doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.017

基于 MaxEnt 模型的气候变化对中国乌桕潜在地理分布的影响预测

益争祝玛
(四川省大熊猫科学研究院,四川 成都 610084)

摘要:为评估气候变化对中国乌桕潜在地理分布的影响,基于乌桕分布点位数据和 19 个生物气候变量,采用 MaxEnt 模型结合 GIS 技术,预测当前及未来气候情景下乌桕在中国的潜在分布。模型评估显示较高准确性(AUC=0.924),降水量和温度是影响乌桕分布的主要环境因子,累积贡献率达 87.3%。预测表明,乌桕的适生区域在不同气候变化情景下呈显著变化。乌桕在中国的潜在适生区面积约 221.04×10^4 km^2,主要集中在华东及中部地区,包括江苏、安徽、湖北、浙江、江西、湖南、广西、广东、重庆和福建等省份。面对未来气候变化,预计高适生区将呈先减少后增加趋势,中适生区持续扩大,低适生区稳定增长。质心迁移将分别在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下向西北和东南方向进行。

关键词:乌桕;地理分布;最大熵模型(MaxEnt);地理信息系统(GIS);气候变化;适生区

中图分类号:Q949.753.5;O211.3;S718.512;S711 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2025)06-0125-08

引文格式:益争祝玛. 基于 MaxEnt 模型的气候变化对中国乌桕潜在地理分布的影响预测[J]. 林业调查规划, 2025,50(6):125-132. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.017

YIZHENG Zhuma. Predicting Impact of Climate Change on Potential Geographical Distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small in China Using MaxEnt Model[J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(6): 125-132. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.017

Predicting Impact of Climate Change on Potential Geographical Distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small in China Using MaxEnt Model

YIZHENG Zhuma
(Sichuan Academy of Giant Panda, Chengdu 610084, China)

Abstract: To assess the impact of climate change on the potential geographical distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small in China, the MaxEnt model combined with GIS technology was used to predict its potential distribution under current and future climate scenarios, based on species occurrence records and 19 bioclimatic variables. Model evaluation indicated high predictive accuracy (AUC=0.924). Precipitation and temperature were identified as the dominant environmental factors influencing the distribution of of *Triadica sebifera* (L.) Small, with a cumulative contribution rate of 87.3%. Predictions suggest that the suitable habitat area for of *Triadica sebifera* (L.) Small will change significantly under different climate change scenarios. The current potential suitable area in China is approximately 221.04×10^4 km^2, primarily concentrated in eastern and central regions, including Jiangsu, Anhui, Hubei, Zhejiang, Jian-

收稿日期:2024-09-04;**修回日期**:2024-10-14

第一作者:益争祝玛(1992-),女,硕士,工程师. 研究方向为林业资源调查和监测. Email:blueskyinxiamen@163.com

gxi, Hunan, Guangxi, Guangdong, Chongqing, and Fujian. Facing future climate change, the highly suitable habitat area is projected to decrease initially and then increase, the moderately suitable area is expected to expand continuously, while the lowly suitable area shows steady growth. The centroid of the suitable habitat is predicted to shift northwestward under the SSP1-2.6 scenario and southeastward under the SSP5-8.5 scenario.

Key words: *Triadica sebifera* (L.) Small; geographical distribution; MaxEnt model; Geographic Information System (GIS); climate change; suitable habitat

乌桕(*Triadica sebifera* (L.) Small),隶属大戟科乌桕属,是中国特有的多功能树种[1]。其不仅以其春季新叶的观赏价值和秋季叶片变色而受到园林设计师的青睐,而且其种子含油丰富,是重要的木本油料作物[2-3]。乌桕以其强大的生长适应性,在华东地区尤其广泛分布[4]。

尽管已有研究认识到乌桕在园林绿化和生物质能源开发中的潜力,但气候变化对其生长和分布的影响尚未充分探讨[5-7]。气候变化对生物多样性和林业产业构成了潜在威胁,乌桕的未来分布变化直接关系到生态平衡和区域经济发展[8-9]。在全球气候变暖的背景下,预测乌桕在中国的潜在地理分布变化,对于科学指导其种植、管理和保护具有重要意义。

MaxEnt 生态位模型软件是一种基于最大熵原理的机器学习技术,用于模拟物种的生态位和分布。通过分析物种的已知分布数据和环境变量,预测物种在不同地理区域的潜在分布情况。MaxEnt 模型因其较高的预测准确性和稳定性,已经成为生态学领域中应用最广泛、效果最好的物种分布模型之一,如利用 MaxEnt 模型预测杜仲的潜在适生区等[10]。研究表明,应用 MaxEnt 模型预测物种的潜在分布区能得到很好的结果[11-12]。

