



•研究报告•

气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估

周润^{1,2}, 慈秀芹^{1,3}, 肖建华^{1,2}, 曹关龙^{1,2}, 李捷^{1,3*}

1. 中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心, 昆明 650223; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院核心植物园综合保护中心, 云南勐腊 666303

摘要: 常绿阔叶林的优势类群由于其个体数量多、盖度大、生物量高、生存能力强, 对维持相应生态系统的稳定起着主导作用。樟属(*Cinnamomum*)植物为亚热带常绿阔叶林的优势类群, 通过对其过去、当前和未来潜在分布区的研究可以了解该类的变迁历史, 为理解亚热带常绿阔叶林动态变化提供帮助, 有助于亚热带常绿阔叶林保育策略的制定。本研究利用最大熵(MaxEnt)模型模拟了我国樟属47种植物在5个时期(末次间冰期、末次盛冰期、全新世中期、当前和未来)的潜在分布区及物种丰富度热点区域。此外, 根据樟属植物的物种丰富度热点区域与自然保护区相叠加, 对当前自然保护区的保护状态进行了评估, 尤其是为保护亚热带常绿阔叶林而设立的自然保护区。结果表明: 樟属物种的潜在分布区在5个时期变化均不大, 仅在亚热带-温带交界处的各大山脉和平原之间出现局部收缩和扩张; 值得注意的是, 物种丰富度热点区域在5个时期变化明显, 末次盛冰期面积最大, 相较于末次间冰期、全新世中期和当前分别多96%、88%和37%; 未来(~2080年)两种不同温室气体排放典型浓度途径(representative concentration pathways, RCP) (RCP2.6和RCP8.5)下, 樟属物种丰富度热点区域面积将分别比当前收缩8.4%和10.0%, 并且随着温室气体排放的增加, 物种热点区域收缩趋势会更加明显。此外, 本研究发现樟属物种丰富度热点区域主要位于我国四川东南部、贵州南部、广西和广东, 然而仅7.5%位于现有自然保护区内, 未来自然保护区、国家公园等自然保护地的扩建、选址和规划应优先考虑四川东南部和华南地区。

关键词: 气候变化; 亚热带常绿阔叶林; 优势类群; 樟属; 保护区评估; MaxEnt模型

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. doi: 10.17520/biods.2020482.

Zhou R, Ci XQ, Xiao JH, Cao GL, Li J (2021) Effects and conservation assessment of climate change on the dominant group—The genus *Cinnamomum* of subtropical evergreen broad-leaved forests. Biodiversity Science, 29, 697–711. doi: 10.17520/biods.2020482.

Effects and conservation assessment of climate change on the dominant group—The genus *Cinnamomum* of subtropical evergreen broad-leaved forests

Run Zhou^{1,2}, Xiuqin Ci^{1,3}, Jianhua Xiao^{1,2}, Guanlong Cao^{1,2}, Jie Li^{1,3*}

1 Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Center of Conservation Biology, Core Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

ABSTRACT

Aims: The Chinese subtropical evergreen broad-leaved forest is facing great threats, caused by global climate change, and its protection needs to be solved urgently. *Cinnamomum* is the dominant genus for the subtropical evergreen broad-leaved forest. *Cinnamomum* is fundamental to the stability of the subtropical evergreen broad-leaved forest ecosystem due to its large number of individuals, large coverage, high biomass, and strong living ability. Here, we predict the potential spatial distribution pattern (potential distribution area and species richness hotspots area) for *Cinnamomum* under five periods of bioclimatic, overlay the nature reserves on species richness hotspots to evaluate the

收稿日期: 2020-12-28; 接受日期: 2021-03-18

基金项目: 中国科学院战略生物资源服务网络计划生物多样性保护策略(ZSSD-013)和国家自然科学基金(31770569)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jieli@xtbg.ac.cn

conservation status of *Cinnamomum*, and make reasonable suggestions for the nature reserves, national parks, and other protected areas.

Methods: In this study, we collected occurrence data for 47 species of *Cinnamomum* in China and bioclimatic data during five periods (i.e. Last Interglacial (LIG), Last Glacial Maximum (LGM), Mid Holocene (MH), current, and future). Using the bioclimatic data, we predicted the potential distribution and species richness hotspots of *Cinnamomum* using the maximum-entropy (MaxEnt) model, and overlay the nature reserve on species richness hotspots of *Cinnamomum* to evaluate the conservation status, especially in the subtropical evergreen broad-leaved forest nature reserves.

Results: The change in the potential distribution area for *Cinnamomum* was not significant among the five time periods. However, the area of potential distribution for this group has contracted and expanded in the mountains and plains, especially at the border between subtropical and temperate regions. The hotspots for species richness did change significantly among the five periods. Among these periods, the potential distribution area of *Cinnamomum* during the LGM was the largest, and 96%, 88%, and 37% higher than the LIG, MH, and current time period, respectively. For the future scenarios (~2080 years), the area of species richness hotspots will contract 8.4% for representative concentration pathways (RCP) 2.6 and 10.0% for RCP8.5. With the increase of greenhouse gas emissions, the degree of contraction will be sharper. Through conservation assessment, species richness hotspots of *Cinnamomum* are mainly located in southeastern Sichuan, southern Guizhou, Guangxi, and Guangdong provinces. Only 7.5% of species richness hotspots are distributed in nature reserves.

Conclusions: The distribution center of *Cinnamomum* is mainly located in southeastern Sichuan and southern China, and the future climate change will have a negative impact on species richness hotspots for this genus. Therefore, the management and planning for the nature reserve, national park, and other protected areas should consider southeastern Sichuan and southern China as areas in need of more protection.

Key words: climate change; subtropical evergreen broad-leaved forest; dominant group; *Cinnamomum*; nature reserve assessment; MaxEnt model

中国亚热带地区是中国经济最发达、人口最密集的地区, 拥有世界上面积最大的常绿阔叶林, 具有较高的生物多样性和生态服务功能(宋永昌, 2013; Fang et al, 2014; Xiang et al, 2016)。数千年来, 受人类经济活动与全球气候变化的深刻影响, 我国亚热带常绿阔叶林在纬度上不断发生变迁(宋永昌, 2013), 尤其是在20世纪中叶到21世纪初发生了大幅度向北推移(缪启龙等, 2009)。据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告, 未来全球气候将持续变暖, 全球平均温度将在21世纪末上升0.3–4.8°C (Allen et al, 2007), 这将在不同程度上影响中国气候的变化和极端天气的产生(黄晓莹等, 2008; 赵宗慈等, 2008), 从而影响我国亚热带常绿阔叶林分布区及地上生物量的变化(Dai et al, 2016)。由此可见, 亚热带常绿阔叶林亟需保护(宋永昌, 2013), 建立自然保护区便是对其进行保护的有效手段, 但目前我国亚热带常绿阔叶林被保护的比例仅12.3% (陈雅涵等, 2009), 且自然保护区覆盖率偏低并呈片断化分布, 存在一定的保护空缺, 保护区布局有待优化(马克平, 2001; Tang et al, 2006; Lu et al, 2018; Cai et

al, 2021)。因此, 在全球气候变暖等背景下, 有必要对现有的自然保护区进行优化, 尤其是提高亚热带常绿阔叶林的保护比例。

在亚热带常绿阔叶林群落中, 优势类群个体数量多、盖度大、生物量高、体积较大、生存能力强, 对群落结构的形成和群落环境的稳定有重要作用(王春晶, 2017)。然而, 大幅度的气候变化与极端气候可能会对优势类群产生消极影响(Parnesan & Yohe, 2003; Gebrekirstos et al, 2008), 再加上过度开发利用优势树种是世界许多地区普遍存在的现象(Muñoz et al, 2015), 这都将会导致天然林的稳定性降低, 直接威胁森林植物多样性(Canadell & Raupach, 2008; Prieto-Torres et al, 2016)。因此, 在全球气候变化情景下, 为了更好地保护亚热带常绿阔叶林, 维持其生态系统稳定, 需要着重保护群落优势种(王春晶, 2017)。樟属(*Cinnamomum*)隶属于樟科, 为常绿乔木或灌木, 我国约有49种, 广泛分布于我国南方, 北达陕西及甘肃南部, 是集经济、工业和生态等价值于一身的重要类群(李锡文, 1982; 李捷和李锡文, 2004; Li et al, 2008)。作为被子植物的基部类群之一, 樟属在早始新世伴随着常绿阔叶

林起源于劳亚古陆,在新生代最温暖的时候扩张到北半球的高纬度地区,在晚始新世后由于气候变冷向南退缩,并因白令陆桥的消失而形成跨太平洋的间断分布,是我国现代常绿阔叶林的重要组成部分(宋永昌, 2013; Huang et al, 2016)。樟属植物作为优势类群在我国典型常绿阔叶林乔木层中占有重要地位,其属的区系重要值为56.52,在常绿阔叶林所有物种属中位居第四(王希华, 2006);且广泛分布于我国亚热带常绿阔叶林中,如樟(*C. camphora*)、香桂(*C. subavenium*)在北亚热带及中亚热带是优势种,云南樟(*C. glanduliferum*)、阴香(*C. burmannii*)则在中亚热带至南亚热带是优势种或者常见种,而天竺桂(*C. japonicum*)常见于东部亚热带地区(倪建和宋永昌, 1997; Tang, 2015)。大部分樟属物种喜暖喜湿,但也有部分物种适应了低温寒冷的气候,例如樟、猴樟(*C. bodinieri*)和银木(*C. septentrionale*)等能耐 -10°C 以下的绝对最低温(张旻桓等, 2011; 程许娜, 2012^①; 王朴等, 2012),这为樟属植物的分布区扩张与应对极端气候提供了可能。

以多样性格局数据为基础的物种分布区是该物种在一个区域内能够分布的最大范围,并与其生存息息相关(Jenkins et al, 2013; Di Marco & Santini, 2015)。物种丰富度指一个区域内的总物种数,常作为确定自然保护区和评估保护优先等级的标准(如Han et al, 2019; D'Amen & Azzurro, 2020),而物种丰富度热点区域代表物种多样性最丰富的区域,是在有限的人力、物力和财力下实现生物多样性最优保护的一种途径(Myers, 1990; Brummitt & Lughadha, 2003)。因此,对物种分布区和物种丰富度热点区域的研究有助于了解物种和类群迁移规律,进而为生物类群保育策略的合理制定提供科学依据(李利平等, 2019)。物种分布模型(species distribution modelling, SDM)利用物种的分布数据,并结合其生境下的环境变量推测物种的基础生态位(fundamental niche),再结合不同历史时期的环境数据模拟不同时期物种的潜在分布区(Araújo & Peterson, 2012)。在众多SDM中,最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型具有建模快、使用广、精度高等优点(Merow et al, 2013),即使在样本量较少的情

