

基于优化 MaxEnt 模型的天女木兰在中国适生区预测

兰雪涵¹,王金玲^{1,2*},付 聪¹,李黎明¹,袁梦琦¹,檀婷婷¹,杜凤国^{1,3*}

(1. 北华大学 林学院,吉林 吉林 132013;2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;
3. 长白山特色森林资源保育与高效利用国家林业和草原局重点实验室,吉林 吉林 132013)

摘要:采用 MaxEnt 模型、ENM Tools、R 语言和地理信息系统(ArcGis)相结合的方法,预测天女木兰在我国的适生区域,确定影响天女木兰地理分布的主导环境因子。结果表明,预测的天女木兰高适生区主要分为 2 个主要区域:一个位于东北地区的吉林省南部与辽宁省中东部组成的带状适生分布区;另一个由华东和华中地区的安徽省南部、浙江省西部、江西省中东部与福建省北部等地区组成不均匀的团块适生分布区。天女木兰在我国的高、中和低适生区面积分别为 21.96 、 52.41×10^4 km^2 和 155.627×10^4 km^2 ;年均温较差和最湿季度降水量环境变量在预测天女木兰在我国的地理分布中起着主导作用,为我国天女木兰迁地保护引种地的选择与科学保育提供依据。

关键词:天女木兰;MaxEnt 模型;模型优化;适生区

中图分类号:Q949.747.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)04-0100-07

Prediction of Suitable Distribution Area of *Magnolia sieboldii* in China Based on the Optimized MaxEnt Model

LAN Xue-han¹, WANG Jin-ling^{1,2*}, FU Cong¹, LI Li-ming¹, YUAN Meng-qi¹,
TAN Ting-ting¹, DU Feng-guo^{1,3*}

(1. College of Forestry, Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Key Lab. on Conservation and Efficient Utilization of Precious and Rare Forest Resources in Changbai Mountain, National Forestry and Grassland Administration, Jilin 132013, Jilin, China)

Abstract: Using a combination of the MaxEnt model, ENM Tools, R language and the ArcGIS, this study predicted the suitable distribution regions for *Magnolia sieboldii* in China, determined the dominant environmental factors affecting the geographical distribution of *M. sieboldii*. The results showed that the predicted high suitable area of *M. sieboldii* were divided into two main regions, one was the belt-form suitable distribution region, which was composed of the southern part of Jilin Province and the middle and eastern part of Liaoning Province in northeast of China, and the other one was composed of southern Anhui Province, western Zhejiang Province, central and eastern Jiangxi Province and northern Fujian Province in eastern and central China. The high, medium and low suitable areas were 21.96 , 52.41×10^4 km^2 and 155.627×10^4 km^2 , respectively. The environmental variables of average annual temperature and precipitation in the wettest season played leading roles in predicting the geographical distribution, which provided a basis for the selection of introduction sites and scientific conservation of *M. sieboldii* in China.

Key words: *Magnolia sieboldii*; MaxEnt model; model optimization; suitable distribution

收稿日期:2021-06-25 修回日期:2021-12-13

基金项目:中央财政林业科技推广示范项目(JLT2020-21)。

第一作者:兰雪涵。研究方向:濒危植物资源保护与利用。E-mail:1643695799@qq.com

*通信作者:王金玲,博士在读。研究方向:野生植物保护与利用。E-mail:wjlbdx@qq.com;杜凤国,博士,教授,博士生导师。研究方向:长白山濒危植物保育生物学。E-mail:dfg4656@qq.com

天女木兰(*Magnolia sieboldii*)也称天女花、山牡丹,隶属于木兰科(Magnoliaceae)木兰属(*Magnolia*)的落叶小乔木,为木兰科在中国分布最北的一个物种。现分布于安徽、福建、江西和吉林等 12 个省的中低山岭与原始林中^[1-2],地理分布呈间断式。《中国物种红色名录》中被定为国家重点保护的濒危物种,亦是吉林省一级保护植物,其花、果、叶具有较高的观赏价值,其器官提取物可作高级香料。近年来,受多种人为因素干扰致使天女木兰生境遭到破坏,野生种群和个体数量呈显著下降趋势,处于濒危状态。目前,众多学者对天女木兰的研究多集中在种子休眠^[3]、遗传多样性^[1]、遗传结构^[4]、生育力分析^[5]和叶表皮微形态^[6]等方面,对天女木兰适生区预测的研究尚未见报道。

