

未来气候变化对孑遗植物鹅掌楸地理分布的影响

翟新宇*, 申宇芳*, 朱圣华, 涂忠华, 张成阁, 李火根**

(南京林业大学林木遗传与生物技术教育部重点实验室, 南京林业大学南方现代林业创新中心, 南京 210037)

摘要: 为了解未来气候波动对鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)潜在适生区的影响, 利用最大熵模型(Maxent)和地理信息系统(ArcGIS)软件, 结合物种地理分布点信息, 对鹅掌楸当前适生区分布进行了模拟和划分, 同时预测了 2061–2080 年间气候变化条件下鹅掌楸的潜在适生分布区变化, 进而分析影响鹅掌楸地理分布的主要气候因子。结果表明, Maxent 模型预测的准确性较高, 受试者工作特征曲线(ROC)的曲线下面积(AUC)均大于 0.9。在未来 4 种不同的气候变化场景下(RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5)鹅掌楸的地理分布发生变化, 在 RCP 4.5 情景下, 鹅掌楸适生面积明显增加; RCP 8.5 情景下适生面积明显减少, 尤其在贵州地区以及贵州、重庆与湖南的交界处。因此, 鹅掌楸适生区分布的几何中心不变, 而适生面积随着温室气体浓度的增加呈现先增加后减少的趋势。昼夜温差月均值、最湿季降雨和最干季降雨是影响鹅掌楸地理分布的主要气候因子, 其累计贡献率达 77.1%。

关键词: 鹅掌楸; Maxent 模型; 气候变化; 潜在适生区

doi: 10.11926/jtsb.4322

Potential Impacts of Climate Change in Future on the Geographical Distributions of Relic *Liriodendron chinense*

ZHAI Xin-yu*, SHEN Yu-fang*, ZHU Sheng-hua, TU Zhong-hua, ZHANG Cheng-ge, LI Huo-gen**

(Key Laboratory of Forest Genetics & Biotechnology of Ministry of Education, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China)

Abstract: It is of great significance to quantify the impacts of future climate fluctuation on the potential suitable area of *Liriodendron chinense* and to analyze the climatic factors affecting its distributions, so that to better protect its genetic resources. The Maxent model and ArcGIS software, combined with geographic distribution data, are used to predict the distribution of current and future (2061–2080) potential suitable areas of *L. chinense*, the distribution of potential suitable areas of *L. chinense* under future climate fluctuations, and the main climatic factors affecting the geographical distribution of *L. chinense* were also discussed. The results showed that Maxent model was a good choice when applying to predict the suitable distribution areas of *L. chinense* due to its high accuracy, and the area under the curve (AUC) of the working characteristic curve (ROC) of subjects is greater than 0.9. The geographic distribution of *L. chinense* would change with four potential scenarios of carbon emission (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) in future. The suitable area of *L. chinense* increase significantly under the condition of RCP4.5, which was significantly reduced under the condition of RCP 8.5, especially in Guizhou and the border of Chongqing, Guizhou and Hunan. Therefore, with the increase of greenhouse gas concentration, the suitable distribution area of *L. chinense* will increase at first and then decrease, while the

收稿日期: 2020–10–14 接受日期: 2020–11–03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770718, 31470660)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31770718, 31470660).

作者简介: 翟新宇(1996~), 女, 在读研究生, 主要从事森林遗传学研究。E-mail: xyzhai@njfu.edu.cn

* 并列第一作者

** 通信作者 Corresponding author. E-mail: hgli@njfu.edu.cn

distribution geographic center will keep unchanged. The three variables of monthly mean diurnal range, precipitation of wettest and driest quarters are the main factors affecting the geographic distribution of *L. chinense* with the total contribution rate of 77.1%.

Key words: *Liriodendron chinense*; Maxent model; Climate change; Potential suitable area

植被-气候互相作用关系是生物地理学和全球气候变化研究的热点问题之一^[1-3]。气候被认为是决定地球上物种分布的最主要环境因子,气候的变化对生物多样性和物种的分布范围有着巨大的影响,物种分布格局的变化也能反映气候的变化^[4-6]。随着工业化进程加快,温室气体的排放增加,全球气候发生了巨大变化。例如:全球变暖和极端气候。而气候变化将近一步对自然界的生物生存和发展产生深远影响。许多陆地、淡水和海洋物种改变了地理分布范围、季节性活动、迁移模式、丰度和物种相互作用方式,以应对正在发生的气候变化^[7-8]。目前,随着全球气候变化,许多物种适宜的栖息地正在不断的减少和丧失,地球生物多样性正在急剧降低。因此,我们迫切需要采取一些策略来减缓全球气候变化导致的物种多样性降低。有效保护和经营策略的制订则需要我们清楚地了解目标物种的地理分布和生物学特性。因此,确定这些物种的潜在地理分布和预测气候变化将如何影响它们的地理分布具有重要意义。

目前,利用物种分布模型(species distribution model, SDM)研究气候变化对物种潜在分布区的影响及模拟预测气候变化情景下各物种的适宜分布区已经得到了广泛的应用^[9-11]。SDM 原理是利用物种已有的分布资料和环境数据产生以生态位为基础的物种生态需求,探索物种已知分布区的环境特征与潜在分布区的非随机关系,预测未来气候环境下物种的实际分布与潜在分布^[12-13]。目前常用于预测物种潜在分布区的生态位模型有 GARP (genetic algorithm for rule-set production, 规则集生成的遗传算法)^[14]、Maxent (maximum entropy, 最大熵模型)^[15]、ENFA (ecological niche factor analysis, 生态位因子分析)^[16]、Bioclim (bioclimate analysis and prediction system, 生物气候分析和预测系统)^[17]和 Domain (domain model, 领域模型)^[18], 其中 Maxent 是应用范围最为广泛和最具代表性的生态位模型。Maxent 是一个密度估计和物种分布预测模型,是以最大熵理论为基础的一种选择型方法。Maxent 从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布,

在确定特征空间(物种已知分布区域)前提下,寻找限制物种分布的约束条件(环境变量),构建约束集合,建立物种与环境二者之间的相互关系^[19]。与其他 4 种模型相比,Maxent 预测得到的结果精度更高,具有运算结果稳定、运算时间短等优点^[15]。Maxent 模型依据物种实际分布点进行建模,即使在分布点数据较少的情况下也有较好的预测效果^[20-21],并可对预测结果进行检验^[22],因此该模型被广泛应用于物种分布建模。曹向锋等^[13]应用了 5 种生态位模型对黄顶菊(*Flaveria bidentis*)在中国的潜在适生区进行了比较预测,结果表明,Maxent 模型的模拟精度最高;张海娟等^[23]利用 GARP 和 Maxent 模型分别对薇甘菊(*Mikania micrantha*)在中国适生区进行了预测,结果发现 Maxent 模型的预测结果更准确、运行速度更快,更适用于薇甘菊的适生区预测。

鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)为木兰科(Magnoliaceae)鹅掌楸属落叶高大乔木,是第三纪孑遗植物。鹅掌楸属在第三纪曾广泛分布于北半球,由于受第三纪晚期及第四纪冰期气候波动的影响,当前该属只遗留下了 2 种:鹅掌楸和北美鹅掌楸^[24]。北美鹅掌楸(*L. tulipifera*)广泛分布于美国的东南部,为当地的优势树种,而鹅掌楸则零星分布于被称为“冰期避难所”的中国长江流域以南的亚热带气候区(103°15'~120°17' E, 22°37'~32°38' N, 海拔 450~1 800 m)^[25-26],鹅掌楸现有分布区年平均气温 10℃~18℃,最低气温-14℃,7 月平均气温 24℃~28℃,年降水量 800~2 300 mm,相对湿度 75%~85%^[27]。鹅掌楸习性喜光,适温暖湿润气候且有一定的耐寒性,喜土层深厚肥沃,湿度适宜且排水良好的酸性或微酸性土壤^[28]。由于自身的生殖生物学障碍以及适生环境遭受人为破坏,鹅掌楸的种群数量急剧减少,趋于濒危状态^[29],现已被列为我国二级濒危保护树种^[25,30]。目前关于鹅掌楸的研究主要集中在群体遗传学^[31-32]、生殖生物学^[33]、杂交育种与子代测定^[34-35]和无性繁殖技术^[36]等方面,而有关该物种潜在适生区的报道较少。因此,本文通过收集和筛选鹅掌楸物种地理分布信息,结合气候环境数据,利用 Maxent 模型和 ArcGIS 软件模拟未来气候变化大

环境背景下鹅掌楸的潜在适生区, 分析未来气候波动对鹅掌楸地理分布的影响, 为制定鹅掌楸遗传资源保护策略提供参考, 并为鹅掌楸资源的管理、保护、引种和应用等方面提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 物种分布数据收集和处理

本研究所用的鹅掌楸分布数据来源于以下3个方面: (1) 通过野外实地调查获得的鹅掌楸分布数据; (2) 从全球生物多样性信息网络(Global Information Biodiversity Facility, <https://www.gbif.org/>)下载带有经纬度坐标的鹅掌楸分布数据; (3) 从中国数字植物标本馆(Chinese Virtual Herbarium, <http://www.cvh.ac.cn/>)获得鹅掌楸在中国的分布数据。将3种途径获得的所有数据整合, 去冗余, 最终得到全面且准确的鹅掌楸自然分布点(图1), 将样本的经纬度坐标存储在Excel数据库中, 并转换成.csv格式, 用于构建Maxent模型。

1.2 环境变量数据及预处理

从全球气候数据库网站(<http://www.worldclim.org>)中下载当前时期气候数据, 共包含19种生物气

候变量(表1), 数据分辨率2.5 min。未来气候条件下的数据(2061–2080年)采用政府间气候变化委员会(IPCC)第五次报告中的温室气体排放场景(representative concentration pathways, RCP)^[7], 选择21世纪70年代的RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0和RCP 8.5共4种RCP情境, 表示强迫辐射值分别上升2.6、4.5、6.0和8.5 W/m², 并且CO₂当量浓度上升至相应浓度时的全球气候变化。

选择的19个生物气候变量间存在着一定的相关性, 为了避免过度拟合, 这些变量经过相关性分析后才可用于建模使用^[37]。本研究采用ArcGis 10.2软件中的Mutivariate工具, 执行Band Collection Statistics命令, 对各变量图层进行多重共线性分析, 检验各变量之间的相关性, 若两个变量之间的相关性的绝对值大于0.8, 则只选择1个变量参与Maxent模型运算。根据相关性分析结果, 最终选择Bio02、Bio03、Bio04、Bio08、Bio09、Bio15、Bio16和Bio17共8个气候变量参与建模。结合实际情况, 鹅掌楸属植物对温度(Bio11)和湿度(Bio13)比较敏感, 故将Bio11和Bio13这2个气候变量也加入其中; 另外考虑到海拔(DEM)和坡度(SLO)对物种分布的影响, 故将海拔和坡度这2个地理变量也加入其中。最终筛选出12个生物气候地理变量参与建模。

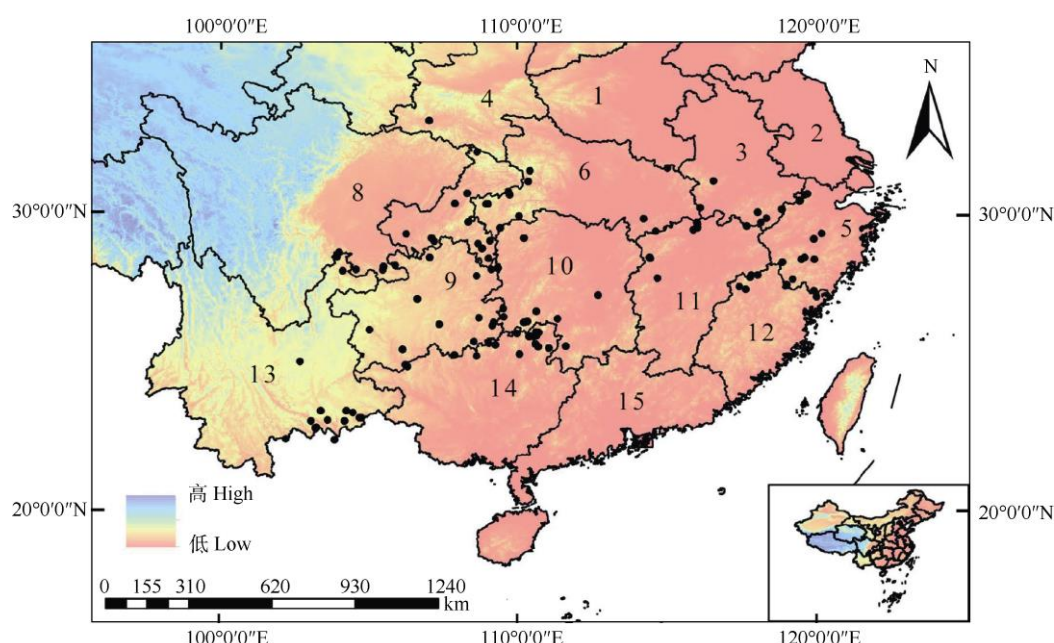


图1 鹅掌楸在中国的分布点数据。1: 河南; 2: 江苏; 3: 安徽; 4: 陕西; 5: 浙江; 6: 湖北; 7: 重庆; 8: 四川; 9: 贵州; 10: 湖南; 11: 江西; 12: 福建; 13: 云南; 14: 广西; 15: 广东。

Fig. 1 Distribution sites of *Liriodendron chinense* in China. 1: Henan; 2: Jiangsu; 3: Anhui; 4: Shanxi; 5: Zhejiang; 6: Hubei; 7: Chongqing; 8: Sichuan; 9: Guizhou; 10: Hunan; 12: Fujian; 13: Yunnan; 14: Guangxi; 15: Guangdong.