况下也具有较高的精度和稳定性(Pearson et al, 2007),相比于其他SDM模型能够更好地预测物种的潜在分布(Phillips et al, 2006)。

目前关于气候变化对中国亚热带常绿阔叶林优势类群影响的研究还较少,大部分的研究涉及单个物种,而对植物物种多样性和丰富度方面的研究较为匮乏,且不同植物对气候变化有着不同的响应趋势(吕佳佳和吴建国, 2009; 郑维艳和曹坤芳, 2020)。因此,需要综合研究多个物种的变化趋势来探讨气候变化对亚热带常绿阔叶林的影响。鉴于樟属植物作为优势类群在亚热带常绿阔叶林森林群落中占据着不可忽视的重要地位,本研究将结合全球气候变化情景下的气候数据和樟属的地理分布数据,利用MaxEnt模型模拟中国樟属植物在间冰期、冰期、当前及未来的潜在分布区,探讨其不同气候背景下的分布区和物种丰富度热点区域的变迁历史,评估我国现有自然保护区对樟属植物的保护状况。期望本研究能有助于了解气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群的影响,为我国亚热带常绿阔叶林自然保护地的规划和布局提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据的收集

在全球生物多样性信息网络(GBIF, <https://www.gbif.org/>)下载中国范围内具有经纬度坐标信息的所有樟属植物数据(GBIF.org, 2019),根据*Flora of China* (<http://www.efloras.org/>)和The Plant List (<http://www.theplantlist.org/>)进行详细校对,剔除一些中国没有分布及鉴定错误的物种;再查阅中国科学院西双版纳热带植物园标本馆(HITPC)、中国科学院昆明植物研究所标本馆(KUN)、中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)和国家标本资源共享平台(NSII, <http://www.nsii.org.cn/>),并利用Google Earth定位补充物种地理分布信息,对于年代久远且记录地址不详的分布点进行删除。虽然*Flora of China*第七卷中记载中国樟属包含49个物种,但是在以上的所有数据库均没有发现短序樟(*C. brachythyrsum*)和绒毛樟(*C. rufotomentosum*)的分布点(Li et al, 2008)。因此,本研究的樟属物种是指除短序樟和绒毛樟以外的47个樟属物种(附录1)。为了避免MaxEnt运行时过度拟合,将樟属所有物种的分布数据导入ArcGIS 10.2中剔除重复点,即10 km

① 程许娜 (2012) 猴樟对低温胁迫的生理响应及其耐寒性分析. 硕士学位论文, 河南农业大学, 郑州.

以内的物种分布点只保留其一, 共计得到2,587个具有经纬度信息的樟属植物分布点。

1.2 环境数据

从古气候网站(<http://www.paleoclim.org/>)下载3个阶段的古气候数据, 即末次间冰期(Last Interglacial, LIG; ~120,000–140,000 years BP)、末次盛冰期(Last Glacial Maximum, LGM; ~22,000年BP)、全新世中期(Mid-Holocene, MH; ~6,000年BP); 从世界气候数据网站(<https://www.worldclim.org/>)下载当前(Current, 1950–2000年)和未来(2060–2080年)的气候数据(详见附录2)。未来气候变化情景选取中国气象局北京气候中心(BCC-CSM2-MR)提供的大气环流模型结果, 该模型预测了未来4种温室气体排放情景, 其典型浓度途径(representative concentration pathways, RCP)分别为RCP2.6、RCP4.5、RCP7.0、RCP8.5。本研究采用该气候模型中两个温室气体排放的极端情况, 即RCP2.6和RCP8.5。其中, RCP2.6情景表示人类采用更加积极的方式应对未来气候变化, 温室气体的排放水平在未来先上升后下降, 到本世纪中叶(2046–2065年), 全球平均地表温度上升0.4–1.6℃, 辐射强度为4种情景中最低; RCP8.5情景表示假定能源消费结构改善比较缓慢, 没有减排措施, 温室气体将持续保持较高速率排放, 到本世纪中叶, 全球平均地表温度上升1.4–2.6℃, 辐射强度为4种情景中最高, 气候变化最剧烈(Riahi et al, 2011; van Vuuren et al, 2011)。

气候数据均采用2.5'的分辨率, 用ArcGIS 10.2软件按照研究区域进行裁剪, 并将裁剪后的气候数据转换为ASCII格式。中国地图来源于自然资源部标准地图服务(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html>), 地理坐标参考系统为WGS1984。

为了避免环境因子之间的高相关性而导致模拟结果的过度拟合, 影响MaxEnt模型评估环境变量的贡献率(Luo et al, 2017), 利用R软件的cor函数对不同历史时期的19个气候变量进行Pearson相关性分析, 保留 $r < |0.7|$ 中贡献率较小的气候因子(详见附录2)。

1.3 MaxEnt模型参数设置与可信度检验

将樟属的物种分布数据(.CSV格式)和5个时期的气候数据(.ASCII格式)导入MaxEnt3.4.1软件中进行物种生态位模拟。樟属物种可用坐标点的范围为

15–317个不等, 均符合MaxEnt模型对最少数据的要求(Pearson et al, 2007)。对于坐标点少于25个的物种, 采用Jackknife方法进行模拟评估, 具体是在建立一个物种的模型时, 将其中一个物种的坐标移除, 并基于剩下的 $n-1$ 个坐标建立模型, 由此每个物种可以建立 n 个模型, 选择最优模型来进行MaxEnt生态位模拟(Pearson et al, 2007); 对于可用坐标点大于25个的物种, 设置物种分布数据的75%作为训练集, 25%作为测试集。运算迭代次数设置为20次, 其余均采用默认值。以受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic, ROC)下的面积(areas under curves, AUC)作为评估模拟结果的可靠性。AUC值的范围为[0, 1], 越接近1表明模拟的可靠性越高(Jiang et al, 2016): 当AUC值为[0.9, 1]时模拟结果非常准确; [0.8, 0.9]时模拟结果准确; [0.7, 0.8]时模拟结果一般; 小于0.7时结果不可信(Elith et al, 2006)。基于MaxEnt 3.4.1软件自动生成的气候变量贡献率、SPSS中的主成分分析(principal component analysis, PCA)及Pearson相关性分析, 综合分析限制樟属植物地理分布的主导气候变量。

1.4 物种丰富度热点区域预测及保护评估

将MaxEnt模型模拟结果导入ArcGIS 10.2软件中转化为栅格图层进行可视化处理, 采用10%训练存在阈值作为物种适生区临界值, 即高于该值为适生区, 低于该值为非适生区(Radosavljevic & Anderson, 2014)。通过图层叠加和栅格计算得到每一栅格内物种存在的数量, 即物种丰富度。将物种丰富度大于1的区域作为樟属分布区。根据前人的研究, 将物种丰富度前5%、10%、25%的区域作为物种丰富度热点区域(Xu et al, 2017; Yu et al, 2017b), 由于本研究的樟属物种有限(47种), 最终选择物种丰富度前25%的地区作为樟属的物种丰富度热点区域。根据中国森林覆盖率情况, 将某一市级行政区域内物种丰富度热点区域面积占该区域总面积23%以上的行政区域列为保护评估对象(王兮之, 2019)。利用中国国家级、省级、市县级自然保护区底图数据(Zhang et al, 2015)与评估对象相叠加, 并结合中华人民共和国生态环境部发布的《2017年全国自然保护区名录》(<http://www.mee.gov.cn/ywgg/zrstbh/zrbhdjg/201905/P020190514616282907461.pdf>), 共同进行该区域的保护评估。

2 结果

MaxEnt模型模拟结果显示, 中国樟属47种植物模拟曲线的AUC值均大于0.9, 表明MaxEnt模型预测结果可靠(附录1)。

2.1 当前樟属潜在分布区空间格局

模型模拟结果表明, 当前樟属物种潜在分布区域总面积为251.61万km², 北达陕西南部 and 甘肃南部, 向南分布于南方各省; 樟属物种丰富度热点区域总面积为16.55万km², 主要分布在广东、广西、贵州南部和四川东南部, 云南南部、海南南部也有少量分布(图1D)。大部分樟属物种的适宜生境在长江以南区域, 仅有少数物种的适宜生境可达长江以北的陕西、甘肃南部等地, 例如油樟(*C. longepaniculatum*)、阔叶樟(*C. platyphyllum*)、川桂(*C. wilsonii*)和银木; 部分物种的适宜分布区非常狭窄, 例如滇南桂(*C. austroyunnanense*)、爪哇肉桂(*C. javanicum*)、细毛樟(*C. tenuipile*)和毛叶樟仅分布在云南南部, 兰屿肉桂(*C. kotoense*)、土肉桂(*C. osmophloeum*)、菲律宾樟树(*C. philippinense*)和网脉桂(*C. reticulatum*)仅分布在台湾。

模型模拟结果还表明, 大部分樟属物种的分布同时受到多个环境因子影响, 其中最干季降水量、最冷季降水量、年平均降水量和温度季节变化对大多数樟属物种的分布有显著影响。少数物种分布的主导环境因子(累积贡献率大于90%)仅为单气候因子, 例如毛叶樟、细毛樟主要受等温性影响, 而网脉桂主要受年温度变化范围的影响(附录1)。樟属物种丰富度热点区域内环境因子的前3个主成分方差解释率为88.966% (PCA1: 48.277%, PCA2: 31.961%, PCA3: 8.758%), 足够代表所有成分的特征(Cattell, 1966)。在方差解释最多的PCA1中, 载荷值的绝对值大于0.8的气候因子分别是年平均降水量、最干月降水量、最干季降水量和最冷季降水量, 这表明它们对樟属物种丰富度具有决定性作用。对樟属物种丰富度与这4个环境因子的相关性分析显示它们与樟属的物种丰富度均呈正相关关系(附录3)。

