

DOI: 10.5846/stxb202201130121

文国卫, 黄秋良, 吕增伟, 赖文峰, 施晨阳, 朱晓如, 蒋天雨, 张国防. 气候变化情境下木荷潜在地理分布及生态适宜性分析. 生态学报, 2023, 43 (16): 6617-6626.

Wen G W, Huang Q L, Lü Z W, Lai W F, Shi C Y, Zhu X R, Jiang T Y, Zhang G F. Potential geographical distribution and ecological suitability of *Schima superba* under the situation of climate change. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (16): 6617-6626.

气候变化情境下木荷潜在地理分布及生态适宜性分析

文国卫, 黄秋良, 吕增伟, 赖文峰, 施晨阳, 朱晓如, 蒋天雨, 张国防*

福建农林大学林学院, 福州 350002

摘要: 木荷 (*Schima superba*) 是中国南方常见的速生阔叶耐火树种之一, 在生态修复和维持环境稳定方面具有重要作用, 因而预测其潜在适生区变化具有重要意义。基于 Maxent 模型, 结合 158 条木荷在中国的有效分布记录和筛选后的 8 个生物气候变量, 预测木荷现代和 2041—2060 年 3 种气候排放浓度情景下木荷的潜在分布区。Maxent 模型的可靠性以受试者工作特征曲线来判断, 综合气候因子的贡献率、置换重要值和刀切法检验, 来分析并探讨制约木荷地理分布的重要气候因子。结果表明: (1) Maxent 模型训练和测试数据的 AUC 值分别为 0.936 ± 0.001 和 0.943 ± 0.008 , 表明模型的预测精度极高; (2) 现代木荷潜在地理分布的总适生区面积 $198.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国国土面积的 20.7%, 主要位于在中国长江以南的大部分地区, 包括福建、浙江、台湾、江西、湖南、广东、海南、广西、贵州、云南、重庆, 以及四川、河南和安徽部分区域; (3) 制约木荷潜在地理分布的重要生物气候因子为降水因子 (最干月降水量 26—214 mm、年降水量 800—2500 mm 和最湿季降水量 590—1030 mm) 和温度因子 (气温年变化 $8.5—28^\circ\text{C}$); (4) 使用 Maxent 模型模拟的木荷适生区面积大于其实际分布面积, 暗示着木荷人工林在未来有较大的发展潜力。本研究结果可为木荷种质资源收集和人工林种植奠定理论基础, 对维持区域性生态系统安全和稳定、缓解气候变化和 2060 年实现碳中和目标具有战略性意义。

关键词: 木荷; Maxent 模型; 气候变化; 潜在适生区; 生态适宜性

Potential geographical distribution and ecological suitability of *Schima superba* under the situation of climate change

WEN Guowei, HUANG Qiuliang, LÜ Zengwei, LAI Wenfeng, SHI Chenyang, ZHU Xiaoru, JIANG Tianyu, ZHANG Guofang*

College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: *Schima superba* is one of the common fast-growing and broad-leaved fire-resistant trees in southern China. It plays an important role in ecological restoration and maintaining environmental stability. Therefore, it is of great significance to predict the change of its potential suitable area. Based on Maxent model, combined with 158 effective distribution records of *S. superba* in China and 8 selected bioclimatic variables, this study predicts the potential distribution areas of *S. superba* are predicted under three climate emission concentration scenarios of modern *S. superba* and 2041—2060. The reliability of Maxent model is judged by the area of under the receiver operator characteristic curves. The important climate factors restricting the geographical distribution of *S. superba* were analyzed and discussed by integrating the percent contribution, permutation importance and Jackknife test of climate factors. The results show that: (1) the AUC values of Maxent model training and test data are 0.936 ± 0.001 and 0.943 ± 0.008 , respectively, indicating that the prediction accuracy of the model is very high. (2) The total suitable area of potential geographical distribution of modern *S. superba* is $198.87 \times 10^4 \text{ km}^2$,

基金项目: 福建农林大学科技创新基金 (CXZX2019046); 福建农林大学高峰学科项目 (71201802404)

收稿日期: 2022-01-13; 网络出版日期: 2023-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjzgfzgf@fafu.edu.cn

accounting for 20.7% of China's total land area. It mainly locates in most areas south of the Yangtze River, including Fujian, Zhejiang, Taiwan, Jiangxi, Hunan, Guangdong, Hainan, Guangxi, Guizhou, Yunnan, Chongqing, and some areas of Sichuan, Henan and Anhui. (3) The important bioclimatic factors restricting the potential geographical distribution of *S. superba* are precipitation factors and temperature factors. The annual precipitation is 800—2500 mm. The precipitation of the driest month is 26—214 mm and the precipitation of the wettest quarter is 590—1030 mm. The range of annual temperature is 8.5—28 °C. (4) The suitable area of *S. superba* simulated by Maxent model is larger than its actual distribution area, suggesting that *S. superba* plantation has great development potential in the future. The results of this study can provide a theoretical basis for the collection of wood lotus germplasm resources and plantation of *S. superba*. They are of strategic importance for maintaining regional ecosystem security and stability, mitigating climate change, and achieving carbon neutrality targets by 2060.