表 1 19 种生物气候变量

Table 1 19 bioclimatic variables

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit	变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
Bio01	年均温 Annual mean temperature	℃	Bio11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter	℃
Bio02	昼夜温差月均值 Mean diurnal range	℃	Bio12	年均降雨量 Annual precipitation	mm
Bio03	昼夜温差与年温差比值 Isothermality	—	Bio13	最湿月降雨量 Precipitation of the wettest month	mm
Bio04	温度季节性 Temperature seasonality	—	Bio14	最干月降雨量 Precipitation of the driest month	mm
Bio05	最热月最高温 Max temperature of the warmest month	℃	Bio15	季节性降水 Precipitation seasonality	—
Bio06	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	℃	Bio16	最湿季降雨量 Precipitation of the wettest quarter	mm
Bio07	年温变化范围 Temperature annual range	℃	Bio17	最干季降雨量 Precipitation of the driest quarter	mm
Bio08	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	℃	Bio18	最暖季平均降雨量 Precipitation of the warmest quarter	mm
Bio09	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	℃	Bio19	最冷季平均降雨量 Precipitation of the coldest quarter	mm
Bio10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter	℃			

1.3 Maxent 模型构建和精度验证

在本研究中，将气候数据和鹅掌楸地理分布数据导入 Maxent 软件中进行建模分析，模型参数设置为：选择 25% 的分布点数据作为测试集，75% 的分布点数据作为训练集，采用交叉验证法(cross validate)，环境参数设置中选择刀切法(jackknife)，其余参数为软件默认值，重复运行 10 次，最终输出的 ASCII 结果文件是 10 次重复的平均值。以软件内建的变量贡献率、响应曲线和刀切法检验分析模型中各气候变量的相对重要性及其对鹅掌楸适宜分布区的影响。

Maxent 模型采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析法进行模型精度检验，ROC 曲线与横坐标围成面积(AUC, area under curve)的大小作为衡量模型预测准确度的指标。AUC 值介于 0 和 1 之间，数值越大，代表越远离随机分布，环境变量与待预测物种地理分布的相关性越大，模型拟合效果越好，预测结果越准确，通常根据 AUC 值将模型精度分为 5 级：小于 0.6 为失败；0.6~0.7 为较差；0.7~0.8 为一般；0.8~0.9 为准确；0.9~1 为极准确^[38]。

1.4 鹅掌楸适生区划分

将 Maxent 模型导出的鹅掌楸潜在适生图导入 ArcGIS 软件，选择 ArcGIS 软件中的 Reclass 工具，执行 Reclassify 命令对鹅掌楸适生区图层进行分类，得到鹅掌楸潜在适生区分布图像，统计未来不同气候情境下鹅掌楸适生区的面积。依据鹅掌楸存在的概率将适生区划分为 3 个等级：大于 0.5 为适生区，0.3~0.5 为低适生区，小于 0.3 为非适生区。

2 结果和分析

2.1 Maxent 模型精度验证

基于 Maxent 模型模拟鹅掌楸在我国的潜在适生区，采用 ROC 曲线作为模型预测准确性的衡量指标。ROC 曲线评价结果表明(图 2)，鹅掌楸适生区预测模型的平均 AUC 值大于 0.9，表明所构建的 Maxent 模型模拟预测准确性较高，预测结果可信，亦说明 Maxent 模型适宜用于预测鹅掌楸地理分布与气候变量间关系的研究。

2.2 鹅掌楸地理分布的影响因子

Maxent 模型采用刀切法检验各环境变量对鹅掌楸适生区影响的重要程度。鹅掌楸的环境因子刀切法检验结果见图 3，按照各环境变量对 Maxent 模型的贡献率大小进行排序，结果表明，用于 Maxent 模型预测的 12 个环境变量中，昼夜温差月均值(Bio02, 37.9%)、最湿季降雨量(Bio16, 20.8%)、最干季降雨量(Bio17, 18.4%)是贡献率最高的 3 个环境变量，累计贡献 77.1% 的影响效应，表明 Bio02、Bio16 和 Bio17 是影响鹅掌楸地理分布的主要环境影响因子。最湿季均温(Bio08, 7%)、最干季均温(Bio09, 5.1%)、海拔(DEM, 3.1%)、坡度(SLO, 2.7%)、季节性降水(Bio15, 2%)和最湿月降雨量(Bio13, 1.4%)这 6 个环境变量是影响鹅掌楸地理分布的次要环境因子。昼夜温差与年温差比值(Bio03, 0.9%)、温度季节性(Bio04, 0.5%)和最冷季均温(Bio11, 0.3%)这 3 个环境变量对鹅掌楸地理分布的影响较小。在 12 个环境变量中，与温度有关的环境变量合计贡献率为 51.7%，与降雨量有关的为 42.6%，海拔和坡度为