2.2 过去和未来樟属潜在分布空间格局

LIG、LGM和MH时期, 樟属植物潜在分布区面积分别为243.04万km²、249.46万km²和250.96万km², 其中LGM比LIG增加2.6%, 扩增的区域主要在大别山、巫山、大巴山和喜马拉雅山脉东段, 但在关中

平原、湖北中部和江苏沿海等低海拔地区有小部分收缩; MH比LGM增加0.6%, 扩增的区域主要在秦岭山脉周围及江苏、山东沿海; 相比于当前的分布范围, 3个历史时期樟属植物的潜在分布区面积分别减少3.4%、0.85%和0.26%。在未来RCP2.6和RCP8.5情景下, 樟属植物潜在分布区面积分别为253.33万km²和245.54万km², 其中RCP2.6情景比当前潜在分布区面积增加0.7%, 扩增的区域主要在湖北东北部; RCP8.5情景比当前和RCP2.6情景分别减少2.4%和3.1%, 均沿着亚热带北部边缘轻度收缩。樟属植物潜在分布面积按大小排序为: 2080 (RCP2.6) > 当前 > MH > LGM > 2080 (RCP8.5) > LIG, 虽总体上看略有扩张的趋势, 但变化幅度不大(图1)。

樟属物种丰富度热点区域在5个时期均主要分布在华南和西南地区, LIG、LGM和MH面积分别为11.56万km²、22.68万km²和12.05万km², LGM的面积最大、分布范围也最广, 比LIG、MH和当前分别增加96%、88%和37%; 未来RCP2.6和RCP8.5情景下分别为15.17万km²和14.91万km², 分别比当前减少8.4%和10%。可见, 在未来全球气候变暖增湿的两种情景条件下, 樟属物种丰富度热点区域均呈收缩趋势, 并且随着温室气体的持续排放, 热点区域逐渐缩减至华南地区。物种丰富度热点区域面积按大小排序为: LGM > 当前 > 2080 (RCP2.6) > 2080 (RCP8.5) > MH > LIG, 总体略有扩张的趋势, 且在5个时期均有较大变化(图1)。

2.3 自然保护区保护评价

模型模拟结果表明, 当前中国樟属物种丰富度热点区域主要分布在四川东南部、贵州南部、广西和广东(图1D), 但只有7.5% (1.25万km²)的热点区域分布于各级自然保护区内, 存在大量的保护空缺。对不同区域的樟属物种组成进行分析(附录4)并和自然保护区与热点区域叠加(图2)发现:

(1)四川东南部的樟属物种丰富度热点区域面积占该省市级行政区域面积23%以上的主要为乐山市, 樟属物种丰富度为22种。该市虽然建设有黑竹沟和马边大风顶2个国家级自然保护区, 但均未能对樟属物种丰富度热点区域进行保护。

(2)贵州南部的樟属物种丰富度热点区域面积占该省市级行政区域面积23%以上的主要为黔东南布依族苗族自治州, 樟属物种丰富度为19种。该地

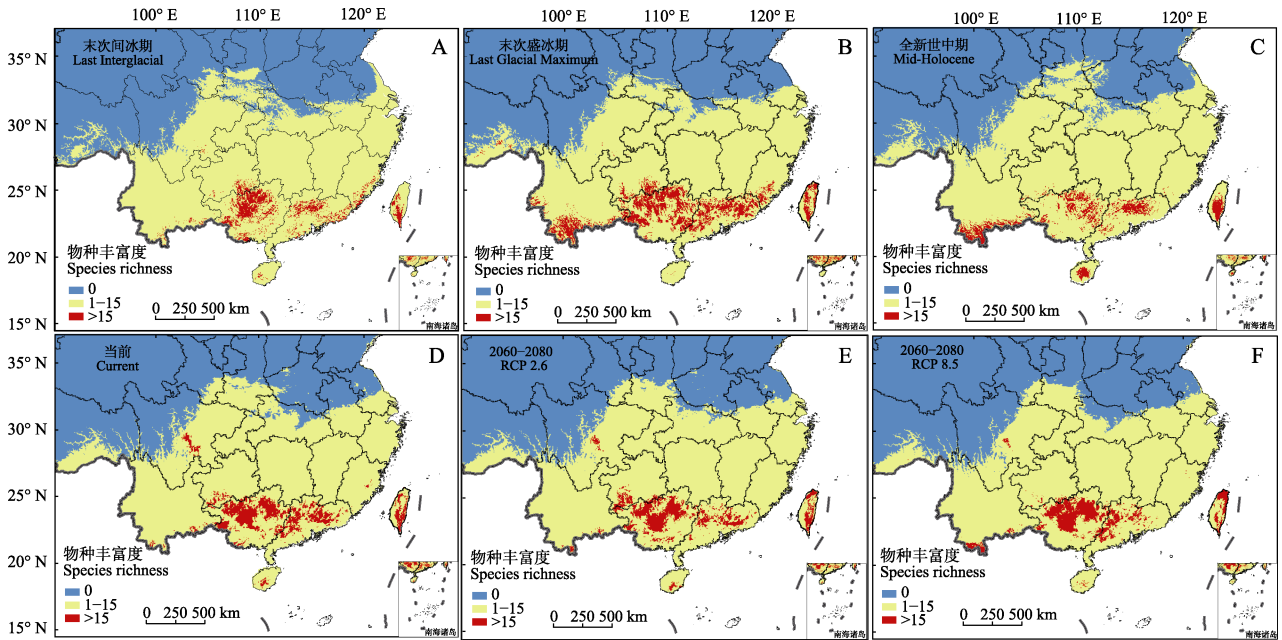


图 1 中国樟属植物物种丰富度分布图。A–F 依次为末次间冰期(LIG)、末次盛冰期(LGM)、全新世中期(MH)、当前 (Current) 以及未来 2060–2080 年 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下樟属植物物种丰富度。

Fig. 1 Distribution of species richness of *Cinnamomum* in China. A–F shows the species richness of *Cinnamomum* under the scenarios of the Last Interglacial (LIG), Last Glacial Maximum (LGM), Mid-Holocene (MH), current, RCP2.6 and RCP8.5 in future 2060–2080, respectively.

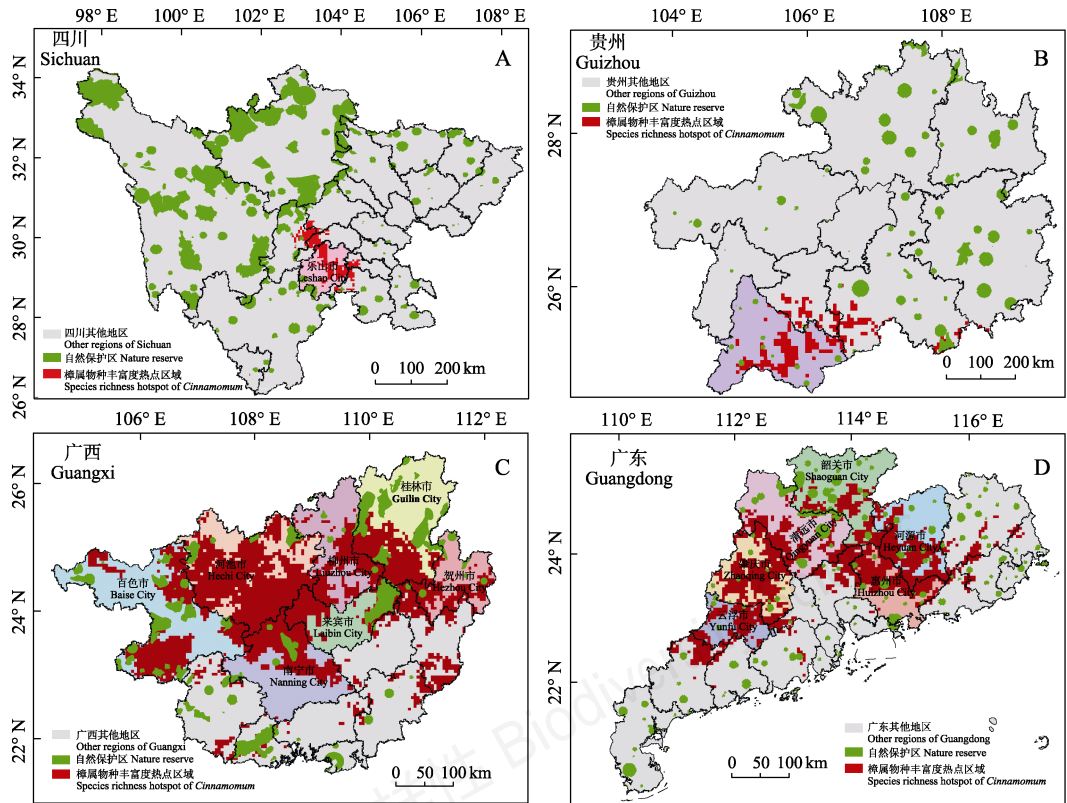


图 2 中国樟属物种丰富度热点区域的保护现状。中国自然保护区的数据引自 Zhang 等(2015)。

Fig. 2 Conservation status of species richness hotspots of *Cinnamomum* in China. The data of Chinese nature conservation reserve are from Zhang et al (2015).

