

基于最大熵模型的中药材半夏潜在适生区预测

李雅婕^{1*}, 赵可^{1*}, 宋林河², 郭甜雨¹, 苗文佳¹, 胡明丽^{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5月26日; 录用日期: 2025年7月4日; 发布日期: 2025年8月25日

摘要

目的: 半夏(*Pinellia ternata* (Thunb.) Breit)具有重要药用和经济价值, 目前半夏野生资源不断减少所以确定最适种植地和最佳保护区对于促进半夏资源的保育和利用发展至关重要。运用Maxent模型并结合ArcGIS软件, 从而确定影响半夏生长发育的环境因子, 预测半夏的适生区变化情况。结果显示, Maxent模型重复运行10次的ROC曲线的ACU平均训练值为0.909, 结果具有较高的准确性。此外, 确定了最干燥月份降雨量(bio_14)、最暖季节降水量(bio_18)和最寒冷月最低温(bio_6)为半夏隐性分布的主要环境因子。该成果的取得, 为我国半夏资源的培养、保育及科学利用提供重要的科学和理论依据。我国半夏资源尚存在广阔的发展空间, 在保障适宜温度、降水量和光照条件的前提下, 可以在我国北部地区积极开展引种试种研究, 从而更好地满足市场需要, 并推动深化半夏资源的可持续利用与发展。

关键词

半夏, Maxent模型, 适生区, 资源保护

Prediction of the Potential Suitable Habitat of *Pinellia Ternata* Based on the Maximum Entropy Model

Yajie Li^{1*}, Ke Zhao^{1*}, Linhe Song², Tianyu Guo¹, Wenjia Miao¹, Mingli Hu^{1#}

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

²School of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: May 26th, 2025; accepted: Jul. 4th, 2025; published: Aug. 25th, 2025

*共一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李雅婕, 赵可, 宋林河, 郭甜雨, 苗文佳, 胡明丽. 基于最大熵模型的中药材半夏潜在适生区预测[J]. 可持续发展, 2025, 15(8): 303-313. DOI: 10.12677/sd.2025.158246

Abstract

Objective: *Pinellia ternata* (Thunb.) Breit has important medicinal and economic value. Currently, the wild resources of *Pinellia ternata* are decreasing. Therefore, determining the most suitable planting site and the best protection area is crucial to promote the conservation and utilization of *Pinellia ternata* resources. The Maxent model was used in combination with ArcGIS software to determine the environmental factors affecting the growth and development of *Pinellia ternata* and predict the changes in the suitable habitat of *Pinellia ternata*. The results showed that the average ACU training value of the ROC curve of the Maxent model repeated 10 times was 0.909, and the results had high accuracy. In addition, the rainfall in the driest month (bio_14), the precipitation in the warmest season (bio_18) and the minimum temperature in the coldest month (bio_6) were determined as the main environmental factors for the recessive distribution of *Pinellia ternata*. The achievement of this result provides an important scientific and theoretical basis for the cultivation, conservation and scientific utilization of my country's *Pinellia* resources. There is still a broad space for the development of my country's *Pinellia* resources. Under the premise of ensuring suitable temperature, precipitation and light conditions, we can actively carry out introduction and trial planting research in northern my country to better meet market needs and promote the sustainable utilization and development of *Pinellia* resources.

Keywords

Pinellia, Maxent Model, Suitable Habitat, Resource Protection

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

中药半夏为天南星科植物(*Pinellia ternata* (Thunb.) Breit)干燥块茎, 拥有重要药用和经济价值。半夏在我国中药出口中位居 5~10 名, 排名稳定[1][2], 出口数量多达 1400 吨, 市场潜力大, 近年来还逐渐拓展到欧美国家。半夏有祛痰平喘、降逆止呕[3]、抗溃疡的疗效, 其中生半夏, 姜半夏, 法半夏有镇咳作用, 同时还具有一定燥湿化痰, 抗肿瘤和安神定智的作用[4]。同时半夏野生资源处于灭绝边缘, 全国除内蒙古、新疆、青海、西藏尚未发现野生的外, 各地广泛分布, 常见于海拔 2500 米以下, 草坡、荒地、玉米地、田边或疏林下[5]。

目前, 对于市场对半夏需求激增、半夏野生品种濒临灭绝和培育技术过于落后三者之间矛盾的增强[6]。近几年野生半夏地区被破坏[7], 野生资源匮乏, 大量地区已经开始半夏的规模化种植培育。同时半夏的伪品来源较多, 假冒伪劣现象严重, 半夏的质量和临床用药安全也受到了严重影响[8]。此外, 半夏培养点和品种选择缺乏科学理论指导以致资源浪费。因此, 最适栖息地的确定和优先保育区的选择对于促进半夏资源保护与持续发展至关重要。