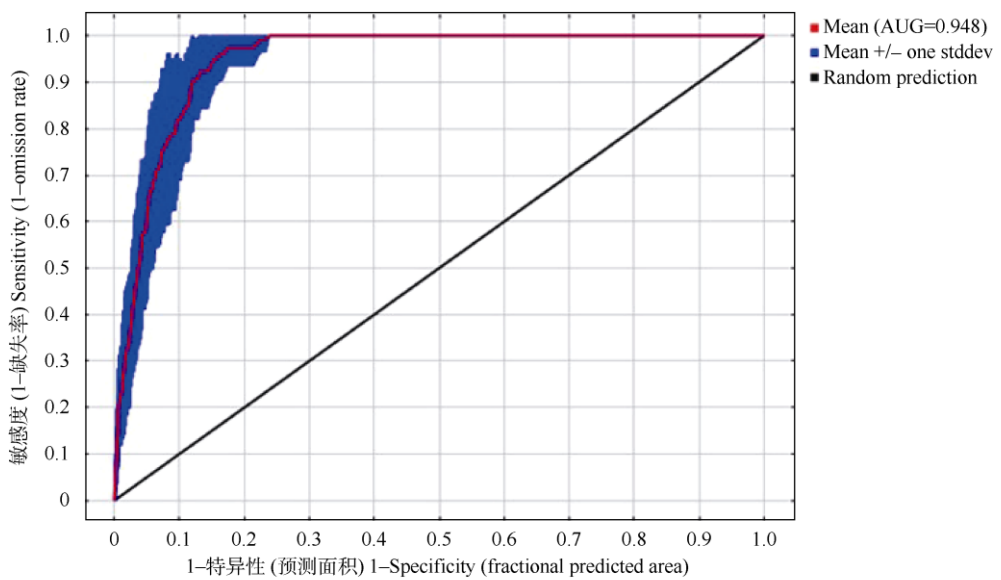


图 2 Maxent 模型在当前条件下的 AUC 结果

Fig. 2 ROC for *Liriodendron chinense* using Maxent model

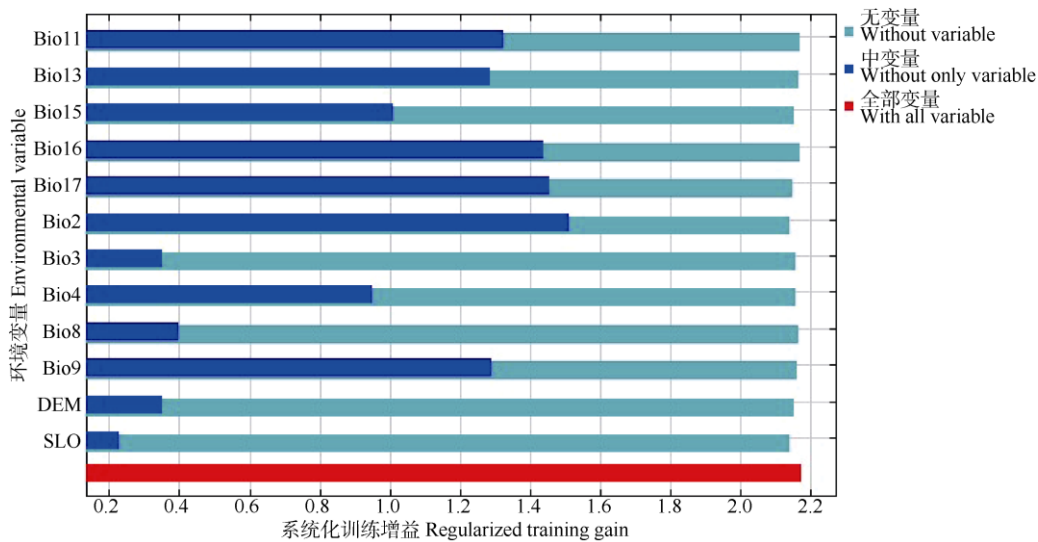


图 3 鹅掌楸环境因子刀切法检验结果。Bio02~Bio04、Bio08、Bio09、Bio11、Bio13、Bio15~Bio17 见表 1; DEM: 海拔; SLO: 坡度。下图同。

Fig. 3 Jackknife test result of environmental factors for *Liriodendron chinense*. Bio02~ Bio04, Bio08, Bio09, Bio11, Bio13, Bio15~ Bio17 see Table 1; DEM: Elevation; SLO: Slope. The same is following Figures.

5.8%，说明影响鹅掌楸地理分布的主要环境因子是温度和降雨。

由图 3 可见，Bio02、Bio17 和 Bio16 是影响鹅掌楸地理分布的主要环境因子，选取这 3 个环境因子进行具体分析，通过 Maxent 输出得到各环境因子变量的单因子响应曲线，单因子响应曲线表示了鹅掌楸的存在概率与各环境因子之间的关系。从图 4 可见，适宜的 Bio02 在 9℃ 以下，且 7℃ 时的适生概率达到最大，5℃ 以下曲线趋于平缓；Bio16

在 900 mm 时鹅掌楸的存在概率最高，适宜鹅掌楸生存的 Bio16 范围为 500~1 200 mm；Bio17 大于 50 mm 为宜，且以 175~185 mm 的适生概率最大，当降雨量大于 190 mm 时达到稳定。

2.3 鹅掌楸当前及未来气候条件下的适生区

在当前的气候条件下，运算出的鹅掌楸适生区主要集中在我国长江流域以南地区，包括安徽、浙江、重庆、湖南、贵州、江西等省市，与鹅掌楸的

实际地理分布点基本一致(图 5), 模型模拟的潜在适生区与实际分布相吻合。同时, 在当前环境下, 鹅掌楸的适生区面积约为 $2.952 \times 10^6 \text{ km}^2$, 低适生区的面积约为 $4.380 \times 10^6 \text{ km}^2$, 非适生区面积则有 $8.884 \times 10^7 \text{ km}^2$, 总适生区面积(适生区面积 + 低适生区面积)仅占我国国土面积的 7.62%。

