

气候变化背景下中国毛竹资源时空动态变化

周潇^{1,2} 张璇^{1,2} 官凤英^{1,2*} 厉振^{1,2} 黎旻恺^{1,2} 傅大伟^{1,2}

(1.国际竹藤中心 国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室 中国北京 100102; 2.江苏宜兴竹林生态系统国家定位观测研究站 宜兴 214200)

摘要:【目的】气候变化是物种分布的重要驱动力,了解植物对气候变化的响应有助于制定相应的管理、保护措施。毛竹是重要的森林资源,广泛分布于热带和亚热带地区,具有生长快,碳积累高的特点。【方法】基于 140 条分布记录和 56 个环境变量,利用 Maxent 模型,模拟毛竹在当前(1970-2000)、未来不同时间段(2021-2040、2041-2060、2061-2080、2081-2100)、不同气候情景(ssp126、ssp245、ssp370、ssp585)下地理分布。【结果】当 Maxent 模型正规化乘数为 3,特征参数为 LQH 时,模型 AICc 最小,该参数组合在本研究中被推荐使用。毛竹的高度适生区位于江西、浙江、湖南、福建(位于 33° N 以南)。利用 jackknife 和相关性分析确定影响毛竹地理分布的关键因子包括最干燥月降雨量(bio14)、11 月降雨量(prec11)、5 月降雨量(prec05)、7 月最低温(tmin07)、最冷月最低温度(bio6)。【结论】气候变化(降雨、温度改变),毛竹高度适生区质心向西南方向移动,气候变暖和降水的增加有利于毛竹适生分布区的增加,但高度适生区面积减少。研究结果有助于森林管理者为毛竹制定适当的管理和保护策略,为气候变化下毛竹的经营发展提供理论依据。

关键词: 气候改变、毛竹、Maxent、物种分布

中图分类号 S75

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 () -0000-00

The spatiotemporal dynamic changes of *Phyllostachys edulis* resources in China under the background of climate change

Zhou Xiao^{1,2} Zhang Xuan^{1,2} Guan Fengying^{1,2} Li Zhen^{1,2} Li Minkai^{1,2} Fu Dawei^{1,2}

(1.International Center for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration, Beijing, China; 2.National Location Observation and Research Station of the Bamboo Forest Ecosystem in Yixing, National Forestry and Grassland Administration, Yixing, China)

Abstract: 【Objective】Climate change is an important driving force for species distribution. Understanding the response of plants to climate change can help develop corresponding management and protection measures. Moso Bamboo is an important forest resource widely distributed in tropical and subtropical regions, characterized by fast growth and high carbon accumulation. 【Method】Based on 140 distribution records and 56 environmental variables, the Maxent model was used to simulate the geographical distribution of bamboo under current (1970-2000), future time periods (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100), and different climate scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, ssp585). 【Result】When the regularization multiplier (RM) of the Maxent model is 3 and the feature parameter is LQH (linear-L, quadratic-Q and hinge-H), the AICc of the model is minimized, and this parameter combination is recommended for use in this study. The highly suitable areas for bamboo are located in Jiangxi, Zhejiang, Hunan, and Fujian (south of 33° N). The key factors affecting the geographical distribution of bamboo were determined using the knife cutting method and correlation analysis, including the precipitation of driest month (bio14), November precipitation (prec11), May precipitation (prec05), July lowest temperature (tmin07), and min temperature of coldest month (bio6). 【Conclusion】Climate change (changes in precipitation

and temperature) has caused the center of mass of the highly suitable area for moso bamboo to shift towards the southwest. Climate warming and increased precipitation are beneficial for the expansion of the suitable distribution area for bamboo, but the area of the highly suitable area has decreased. The research results are helpful for forest managers to develop appropriate management and protection strategies for bamboo, and provide theoretical basis for the management and development of bamboo under climate change.

Key words: Climate change; bamboo; Maxent; species distribution.

气候变化是影响生物多样性和物种分布的重要的自然因素之一 (Fan *et al.*, 2022; Wudu *et al.*, 2023)。随着全球变暖, 气候变化将成为未来生物多样性最大的威胁, 对生物个体、种群、群落和生态系统产生不同程度的影响 (Bellard *et al.*, 2012; Nunez *et al.*, 2019; Voskamp *et al.*, 2022)。根据 IPCC 第六次报告指出, 大气中 CO₂ 浓度 410ppm, 地表温度较 1850-1900 年升高 1.09°C, 未来 20 年还会持续升高, 到本世纪末, 预计升高 1.5-5.1°C (IPCC, 2021)。气候变化是把双刃剑, 可能导致植物适生区面积的减少 (Antão *et al.*, 2022; Wan *et al.*, 2021; Weiskopf *et al.*, 2020), 也可能导致生物量的提高 (Uribe *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023)。因此, 了解未来气候变化对不同物种的分布格局, 可以为未来指定物种保护策略提供科学依据。

生态位模型即物种分布模型, 利用已知的物种分布数据和相关的环境变量, 按照一定的算法构建模型, 预测物种潜在分布区域。近年来, 越来越多的方法被用来预测物种分布, 如生态位因子法 (ENFA)、分类与回归树 (CART)、最大熵模型 (Maxent)、广义线性模型 (GLM)、人工神经网络 (ANN) 等 (Bouska *et al.*, 2015; 许仲林等, 2015)。其中, 最大熵模型 (maxent) 仅利用少量的分布点较准确的预测物种分布, 具有结果稳定, 运行时间段等优点 (Phillips *et al.*, 2006; 马孟泉等, 2019), 是应用最广泛的生态位模型, 已经被广泛应用于气候变化对物种分布的影响 (Kong *et al.*, 2021; Shen *et al.*, 2022)、濒危物种保护 (Huang *et al.*, 2020)、动植物引种 (Hua *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024)、入侵物种防制 (Wu *et al.*, 2022) 等领域。

2019 年 12 月, 以竹代塑倡议提出, 致力于探讨竹子在解决全球塑料问题、减少污染排放方面的潜力和情景。毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 禾本科刚竹属竹种, 是中国重要的竹林资源类型, 面积 756.27 万 h m², 具有碳积累高、生长快等特点, 被广泛用于建筑、造纸、农业等方面。以往对毛竹的研究主要集中在经营措施 (Li *et al.*, 2015, 2018)、碳积累 (Yen, 2015; Zhou *et al.*, 2022a, 2023a) 和林分生长特征研究 (Zhou *et al.*, 2022b, 2023b); 然而, 其栖息地分布以及物种的生态需求如何影响物种的可持续发展, 在很大程度上仍不清楚。因此, 探讨毛竹与各环境因子的关系, 确定影响其分布的因素具有十分重要的意义。