最大熵(MaxEnt)模型可以适应各种类型的数据分布, 不依赖于特定的数据分布, 这区别于其他的传统模型[9], 同时, 最大熵(MaxEnt)模型拥有使用灵活和性能良好的特性[10]。尤其适用于中药材的评估。本实验应用最大熵(MaxEnt)模型来运算半夏全国适生区分布概率。ArcGIS 软件提供大量的空间分析工具, 具有专业制图和可视化表达的优势。本实验制图均用 ArcGIS 软件绘制。ArcGIS 软件提供准确的环境因

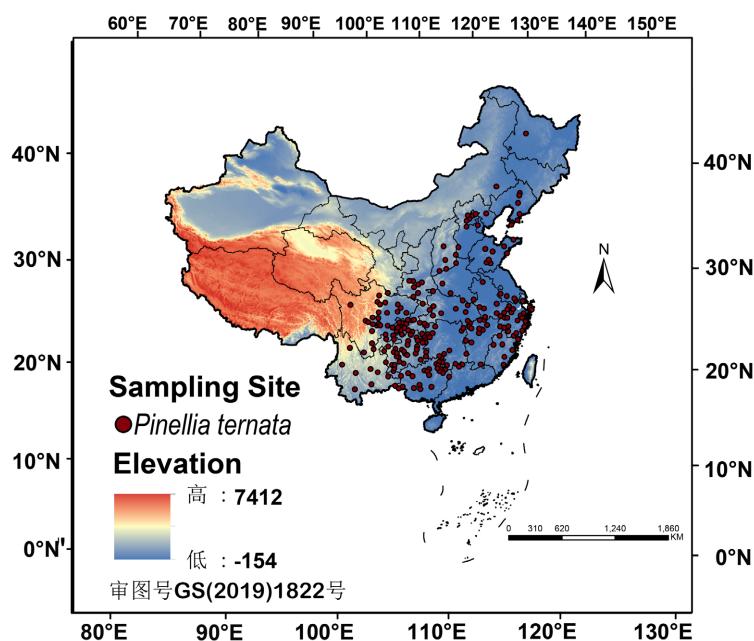
子的信息,最大熵(MaxEnt)模型可以利用环境因子来确定物种最佳培育环境因素,二者结合,能够更深入地了解环境因子与物种分布之间的关系,从而更好地评估生态环境对物种生长造成的影响,利于分析出主要的生态保护区块。

为了确保半夏适宜栖息地,本研究运用最大熵(MaxEnt)和 ArcGIS 软件来预测不同情境下半夏在中国潜在适生区分布范围,探索气候,土壤,地形等因素对半夏分布的影响,为未来在中国的持续利用提供理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 半夏分布数据收集与处理

本次实验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/>)中获得半夏标本的分布点信息,在全国范围内共收集到 289 份记录。去除重复数据和含混信息后,用百度经纬度查询并确定地理坐标信息最终获得半夏的分布样点。此外,利用 ArcGIS10.4 选择邻域分析来设置以 10 km 为半径的缓冲区,在 20 km 的范围内随机保存一个分布点,对其他分布点进行筛选处理并删除数据,最后得到 237 个有效分布点(图 1)。保存为 CSV 格式,包括平种名、经度和纬度,作为后续分析的依据。



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(2019)1822 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Effective distribution points of *Pinellia ternata* across the country

图 1. 半夏全国有效分布点

2.2. 环境因子的选择与处理

本研究采用的自然环境数据涵盖气候、土壤及地形三大类,气候数值信息均来自于全球气候数据库 WordClim (<https://www.worldclim.org/>),共提取 19 个气候变量[11]。本次实验以 1970~2000 年期间的气候数据作为研究基准,进一步选取 2041~2060 年、2081~2100 年两个未来时段,基于第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)发布的共享社会经济路径(SSPs)模型[12],获取不同情境下的 19 个气候因子数据。其中,

SSP126 (低强迫情境)和 SSP585 (高强迫情境)分别代表未来温室气体排放的乐观与悲观极端情形[13][14]。此外, 本研究从世界土壤数据库 (<http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/en/>) 和 WorldClim 网站 (<https://www.worldclim.org/>)采集 11 个土壤因子及 3 个地形因子数据。最终, 经筛选整合, 本研究确定 33 个独立环境因子(详见表 1), 作为后续分析的核心数据基础。