Key Words: *Schima superba*; Maxent model; climate change; potential geographical distribution; ecological suitability

气候变化和全球变暖是全世界重点关注的问题,也是当今社会讨论最多的问题之一,对物种的分布格局造成了巨大影响^[1]。自第一次工业革命以来,人类对化石能源的使用量日益增加和森林面积的大幅减少,导致大气层 CO₂ 含量逐年递增,浓度上升了近 35%,使气候变暖的趋势愈发明显^[2-4]。现如今,为应对气候变化带来的负面影响,中国政府已宣布将于 2030 年达到全国碳排放峰值、2060 年实现碳中和的目标^[5]。其中,植树造林不仅能够满足人类社会对林产品的市场需求,也增加了森林的覆盖率,并提高了森林对 CO₂ 的吸收,是实现碳中和不可或缺的重要途径^[6]。因此,在未来,研究主要造林树种的潜在适生区分布格局变化,将有助于我们制定更有效的营林措施,以提高碳汇成效,是全球气候变化背景下实现碳中和愿景的有效手段之一。

生态位模型 (Environmental niche models, ENMs) 对物种的潜在适生区变化有较好预测,常用于模拟物种的生态位^[7]。目前,生态位模型主要有:最大熵模型 (Maxent)^[8]、CLIMEX 模型^[9]、规则集遗传算法模型 (GARP)^[10]、广义线性模型 (GLM)^[11] 和随机森林 (RF)^[12] 等。其中,Maxent 模型采用最大熵来推算物种的潜在地理分布,具有失真小、稳定性好和操作简单等优势,已成为使用次数最多的生态位模型之一^[13]。另外,正是由于 Maxent 模型能够对物种的未来潜在地理分布区进行准确预测,并实现物种适生区空间格局变化的可视化,已被国内外研究者广泛应用于珍稀濒危动植物保护^[14-15]、入侵物种的治理和预防^[16]、病虫害防治^[17-18] 和物种的潜在分布区探索^[19] 等方面。

木荷 (*Schima superba*) 为山茶科 (Theaceae) 木荷属 (*Schima*) 的常绿阔叶高大乔木,是中国南方广泛分布的速生用材树种之一,也是亚热带森林中重要的耐火树种之一^[20-21]。在经济价值方面,木荷树干通直、材质坚硬、耐腐蚀、纹理优美,是制作地板、高档家具和雕刻木雕等优良用材^[22]。其次,木荷茎叶提取液具有杀虫和抑菌活性的功效,可作为杀虫剂的补充和替代药物主成分^[23-24]。在生态价值方面,木荷落叶分解快、养分含量高,对林地土壤起改良增肥作用^[25]。在社会价值方面,木荷因花开白色,新叶和秋叶绚丽多彩,是很好的园林绿化树种,可应用于城市道路两侧、公园、庭院等方面^[26]。目前,关于木荷的研究主要集中在遗传改良^[27]、群落演替^[28]、凋落物分解^[29]、混交林种植^[30] 和根系^[31] 等方面。然而,上述均未系统的研究气候变量与木荷分布格局之间关系,但在未来不同的气候排放情景下,木荷潜在地理分布将如何变化,以及影响木荷地理分布的主导气候变量也尚未清楚。

通过木荷分布点数据和生物气候变量,利用 Maxent 模型模拟现代 (1970—2000 年) 和未来时间段 (2041—2060 年) 在低浓度 (RCP2.6, 温室气体排放较低)、中浓度 (RCP4.5, 温室气体排放一般) 和高浓度 (RCP8.5, 温室气体排放浓度较高) 3 种气候情景下木荷的潜在适生区,并通过 ArcGIS 进行可视化处理,进一步探讨影响木荷在未来全球气候变化下地理变迁的关键因素,旨在了解气候变量对木荷潜在地理分布的制约机制,为木荷种质资源的高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 木荷分布点收集与整理

通过检索全球物种多样性信息库(GBIF, <http://www.gbif.org>)、中国植物图像库(PPBC, <http://ppbc.iplant.cn>)、国家标本平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn>)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn>)分别获得样本记录 432 条、567 条、289 条和 475 条,共计 1763 条,又查阅中国知网(<https://kns.cnki.net>)关于木荷相关的文献,搜集到分布点 154 条。本研究对只记录有地点名称却缺少准确经纬度坐标的标本,通过经纬度查询(<https://map.jiqrx.com/jingweidu/>)输入地点名称来确定经纬度。此外,为降低群集效应所产生的误差,将获取的分布点以物种名、经度、纬度和地点整理成 csv 格式文件,导入 ArcGIS 10.5 中,进行缓冲区分析,以 10 km 范围内的多个样本点,只保留一个分布点的原则,最终得到 158 个有效分布记录(图 1)。