在本研究中, 利用广泛的野外调查和地理参考数据, 采用 Maxent 模型评估毛竹的未来的潜在分布区。本研究的目的是: 确定影响毛竹分布的重要环境变量; 利用当前气候条件, 模拟未来气候情境下的毛竹潜在分布区变化情况, 探讨毛竹不同气候情景下的潜在分布区及制约毛竹地理扩散的原因, 为气候变化下毛竹的经营发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 数据收 和处理

基于中国数字标本馆 (<http://www.cvh.org.cn/>)、全球生物多样性 (GBIF, <https://www.gbif.org>)、发表的文献和 2021 年至 2024 年野外调查。将数据下载至 excel 表格中, 去除重复调查的样本和地理位置不清晰记录, 共获取样本数量 539 个。为减少数据的空间相关性, 使用 GIS 构建 2.5km*2.5km 的网格, 保留距离网格中心最近的点, 经过筛选, 总中获得毛竹分布点 140 个, 并使用 CSV 保存, 发生点位置如图

1 所示。

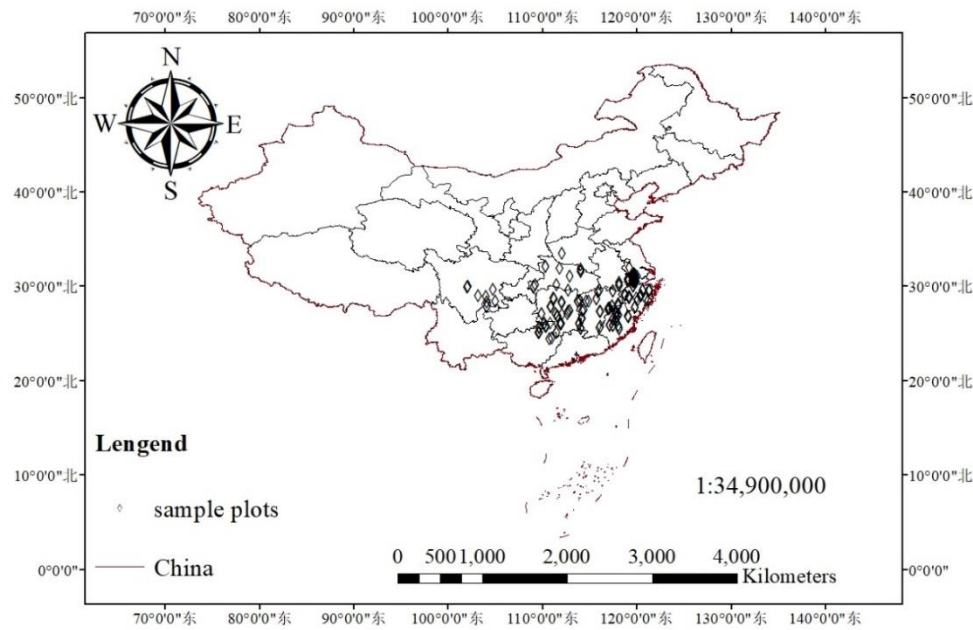


图 1. 毛竹存在点分布
Fig. 1. Distribution of bamboo existence points

1.2 环境变 的筛选和 处理

气候、海拔等环境因素影响着植物的生长发育和繁殖，进而决定植物的分布。本研究选取使用的环境变量来自 WorldClim v2.1 数据集（<http://www.worldclim.org/>），包括 19 个生物气候变量、月平均最高温度、月平均最低温度、月总降雨量和海拔（表 1），总计 56 个环境因子。使用 BCC-CSM2-MR 全球气候模式，使用 ssp126、ssp245、ssp370 和 ssp585 4 种气候情景下 2021 - 2040、2041 - 2060、2061 - 2080 和 2081 - 2100 年的环境变量。对环境变量进行过滤以提高模型的预测精度。使用 Maxent 软件 jackknife 分析来确定每个环境变量的贡献率，使用 R 分析每个环境变量的相关性。当两个环境变量相关系数 $R > 0.8$ 时，保留贡献率较大的变量。

表 1 气候因子定义
Tab. 1 Definition of Climate Factors

Climate Variables	Code	气候变量	Unit
Annual mean temperature	bio1	年平均温度	°C
Mean diurnal range	bio2	平均日变化范围	°C
Isothermality	bio3	等温性	%
Temperature seasonality	bio4	温度季节性	—
Max temperature of warmest month	bio5	最热月份的最高温度	°C
Min temperature of coldest month	bio6	最冷月份的最低温度	°C
Temperature annual range	bio7	温度年变化范围	°C
Mean temperature of wettest quarter	bio8	最潮湿季度的平均温度	°C
Mean temperature of driest quarter	bio9	最干燥季度的平均温度	°C

Mean temperature of warmest quarter	bio10	最热季度平均温度	°C
Mean temperature of coldest quarter	bio11	最冷季度平均温度	°C
Annual precipitation	bio12	年降水量	mm
Precipitation of wettest month	bio13	最湿月份降水量	mm
Precipitation of driest month	bio14	最干燥月份的降水量	mm
Precipitation seasonality	bio15	降水季节性	—
Precipitation of wettest quarter	bio16	最湿季度降水量	mm
Precipitation of driest quarter	bio17	最干季度降水量	mm
Precipitation of warmest quarter	bio18	最热季度降水量	mm
Precipitation of coldest quarter	bio19	最冷季度降水量	mm
Monthly average minimum temperature	tmin1–tmin12	月平均最低温度	°C
Monthly average maximum temperature	tmax1–tmax12	月平均最高温度	°C
Monthly total precipitation	prec1–prec12	月降水量	mm
Elevation	EL1	海拔	m