Table 1. 19 climate variables
表 1. 19 个气候变量

Variable	Description	Variable	Description
bio_1	Annual mean temperature	bio_18	Precipitation of warmest quarter
bio_2	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp-min temp))	bio_19	Precipitation of coldest quarter
bio_3	Isothermality ((Bio02/Bio07) * 100)	awc_class	Soil available water content
bio_4	Temperature seasonality (standard deviation * 100)	s_caco3	Topsoil calcium Carbonate
bio_5	Max temperature of warmest month	s_clay	Substrate-soil clay content
bio_6	Min temperature of coldest month	s_oc	Substrate-soil organic carbon
bio_7	Temperature annual range(Bi05-Bi06)	s_ph_h2o	Substrate-soil pH
bio_8	Mean temperature of driest quarter	s_sand	Sediment content in the subsoil
bio_9	Mean temperature of warmest quarter	t_caco3	Topsoil carbonate or lime content
bio_10	Mean temperature of coldest quarter	t_clay	Clay content in the upper soil
bio_11	Annual precipitation	t_oc	Topsoil organic carbon
bio_12	Precipitation of wettest month	t_ph_h2o	Topsoil pH
bio_13	Precipitation of driest month	t_sand	Sand content
bio_14	Precipitation seasonality (coefficient of variation)	aspect	Aspect
bio_15	Precipitation of wettest quarter	elev	Elevation
bio_16	Precipitation of driest quarter	slope	Slope
bio_17	Driest quarterly precipitation		

为降低环境因子之间的高度相关性和多重共线关系造成模型的模型过适, 确保预测结果的精准性, 本研究使用 SPSS26.0 软件对以上环境因子进行 Spearman 相关性分析[15][16], 最终保留 17 个环境因子作为半夏的预测模型的基础, 包括 8 个气候因子(bio_2、bio_3、bio_4、bio_5、bio_6、bio_8、bio_14、bio_18), 6 个土壤因子(s_ph_h2o、s_oc、t_clay、s_sand、t_oc、awc_class)和 3 个地形因子(aspect、elev、slope)。

2.3. MaxEnt 模型与适宜生境划分

本研究使用 Maxent3.4.1 模型预测半夏在中国范围内的分布。将筛选处理后的自然环境因子和半夏在全国范围内的分布数值信息输入 Maxent 软件中, 在分布数据中随机抽取 75%的数值信息作为训练集, 剩下 25%的数值信息作为测试集做模型预测[17]-[19], 设置迭代数为 10,000, 模型重复 10 次, 利用刀切法对自然环境变量数据进行重检测。计算受试者工作特征曲线(ROC)下面积(AUC)量化 Maxent 模型预测精确性, AUC 的取值范围为[0~10], AUC 值越接近 1, 代表模型预测结果越精确, 可信度越好[20]。一般而

言, 当 $AUC \leq 0.6$ 时认为模型预测结果失败; $0.6 < AUC \leq 0.7$ 时, 模型预测结果较差; $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时, 模型的预测结果一般; $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时, 模型预测结果良好; $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时, 模型预测结果优秀[21][22]。

2.4. 半夏适生等级划分

Maxent 模型得到半夏研究分布概率(P)后, 利用 ArcGIS10.4.1 软件中重分类(Reclassify)工具, 根据分布概率 P 值将半夏培育适生区分为四个等级(表 2)。

Table 2. Division of suitable habitats

表 2. 适生区划分

分布概率(P)	评价等级	分布概率(P)	评价等级
Probability distribution	Evaluation	Probability distribution	Evaluation
$P < 0.1$	非适生区	$0.1 \leq P < 0.3$	低适生区
$0.3 \leq P < 0.6$	中适生区	$0.6 \leq P \leq 1$	高适生区

3. 结果与分析

3.1. 模型预测结果

经 10 次重复运行测试后, 模型 ROC 曲线的 ACU 平均训练值达 0.909 (图 2)。这一结果充分证明该模型具有卓越的预测精度, 能够可靠地用于分析半夏的潜在适生区块。