MaxEnt 模型自 2006 年开发以来,已广泛应用于濒危物种适生区的预测、未来气候变化下的物种分布预测、入侵物种监控区确定等领域^[7-10],该模型对样本量要求不苟,即使小样本也具有较高精度和稳定性。基于此,本研究将 MaxEnt 模型、ENM Tools、R 语言和地理信息系统(ArcGis)相结合,预测天女木兰在中国的适生区,为濒危植物天女木兰迁地保护引种地的选择与科学保育提供依据。

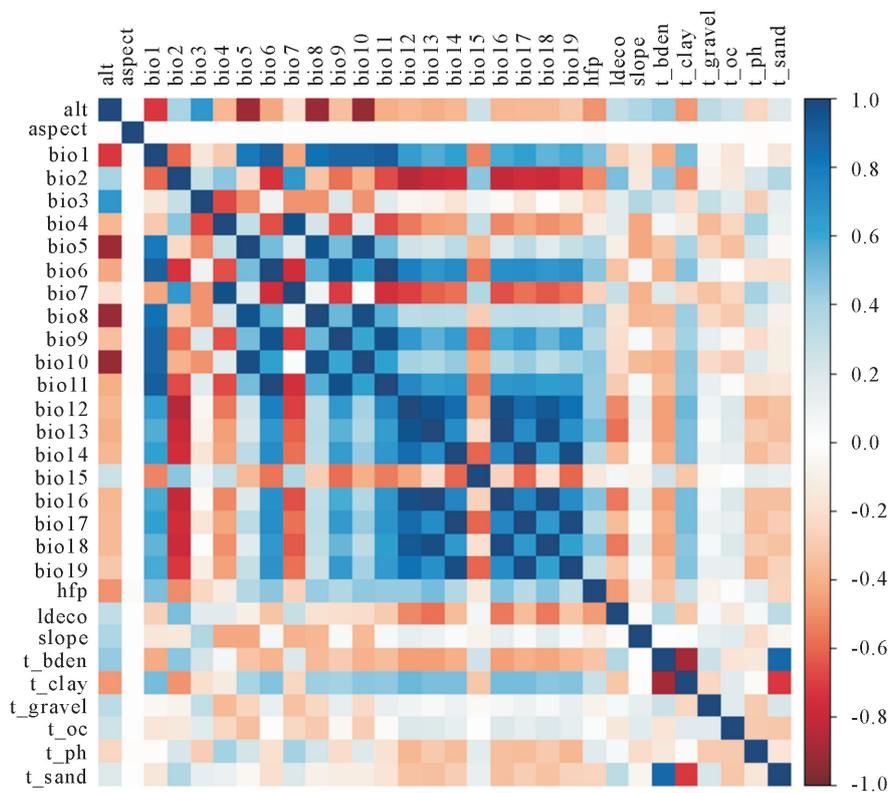
1 材料与方法

1.1 地理分布数据与处理

主要采用以下方法获取天女木兰的地理分布(经纬度)数据:1)对吉林省、贵州省、河北省、辽宁省与安徽省等 7 个省份的 13 个天女木兰种群分布地进行实地调查与测量,用 GPS 记录经纬度;2)通过全球生物多样性信息网络(GBIF, <https://www.gbif.org>)获得数据;3)检索与天女木兰相关的文献^[1-2,4-5,11-13]。通过以上方法获得天女木兰 42 个地理分布点。为避免由于天女木兰分布点聚集导致的模型过度拟合,利用 ENM Tools 1.4.4 软件筛选分布点数据,最后得到用于模拟天女木兰地理分布点数据为 40 个(表 1)。

1.2 环境变量数据与处理

环境数据包括气候^[14]、地形、陆地生态系统^[15]、土壤^[16]和人类活动强度^[17]5 类环境因子共 30 个环境变量,环境变量之间存在着较高的空间相关性,这些环境变量在模型预测过程中会引入更多的复杂且无用信息,为提高模型的精确性,本研究利用 ENM Tools 1.4.4 软件和 R 语言 corrplot 软件包对 30 个环境变量进行相关性分析并制图(图 1),删



注:蓝色代表正相关,红色代表负相关,颜色越深相关程度越大。

图 1 30 个环境变量相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of 30 environmental variables