1.3 模型构建及评价

使用 Maxent 软件对毛竹不同时期不同情景的潜在分布区进行预测。将收集的毛竹分布 140 个点导入软件后，随机选取 75%的分布点进行模型构建，剩余 25%分布点进行模型验证，设置最大迭代值为 100 0，背景点设置为 10000，模型重复运行 20 次，并使用运行平均值确保结果的可靠性。使用 R 软件 ENMeval 2.0 函数（Kass *et al.*, 2021）优化正规化乘数（RM）和特征组合（FC）。RM 设置 0.5-4，以 0.5 为间隔，共 8 个水平，FC 选取了“L”，“LQ”，“H”，“LQH”，“LQHP”，“LQHPT” 6 种类型进行测试，其中线性（linear-L）、二次型（quadratic-Q）、片段化（hinge-H）、乘积型（product-P）和阈值型（threshold-T）。采用 Jackknife 方法进行 ENMeval 计算，生成最大可用的信息模型，提高模型预测精度。根据赤池信息准则（AICc）、delta 赤池信息准则（delta AICc）、受试者工作曲线（AUC）与测试 AUC 的差值（AUC.diff）、10%的遗漏率（OR10）进行模型性能评估。AUC 越接近 1，模型结果越准确。

将 Maxent 模型结果导入 GIS 中，通过转换工具将 ASCII 格式转换为栅格层，并通过重分类划分结果。比较了 manual 模型划分、standard deviation 划分、Geometrical interval 和 natural breaks（自然间断点）。本研究使用后发现适生面积过大且适生等级区分不高。因此本研究使用平均间距法将适生区划分为 5 个等级，分别为 0~20%为非适生区，20%~40%为低适生区、40%~60%为中适生区，60%~80%为次适生区，80%-100%为最适生区，且 60%-100%表示高度适生，并统计各适生区面积。

适宜生境质心变化：使用 GIS 分析次适生区（60%~80%）和最适生区（80%-100%）两个适生范围当前和未来适宜栖息地的质心。使用 GIS 绘制当前气候和不同时间段、不同气候情景下质心的变化。

2 结果与分析

2.1 模型的选择和准确性评价

通过 jackknife 分析和相关性分析选择环境变量, 贡献率排前三的依次是, 最干燥月份的降水量, 11 月降雨量, 5 月年降雨量; 累计贡献率占有环境因子的总贡献率的 43.3% 以上 (表 2)。

基于毛竹的物种分布点数目 (140 个), 在 Maxent 模型的默认参数 RM=1, FC=LQHPT 下, $\Delta AIC_c=270.1110$, $AUC=0.9807$, $OR_{10}=0.1985$; 当 RM=3, FC=LQH 时, $\Delta AIC_c=0$, $AUC=0.9612$, $OR_{10}=0.1103$ 。优化的参数显著降低了模型复杂程度, 更适合不同情景不同时期毛竹潜在适生区的预测。使用优化的组合对模型重新构建, 运行 20 次, 基于受试者工作曲线 (ROC 曲线), 得到本模型 AUC 最大 0.9828, 最小 0.9183, 平均值为 0.9614 (标准差 0.017), 表明模型预测准确 (图 2)。

表 2 用环境变量预测毛竹的潜在地理分布

Tab. 2 Predicting the Potential Geographical Distribution of Moso Bamboo Using Environmental Variables

名称	单位	气候变量	贡献率
	Unit	Climate variables	Percent contribution
bio14	mm	最干燥降水量	67.4
Prec11	mm	11 月降雨量	10.6
Prec5	mm	5 月降雨量	9.3
Tmin07	°C	7 月最低温	6.9
bio6	°C	最冷月最低温度	5.8

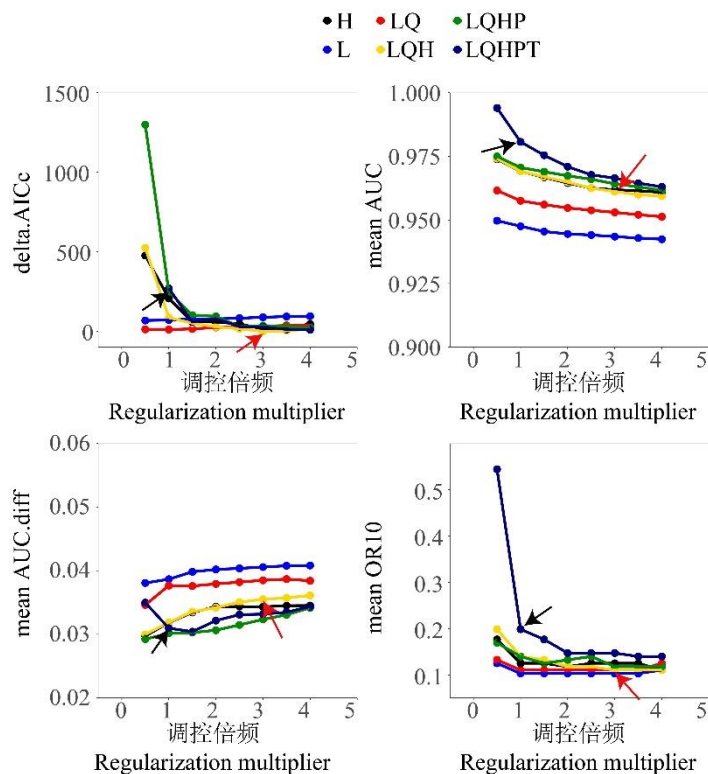


图 2 不同参数下的毛竹模型表现。黑色箭头表示 Maxent 默认参数, 红边箭头表示 AIC 值最小优化模型参数
Fig. 2 Performances of native niche model of moso bamboo under different settings. Black arrow indicates default setting, red arrow indicates the AICc-chosen setting

2.2 环境因子对物种分布的贡献

图 3 显示了 jackknife 测试的结果。当使用单个变量时，正则化训练增益，正则化测试增益和 AUC 值最大的变量是 11 月降雨量和最干月降雨量 (bio14)。从模型输出中获得环境变量对 Maxent 建模的百分比贡献率。单个环境变量百分比贡献率前四的分别为 bio14 (67.4%)、prec11 (10.6%)、prec5 (9.3%) 和 Tmin7 (6.9%)，累计贡献率为 94.2%。在应用的环境因子中，温度因子总贡献率为 12.7%，降水因子的总贡献率为 87.3%。

根据 Maxent 模型中环境因子对存在概率的响应曲线 (图 4)，以存在概率为 0.6 作为高度适生分布阈值，当最干燥月份降水量>32.31mm、11 月降水量>47.81mm、5 月降水量>142.668mm、7 月最低温 21.67~24.45℃，毛竹适宜生长生存。