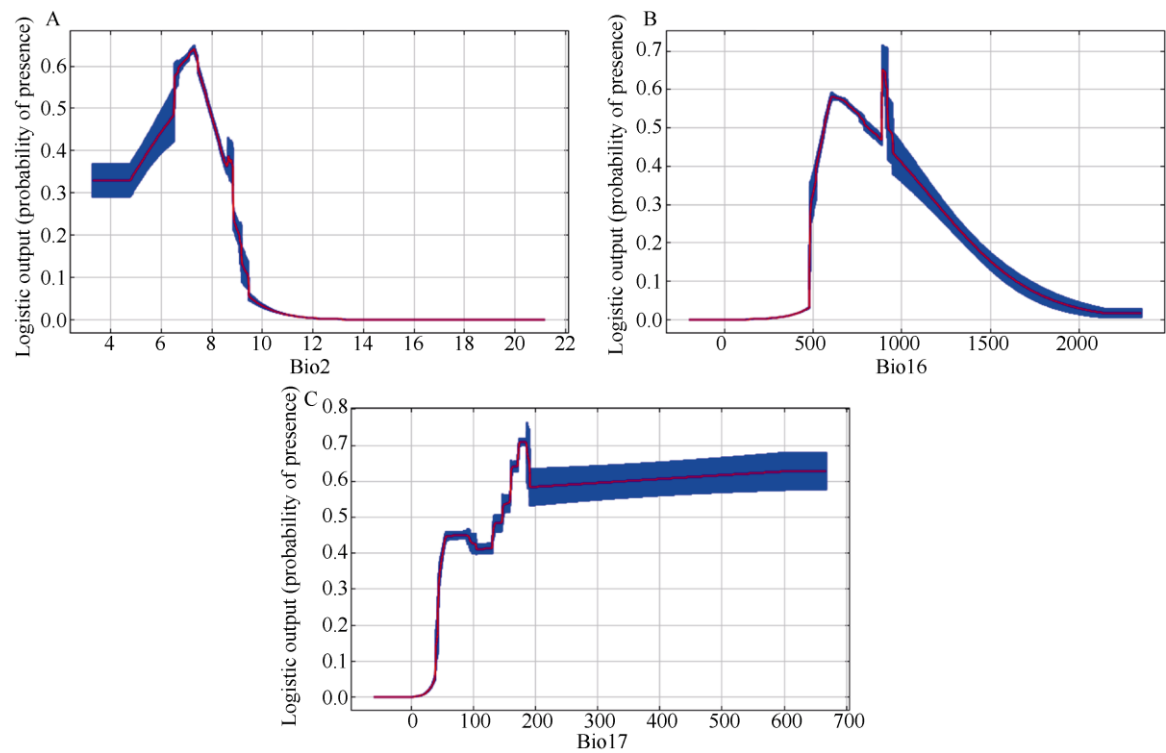


图 4 鹅掌楸主导环境变量响应曲线

Fig. 4 Response curves of dominant environmental variables of *Liriodendron chinense*

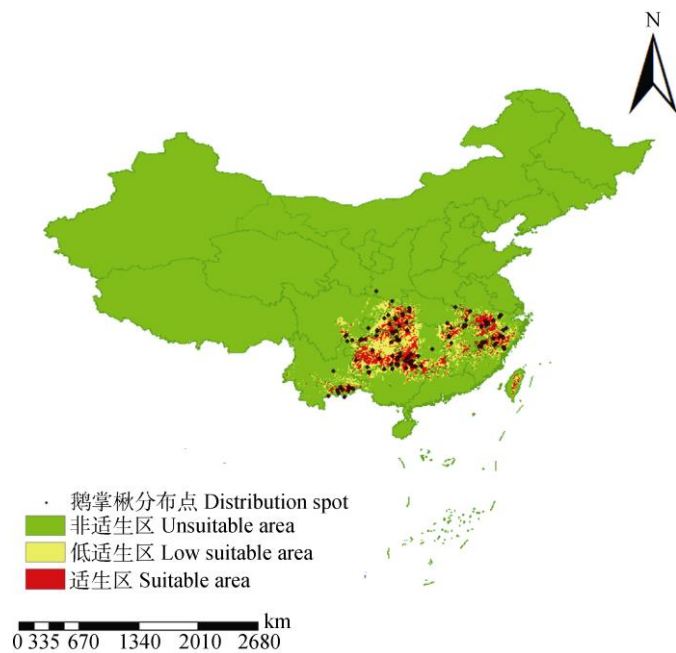


图 5 Maxent 模型预测当前气候条件下鹅掌楸在我国的潜在适生区

Fig. 5 Potential adaptability of *Liriodendron chinense* in China under current climatic conditions by Maxent model

根据运算结果(图 6 和表 2),在 RCP 2.6 情景下,2070 年鹅掌楸的适生区面积为 $2.965\times 10^6\text{ km}^2$,低适生区面积为 $4.487\times 10^6\text{ km}^2$,两者与当前气候条件下基本没有变化。在 RCP 4.5 情境下,鹅掌楸适生区面积达到最大值,约为 $3.560\times 10^6\text{ km}^2$,此时低适生区面积约为 $4.510\times 10^6\text{ km}^2$,两者较当前气候条件下分别增加了 20.60%和 2.97%。在 RCP 6.0 情境下,鹅掌

楸适生面积为 $3.174\times 10^6\text{ km}^2$,较当前气候条件下的适生区面积增加了 7.62%;低适生区面积约为 $4.229\times 10^6\text{ km}^2$,比当前低适生区面积约减少 1.51%。在 RCP 8.5 情境下,鹅掌楸适生面积最小,为 $2.828\times 10^6\text{ km}^2$,较当前气候状态下的适生区面积减少了 4.20%;低适生区面积约为 $4.379\times 10^6\text{ km}^2$ 。整体看来,鹅掌楸低适生区面积变化不大,而总适生区面积明显减少。