表 1 天女木兰 40 个种群的基本信息

Table 1 Basic information of 40 populations of *Magnolia sieboldii* in China

序号	位置	经度	纬度	来源
1	安徽省, 安庆市, 潜山市	116.45	30.733 333 33	[4]
2	安徽省, 安庆市, 岳西县	116.1	30.966 666 67	[4]
3	安徽省, 安庆市, 岳西县	116.2	30.91	[GBIF]
4	安徽省, 池州市, 石台县	117.45	30.05	[4]
5	安徽省, 黄冈市, 罗田县	115.766 666 7	31.116 666 67	[4]
6	安徽省, 黄山市, 黄山区	118.15	30.133 333 33	[1]
7	安徽省, 黄山市, 黄山区	118.006 897	30.131 914 67	[GBIF]
8	安徽省, 黄山市, 歙县	118.85	30.083 333 33	[4]
9	安徽省, 黄山市, 歙县	118.43	29.86	[GBIF]
10	安徽省, 黄山市, 歙县	118.883 333 3	30.1	[1]
11	安徽省, 六安市, 霍山县	116.016 666 7	31.1	[4]
12	安徽省, 宣城市, 绩溪县	118.85	30.116 666 67	[4]
13	福建省, 南平市, 武夷山市	118.03	27.75	[GBIF]
14	广西壮族自治区, 桂林市, 兴安县	110.58	25.6	[GBIF]
15	广西壮族自治区, 桂林市, 资源县	110.4	25.85	[1]
16	贵州省, 黔东南苗族侗族自治州, 雷山县	108.2	26.383 333 33	[1]
17	贵州省, 黔南布依族苗族自治州, 龙里县	107.033 333 3	26.4	[1]
18	河北省, 秦皇岛市, 青龙满族自治县	119.4	40.116 666 67	[1]
19	河北省, 秦皇岛市, 青龙满族自治县	119.416 666 7	40.133 333 33	[12]
20	河南省, 信阳市, 商城县	115.4	31.79	[GBIF]
21	湖南省, 邵阳市, 新宁县	110.85	26.43	[GBIF]
22	吉林省, 通化市, 集安市	126.385 101	41.389 74	[2]
23	吉林省, 通化市, 集安市	125.973 926	41.169 873	[2]
24	吉林省, 通化市, 通化县	126.55	43.033 333 33	[1]
25	吉林省, 通化市, 通化县	126.271 276	41.453 283	[2]
26	吉林省, 通化市, 通化县	126.348 749	41.454 334	[2]
27	江西省, 吉安市, 安福县	114.61	27.39	[GBIF]
28	江西省, 上饶市, 玉山县	118.05	28.9	[4]
29	江西省, 上饶市, 玉山县	118.05	28.916 666 67	[11]
30	辽宁省, 鞍山市, 岫岩满族自治县	123.31	40.41	[GBIF]
31	辽宁省, 本溪市, 本溪满族自治县	124.17	41.19	[GBIF]
32	辽宁省, 本溪市, 桓仁满族自治县	125.24	41.24	[GBIF]
33	辽宁省, 丹东市, 凤城市	124.03	40.57	[GBIF]
34	辽宁省, 丹东市, 凤城市	124.066 666 7	40.4	[1]
35	辽宁省, 丹东市, 宽甸满族自治县	124.8	40.933 333 33	[1]
36	辽宁省, 丹东市, 宽甸满族自治县	125.02	40.67	[GBIF]
37	四川省, 阿坝藏族羌族自治州, 松潘县	103.59	32.63	[GBIF]
38	四川省, 乐山市, 峨眉山市	103.39	29.49	[GBIF]
39	浙江省, 杭州市, 临安区	119.436 458	30.353 794	[GBIF]
40	浙江省, 杭州市, 临安区	119.36	30.19	[GBIF]

注:表中经纬度坐标采用十进制。

减相关性 $|r| \geq 0.85$ 的环境变量, 余下 17 个环境变量用于后续的优化模拟(表 2)。

1.3 MaxEnt 模型优化

利用 MaxEnt 模型对天女木兰在我国的适生区进行预测。将收集到的天女木兰地理分布点导入 MaxEnt 模型软件, 75% 的地理分布点用于训练集构建, 25% 用于测试集验证, 选择刀切法创建环境变量反馈曲线, 设置其训练模型所用的 feature 和倍频