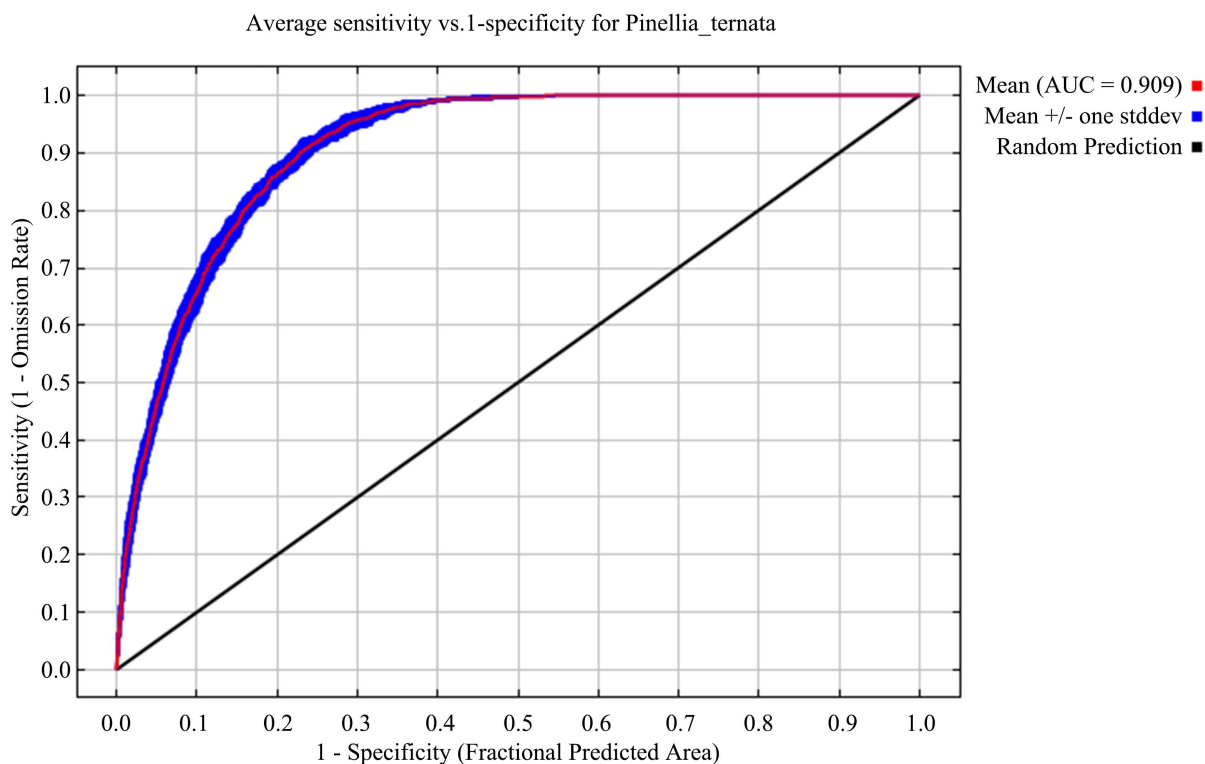


Figure 2. ROC curve

图 2. ROC 曲线

3.2. 影响半夏生长的环境因子与影响程度

由图 3 可知, 最干燥月降雨量(bio_14)贡献率最高, 达到 33.8%, 其次是最暖季节降水量(bio_18), 贡献率为 21.5%, 最冷月最低温(bio_6)、温度季节性变化方差(bio_4)、坡度(slope)、昼夜温差月均值(bio_2)、坡向(aspect)及昼夜温差及年温差比值(bio_3)的贡献率分别为 17.5%、6.1%、4.6%、4.2%、2.9%、2.1%, 其余环境变量因子的贡献率均未达到 2%, 以上结果表明最干燥月降雨量(bio_14)和最温暖季节降水量(bio_18)是影响半夏潜在适生区的重要环境因子, 且最干燥月降雨量(bio_14)是决定半夏培育的最关键环境因子。

