

基于 MaxEnt 模型预测鹅掌楸在中国的潜在分布区

邱浩杰¹, 孙杰杰^{2,3}, 徐 达¹, 沈爱华³, 江 波³, 袁位高³, 李 胜¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 3. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:【目的】分析未来气候环境对鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 空间分布的影响, 以利于科学合理地制定鹅掌楸的保护措施。【方法】采用最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(ArcGIS)软件, 以鹅掌楸的地理分布数据、Worldclim 生物气候变量和人类活动强度数据为依据, 分析影响鹅掌楸分布的主导因子, 并对其在中国的适宜性分布区进行预测。【结果】MaxEnt 模型有很好的预测能力, 训练集均值为 0.973, 测试集为 0.953。年均降水量、最湿季度降水量、最冷月最低温、降水量变异系数和昼夜温差月均值是影响鹅掌楸分布的五大因子, 总贡献率超过 80%; 人类活动强度也有影响, 贡献率为 2.3%。将 MaxEnt 模型预测结果导入 GIS 软件中进行适生区分级, 发现鹅掌楸高适宜分布区在西南地区的大巴山以南向西南方向延伸到贵州中北部地区; 在华东地区为北起天目山, 向南延伸至浙南和闽北的丘陵山区。该模拟结果与已有调查结论一致。对 21 世纪 50 年代和 21 世纪 70 年代不同温室气体排放场景(RCP)下鹅掌楸在中国的分布预测表明: 鹅掌楸的适宜分布区有向高纬度轻微移动的趋势, 分布面积随着年份的增长呈先稳定后下降趋势; 至 21 世纪 70 年代, RCP 8.5 时, 面积较当代减少 5.3%, 与已有研究认为全球变暖情况下生物适宜分布区减少的结果吻合。【结论】该预测结果表明了气候变化将影响鹅掌楸种群分布, 可为鹅掌楸未来的栽培与迁地保护提供参考。图 2 表 3 参 31

关键词: 森林生态学; MaxEnt 最大熵模型; 鹅掌楸; 潜在分布区; 适宜性评价; 气候变化
中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)01-0001-08

MaxEnt model-based prediction of potential distribution of *Liriodendron chinense* in China

QIU Haojie¹, SUN Jiejie^{2,3}, XU Da¹, SHEN Aihua³, JIANG Bo³, YUAN Weigao³, LI Sheng¹

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective]The aim is to scientifically and rationally develop protective measures for *Liriodendron chinense*. [Method]Maximum Entropy Model (MaxEnt) and Geographic Information System (ArcGIS)were adopted to predict the potential distribution areas of *L. chinense*, and to explore the dominant environmental factors of *L. chinense* under various climate change scenarios. [Result]The mean AUC of the training data was 0.973, and the AUC of the test data reached 0.953, indicating that MaxEnt model had a good predicting ability. The annual precipitation, precipitation of wettest quarter, min temperature of coldest month, precipitation of seasonality and monthly mean temperature difference were predicted to be five main factors affecting the distribution of *L. chinense*, with a total contribution rate of over 80%. The intensity of human activities was 2.3%. Then MaxEnt model was imported into GIS to classify the suitable areas, and the results showed that the highly suitable distribution areas of *L. chinense* ranged from south of Daba Mountain to the north-central part of

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-06-18

基金项目: 浙江省省院合作林业科技重大项目(2018SY08); 浙江省重点研发计划项目(2017C02028)

作者简介: 邱浩杰, 从事植物生态学与风景园林技术研究。E-mail: 540207759@qq.com。通信作者: 李胜, 副教授, 从事园林生态与风景园林技术研究。E-mail: 8357573@qq.com

Guizhou in Southwest China; its southernmost part extended to the hilly area in the southern part of Zhejiang Province and the northern part of Fujian Province while its northernmost part reached the Tianmu Mountain in East China, which was similar with the investigation before. Meanwhile, the distribution of *L. chinense* in China under different RCP scenarios of the 2050s and 2070s was simulated. The study showed that the potential distribution area would move to higher latitudes, and the area would remain stable and then decline with the growth of the year. In 2070s under the climate scenario of RCP 8.5, the distribution area of *L. chinense* would decrease by 5.3% compared with the current period. These were consistent with the results of previous studies on the reduction of biogenic suitable area in the context of global warming. [Conclusion]The predictions indicated that climate change would affect the distribution of *L. chinense* populations, and would provide a reference for the future cultivation and ex-situ conservation of *L. chinense* too. [Ch, 2 fig. 3 tab. 31 ref.]