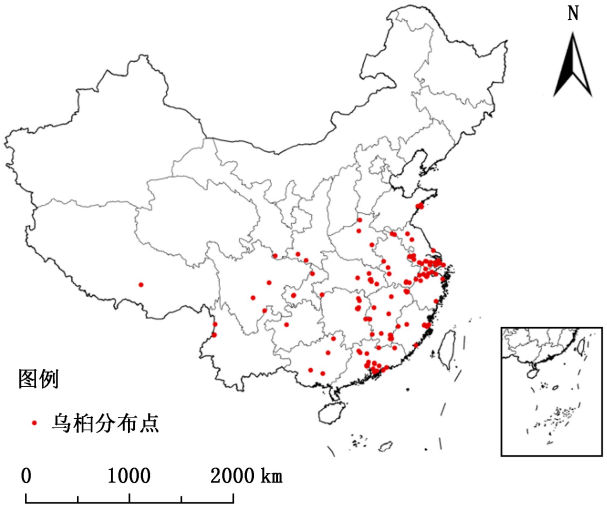
本研究采用 MaxEnt 生态位模型软件,结合乌桕资源分布资料和气候数据,对当前及未来气候情景下乌桕在中国的潜在分布进行了预测分析。通过识别影响乌桕生长的主要气候因子,本研究旨在为乌桕的引种栽培、生物质能源开发以及科学管理提供决策支持,为应对气候变化提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据获取与处理

本研究的数据集由 3 部分组成:

1)乌桕分布点位数据来源于全球生物多样性信息机构(GBIF)和学术期刊,经过筛选和整理,共得到 137 个分布点(图 1)。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改(下同)。

图 1 乌桕在中国的分布点数据

Fig. 1 Distribution points of *Triadica sebifera* (L.) Small in China

2)环境数据包括 19 个生物气候变量,这些变量从全球气候数据库(WorldClim)获取,涵盖当前(1970—2020 年)及未来两个时间段:2030s(2021—2040 年)和 2070s(2061—2080 年),数据分辨率统一为 2.5′。

3)底图数据来源于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作。

1.2 模型评估与验证

采用 MaxEnt Version 3.4.1 软件构建乌桕在中国的适生区预测模型,遵循以下步骤:

1)将乌桕在中国的 75%分布点位数据及 19 个生物气候变量输入软件,启用响应曲线创建、变量重要性评估及预测图生成等功能,构建初步模型。剩余 25%数据作为测试集,用于验证模型的预测能力。

2)采用 Jackknife 方法确定关键环境因子,筛选出具有较高贡献率的变量。

3)在当前及两种未来气候情景(低排放情景 SSP1-2.6 和高排放情景 SSP5-8.5)下模拟预测,两者构成了未来气候变化的最乐观与最严峻预估,为评估气候变化对乌桕适生区的影响提供了重要参考。输入关键环境因子数据至 MaxEnt 软件,模拟并预测乌桕在中国的潜在分布。模型运行重复 10 次,其他参数使用默认设置。

4)使用受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)值评估模型准确性。AUC 值接近 1 表示高预测准确性。根据王运生等人的研究[13],AUC 值的评价标准:0.5 以下为失败,0.5~0.6 为较差,>0.6~0.7 为一般,>0.7~0.8 为好,>0.8~1.0 为极好。

1.3 适生区划分

在模型结果较优的条件下,结合 ArcGIS 软件中空间分析工具对预测模型进行重分类。采用自然间断点分级法将适宜度分为 4 个等级[14],即高度适生区 $P \geqslant 0.48$,中度适生区 $0.28 \leqslant P < 0.48$,低度适生区 $0.09 \leqslant P < 0.28$,非适生区 $0 \leqslant P < 0.09$。

1.4 适生区质心迁移计算

根据刘美娟等的方法[15],可计算出不同时期乌桕在中国的适生区质心迁移情况。迁移距离 D 可通过公式计算得到,公式为:

$$D_{(j+1)-j} = R \times \sqrt{(y_{j+1} - y_j)^2 + (x_{j+1} - x_j)^2} \quad (1)$$

式中:(x_j, y_j) 和 (x_{j+1}, y_{j+1}) 分别为第 j 年和第 $j+1$ 年的质心坐标;R 为一个比例常数,取值为 111.11 km,用于将坐标差转换为实际的迁移距离。

迁移方向 θ 的计算公式为:

$$\theta_{(j+1)-j} = \frac{n\pi}{2} + \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j}\right) \quad (2)$$

式中:θ 为从 j 年到至 $j+1$ 年适生区质心迁移的方向,$n=(0,1,2)$。

2 结果与分析

2.1 模型预测评价

MaxEnt 模型分析显示,训练集的 ROC 曲线下面积 AUC 值为 0.924,测试集的 AUC 值为 0.935,均大于 0.9,表明 MaxEnt 模型预测乌桕适生区具有较高精度。生成的 ROC 曲线如图 2 所示。