区设立了35个面积小、分散零落的市县级自然保护区, 仅有仙鹤坪和龙头大山市级自然保护区、赖子山县级自然保护区保护了该区域仅3.11%的樟属物种丰富度热点区域。

(3) 广西的樟属物种丰富度热点区域面积占该省市级行政区域面积23%以上的主要有百色市、河池市、柳州市、桂林市、南宁市、来宾市和贺州市, 樟属物种丰富度分别为24种、23种、20种、18种、20种、18种和18种, 其中百色市建立了岑王老山国家级自然保护区、大王岭省级自然保护区、老虎跳省级自然保护区、百东河市级自然保护区等19个自然保护区; 桂林市建有花坪国家级自然保护区、架桥岭省级自然保护区、寿城省级自然保护区等12个自然保护区; 南宁市建有大明山国家级自然保护区、龙虎山省级自然保护区等6个自然保护区, 来宾市建有大瑶山国家级自然保护区、金秀老山省级自然保护区; 贺州市建有七冲国家级自然保护区、姑婆山省级自然保护区、滑水冲省级自然保护区、西岭山省级自然保护区、大桂山省级自然保护区, 各区域内的热点区域都得到了较好保护。河池市的樟属物种丰富度热点区域面积最大, 占该市面积的71.13%, 但该市的本论国家级自然保护区、龙滩省级自然保护区、九万山国家级自然保护区仅对该市7%的樟属物种丰富度热点区域进行了保护。柳州市建有九万山国家级自然保护区、元宝山国家级自然保护区、拉沟鸟类县级自然保护区, 但仅有拉沟鸟类县级自然保护区对该市8%的樟属物种丰富度热点区域进行了保护。

(4) 广东的樟属物种丰富度热点区域面积占该省市级行政区域面积23%以上的主要有云浮市、肇庆市、清远市、韶关市、河源市和惠州市, 樟属物种丰富度分别为20种、22种、19种、18种、20种、21种。肇庆市建有鼎湖山国家级自然保护区、黑石顶省级自然保护区、深坑市级自然保护区、罗壳山市级自然保护区等24个自然保护区; 清远市建有笔架山省级自然保护区、石门台国家级自然保护区等26个自然保护区; 韶关市建有南岭国家级自然保护区、车八岭国家级自然保护区、乳源大峡谷省级自然保护区等36个自然保护区; 河源市建有新港省级自然保护区、康禾省级自然保护区等50个自然保护区; 惠州市建有象头山国家级自然保护区、南昆山省级自然保护区、罗浮山省级自然保护区、惠东白

马山县级自然保护区等29个自然保护区, 各自对樟属物种丰富度热点区域进行了较好保护。云浮市虽然建有大云雾山市级自然保护区、罗定龙湾市级自然保护区、郁南望君山县级自然保护区等11个自然保护区, 但仅对该市6.6%的樟属物种丰富度热点区域进行了保护。

3 讨论

3.1 樟属植物潜在空间分布格局

本研究结果表明, 樟属植物广泛分布于长江以南区域, 向北可达陕西、甘肃南部等地, 其物种丰富度热点区域主要分布在广东、广西、云南南部、四川东南部和海南等我国大陆北热带及亚热带地区的中南部(图1D), 这与前人的研究结果基本吻合(李锡文, 1982; 查凤书等, 2008; 张规富和何帅艳, 2014; 郑维艳等, 2018)。中国亚热带常绿阔叶林分布在 23° – 33° N、 98° – 123° E之间, 大致在长江以南各省(宋永昌, 2013), 与樟属植物的分布区范围基本一致。我国亚热带地区主要受到东亚季风的影响, 其中西部地区主要受印度洋西南季风的影响, 而东部地区主要受太平洋季风的影响, 季风带来的大量降水造就了我国亚热带丰富的生物多样性(Qiu et al, 2011; 陈灵芝等, 2015)。MaxEnt模型的拟合结果和主成分分析结果表明, 年平均降水量、最干季降水量、最冷季降水量等水分因子影响了大多数樟属植物的分布(附录1), 同时也在塑造樟属物种丰富度空间分布格局上有重要的作用, 说明水分因子是影响樟属植物分布的主要气候因子, 且随着水分的增多, 樟属植物分布区扩大、物种丰富度增加(附录3)。

根据化石孢粉学证据, 在末次盛冰期时, 我国常绿阔叶林向南退缩至华南地区, 冰期后又向北扩张至现在的纬度(Ni et al, 2010)。也有研究表明, 在未来气候条件下, 亚热带常绿阔叶林植物将会北扩东进, 推测我国亚热带常绿阔叶林将向北方移动(Ni et al, 2000; 吴显坤等, 2016; 胡文强等, 2017; Lim et al, 2018)。但本研究结果表明, 樟属植物的潜在分布区在各个时期的变化并不明显, 整体变化范围仅0.6%–3.4%, 只在亚热带常绿阔叶林边缘的各大山脉和平原出现局部的扩张与收缩。我们推测有以下几个原因: 第一, 亚热带常绿阔叶林植物的谱系地理研究表明, 在第四纪盛冰期部分植物有着多个隐形避难所(24° – 33° N), 即多个避难所模式(Shi

et al, 2014; Ma et al, 2015; Zhu et al, 2020), 它们主要通过局部地区高低海拔间进行迁移来度过冰期与间冰期的交替(Qiu et al, 2011; Dao et al, 2013); 同时也有部分植物呈现出南方大型避难所($\sim 24^{\circ}$ N)的模式(Denk & Grimm, 2009; Gong et al, 2016; Ye et al, 2019)。通过模型模拟我们发现, 樟属植物在面对第四纪间冰期与冰期的交替时同时存在两种避难所模式。分布在北亚热带地区较低海拔的樟属物种向附近具有复杂地形和微环境的各大山脉迁移, 如银木由关中平原向秦岭和大巴山山脉迁移、野黄桂(*C. jensenianum*)由四川盆地向巫山山脉迁移、猴樟由长江中下游平原向巫山和雪峰山山脉迁移; 而肉桂(*C. cassia*)、平托桂(*C. tsoi*)退到 24° N以南的大型避难所中。第二, 樟属类群是热带起源、亚热带辐射分布(Huang et al, 2016), 进化出对气候有不同喜好的物种: 如喜温喜暖的毛桂(*C. appelianum*)、钝叶桂(*C. bejolghota*)、猴樟和红辣槁树(*C. kwangtungense*)的潜在分布区在冰期气候变冷时收缩, 冰期后至未来气候变暖又北扩东进; 喜冷好寒的银叶桂(*C. mairei*)、屏边桂(*C. pingbii*)、狭叶桂(*C. heyneanum*)和米槁(*C. migao*)的潜在分布区则在冰期扩大, 冰期后收缩; 而横跨南北广泛分布的物种则具有较宽的生态位, 对环境的适应能力较强, 如樟、黄樟(*C. parthenoxylon*)、少花桂(*C. pauciflorum*)和香桂的潜在分布区在冰期与间冰期交替、冷暖气候变化情景下并无太大变化。同时, 樟属植物面对气候变化而表现出来的多避难所模式共存, 以及不同物种之间对气候的喜好程度, 也是模型模拟结果中末次盛冰期的樟属物种分布区面积稍高于末次间冰期, 并在陕西秦岭山脉以北的关中平原、湖北中部、江苏东部等高纬度低海拔地区出现局部收缩, 在秦岭、大别山、大巴山、巫山等山脉附近出现扩张的可能原因之一。

樟属物种丰富度热点区域在5个时期都主要分布于华南和西南(24° N以南), 并且不同时期变化比较明显, 变化范围为8.4%–96%。值得注意的是末次盛冰期时樟属物种丰富度热点区域面积在5个时期中最大, 这可能有以下几点原因: 第一, 我国华南大部分地区作为亚热带常绿阔叶林冰期时的避难所(Myers et al, 2000; 应俊生, 2001), 大多数分布在此地区的樟属物种受末次盛冰期的影响很小, 其分布区较其他时期无明显变化, 例如阴香、黄樟等;

第二, 东亚气候模拟结果发现, 末次盛冰期时中国大陆地表气温降低 $2\sim 9^{\circ}\text{C}$, 但在我国南方地区却出现了局部的弱升温(Pinot et al, 1999), 分布在华南地区喜热的樟属物种分布区出现了小范围扩张, 例如八角樟(*C. illicioides*)、卵叶桂(*C. rigidissimum*)和滇南桂等; 第三, 末次盛冰期时某些物种向南或低海拔迁移到大型避难所中生存, 冰期后又向北或高海拔适宜生境地区迁移(Hewitt, 2000; Tiffney & Manchester, 2001), 例如银叶桂、屏边桂等。

虽然随着未来(2080年)温室气体的持续排放, 中国气候逐渐变暖变湿, 平均温度会增加 3.5°C , 降水量增加7.5%, 温度和降水都较当前有小幅度提升(江志红等, 2008), 但华南地区将温度升高、干旱加剧(赵宗慈等, 2008; Yin et al, 2018)。在这样的气候变化情景下, 分布在华南地区以北的亚热带常绿阔叶林物种将出现潜在分布区增加的趋势, 如樟科的毛豹皮樟(*Litsea coreana*)、壳斗科的短尾柯(*Lithocarpus brevicaudatus*); 而分布在华南地区的亚热带常绿阔叶林物种则出现潜在分布区减少的趋势, 例如樟科的华南木姜子(*Litsea greenmaniana*)、壳斗科的木姜叶柯(*Lithocarpus litseifolius*)、烟斗柯(*L. corneus*) (郑维艳, 2019^①; 郑维艳和曹坤芳, 2020)。通过对樟属植物的分布区进行模拟发现, 在未来温室气体排放情景下, 樟属植物中同时存在潜在分布区增加和减少的物种; 其中分布在较北地区的樟属物种, 例如云南樟、天竺桂和阔叶樟呈现潜在分布区增加的趋势, 分布在华南地区的樟属物种, 例如红辣槁树、软皮桂(*C. liangii*)、沉水樟(*C. micranthum*)、米槁等的潜在分布区则呈现逐渐缩减、破碎化的趋势。由于樟属的物种分布中心位于我国热带北部和亚热带南部等华南地区(图1; 郑维艳, 2019^①), 且通过MaxEnt模拟得出的环境因子贡献率和主成分分析结果可知, 相较于温度因子, 樟属植物受降水的影响更大(附录1和附录3)。因此, 在未来华南地区温度升高、干旱加剧的情景下, 模拟结果得出樟属植物潜在分布区减少的物种多于增加的物种, 导致未来两种情景下位于华南地区的樟属物种丰富度热点区域面积均小于当前, 并且相较于RCP2.6情景, RCP8.5情景

① 郑维艳 (2019) 中国大陆北热带及亚热带地区樟科、壳斗科物种多样性格局及潜在分布预测分析。硕士学位论文, 广西大学, 南宁。

下樟属物种丰富度热点区域向华南地区收缩的趋势更加明显。这一结果意味着温室气体的持续排放将在一定程度上迫使我国华南地区的亚热带常绿阔叶林面临不断缩减的风险。

3.2 对自然保护地的建议

根据5个时期的模型模拟结果可知, 樟属物种的潜在分布区面积在各个时期并无较大变化, 但物种丰富度热点区域在各个时期有明显不同的分布格局, 因此针对樟属植物的物种丰富度热点区域进行保护评估与规划是关键所在。本研究结果表明, 中国樟属植物的物种丰富度热点区域主要分布在四川东南部、贵州南部、广西和广东, 且仅有少部分热点区域分布在自然保护区内, 还存在大量的保护空缺, 而且这些保护区大多数非国家级, 在人力、财力、物力和科研方面均弱于国家级自然保护区(冯斌等, 2020)。