Key words: forest ecology; MaxEnt maximum entropy model; *Liriodendron chinense*; potential distribution; suitability evaluation; climate change

北美鹅掌楸 *Liriodendron tulipifera* 和鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 是鹅掌楸属 *Liriodendron* 中残存的 2 个种。受人类活动影响和天然更新不良等因素制约, 鹅掌楸的种群数量和分布范围逐年减少, 基本以 1 株或数株的零散分布存在。在中国, 鹅掌楸被列为国家二级珍稀濒危植物^[1], 主要分为东、西 2 个亚区: 西部分区由北部的大巴山经鄂西、湘西、川东和黔北中山(武陵山和大娄山)向西南延伸到云贵高原东部中山(苗岭), 南端沿云贵高原南坡向西南分布至北回归线以南的金平和麻栗坡, 直至越南北部; 东部分区包括地处鄂东、皖北交界地带的“大别山岛”, 赣西北、鄂东、湘东三省交界地带的“九幕岛”, 浙南、闽北交界地带的“武夷山岛”和浙西北、皖南交界地带的“天黄岛”等 4 个岛状分布区^[2-4]。目前, 鹅掌楸的研究主要集中在生理生化、育苗和观赏价值等方面。如陆畅等^[5]对不同种源鹅掌楸的抗寒性能进行了研究; 刘丹等^[6]运用随机扩增多态性 DNA (RAPD) 分子标记手段揭示了鹅掌楸的遗传多样性和变异规律; 张晓平等^[7]研究了淹水胁迫对浙江种源鹅掌楸光合特征的影响, 间接揭示光照与降水对鹅掌楸生长的影响。对鹅掌楸地理分布上的研究主要以调查和整理为主, 对其分布区域和影响因子的定量分析未见报道。方炎明^[2]和贺善安等^[3]研究认为: 影响鹅掌楸生长的主要因素是生理障碍、气候环境和人类活动。郝日明等^[4]进一步研究发现: 由于不合适的生境引起的鹅掌楸天然更新不良是造成鹅掌楸生理障碍的主要原因。环境因素成为当前全球气候变暖背景下影响生物分布的决定性因素^[8], 预测受威胁物种如鹅掌楸适宜分布区的空间变化和迁移趋势已成为最新研究热点^[9-10]。MaxEnt 最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)是以最大熵理论为基础的密度估计和物种分布预测模型, 具有运算结果稳定, 运算时间短等优点^[11-13], 被广泛应用于动植物生长环境分析、害虫预警、栖息地保护和潜在分布区预测等。关心怡等^[14]借助该模型预测了未来气候情景下的麻栎 *Quercus acutissima* 的地理分布; 李绒等^[15]基于 MaxEnt 模型分析了影响绿孔雀 *Pavo muticus* 生长的主要环境因子; 王茹琳等^[16]借助此模型分析了影响西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* 潜在分布的环境变量和适宜分布区, 在害虫预警方面得到较好反响。另外, 该模型在交通^[17]、用地条件^[18]等新领域也能发挥较好效果。本研究以鹅掌楸在中国的标本分布记录以及相应分布地区的生物气候环境、人类活动强度等数据为基础, 模拟鹅掌楸在当代气候环境下的潜在分布区, 分析影响其分布的主导环境因子和适宜的环境范围; 选取 21 世纪 50 年代和 21 世纪 70 年代不同气候情景, 分析未来气候环境对鹅掌楸空间分布的影响, 为今后鹅掌楸的栽培保护提供参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 标本数据来源

以中国国家标本资源平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)和教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn>)等标本信息、平台信息和文献检索信息为依据, 剔除位置信息未精确到镇的标本数据和重复数据。根据气候精度, 在每个 2.5'×2.5'网格处选取 1 个分布点, 共搜集到鹅掌楸标本信息 154 条, 按照 MaxEnt 软件要求录入并保存信息。

1.2 环境数据来源

从世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)下载 1970–2000 年坐标系为 WGS84、栅格大小为 25 km² 的 19 种气候环境数据(表 1)，数据空间分辨率为 2.5 min。其中气候数据采用中国气象局北京气候中心的 BCC-CSM1-1 大气环流模型；未来温室气体排放量(GHG)采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次报告中的温室气体排放场景(representative concentration pathways, RCP)，选择 RCP 2.6 和 RCP 8.5 等 2 种气候变化情景，分别代表温室气体增加对未来气候的最低和最高影响^[14]；中国行政区划图来源于国家基础地理信息中心网站(<http://www.ngcc.cn/>)。ArcGIS 软件版本为 10.2，MaxEnt 软件版本为 3.3.3k。