2.2 影响乌桕地理分布的主要环境因子

本研究采用 MaxEnt 模型的刀切法评估了环境因子对乌桕分布的影响(图 3)。

分析结果显示,5 个环境因子对乌桕分布影响最为显著,按贡献率从高到低依次为:最干月份降水量(bio14,75.9%)、最冷月份最低温(bio6,8.7%)、最湿季度均温(bio8,5.1%)、等温性(bio3,3.9%)、年均温变化范围(bio7,2.6%),累积贡献率达到 87.3%。次要影响因子包括降水量季变异系数(bio15,1.7%)、昼夜温差月均值(bio2,1.3%)、最暖季度降水量(bio18,0.7%),这些因子的累积贡献率

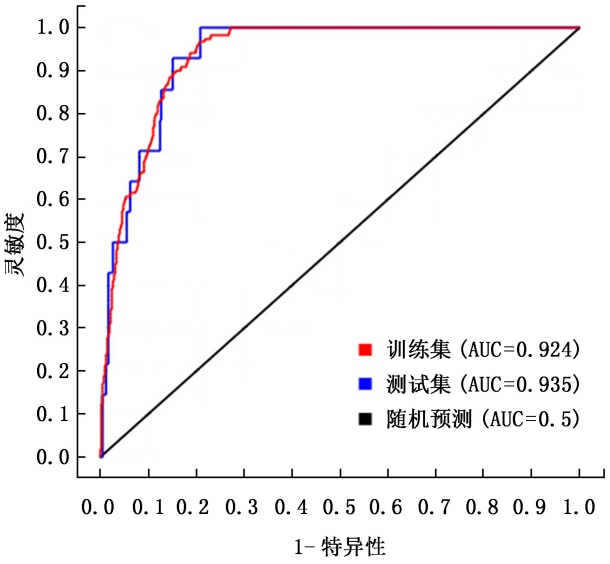


图 2　乌桕分布预测模型的 ROC 曲线

Fig. 2　Receiver operating characteristic curve for the distribution prediction model of *Triadica sebifera* (L.) Small

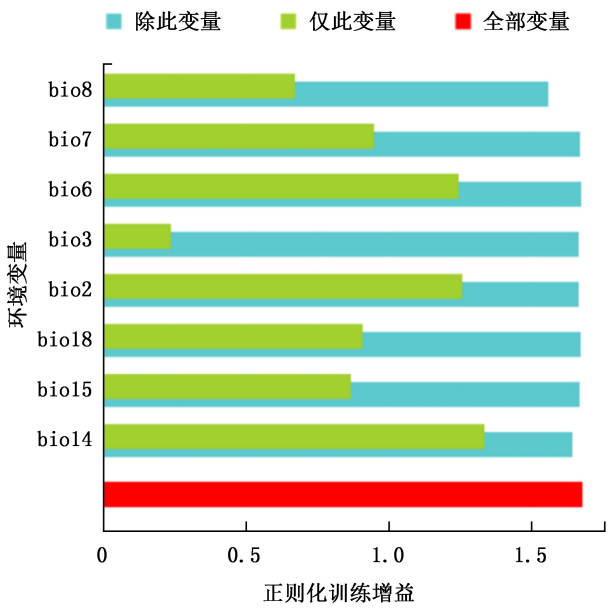


图 3　乌桕环境因子刀切法检验结果

Fig. 3　Results of the threshold cut method for environmental factors of *Triadica sebifera* (L.) Small

为 12.7%。分析结果突出了降水量和温度作为乌桕潜在生境分布的主要决定因素。适宜区的划分标准定为 $P \geqslant 0.48$，具体环境因子的贡献率及适宜区间详见表 1。其中，对乌桕影响最为显著的 5 个环境因子的适生范围参数：最干月份降水量 24.58～143.92 mm，最冷月份最低温 1.44～12.36℃，最湿季度均温 23.96～37.05℃，等温性 19.09～28.45℃，年均温变化范围 24.81～32.74℃。次要影响因子包括降水量季变异系数 41.07～64.42、昼夜温差月均值 5.38～8.56℃、最暖季度降水量 403.31～1 403.64 mm。

表 1 影响乌桕分布 8 个环境因子贡献率、累积贡献率及适宜区间

Tab. 1 Contribution rate, cumulative contribution rate, and suitable range of eight environmental factors affecting the distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small

	环境因子	贡献率/%	累积贡献率/%	适生区间
bio14	最干月份降水量	75.9	14.1	24.58～143.92 mm
bio6	最冷月份最低温	8.7	18.4	1.44～12.36℃
bio8	最湿季度均温	5.1	25.0	23.96～37.05℃
bio3	等温性	3.9	3.5	19.09～28.45℃
bio7	年均温变化范围	2.6	26.3	24.81～32.74℃
bio15	降水量季变异系数	1.7	6.1	41.07～64.42
bio2	昼夜温差月均值	1.3	4.6	5.38～8.56℃
bio18	最暖季度降水量	0.7	2.0	403.31～1403.64 mm

