

气候变化情境下吴茱萸的潜在适生区分布预测

陈可欣¹, 胡明丽¹, 宋林河², 张易凡¹, 张志君¹, 陈林枫^{1*}

¹湖北科技学院药学院, 湖北 咸宁

²云南大学生态与环境学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月7日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月19日

摘要

吴茱萸是中国传统的中药材, 野生资源较少, 主要来源于种植, 预测吴茱萸的潜在适生区对吴茱萸的栽培和植物的保护具有指导意义。利用吴茱萸在中国的318个地理分布记录, 结合14个有效环境因子, 应用最大熵模型(MaxEnt)研究影响吴茱萸适宜性分布的生态因子, 结合ArcGIS软件预测未来(2041~2060年、2080~2100年)吴茱萸在中国的潜在适生区分布。研究结果表明: (1) MaxEnt模型的ROC曲线的平均训练集的AUC值为0.945 (>0.9), 说明该模型构建准确可靠。(2) 影响吴茱萸适宜性生长的主要环境因子为最冷季度的平均温度(Bio11)、最暖季度的降水量(Bio18)、温度季节性变化(Bio4)和坡向(Aspect), 其中最冷季度的平均温度(Bio11)起到至关重要的作用。(3) 当前吴茱萸在中国分布较广, 高适生区在江西、广西、贵州、湖南等省份, 总适生区面积为 $131.69 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占我国陆地表面积的13.72%。(4) 未来气候变化有利于吴茱萸在我国的分布, 其高适生区和总适生区在不同气候情境下均有明显的扩张。以上预测为吴茱萸潜在适生区分布提供了参考, 为吴茱萸的物种资源保护和开发利用提供了视野。

关键词

吴茱萸, 环境因子, 潜在适生区, MaxEnt, ArcGIS

Prediction of Potential Suitable Habitat Distribution of *Euodia rutaecarpa* under Climate Change Scenarios

Kexin Chen¹, Mingli Hu¹, Linhe Song², Yifan Zhang¹, Zhijun Zhang¹, Linfeng Chen^{1*}

¹School of Pharmacy, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei

²School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 陈可欣, 胡明丽, 宋林河, 张易凡, 张志君, 陈林枫. 气候变化情境下吴茱萸的潜在适生区分布预测[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 411-421. DOI: 10.12677/ccrl.2025.143041

Abstract

Euodia rutaecarpa is a traditional medicinal herb in China. The wild resources of *E. rutaecarpa* are scarce, and they are primarily sourced from cultivation. Predicting the potential suitable areas of *E. rutaecarpa* holds guiding significance for its cultivation and plant conservation. Using the MaxEnt (Maximum Entropy) and ArcGIS software, we predicted potential suitable habitat of *E. rutaecarpa* in China in the future (2041~2060, 2080~2100) through 318 occurrence records along with 14 environmental factors. The results indicated the following: (1) The model exhibited outstanding accuracy with AUC = 0.945 (>0.9), indicating that the model is constructed accurately and reliably. (2) The primary environmental factors influencing the distribution of *E. rutaecarpa* were average temperature of coldest quarter (Bio11), precipitation in the warmest quarter (Bio18), seasonal variation of temperature (Bio4), and aspect. Among these, average temperature of coldest quarter (Bio11) was the most influential environmental factor on *E. rutaecarpa* distribution. (3) Currently, *E. rutaecarpa* is widely distributed in China, with suitability areas located in provinces such as Jiangxi, Guangxi, Guizhou, and Hunan, covering $131.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ (13.72% of China's total land area). (4) Future climate change is projected to favor the distribution of *E. rutaecarpa* in China, with notable expansion in its potential total suitable areas and high suitability areas under different climate scenarios. These accurate predictions serve as a scientific references for the identification of suitable areas of *E. rutaecarpa*, and provide insights into both the conservation and sustainable utilization of its germplasm resources.

Keywords

Euodia rutaecarpa, Environmental Factors, Potential Suitable Habitat, MaxEnt, ArcGIS

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化直接影响着物种的栖息环境,如生态系统结构和功能,植物的春季物候,水热条件等,进而对植物的地理分布格局造成影响[1][2]。植物栖息地会随着环境条件的变化受到严重影响,引起适生区的迁移和面积的改变[3],植物中的次生代谢产物可能也会的积累可能也会有相应的改变,进一步影响某些中药材的品质[4]。科学预测濒危珍稀物种分布区及适宜等级,在最适生区规划野生自然保护区,是保护植物资源,实现药用植物可持续利用的有效方式[5]。

物种分布模型是评价气候变化对物种分布影响的有力工具之一[6],其中最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型具有仅依靠物种分布点及环境数据便能准确可靠地模拟物种的潜在适生区,运算时间短,且在低样本量条件下模拟精度高等优点[7]。近年来,MaxEnt模型因在预测气候变化对植物分布影响的研究中展现出了优秀的预测能力而得到了广泛应用[8][9]。