人类活动对鹅掌楸影响较大。本研究将人类活动强度数据(hf-v2geo)作为干扰变量进行研究。该数据来自于国际地球科学信息网络中心(Center for Earth Science Information Network, CIESIN)，能全面和客观体现人类活动的程度及空间分布^[19]。将下载数据进行格式与坐标转换，导入到 GIS 软件中裁剪得到中国地区的人类活动强度。

表 1 模拟鹅掌楸适生区的环境变量及其贡献率

Table 1 Environmental factors used for simulating suitable area of *L. chinense* and percent contribution

序号	变量因子	贡献率/%	序号	变量因子	贡献率/%
Bio12	年均降水量	50.3	Bio5	最暖月最高温	1.7
Bio16	最湿季度降水量	14.7	Bio4	温度季节性变化标准差	1.7
Bio6	最冷月最低温	5.8	Bio9	最干季度平均温度	1.7
Bio15	降水量变异系数	5.4	Bio8	最湿季度平均温度	1.1
Bio2	昼夜温差月均值	4.2	Bio19	最冷季度降水量	0.4
Bio3	等温线	3.8	Bio17	最干季度降水量	0.3
hf_v2geo	人类活动强度	2.3	Bio14	最干月降水量	0.2
Bio11	最冷季度平均温度	2.3	Bio13	最湿月降水量	0.1
Bio10	最暖季度平均温度	2.1	Bio1	年平均温度	0
Bio7	气温年较差	1.9	Bio18	最暖季度降水量	0

1.3 模型的设置与选择

将 19 个变量和人类活动强度数据导入 MaxEnt 软件。设分布数据的 25%作为测试集(test data)，剩余的 75%作为训练集(training data)。为保证结果的准确性，设置软件重复运算 10 次，输出分布值为逻辑斯蒂值(logistic)，表示分布概率(简称为分布值)，勾选 Do Jackknife to measure variable importance 和 Creat response Curves 2 项，其余选项保持软件默认设置。以省级行政区划图为底图，以 MaxEnt 10 次运算的平均值为依据，绘制鹅掌楸在当代、21 世纪 50 年代和 21 世纪 70 年代等 3 个时期不同气候变化情景下的适宜性分布图。

2 结果与分析

2.1 模型准确性检验

接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法在物种潜在分布预测模型评价中得到了广泛的应用，是目前认可度较高的诊断试验评价指标^[20]。ROC 曲线与横坐标围成的区域面积(the area under the ROC curve, AUC)，取值范围为 0~1，值越接近于 1，表明模型模拟的精确度越高。10 组训练集 AUC 均值为 0.973，测试集的均值为 0.953，表示软件的模拟效果达到了极高的水平^[21]，实验数据可信度高。本研究 10 次运算结果中数值最大的 1 组训练集 AUC 值为 0.971，测试集值为 0.968，可作为分析对象(图 1)。

2.2 环境因子的贡献率

MaxEnt 模型通过刀切法(Jackknife)得出各环境因子对模拟鹅掌楸分布的贡献率(contribution rate)，由表 1 可知：Bio12(年均降水量)、Bio16(最湿季度降水量)、Bio6(最冷月最低温)、Bio15(降水量变异系数)、和 Bio2(昼夜温差月均值)是对鹅掌楸的潜在分布影响最大的 5 个环境变量，累计贡献率达

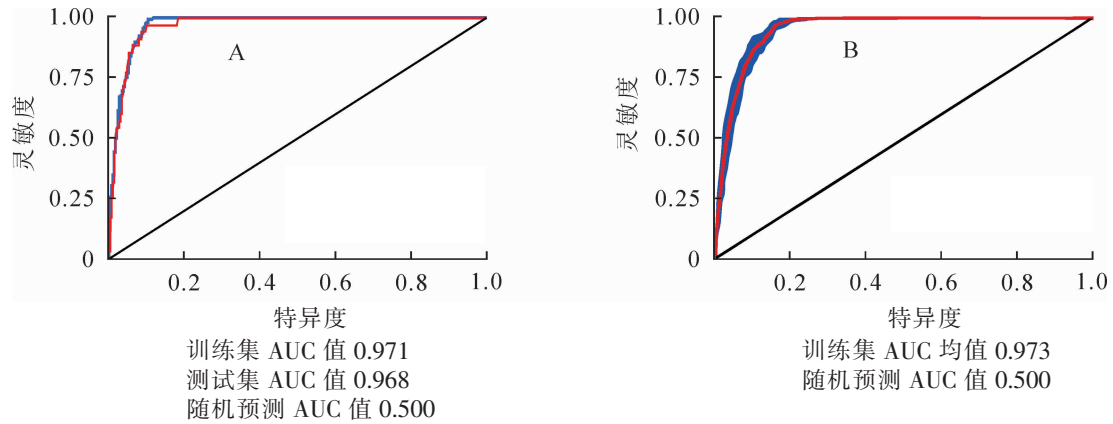


图1 MaxEnt模拟的AUC曲线分析

Figure 1 ROC curve analysis of MaxEnt simulation

80.4%；与此同时，人类活动强度对鹅掌楸分布的贡献率达2.3%，可见人类活动(如人口压力、土地利用、基础设施建设、交通运输等)对鹅掌楸繁衍和生长也存在着一定程度的影响^[19]。