2.3 当前气候条件下乌桕潜在地理分布

乌桕在当前气候条件下的生境适宜性分布如图 4 所示。

如图 4 所示，在当前气候条件下，乌桕的潜在适宜生境总面积达到 $221.04\times10^4 km^2$，广泛覆盖中国的关键生态区域。高适生区集中于东部及中部地区，包括江苏、安徽、湖北、浙江、江西、湖南、广西、广东、重庆和福建等省份，总面积为 $57.62\times10^4 km^2$。中适生区与高适生区相邻，主要分布在贵州、湖南、江西、浙江、福建、广东、广西、江苏、安徽、湖北及四川和重庆的部分地区，面积为 $76.49\times10^4 km^2$。低适生区则进一步向西南部及中部地区扩展，包括四川、重庆、湖北、陕西、河南、山东、云南、西藏、福建及海南等省份的部分地区，面积为 $86.92\times10^4 km^2$。

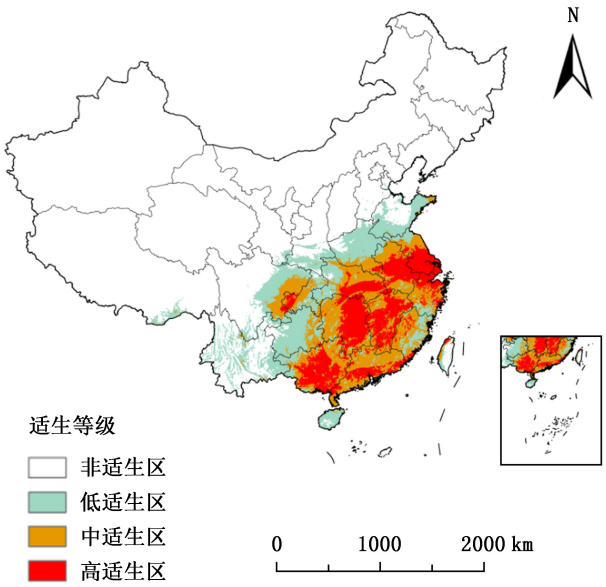


图 4 乌桕在当前气候条件下的生境适宜性分布

Fig. 4 Habitat suitability distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small under current climatic conditions

2.4 SSP1-2.6 情景下乌桕在中国的潜在分布

在 SSP1-2.6 情景下，预测乌桕在中国的适生区域将呈现不同的变化趋势（图 5）。2030s，高适生区域面积预计将先减少 8.83%，至 $52.53\times10^4 km^2$；中适生区域面积将增加 2.43%，至 $78.35\times10^4 km^2$；而低适生区域面积预计将增加 4.50%，至 $90.84\times10^4 km^2$。

至 2070s，预计高适生区域面积将恢复增长，达到 $68.11\times10^4 km^2$，中适生区域面积将略微减少至 $77.22\times10^4 km^2$，低适生区域面积将继续增加至 $96.32\times10^4 km^2$。这些预测揭示了乌桕适生区域在不同时间段的波动情况，表明了其对气候变化的适应性及未来潜在的生态格局变化。

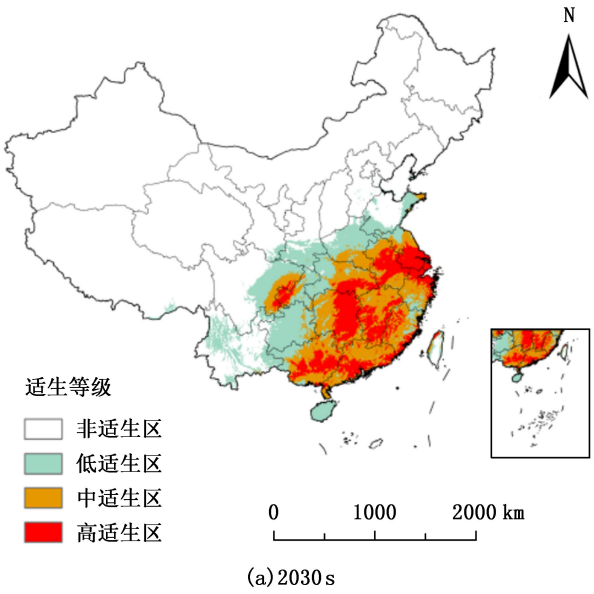
2.5 SSP5-8.5 情景下乌桕在中国的潜在分布

在 SSP5-8.5 情景下，预测乌桕在中国的适生区域将经历阶段性变化（图 6）。2030s，高适生区域面积预计将减少 7.89%，至 $53.08\times10^4 km^2$；中适生区域面积增加 6.78%，至 $81.67\times10^4 km^2$；低适生区域面积减少 5.66%，至 $82.00\times10^4 km^2$。

