与莲分布的关系

由MaxEnt模型预测的正则化训练增益值可知,水汽压、海拔、年平均气温、多年平均降水量、最热季节平均温度、最冷季节平均温度、最干月降水量、最冷月最低温度和最热月最高温度与莲分布区相关性较大。其中,年均温、最热月最高温度、最冷月最低温度、最热季节平均温度、最冷季节平均温度是与温度相关的环境因子。温度对水生植物的影响最为明显^[47],也是植物生长发育必不可少的环境条件。野生莲生长期约为5个月(6~10月),其中,花期为7月初至8月中下旬,果熟期为8月下旬至9月中下旬,且年积温必须满足 $2200^{\circ}\text{C} \sim 2600^{\circ}\text{C}$ ^[37]。夏季花期对温度的要求较为苛刻,会直接影响野生莲的开花、结果。冬季新生的莲藕在冬季水温不低于 4°C 时,才能顺利度过

冬季休眠期^[48]。野生莲适宜生长在最热月份温度为 $24.60^{\circ}\text{C} \sim 35.10^{\circ}\text{C}$ 的地区,我们推测夏季温度过高不利于野生莲开花、结果。在全球气候变化下,升温引起的水温变化还会导致水生植被生物量的减少,生物分布格局的改变,甚至生态系统的组成和多样性发生变化^[49],使野生莲面临更加严苛的环境挑战。上述分析结果表明,与温度相关的因子是决定野生莲地理空间分布的重要环境因素。莲作为多年生的挺水植物,其生长离不开水体。降水量和蒸发量能决定河流流量大小和湖泊水平面的高低,此外,全球气候变化还会导致干旱或洪涝频率和强度的增加,因而水生植物还需经常应对这些极端气候事件(干旱期、飓风、强降雨引起的深洪泛滥)的发生,这些都会增加水生植被的死亡率和生境的丧失^[50]。因此,降水量对野生莲适生区的分布同样起重要作用。陈璐等^[35]运用GARP模型对大藻(*Pistia stratiotes* L.)的潜在适生区分布的研究发现,年均温和年降水量对其适生分布区的影响显著。陈立立等^[36]和李宏群等^[51]分别利用GARP和MaxEnt模型对喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)的适生分布区进行了预测,同样发现温度对其地理空间分布影响较大。本研究也发现,降水量和温度等环境因子是制约野生莲分布的主要环境因素。此外,野生莲能生长于高寒气候条件的地区,并能分布于海拔2780 m的地区^[49, 52],说明野生莲对海拔的适应性较广。

3.3 珍稀濒危植物莲的保护措施

野生莲最喜生长于自然环境良好且不为人干扰的湖泊、湿地和河道中。薛建华等^[48]在黑龙江流域调查时发现,该地区已有5个野生莲种群消失,野生莲种群存在较严重的生境退化现象。这主要归因于我国对野生莲的保护意识还不强,造成野生莲种质资源的极度衰退。因此,加强对野生莲的保护迫在眉睫。依据研究结果,我们认为对野生莲种群的保护可从以下几个方面进行:首先,在黑龙江、辽宁、湖北、江西、湖南、重庆等高适生区域,根据野生莲种群的大小,分级别建立自然保护区,进行原位保护;其次,人工移栽野生莲到适宜生境已有成功的案例^[23],因此,对于中适生区和低适生区内的省份,在人口密集、人类活动频繁或水质污染较重,对野生莲种群及种质资源已经造成

严重危害的区域, 可依据野生莲适宜生存的海拔、年降水量、年均温、最热月温度和最冷月耐受温度等环境条件, 就近移栽到适宜其生存且未被人类干扰的水库、农场和公园, 达到野生莲遗传资源迁地保护的目; 最后, 应呼吁有关部门加大宣传力度、普及野生莲的遗传种质资源价值, 以提高大众对野生莲的保护意识。

参考文献:

- [1] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management[M]//Harper DAT, Brierley B, Ferguson AJD, Phillips G, eds. *The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management*. Dordrecht: Springer, 1999.
- [2] Sand JK, Riis T, Vestergaard O, Larsen SE. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years[J]. *J Ecol*, 2000, 88(6): 1030-1040.
- [3] Körner S. Loss of submerged macrophytes in shallow lakes in North-Eastern Germany[J]. *Int Rev Hydrobiol*, 2002, 87(4): 375-384.
- [4] Phillips G, Willby N, Moss B. Submerged macrophyte decline in shallow lakes: what have we learnt in the last forty years? [J]. *Aquat Bot*, 2016, 135: 37-45.
- [5] Short FT, Kosten S, Morgan PA, Malone S, Moore GE. Impacts of climate change on submerged and emergent wetland plants[J]. *Aquat Bot*, 2016, 135: 3-17.
- [6] Carpenter SR, Lodge DM. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes [J]. *Aquat Bot*, 1986, 26: 341-370.
- [7] Bakker ES, Sarneel JM, Gulati RD, Liu Z, Van DE. Restoring macrophyte diversity in shallow temperate lakes: biotic versus abiotic constraints[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 710(1): 23-37.
- [8] Valk VDAG. Effects of prolonged flooding on the distribution and biomass of emergent species along a freshwater wetland coenocline[J]. *Vegetatio*, 1994, 110(2): 185-196.
- [9] Havens KE, Fox D, Gornak S, Hanlon C. Aquatic vegetation and largemouth bass population responses to water-level variations in lake Okeechobee, Florida (USA) [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 539(1): 225-237.
- [10] Thuiller W, Araujo MB, Lavorel S. Do we need land-cover data to model species distributions in Europe? [J]. *J Biogeogr*, 2004, 31(3): 353-361.
- [11] Luoto M, Virkkala R, Heikkinen RK. The role of land cover in bioclimatic models depends on spatial resolution [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2007, 16(1): 34-42.
- [12] 吴征镒, 孙航, 周浙昆, 彭华, 李德铎. 中国植物区系中的特有性及其起源和分化[J]. *云南植物研究*, 2005, 27(6): 577-601.
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Peng H, Li DZ. Origin and differentiation of endemism in the flora of China[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2005, 27(6): 577-601.
- [13] 薛建华, 卓丽环, 周世良. 黑龙江野生莲遗传多样性及其地理式样[J]. *科学通报*, 2006, 51(3): 299-308.
- Xue JH, Zhuo LH, Zhou SL. Genetic diversity of wild lotus in Heilongjiang and its geographical pattern [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(3): 299-308.
- [14] 瞿桢, 魏英辉, 李大威, 肖丽舟, 徐金星, 等. 莲品种资源的 SRAP 遗传多样性分析[J]. *氨基酸和生物资源*, 2008, 30(3): 21-25.
- Qu Z, Wei YH, Li DW, Xiao LZ, Xu JX, et al. Genetic diversity analysis of *Nelumbo nucifera* based on SRAP markers[J]. *Amino Acids and Biotic Resources*, 2008, 30(3): 21-25.
- [15] 欧阳冬梅, 刘凰, 徐金星, 刘春华, 邹东旺, 等. 基于 SRAP 标记的莲种质资源遗传多样性分析[J]. *长江蔬菜*, 2012(16): 35-38.
- Ouyang DM, Liu H, Xu JX, Liu CH, Zou DW, et al. Genetic diversity analysis of *Nelumbo* accessions based on SRAP markers [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2012(16): 35-38.
- [16] 王硕. 莲的杂交育种及杂交 F1 代的遗传分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [17] 谢克强, 张香莲, 杨良波, 徐金星, 苏颖, 张涛. 太空搭载结合离子注入进行白莲诱变育种的研究[J]. *核农学报*, 2004, 18(4): 303-306.
- Xie KQ, Zhang XL, Yang LB, Xu JX, Su Y, Zhang T. Effects of ion implantation on lotus seeds from space mutation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2004, 18(4): 303-306.
- [18] 王玲, 王硕, 薛建华, 周世良. 中国野生莲莲子的形态变异[J]. *河北农业大学学报*, 2013, 36(1): 16-20.
- Wang L, Wang S, Xue JH, Zhou SL. Morphological variations of wild lotus fruits in China[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2013, 36(1): 16-20.
- [19] Fleishman E, Nally RM, Fay JP, Murphy DD. Modeling and predicting species occurrence using broad-scale environmental variables: an example with butterflies of the Great Basin[J]. *Conserv Biol*, 2001, 15(6): 1674-1685.
- [20] Peterson AT, Vieglais DA. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem[J]. *BioScience*, 2001, 51(5): 363-371.
- [21] Scott JM, Heglund PJ, Wall WA, Morrison ML. Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale[M].