四川东南部的乐山市虽然已建有2个国家级自然保护区, 但均位于其西南部, 未能对分布于其北部、中部和东南部的樟属物种丰富度热点区域进行有效保护。其中乐山市北部的峨眉山和乌尤山等地分布着亚热带偏湿性低山常绿阔叶林, 0.1 km²范围内就有维管植物51种, 分属于118科(罗利群, 1991)。乌尤山是部分植物模式标本的产地, 还分布着褐果石栎(*Lithocarpus brunneus*)等特有种(罗利群, 2005)。因此, 建议四川今后对自然保护地的规划重点考虑乐山市北部乌尤山等地。

贵州黔西南布依族苗族自治州的植被类型为西部亚热带常绿阔叶林(陈灵芝等, 2015), 该地区属于侵蚀切割高原, 地形起伏变化较大, 山地坡度较陡, 由于不合理的土地利用造成水土流失比较严重(吴征镒, 1980), 山地上的常绿阔叶林更应加以保护。虽然该地区目前已经建立了35个小型分散的自然保护区, 但只有仙鹤坪、龙头大山、赖子山3个市、县级自然保护区保护了该区域3.11%的樟属物种丰富度热点区域, 并且该区域的自然保护区级别均为省级以下, 建议适当扩大并升级仙鹤坪等市级自然保护区。

广西河池市植被类型主要为中亚热带常绿阔叶林和南亚热带季风常绿阔叶林, 其森林覆盖率为65.7%, 呈现中部地区向东西逐渐增高(李玉清,

2017^①; 黄肖寒等, 2018); 该市建有2个国家级自然保护区, 保护了该区域内7%的樟属物种丰富度热点区域, 但由于河池市的樟属物种丰富度热点区域面积最大(占该市面积的71.13%), 并且樟属物种组成与其他地区有较大差异, 因此, 建议在其巴马瑶族自治县和都安瑶族自治县增加保护区的规划。柳州市是广西中部地区重要的工业城市, 工业化和人类活动对植被的破坏非常严重, 森林植被亟需保护(文和群等, 1992)。受区域地貌特征的影响, 柳州市城镇体系呈现为“南重北轻, 中心偏南”的格局(http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324589.html), 导致其自然保护区表现为南少北多, 而樟属物种丰富度热点区域却呈现为南多北少, 仅有拉沟鸟类县级自然保护区对该市8%的樟属物种丰富度热点区域进行了保护, 考虑到该区域多为喀斯特地貌, 建议在南部增加微植物保护区(protection model of plant microreserves, PMR)的建设。

广东云浮市位于广东西部, 是广东的重要生态屏障, 森林覆盖率在60%以上, 属于南亚热带季风常绿阔叶林的一个植被亚型, 近年来随着珠三角产业的转移, 森林质量下降, 植被覆盖度逐渐降低(刘海超, 2015^②; 陈昕等, 2017)。云浮市内目前设立了11个非国家自然保护区, 对该区域内6.6%的樟属物种丰富度热点区域进行了保护。其中同乐大山省级自然保护区面积为129.90 km², 保护价值指数为0.559(李霄宇, 2011), 建议今后升级同乐大山省级自然保护区。

从现有保护区的整体分布来看, 我国南方的保护区总体上呈现片断化不连续格局, 并未建立较为连续的自然保护区, 今后应在多样性高的区域优先进行自然保护区网络建设, 提高相邻自然保护区的连通性(Pouzols & Moilanen, 2014; Tarabon et al, 2021)。根据《生物多样性公约》《2020年后全球生物多样性框架》初稿的要求, 到2030年自然保护区和其他有效区域保护措施的面积要占到陆地国土面积的30% (<https://www.cbd.int/article/2020-01-10-19-02-38>); 以及2019年中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于建立以国家公园为主体的自然保

① 李玉清 (2017) 广西河池市森林风景资源评价研究. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.

② 刘海超 (2015) 基于RS和GIS的广东省植被覆盖度动态变化研究. 硕士学位论文, 华南农业大学, 广州.

护地体系的指导意见》，到2035年，自然保护地占陆域国土面积18%以上(http://www.gov.cn/zhengce/2019-06/26/content_5403497.htm)，目前我国建立的自然保护区已占到了国土面积的15% (<http://www.stats.gov.cn>)。因此，在未来我国的自然保护区、国家公园、自然公园等自然保护地的选址、扩建和升级等工作中，要避免片面强调面积和数量，有针对性地保证质量(Pimm et al, 2018; Cai et al, 2021)。此外，樟属物种丰富度热点区域是我国第四纪冰川生物避难所(胡忠俊等, 2013)，在过去气候变化的过程中，避难所为生物体提供了在不利条件下维持其生存和生物多样性的环境，在应对未来全球气候变暖可能会导致的极端高温等不利事件下，避难所同样可以为生物提供生存保障，其保护值得优先考虑(Noss, 2001; Tzedakis et al, 2002)。因此，在以保护中国亚热带常绿阔叶林森林生态系统的规划和布局中，建议有针对性地优先考虑四川东南部以及广西和广东两省。

3.3 研究局限性及展望

尽管温度和降水是影响植物分布最具决定性的环境因子，且具有大范围、长期与稳定的观测数据，进而被广泛研究(Gallagher, 2016; Yu et al, 2017a)；但地形、土壤、植被覆盖因子和人口密度等对植物的分布和生态位模拟的结果都有一定的影响(Cantón et al, 2004; John et al, 2007; Huang et al, 2020)。另外，我国于2020年在第75届联合国大会一般性辩论上提出CO₂排放力争于2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和(王灿和张雅欣, 2020)，这对全球气候变化的改善起到推动作用，能够有效地缓解全球升温趋势，使得全球温度比预期降低0.2–0.3℃左右(<https://climateactiontracker.org/press/china-carbon-neutral-before-2060-would-lower-warming-projections-by-around-2-to-3-tenths-of-a-degree/>)。此外，亚热带常绿阔叶林中包含的优势类群非常多，且不同类群之间的起源和对生境的喜好程度不一致(郑维艳等, 2018)，单以樟属植物难以全面代表中国亚热带常绿阔叶林的全貌。


因此，本研究还缺乏环境因子数据的完整性和确定性，以及研究对象的综合性。今后可从以下几个方面进行完善：(1)在生态位模拟中结合除19个气候因子之外的其他可获得的环境因子，诸如土壤、地形以及生物因子；(2)依据世界各国的碳达峰和碳

中和目标，期待更多的大气环流模拟研究，并以最新的大气环流模型来对物种的潜在分布区进行模拟和探讨；(3)应尽可能结合多类群如壳斗科、山茶科、木兰科、樟科等亚热带常绿阔叶林中的优势类群，来进行气候变化对亚热带常绿阔叶林的影响及保护评估研究。

致谢：感谢北京大学唐志尧教授在提供中国自然保护区数据方面的帮助。感谢中国科学院西双版纳热带植物园、中国科学院昆明植物研究所标本馆在提供物种分布数据方面的帮助。

ORCID

周润  <https://orcid.org/0000-0003-3485-8294>

李捷  <https://orcid.org/0000-0001-8067-749X>

参考文献

- Allen SK, Plattner GK, Nauels A, Xia Y, Stocker TF (2007) Climate Change 2013: The physical science basis. An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Computational Geometry*, 18, 95–123.
- Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.
- Brummitt N, Lughadha EN (2003) Biodiversity: Where's hot and where's not. *Conservation Biology*, 17, 1442–1448.
- Cai HY, Lyu LS, Shrestha N, Tang ZY, Su XY, Xu XT, Dimitrov D, Wang ZH (2021) Geographical patterns in phylogenetic diversity of Chinese woody plants and its application for conservation planning. *Diversity and Distributions*, 27, 179–194.
- Canadell JG, Raupach MR (2008) Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320, 1456–1457.
- Cantón Y, Del Barrio G, Solé-Benet A, Lázaro R (2004) Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain. *CATENA*, 55, 341–365.
- Cattell RB (1966) The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1, 245–276.
- Chen LZ, Sun H, Guo K (2015) *Floristic and Vegetational Geography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈灵芝, 孙航, 郭珂 (2015) 中国植物区系与植被地理. 科学出版社, 北京.]
- Chen X, Peng J, Liu YX, Yang Y, Li GC (2017) Constructing ecological security patterns in Yunfu City based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 36, 471–484. (in Chinese with English abstract) [陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旻, 李贵才