2.3 鹅掌楸分布地区的气候特征

由表1模拟结果可知：降水因子对鹅掌楸分布影响最大。选取年均降水量、最湿季度降水量、最冷月最低温和降水量变异系数4个影响最大的变量进行具体分析，通过MaxEnt自动输出各变量因子的响应曲线(图2)，分析最适合鹅掌楸生长的生物气候变化范围。一般认为，当存在概率大于0.50时，其对应的环境变量数值更有利于鹅掌楸生长^[22]。由图2A可知：年均降水量小于1000 mm时，鹅掌楸的存在概率很低(<0.05)；随年均降水量增大，存在概率大幅增长。当存在概率大于0.50时可认为该变量处于适宜范围。鹅掌楸适宜生长的年均降水量范围为1200~1800 mm，1350 mm为其最适值。图2B显示：最湿季度降水量小于450 mm时，鹅掌楸存在概率极低；随着降水量的增大，存在概率急速上升，并在500~900 mm时达到并大于0.50，表明500~900 mm是鹅掌楸适宜的最湿季度降水量，600~850 mm是鹅掌楸生长最适宜的最湿季度降水量。最冷月最低温 ≤ -4.0 °C时，鹅掌楸存在概率较低；随着温度的升高，鹅掌楸存在概率迅速增大，在 -2.0 ~ -3.0 °C时存在概率超过0.50；最适温度点为 -1.0 °C。之后又快速回落，最冷月最低温超过5.0 °C后存在概率接近于0(图2C)。降水量变异系数 <45 时，鹅掌楸存在概率很低，适宜范围为45~65；当降水量变异系数为55时，鹅掌楸达最适生长，之后不断下降(图2D)。

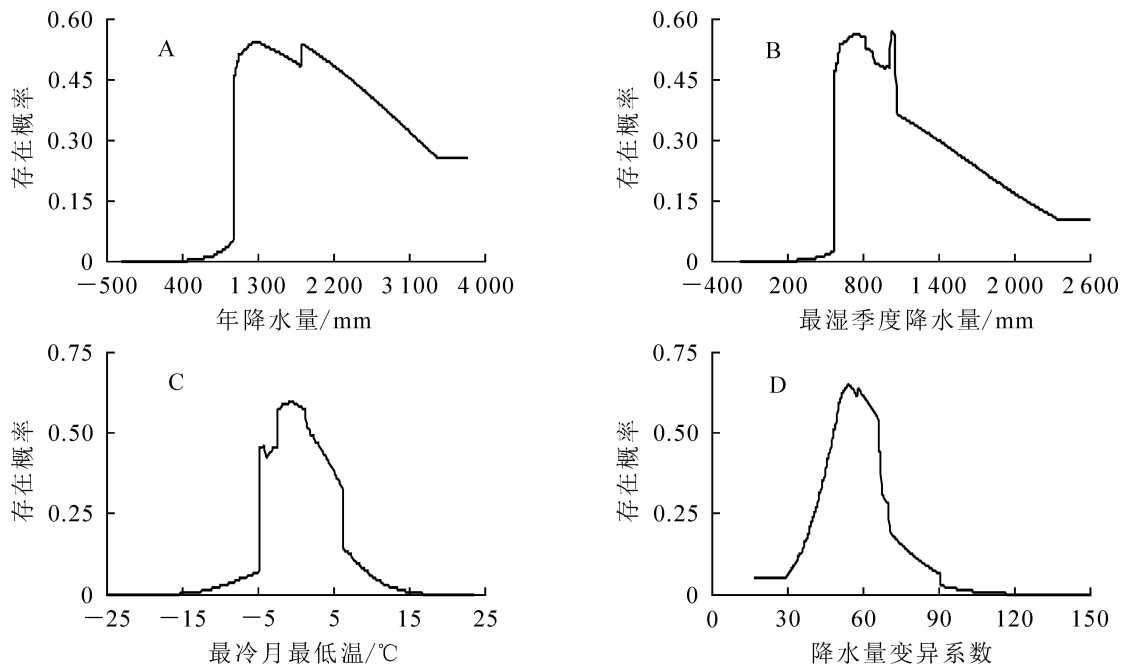


图2 鹅掌楸存在概率对主要气候环境因子的响应

Figure 2 Response curve of the existence probability of *L. chinense* to major climatic environmental factors