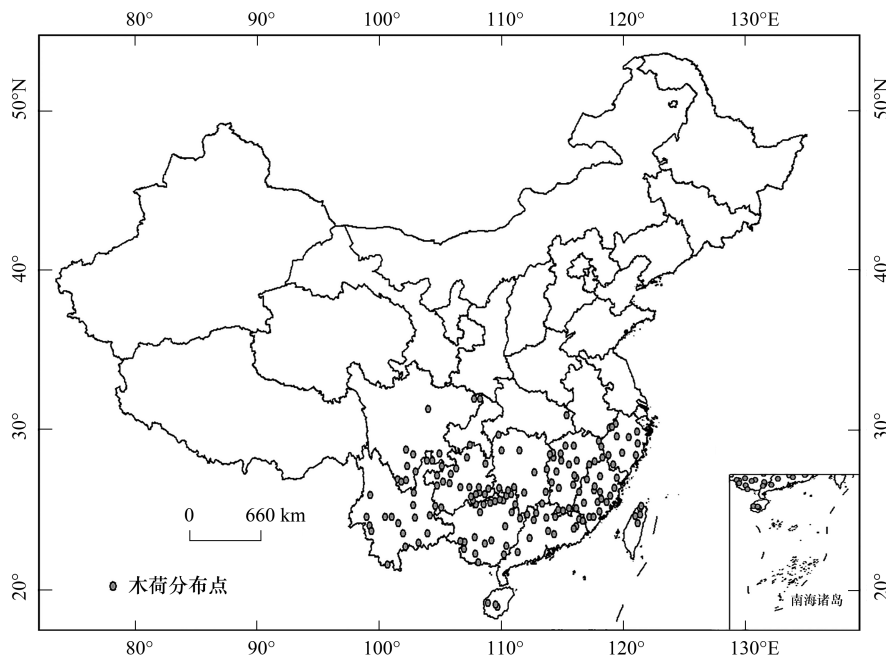


图 1 木荷的分布点数据

Fig.1 Distribution data of *Schima superba*

1.2 生物气候因子数据获取与筛选

研究所用的当前(1970—2000 年)和未来(2041—2060 年)的 19 个生物气候变量均来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>),数据空间分辨率为 2.5'。其中,19 个气候变量分别为年均温(Annual mean temperature, bio1)、平间日较差(Mean diurnal range, bio2)、等温性(Isothermality, bio3)、温度季节变动系数(Temperature seasonality, bio4)、最热月最高气温(Max temperature of the warmest month, bio5)、最冷月最低气温(Min temperature of the coldest month, bio6)、温度年较差(Range of annual temperature, bio7)、最湿季度平均气温(Mean temperature of the wettest quarter, bio8)、最干季度平均气温(Mean temperature of the driest quarter, bio9)、最暖季度平均气温(Mean temperature of the warmest quarter, bio10)、最冷季度平均气温(Mean temperature of the coldest quarter, bio11)、年降水量(Annual precipitation, bio12)、最湿月降水量(Precipitation of the wettest month, bio13)、最干月降水量(Precipitation of the driest month, bio14)、降水量季节性变化(Seasonality of precipitation, bio15)、最湿季度降水量(Precipitation of the wettest quarter, bio16)、最干季度降水量(Precipitation of the driest quarter, bio17)、最暖季度降水量(Precipitation of the warmest quarter, bio18)、最冷季度降水量(Precipitation of the coldest quarter, bio19)。未来生物气候变量数据为第六次国际耦合模式比较计

划(CMIP6)的 BCC-CSM2-MR 气候模式,包括共享社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCP)。本研究在 SSP1-RCP2.6(SSP126)、SSP2-RCP4.5(SSP245)和 SSP5-RCP8.5(SSP585)3 种典型浓度排放情景下对木荷未来潜在适生区进行模拟。其中,SSP126 是可持续发展途径,代表温室气体排放浓度处于低水平;SSP245 是一般发展途径,代表温室气体排放浓度处于中等水平;而 SSP585 是以化石燃料利用为主的发展途径,代表温室气体排放浓度处于高水平^[32]。

研究所使用的 1:4000000 的中国国界和省界行政区划图来源于国家基础地理信息中心(<http://nfarcgis.Nsdi.Gov.cn/>)。以中国行政区划矢量地图为底图,将 19 个生物气候栅格数据添加到 ArcGIS 10.5 中,进行掩膜提取,并转换为 Maxent 模型可用的 ASC II 格式,备用。为了避免 19 个生物气候变量引起多重共线性而导致模型过度拟合,参照张华^[33]的方法对生物气候变量进行筛选。筛选方法为将 19 个现代生物气候变量和筛选后的木荷分布点数据导入 Maxent 软件中,每次运行后,剔除结果中贡献率小于 1%的气候变量,共运行 3 次,最终筛选出 8 个气候变量(表 1),累计贡献率大于 95%,用于木荷潜在适生区面积分布的预测。其中,筛选后的 8 个气候变量依次为昼夜温差月均值(bio2)、最冷月最低气温(bio6)、气温年变化范围(bio7)、最湿季平均气温(bio8)、年降水量(bio12)、最干月降水量(bio14)、最湿季降水量(bio16)和最暖季降水量(bio18)。

1.3 数据处理与分析

把筛选后的木荷分布点和 8 个气候变量数据导入 Maxent 3.4.1 中,随机选取 75%分布点数据作为训练集,25%作为测试集,并使用交叉验证方法(Crossvalidate),重复 10 次,最大背景点数量为 10000 个,最大迭代次数为 500 次,其余为默认设置,最终输出 ASCII 格式的结果文件^[34]。然后,挑选出结果中的平均值 ASCII 格式文件,导入 ArcGIS10.5 软件中,利用空间分析工具(Spatial analyst tools)中的重分类命令(Reclassify),利用自然间断点分级法(Jenks' natural breaks)将适宜度分为 4 个等级^[35],分别为非适生区(0—0.11)、低适生区(0.11—0.31)、一般适生区(0.31—0.50)、最佳适生区(0.50—1),从而确定木荷的潜在适生区分布情况。

贡献率(Percent Contribution,PC)是通过持续修正单一要素的系数,并以百分比的形式给出,其决定某一个气候变量对该物种的贡献大小;置换重要值(Permutation Importance,PI)是测定随机置换训练点集上环境变量的数值,归一化后也以百分比表示。气候变量的贡献率和置换重要值越大,说明该气候变量对物种的潜在地理分布起的作用也就越重要。刀切法(Jackknife)检验则是依次使用和排除某一变量来建立新的模型,并通过比较模型间正则化训练增益(Regularized training gain)、测试增益(Test gain)和 AUC 值的差异来衡量生物气候变量的重要性^[34]。通过 Maxent 模拟结果的贡献率、置换重要值和刀切法来评价影响物种分布的主导气候变量,并分析生物气候变量在制约木荷现代地理分布格局中的重要性。

根据受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curves,ROC Curves)的 AUC 值(Area Under Curve)来判断模型预测的准确度,AUC 值是评价预测结果可靠的重要指标^[8]。AUC 值范围在 0 到 1 之间,值越大表明预测结果的准确性就越好。若 AUC 值小于 0.6,表明模拟结果失败;0.6—0.7,预测结果较差;0.7—0.8,预测结果一般;0.8—0.9,预测结果准确;若大于 0.9,则表明预测结果极为准确^[36],可以较精准地反映出物种潜在分布范围。

2 结果与分析

2.1 Maxent 模型模拟精度评价

根据木荷分布点数据和 8 个气候变量(表 1),应用 Maxent 模型进行模拟,获得训练数据(红线)和测试数据(蓝线)的受试者工作曲线(ROC 曲线)和 ROC 曲线下的面积(AUC 值),用来验证分布点数据对模型的契合度(图 2)。如图 2,本研究重复 10 次,得到训练数据的 AUC 值为 0.936 ± 0.001 ,测试数据的 AUC 值为 0.943 ± 0.008 ,表明采用 Maxent 模型预测木荷潜在适生区范围有很高的可信度。