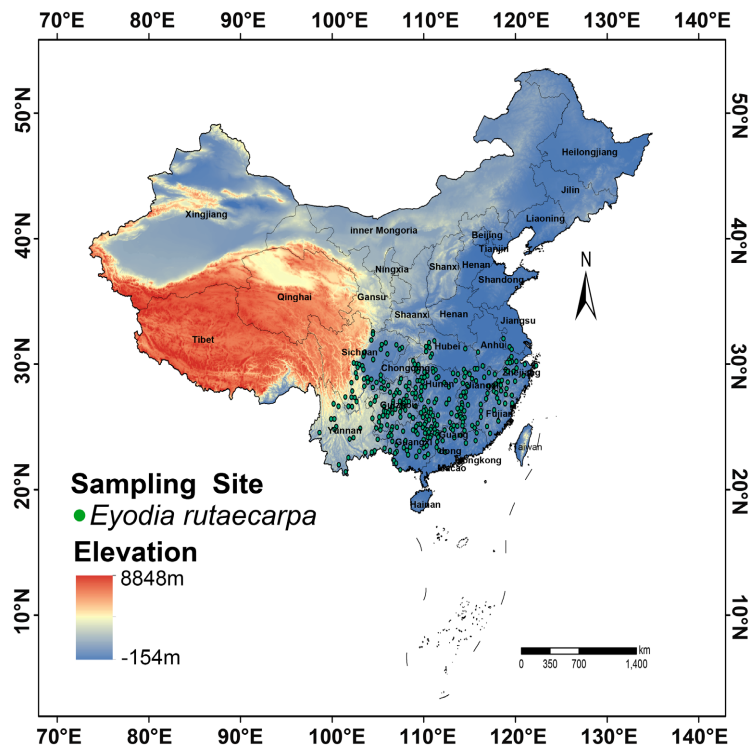
吴茱萸 *Euodia rutaecarpa* (Juss.) Benth.为芸香科吴茱萸属小乔木或灌木,适应性强,除海南未见自然分布,广泛分布于秦岭以南各地[10]。吴茱萸的干燥近成熟的果实是《中华人民共和国药典》中生药吴茱萸的主要来源之一,具有散寒止痛、降逆止呕、助阳止泻的功效,用于厥阴头痛、寒疝腹痛、寒湿脚气等

的治疗[11]。吴茱萸是一种古老的传统中药植物，其果早于西汉时已作药用，长沙马王堆古墓出土的《五十二病方》就有吴茱萸治疗疟病的记载[10]。现代研究表明，吴茱萸含有生物碱类、萜类、黄酮类、挥发油类及酚酸等成分[12][13]，具有止呕、镇痛、镇静、抗炎、抑菌、抗氧化、保肝等活性[14]-[16]。吴茱萸是我国传统的常用中药材，近年来，吴茱萸在中药材市场、食疗养生、药妆品等领域需求逐渐增加，而野生资源较少，主要来源于种植[17]，因此，确定吴茱萸的资源分布的概况，分析影响吴茱萸分布的主要环境因素，预测气候变化下吴茱萸潜在适生区，这些对吴茱萸人工栽培适宜区域的选择和物种保护，可以提供科学的方法与理论的支持。

2. 材料与方法

2.1. 分布数据的获取与处理

从中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)和 NSII-中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn/>)中获得吴茱萸 *Euodia rutaecarpa* 标本的分布点信息，在全国范围内共收集到 395 份记录。去除重复数据和模糊信息后，针对有详细地理位置却无经纬度信息的样本点，使用百度经纬度查询确定坐标信息，最终获得吴茱萸的分布样点。此外，为减少采样偏差导致的模型过拟合，利用 ArcGIS 10.4 选择邻域分析来设置以 10 km 为半径的缓冲区，在 10 km 的范围内随机保留其中一个分布点，对其他分布点进行筛选并剔除，最终得到 318 个有效分布点(图 1)。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4306 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Sample distribution of *E. rutaecarpa*

图 1. 吴茱萸的样本分布图

2.2. 环境因子的获取与筛选

从世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>)中获取 19 个气候因子，同时，从世界土壤数据库

(<http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/en/>)和世界气候数据库中获得 11 个土壤因子和 3 个地形因子, 本文共选取了 33 个独立的环境因子进行后续研究(表 1)。

过去气候数据的末次盛冰期(LGM)和全新世中期(MH)选自 IPCC 第五次耦合模型比较项目(CMIP5) [7]; 当前及未来(2041~2060 年、2080~2100 年)气候数据基于第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6) [18]。未来环境数据选取了共享社会经济路径(SSP)中两种温室气体排放场景, 即低浓度温室气体排放场景(SSP126)和高浓度温室气体排放场景(SSP585)下的四个时期, 分别为 2041~2060 (SSP126-2050S)、2041~2060 (SSP585-2050S)、2080~2100 (SSP126-2090S)和 2080~2100 (SSP585-2090S) [19]。