2.4 当代环境条件下鹅掌楸在中国的适生区分布

利用 ArcGIS 将 MaxEnt 模拟结果与中国省级行政区划图叠加,对鹅掌楸潜在分布区进行适生等级评价。采用人工分级方法对鹅掌楸潜在分布区进行适宜性等级划分,适生指数 0~0.1 为不适宜分布区,0.1~0.3 为低适宜分布区,0.3~0.5 为中适宜分布区,0.5~1.0 为高适宜分布区。统计每个等级内的栅格数并计算每个等级的面积(表 2)。当代生物气候环境下,鹅掌楸分布范围为 22°~32°N, 103°~123°E,覆盖了中国 19 个(省、市、自治区),总适宜面积约 129.8 万 km²。湖南、贵州和江西的适宜区最大,分别达 20.0 万 km², 15.9 万 km² 和 15.6 万 km²。按适宜等级划分,高适宜分布区面积约 20.7 万 km², 主要为中国西南和华东地区。相比而言,西南地区面积较大,分布也较集中;该区域北起大巴山南的重庆巫溪县和湖北恩施州,经方斗山、大娄山和武陵山,包括重庆石柱县、武隆县、彭水县、酉阳县,湖南湘西州等大部分地区,沿西南延伸到遵义等贵州中北部地区,往南沿苗岭、凤凰山呈带状,分布较为稀疏。华东地区北起天目山,沿仙霞岭、武夷山脉延伸至浙南和闽北交界的丘陵山区,自西向东包括江西上饶,安徽黄山,浙江丽水、台州和宁波等地。中适宜分布区面积约 51.9 万 km², 从高适宜分布区向北延伸到长江以北、秦岭以南,陕西安康,四川达州和巴中都有分布,向西至华蓥山一带,且在大凉山附近的四川内江、乐江、宜宾和资阳呈现小范围集中分布。低适宜分布区的范围则进一步扩大,面积约 57.2 万 km², 覆盖了贵州、重庆、湖南、江西及浙江全境,且在龙门山以东的四川中东部、武夷山至戴云山山脉间的福建中北部、大别山以南的湖北南部、南岭山脉的广西北部 and 广东北部等地出现大面积适宜区。另外,在花莲、新竹等中国台湾中北部地区,苏州、无锡和南通等江苏南部地区和上海部分地区也有零星分布。

表 2 当代鹅掌楸在中国各省(市)的潜在分布区面积

Table 2 Potential distribution area of *L. chinense* in various provinces of China in current

省份	高适宜分布区/ 万km ²	中适宜分布区/ 万km ²	低适宜分布区/ 万km ²	省份	高适宜分布区/ 万km ²	中适宜分布区/ 万km ²	低适宜分布区/ 万km ²
安徽	1.71	2.94	2.36	湖南	3.13	12.07	4.85
上海	0	0.02	0.37	江苏	0	0.37	2.11
福建	0.36	1.75	4.59	江西	0.92	7.26	7.48
广东	0.02	0.60	2.09	陕西	0.12	0.38	0.14
广西	0.79	2.25	5.87	四川	0.27	5.31	6.76
贵州	4.00	6.45	5.40	台湾	0.02	0.15	0.33
西藏	0	0.01	0.85	云南	0	0.29	3.79
河南	0.05	0.11	1.21	重庆	2.98	3.81	1.18
湖北	3.91	4.63	4.52	浙江	2.42	3.50	3.27

2.5 鹅掌楸未来的适生分布区

选取未来 21 世纪 50 年代和 21 世纪 70 年代的不同气候环境情景,利用 MaxEnt 模型对鹅掌楸的潜在地理分布进行模拟,得到未来不同气候情景下鹅掌楸适宜分布区分布面积(表 3)。结果表明:随着年代的推移,鹅掌楸在中国的适宜分布面积先稳定后减少,并呈现向高纬度地区和东部沿海地区轻微扩展趋势。当温室气体排放量达到典型目标值(RCP 8.5)时,该趋势更加明显。相比当代,RCP 8.5 情景下,21 世纪 50 年代适宜分布区将减少 0.5 万 km², 21 世纪 70 年代将减少 6.9 万 km², 下降幅度达到了 5.3%。RCP2.6 情景下,面积变化趋势同样为先稳定后下降,但变化幅度较小。具体来看,当代、21 世纪 50 年代和 21 世纪 70 年代的总适宜分布区面积分别为 129.8、131.3 和 126.9 万 km²; 低适宜分布区面积和高适宜分布区面积变化趋势相似,都是先增加后减少;中适宜分布区面积在当代最高,之后不断下降并保持稳定。从分布地区来看,与当代分布区相比,未来低适宜分布区较当代有比较明显的北抬趋势,江苏中北部和陕西南部都会出现一定范围的分布,中国台湾中北部的低适宜分布区也出现了明显的增加;中高适宜分布区开始呈现东西分布区连接中断的趋势,且分布区域出现破碎化,并出现向东部迁移的倾向。四川资阳、内江和宜宾的大凉山附近分布区域逐渐萎缩;丰城、新余、抚州等江西中北部,岳阳、常德等湖南北部以及鄂州、黄石等湖北东部的中高适宜分布区消失,自西向东的中高适宜分布区在此出