2.2 影响木荷分布的主导气候变量

气候变量对木荷适生区分布的影响,主要通过贡献率、置换重要值和 Jackknife 检验结果三个指标来进行

综合评价。从贡献率来看,排前三位的气候变量依次是:最干月降水量(bio14, 49.8%)、年降水量(bio12, 26.2%)、气温年变化范围(bio7, 7.6%),累计贡献率为83.6%(表1);表明此三个气候变量对木荷的地理分布有重要影响。从置换重要值来看,排前三位的气候变量依次是:气温年变化范围(bio7, 56.8%)、最暖季降水量(bio18, 19.2%)、最干月降水量(bio14, 10.9%),累计贡献率为86.9%(表1);也表明了气温年变化范围和最干月降水量是影响木荷的地理分布的关键气候变量。从刀切法检验结果来看(图3),正则化训练增益、测试增益和AUC值的仅此变量排前三位的气候变量均为最湿季降水量(bio16)、年降水量(bio12)、最暖季降水量(bio18);表明降水变量是影响木荷地理分布的主要气候限制因素。综上,降水因子变量(年降水量、最干月降水量、最湿季降水量)和温度因子变量(气温年变化范围)是影响现代木荷潜在地理分布的主导生物气候变量。

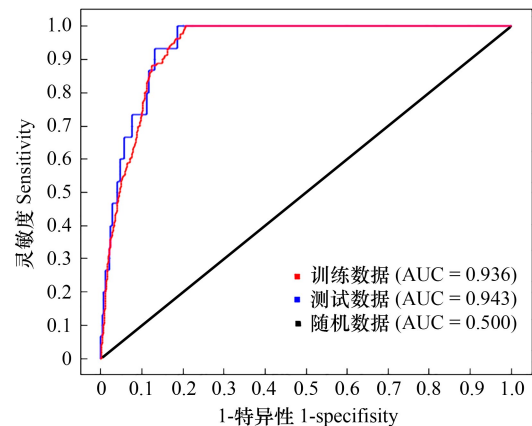


图2 Maxent 模型对木荷的 ROC 曲线预测结果

Fig.2 Prediction validation of ROC curve of *Schima superba* by Maxent model

AUC: 曲线下面积值, Area Under Curve; ROC: 受试者工作特征曲线, Receiver Operating Characteristic Curve

表1 主导气候变量评价

Table 1 Evaluation of dominant climate variables

变量 Variables	指标 Index		变量 Variables	指标 Index	
	贡献率 Percent contribution/%	置换重要值 Permutation importance/%		贡献率 Percent contribution/%	置换重要值 Permutation importance/%
bio14	49.8	10.9	bio16	4.2	1.4
bio12	26.2	0.6	bio6	3.1	3.3
bio7	7.6	56.8	bio18	2.8	19.2
bio8	4.7	1.9	bio2	1.6	5.9

bio2:昼夜温差月均值 Mean diurnal range; bio6:最冷月最低气温 Min temperature of the coldest month; bio7:气温年变化范围 Range of annual temperature; bio8:最湿季平均气温 Mean temperature of the wettest quarter; bio12:年降水量 Annual precipitation; bio14:最干月降水量 Precipitation of the driest month; bio16:最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter; bio18:最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter

2.3 主导气候变量影响木荷分布的响应曲线分析

根据响应曲线来判断木荷的分布概率与主导气候变量之间的联系。当木荷的分布概率大于0.5时,是有利于木荷生长繁殖的,从而获得对应的生物气候变量的范围值。其中,四个主导气候变量对木荷的适生区面积影响较大。一是气温年变化范围(PC为7.6%,PI为56.8%),变化曲线为倒“S”型,即气温年变化在8.5℃范围时木荷分布概率最大(0.89),随着气温年变化范围的增加,木荷的分布概率开始下降,当气温年变化范围达到28℃时分布概率下降到0.5以下,表明适合木荷生长的气温年变化范围:8.5—28℃(图4)。二是年降水量(PC为26.2%,PI为0.6%),从500 mm开始,木荷分布概率不断增加,当年降水量达到800 mm时,木荷分布概率达到0.5,并在1570—1930 mm为最高分布概率(0.64),之后到2500 mm后,分布概率再次小于0.5,表明适合木荷生长的年降水量范围:800—2500 mm(图4)。三是最干月降水量(PC为49.8%,PI为10.9%),在26 mm以下时,木荷分布存在的概率小于0.5,随着最干月降水量的增加,木荷的分布概率逐渐增加,在26—48 mm范围内,分布概率快速增加,增幅为32%,并在214 mm时达到最大分布值(0.78),表明适合木荷生长的最干月降水量范围:26—214 mm(图4)。四是最湿季降水量(PC为4.2%,PI为1.4%),从365 mm开始,木荷的分布概率急速增加,到590 mm时,分布概率达到0.5,并在725 mm时达到最大分布概率值(0.6)后,开始