Table 1. Description of environmental data
表 1. 环境数据描述

Variable	Description	Variable	Description
Bio01	Annual average temperature	Bio18	Precipitation in the warmest quarter
Bio02	Monthly mean temperature	Bio19	Coldest seasonal precipitation
Bio03	Isothermality	awc_class	Soil available water content
Bio04	Seasonal variation of temperature	s_caco3	Carbonate or lime content of subsoil
Bio05	Maximum temperature in warmest month	s_clay	Clay content in the subsoil
Bio06	Minimum temperature in coldest month	s_oc	Subsoil organic carbon content
Bio07	Annual temperature range	s_ph_h2o	Subsoil pH
Bio08	Average wettest season temperature	s_sand	Sediment content in the subsoil
Bio09	Driest quarterly mean temperature	t_caco3	Topsoil carbonate or lime content
Bio10	Average temperature of the warmest quarter	t_clay	Clay content in the upper soil
Bio11	Average temperature of coldest quarter	t_oc	Topsoil organic carbon content
Bio12	Average annual precipitation	t_ph_h2o	Topsoil pH
Bio13	Wettest monthly precipitation	t_sand	Upper soil sand content
Bio14	The driest monthly precipitation	aspect	Aspect
Bio15	Seasonal variation of precipitation	elev	Elevation
Bio16	Wettest quarterly precipitation	slope	Slope
Bio17	Driest quarterly precipitation		

将获得的 19 个气候因子、11 个土壤因子、3 个地形因子和吴茱萸分布样点数据分别导入 ArcGIS 软件, 对每个样点的环境因子进行提取, 通过 SPSS26.0 软件进行 Spearman 空间自相关性分析, 剔除了相关性系数大于等于 0.8 以及贡献率小于 0.5 的环境因子, 最终筛选出 14 个环境因子参与模型预测分析, 包括 5 个气候因子(Bio02、Bio04、Bio11、Bio15、Bio18), 6 个土壤因子(awc_class、s_oc、t_caco3、t_clay、t_oc、t_sand)和 3 个地形因子(aspect、elev、slope)。

2.3. MaxEnt 模型的构建及评价标准

采用 MaxEnt (V3.4.3)软件将筛选出的 14 个环境因子对 318 个样点数据进行模型构建。使用以下建模参数:bootstrap 方法进行抽样, 输出格式为 Logistic, 随机选择 25%的吴茱萸分布点作为测试集, 75%的分布点用于训练集, 对于每个训练分区, 经过 10^6 次迭代, 模型重复 10 次[20]。以受试者工作特征曲

线(ROC)下的 AUC 面积判断模型预测结果的精准度, AUC 值在 0.9~1.0 表明模型的预测能力极好[21]。

同时, 采用 Jackknife 方法确定环境因子对吴茱萸的分布的贡献程度。此外, 采用最大训练敏感性加特异性(Maximum training sensitivity plus specificity Logistic threshold, MTSPS)对吴茱萸的潜在适生区进行划分[22]。其中, 吴茱萸的 MTSPS 阈值为 0.1880, 故将其适生区划分为以下 4 个等级: 不适生区(0~0.1880)、低适生区(0.1880~0.3)、中适生区(0.3~0.5)和高适生区(0.5~1), 后统计不同适生区的面积。

3. 结果与分析

3.1. MaxEnt 模型预测精度分析

通过 MaxEnt 软件对吴茱萸分布区进行模拟预测, 经过 10 次运算, 拟合出计算结果的平均 ROC 曲线。AUC 数值的范围在 0.5~1 之间, 越趋近于 1, 说明模型的预测结果越准确, 当 AUC > 0.9 时, 模型预测极好[23]。由图 2 可知, 本研究中 ROC 曲线的平均训练值为 0.945, 表明该模型的构建具有极高的准确性, 可用于研究吴茱萸的潜在适生区。