乘数。使用 R 语言的 kuenm 软件包^[18]从模型的 40 个倍频乘数水平 $[0.1 \sim 4]$ 和 29 种选择特征组合 $[L, Q, P, T, H, LQ, LP, LT, LH, QP, QT, QH, PT, PH, TH, LQP, LQT, LQH, LPT, LPH, QPT, QPH, QTH, QTH, LQPT, LQPH, LQTH, LPTH$ 和 $LQPTH]$ 等参数设置的 1 160 种模型结果中进行筛选, 选择 delta AICc 最小值作为最优设置并建立最终模型。

表 2 天女木兰分布模拟的 17 个环境变量

Table 2 17 environmental variables for simulation of *M. sieboldii* distribution

类型	环境变量	描述
气候	bio2	昼夜温差月均值
	bio3	等温性
	bio7	气温年较差
	bio11	最冷季度平均温度
	bio15	降水量变异系数
	bio16	最湿季度降水量
	bio17	最干季度降水量
地形	alt	海拔
	aspet	坡向
	slope	坡度
土壤	t_sand	含沙量
	t_ph	土壤酸碱度
	t_oc	土壤有机碳含量
	t_gravel	碎石体积比
	t_clay	黏土含量
生态系统	ldeco	农田、森林、草地、水体与湿地、荒漠、聚落和其他生态系统
人类足迹	fhp	人类活动强度

1.4 模型评价及适生区等级划分

通过 ArcGIS 10.4 的 Conversion Tools-ASCII to Raster 将 MaxEnt 运行优化参数后所得模拟结果中的 asc 格式文件转化成栅格数据并进行适生区划分。使用“自然间断点分级法(Jenks)”功能,划分适生级别并标注存在概率的范围:存在概率<0.07,非适生区;0.07≤存在概率<0.23,低适生区;0.23≤存在概率<0.48,中适生区;存在概率≥0.48,高适生区。统计各适生区面积并进行比较。

本研究中 MaxEnt 模型使用 AUC 评分法(ROC 曲线下面积值)评估所得模型的准确性。评估标准划分为 5 个等级,分别为较差(AUC≤0.80)、一般(0.80<AUC≤0.90)、好(0.90<AUC≤0.95)和很好(0.95<AUC≤1.00)^[19]。

2 结果与分析

2.1 模型准确性检验

基于我国天女木兰分布点数量和相应的环境因子预测适生区,在 1 160 种模型结果中,筛选出在统计学上显著又满足模型遗漏率和 AICc 标准的组合有 2 种,参照 Cobos 的选择方法^[18],选择 delta AICc 值最小的组合:倍频乘数为 2.4 和 feature 为 LPQ。使用其组合设置使模型重复运行 10 次,得到重复运算 AUC 训练集平均值为 0.963(图 2),表明模型预测达到“很好”效果,说明预测结果有较高的精确度和可信度。

2.2 适生区预测

将 MaxEnt 模型输出的结果导入 ArcGis10.4 中,采用来源于国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn/ngcc/)的中国行政区矢量地图作为分析底图,生成天女木兰在中国的适生分布(图 3)。预测结果显示,天女木兰高适生区主要包括我国的东北、华中、华南和西南等部分地区,主要分布于吉林省的通化市和吉林市,辽宁省的丹东市、抚顺市、鞍山市与大连市,安徽省的六安市、安庆市、黄山市、池州市和宣城市,浙江省的杭州市、衢州市、金华市和丽水市,福建省的南平市、三明市和宁德市,江西省的景德镇市、上饶市、鹰潭市、抚州市、南昌市、宜春市和吉安市,湖南省的张家界市、邵阳市、怀化市、益阳市、恩施土家族苗族自治州和湘西土家族苗族自治州,广西壮族自治区的桂林市、柳州市和贺州市,重庆市,四川省的成都市、乐山市、眉山市和雅安市,西藏自治区的林芝市,台湾地区等。