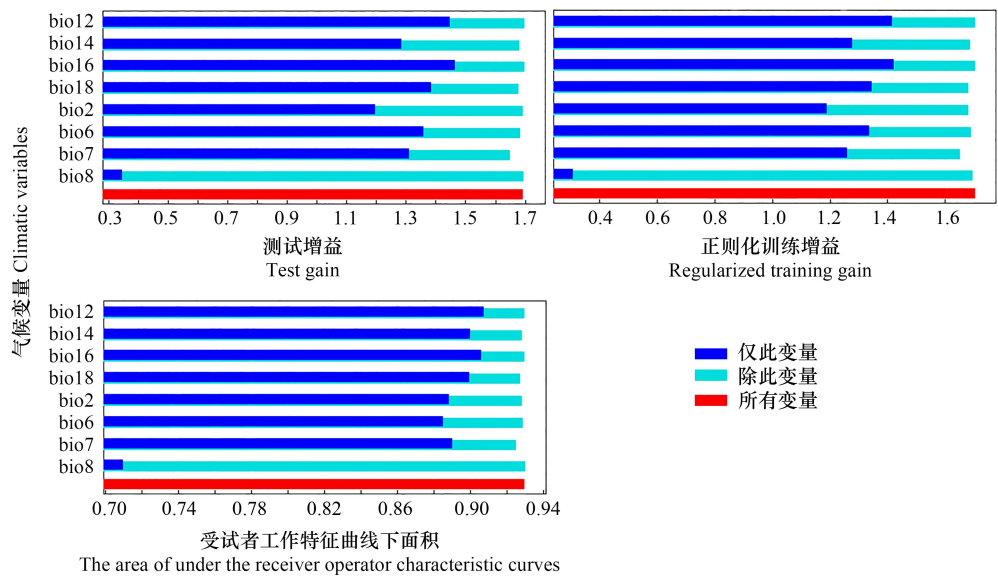


图3 木荷8个气候变量的 Jackknife 检验结果

Fig.3 The jackknife test result for 8 climatic variables of *Schima superba*

bio2:昼夜温差月均值 Mean diurnal range; bio6:最冷月最低气温 Min temperature of the coldest month; bio7:气温年变化范围 Range of annual temperature; bio8:最湿季平均气温 Mean temperature of the wettest quarter; bio12:年降水量 Annual precipitation; bio14:最干月降水量 Precipitation of the driest month; bio16:最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter; bio18:最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter

下降,在约 1030 mm 时,木荷的分布概率下降到 0.5,表明适合木荷生长的最湿季降水量范围:590—1030 mm (图 4)。

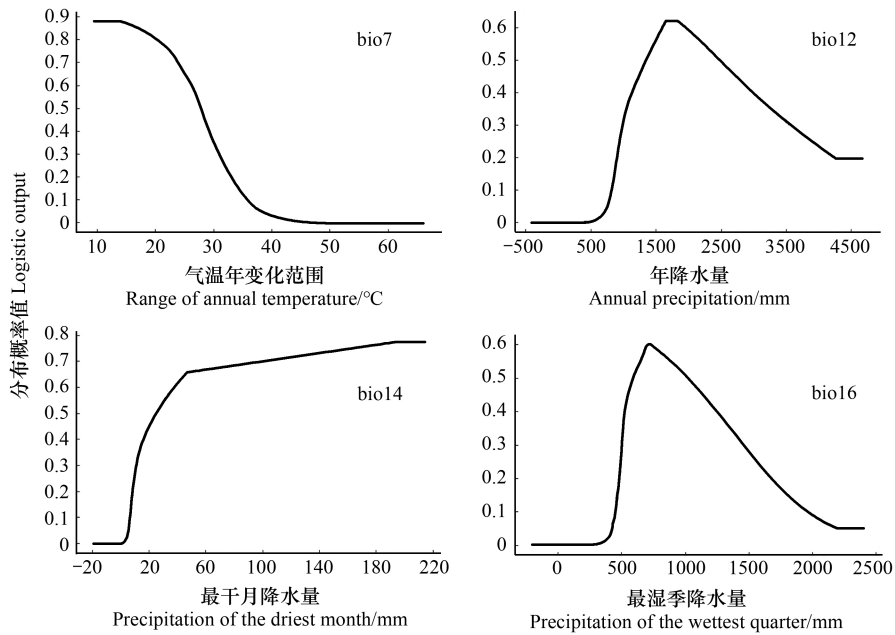


图4 木荷适宜性概率对主导气候变量的响应曲线

Fig.4 Response curves of *Schima superba* suitability probability to dominant climate variables

2.4 不同气候情景下木荷的潜在适生区变化

根据 Maxent 模型模拟结果,在 ArcGIS 10.5 软件中绘制出木荷在现代(Current) 气候条件的潜在地理分布

(图 5)。在木荷分布点记录的分布概率逻辑值中,最大分布概率逻辑值分布在湖南炎陵县龙渣瑶族乡,为 0.84;最小分布概率逻辑值分布在广西东兴市江平镇,为 0.14;平均分布逻辑概率值为 0.52。在现代气候条件下,木荷总适生区主要分布在中国长江以南的大部分地区,包括福建、浙江、台湾、江西、湖南、广东、海南、广西、贵州、云南、重庆,以及四川、河南和安徽部分区域,面积 $198.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 20.7%(图 5,表 2)。而木荷最佳适生区主要分布于福建、广东和广西北部、贵州南部、云南东部,面积为 $51.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 5.3%(图 5,表 2)。此外,从 Maxent 模型预测结果来看,木荷潜在适生区分布范围一定程度上超过了其在现代分布的范围(图 1,图 5)。

表 2 现代及未来不同排放情景下适生区面积/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 2 Suitable area under different emission scenarios in current and future

等级 Grade	时期 Period			
	现代 Current	2041—2060 年		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
低适生区 Lowly suitable area	65.51	69.55	62.15	63.77
一般适生区 Moderately suitable area	82.34	83.43	83.08	81.37
最佳适生区 Highly suitable area	51.02	51.53	53.64	52.83
总适生区 Total suitable area	198.87	204.51	198.86	197.97