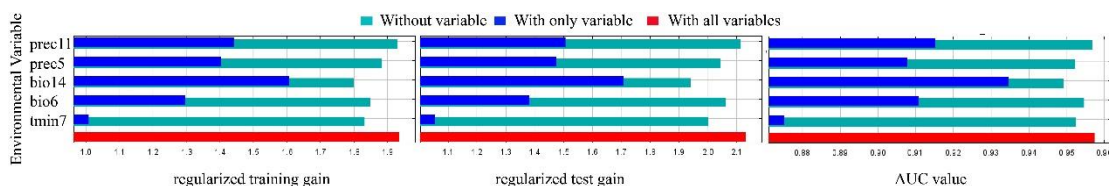


图 3 环境变量对毛竹潜在地理分布贡献的刀切法检验结果。图中分别显示了使用正则化训练增益，正则化测试增益和 AUC 值对变量贡献进行刀切法检验的结果

Fig. 3 The results of the Jackknife test on the potential geographical distribution contribution of environmental variables to bamboo. The figure shows the results of the Jackknife test on the contribution of variables using regularized training gain, regularized testing gain, and AUC value, respectively

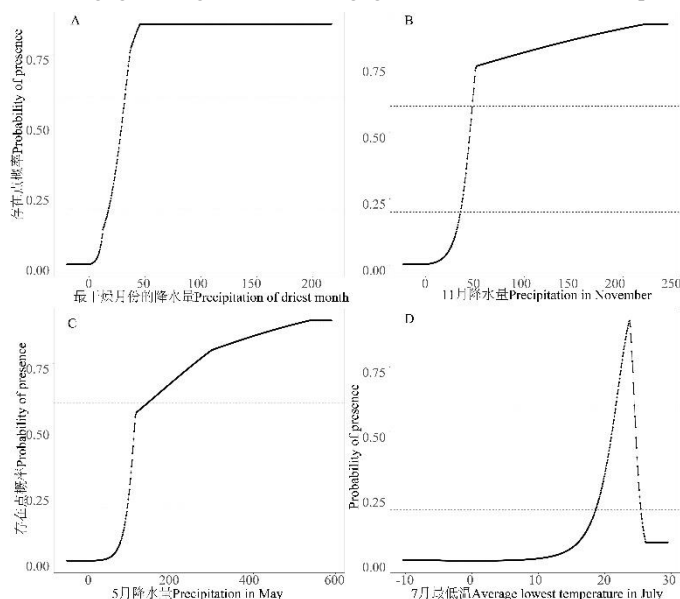


图 4 主要环境的响应曲线。A: 最干燥月份降水量, B:11 月降水量, C:5 月降水量, D: 7 月降水量。

虚线 0.2 以下表示非适生分布范围线, 0.6 以上表示高度适生分布范围线

Fig. 4 Response curve of the main environment. A: The driest month precipitation, B: November precipitation, C: May precipitation, D: July precipitation. The dashed line below 0.2 indicates the non suitable distribution range line, and above 0.6 indicates the highly suitable distribution range line

2.3 毛竹的当代适生分布

在当前气候条件下，预测毛竹分布涵盖了目前已知的实际分布区域 (图 5)，最适生区面积 $9.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占适生区面积 18.22%，主要集中在浙江、江西、湖南、福建北部、台湾中部和北部；次适生区、中适生区面积分别为 $28.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $38.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，分别占适生区面积的 17.65% 和 23.85%，主要分布于浙江、江西、湖南、福建、江苏、安徽、河南、贵州、四川、台湾；低适生区面积 $65.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，分布于中适生

区的外围（表3）。

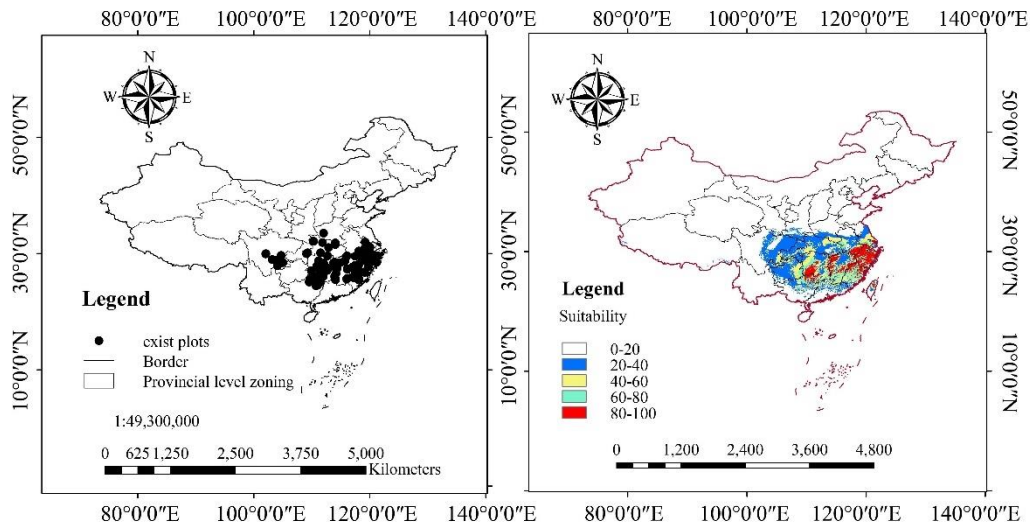


图5 毛竹在当代气候条件下的潜在适生区预测

Fig. 5. Predicted distribution map for moso bamboo under the current climate condition (1950-2000)

2.4. 气候背景下毛竹适生分布 测

在气候背景下，本研究对毛竹未来4个时间段（2021-2040，2041-2060，2061-2080和2081-2100）4个气候情景（ssp126，ssp245，ssp370和ssp585）的适生区分布格局进行了预测（图6-图9）。毛竹未来适生区呈现波动趋势（表3）。除2061-2080ssp585和2081-2100ssp585情景外，其余低度适生区面积减少，低适生区面积增加，中适生区面积呈现波动趋势，次适生区和最适生区面积减少。

在未来气候情景下，毛竹适生区总面积呈现波动趋势并维持在当前水平的79.47%（ $129.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）~149.37%（ $243.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ ）区间内。中适生区在2061-2080ssp585情景下面积减到最小（当前水平64.63%）；次适生区较当前气候有不同程度的下降，下降的幅度在24.61%-86.65%，最适生区面积变化趋势比较明显，其中在2081-2100ssp585情景下减幅最大，仅为当前面积5.44%。毛竹相对稳定适生区主要集中在福建北部，江西，湖南，浙江等地，另外，在西藏、甘肃、云南等区域适宜毛竹生存。

表3 不同气候情景下毛竹各适生区分布 积统计

Tab. 3 Statistics on the distribution area of suitable growing areas for bamboo under different climate scenarios