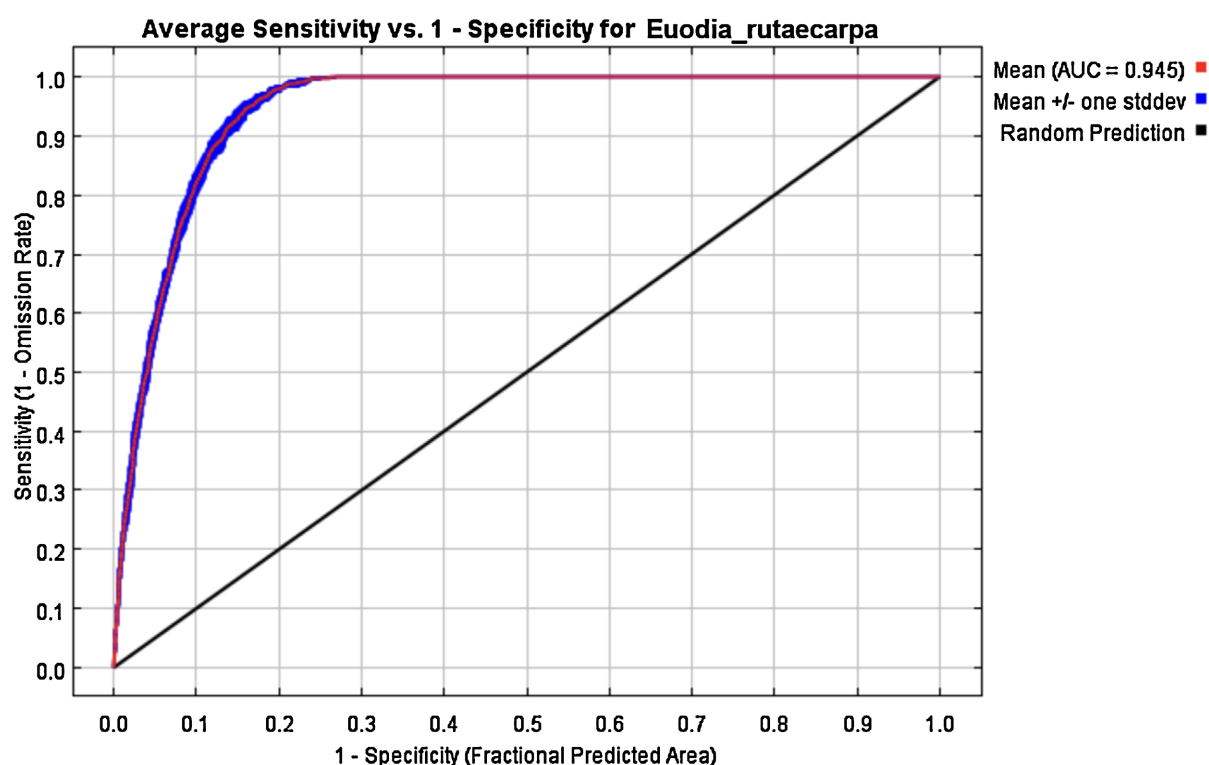


Figure 2. ROC curve of the MaxEnt model for *E. rutaecarpa*

图 2. 吴茱萸 MaxEnt 模型的 ROC 曲线

3.2. 主导环境因子分析

为表征各环境因子对预测模型构建结果的影响, 我们利用 MaxEnt 模型分别对筛选出的 14 个环境因子的贡献率进行分析。由表 2 可知, 最冷季度平均温度(Bio11)和最暖季度降水量(Bio18)贡献率最高, 分别为 40.3%和 38.3%, 其次是气温季节性变动(Bio04)、坡向(aspect)、月平均气温(Bio02)、表层土壤有机碳含量(t_oc), 它们的贡献率分别为 5.1%、5%、2.6%、2.4%, 其余环境因子的贡献率均未达到 2%, 以上结果表明最冷季度平均温度和最暖季度降水量是决定吴茱萸分布的最关键的环境因子。

Table 2. Importance of dominant environmental factors in the MaxEnt model
表 2. MaxEnt 模型主导环境因子的重要性

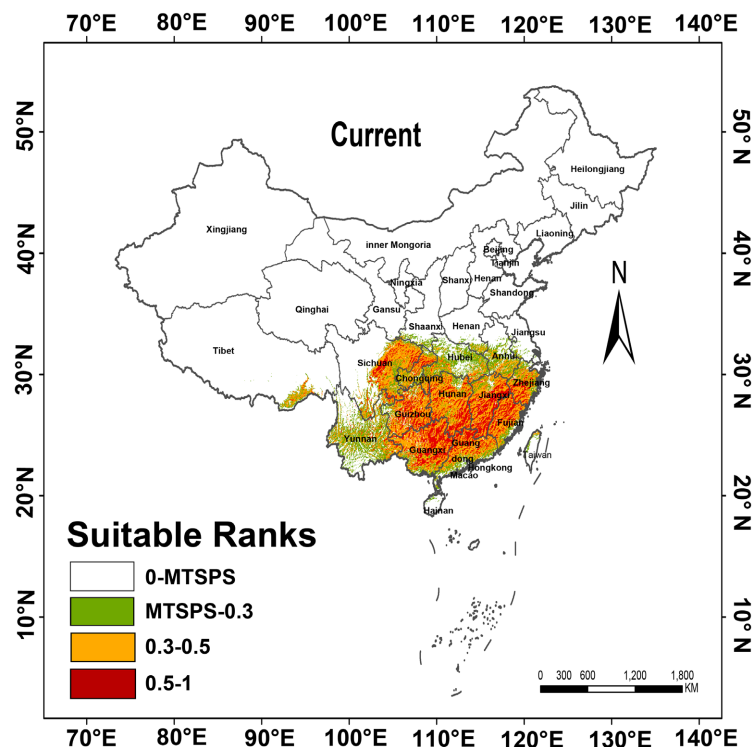
Variable	Percent contribution	Permutation importance
Bio11	40.3	58.3
Bio18	38.3	12.5
Bio04	5.1	9.3
aspect	5	3.5
Bio02	2.6	2.3
t_oc	2.4	0.9
elev	1.9	6.2
slope	1.3	0.8
Bio15	0.9	0.7
s_oc	0.6	0.8
t_caco3	0.6	1.7
t_sand	0.4	0.8
awc_class	0.3	1.3
t_sand	0.2	0.9