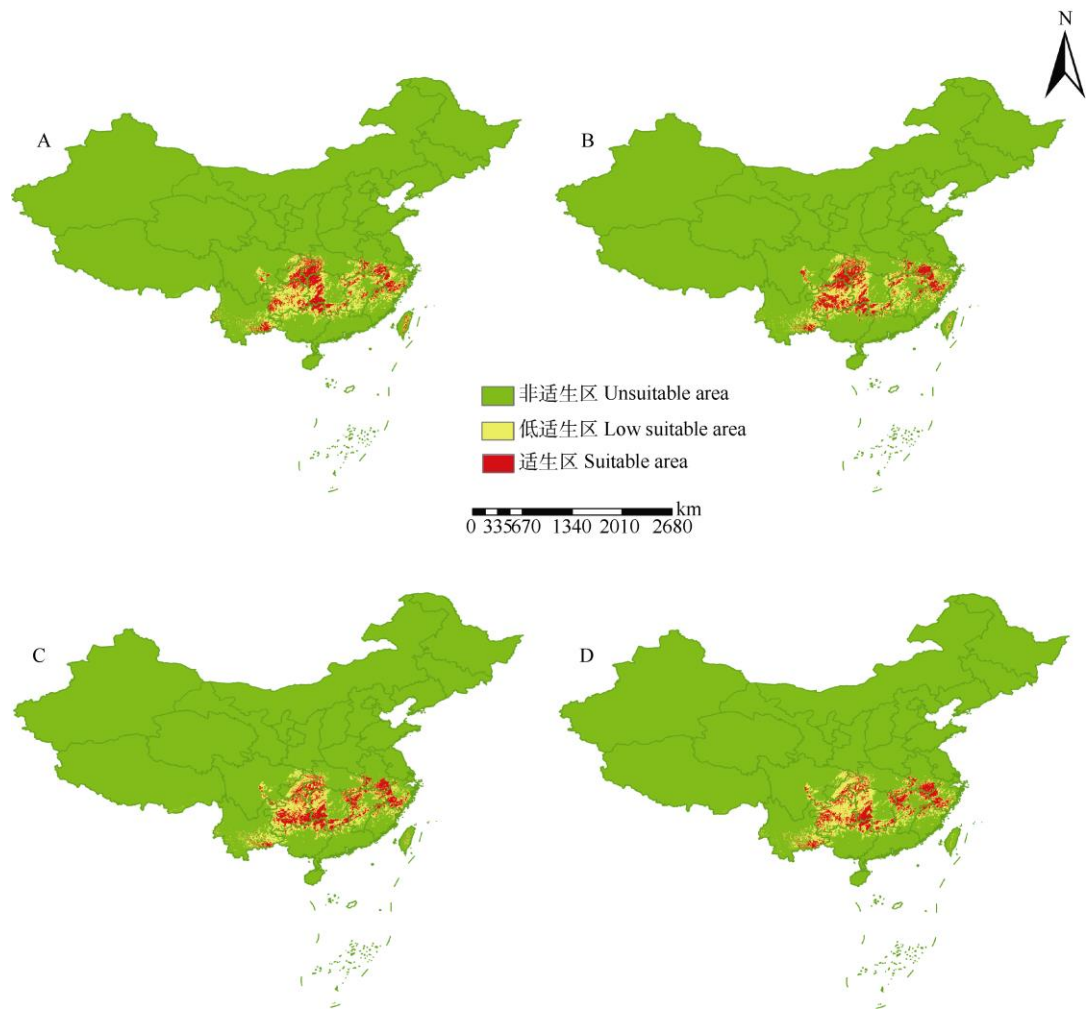


图 6 4 种 RCP 情境下 2070 年鹅掌楸分布格局变化。A: RCP 2.6; B: RCP 4.5; C: RCP 6.0; D: RCP 8.5。

Fig. 6 Changes in distribution of *Liriodendron chinense* in 2070s. A: RCP 2.6; B: RCP 4.5; C: RCP 6.0; D: RCP 8.5.

表 2 当前和不同气候情境下 2070 年鹅掌楸的适生区面积

情境 Situation	面积 Area (km ²)		
	适生区 Suitable area (× 10 ⁶)	低适生区 Low suitable area (× 10 ⁶)	非适生区 Unsuitable (× 10 ⁷)
当前 Current	2.952	4.380	8.884
RCP 2.6	2.965 (+0.44%)	4.487 (+2.44%)	8.872
RCP 4.5	3.560 (+20.60%)	4.510 (+2.97%)	8.810
RCP 6.0	3.174 (+7.52%)	4.229 (−1.51%)	8.876
RCP 8.5	2.828 (−4.20%)	4.379 (−0.02%)	8.896

3 结论和讨论

3.1 影响鹅掌楸分布的主要环境因子

在筛选出的 12 个影响鹅掌楸地理分布的环境变量中,昼夜温差月均值是最主要的变量,其次为最湿季降雨和最干季降雨,且温度与降雨两大变量的累计贡献率分别为 51.7%和 42.6%,表明温度与降水量是影响鹅掌楸适生区分布的主导因子。这与吴建国^[39]利用分类和回归树(CART)模型研究温度与降水变化对鹅掌楸分布区的影响结果一致。

本研究结果表明,鹅掌楸最适宜的昼夜温差为 6℃~8℃,当温差超过 9℃时,鹅掌楸生存的概率几乎为零。虽然昼夜温差月均值累计贡献率最大,但是降雨变量也不可忽视。最湿季降雨量应满足 500~1 200 mm,当最湿季降雨量过大时,鹅掌楸适生概率反而减小;当降雨量超过 2 100 mm 时,几乎不具备鹅掌楸适生条件,这反映出鹅掌楸不耐涝的特点。最干季降雨量则应满足在 50 mm 以上,鹅掌楸适生概率整体上随最干季降雨量的增加而增加,这与鹅掌楸喜湿的特性相符;最干季雨量的增加有利于鹅掌楸的生长,与杨元媛^[28]对四川省鹅掌楸生态适应性研究所得结论相一致。

鹅掌楸在地理分布上表现出主要集中于我国南方亚热带地区,该地区温和湿润的气候有利于鹅掌楸的生长。同时,除气候因子外,海拔和坡度这 2 个环境因子对鹅掌楸分布也产生一定的影响,贡献率分别为 3.1%和 2.7%。在多重因素的影响下,鹅掌楸适生区受到限制,最终呈现出零星、分散的片段化分布格局。

3.2 鹅掌楸在我国的潜在适生区

本研究利用 Maxent 模型预测未来在 4 种不同浓度温室气体排放导致的环境变化下鹅掌楸的分布区变化(图 6)。总体上,鹅掌楸“一带五岛”的地理分布位置的几何中心基本不变,虽然台湾没有鹅掌楸的天然分布,但在模拟的当前分布的适生区中包含有台湾地区,说明台湾的气候环境条件也可能适合鹅掌楸生长。

除此之外,在 RCP 2.6 情况下鹅掌楸适生区面积基本不变,在云南南部以及重庆、湖北、湖南交界处适生区增加,在贵州中南部、安徽福建江西交界处略有减少。在 RCP 4.5 情况下,鹅掌楸的适生区面积增加最大,适生区分布在青海、安徽

和云南南部都有增加,重庆、湖南、贵州的分布较当前向北移动。在 RCP 6.0 情况下,虽然面积变化不大,但是适生区整体更加分散。适生区在贵州、湖南、广西交界和湖南、湖北、江西交界处都有不同程度的增加。重庆、湖南、贵州交界处的适生区有减少。在 RCP 8.5 情况下,鹅掌楸适生面积减少了 1.70%,有明显减少,但湖南、湖北、江西交界区的适生区增加了,而贵州以及贵州、重庆、湖南交界地区有明显减少,其他地区变化并不明显。

根据模拟结果,到 21 世纪 70 年代,在 4 种 RCP 情境下,随着温室气体浓度的增加,鹅掌楸适生面积呈现先增加后减少的趋势。当前鹅掌楸集中分布于我国南部地区,适宜南方温暖湿润的环境,低温或降水条件限制了鹅掌楸向北扩张。在未来气候环境下,随着温室气体浓度增加,气温升高,鹅掌楸适生区可能会向北移动,但同时也可能受降水变化或其它环境因子的限制。多种因素相互制约,又互相关联,最终在多重因素的影响下,鹅掌楸面积呈现先增加后减小的变化。模拟结果表明,在 RCP 8.5 情境下,鹅掌楸适生区面积明显减小,这说明大气中适量的温室气体浓度增加对鹅掌楸的生存威胁较小,然而当温室气体浓度过高时,各环境变量受到影响发生剧烈变化,长期高浓度的温室气体引起的气候变化将造成其适生区的减少和丧失,最终可能影响鹅掌楸的生存。