气候情景	0%-20%	20%-40%	40%-60%	60%-80%	80%-100%
当前气候	799.3408	65.69512	38.90719	28.79501	29.72635
2021-2041ssp126	760.7529	120.2524	45.59036	21.70885	14.1707
2021-2041ssp245	757.6019	133.9978	37.70767	17.77425	15.395
2021-2041ssp370	783.1077	111.4952	39.04254	14.86881	13.95154
2021-2041ssp585	746.4516	139.9375	42.94879	19.96099	13.18219
2041-2060ssp126	718.8271	162.779	49.92086	19.56796	11.3907
2041-2060ssp245	788.3722	110.5238	35.65757	16.69266	11.21989
2041-2060ssp370	777.8175	121.9318	34.99444	16.75704	10.95214
2041-2060ssp585	795.495	116.2944	34.32209	11.16268	5.20579
2061-2080ssp126	748.512	139.4961	41.88468	18.66025	13.91102
2061-2080ssp245	812.5507	101.9274	29.14601	11.66033	7.174852

2061-2080ssp370	822.9486	97.22763	30.21321	9.845144	2.237181
2061-2080ssp585	832.8471	94.57701	25.14759	6.511584	3.394352
2081-2100ssp126	755.5483	124.3798	52.94431	19.2817	10.29671
2081-2100ssp245	812.1353	91.87911	41.05747	11.87287	5.532779
2081-2100ssp370	809.2275	103.2697	38.35679	9.009717	2.614648
2081-2100ssp585	825.3876	98.55658	33.071	3.84765	1.61921

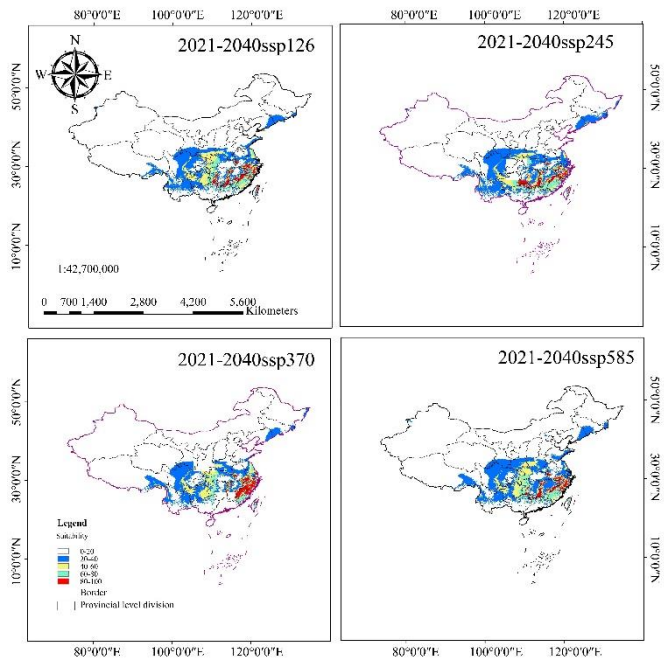


图6 2021-2040 气候变化背景下毛竹潜在适生区预测

Fig. 6 Prediction of potential suitable habitats for bamboo under the background of climate change from 2021 to 2040

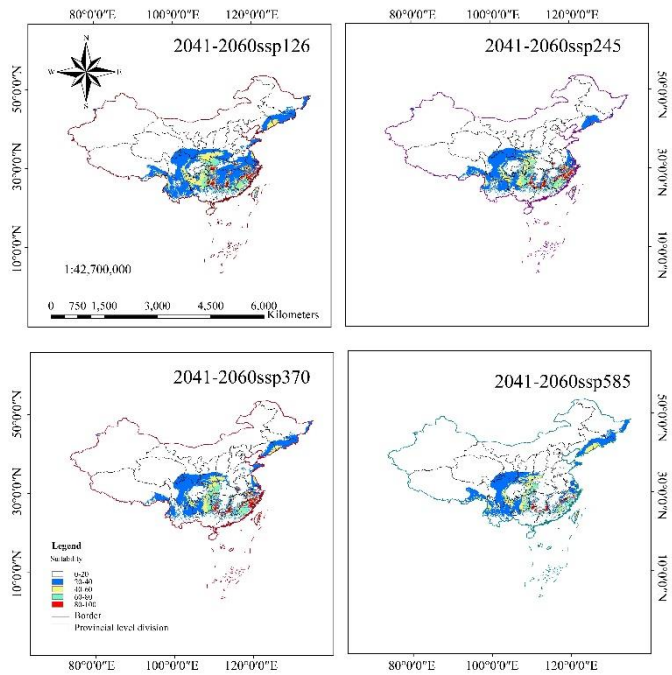


图7 2041-2060 气候变化背景下毛竹潜在适生区预测

Fig. 7 Prediction of potential suitable habitats for bamboo under the background of climate change from 2041 to 2060

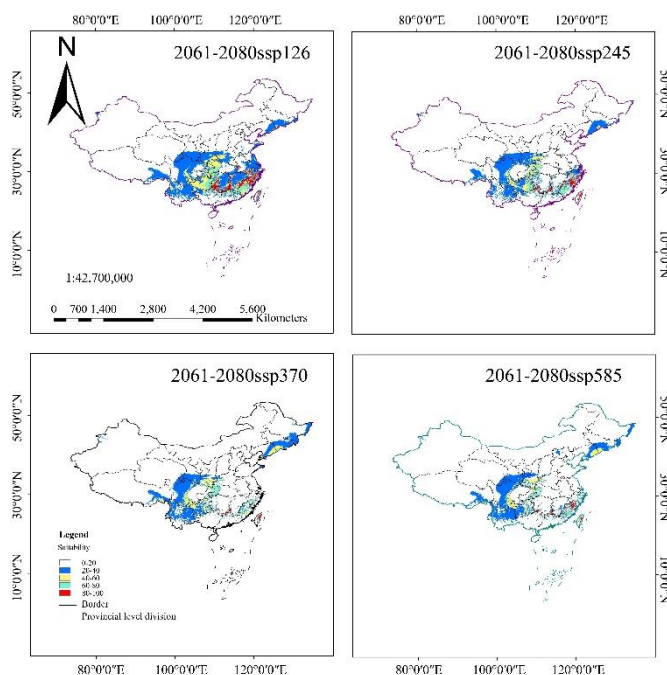


图 8 2061-2080 气候变化背景下毛竹潜在适生区预测

Fig. 8 Prediction of potential suitable habitats for bamboo under the background of climate change from 2061 to 2080