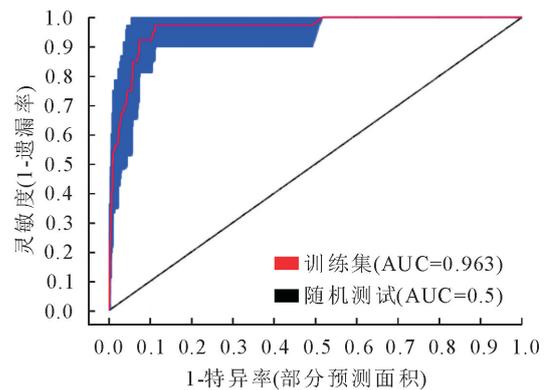


图 2 MaxEnt 模型的天女木兰预测结果 ROC 曲线验证
Fig. 2 ROC curve verification of prediction for *M. sieboldii* by MaxEnt model

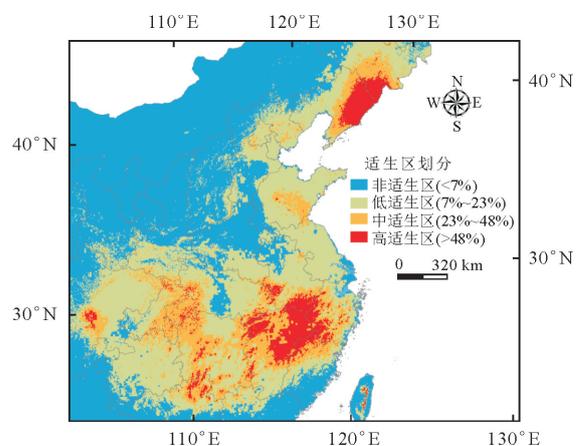


图 3 基于 MaxEnt 模型预测的天女木兰在中国的适生分布
Fig. 3 Suitable distribution of *M. sieboldii* in China based on MaxEnt model

中适生区与低适生区沿高适生区周围或邻域附近分布,主要集中在黑龙江省、吉林省、辽宁省、河北省、山东省、江苏省、安徽省,浙江省、福建省、江西省、河南省、湖北省、四川省、重庆市、贵州省、台湾地区和西藏自治区等部分地区。

天女木兰在我国的高、中和低适生区面积分别

为 21.96 、 $52.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $155.627 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分别占我国国土面积的 2.28% 、 5.44% 和 16.15% 。江西省的高适生区面积最大,为 $6.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 辽宁省与浙江省次之,分别为 $4.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。天女木兰在各环境变量条件下的适生区面积预测结果见表 3。

表 3 天女木兰在各环境变量条件下的适生区面积预测

Table 3 Predicted areas for *M. sieboldii* under each environmental variables condition

省份	非适生区		低适生区		中适生区		高适生区	
	预测面积 / $\times 10^4 \text{ km}^2$	占该省面积 比例(%)						
江西省	0.12	0.72	3.32	19.90	6.31	37.79	6.94	41.59
辽宁省	1.64	11.07	5.92	40.02	3.16	21.36	4.08	27.55
浙江省	0.67	6.59	3.80	37.34	3.61	35.47	2.10	20.60
安徽省	2.66	18.99	7.09	50.61	2.22	15.85	2.04	14.56
吉林省	5.32	28.38	8.12	43.33	3.56	19.01	1.74	9.28
湖南省	0.01	0.04	9.47	44.72	10.33	48.76	1.37	6.49
福建省	4.75	39.12	3.40	27.97	2.65	21.82	1.35	11.09
湖北省	2.70	14.52	9.44	50.77	5.39	28.99	1.07	5.73
广西壮族自治区	15.42	64.90	5.33	22.42	2.27	9.57	0.74	3.11
四川省	27.61	56.81	17.01	35.00	3.46	7.13	0.52	1.06
重庆市	0.65	7.91	3.76	45.68	3.49	42.30	0.34	4.12
台湾地区	2.84	78.90	0.49	13.66	0.13	3.54	0.14	3.89
西藏自治区	116.98	95.23	4.74	3.86	0.99	0.81	0.13	0.11
贵州省	3.07	17.45	12.92	73.31	1.58	8.94	0.05	0.30
山东省	1.63	10.35	11.61	73.53	2.51	15.90	0.04	0.23