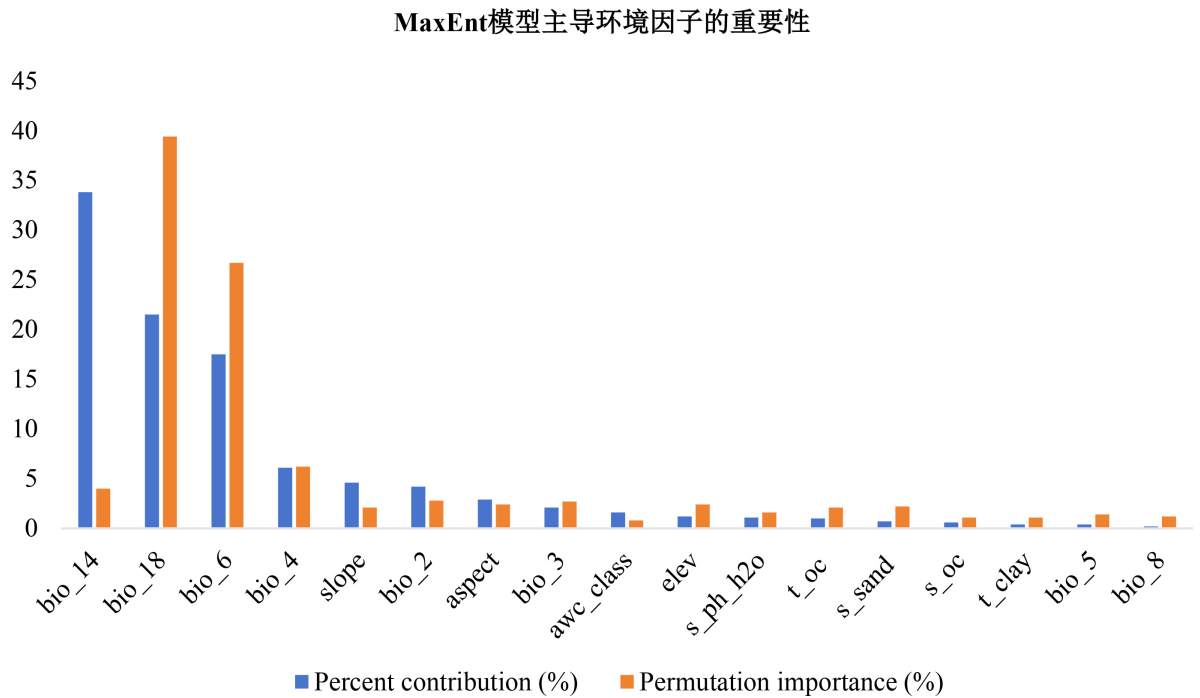
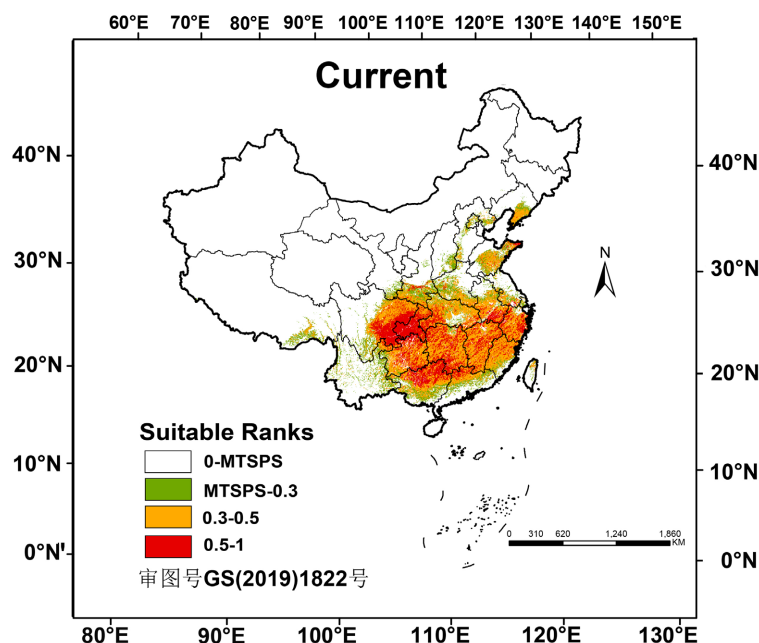


Figure 3. Importance of dominant environmental factors in the MaxEnt model

图 3. MaxEnt 模型主导环境因子的重要性

3.3. 当前气候下分布预测

根据《中国植物志》记载, 半夏除内蒙古、新疆、青海、西藏尚未发现野生外, 全国各地广布, 常见于海拔 2500 米以下, 草坡、荒地、玉米地、田边或疏林下[23]。如图 4 所示, 不同颜色区块直观呈现半夏的适生程度: 白色区块为不适宜生长区块; 绿色表示低适生区, 橙色表示中适生区, 红色则表示高适生区。数据显示, 半夏地理分布集中于 20°N~43°N 纬度带与 92°E~125°E 经度带, 该经度内覆盖中适生区与高适生区, 其总适生区面积达 $199.38 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国总面积的 18.22%, 其中高适生区仅占总适生区面积的 7.46%。从空间分布特征来看, 当前半夏总适生区呈现显著的集聚性, 主要覆盖华中、华南及东南地区东部, 在华东地区则以零散斑块状分布, 与《中国植物志》中半夏自然分布区的描述基本一致。其中, 高适生区主要分布在重庆、广西、湖南三省。中适生区围高适生区呈环绕式分布, 主要涵盖四川、广西、湖南、江西、湖北, 以及四川西部、广东北部地区。低适生区面积为 $47.178 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占我国总面积的 4.91%。不适生区大多位于我国的北方和西部地区, 其中在广西、广东、福建等地也有大面积分布。(图 5)