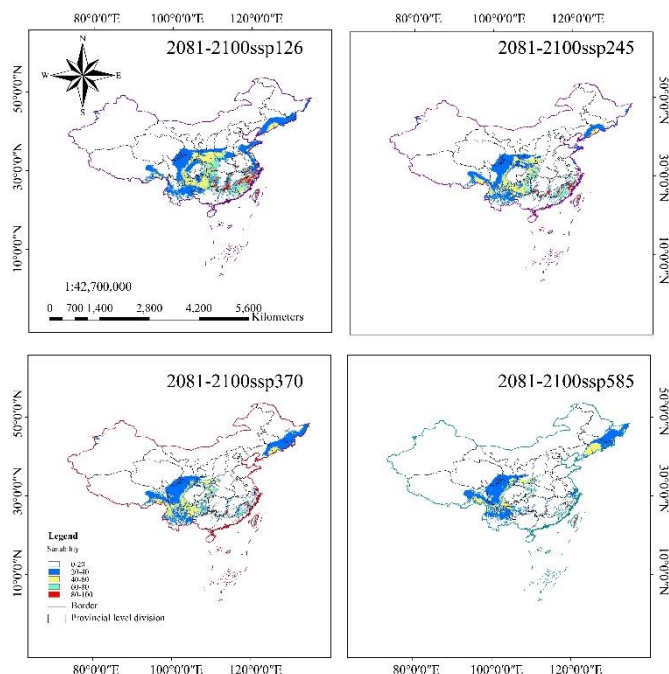


图 9 2081-2100 气候变化背景下毛竹潜在适生区预测

Fig. 9 Prediction of potential suitable habitats for bamboo under the background of climate change from 2081 to 2100

目前, 预测毛竹的质心位于江西省新余市 (27.85°N , 115.26°E ; 图 10)。毛竹相对稳定适生分布主要集中在福建北部, 江西, 湖南, 浙江等地。到 2040 年, 毛竹适生分布发生纬度上北移, 经度上出现

向东扩张趋势；在 2061-2080、2081-2100 时间段，毛竹适生分布发生纬度上南移，经度上出现向西扩张。总体来看，适宜生境的质心将向西南方向转移。

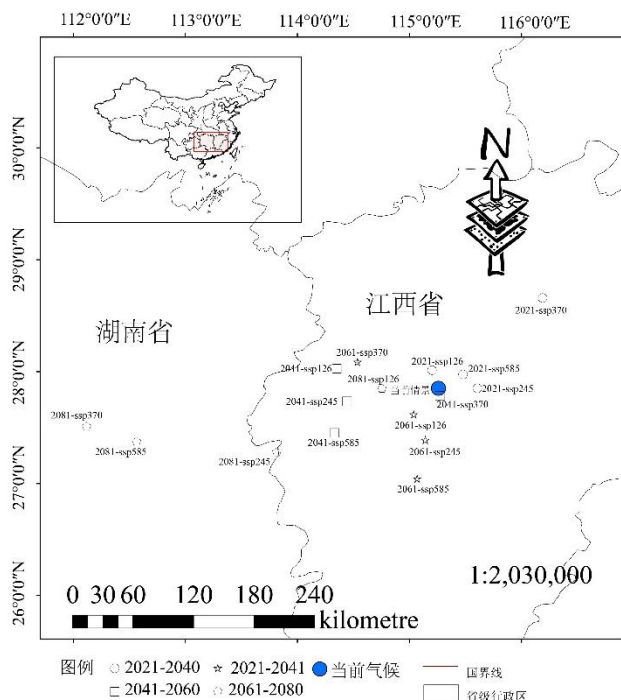


图 10 基于 Maxent 模型，毛竹的适生分布质心转移

Fig. 10 Based on the Maxent model, the centroid transfer of the suitable distribution of moso bamboo

4 讨论

生态位模型是利用物种是分布点所关联的环境变量去推算物种的生态需求，模拟物种的分布。提高生态位模型的转移能力，不仅可以准确模拟物种的潜在分布，同时对生态位保守等理论问题具有重要的参考（朱耿平等，2014）。

4.1 Maxent 模型默认参数的局限性

Maxent 模型通常保留一个随机子集的数据去建模，然后使用 AUC 去评价模型预测能力（Wacern *et al.*, 2014），但软件存在缺陷。当测试数据和训练数据受到采样偏差的影响时，模型可能会过拟合，AUC 可能偏大（Veloz, 2009）模拟物种潜在分布时，直接影响物种的转移能力（朱耿平等，2016），而使用 AICc 选择特征化参数和调整正规化参数可以约束模型的复杂度（Dan *et al.*, 2011）。本研究使用 AICc、AUC、AUC.diff（AUCtrain-AUCtest）和 OR10 指标进行对比，结果表明正规化乘数为 3 时，AICc 值最小，AUC 较大。当正规化乘数增大时 AICc 值增大，AUC 有下降趋势。本研究选取的最优设置为正规化乘数为 3，特征参数为 LQH。再重新建模后，得到不同气候情境下毛竹适宜区预测。

4.2 主导环境因子对毛竹潜在分布区的影响

环境因素、生物因素和物种的特性可能会影响生存分布（Fan *et al.*, 2022）。相较于物种特性，环境因子适用于预测大范围分布（King *et al.*, 2021；Williams *et al.*, 2021）。在本研究中，我们考虑了海拔（环境因子）对毛竹分布的影响，然而，海拔未被选作关键因子，这可能是由于海拔主要是通过影响温度、降水（V uille, 2011；Wang *et al.*, 2018），从而调节毛竹生长分布。我们的研究表明，毛竹高度适生区主要位于 33° N 以南（图 5）。根据未来气候条件，预计适合毛竹生长的区域总面积将会增加（图 6-图 9）。Maxent 模型表明，最干燥降雨量、11 月降雨量、5 月降雨量、7 月最低温是影响毛竹地理分布的关键环境因子（表 2，图