2.3 主导环境变量的确定

依据 MaxEnt 模型的运算结果,不同环境变量对天女木兰分布的贡献率和置换重要性见表 4。由表 4 可见,年均温较差(bio7)和最湿季度降水量(bio16)变量的贡献率较高,分别高达 38.1% 和 31% ;最冷季度平均温度(bio11)、等温性(bio3)、最干季度降水量(bio17)、坡度(slope)、土壤酸碱度(t_{ph})、平均日较差(bio2)、海拔(alt)、黏土含量(t_{clay})、陆地生态系统类型(ldeco)、土壤有机碳含量(t_{oc})、人类活动强度(hfp)和降水量变异系数(bio15),12 个环境变量的累计贡献率合计为 30.9% ;而含沙量(t_{sand})、碎石体积百分比(t_{gravel})和坡向(aspect)环境变量对天女木兰分布的贡献微乎其微。而年均温较差(bio7)和最湿季度降水量(bio16)的置换重要性亦是较高,分别达到 17.5% 和 62% 。因此,年均温较差和最湿季度降水量环境变量在预测天女木兰在中国的地理分布中起着主导作用。

3 结论与讨论

MaxEnt 的默认参数最初是通过早期模型开发人员对 6 个不同地理区域的 266 个物种的数据进行

测试而设定的。如果只使用默认参数,模型的转移将因过度拟合而精确度降低。另外,模型复杂度对物种的转移能力有重要影响^[20],而有研究^[21-22]表明,通过使用 AICc 参数和调整倍频参数可以约束 MaxEnt 模型的复杂度。本研究使用 R 语言的 kuenm 软件包^[18]对模型 40 个倍频乘数水平和 29 种选择特征组合等参数设置的 1 160 种模型结果中进行筛选,在符合相应条件的组合中,选取 delta AICc 值最小优化设置。在重新建模后,得到天女木兰在中国的适生区预测结果,优于默认参数的预测结果。

本研究预测的高适生区主要分为 2 个区域:一个由东北地区的吉林省南部与辽宁省中东部组成的带状适生分布区;另一个由华东和华中地区的安徽省南部、浙江省西部、江西省中东部与福建省北部等地区组成不均匀的团块分布区。其他高适生区分布呈星点状,分布于山东省、湖北省、湖南省、四川省、广西壮族自治区与西藏自治区等地区。与孙李勇等^[23]、施晓灯等^[24]和翟新宇等^[25]预测其他木兰科植物紫玉兰(*Magnolia liliflora*)、红花玉兰(*Magnolia wufengensis*)和鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)的适生区部分地区重叠,适生区的面积及比例不尽相同,其

表4 MaxEnt 模型中各环境变量贡献率和置换重要性

Table 4 Percent contribution and permutation importance of each environmental variables in MaxEnt modeling %

环境变量	贡献率	置换重要性
年均温较差(bio7)	38.1	17.5
最湿季度降水量(bio16)	31	62
最冷季度平均温度(bio11)	10.9	7.9
等温性(bio3)	6.4	4.3
最干季度降水量(bio17)	6	0.6
坡度(slope)	4.8	2.3
土壤酸碱度(t_ph)	1.2	0.5
平均日较差(bio2)	0.4	0
海拔(alt)	0.3	3.8
黏土含量(t_clay)	0.2	0.2
陆地生态系统类型(ldec)	0.2	0
土壤有机碳含量(t_oc)	0.2	0.3
人类活动强度(hfp)	0.2	0.6
降水量变异系数(bio15)	0.1	0
含沙量(t_sand)	0	0
碎石体积百分比(t_gravel)	0	0
坡向(aspect)	0	0

原因可能是木兰科植物的自然种群多分布于我国华中、华东、华南和滇黔桂等地区^[26],而天女木兰是木兰科在中国分布最北的物种,有较好的抗寒性,本研究中天女木兰自然种群的地理分布点中有12个位于东北地区,从而使其他木兰科树种所预测适生区范围与天女木兰的东北部适生分布区不重叠。同时,根据中国植物志和已发表的文献^[5,27-28]记载,天然天女木兰种群分布于辽宁、吉林、安徽、江西、福建、广西北部及西南一些省份等地区,地理分布呈间断式,本研究结果预测的适生区分布与天女木兰实际分布重合度较高且更为广阔,可能由于自然分级法进行划分存在概率阈值所导致。

研究结果显示,气候变量中的年均温较差和最湿季度降水量环境变量的贡献率较高,置换重要性亦较高,说明这2个变量包含了其他变量不可替代的信息与重要性,因此,年均温较差和最湿季度降水量环境变量在预测天女木兰在中国的地理分布中起着主导作用。在预测其他木兰科植物研究结果显示^[23-25],主导环境变量均为气候变量,气候因素亦是影响物种分布的主要非生物因素之一^[29]。另外,本研究着重探讨非生物因素对天女木兰的影响,自然条件下种群分布扩增时,还受伴生物种、种间互作、种群更新和物种自身繁殖力等生物因素的影响。因此,在后续研究中应考虑其他物种等生物因素进行综合预测和分析。