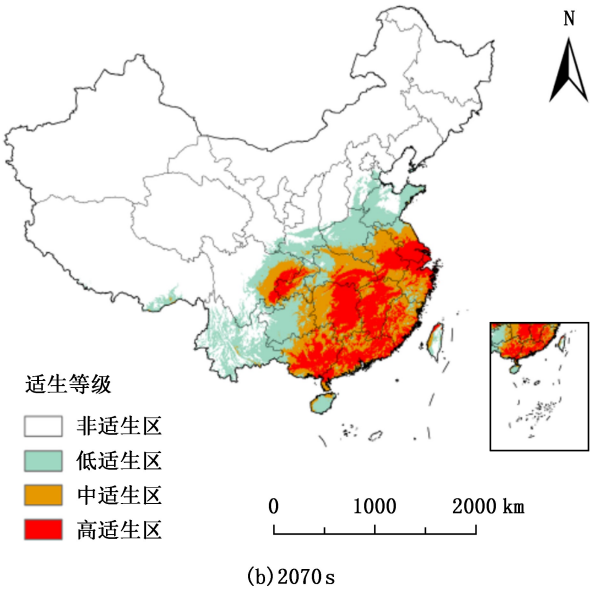
至 2070s，预计高适生区域面积将回升，增加至 $60.96\times10^4 km^2$，中适生区域面积将继续扩张至 $79.73\times10^4 km^2$。低适生区域面积也预计增加，达到 $92.85\times10^4 km^2$。这些预测指出，尽管短期内适生区域面积有所波动，但长期来看，乌桕的适生区域整体呈现扩张趋势（表 2）。

2.6 适生区质心迁移轨迹

在 SSP1-2.6 情景下，乌桕的适生区质心预计在



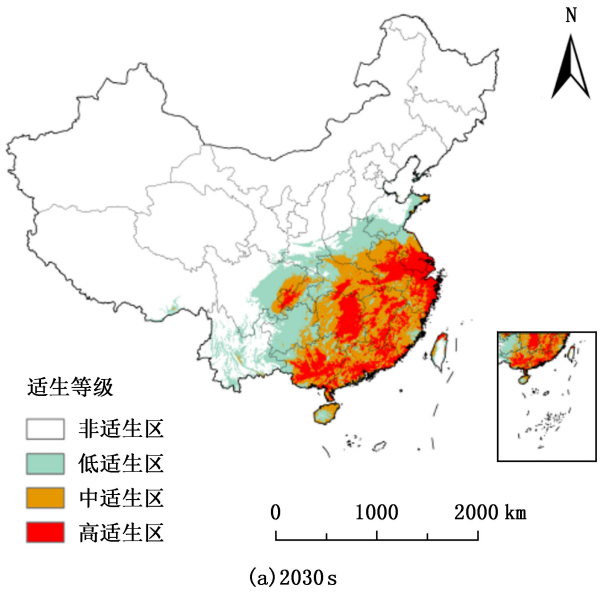
(a)2030s



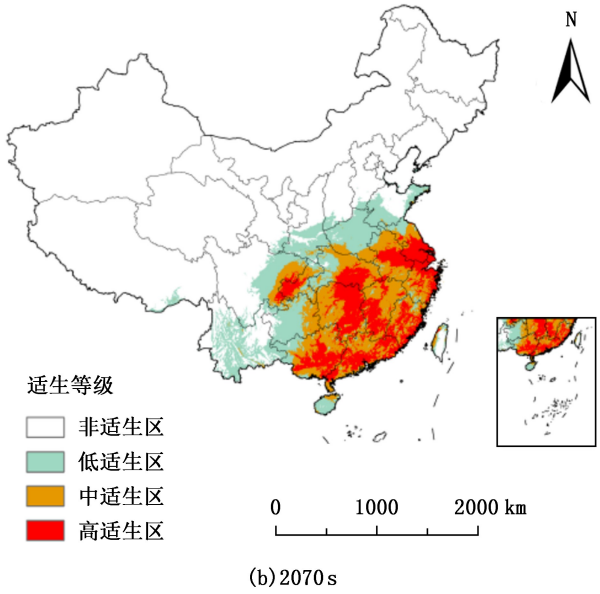
(b)2070s

图 5　SSP1-2.6 情境下乌桕在中国的潜在分布

Fig. 5　Potential distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small in China under the SSP1-2.6 scenario



(a)2030s



(b)2070s

图 6　SSP5-8.5 情境下乌桕在中国的潜在分布

Fig. 6　Potential distribution of *Triadica sebifera* (L.) Small in China under the SSP5-8.5 scenario

2030s 向东北方(23.87°)移动 83.41 km,而到 2070s 则向西南方向(11.86°)进一步移动 106.25 km。SSP5-8.5 情景下,2030s 的移动方向为东南(35.36°),距离为 34.74 km,至 2070s 则转向东北(15.06°),移动距离为 78.73 km。至 2070s,SSP1-2.6 情景下的总位移为向西北方向(30.37°)31.61 km,而 SSP5-8.5 情景下的总位移为向东南方向(13.47°)102.15 km。这些数据揭示了气候变化情景对乌桕分布的显著影响,且不同情景下的移动方向和距离差异显著(图 7)。