3.3. 当前气候下吴茱萸潜在适生区分析

根据《中国植物志》记载,吴茱萸国内主要分布区在长江以南五岭以北的东部和中部各省,在江苏、福建、台湾、广东、河南、云南等地区也有少量分布,但海南未见有自然分布,曾引进栽培,均生长不良。生于平地至海拔 1500 米山地疏林或灌木丛中,多见于向阳坡地,这与中国数字植物标本馆所收集的分布记录大致相同。模拟吴茱萸当前气候情境下的分布模式如图 3 所示,灰色区域代表吴茱萸的不适生区,绿色代表低适生区,橙色代表中适生区,红色代表高适生区,主要分布范围为北纬 22°~35°,东经 100°~125°,总适生区面积为 $131.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包含中和高适生区),占我国陆地表面积的 13.72%,高适生区占总适生区面积的 24.63% (表 3)。吴茱萸总适生区分布比较集中,主要位于我国华中、华南地区,这与《中国植物志》记录的吴茱萸自然分布区基本一致。其中,高适生区主要分布在江西、广西、贵州、湖南四省,并呈现大面积连续分布的特征。中适生区沿着高适生区呈环绕或交错分布,主要在山东、重庆、湖南、四川、广东、浙江、福建等省份。低适生区沿着总适生区呈环绕分布,多位于我国的沿海地区,湖北和云南部分地区及西藏南部。

Table 3. Potential suitable habitat area of *E. rutaecarpa* in different periods ($\times 10^4 \text{ km}^2$)
表 3. 不同时期吴茱萸潜在适生区面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Period	LGM	MH	Current	SSP126		SSP585	
				2050S	2090S	2050S	2090S
Low suitable zone	7.45	14.65	43.72	33.14	65.24	30.62	55.36
Medium suitable zone	159.69	206.32	88.53	83.55	76.58	67.74	66.42
High suitable zone	1.45	1.09	43.16	83.47	85.51	116.02	144.43
Total suitable zone	161.15	207.42	131.69	167.03	162.09	183.77	210.85



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4306 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. Distribution of suitable habitat for *E. rutaecarpa* under current scenario

图 3. 当前情境下吴茱萸适宜生境的分布

3.4. 过去及未来吴茱萸潜在适生区模拟

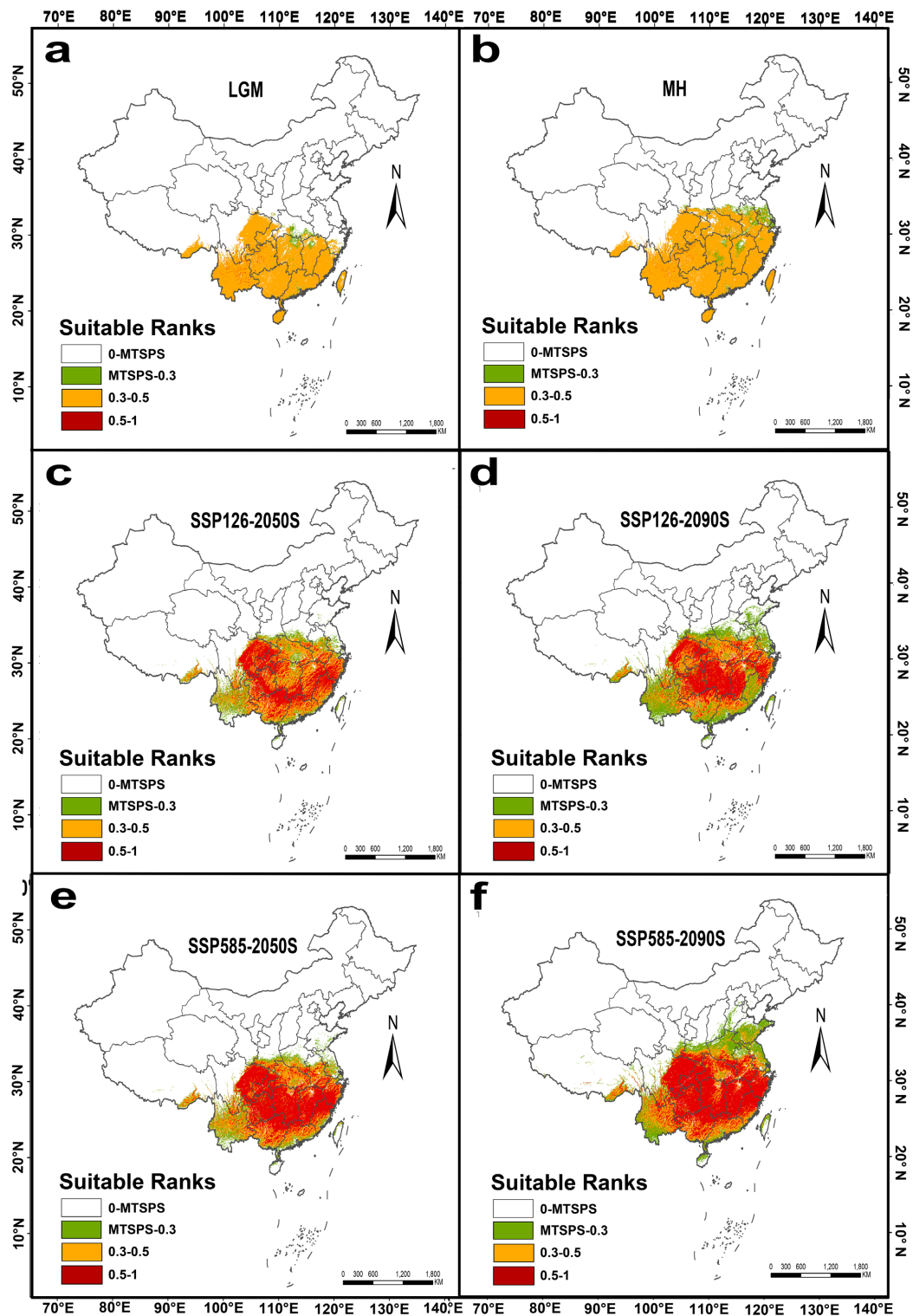
由图 4 和表 3 可以看出，LGM 和 MH 时期吴茱萸的总适生区面积较大，但高适生区非常小，分别只占相应时期总适生区的 0.9%和 0.5%，从 LGM 到 MH 时期吴茱萸的中适生区明显扩张(从 $159.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ 到 $206.32 \times 10^4 \text{ km}^2$)，而在后期的气候变化过程中，从 MH 时期到当前，吴茱萸的部分中适生区逐渐演变成低适生区和高适生区，导致高适生区极大的扩张(从 $1.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ 到 $43.16 \times 10^4 \text{ km}^2$)，但是总适生区缩小(从 $207.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ 到 $131.69 \times 10^4 \text{ km}^2$)。