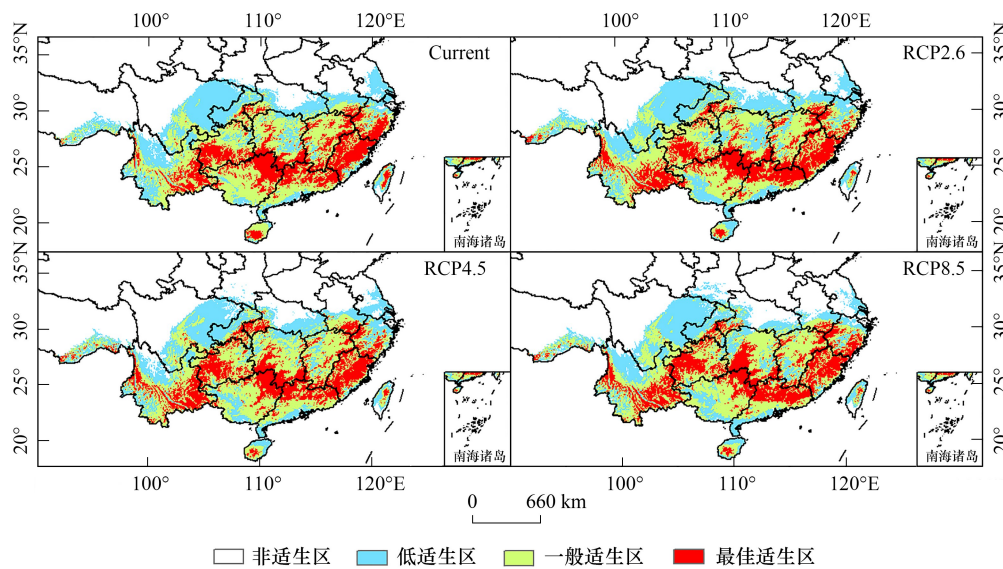


图 5 现代及未来不同排放情景下木荷的潜在适生区分布

Fig.5 Distribution of potential suitable areas of *Schima superba* under different emission scenarios in current and future

同时,使用 Maxent 模型模拟了未来(2041—2060 年)3 种排放情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)木荷的潜在地理分布,并绘制出其在未来气候条件的潜在地理分布(图 5),以及算出了不同排放情景下木荷各潜在适生等级的面积(表 2)。在 RCP2.6 排放情景下,木荷的总适生区面积 $204.51 \times 10^4 \text{ km}^2$,最佳适生区面积 $51.53 \times 10^4 \text{ km}^2$;较现代气候情景下,木荷的总适生区面积和最佳适生区面积分别增加了 $5.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 RCP4.5 排放情景下,木荷的总适生区面积 $198.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,最佳适生区面积 $53.64 \times 10^4 \text{ km}^2$;较现代气候情景下,木荷的总适生区面积基本一致,但最佳适生区面积增加 $2.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 RCP8.5 排放情景下,木荷的总适生区面积 $197.97 \times 10^4 \text{ km}^2$,最佳适生区面积 $52.83 \times 10^4 \text{ km}^2$;较现代气候情景下,木荷的总适生区面积减少了 $0.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,最佳适生区面积增加 $1.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。综上,在 RCP2.6 排放情景下木荷的总适生区面积最大,在 RCP8.5 排放情景下木荷的总适生区面积最小;与现代相比,未来 3 种排放情景下,最佳适生区

的面积均有略微增加,表明木荷的适生能力较强,能够较好地适应未来各种气候变化,可作为未来植树造林的主要树种之一。

3 讨论

3.1 木荷潜在地理分布对生物气候变量的响应

根据 Maxent 模型模拟后获得的贡献率、置换重要值和 Jackknife 检验结果,得出年降水量(bio12)、最干月降水量(bio14)、最湿季降水量(bio16)和气温年变化范围(bio7)是影响现代木荷潜在地理分布的主导气候变量,即制约木荷分布格局最重要的因子为降水因子,其次为温度因子。娄俊鹏^[37]研究表明,植被的总初级生产力(GPP)在年尺度上与温度因子差异不大,降水因子对植被的动态变化要大于温度因子,本文结果与之相一致。黄石德等^[38]通过研究木荷和马尾松(*Pinus massoniana*)混交林凋落物和土壤呼吸与环境因子之间的联系,结果表明,无降水情景下,凋落物对土壤呼吸的贡献率显著低于降水情景($P<0.05$),仅为 8.6%,表明了降水因子的重要性,与本研究结果一致。张静芬^[39]研究了气候变化对中国亚热带地区木荷的气候适应性变化及其空间差异,结果表明,在经度地带性特征上,木荷对气候变化的适应性自东向西递减;降水因子是造成云南西南部地区木荷适应性较弱的主要因素,这两点也表明了降水因子对木荷适宜性生长和地理分布的重要性。此外,高德强^[40]对广东鼎湖山森林的研究结果表明,在常绿阔叶林中,亚乔木层木荷对降水利用率最高;闫慧等^[41]通过探究不同降水及氮添加对木荷、枫香树(*Liquidambar formosana*)等幼苗的影响,结果也表明:降水和氮素对树木幼苗的生理特征及生长有影响,尤其在干季,降水对净光合速率、气孔导度等指标有显著的影响;此两点也从侧面表明了降水因子是影响木荷地理分布的主导气候变量。综上,降水因子对木荷的潜在地理分布和生长起着极其重要的作用,但在制约木荷潜在地理分布的环境因素中,温度因子也不可忽视,有着不可替代的作用;这与本文的研究结果相一致,也证实了本研究结果的准确性。

然而,由于未来时期的土壤和地形等环境变量数据不易获取,本研究仅使用了气候变量参与建模,对木荷的未来潜在地理分布进行了预测。但影响物种分布的因素是复杂多样的,需要我们综合进行考虑,以更好的了解物种的生活习性。曾超越等^[42]使用 Maxent 模型结合分布点和 22 个环境变量数据,模拟连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)在中国的地理潜在适生区,分析影响其地理位置分布变化和种群特征差异的主要环境因子,结果表明,除温度和降水因子外,地形因子也影响着连香树的地理分布。李莎等^[43]采用 Maxent 模型结合 18 个环境变量和 294 份分布数据对马尾松进行潜在适生区预测,结果表明,土壤因子是影响湖北省马尾松适宜性的主要因子之一。从连香树和马尾松这两种物种中,得知除降水和温度因子外,地形和土壤因子也制约着物种的分布;同理,地形和土壤因子对木荷的分布也起着一定的作用。此外,造成物种空间分布差异的因素,还包括紫外线、种间竞争、人为活动和物种自身特性等。因此,在以后对木荷的研究中,加入上述变量,也许会提高模型对木荷预测的准确性。但本研究结果可以作为整体规划的第一步,对未来木荷种植措施的制定起参考作用。