- Washington: Island Press, 2002.
- [22] 张东方, 张琴, 郭杰, 孙成忠, 吴杰, 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 DF, Zhang Q, Guo J, Sun ZC, Wu 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.
- [23] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 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.
- [24] 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.
- [25] Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudik M, Ferrier S. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129–151.
- [26] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190(3–4): 231–259.
- [27] Stockwell D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction[J]. *Int J Geogr Inf Sci*, 1999, 13(2): 143–158.
- [28] Higgins SI, Richardson DM, Cowling RM. Modeling invasive plant spread: the role of plant-environment interactions and model structure [J]. *Ecology*, 1996, 77(7): 2043–2054.
- [29] Proosdij VASJ, Sosef MSM, Wieringa JJ, Raes N. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models[J]. *Ecography*, 2016, 39(6): 542–552.
- [30] Hirzel AH, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? [J]. *Ecology*, 2002, 83(7): 2027–2036.
- [31] Luoto M, Heikkinen RK, Pöyry J, Saarinen K. Determinants of the biogeographical distribution of butterflies in boreal regions [J]. *J Biogeogr*, 2006, 33(10): 1764–1778.
- [32] Dorji S, Vernes K, Rajaratnam R. Habitat correlates of the red panda in the temperate forests of Bhutan [J]. *PLoS One*, 2011, 6(10): e26483.
- [33] Owens HL, Bentley AC, Peterson AT. Predicting suitable environments and potential occurrences for coelacanths (*Latimeria* spp.) [J]. *Biodivers Conserv*, 2012, 21(2): 577–587.
- [34] Heikkinen R, Leikola N, Fronzek S, Toivonen H. Predicting distribution patterns and recent northward range shift of an invasive aquatic plant: *Elodea canadensis* in Europe [J]. *BioRisk*, 2009, 2: 1–32.
- [35] 陈璐, 孙希华, 林泽民. 基于 GARP 的大藻潜在适生区预测 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(2): 243–245.
- Chen L, Sun XH, Lin ZM. GARP-based prediction of potential distribution of *Pistia stratiotes* L. in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(2): 243–245.
- [36] 陈立立, 余岩, 何兴金. 喜旱莲子草在中国的入侵和扩散动态及其潜在分布区预测 [J]. 生物多样性, 2008, 16(6): 578–585.
- Chen LL, Yu Y, He XJ. Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China [J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16(6): 578–585.
- [37] Saupe EE, Qiao H, Hendricks JR, Portell RW, Hunter SJ, et al. Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2015, 24(10): 1159–1169.
- [38] 薛建华, 卓丽环, 郭玉民, 苏含英. 黑龙江省野生莲资源的现状及保护 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2005, 21(2): 87–91.
- Xue JH, Zhuo LH, Guo YM, Su HY. The situation and protection of wild-lotus resource on Heilongjiang province [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2005, 21(2): 87–91.
- [39] 李静. 黑龙江省野生莲的分布及应用 [J]. 黑龙江农业科学, 2009(1): 81–83.
- Li J. Distribution and application of wild-lotus resource in Heilongjiang province [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(1): 81–83.
- [40] 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.
- [41] Wang R, Wang YZ. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China [J]. *Divers Distrib*, 2006, 12(4): 397–408.
- [42] 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, Wang FH, Xiao QM, Dai LY. Applica-

- tion of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 365–372.
- [43] Engler R, Guisan A, Rechsteiner L. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data[J]. *J Appl Ecol*, 2004, 41(2): 263–274.
- [44] Carnaval AC, Moritz C. Historical climate modelling predicts patterns of current biodiversity in the Brazilian Atlantic forest[J]. *J Biogeogr*, 2008, 35(7): 1187–1201.
- [45] Escobar LE, Awan MN, Qiao H. Anthropogenic disturbance and habitat loss for the red-listed Asiatic black bear (*Ursus thibetanus*): Using ecological niche modeling and nighttime light satellite imagery[J]. *Biol Conserv*, 2015, 191: 400–407.
- [46] 郑卉, 何兴金. 苋属 4 种外来有害杂草在中国的适生区预测[J]. *植物保护*, 2011, 37(2): 81–86.
Zheng H, He XJ. Prediction of potential distribution of four alien invasive *Amaranthus* weeds in China[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(2): 81–86.
- [47] Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Climate change 2007—impacts, adaptation and vulnerability[R]. Cambridge, 2007.
- [48] 薛建华, Kryukova MV, Rubtsova TA, Pshennikova LM, Bolotova YV. 走近黑龙江流域野生莲[J]. *生命世界*, 2015(6): 4–16.
Xue JH, Kryukova MV, Rubtsova TA, Pshennikova LM, Bolotova YV. Approaching the wild lotus in the Heilongjiang River Basin[J]. *Life World*, 2015(6): 4–16.
- [49] Matthews WJ. Patterns in Freshwater Fish Ecology[M]. Boston: Springer, 1998.
- [50] Jeppesen E, Kronvang B, Meerhoff M, Søndergaard M, Hansen KM, et al. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations[J]. *J Environ Qual*, 2009, 38(5): 1930–1941.
- [51] 李宏群, 李宇轩, 刘晓莉, 丁世敏, 张倩倩, 等. 基于 Maxent 生态位模型的水葫芦在中国的适生区预测[J]. *生态科学*, 2018, 37(3): 143–147.
Li HQ, Li YX, Liu XL, Ding SM, Zhang QQ, et al. Prediction of potential distribution for water hyacinth in China by using Maxent ecologic niche model[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3): 143–147.
- [52] 薛建华, 曹晓青, Kryukova MV, Rubtsova TA. 黑龙江流域野生莲及其生物学特性[J]. *国土与自然资源研究*, 2010(5): 66–68.
Xue JH, Cao XQ, Kryukova MV, Rubtsova TA. Wild lotus in the Heilongjiang river valley and its biological characteristics[J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2010(5): 66–68.

(责任编辑: 周媛)