在未来时期两种温室气体排放场景(SSP126 和 SSP585)下，中国当前的吴茱萸总适生区和高适生区都明显增加(图 4(c)~(f))。当前吴茱萸在中国的总适生面积为 $131.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，在 SSP126 和 SSP585 情境 2050S 和 2090S 四种模式下，总适生区的增幅为 23.08%~60.11% (表 4)。在 SSP126 情境下，2050S 高适生区面积为 $83.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，较当前气候情境增加 93.39%；2090S 高适生区面积为 $85.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，较当前气候情境增加 98.12%；在 SSP585 情境下，2050S 和 2090S 高适生区面积较当前气候情境分别增加 168.81%和 234.64% (表 4)，在未来情境下，随着气温的升高，部分中适生区转变为高适生区，高适生区

Table 4. Percentage change in the total suitable zone of *E. rutaecarpa* under future climate scenarios compared to current

表 4. 未来气候情境下吴茱萸总适生区与当前气候相比变化百分比

Climate scenario	SSP126		SSP585	
	Area ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	Percent (%)	Area ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	Percent (%)
2050S	167.03	26.84	183.77	39.55
2090S	162.09	23.08	210.85	60.11



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(2022)4306 号的标准地图制作，底图无修改。(a) 末次盛冰期(LGM); (b) 全新世中期(MH); (c) 2041~2060 (2050S)平均值, SSP126; (d) 2080~2100 (2090S)平均值, SSP126; (e) 2041~2060 (2050S)平均值, SSP585; (f) 2080~2100 (2090S), SSP585。

Figure 4. Predicted potential suitable habitat area for *E. rutaecarpa* in different periods

图 4. 不同时期吴茱萸潜在适生区面积预测

极大的扩张,原来碎片化的高适生区会连成一块,集中在华中、华南地区。总的来说,未来气候环境下有利于吴茱萸的分布。

4. 讨论

4.1. MaxEnt 模型模拟结果的可靠性

MaxEnt 模型具有用较少样本量便能对物种的分布进行预测的特点,广泛应用于生态学中的适宜性评价领域[24]。通常来说,物种分布点的数据越多,模型预测就越准确[25],本研究尽可能多的收集吴茱萸的采样标本信息,防止因样本问题带来的预测偏差。同时,为降低采样点的地理偏差,在线性距离中选择 10 km。此外,为防止模型的过度拟合,将绝对值大于 0.8 的相关性系数剔除,使得模拟结果更为准确。本次研究最终结果经过 ROC 曲线精度检验,MaxEnt 模型 AUC 高达 0.945,表明该模型预测的吴茱萸生态适宜性分布区可信度较高。