3, 图 4)。越来越多的研究已经证明植物的存活(尤其是树木)受到热带和亚热带地区降水不足(即干旱)的限制(Allen *et al.*, 2010; Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2020)。极端事件的发生可能是导致生物适应和物种分布的决定性因素(Leigh *et al.*, 2012; Harris *et al.*, 2018; Sillmann *et al.*, 2017)。Zeppel 1 等人发现春季或夏季的降水量减少会对植物有负面影响, 其他季节无显著影响, 且夏季降水的影响显著强于冬季(Zeppel *et al.*, 2014)。在本研究中, 我们也分析了月份降水对毛竹地理分布的影响, 发现 11 月降水量和 5 月降水量有较大的作用(表 2, 图 3, 图 4)。毛竹通过复杂的地下鞭根系统繁殖, 并通过鞭根产生新芽来扩大种群规模(Wei *et al.*, 2017)。11 月处于毛竹孕笋期, 鞭芽生长; 5 月处于毛竹高生长期(笋成竹阶段), 这两个时间段的降雨量决定了鞭芽的产生和竹笋是否能成竹。毛竹生长需要大量的水分(Páscoa *et al.*, 2020; Sawarkar *et al.*, 2023), 水分偏低可能导致毛竹林生产力下降甚至死亡。降水量是决定毛竹分布的关键因子(贡献率 87.3%), 这与一些研究结果相似(Shi *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2024), 在最干燥降雨量仅有 32.31mm 时, 毛竹仍然适生, 表明毛竹是耐干旱物种(Kongjarat *et al.*, 2024)。另外, 温度因子(Tmin07)总贡献率为 12.7%, 在当前气候情境下, 毛竹不适宜在 33° N 以北(图 5), 这可能是因为该区域属于温带地区, 冬季寒冷, 夏季炎热, 降雨量低, 不适宜毛竹生长。

4.3 未来气候变化对毛竹适生区分布影响

气候变化是影响物种分布和迁移的主要因素(Aguirre-Liguori *et al.*, 2021; Fan *et al.*, 2022; Weiskopf *et al.*, 2020; Wudu *et al.*, 2023)。几种气候模式表明, 未来地表温度继续上升, 年平均降水量将增加 17%-30%(Yang *et al.*, 2021)。预测结果表明, 毛竹适生区总面积呈现波动趋势并维持在当前水平的 79.47% (129.63*104km²)~149.37% (243.66*104km²) 区间内。

在未来气候情境下, 浙江、江西、湖南、福建具有相对稳定的高适宜生境, 贵州省也有破碎不连续稳定的分布区。在辽宁南部存在毛竹中适生区(40%-60%); 不同气候情境下毛竹高度适宜区质心向西南方向偏移, 这些变化与这些情景下降水和温度模式的变化密切相关(Bosso *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022)。

气候的变化, 每个物种都会有一个相对稳定的栖息地, 毛竹主要存在于福建、浙江、江西、湖南, 但是毛竹可能会失去一部分适合的栖息地。气候的变化不会导致毛竹大规模的迁移或灭绝, 但是合理控制碳排放有利于毛竹的生存和分布。

5 结论

本研究利用分布点数据和环境变量, 使用 Maxent 模拟了当前和未来中国毛竹的动态分布。使用正规化乘数为 3, 特征参数为 LQH 的 Maxent 模型去预测。结果表明, 毛竹高度适生区主要位于 33° N 以南, 影响毛竹地理分布的主要环境因子是最干燥月降雨量(bio14)、11 月降雨量(prec11)、5 月降雨量(prec05)、7 月最低温(tmin07)、最冷月最低温度(bio6)。毛竹的高度适宜区位于江西、浙江、湖南、福建。气候变化, 毛竹高度适宜区质心向西南方向移动, 气候变暖和降水的增加有利于毛竹适生分布区的增加, 但高度适生区面积减少。研究结果有助于森林经理者为毛竹制定适当的管理和保护策略, 为毛竹高效可持续经营提供建议。

参 考 文 献

马孟泉, 张 慧, 高吉喜, 等. 2019. 生物多样性维护生态保护红线划定方法对比. 生态学报, 39(19): 6959-6965.

- (Ma M X, Zhang H, Gao J X, et al. 2019. Different methods comparison of delineating the ecological protection red line for biodiversity conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 39(19): 6959-6965.[in Chinese])
- 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 2015. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 35(2): 557-567.
- (Xu Z L, Peng H H, Peng S Z. 2015. The development and evaluation of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 557-567. [in Chinese])
- 朱耿平, 刘 强, 高玉葆. 2014. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布[J]. *生物多样性*, 22(2): 223-230.
- (Zhu G P, Liu Q, Gao Y B. 2014. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species[J]. *Biodiversity Science*, 22(2): 223-230. [in Chinese])
- 朱耿平, 乔慧捷. 2016. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. *生物多样性*, 24(10): 1189-1196.
- (Zhu G P, Qiao H J. 2016. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. *Biodiversity Science*, 24(10): 1189-1196. DOI:10.17520/biods.2016265 [in Chinese])
- Aguirre-Gutiérrez J, Oliveras I, Rifai S, et al. 2019. Drier tropical forests are susceptible to functional changes in response to a long-term drought. *Ecology Letters* 22, 855–865.
- Aguirre-Liguori J A, Ramírez-Barahona S, Gaut B S. 2021. The evolutionary genomics of species' responses to climate change. *Nat Ecol Evol* 5, 1350–1360.
- Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management, Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate* 259, 660–684.
- Antão L H, Weigel B, Strona G, et al. 2022. Climate change reshuffles northern species within their niches. *Nat. Clim. Chang.* 12, 587–592.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters* 15, 365–377.
- Bosso L, Luchi N, Maresi G, et al. 2017. Predicting current and future disease outbreaks of *Diplodia sapinea* shoot blight in Italy: species distribution models as a tool for forest management planning. *Forest Ecology and Management* 400, 655–664.
- Bouska K L, Whitley G W, Lant C. 2015. Development and evaluation of species distribution models for fourteen native central U.S. fish species. *Hydrobiologia* 747, 159–176.
- Dan L W, Seifert S N. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. *Ecological Applications A Publication of the Ecological Society of America*, 21(2): 335-342. DOI:10.1890/10-1171.1
- Du D, Jiao L, Wu X, et al. 2024. Drought determines the growth stability of different dominant conifer species in Central Asia. *Global and Planetary Change* 234, 104370.
- Fan Z F, Zhou B J, Ma C L, et al. 2022. Impacts of climate change on species distribution patterns of *Polyspora sweet* in China. *Ecology and Evolution* 12, e9516.
- Harris R.M.B, Beaumont L J, Vance T R, et al. 2018. Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Clim Change* 8, 579–587.
- Hua R, Hua L, Tang Z, et al. 2023. Maxent Modeling for Predicting Habitat Suitability and Potential Distribution of Plateau Pika (*Ochotona curzoniae*) on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Rangeland Ecology & Management* 87, 34–43.
- Huang Z, Bai Y, Alatalo J M, et al. 2020. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: A case study in Xishuangbanna Tropical Area, China. *Biological Conservation* 249,
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Kass J M, Muscarella R, Galante P J, et al. 2021. ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. *Methods in Ecology and Evolution* 12, 1602–1608.
- King T W, Vynne C, Miller D, et al. 2021. The influence of spatial and temporal scale on the relative importance of biotic vs. abiotic factors for species distributions. *Diversity and Distributions* 27, 327–343.
- Kong F, Tang L, He H, et al. 2021. Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using Maxent.