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(2019)1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 4. Distribution map of the current suitable growing areas of *Pinellia ternata*

图 4. 半夏当前适生区分布图

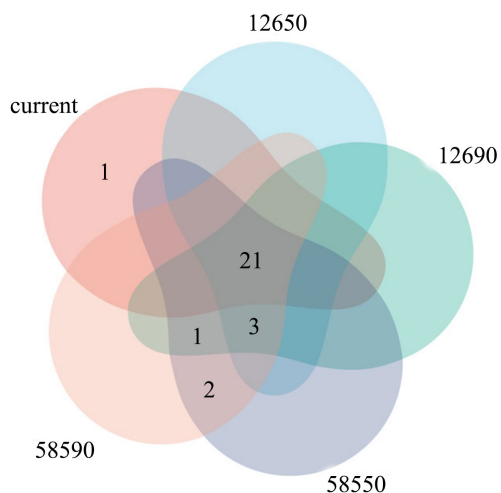


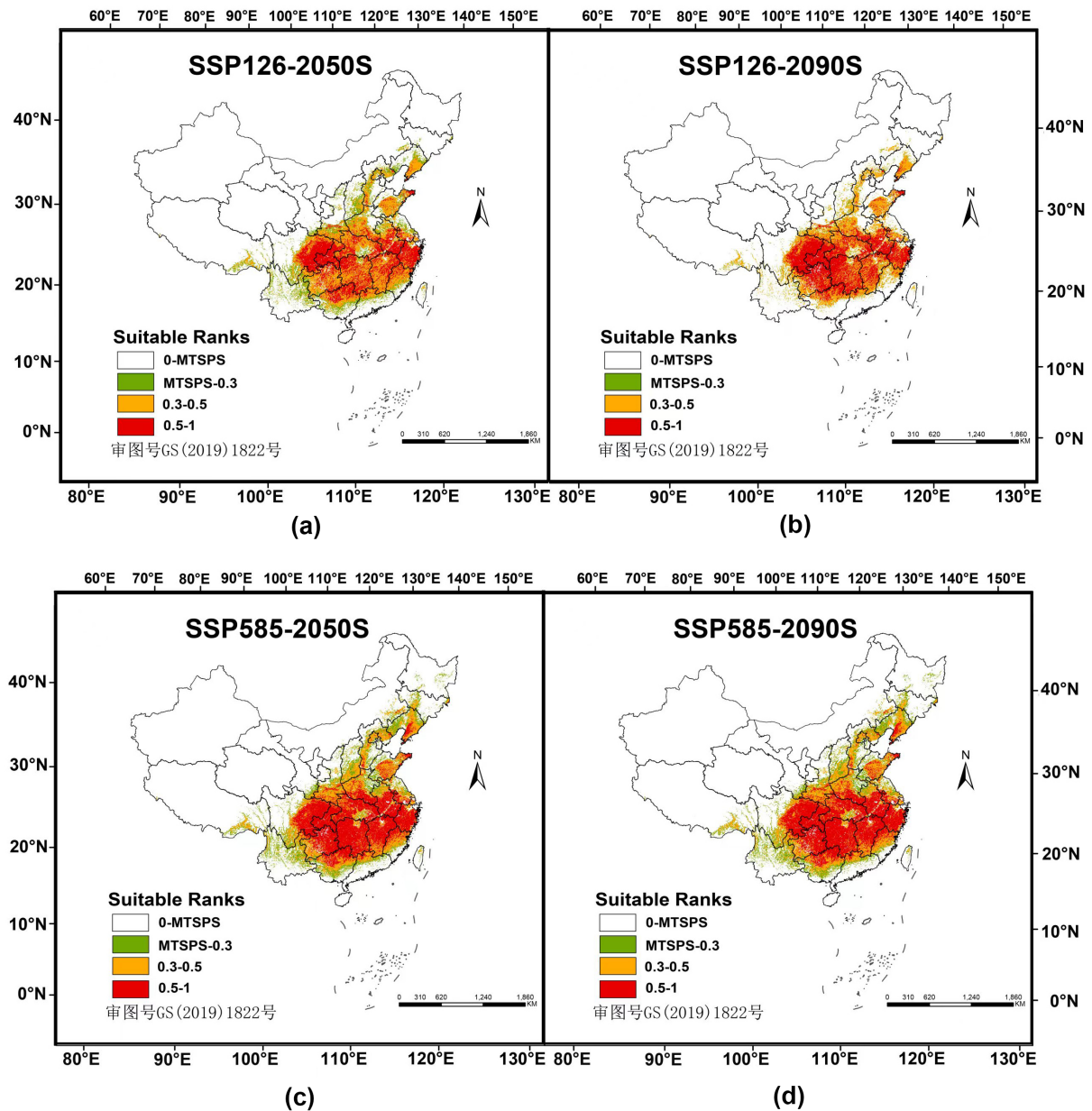
Figure 5. Venn diagram of the distribution of high-fertility areas in various provinces