表 2　乌桕不同时期气候情景下潜在适生区面积

Tab. 2　Areas of potentially suitable habitats for *Triadica sebifera* (L.) Small under different climate scenarios and time periods　　万 km^2

时期	气候情景	高适生区	中适生区	低适生区	总适生区
当前		57.62	76.49	86.92	221.03
2030s	SSP1-2.6	52.53	78.35	90.84	221.72
	SSP5-8.5	53.08	81.67	82.00	216.75
2070s	SSP1-2.6	68.11	77.22	96.32	241.65
	SSP5-8.5	60.96	79.73	92.85	233.55

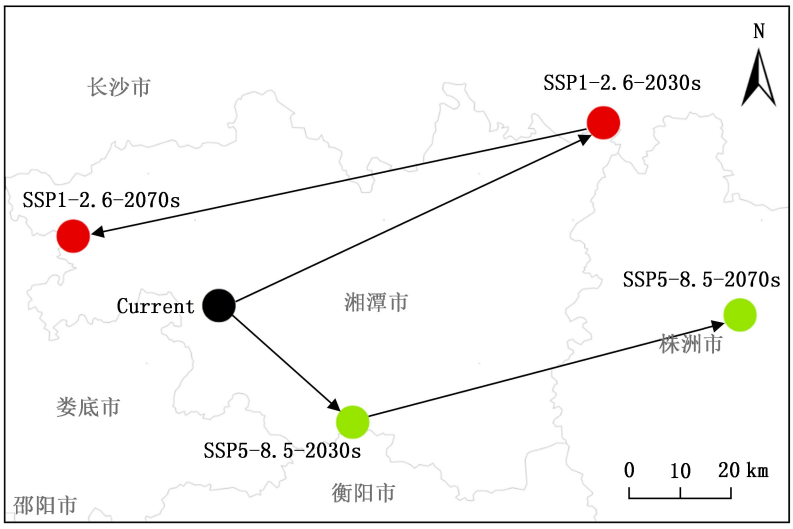


图 7 未来情境下乌桕适生区质心迁移轨迹

Fig. 7 Trajectory of the centroid shift in the suitable habitat area for *Triadica sebifera* (L.) Small under future scenarios

3 讨 论

3.1 模拟结果的可靠性

MaxEnt 模型对物种的预测效果较好,国内外专家学者对其使用较多、应用较为广泛,在植物潜在分布上的研究利用更是取得了较好成果[16-17]。基于 MaxEnt 模型预测物种潜在地理分布时,其准确性受到多种因素的综合影响,包括气候数据的详尽性、数据集的质量、样本地理位置信息的采集精确度,以及环境变量的选择和模型参数的优化等[18]。模型的准确度受多种因素影响,导致预测结果具有多样性,如王祎琛[19]等在黄连木研究中所展示的,其 ROC 曲线下面积(AUC)平均值达到了 0.902。本研究采用最大熵(MaxEnt)模型对乌桕物种分布进行模拟,并通过 10 次重复运行增强结果的稳健性。训练集的 AUC 值为 0.924,测试集的 AUC 值为 0.935。模型展现出较高的精确度,准确反映了乌桕的地理分布特征。

3.2 影响乌桕分布的主要环境因子

众多环境因子共同作用于物种分布,不同物种的生长需求和习性呈现出明显的差异。徐小琼等[20]研究发现,影响黄芩分布的主要环境因子有 11 月份降水量、最湿月降雨量、5 月份降水量、植被类型、土壤亚类、8 月份均温、坡度、温度季节性变化标准差。郑亚娇等[21]研究发现,影响多脉青冈潜在适生区的主要环境因子是最暖季降水量、等温性、最湿季降水量等。陈伊能等[22]研究发现,影响梅分布变化的主要环境因子是最冷月最低温、年降水量、最暖季降水量、年温差与最干燥月降水量等。刘斯垚等[23]研究发现,影响珠海市红树林分布的最主要环境因子是为水体盐度、土地利用类型、底质类型、水源地距离和高程等。何学高等[24]研究发现,海拔、坡度、生态系统类型、最热月最高温和人类活动强度等是影响青海省祁连圆柏潜在分布的主要环境因子。由此可见,不同物种的分布受不同环境因子的影响。

研究结果表明,最干月份降水量(bio14)、最冷月份最低温(bio6)、最湿季度均温(bio8)、等温性(bio3)及年均温变化范围(bio7)是影响乌桕分布格局的主导气候因子,降水和温度对乌桕的分布至关重要。顾庆龙等[25]研究强调了充足降水对乌桕生长的重要性。温度作为第二大影响因子,与李冬林等[26]的研究相吻合,表明乌桕偏好温暖气候。同时,结合金代钧等[27]对乌桕地理分布与环境关系的分析结果,将乌桕归属亚热带树种,适宜生长在温暖湿润的气候条件下,需要较高的温度和充足的降水,对低温环境的适应能力较弱。可见,降水量和温度是影响乌桕的重要因素。