目前,大多数学者认为,在未来气候变化情境下,物种的适生面积将不断减小,同时将呈现向高纬度和高海拔地区迁移的趋势^[40]。吴建国利用 CART 模型研究气候变化情境下我国 7 种植物的潜在地理分布的变化,认为这些植物的适宜分布范围将缩小,且有向高纬度高海拔地区迁移的趋势^[39]。但关心怡等在未来气候变化对麻栎(*Quercus acutissima*)地理分布影响的研究中,认为随着温度升高,麻栎适生区域面积总体呈增加趋势^[41]。在对中国侧柏(*Platycladus orientalis*)分布预测的研究中,低浓度温室气体排放的情况下,其分布范围可能会随着全球变暖的加剧而扩大;但在高浓度温室气体排放的情况下,该物种的分布范围会先略有扩大,然后缩小^[42]。这与本实验预测的结果基本一致。说明不同物种对环境的适应能力不同,因此在未来气候变化条件下不同物种的变化趋势不同。

3.3 鹅掌楸资源的管理与保护

根据模拟预测结果, 长远看来在自然条件下鹅掌楸的适生区分布并不乐观, 需要人为辅助对鹅掌楸资源进行保护管理。

(1) 人类活动的干扰严重影响了鹅掌楸群体的生存和发展, 加强对鹅掌楸现有资源的保护, 就需要对分布较集中的区域划定保护区就地保护, 采用合理的抚育措施保证苗木的正常生长, 严禁乱砍滥伐, 避免人为因素的干扰破坏。

(2) 适当推广种植鹅掌楸。由于低的遗传多样性水平, 小而孤立的群体更容易受到气候或栖息地改变的侵害, 因此对鹅掌楸的保护不仅要采取就地保护也可采取迁地保存策略。根据预测的适生区结合当地地形土壤等因素选择合适的迁地保护地区扩大鹅掌楸种植范围。同时, 关注当地温差和降雨对鹅掌楸的影响, 并将地形、土壤等环境因子纳入考量, 选择排水良好、土质肥沃的区域种植, 为鹅掌楸生长提供适宜的环境条件。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WU X P, LIN X, ZHANG Y, et al. Impacts of climate change on ecosystem in priority areas of biodiversity conservation in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(34): 4668–4680. doi: 10.1007/s11434-014-0612-z.
- [3] GRIMM N, CHAPIN F S, CARTER S L, et al. Current and future impacts of climate and global change on biodiversity and the structure and functioning of ecosystems [R]// 97th ESA Annual Convention 2012. Washington, DC: ESA. 2012
- [4] YING L X, LIU Y, CHEN S T, et al. Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model [J]. *Biodiv Sci*, 2016, 24(4): 453–461. doi: 10.17520/biods.2015246.
应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4): 453–461. doi: 10.17520/biods.2015246.
- [5] DESCOMBES P, WISZ M S, LEPRIEUR F, et al. Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change [J]. *Glob Change Biol*, 2015, 21(7): 2479–2487. doi: 10.1111/gcb.12868.
- [6] ALLEN J L, LENDEMER J C. Climate change impacts on endemic, high-elevation lichens in a biodiversity hotspot [J]. *Biodiv Conserv*, 2016, 25(3): 555–568. doi: 10.1007/s10531-016-1071-4.
- [7] PACHAURI R K, REISINGER A. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. *J Romance Studies*, 2014, 4(2): 85–88.
- [8] OUYANG Z Y, LIU J G, XIAO H, et al. An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, 21(11): 1869–1874. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.11.018.
欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 等. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价 [J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1869–1874. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.11.018.
- [9] ZHANG H, ZHAO H X, WANG H. Potential geographical distribution of *Populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on Maxent model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(18): 6552–6563. doi: 10.5846/stxb201906111232.
张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布 [J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552–6563. doi: 10.5846/stxb201906111232.
- [10] GELVIZGELVEZ S M, PAVON N P, ILLODIRANGEL P, et al. Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico [J]. *Ecol Eng*, 2015, 74: 302–309.
- [11] WU J G. Potential effects of climate change on the distributions of 5 plants in China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(5): 511–522. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.05.007.
吴建国. 气候变化对 5 种植物分布的潜在影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(5): 511–522. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.05.007.
- [12] HU X K, XIA S, GUO Y H, et al. Ecological niche modeling and its applications in research on transmission risks of parasitic diseases [J]. *Chin J Parasitol Parasit Dise*, 2020, 38(2): 238–244. doi: 10.12140/j.issn.1000-7423.2020.02.017.
胡小康, 夏尚, 郭云海, 等. 生态位模型及其在寄生虫病传播风险研究中的应用 [J]. *中国寄生虫学与寄生虫病杂志*, 2020, 38(2): 238–244. doi: 10.12140/j.issn.1000-7423.2020.02.017.
- [13] CAO X F, QIAN G L, HU B S, et al. Prediction of potential suitable distribution area of *Flaveria bidentis* in China based on niche mode [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(12): 3063–3069.
曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3063–3069.
- [14] BRAUNISCH V, SUCHANT R. A model for evaluating the 'Habitat Potential' of a landscape for capercaillie *Tetrao urogallus*: A tool for conservation planning [J]. *Wildlife Biol*, 2007, 13(S1): 21–33. doi: 10.