年均温较差可以反映温差特点,夏季降水的增加将有益于植物的生长发育并增加大气湿度与土壤含水量^[30],而大气湿度和土壤含水量对促进天女木兰种子发育具有显著影响^[13]。6—8月是天女木兰开花

盛期至果实成熟期的月份^[31],也是种子逐渐成熟的关键时期,如果种子不成熟将影响种群更新,进而导致物种分布区扩增的能力减弱,并将进一步加剧天女木兰种群数量的减少。而天女木兰多生长于海拔400~2100 m、夏季温暖多雨、湿润的阴坡山谷中^[1,26],也进一步说明本研究结果中年均温较差和最湿季度降水量等气候因素为主导环境因素的合理性。

鉴于天女木兰为国家濒危物种,一方面,应加大宣传力度,基于天女木兰天然种群现有分布地建立保护区,实施就地保护;另一方面,全球气候变暖的情境下,多数濒危植物都将面临原始生境向高纬度或高海拔迁移,导致自然种群数量变少,在后续的研究中,建议将未来气候变化下不同情景的气候因素考虑进行预测,预测其适生区的动态变化。基于预测的高、中适生区可以作为天女木兰引种地选择的参考,进行天女木兰引种、繁育和栽培技术研究,实施迁地保护,扩大其种群数量,同时普及宣传教育,引起全社会的高度重视,加大天女木兰保护力度,加快保育这一濒危物种。

参考文献:

- [1] 王金玲,王瑞俭,杜凤国,等.天女木兰遗传多样性微卫星标记的研究[J].西北植物学报,2017,37(2):266-272.
WANG J L, WANG R J, DU F G, et al. Genetic diversity of *Magnolia sieboldii* assessed with SSR markers[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(2): 266-272. (in Chinese)
- [2] 杜凤国,王欢,刘春强,等.天女木兰群落物种多样性的研究[J].东北师大学报:自然科学版,2006,38(2):91-95.
DU F G, WANG H, LIU C Q, et al. Study on the species diversity in *Magnolia sieboldii* community[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2006, 38(2): 91-95. (in Chinese)
- [3] 曾莞棋.不同激素处理对天女木兰种子休眠解除的影响及ABA受体MsPYR1基因的功能分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [4] 徐延年,邵剑文.华东地区两种植被带内天女花的遗传结构[J].生态学报,2017,37(7):2253-2262.
XU Y N, SHAO J W. The genetic structure of *Oyama sieboldii* (K. Koch) N. H. Xia & C. Y. Wu within two vegetation zones in Eastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2253-2262. (in Chinese)
- [5] 徐卫红,徐秀芳,郭连金,等.三清山濒危植物天女木兰生育力分析[J].东北林业大学学报,2012,40(8):26-28,39.
XU W H, XU X F, GUO L J, et al. Fecundity of endangered plant *Magnolia sieboldii* in Sanqing Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(8): 26-28, 39. (in Chinese)
- [6] 张淑媛,杜凤国,王瑞俭,等.不同分布地天女木兰叶表皮微形态研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(4):56-62.
ZHANG S Y, DU F G, WANG R J, et al. Micromorphological characters of leaf epidermis in *Magnolia sieboldii* from differ-