3.3 当前乌桕适生区的分析

目前,由于影响物种地理分布的因素多样,因此适生区划分的研究中尚未形成统一的等级划分标准[28]。陈禹光等[29]在研究中,采用模型首次输出结果中最小存在阈值 0.157,按照适生程度对杉木适生区从低到高定义划分为:不适宜区($P \leqslant 0.157$)、低适宜区($0.157 < P \leqslant 0.35$)、中适宜区($0.35 < P \leqslant 0.55$)、高适宜区($P > 0.55$)。张华等[30]将胡杨分布区划为以下 4 个等级:$P < 0.2$ 为非适生区,$0.2 \leqslant P <$

0.4 为低适生区,0.4≤P<0.65 为中适生区,P≥0.65 为高适生区。

利用 MaxEnt 模型对我国乌桕的分布区进行模拟得到适生区,按照自然断点法将适生范围分为 4 个等级:高度适生区 P≥0.48,中度适生区 0.28≤P<0.48,低度适生区 0.09≤P<0.28,非适生区 P<0.09。当前适生等级呈带状分布,高适生区主要分布于东部及中部省份,中适生区在高适生区周围扩展,低适生区则进一步延伸至西南部及中部地区。模拟结果与乌桕的实际分布相一致。在本研究中,MaxEnt 模型基于标准参数构建,但此默认设置可能对样本偏差敏感,导致过拟合。因此,建议未来研究对模型参数进行优化,以更精确地模拟乌桕的自然分布,增强模型的预测能力和生态学研究的准确性。

3.4 乌桕在 2030s 和 2070s 潜在适生区变化格局

在研究未来气候变化对乌桕适生区的潜在影响时,采用了两种温室气体排放情景:SSP1-2.6(低排放)和 SSP5-8.5(高排放)。CHEN 等[31]研究表明,植物的分布变化是响应气候变化的直接指标。在 2030s,SSP1-2.6 情景下,乌桕的高适生区面积有所下降,而中适生区和低适生区面积则相应增加。这一趋势表明,在温和的气候变化条件下,乌桕倾向于向气候较凉爽的地区迁移,与 Thuiller 等[32]对其他植被迁移模式的观察结果一致。相反,在 SSP5-8.5 情景下,高适生区面积减少、中适生区面积的增加则表明乌桕可能在寻找更温和的气候条件,尤其是在受海洋性气候影响的东南部地区。

进入 2070s,SSP1-2.6 情景下,乌桕的适生区整体面积进一步扩大,尤其是在中适生区和低适生区,这表明乌桕在这一情景下展现出较强的适应性。而在 SSP5-8.5 情景下,虽然适生区扩张趋势较弱,但高适生区面积的恢复增长也显示了乌桕对高排放情景下的气候变化具有一定的适应性。

乌桕对气候变化的响应表现为其适生区的地理迁移。在低排放情景(SSP1-2.6)中,乌桕倾向于向凉爽湿润的地区转移,这可能是由于全球变暖速度较慢,为乌桕提供了适应性迁移的机会。而在高排放情景(SSP5-8.5)下,乌桕的迁移趋势指向气候相对温和的东南地区,这可能是对全球气温升高和适宜生长区域变得炎热干燥的响应。这些观察结果揭示了乌桕对气候变化的敏感性,并展示了其通过调整地理分布来适应环境变化的能力。尽管乌桕树显示出一定的适应性,但这种分布变化也暗示了气候变化可能对物种分布产生复杂影响。

4 结　论

应用 MaxEnt 模型,有效识别了乌桕分布的主要气候因素:降水量和温度。5 个关键气候变量(最干月份降水量、最冷月份最低温、最湿季度均温、等温性及年均温变化范围)对乌桕分布具有决定性影响,累积贡献率达到 87.3%,凸显乌桕对湿润气候条件的偏好。基于这些关键气候因子,本研究预测 2030s 至 2070s 气候变化将引起乌桕适生区的显著变化。预计高适生区会先减少后增加,中适生区将稳定扩大,而低适生区将呈现增长后的波动,反映了乌桕对气候变化的敏感性和适应性。

虽然 MaxEnt 模型在生态学研究中得到了广泛应用,但其准确性依赖于样本的精确采集、环境变量的精心选择和模型参数的细致调整。为提高预测准确性,建议未来研究增加样本量、细化环境变量,并优化模型参数,以减少偏差和过拟合现象。

本研究为理解乌桕的生态需求和分布模式提供了新的视角,并为应对气候变化提供了科学依据。鉴于气候变化对乌桕分布的潜在影响,建议加强气候变化对乌桕分布影响的监测、保护和恢复关键生态区域、制定和实施适应性管理策略等措施,以维持乌桕的生态多样性。

参考文献:

[1] 王怡晨,孙海燕,陈丽,等. 不同产地乌桕种子含油率差异的研究[J]. 种子,2018,37(6):53-55.