- (2017) 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 36, 471–484.]
- Chen YH, Tang ZY, Fang JY (2009) Distribution of nature reserves and status of biodiversity protection in China. *Biodiversity Science*, 17, 664–674. (in Chinese with English abstract) [陈雅涵, 唐志尧, 方精云 (2009) 中国自然保护区分布现状及合理布局的探讨. 生物多样性, 17, 664–674.]
- Dai EF, Wu Z, Ge QS, Xi WM, Wang XF (2016) Predicting the responses of forest distribution and aboveground biomass to climate change under RCP scenarios in Southern China. *Global Change Biology*, 22, 3642–3661.
- D'Amen M, Azzurro E (2020) Lessepsian fish invasion in Mediterranean marine protected areas: A risk assessment under climate change scenarios. *ICES Journal of Marine Science*, 77, 388–397.
- Dao KQ, Chen JL, Jin PH, Dong C, Yang Y, Xu XH, Wu JY, Xie SP, Lin ZC, Sun BN (2013) A new material of *Lindera* (Lauraceae) of the Late Pliocene from Tengchong, Yunnan and the genus' biogeography significance. *Acta Geologica Sinica*, 87, 690–706.
- Denk T, Grimm GW (2009) The biogeographic history of beech trees. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 158, 83–100.
- Di Marco M, Santini L (2015) Human pressures predict species' geographic range size better than biological traits. *Global Change Biology*, 21, 2169–2178.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Townsend Peterson A, Phillips SJ, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Fang JY, Guo ZD, Hu HF, Kato T, Muraoka H, Son Y (2014) Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, 20, 2019–2030.
- Feng B, Li DQ, Zhang YG, Xue YD (2020) Evaluation on nature reserve management effectiveness of mitigation and adaptation on climate change: A case study of 12 typical nature reserves in Guangxi. *Biodiversity Science*, 28, 1026–1035. (in Chinese with English abstract) [冯斌, 李迪强, 张于光, 薛亚东 (2020) 自然保护区减缓和适应气候变化的管理有效性评估: 以广西12个典型自然保护区为例. 生物多样性, 28, 1026–1035.]
- Gallagher RV (2016) Correlates of range size variation in the Australian seed-plant flora. *Journal of Biogeography*, 43, 1287–1298.
- GBIF.org (2019) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.3ka7mv>. (accessed on 2019-12-24)
- Gebrekirstos A, Mitlöhner R, Teketay D, Worbes M (2008) Climate-growth relationships of the dominant tree species from semi-arid savanna woodland in Ethiopia. *Trees*, 22, 631–641.
- Gong W, Liu WZ, Gu L, Kaneko S, Koch MA, Zhang DX (2016) From glacial refugia to wide distribution range: Demographic expansion of *Loropetalum chinense* (Hamamelidaceae) in Chinese subtropical evergreen broadleaved forest. *Organisms Diversity and Evolution*, 16, 23–38.
- Han YH, Dong SK, Wu XY, Liu SL, Su XK, Zhang Y, Zhao HD, Zhang XL, Swift D (2019) Integrated modeling to identify priority areas for the conservation of the endangered plant species in headwater areas of Asia. *Ecological Indicators*, 105, 47–56.
- Hewitt G (2000) The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405, 907–913.
- Hu WQ, Wen NL, Xiao Y, Zhong RZ, Ru ZZ (2017) Geographic distribution and potential distribution estimation of *Machilus breviflora*. *Guangdong Agricultural Sciences*, 44(2), 82–85. (in Chinese with English abstract) [胡文强, 温暖玲, 肖玉, 钟任资, 茹正忠 (2017) 短序润楠的地理分布及潜在分布区估计. 广东农业科学, 44(2), 82–85.]
- Hu ZJ, Zhang YL, Liu LS, Yu HB (2013) Refugia and their identification methods: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 3397–3406. (in Chinese with English abstract) [胡忠俊, 张镔铨, 刘林山, 于海彬 (2013) 生物避难所及其识别方法评述. 生态学杂志, 32, 3397–3406.]
- Huang JF, Li L, van der Werff H, Li HW, Rohwer JG, Crayn DM, Meng HH, van der Merwe M, Conran JG, Li J (2016) Origins and evolution of cinnamon and camphor: A phylogenetic and historical biogeographical analysis of the *Cinnamomum* group (Lauraceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 96, 33–44.
- Huang XH, Chen YL, Huang DM (2018) NDVI simulation of vegetation in Hechi based on climate information. *Journal of Meteorological Research and Application*, 39(4), 42–45, 107. (in Chinese with English abstract) [黄肖寒, 陈燕丽, 黄冬梅 (2018) 基于气候信息的河池市植被NDVI模拟. 气象研究与应用, 39(4), 42–45, 107.]
- Huang XY, Wen ZP, Du YD, Xu YL (2008) Scenario analyses on the changes of future surface air temperature and precipitation in South China. *Journal of Tropical Meteorology*, 24, 245–258. (in Chinese with English abstract) [黄晓莹, 温之平, 杜尧东, 许吟隆 (2008) 华南地区未来地面温度和降水变化的情景分析. 热带气象学报, 24, 245–258.]
- Huang ZD, Bai Y, Alatalo JM, Yang ZQ (2020) Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: A case study in Xishuangbanna Tropical Area, China. *Biological Conservation*, 249, 108741.
- Jenkins CN, Pimm SL, Joppa LN (2013) Global patterns of

terrestrial vertebrate diversity and conservation. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 110, E2602–E2610.

Jiang XL, Deng M, Li Y (2016) Evolutionary history of subtropical evergreen broad-leaved forest in Yunnan Plateau and adjacent areas: An insight from *Quercus schottkyana* (Fagaceae). Tree Genetics & Genomes, 12, 1–12.

Jiang ZH, Zhang X, Wang J (2008) Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models. Geographical Research, 27, 787–799. (in Chinese with English abstract) [江志红, 张霞, 王冀 (2008) IPCC-AR4 模式对中国21世纪气候变化的情景预估. 地理研究, 27, 787–799.]

John R, Dalling JW, Harms KE, Yavitt JB, Stallard RF, Mirabello M, Hubbell SP, Valencia R, Navarrete H, Vallejo M, Foster RB (2007) Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 104, 864–869.

Li J, Li XW (2004) Advances in Lauraceae systematic research on the world scale. Acta Botanica Yunnanica, 26, 1–11. (in Chinese with English abstract) [李捷, 李锡文 (2004) 世界樟科植物系统学研究进展. 云南植物研究, 26, 1–11.]

Li LP, He SY, Jiang YM, Wang T, Zhao HH, Cui WH, Zheng YM, Hai Y, Wan HW (2019) Species range size patterns and their significance on biodiversity conservation. Scientia Sinica Vitae, 49, 929–937. (in Chinese with English abstract) [李利平, 何思源, 蒋样明, 王拓, 赵辉辉, 崔伟宏, 郑姚闽, 海鹰, 万华伟 (2019) 物种分布区特征及其对生物多样性保育的意义. 中国科学: 生命科学, 49, 929–937.]

Li XW (1982) Flora of China (Vol. 31). Science Press, Beijing. (in Chinese) [李锡文 (1982) 中国植物志(第31卷). 科学出版社, 北京.]

Li XW, Li J, Huang PH, Wei FN, Cui HB, van der Werff H (2008) Lauraceae. In: Flora of China, Vol. 7. (eds Wu CY, Raven HP, Hong DY), pp. 102–254. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.

Li XY (2011) Conservation Value Evaluation and Reasonable Distribution of National Nature Reserve for Forest. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [李霄宇 (2011) 国家级森林类型自然保护区保护价值评价及合理布局研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]

Lim CH, Yoo S, Choi Y, Jeon S, Son Y, Lee WK (2018) Assessing climate change impact on forest habitat suitability and diversity in the Korean Peninsula. Forests, 9, 259.

Lu LM, Mao LF, Yang T, Ye JF, Liu B, Li HL, Sun M, Miller JT, Mathews S, Hu HH, Niu YT, Peng DX, Chen YH, Smith SA, Chen M, Xiang KL, Le CT, Dang VC, Lu AM, Soltis PS, Soltis DE, Li JH, Chen ZD (2018) Evolutionary history of the angiosperm flora of China. Nature, 554, 234–238.

Luo LQ (2005) Study on conservation and construction of biodiversity (plants) in Leshan City. Journal of Leshan

Teachers College, 20(5), 62–65. (in Chinese) [罗利群 (2005) 乐山市生物多样性(植物)保护与建设的研究. 乐山师范学院学报, 20(5), 62–65.]

Luo LQ (1991) Survey of Wuyou Mountain evergreen broad-leaved forest. Journal of Sichuan Normal University, 12(Suppl.), 48–53. (in Chinese) [罗利群 (1991) 乌尤山常绿阔叶林概况. 四川师范学院学报, 12(增刊), 48–53.]

Luo X, Hu QJ, Zhou PP, Zhang D, Wang Q, Abbott RJ, Liu JQ (2017) Chasing ghosts: Allopolyploid origin of *Oxyria sinensis* (Polygonaceae) from its only diploid congener and an unknown ancestor. Molecular Ecology, 26, 3037–3049.

Lü JJ, Wu JG (2009) Advances in the effects of climate change on the distribution of plant species and vegetation in China. Environmental Science & Technology, 32(6), 85–95. (in Chinese with English abstract) [吕佳佳, 吴建国 (2009) 气候变化对植物及植被分布的影响研究进展. 环境科学与技术, 32(6), 85–95.]

Ma KP (2001) Hotspots assessment and conservation priorities identification of biodiversity in China should be emphasized. Acta Phytoecologica Sinica, 25, 124–125. (in Chinese) [马克平 (2001) 中国生物多样性热点地区(hotspot)评估与优先保护重点的确定应该重视. 植物生态学报, 25, 124–125.]

Ma Q, Du YJ, Chen N, Zhang LY, Li JH, Fu CX (2015) Phylogeography of *Davidia involucrata* (Davidiaceae) inferred from cpDNA haplotypes and nSSR data. Systematic Botany, 40, 769–810.

Merow C, Smith MJ, Silander JA Jr (2013) A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. Ecography, 36, 1058–1069.

Miao QL, Ding YY, Wang Y (2009) Impact of climate warming on the northern boundary of sub-tropical zone of China. Geographical Research, 28, 634–642. (in Chinese with English abstract) [缪启龙, 丁园圆, 王勇 (2009) 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响. 地理研究, 28, 634–642.]

Muñoz MA, Faz A, Acosta JA, Martínez-Martínez S, Zornoza R (2015) Effect of South American grazing camelids on soil fertility and vegetation at the Bolivian Andean grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment, 207, 203–210.

Myers N (1990) The biodiversity challenge: Expanded hot-spots analysis. Environmentalist, 10, 243–256.

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403, 853–858.

Ni J, Song YC (1997) The water-temperature distributional groups of dominants and companions of subtropical evergreen broadleaved forest in China. Acta Phytoecologica Sinica, 21, 349–359. (in Chinese with English abstract) [倪健, 宋永昌 (1997) 中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种的水热分布类群. 植物生态学报, 21, 349–359.]