现不同程度的断裂。集中分布区仅存在于大巴山以南的湖北西南部和重庆东南部以及浙皖交界处的天目山一带。

3 讨论

3.1 主导气候因子对鹅掌楸的分布影响

本研究的20个环境因子中,降水相关因子对鹅掌楸分布影响最大,累计贡献率达到71.4%,其中,年均降水量贡献率最大。MaxEnt模型预测1 200~1 800 mm为鹅掌楸生长的最适年降水量范围,该结果与王章荣^[23]提出的鹅掌楸分布于雨量充沛、湿度大、季节分明的亚热带、暖温带气候区,年均降水量为800~2 300 mm的结论相符。事实上,从中国气象局所查询到的各个站点的气候数据显示,已存在的154个标本分布点年均降水量都在这一范围,特别是高适宜分布区(贵州、四川等)的年均降水量都接近最适降水量(1 350 mm)。最冷月最低温对鹅掌楸的分布也有一定的影响,低于-4.0℃和高于5.0℃以上都不适宜鹅掌楸生长。正因如此,在当代,气温和降水两大影响因子将鹅掌楸的适生范围限定在了秦岭—淮河以南;而福建南部、广东等低纬度地区虽然冬季温度较高,但鹅掌楸也较少分布。此外,季节性降雨(Bio15),极端气温(Bio6、Bio10、Bio11)和降水(Bio16)也对其生长存在影响。

3.2 气候变化下鹅掌楸地理空间分布的变化

目前,学者大都认为未来物种的适宜分布面积将不断减少,且有向高纬度和高海拔地区迁移的趋势^[24]。如MCKENNEY等^[25]发现:在未来北美130种树木分布范围都将出现一定程度的缩减。吴建国^[26]对国内7种乔木的研究发现,气候变化下这些乔木未来分布面积将不断萎缩,且有向高海拔区域扩散的趋势。近年来,借助于MaxEnt等模型分析认为,未来3种气候情景下黄山花楸*Sorbus amabilis*适生区面积较当代缩减^[27];白栎*Quercus fabri*可能向北扩张,且面积也有一定程度的缩小^[28]。但也有学者得出不同的结论。关心怡等^[14]在研究麻栎的适宜性分布时认为:气候变暖对部分植物生长有促进作用,在未来气候条件下麻栎适生区域面积总体上是增加的。本研究预测了21世纪50年代和21世纪70年代不同RCP环境情景下鹅掌楸的潜在分布区,结果表明:鹅掌楸适宜分布区面积呈现先稳定后不断减少的趋势。作为喜湿植物,鹅掌楸对年均降水量的适宜范围较大,有一定的耐寒性,可以推测这是未来鹅掌楸适宜面积保持稳定的一个原因。但21世纪50年代鹅掌楸低适宜分布范围有明显的北抬趋势,在陕西南部、江苏中部等地出现较大面积的分布区。这是温度和降水量双重影响的结果。一方面降水作为最大的影响因子,在全球变暖的背景下,中国区域内的降水量会不断增加,尤以北方地区最为明显^[29];另一方面不断增大的降水势必会破坏低海拔生境^[27]。到21世纪70年代,气温和降水增大趋势更加明显,鹅掌楸原生长区域的适宜度进一步降低。中适宜分布区和高适宜分布区呈现岛状分布,由当前西南、华东2个高适生区缩减为以天目山到黄山为中心的东部片区和以湖北、湖南和贵州交界处为中心的西部片区;剩余中高适宜分布区较为零散,分布面积也因此缩小。数据显示,在RCP 8.5的情景下,总适宜面积相比当代将下降5.3%。