[2] 李淑娴,刘菁菁,田树霞,等. 乌桕种子休眠原因及解除方法研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(5):1-4.

[3] 许中秋,隋德宗,谢寅峰,等. 两个乌桕新品种苗木光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):93-100.

[4] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,2004.

[5] 李玉玲,梁素,周丽珠,等. 基于功能性状的中亚热带岩溶常绿落叶阔叶混交林物种多样性维持研究[J]. 生态学报,2024,44(10):4400-4411.

[6] 范帆,蔡胜伟,龚宇佳,等. 乌桕籽绝缘油的电气性能及其热老化特性研究[J]. 绝缘材料,2024,57(5):57-60.

[7] 唐梦,陈静,杨灵懿,等. 气候变化下中国主要生物燃油树种分布与变迁[J]. 生态学报,2023,43(24):10156-10170.

[8] 刘阳,王鹤松. 气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响[J]. 北京林业大学学报,2024,46(6):82-92.

[9] 张明珠,叶兴状,李佳慧,等. 气候变化情景下长序榆在中国的潜在适生区预测[J]. 生态学杂志,2021,40(12):3822-3835.
[10] 刘攀峰,王璐,杜庆鑫,等. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析[J]. 生态学报,2020,40(16):5674-5684.
[11] 马松梅,张明理,张宏祥,等. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸果木的潜在地理分布及格局[J]. 植物生态学报,2010,34(11):1327-1335.
[12] 杨楠,马东源,钟雪,等. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价[J]. 生态学报,2020,40(19):7064-7072.
[13] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2008.
[14] 丁德永,段洪,李咪者,等. 木荷适生区分析及未来气候下在中国潜在适生区预测[J]. 中国野生植物资源,2024,43(3):114-123.
[15] 刘美娟,王蓓,仲俊涛. 近 30 年来青海省人口—经济—粮食区域差异与空间格局[J]. 西北人口,2021,42(6):113-124.
[16] 雒鹏,艾尼瓦尔·吐米尔. 应用 MaxEnt 模型对新疆粉衣科地衣潜在分布区预测[J]. 东北林业大学学报,2023,51(3):84-89.
[17] 赵浩翔,冼晓青,郭建洋,等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测海灰翅夜蛾潜在地理分布区[J]. 植物保护,2022,48(6):16-22.
[18] 王爱君,路东晔,张国盛,等. 基于 MaxEnt 模拟欧亚大陆气候变化下叉子圆柏的潜在分布[J]. 林业科学,2021,57(8):43-55.
[19] 王祎琛,毛俊俨,陈星京,等. 应用最大熵模型预测黄连木在中国的潜在分布[J]. 东北林业大学学报,2021,49(7):61-65.
[20] 徐小琼,鲁燕云,朱颖,等. 基于最大熵模型的我国黄芩生态适宜性研究[J]. 中国中医药信息杂志,2024,31(2):1-5.
[21] 郑亚娇,张沈安,栾东涛,等. 应用最大熵模型预测多脉青冈在不同时期的潜在分布[J]. 东北林业大学学报,2024,52(3):76-81.
[22] 陈伊能,刘志刚,于婷,等. 基于 MaxEnt 模型预测梅的潜在适生区分布[J]. 中国野生植物资源,2024,43(1):107-113.
[23] 刘斯垚,周维,叶生晶,等. 基于 MaxEnt 模型的珠海市红树林潜在适生区分析[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(12):35-43.
[24] 何学高,刘欢,张婧,等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测青海省祁连圆柏潜在分布区[J]. 北京林业大学学报,2023,45(12):19-31.
[25] 顾庆龙,刘金林. 环境因子与乌桕种子产量、品质的相关性[J]. 生物学杂志,2001(1):27-29.
[26] 李冬林,黄栋,王瑾,等. 乌桕研究综述[J]. 江苏林业科技,2009,36(4):43-47.
[27] 金代钧,黄惠坤. 乌桕的地理分布和环境的关系[J]. 广西植物,1984(1):71-80.
[28] 荣文文,黄祥,牛攀新,等. 基于最大熵模型的中药材木贼麻黄潜在适生区[J]. 生态学报,2023,43(20):8631-8646.
[29] 陈禹光,乐新贵,陈宇涵,等. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布[J]. 应用生态学报,2022,33(5):1207-1214.
[30] 张华,赵浩翔,王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布[J]. 生态学报,2020,40(18):6552-6563.
[31] CHEN I C,HILL J K,OHLEMÜLLER R,et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science,2011,333(6045):1024-1026.
[32] THUILLER W,LAVOREL S,ARAÚJO M B,et al. Climate change threatens plant diversity in Europe [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2005,102(8):8245-8250.

责任编辑:刘平书