图 5. 高适生区各省分布韦恩图

3.4. 未来气候下的分布预测

本研究共选取 4 个时期预测半夏在中国的隐性分布，根据 MaxEnt 模型的运算结果，得到 2050s 和 2090s 情境下(SSP126、SSP585)的半夏适宜生境分布图。

在未来的研究预测中，未来半夏的分布范围将呈现多向延展趋势(如图 6(a)~(d)所示)。这一现象表明，随着全球气候的持续变化，半夏对环境的适应能力增强。由当前的中南部核心带向华北平原推进约 300 公里，并在云贵高原西侧形成新的适生斑块；同时沿海岸线向东北延伸，至 2090 年已覆盖山东丘陵地带。逐渐适应新的环境条件，包括气候、地形等环境因子的变化，并在此基础上拓展其生存范围。



(a): 2041~2060 (2050S)平均值, SSP126; (b): 2041~2060 (2050S)平均值, SSP585; (c): 2081~2100 (2090S)平均值, SSP126; (d): 2081~2100 (2090S)平均值, SSP585。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(2019)1822号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 6. Distribution of suitable growing areas of *Pinellia ternata* under two different growth periods
图 6. 两种时期情境下半夏适生区的分布

表 3 和图 7 表示, 未来半夏适宜生境面积及其生长情况: 在 SSP126 情境中, 2050 年总适生区面积为 $225.64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候情境上升 13.17%, 其中高适生区面积、中适生区和低适生区分别上升 11.65%、1.52%、3.12%。2090 年总适生区面积为 $223.35 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候情境上升 12.02%, 具体表现为高适生区上升了 18.26%, 低适生区上升了 5.56%, 中适生区减少 6.24%。在 SSP585 情境下 2050 年与 2090 年半夏总适生区面积达到最大, 其中 2050 年总适生区面积为 $260.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候情境上升 30.73%, 高适生区上升 36.64%, 低适生区上升 8.00%, 中适生区减少 5.90%。2090 年总适生区面

积为 $260.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。较当前气候情境上升 30.73%，其中低适生区和高适生区分别上升了 8.00%和 36.64%，中适生区减少 5.90%。

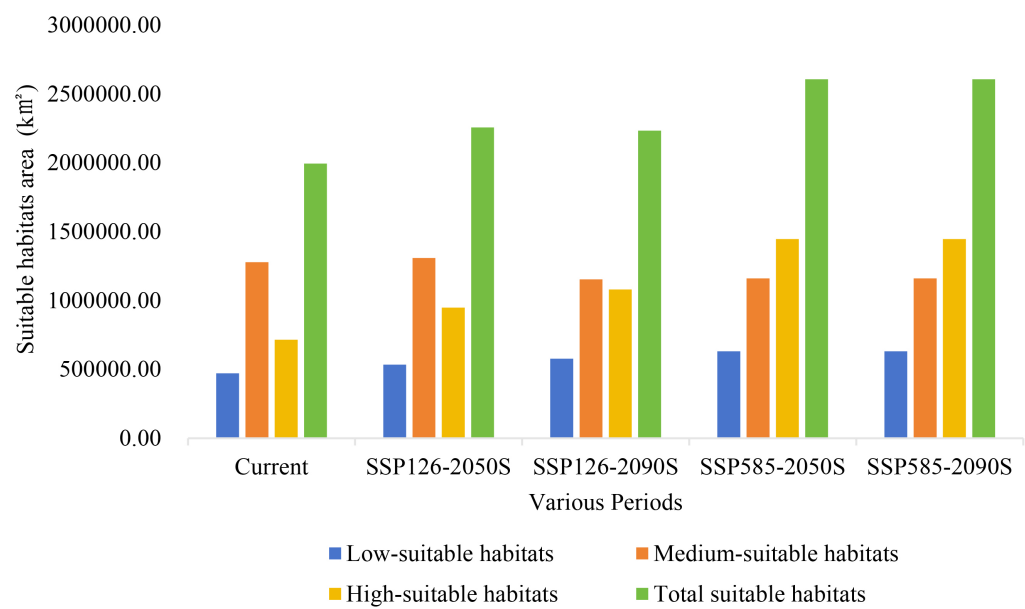


Figure 7. Changes in percentage of the area of *Pinellia ternata* suitable for different scenarios and the area under current climate conditions