3.3 鹅掌楸的栽培与保护

就预测结果而言,鹅掌楸未来适宜分布区不容乐观。当前及今后,鹅掌楸的保护工作需更加深入。一是扩大种植范围,在进一步认识鹅掌楸适生气候环境前提下,在未知的适生区域和未来新增区域上划定保护区,减少适生区尤其是新增适生区域的人为干扰;加强已有适生区域,特别是高适宜分布区的保护,防止乱砍乱伐,使之成为鹅掌楸应对气候变化的安全地和避难所^[30]。另一方面,鹅掌楸是优美的园林树种,可在相关区域作为园林绿化树种进行推广,通过多种途径提高种群数量。本研究建模时未将土壤因子,地形数据(包括坡度和坡向)等作为影响因子,栽培时建议在本研究基础上,选择排水良好的酸

表3 鹅掌楸不同气候情景下的潜在分布区的面积
Table 3 Areas of potential distribution under different climate scenarios of *L. chinense*

时段	气候情景	低适宜分布区/万km ²	中适宜分布区/万km ²	高适宜分布区/万km ²	合计/万km ²
当代		57.2	51.9	20.7	129.8
21世纪	RCP 2.6	62.3	44.6	22.4	131.3
50年代	RCP 8.5	61.9	45.1	24.3	129.3
21世纪	RCP 2.6	60.6	44.1	22.3	126.9
70年代	RCP 8.5	56.1	46.1	20.7	122.9

性土(pH 4.5~6.5)且具有适宜光照的区域种植^[31], 为其提供优越的生长环境。

4 参考文献

- [1] 傅立国. 中国植物红皮书[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 方炎明. 中国鹅掌楸的地理分布与空间格局[J]. 南京林业大学学报, 1994, **18**(2): 13 – 18.
FANG Yanming. Geographical distribution and spatial pattern of *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg. [J]. *J Nanjing For Univ*, 1994, **18**(2): 13 – 18.
- [3] 贺善安, 郝日明. 中国鹅掌楸自然种群动态及其致危生境的研究[J]. 植物生态学报, 1999, **23**(1): 87 – 95.
HE Shan'an, HAO Riming. Study on the natural population dynamics and the endangering habitat of *Liriodendron chinense* in China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1999, **23**(1): 87 – 95.
- [4] 郝日明, 贺善安, 汤诗杰, 等. 鹅掌楸在其自然分布及其特点[J]. 植物资源与环境, 1995, **4**(1): 1 – 6.
HAO Riming, HE Shan'an, TANG Shijie, et al. Geographical distribution of *Liriodendron chinense* in China and its significance [J]. *J Plant Resour Environ*, 1995, **4**(1): 1 – 6.
- [5] 陆畅, 李斌, 刘儒, 等. 不同种源鹅掌楸抗寒性综合评价[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(3): 455 – 461.
LU Chang, LI Bin, LIU Ru, et al. Comprehensive evaluation on cold resistance of *Liriodendron chinense* from four provenances [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(3): 455 – 461.
- [6] 刘丹, 顾万春, 杨传平. 中国鹅掌楸遗传多样性研究[J]. 林业科学, 2006, **42**(2): 116 – 119.
LIU Dan, GU Wanchun, YANG Chuanping. Genetic diversity of *Liriodendron chinense* in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(2): 116 – 119.
- [7] 张晓平, 王沁峰, 方炎明, 等. 淹水胁迫对浙江种源鹅掌楸光合特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, **31**(3): 136 – 138.
ZHANG Xiaoping, WANG Qinfeng, FANG Yanming, et al. Effects of different water stress on photosynthetic characters of *Liriodendron chinense* from Zhejiang Province [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **31**(3): 136 – 138.
- [8] KOZAK K H, GRAHAM C H, WIENS J J. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology [J]. *Trends Ecol Evol*, 2008, **23**(3): 141 – 148. doi: 10.1016/j.tree.2008.02.001.
- [9] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. *Ecol Lett*, 2012, **15**(4): 365 – 377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.
- [10] ESPÍNDOLA A, PELLISSIER L, MAIORANO L, et al. Predicting present and future intra-specific genetic structure through niche hindcasting across 24 millennia [J]. *Ecol Lett*, 2012, **15**(7): 649 – 657. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01779.x.
- [11] AHMED S E, McINERNEY G, O'HARA K, et al. Scientists and software—surveying the species distribution modelling community [J]. *Diversity Distrib*, 2015, **21**(3): 258 – 267.
- [12] BARBOSA F G, SCHNECK F. Characteristics of the top-cited papers in species distribution predictive models [J]. *Ecol Model*, 2015, **313**: 77 – 83.
- [13] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, **190**(3/4): 231 – 259.
- [14] 关心怡, 石慰, 曹坤芳. 未来气候变化对广布种麻栎地理分布的影响和主导气候因子分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, **26**(6): 661 – 668.
GUAN Xinyi, SHI Wei, CAO Kunfang. Effect of climate change in future on geographical distribution of widespread *Quercus acutissima* and analysis of dominant climatic factors [J]. *J Tropic Subtropic Bot*, 2018, **26**(6): 661 – 668.
- [15] 李绒, 角媛梅, 刘歆, 等. 基于 MaxEnt 模型的绿孔雀适宜生境评价及廊道设计[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(3): 919 – 926.
LI Rong, JIAO Yuanmei, LIU Xin, et al. Suitability evaluation and corridor design of habitats for *Pavo muticus* based on MaxEnt Model [J]. *Chin J Ecol*, 2019, **38**(3): 919 – 926.
- [16] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8556 – 8566.
WANG Rulin, LI Qing, FENG Chuanhong, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(24): 8556 – 8566.