3.2 未来不同气候排放情景下木荷潜在地理分布格局

在未来,通过 Maxent 模型模拟 3 种气候排放浓度情景下木荷的潜在地理分布,预测结果表明:2041—2060 年 3 种气候排放情景下木荷的总适生区面积与现代基本一致;但高浓度排放情景下(RCP8.5)总面积略小,比现代小 $0.9\times 10^4\text{ km}^2$,减少部分为低适生区和一般适生区的面积。马丽娜等^[44]对中国亚热带地区的木荷进行气候适宜性研究,结果表明,随着时间的推移,在未来气候变化情景下,木荷适宜性有所下降,这与本研究结果有一定类似之处。张春华等^[45]研究发现,未来不同气候排放浓度情景条件下高山栲(*Castanopsis delavayi*)的潜在适生区面积变化幅度与现代相差不大;由于木荷和高山栲均为防火阔叶树种,有着极其相似的生态位,两者的生活习性也都极为相似,适生范围也基本一致^[46];这从侧面验证了本研究结果的准确性。与现代相比,未来 3 种排放情景下,最佳适生区的面积均有略微增加,低(RCP2.6)、中(RCP4.5)和高(RCP8.5)浓度情境下依次增加了 $0.51\times 10^4\text{ km}^2$ 、 $2.62\times 10^4\text{ km}^2$ 和 $1.81\times 10^4\text{ km}^2$ 。一方面可能是因为木荷自身

特性决定的,其具有喜光、耐荫和适应性广等生物学特性^[47]。另一方面也可能是外界环境条件的变化更加符合木荷的生长条件了。因此,在木荷最佳适生区内,和其它树种一起大量种植,这对维持生态系统稳定、缓解气候变化和实现碳中和目标具有重要意义。虽然本研究仅使用了 2041—2060 年这一时间段的生物气候变量数据对木荷潜在地理分布进行预测,但这对中国政府在 2060 年实现碳中和有一定的理论参考价值。

4 结论

通过 Maxent 模型分析表明降水因子是影响木荷分布的主导气候变量,其次为温度因子。同时,明确了木荷潜在适生区的 4 个主导气候变量范围。其中,木荷潜在适生区的最干月降水量 26—214 mm、年降水量 800—2500 mm、最湿季降水量 590—1030 mm 和气温年变化 8.5—28℃。在现代气候条件下,木荷潜在适生区主要分布中国福建、浙江、台湾、江西、湖南、广东、海南、广西、贵州、云南、重庆,以及四川、河南和安徽部分区域,总适生区面积 $198.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 20.7%, 且未来不同气候排放浓度情景下的总适生区面积与现代相差不大。综上,气候变化对木荷总适生区面积无明显影响,但最佳适生区面积有所增加,在最佳适生区内加大对木荷树种的种植,这不仅能够有效缓解气候变化,也对碳达峰目标的实现有益,是中国南方造林树种的最佳选择之一。

参考文献 (References):

- [1] Skendzić S, Zovko M, Živković I P, Lešić V, Lemić D. The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 2021, 12(5): 440.
- [2] Choi S, Drese J H, Jones C W. Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources. *ChemSusChem*, 2009, 2(9): 796-854.
- [3] Köne A Ç, Büke T. Forecasting of CO₂ emissions from fuel combustion using trend analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2906-2915.
- [4] Shakhshiri B Z, Bell J A. Climate change and our responsibilities as chemists. *Arabian Journal of Chemistry*, 2014, 7(1): 5-9.
- [5] Su Y Q, Liu X, Ji J P, Ma X M. Role of economic structural change in the peaking of China's CO₂ emissions: an input-output optimization model. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143306.
- [6] Hong S B, Piao S L, Chen A P, Liu Y W, Liu L L, Peng S S, Sardans J, Sun Y, Peñuelas J, Zeng H. Afforestation neutralizes soil pH. *Nature Communications*, 2018, 9: 520.
- [7] Li A N, Wang J W, Wang R L, Yang H, Yang W, Yang C P, Jin Z. MaxEnt modeling to predict current and future distributions of *Batocera lineolata* (Coleoptera: Cerambycidae) under climate change in China. *Écoscience*, 2020, 27(1): 23-31.
- [8] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [9] Feng X, Park D S, Liang Y, Pandey R, Papeş M. Collinearity in ecological niche modeling: Confusions and challenges. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(18): 10365-10376.
- [10] Hu W J, Wang Y Y, Zhang D, Yu W W, Chen G C, Xie T, Liu Z H, Ma Z Y, Du J G, Chao B X, Lei G C, Chen B. Mapping the potential of mangrove forest restoration based on species distribution models: a case study in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 142321.
- [11] Smith-Ramírez C, Castillo-Mandujano J, Becerra P, Sandoval N, Allende R, Fuentes R. Recovery of Chilean Mediterranean vegetation after different frequencies of fires. *Forest Ecology and Management*, 2021, 485: 118922.
- [12] Gigović L, Pourghasemi H R, Drobnjak S, Bai S B. Testing a new ensemble model based on SVM and random forest in forest fire susceptibility assessment and its mapping in Serbia's Tara National Park. *Forests*, 2019, 10(5): 408.
- [13] Zheng C, Wen Z, Liu Y Y, Guo Q, Jiang Y M, Ren H Y, Fan Y M, Yang Y T. Integrating habitat suitability and the near-nature restoration priorities into revegetation plans based on potential vegetation distribution. *Forests*, 2021, 12(2): 218.
- [14] Wang X Y, Kittiwattanawong K, Junchompoo C, Sakornwimon W, Chen M, Wu F X, Jutapruet S, Huang S L. Mapping habitat protection priority over a marine ecoregion under information gaps. *Diversity and Distributions*, 2021, 27(2): 233-248.
- [15] Dhyani A, Kadaverugu R, Nautiyal B P, Nautiyal M C. Predicting the potential distribution of a critically endangered medicinal plant *Lilium polyphyllum* in Indian Western Himalayan Region. *Regional Environmental Change*, 2021, 21(2): 30.
- [16] Mushtaq S, Reshi Z A, Shah M A, Charles B. Modelled distribution of an invasive alien plant species differs at different spatiotemporal scales under changing climate: a case study of *Parthenium hysterophorus* L. *Tropical Ecology*, 2021, 62(3): 398-417.
- [17] Ma J, Chen H, Gao X, Xiao J H, Wang H B. African swine fever emerging in China: distribution characteristics and high-risk areas. *Preventive Veterinary Medicine*, 2020, 175: 104861.