4.2. 影响吴茱萸分布的主导环境因子

本研究根据 MaxEnt 模型的训练增益值、贡献率揭示影响吴茱萸分布的主要环境因子为最冷季度平均温度(Bio11)、最暖季度降水量(Bio18)、气温季节性变动(Bio04)、坡向(aspect)、月平均气温(Bio02)、表层土壤有机碳含量(t_oc)。在植物生长的过程中,温度和水份可能是非常重要的影响因素,它们参与信号传导、自身防御及生理调节等代谢途径[26]。吴茱萸的适生区分布受温度的影响尤为明显,其次是降水量。吴茱萸主要分布在长江以南,喜阳光充足、温暖、湿润的气候条件,阳坡(东或东南坡向)利于吴茱萸生长,因此坡向(aspect)也可能通过水分和温度影响吴茱萸的分布。根据吴茱萸的种植经验来看,它的生长对土壤要求不高,以疏松肥沃、排水良好的酸性土壤为佳,土壤的肥力表层土壤有机碳含量(t_oc)在一定程度上影响到吴茱萸的分布。

4.3. 气候变化对吴茱萸适生区的影响及资源保护

研究气候变化情境下物种生存的分布情况,可衡量气候变化对于物种的影响,从而制定保护措施,进一步开发利用该物种资源[27]。本研究结果表明,在未来的 4 个时期,吴茱萸的潜在总适生区和高适生区较当前在不同气候情境下均有明显的增加,表明全球气候变暖会对吴茱萸分布产生有利影响,在高适生区引种栽培吴茱萸,扩大吴茱萸的种植面积,满足吴茱萸的中药材供应,进一步开发吴茱萸的药用和食用价值,有利于吴茱萸资源的可持续发展。

5. 结论

本研究基于 MaxEnt 模型预测吴茱萸在过去 LGM 和 MH 时期,当前以及两种温室气体排放模式下未来 4 个时期的潜在适生区以进行了模拟,不同情境下吴茱萸在我国的潜在适生区,得出以下结论:

(1) 最冷季度的平均温度(Bio11)、最暖季度的降水量(Bio18)、温度季节性变化(Bio4)、坡向(aspect)、月平均气温(Bio02)、表层土壤有机碳含量(t_oc)是影响吴茱萸分布的主导环境因子,其中最冷季度的平均温度(Bio11)、最暖季度的降水量(Bio18)起到了决定性作用。

(2) 目前,吴茱萸的总适生区主要位于我国华中、华东以及华南地区,总适生区面积为 131.69×10^4 km²,其中高适生区主要分布于江西、广西、贵州、湖南四省。

(3) 从过去到现在,吴茱萸高适生区在急剧扩大,在未来气候变暖的情境下,总适生区和高适生区都会明显扩张。

因此,从长远发展来看,应建立实地资源调查、因地制宜保护吴茱萸的种质资源,未来环境有利于

吴茱萸生长, 其植物资源丰富, 可充分开发吴茱萸的药用, 在保健品、食品添加剂及日化用品等方面深度挖掘, 开发拓展市场, 充分利用吴茱萸的资源, 保障吴茱萸产业可持续发展。