Ni J, Sykes MT, Prentice IC, Cramer W (2000) Modelling the

- vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecology and Biogeography*, 9, 463–479.
- Ni J, Yu G, Harrison SP, Prentice IC (2010) Palaeovegetation in China during the late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 289, 44–61.
- Noss RF (2001) Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology*, 15, 578–590.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Townsend Peterson A (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34, 102–117.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Pimm SL, Jenkins CN, Li BV (2018) How to protect half of Earth to ensure it protects sufficient biodiversity. *Science Advances*, 4, eaat2616.
- Pinot S, Ramstein G, Harrison SP, Prentice IC, Guiot J, Stute M, Joussaume S (1999) Tropical paleoclimates at the Last Glacial Maximum: Comparison of Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) simulations and paleodata. *Climate Dynamics*, 15, 857–874.
- Pouzols FM, Moilanen A (2014) A method for building corridors in spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, 29, 789–801.
- Prieto-Torres DA, Navarro-Sigüenza AG, Santiago-Alarcon D, Rojas-Soto OR (2016) Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global Change Biology*, 22, 364–379.
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: Tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 225–244.
- Radosavljevic A, Anderson RP (2014) Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41, 629–643.
- Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P (2011) RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109, 33–57.
- Shi MM, Michalski SG, Welk E, Chen XY, Durka W (2014) Phylogeography of a widespread Asian subtropical tree: Genetic east-west differentiation and climate envelope modelling suggest multiple glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 41, 1710–1720.
- Song YC (2013) Evergreen Broad-leaved Forest in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [宋永昌 (2013) 中国常绿阔叶林. 科学出版社, 北京.]
- Tang CQ (2015) Distribution patterns of the subtropical evergreen broad-leaved forests of southwestern China, as compared with those of the eastern Chinese subtropical regions. *Collectanea Botanica*, 34, 1–19.
- Tang ZY, Wang ZH, Zheng CY, Fang JY (2006) Biodiversity in China's mountains. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 347–352.
- Tarabon S, Dutoit T, Isselin-Nondedeu F (2021) Pooling biodiversity offsets to improve habitat connectivity and species conservation. *Journal of Environmental Management*, 277, 111425.
- Tiffney BH, Manchester SR (2001) The use of geological and paleontological evidence in evaluating plant phylogeographic hypotheses in the Northern Hemisphere Tertiary. *International Journal of Plant Sciences*, 162, S3–S17.
- Tzedakis PC, Lawson IT, Frogley MR, Hewitt GM, Preece RC (2002) Buffered tree population changes in a quaternary refugium: Evolutionary implications. *Science*, 297, 2044–2047.
- van Vuuren DP, Stehfest E, den Elzen MGJ, Kram T, van Vliet J, Deetman S, Isaac M, Klein Goldewijk K, Hof A, Mendoza Beltran A, Oostenrijk R, van Ruijven B (2011) RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109, 95–116.
- Wang C, Zhang YX (2020) Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision. *Chinese Journal of Environmental Management*, 12, 58–64. (in Chinese with English abstract) [王灿, 张雅欣 (2020) 碳中和愿景的实现路径与政策体系. 中国环境管理, 12, 58–64.]
- Wang CJ (2017) Geographical Distribution Pattern and Spatial Conservation Prioritization for Wild Plants in China under Climate Change. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [王春晶 (2017) 气候变化背景下中国野生植物地理分布格局及优先保护. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Wang P, Chen GQ, Ding ZQ (2012) Introduction and cultivation techniques of silverwood. *Science & Technology of Landscape Architecture*, (3), 12–13. (in Chinese) [王朴, 陈桂桥, 丁昭全 (2012) 银木的引种及栽培技术. 园林科技, (3), 12–13.]
- Wang XH (2006) Phytogeography and Species Diversity of Typical Evergreen Broad-leaved in China. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [王希华 (2006) 中国常绿阔叶林植物地理与物种多样性研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]

- Wang XZ (2019) China's forest coverage rate is 22.96%. Green China, (12), 54–57. (in Chinese) [王兮之 (2019) 中国森林覆盖率22.96%。绿色中国, (12), 54–57.]
- Wen HQ, Qin MF, Lu YX, Liang JY, Wei YG (1992) A preliminary study on the vegetation in Longtan and Dule parks in Liuzhou City. Guihaia, 12, 364–371. (in Chinese) [文和群, 覃民府, 陆益新, 梁健英, 韦毅刚 (1992) 柳州市龙潭、都乐公园植被的初步研究. 广西植物, 12, 364–371.]
- Wu XK, Nan CH, Tang GG, Li Y, Mao LJ, Zhang ZC (2016) Impact of climate change on potential distribution range and spatial pattern of *Phoebe chekiangensis*. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 40(6), 85–91. (in Chinese with English abstract) [吴显坤, 南程慧, 汤庚国, 李焱, 毛丽君, 张志成 (2016) 气候变化对浙江楠潜在分布范围及空间格局的影响. 南京林业大学学报 (自然科学版), 40(6), 85–91.]
- Wu ZY (1980) Vegetation of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Xiang XG, Mi XC, Zhou HL, Li JW, Chung SW, Li DZ, Huang WC, Jin WT, Li ZY, Huang LQ, Jin XH (2016) Biogeographical diversification of mainland Asian *Dendrobium* (Orchidaceae) and its implications for the historical dynamics of evergreen broad-leaved forests. Journal of Biogeography, 43, 1310–1323.
- Xu Y, Shen ZH, Ying LX, Wang ZH, Huang JH, Zang RG, Jiang YX (2017) Hotspot analyses indicate significant conservation gaps for evergreen broadleaved woody plants in China. Scientific Reports, 7, 1859.
- Ye JW, Li DZ, Hampe A (2019) Differential Quaternary dynamics of evergreen broadleaved forests in subtropical China revealed by phylogeography of *Lindera aggregata* (Lauraceae). Journal of Biogeography, 46, 1112–1123.
- Yin YH, Ma DY, Wu SH (2018) Climate change risk to forests in China associated with warming. Scientific Reports, 8, 493.
- Ying TS (2001) Species diversity and distribution pattern of seed plants in China. Chinese Biodiversity, 9, 393–398. (in Chinese with English abstract) [应俊生 (2001) 中国种子植物物种多样性及其分布格局. 生物多样性, 9, 393–398.]
- Yu FY, Groen TA, Wang TJ, Skidmore AK, Huang JH, Ma KP (2017a) Climatic niche breadth can explain variation in geographical range size of alpine and subalpine plants. International Journal of Geographical Information Science, 31, 190–212.
- Yu FY, Skidmore AK, Wang TJ, Huang JH, Ma KP, Groen TA (2017b) *Rhododendron* diversity patterns and priority conservation areas in China. Diversity and Distributions, 23, 1143–1156.
- Zha FS, He LX, Yang F, Yang W, Yang J, Feng JM (2008) Spatial patterns of species diversity of Lauraceae plants in Yunnan, China. Journal of Chuxiong Normal University, 23(9), 90–94. (in Chinese with English abstract) [查凤书, 何丽香, 杨飞, 杨惟, 杨杰, 冯建孟 (2008) 云南樟科植物多样性的空间分布格局. 楚雄师范学院学报, 23(9), 90–94.]
- Zhao ZC, Luo Y, Jiang Y, Xu Y (2008) Assessment and prediction of precipitation and droughts/floods changes over the world and in China. Science & Technology Review, 26(6), 28–33. (in Chinese with English abstract) [赵宗慈, 罗勇, 江滢, 徐影 (2008) 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估. 科技导报, 26(6), 28–33.]
- Zhang GF, He SY (2014) Ornamental tree species resources of Lauraceae and their application in gardens. Modern Horticulture, (4), 26–28. (in Chinese) [张规富, 何帅艳 (2014) 樟科植物观赏树种资源及其在园林中的应用. 现代园艺, (4), 26–28.]
- Zhang MH, Zhang HQ, Liu ED (2011) Camphortree and the morphological characteristics of cold north correlation. Northern Horticulture, (13), 94–97. (in Chinese with English abstract) [张旻桓, 张汉卿, 刘二冬 (2011) 樟树北移耐寒性与形态特征的相关性研究. 北方园艺, (13), 94–97.]
- Zhang ZJ, He JS, Li JS, Tang ZY (2015) Distribution and conservation of threatened plants in China. Biological Conservation, 192, 454–460.
- Zheng WY, Zeng WH, Tang YS, Shi W, Cao KF (2018) Species diversity and biogeographical patterns of Lauraceae and Fagaceae in northern tropical and subtropical regions of China. Acta Ecologica Sinica, 38, 8676–8687. (in Chinese with English abstract) [郑维艳, 曾文豪, 唐一思, 石慰, 曹坤芳 (2018) 中国大陆北热带及亚热带地区樟科、壳斗科物种多样性及其生物地理格局分析. 生态学报, 38, 8676–8687.]
- Zheng WY, Cao KF (2020) Impact of future climate change on potential geographical distribution of four *Litsea* species in China. Guihaia, 40, 1584–1594. (in Chinese with English abstract) [郑维艳, 曹坤芳 (2020) 未来气候变化对四种木姜子地理分布的影响. 广西植物, 40, 1584–1594.]
- Zhu SS, Comes HP, Tamaki I, Cao YN, Sakaguchi S, Yap ZY, Ding YQ, Qiu YX (2020) Patterns of genotype variation and demographic history in *Lindera glauca* (Lauraceae), an apomict-containing dioecious forest tree. Journal of Biogeography, 47, 2002–2016.