- [17] 刘米兰, 李明阳, 王晓俊. 快速交通对城市郊区獐的生境影响分析[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(6): 897 - 903.
LIU Milan, LI Mingyang, WANG Xiaojun. Impact of rapid transportation network on the potential habitat of *Hydropotes inermis* in suburban areas [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29**(6): 897 - 903.
- [18] 谢新锐, 李亭亭, 汪正祥, 等. 基于 GIS 与 MAXENT 模型分析的国家公园传统用地适宜性评价及应用研究: 以神农架国家公园为例[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2017, **39**(5): 437 - 443, 450.
XIE Xinrui, LI Tingting, WANG Zhengxiang, *et al.* The application research on suitability evaluation of traditional land use in national park based on GIS and MAXENT model, Shennongjia National Park as an example [J]. *J Hubei Univ Nat Sci*, 2017, **39**(5): 437 - 443, 450.
- [19] 迈迪娜·吐尔逊. 意大利苍耳在新疆的适生区分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
Maidina Tuerxun. *Studies on Suitable Geographic Distribution of Xanthium italicum Moretti in Xinjiang* [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.
- [20] 刘超, 霍宏亮, 田路明, 等. 基于 MaxEnt 模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(11): 3696 - 3704.
LIU Chao, HUO Hongliang, TIAN Luming, *et al.* Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(11): 3696 - 3704.
- [21] HANLEY J A, McNEIL B J. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve [J]. *Radiology*, 1982, **143**: 29 - 36.
- [22] 麻亚鸿. 基于最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(ArcGIS)预测藓类植物的地理分布范围: 以广西花屏自然保护区为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
MA Yahong. *Applying MaxEnt and ArcGIS to Predict Mosses Geographic Distribution Range: A Case Study of Huaping Nature Reserve, Guangxi* [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013.
- [23] 王章荣. 鹅掌楸属树种杂交育种与利用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [24] PARMESAN C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2006, **37**: 637 - 669.
- [25] MCKENNEY D W, PEDLAR J H, LAWRENCE K, *et al.* Potential impacts of climate change on the distribution of north American trees [J]. *Bioscience*, 2007, **57**(11): 939 - 948.
- [26] 吴建国. 气候变化对我国 7 种植物潜在分布的影响[J]. 广西植物, 2011, **31**(5): 595 - 607, 694.
WU Jianguo. The potential effects of climate change on the distributions of 7 plants in China [J]. *Guihaia*, 2011, **31**(5): 595 - 607, 694.
- [27] 张兴旺, 李垚, 谢艳萍, 等. 气候变化对黄山花楸潜在地理分布的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2018, **27**(4): 31 - 41.
ZHANG Xingwang, LI Yao, XIE Yanping, *et al.* Effect of climate change on potential geographical distribution of *Sorbus amabilis* [J]. *J Plant Resour Environ*, 2018, **27**(4): 31 - 41.
- [28] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区[J]. 林业科学, 2018, **54**(8): 154 - 165.
LI Xuan, LI Yao, FANG Yanming. Prediction of potential suitable distribution areas of *Quercus fabri* in China based on an Optimized Maxent model [J]. *Sci Silv Sin*, 2018, **54**(8): 154 - 165.
- [29] 江志红, 张霞, 王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估[J]. 地理研究, 2008, **27**(4): 787 - 799.
JIANG Zhihong, ZHANG Xia, WANG Ji. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models [J]. *Geogr Res*, 2008, **27**(4): 787 - 799.
- [30] 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(2): 496 - 502.
ZHANG Yinbo, LIU Yanlan, QIN Hao, *et al.* Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(2): 496 - 502.
- [31] 周家骏, 高林. 优良阔叶树种造林技术[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1985.