Environ Sci Pollut Res 28, 34655–34663.

Kongjarat W, Han L, Aritsara A.N.A, et al. 2024. Hydraulic properties and drought response of a tropical bamboo (*Cephalostachyum pergracile*). *Plant Diversity* 46, 406–415.

Leigh A, Sevanto S, Ball M, et al. 2012. Do thick leaves avoid thermal damage in critically low wind speeds? *The New phytologist* 194, 477–87.

Li C, Shi Y, Zhou G, et al. 2018. Effects of different management approaches on soil carbon dynamics in Moso bamboo forest ecosystems. *CATENA* 169, 59–68.

Li P, Zhou G, Du H, et al. 2015. Current and potential carbon stocks in Moso bamboo forests in China. *Journal of Environmental Management* 156, 89–96.

Liu D, Wang T, Peñuelas J, et al. 2022. Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests. *Nat. Geosci.* 15, 800–804.

Nunez S, Arets E, Alkemade R, et al. 2019. Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough? *Climatic Change* 154, 351–365.

Páscoa P, Gouveia C, Besson C. 2020. A Simple Method to Identify Potential Groundwater-Dependent Vegetation Using NDVI MODIS. *Forests* 11, 147.

Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190, 231–259.

Sawarkar A D, Shrimankar D D, Kumar M, et al. 2023. Bamboos as a cultivated medicinal grass for industries: A systematic review. *Industrial Crops and Products* 203, 117210.

Shen Y, Tu Z, Zhang Y, et al. 2022. Predicting the impact of climate change on the distribution of two relict *Liriodendron* species by coupling the MaxEnt model and actual physiological indicators in relation to stress tolerance. *Journal of Environmental Management* 322, 116024.

Shi P, Preisler H K, Quinn B K, et al. 2020. Precipitation is the most crucial factor determining the distribution of moso bamboo in Mainland China. *Global Ecology and Conservation* 22, e00924.

Sillmann J, Thorarinsdottir T, Keenlyside N, et al. 2017. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes* 18, 65–74.

Uribe M. del R, Coe M T, Castanho A.D.A, et al. 2023. Net loss of biomass predicted for tropical biomes in a changing climate. *Nat. Clim. Chang.* 13, 274–281.

Veloz S D. 2009. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models[J]. *Journal of Biogeography*, 36(12): 2290–2299.

Voskamp A, Hof C, Biber M F, et al. 2022. Projected climate change impacts on the phylogenetic diversity of the world's terrestrial birds: more than species numbers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 289, 20212184.

Vuille M. 2011. Climate Variability and High Altitude Temperature and Precipitation, in: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 153–156.

Wan J N, Mbari N J, Wang S W, et al. 2021. Modeling impacts of climate change on the potential distribution of six endemic baobab species in Madagascar. *Plant Diversity* 43, 117–124.

Wang F, Yuan X, Sun Y, et al. 2024. Species distribution modeling based on MaxEnt to inform biodiversity conservation in the Central Urban Area of Chongqing Municipality. *Ecological Indicators* 158, 111491.

Wang L, Chen R, Song Y, et al. 2018. Precipitation–altitude relationships on different timescales and at different precipitation magnitudes in the Qilian Mountains. *Theor Appl Climatol* 134, 875–884.

Warren D L, Wright A N, Seifert S N, et al. 2014. Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern[J]. *Diversity & Distributions*, 20(3): 334–343.

Wei Q, Jiao C, Guo L, et al. 2017. Exploring key cellular processes and candidate genes regulating the primary thickening growth of Moso underground shoots. *New Phytol* 214, 81–96.

Weiskopf S R, Rubenstein M A, Crozier L G, et al. 2020. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment* 733, 137782.

- Williams K A, Slater H D, Gillingham P, et al. 2021. Environmental Factors Are Stronger Predictors of Primate Species' Distributions Than Basic Biological Traits. *Int J Primatol* 42, 404–425.
- Wu Z, Gao T, Luo Y, et al. 2022. Prediction of the global potential geographical distribution of *Hylurgus ligniperda* using a maximum entropy model. *Forest Ecosystems* 9, 100042.
- Wudu K, Abegaz A, Ayele L, et al. 2023. The impacts of climate change on biodiversity loss and its remedial measures using nature based conservation approach: a global perspective. *Biodivers Conserv* 32, 3681–3701.
- Yang H, Ciais P, Frappart F, et al. 2023. Global increase in biomass carbon stock dominated by growth of northern young forests over past decade. *Nat. Geosci.* 16, 886–892.
- Yang X, Zhou B, Xu Y, et al. 2021. CMIP6 Evaluation and Projection of Temperature and Precipitation over China. *dqxjz* 38, 817–830.
- Yen T M. 2015. Comparing aboveground structure and aboveground carbon storage of an age series of moso bamboo forests subjected to different management strategies. *Journal of Forest Research* 20, 1–8.
- Zeppel M.J.B, Wilks J V, Lewis J D. 2014. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences* 11, 3083–3093.
- Zhou X, Guan F, Fan S, et al. 2022b. Modeling Degraded Bamboo Shoots in Southeast China. *Forests* 13, 1482.
- Zhou X, Li Z, Liu L, et al. 2023b. Constructing two-level nonlinear mixed-effects crown width models for Moso bamboo in China. *Frontiers in Plant Science* 14.
- Zhou X, Zheng Y, Guan F, et al. 2022a. Compatible Biomass Model of Moso Bamboo with Measurement Error. *Forests* 13, 774.
- Zhou X, Zheng Y, Sharma R P, et al. 2023a. Comparing estimation algorithms for compatible biomass models of Moso Bamboo. *Trop Ecol.* <https://doi.org/10.1007/s42965-023-00314-9>