基金项目

湖北省自然科学基金青年项目(2022CFB877); 湖北科技学院博士启动项目(BK202213)。

参考文献

- [1] Gong, B., Weng, B., Yan, D., Qin, T., Wang, H. and Bi, W. (2018) Variation of Hydrothermal Conditions under Climate Change in Naqu Prefecture, Tibet Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, Article 2271. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102271>
- [2] Graham, E.M., Reside, A.E., Atkinson, I., Baird, D., Hodgson, L., James, C.S., *et al.* (2019) Climate Change and Biodiversity in Australia: A Systematic Modelling Approach to Nationwide Species Distributions. *Australasian Journal of Environmental Management*, **26**, 112-123. <https://doi.org/10.1080/14486563.2019.1599742>
- [3] Applequist, W.L., Brinckmann, J.A., Cunningham, A.B., Hart, R.E., Heinrich, M., Katerere, D.R., *et al.* (2019) Scientists' Warning on Climate Change and Medicinal Plants. *Planta Medica*, **86**, 10-18. <https://doi.org/10.1055/a-1041-3406>
- [4] Zhan, P., Wang, F., Xia, P., Zhao, G., Wei, M., Wei, F., *et al.* (2022) Assessment of Suitable Cultivation Region for *Panax Notoginseng* under Different Climatic Conditions Using Maxent Model and High-Performance Liquid Chromatography in China. *Industrial Crops and Products*, **176**, Article 114416. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114416>
- [5] Thuiller, W., Lavorel, S. and Araújo, M.B. (2005) Niche Properties and Geographical Extent as Predictors of Species Sensitivity to Climate Change. *Global Ecology and Biogeography*, **14**, 347-357. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00162.x>
- [6] Colli-Silva, M., Pirani, J.R. and Zizka, A. (2022) Ecological Niche Models and Point Distribution Data Reveal a Differential Coverage of the Cacao Relatives (Malvaceae) in South American Protected Areas. *Ecological Informatics*, **69**, Article 101668. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101668>
- [7] Yang, Y., He, J., Liu, Y., Zeng, J., Zeng, L., He, R., *et al.* (2023) Assessment of Chinese Suitable Habitats of *Zanthoxylum nitidum* in Different Climatic Conditions by Maxent Model, HPLC, and Chemometric Methods. *Industrial Crops and Products*, **196**, Article 116515. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116515>
- [8] Ahmadi, M., Hemami, M., Kaboli, M. and Shabani, F. (2023) MaxEnt Brings Comparable Results When the Input Data Are Being Completed; Model Parameterization of Four Species Distribution Models. *Ecology and Evolution*, **13**, e9827. <https://doi.org/10.1002/ece3.9827>
- [9] 苏玉良, 赵伊玲, 殷宝, 等. 基于 MaxEnt 模型的云杉潜在分布模拟[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6211-6219.
- [10] 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, 1997: 65.
- [11] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 178-179.
- [12] 吴梅青, 罗栩强, 唐海飞, 等. 不同炮制方法对吴茱萸指标成分含量的影响与评价[J]. 中国现代中药, 2020, 22(7): 1108-1112.
- [13] 刘丽, 张笑敏, 许浚, 等. 吴茱萸化学成分和药理作用及质量标志物(Q-marker)的预测分析[J]. 中草药, 2020, 51(10): 2689-2702.
- [14] 赵楠, 景云荣, 何婷婷, 等. 吴茱萸中总黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(3): 118-121.
- [15] 刘万丽, 邵进明, 易梦, 等. 吴茱萸碱与吴茱萸次碱对 T2DMSD 大鼠肝损伤的影响[J]. 生物医学, 2025, 15(1): 152-158.
- [16] 唐锦程, 李玉丽, 王莎莎, 等. 吴茱萸本草考证及药理作用研究进展[J]. 中草药, 2024, 55(16): 5723-5734.
- [17] 刘珊珊, 尹元元, 闫利华, 等. 吴茱萸药用植物资源调查[J]. 中国中医药信息杂志, 2016, 23(9): 5-9.
- [18] Xin, X.G., Wu, T.W., Zhang, J., *et al.* (2019) Introduction to the BCC model and its CMIP6 experiment. *Progress in Climate Change Research*, **15**, 533-539.
- [19] Zhang, K., Zhang, Y., Zhou, C., Meng, J., Sun, J., Zhou, T., *et al.* (2019) Impact of Climate Factors on Future Distributions of *Paonia ostii* across China Estimated by Maxent. *Ecological Informatics*, **50**, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.01.004>
- [20] Hosni, E.M., Al-Khalaf, A.A., Naguib, R.M., Afify, A.E., Abdalgawad, A.A., Faltas, E.M., *et al.* (2022) Evaluation of Climate Change Impacts on the Global Distribution of the Calliphorid Fly *Chrysomya albiceps* Using GIS. *Diversity*, **14**, Article 578. <https://doi.org/10.3390/d14070578>

-
- [21] Chen, T., Acma, F.M., Amoroso, V.B., Medecilo Guiang, M.M. and Huang, B. (2022) Distribution of Climatic Suitability of *Pellionia scabra* Benth. (Urticaceae) in China. *Applied Ecology and Environmental Research*, **20**, 4489-4498. https://doi.org/10.15666/aeer/2005_44894498
- [22] Liu, H., Cheng, H., Xu, J., Hu, J., Zhao, C., Xing, L., *et al.* (2023) Genetic Diversity and Population Structure of *Polygonatum cyrtoneura* Hua in China Using SSR Markers. *PLOS ONE*, **18**, e0290605. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290605>
- [23] Ren, Q., Wu, D., Wu, C., Wang, Z., Jiao, J., Jiang, B., *et al.* (2020) Modeling the Potential Distribution of *Machilus thunbergii* under the Climate Change Patterns in China. *Open Journal of Forestry*, **10**, 217-231. <https://doi.org/10.4236/ojf.2020.102015>
- [24] Tarroso, P., Carvalho, S.B. and Brito, J.C. (2012) Simapse—Simulation Maps for Ecological Niche Modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**, 787-791. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00210.x>
- [25] Wang, P., Luo, W., Zhang, Q., Han, S., Jin, Z., Liu, J., *et al.* (2024) Assessing the Impact of Climate Change on Three *Populus* Species in China: Distribution Patterns and Implications. *Global Ecology and Conservation*, **50**, e02853. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02853>
- [26] Pant, P., Pandey, S. and Dall'Acqua, S. (2021) The Influence of Environmental Conditions on Secondary Metabolites in Medicinal Plants: A Literature Review. *Chemistry & Biodiversity*, **18**, e2100345. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202100345>
- [27] Deb, J.C., Phinn, S., Butt, N. and McAlpine, C.A. (2017) The Impact of Climate Change on the Distribution of Two Threatened Dipterocarp Trees. *Ecology and Evolution*, **7**, 2238-2248. <https://doi.org/10.1002/ece3.2846>