- ent habitats[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 40(4): 56-62. (in Chinese)
- [7] 兰雪涵,付聪,李黎明,等. 基于 MaxEnt 模型的濒危植物朝鲜崖柏中国适生区预测[J]. 北华大学学报:自然科学版, 2021, 22(3): 292-298.
LAN X H, FU C, LI L M, et al. Prediction of potential suitable distribution areas in China for *Thuja koraiensis* Nakai based on MaxEnt model[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2021, 22(3): 292-298. (in Chinese)
- [8] 辜云杰,李晓清,杨汉波. 基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的适宜栽培区[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 136-141.
GU Y J, LI X Q, YANG H B. MaxEnt model-based prediction of suitable cultivation area of *Phoebe zheman* in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 136-141. (in Chinese)
- [9] 牛若恺,高润红,侯艳青,等. 气候变化下沙冬青适宜分布区预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 102-107.
NIU R K, GAO R H, HOU Y Q, et al. Prediction of the geographic distribution of *Ammopiptanthus mongolicus* under climate change[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 102-107. (in Chinese)
- [10] 李丽鹤,刘会玉,林振山,等. 基于 MaxEnt 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3124-3132.
LI L H, LIU H Y, LIN Z S, et al. Identifying priority areas for monitoring the invasion of *Solidago canadensis* based on MaxEnt and ZONATION[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3124-3132. (in Chinese)
- [11] 郭连金,贺昱,徐卫红. 三清山濒危植物天女花种群生殖对策研究[J]. 植物科学学报, 2012, 30(2): 153-160.
- [12] 魏贤星,常旭,陈健,等. 老岭自然保护区天女木兰茎叶中次生代谢产物的含量分析[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(3): 21-26.
- [13] 徐卫红,郭连金,徐芬芬,等. 江西三清山濒危植物天女花种子特性研究[J]. 亚热带植物科学, 2012, 41(1): 26-30.
- [14] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [15] 徐新良,刘纪远,张增祥,等. 中国 5 年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990-2010)内容与研发[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(1): 52-59.
XU X L, LIU J Y, ZHANG Z X, et al. A time series land ecosystem classification dataset of China in five-year increments (1990-2010)[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2017, 1(1): 52-59. (in Chinese)
- [16] FISCHER G, NACHTERGAELE F, PRIELER S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008)[J]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008, 10.
- [17] VENTER O, SANDERSON E W, MAGRACH A, et al. Global terrestrial human footprint maps for 1993 and 2009[J]. Scientific Data, 2016, 3(1): 1-10.
- [18] COBOS M E, PETERSON A T, BARVE N, et al. Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using MaxEnt[J]. Peer. J., 2019, 7: e6281.
- [19] SWEETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [20] LI Y C, LI M Y, LI C, et al. Optimized MaxEnt model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China[J]. Forests, 2020, 11(3): 302.
- [21] 朱耿平,乔慧捷. MaxEnt 模型复杂度对物种分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
ZHU G P, QIAO H J. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1189-1196. (in Chinese)
- [22] WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in MaxEnt: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. Ecological Applications, 2011, 21(2): 335-342.
- [23] 孙李勇,蒋政,刘晨妮,等. 基于 DIVA-GIS 的紫玉兰地理分布及适生性分析[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 804-811.
- [24] 施晓灯,马履一,段劼,等. 红花玉兰引种气候适生区研究[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(4): 705-715.
SHI X D, MA L Y, DUAN J, et al. Potential climatically adaptive regions for the introduction of *Magnolia wufengensis* [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(4): 705-715. (in Chinese)
- [25] 翟新宇,申宇芳,朱圣华,等. 未来气候变化对孑遗植物鹅掌楸地理分布的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(2): 151-161.
ZHAI X Y, SHEN Y F, ZHU S H, et al. Potential impacts of climate change in future on the geographical distributions of relic *Liriodendron chinense* [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(2): 151-161. (in Chinese)
- [26] 刘玉壶,夏念和,杨惠秋. 木兰科(Magnoliaceae)的起源、进化和地理分布[J]. 热带亚热带植物学报, 1995, 3(4): 1-12.
LIU Y H, XIA N H, YANG H Q. The origin, evolution and phytogeography of Magnoliaceae[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1995, 3(4): 1-12. (in Chinese)
- [27] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第 30 卷第 1 分册[M]. 北京:科学出版社, 1996: 125.
- [28] 于新杰. 天女木兰遗传转化再生体系建立初步探究[D]. 长春:沈阳农业大学, 2016.
- [29] 朱耿平,刘强,高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的分布[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 223-230.
ZHU G P, LIU Q, GAO Y B. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species[J]. Biodiversity Science, 2014, 22(2): 223-230. (in Chinese)
- [30] 陈四清. 基于遥感和 GIS 的内蒙古锡林河流域土地利用/土地覆盖变化和碳循环研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2002.
- [31] 杜凤国,刁绍起,王欢,等. 天女木兰的物候及生长过程[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(6): 39-40.
DU F G, DIAO S Q, WANG H, et al. Phenology and growth process of *Magnolia sieboldii* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(6): 39-40. (in Chinese)