- 2981/0909-6396(2007)13[21:AMFETH]2.0.CO;2.
- [15] 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.
- [16] HIRZEL A H, HAUSSEER J, CHESSEL D, et al. Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? [J]. *Ecology*, 2002, 83(7): 2027–2036. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[2027:ENFAHT]2.0.CO;2.
- [17] HONIG M A, COWLING R M, RICHARDSON D M. The invasive potential of Australian banksias in South African fynbos: A comparison of the reproductive potential of *Banksia ericifolia* and *Leucadendron laureolum* [J]. *Austr Ecol*, 1992, 17(3): 305–314. doi: 10.1111/j.1442-9993.1992.tb00812.x.
- [18] CARPENTER G, GILLISON A N, WINTER J. DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals [J]. *Biodiv Conserv*, 1993, 2(6): 667–680. doi: 10.1007/BF00051966.
- [19] PHILLIPS S J, DUDIK M, SCHAPIRE R E, et al. A maximum entropy approach to species distribution modeling [C]// International Conference on Machine Learning. Banff, Canada: ACM, 2004: 655–662.
- [20] KUMAR S, STOHLGREN T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canaomyrica monticola* in New Caledonia [J]. *J Ecol Nat Environ*, 2009, 1(4): 94–98. doi: 10.5897/JENE.9000071.
- [21] XING D L, HAO Z Q. The principle of maximum entropy and its applications in ecology [J]. *Biodiv Sci*, 2011, 19(3): 295–302. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.08318.
- 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295–302. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.08318.
- [22] ESTES L D, BRADLEY B A, BEUKES H, et al. Comparing mechanistic and empirical model projections of crop suitability and productivity: Implications for ecological forecasting [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2013, 22(8): 1007–1018. doi: 10.1111/geb.12034.
- [23] ZHANG H J, CHEN Y, HUANG L J, et al. Predicting potential geographic distribution of *Mikania micrantha* planting based on ecological niche models in China [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2011, 27(S1): 413–418.
- 张海娟, 陈勇, 黄烈健, 等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1): 413–418.
- [24] LI H G, CHEN L, LIANG C Y, et al. A case study on provenance testing of tulip tree (*Liriodendron* spp.) [J]. *China For Sci Technol*, 2005, 19(5): 13–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2005.05.005.
- 李火根, 陈龙, 梁呈元, 等. 鹅掌楸属树种源试验研究 [J]. *林业科技开发*, 2005, 19(5): 13–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2005.05.005.
- [25] HE S A, HAO R M, TANG S J. A study on the ecological factors of endangering mechanism of *Liriodendron chinense* [J]. *J Plant Resour Environ*, 1996, 5(1): 1–8.
- 贺善安, 郝日明, 汤诗杰. 鹅掌楸致濒的生态因素研究 [J]. *植物资源与环境*, 1996, 5(1): 1–8.
- [26] GUAN L H, WANG G, CAO J, et al. Discussion on current status, problems and countermeasures of industrialization for *Liriodendron chinense* in Hubei Province [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2016, 45(1): 7–11, 49. doi: 10.3969/j.issn.1004-3020.2016.01.002.
- 管兰华, 王刚, 曹健, 等. 湖北省鹅掌楸发展现状、问题及对策 [J]. *湖北林业科技*, 2016, 45(1): 7–11, 49. doi: 10.3969/j.issn.1004-3020.2016.01.002.
- [27] ZHANG G. Distribution, suitable range and cultivation technique of *Liriodendron* in Guizhou Province [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2011, 40(2): 67–69.
- 张果. 鹅掌楸属植物在贵州省分布、适生范围及栽培技术 [J]. *湖北林业科技*, 2011, 40(2): 67–69. doi: 10.3969/j.issn.1004-3020.2011.02.019.
- [28] YANG Y Y. Study on population dynamics and ecological adaptation of rare branch ornamental *Liriodendron chinense* [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 杨元媛. 四川省珍稀观赏植物鹅掌楸种群动态和生态适应性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [29] HAO R M, HE S A, TANG S J, et al. Geographical distribution of *Liriodendron chinense* in china and its significance [J]. *J Plant Resour Environ*, 1995, 4(1): 1–6.
- 郝日明, 贺善安, 汤诗杰, 等. 鹅掌楸在中国的自然分布及其特点 [J]. *植物资源与环境*, 1995, 4(1): 1–6.
- [30] HE S A, HAO R M. Study on the natural population dynamics and the endangering habitat of *Liriodendron chinense* in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1999, 23(1): 87–95.
- 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.
- [31] LI K Q. Studies on population genetics and molecular phylogeography of *Liriodendron* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013: 1–116.
- 李康琴. 鹅掌楸属群体遗传结构及分子系统地理学研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013: 1–116.
- [32] LUO G Z, SHI J S, YIN T M, et al. Comparison of genetic diversity between *Liriodendron tulipifera* Linn. and *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg. by means of RAPD markers [J]. *J Plant Resour Environ*,

- 2000, 9(2): 9–13. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2000.02.003.
- 罗光佐, 施季森, 尹佟明, 等. 利用 RAPD 标记分析北美鹅掌楸与鹅掌楸种间遗传多样性 [J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(2): 9–13. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2000.02.003.
- [33] HUANG J Q, ZHOU J, FAN R W, et al. The observation of cell phytomorphology of the double fertilization and embryogenesis in *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sary. [J]. Chin Bull Bot, 1995, 12(3): 45–47, 50.
- 黄坚钦, 周坚, 樊汝议. 中国鹅掌楸双受精和胚胎发生的细胞形态学观察 [J]. 植物学报, 1995, 12(3): 45–47, 50.
- [34] ZHANG X F, LI H G, YOU L X, et al. Variation and genetic stability of two-year-old *Liriodendron* seedling growth for 39 mating combinations [J]. J Zhejiang Agric For Univ, 2011, 28(1): 103–108. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.01.016.
- 张晓飞, 李火根, 尤录祥, 等. 鹅掌楸不同交配组合子代苗期生长变异及遗传稳定性分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(1): 103–108. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.01.016.
- [35] YAO J X. Studies on the molecular mechanism of heterosis in *Liriodendron* based on SSR markers [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- 姚俊修. 鹅掌楸杂种优势分子机理研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [36] CAI W J, DOU X, CAO H D, et al. Effect of combined fertilization of NPK on initial growth of young *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* plantation [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2011, 35(4): 27–33. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.04.006.
- 蔡伟建, 窦霄, 高捍东, 等. 氮磷钾配比施肥对杂交鹅掌楸幼林初期生长的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 27–33. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.04.006.
- [37] SILLERO N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods [J]. Ecol Model, 2011, 222(8): 1343–1346. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.018.
- [38] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240(4857): 1285–1293. doi: 10.1126/science.3287615.
- [39] WU J G. The potential effects of climate change on the distributions of 7 plants in China [J]. Guihaia, 2011, 31(5): 595–607, 694. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2011.05.008.
- 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2011.05.008.
- [40] PARMESAN C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change [J]. Annu Rev Ecol Evol Syst, 2006, 37(1): 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100.
- [41] GUAN X Y, SHI W, CAO K F. Effect of climate change in future on geographical distribution of widespread *Quercus acutissima* and analysis of dominant climatic factors [J]. J Trop Subtrop Bot, 2018, 26(6): 661–668. doi: 10.11926/jtsb.3898.
- 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. doi: 10.11926/jtsb.3898.
- [42] HU X G, JIN Y Q, WANG X R, et al. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis* [J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0132326. doi: 10.1371/journal.pone.0132326.