(责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 47种樟属植物及当前气候条件下排名前3的生物气候因子贡献率

Appendix 1 The contribution of the top 3 bioclimatic variables of the 47 species in *Cinnamomum*
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020482-1.pdf>

附录2 19个环境变量及其描述

Appendix 2 The 19 bioclimatic variables and their descriptions
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020482-2.pdf>

附录3 3个主成分的方差解释率、13个环境因子的负载值及Pearson相关性系数

Appendix 3 The variance percentage of 3 principal components, load values of 13 environmental factors and Pearson correlation index
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020482-3.pdf>

附录4 樟属物种丰富度热点区域的物种组成

Appendix 4 Species composition of species richness hotspots of *Cinnamomum*
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020482-4.pdf>

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020482>

附录1 47种樟属植物及当前气候条件下排名前3的生物气候因子贡献率(*, AUC > 0.9)

Appendix 1 The contribution of the top 3 bioclimatic variables of the 47 species in *Cinnamomum* (*, AUC > 0.9)

物种	主要生物气候因子	贡献率	物种	主要生物气候因子	贡献率
Species	Main bioclimatic variables	Contribution	Species	Main bioclimatic variables	Contribution
毛桂	最干季度降水量	28.8%	沉水樟	平均温度日较差	43.4%
<i>C. appelianum</i> *	年平均降水量	25.1%	<i>C. micranthum</i> *	最冷季度降水量	29.6%
	最干月降水量	20.9%		年平均降水量	7.1%
华南桂	最冷季度降水量	39.9%	米槁	最干季度降水量	39.6%
<i>C. austrosinense</i> *	最干月降水量	31%	<i>C. migao</i> *	最暖季度降水量	29.1%
	平均温度日较差	10.8%		最干季度均温	7.9%
滇南桂	温度季节变化	51.7%	毛叶樟	等温性	94.4%
<i>C. austroyunnanense</i> *	等温性	20.5%	<i>C. mollifolium</i> *	温度季节变化	3.8%
	最暖季度降水量	17.2%		平均温度日较差	0.5%
钝叶桂	温度季节变化	39.9%	土肉桂	年温度变化范围	54.8%
<i>C. bejolghota</i> *	最冷月最低温	21.4%	<i>C. osmophloeum</i> *	年平均降水量	23.9%
	最干季度降水量	12%		年均温	6.2%
猴樟	最干月降水量	45.3%	黄樟	最干季度降水量	43.7%
<i>C. bodinieri</i> *	年平均降水量	18.5%	<i>C.</i>	年平均降水量	15.4%
	最冷月最低温	12.5%	<i>parthenoxylon</i> *	温度季节变化	5.6%
阴香	最干季度降水量	31.1%		最干月降水量	83.2%
<i>C. burmannii</i> *	最冷月最低温	22.4%	<i>C. pauciflorum</i> *	平均温度日较差	3.6%
	年平均降水量	15.5%		最湿季度降水量	2.4%
樟	最冷季度降水量	60.7%	菲律宾樟树	年温度变化范围	76%
<i>C. camphora</i> *	年平均降水量	11.4%	<i>C. philippinense</i> *	年平均降水量	8.3%
	年温度变化范围	4.6%		最暖季度降水量	2.7%
肉桂	最干季度降水量	55.1%	屏边桂	最干季度降水量	41.1%
<i>C. cassia</i> *	最冷月最低温	9.4%	<i>C. pingbienense</i> *	年平均降水量	25.6%
	等温性	4%		最冷季度降水量	3.4%
坚叶樟	等温性	86.1%	刀把木	温度季节变化	73.7%
<i>C. chartophyllum</i> *	平均温度日较差	8.7%	<i>C.</i>	等温性	10.1%
	温度季节变化	3.7%	<i>pittosporoides</i> *	最冷月最低温	7.2%
聚花桂	温度季节变化	28.5%	阔叶樟	平均温度日较差	35.7%
<i>C. contractum</i> *	等温性	24.6%	<i>C. platyphyllum</i> *	最冷月最低温	23.9%
	最冷月最低温	12.9%		年平均降水量	16.3%
尾叶樟	最干季度降水量	36.5%	网脉桂	年温度变化范围	94.4%
<i>C. foveolatum</i> *	最冷月最低温	14.8%	<i>C. reticulatum</i> *	最暖季度降水量	1.6%
	平均温度日较差	14.2%		降水量变异系数	0.7%
云南樟	温度季节变化	27.9%	卵叶桂	年温度变化范围	65.4%
<i>C. glanduliferum</i> *	最干季度降水量	22.8%	<i>C. rigidissimum</i> *	温度季节变化	12.5%
	等温性	15.8%		最冷季度降水量	9.4%
狭叶桂	最干季度降水量	56.2%	岩樟	年平均降水量	27.8%
<i>C. heyneanum</i> *	最暖季度降水量	11.1%	<i>C. saxatile</i> *	最暖季度降水量	24.2%
	降水量变异系数	5.2%		最干季度降水量	19.5%
八角樟	最干月降水量	55.9%	银木	最冷月最低温	33.4%
<i>C. illicioides</i> *	最冷月最低温	14.9%	<i>C.</i>	平均温度日较差	20.9%
	平均温度日较差	8.7%	<i>septentrionale</i> *	年平均降水量	20.4%
大叶桂	等温性	44.8%	香桂	最冷季度降水量	45.6%
<i>C. iners</i> *	温度季节变化	25.3%	<i>C. subavenium</i> *	年温度变化范围	23.6%
	最冷季度降水量	8.4%		最干季度降水量	9.5%
天竺桂	最干月降水量	30.6%	柴桂	等温性	57.9%
<i>C. japonicum</i> *	最冷季度降水量	22.7%	<i>C. tamala</i> *	最冷季度降水量	13.8%
	年温度变化范围	22.2%		温度季节变化	12.4%
爪哇肉桂	等温性	72.8%	细毛樟	等温性	97.5%
<i>C. javanicum</i> *	温度季节变化	20.5%	<i>C. tenuipile</i> *	温度季节变化	0.9%
	最冷月最低温	2.2%		最干月降水量	0.6%
野黄桂	最干月降水量	68.4%	假桂皮树	年温度变化范围	50.1%
<i>C. jensenianum</i> *	最干季度降水量	11.1%	<i>C. tonkinense</i> *	最暖季度降水量	16.7%
	最湿季度降水量	6.4%		温度季节变化	9.8%
兰屿肉桂	年温度变化范围	39.9%	辣汁树	最冷季度降水量	52.7%
<i>C. kotoense</i> *	最湿季度降水量	27.8%	<i>C. tsangii</i> *	最干月降水量	18.4%
	最暖季度降水量	16.2%		年平均降水量	9.8%
红辣槁树	最冷季度降水量	76.1%	平托桂	温度季节变化	35.9%
<i>C. kwangtungense</i> *	最冷月最低温	5.6%	<i>C. tsoi</i> *	最冷月最低温	30.1%
	等温性	5.4%		年温度变化范围	15.5%
软皮桂	最干月降水量	38.7%	粗脉桂	最冷季度降水量	27.5%
<i>C. liangii</i> *	年温度变化范围	26.3%	<i>C. validinerve</i> *	最干季度降水量	26.3%
	年平均降水量	9.9%		最湿季度降水量	12.8%

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020482>

物种 Species	主要生物气候因子 Main bioclimatic variables	贡献率 Contribution	物种 Species	主要生物气候因子 Main bioclimatic variables	贡献率 Contribution
油樟 <i>C. longepaniculatum</i> *	最冷月最低温	33.5%	锡兰肉桂	最冷月最低温	63%
	年平均降水量	29%	<i>C. verum</i> *	年平均降水量	10.3%
	最冷季度降水量	7.5%		平均温度日较差	5%
长柄樟	等温性	57.2%	川桂	年平均降水量	56.3%
<i>C. longipetiolatum</i> *	温度季节变化	27%	<i>C. wilsonii</i> *	最冷月最低温	18%
	最干季度降水量	8.8%		温度季节变化	8.3%
银叶桂	最干季度降水量	28.5%			
<i>C. mairei</i> *	年温度变化范围	24.9%			
	最冷季度降水量	12%			

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020482>

附录2 19个环境变量及其描述

Appendix 2 The 19 bioclimatic variables and their descriptions

变量 Variable	描述 Description
Bio1	年均温 Annual mean temperature
Bio2*	平均温度日较差 Mean diurnal temperature range
Bio3*	等温性 Isothermality
Bio4*	温度季度变化 Temperature seasonality
Bio5*	最热月最高温 Max temperature of warmest month
Bio6*	最冷月最低温 Min temperature of coldest month
Bio7*	年温度变化范围 Temperature annual range
Bio8	最湿季度均温 Mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干季度均温 Mean temperature of driest quarter
Bio10	最暖季度均温 Mean temperature of warmest quarter
Bio11	最冷季度均温 Mean temperature of coldest quarter
Bio12*	年平均降水量 Annual precipitation
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of Wettest Month
Bio14*	最干月降水量 Precipitation of driest month
Bio15*	降水量变异系数 Precipitation seasonality(coefficient of variation)
Bio16*	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio17*	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter
Bio18*	最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter
Bio19*	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter

*表示经过 Person 分析后最终保留的用来进行 MaxEnt 模型模拟的气候因子。

* represents the climate factors retained for MaxEnt simulation analysis after Person analysis.

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020482>

附录3 3个主成分的方差解释率、13个环境因子的负载值及Pearson相关性系数

Appendix 3 The variance percentage of 3 principal components, load values of 13 environmental factors and Pearson correlation index

气候变量 Climate variables	PC1	PC2	PC3	Pearson
方差解释率 Percent of variance (%)	48.277	31.961	8.758	
年均温 Annual mean temperature	-0.726	0.236	0.487	-0.44**
等温性 Isothermality	-0.415	0.772	0.412	0.03*
温度季度变化 Temperature seasonality	0.54	-0.925	-0.249	-0.411**
最热月最高温 Max temperature of warmest month	0.749	-0.269	-0.380	0.409**
最冷月最低温 Min temperature of coldest month	0.763	0.378	-0.272	0.74**
年温度变化范围 Temperature annual range	-0.220	-0.876	-0.058	-0.595**
年平均降水量 Annual precipitation	0.932	0.276	0.085	0.694**
最干月降水量 Precipitation of driest month	0.841	-0.365	0.345	0.421**
降水量变异系数 Precipitation seasonality	-0.511	0.703	-0.284	0.037*
最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	0.789	0.545	-0.026	0.707**
最干季度降水量 Precipitation of driest quarter	0.838	-0.375	0.371	0.391**
最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	0.616	0.692	-0.152	0.62**
最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter	0.833	-0.328	0.406	0.439**

*表示 Pearson 相关性在 0.05 水平显著, **表示 Pearson 相关性在 0.01 水平显著。

* means that the Pearson correlation is significant at 0.05, ** means that the Pearson correlation is significant at 0.01.

周润, 慈秀芹, 肖建华, 曹关龙, 李捷 (2021) 气候变化对亚热带常绿阔叶林优势类群樟属植物的影响及保护评估. 生物多样性, 29, 697–711. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020482>

附录4 樟属物种丰富度热点区域的物种组成

Appendix 4 Species composition of species richness hotspots of *Cinnamomum*[illegible]

细毛樟 <i>C. tenuipile</i>															
假桂皮树 <i>C. tonkinense</i>		1													
辣汁树 <i>C. tsangii</i>			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
平托桂 <i>C. tsoi</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
粗脉桂 <i>C. validinerve</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
锡兰肉桂 <i>C. verum</i>															
川桂 <i>C. wilsonii</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
物种数 No. of species	22	24	23	20	20	18	18	18	22	10	19	18	20	21	19

1 代表该区域内有该物种分布。1 represents there have distribution of the species in the region.