- [18] Ikegami M, Jenkins T A R. Estimate global risks of a forest disease under current and future climates using species distribution model and simple thermal model - Pine Wilt disease as a model case. *Forest Ecology and Management*, 2018, 409: 343-352.
- [19] Martins T G V, Reis G G, Reis M G F, Telles L A A, Lage M R, Mendes G G C, Pinto D L, Castro N L M, Lorenzon A S, Silva R S, Gonz  les D G E. Potential planting areas for native tree species in Minas Gerais state, Brazil, based on environmental variables and wood demand. *Ecological Modelling*, 2020, 432: 109211.
- [20] Yang H B, Zhang R, Song P, Zhou Z C. The floral biology, breeding system and pollination efficiency of *Schima superba* gardn. et champ. (Theaceae). *Forests*, 2017, 8(10): 404.
- [21] Zhang R, Pan H W, He B T, Chen H W, Zhou Z C. Nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Schima superba* under nitrogen deposition. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13669.
- [22] 赵育敏. 马占相思人工林中木荷的天然更新. *林业勘察设计*, 2020, 40(3): 57-60.
- [23] Wu C, Wu H T, Wang Q, Wang G H, Yi X, Chen Y P, Zhou G X. Anticandidal potential of stem bark extract from *Schima superba* and the identification of its major anticandidal compound. *Molecules*; Basel, Switzerland, 2019, 24(8): 1587.
- [24] Yang C P, Chang X L, Zhang M, Ni X X, Lv T X, Gong G S, Yue G Z, Sun X F, Chen H B. Active compounds of stem bark extract from *Schima superba* and their molluscicidal effects on *Pomacea canaliculata*. *Journal of Pest Science*, 2018, 91(1): 437-445.
- [25] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 杨玉盛. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2235-2240.
- [26] 陶思晨, 张笑颜, 赵珍, 林兴稳, 房荷丹, 胡卓尔, 骆超男, 叶昕宇, 沈菲儿, 张振振. 不同城市化梯度下木荷(*Schima superba*)功能性状差异. *生态学报*, 2021, 41(10): 4099-4109.
- [27] 徐肇友, 王云鹏, 肖纪军, 沈斌, 王帮顺, 周志春. 不同产地木荷优树无性系表型多样性. *东北林业大学学报*, 2021, 49(2): 5-10, 17.
- [28] 金超, 吴初平, 丁易, 袁位高, 朱锦茹, 黄玉洁, 焦洁洁, 臧润国, 江波. 午潮山常绿次生阔叶林主要木本植物功能群及其演替特征. *生态学报*, 2021, 41(8): 3053-3066.
- [29] 丁翊东, 徐江琪, 郑娇, 吴盼盼, 毛璐. 亚热带典型人工林凋落物地表和空中分解过程中溶解性有机质数量和光谱特征. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1599-1608.
- [30] 汪清, 潘萍, 欧阳勋志, 臧颢, 宁金魁, 冯瑞琦, 徐丽. 马尾松-木荷不同比例混交林种内和种间竞争强度. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 49-57.
- [31] 闫小莉, 胡文佳, 马远帆, 霍昱帆, 王拓, 马祥庆. 异质性供氮环境下杉木、马尾松、木荷氮素吸收偏好及其根系觅氮策略. *林业科学*, 2020, 56(2): 1-11.
- [32] Li S Y, Miao L J, Jiang Z H, Wang G J, Gnyawali K R, Zhang J, Zhang H, Fang K, He Y, Li C. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(3): 210-217.
- [33] 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. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [34] 李垚, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1164-1178.
- [35] 宁瑶, 雷金睿, 宋希强, 韩淑梅, 钟云芳. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 946-954.
- [36] Jessica B S, Christine R W, Karen V R. Developing macrohabitat models for bats in parks using maxent and testing them with data collected by citizen scientists. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 2014, 6(2): 171-183.
- [37] 姜俊鹏. 潮河流域植被动态变化及水资源效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [38] 黄石德. 降水和凋落物对木荷马尾松混交林土壤呼吸的影响. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(2): 218-225.
- [39] 张静芬. 中国亚热带木荷的气候适宜性研究[D]. 广州: 广州大学, 2011.
- [40] 高德强. 鼎湖山典型森林水文过程氢氧稳定同位素特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [41] 闫慧, 吴茜, 丁佳, 张守仁. 不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响. *生态学报*, 2013, 33(14): 4226-4236.
- [42] 曾超越, 钟乾娟, 王崇云, 胡艳萍, 吴明慧, 蒙薇, 彭明春. 中国连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)生态适宜区及种群特征. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2704-2712.
- [43] 李莎, 史明昌, 刘小宇, 赵辉, 孙林山, 柯尊发, 周欢. 湖北省马尾松精准适宜性空间分布. *生态学报*, 2019, 39(6): 1960-1968.
- [44] 马丽娜, 千怀遂, 张静芬. 未来气候情景下中国亚热带地区木荷气候适宜性. *安徽农业科学*, 2012, 40(24): 12127-12131, 12190.
- [45] 张春华, 雷晨雨, 田瑞杰, 冯德枫, 孙永玉. 用材树种高山栲潜在适生区分布区及影响因子. *西部林业科学*, 2021, 50(3): 28-33.
- [46] 李修鹏, 杨晓东, 余树全, 阎恩荣, 章建红. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价. *生态学报*, 2013, 33(20): 6604-6613.
- [47] 朱婷婷, 王懿祥, 朱旭丹, 尤誉杰, 邱焯婷. 遮光对木荷和枫香光合特性的影响. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(1): 28-35.