图 7. 不同情境半夏适生区面积与当前气候面积百分比变化

Table 3. The ratio of the percentage of each suitable habitat area to my country’s land surface area ($960 \times 10^4 \text{ km}^2$) in different periods

表 3. 不同时期各适生区占我国陆地表面面积的面积百分比($960 \times 10^4 \text{ km}^2$)的比值

时期		不适生区		低适生区		中适生区		高适生区	
		面积 (*10 ⁴ km ²)	百分比 (%)	面积 (*10 ⁴ km ²)	百分比 (%)	面积 (*10 ⁴ km ²)	百分比 (%)	面积 (*10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
Current		713.44	74.32	47.18	4.91	127.80	13.31	71.58	7.46
2050S	SSP126	680.94	70.93	53.42	5.56	130.83	13.63	94.81	9.88
	SSP585	636.20	66.27	63.14	6.58	116.03	12.09	144.63	11.25
2090S	SSP126	678.83	70.71	57.82	6.02	115.35	12.02	108.00	15.07
	SSP585	636.20	66.27	63.14	6.58	116.03	12.09	144.63	15.07

4. 讨论

4.1. MaxEnt 模型模拟结果的可靠性

在大量物种分布模型中，MaxEnt 模型预测准确性与全面适用性的应用效果显著[24] [25]。半夏分布数据越多，模型预测就越精确[26]。本研究将半夏的采样标本信息收集全面，防止因样本问题带来的预测偏差。同时，在线性距离中选择 10 km，从而降低采样点的地理偏差。此外，为防止模型的过度拟合，将绝对值大于 0.8 的相关性系数删除，使得模拟结果更为精确[27]。仅使用地形、气候等因子来预测半夏的适宜生境，研究表明海拔高度、温度和降水是影响半夏分布最重要的环境因子，本研究在此基础上上升

了土壤这个环境因子,表现出更高的精度。由于本研究未充分涵盖植物生物学特性、自然生态过程及人类活动等多维影响要素,致使预测结果与现实分布格局存在一定程度的偏离。未来研究可通过精细化调校 MaxEnt 模型参数体系,系统性整合植物生理生态指标、环境演变动态及社会经济要素,构建多维度耦合分析框架,从而进一步提升模型预测的准确性与普适性。总之,本次研究最终结果经过 ROC 曲线精度检验,MaxEnt 模型 AUC 高达 0.905,说明本次模型效果好、精确度高,为半夏宏观保护策略提供了一定参考价值。

4.2. 影响半夏分布的主要环境因子

在植物生长中,水分和温度可能是非常重要的影响因素,参与信号传导、自身防御及生理调节等代谢途径[28] [29]。本研究显示,最干燥月降雨量(bio_14)、最温暖季节降水量(bio_18)和最寒冷月最低温(bio_6)是半夏潜在分布的主导环境因子。由此可见,半夏的适生区分布受降水量影响尤为显著。其中,影响半夏分布最主要的气候因子是最寒冷月最低温度(bio_6),这与王家禄[30]的研究结果一致。

利用 Maxent 模型预测出当前半夏总适生区分布比较集中,主要位于我国华中、华南以及东南地区的东部,在华东地区也有少许碎片化趋势分布。目前药用半夏主产区在湖北、甘肃、河南、贵州、江苏等地,总适生区为 $199.38 \times 10^4 \text{ km}^2$,由此可见,半夏资源还存在很大的发展空间,可以根据环境因子的研究情况,在保证温度,降水量,光照的情况下,在我国北部地区选址进行引种试种研究,以满足市场的需求。

5. 结论

该研究为我国半夏资源的综合培育、保育及科学规范利用提供了重要的科学依据。本研究基于 MaxEnt 模型系统评价了不同气候情境下半夏适宜生境变化。得出以下结论:影响半夏分布的关键环境因子是 bio_14、bio_18 和 bio_6。在我国,半夏的高适生区主要分布在重庆、湖南,中适生区沿着高适生区呈环绕分布。所以我国半夏资源尚存在广阔的发展空间。通过研究环境因子对半夏生长的影响,可以在保障适宜温度、降水量和光照条件的前提下,在我国北部地区积极开展引种试种研究,从而更好地提供经济需求,并促进半夏资源的可持续利用发展。根据适生区研究结果,培育半夏有利于扩大半夏种植规模,降低濒危灭绝的风险和促进物种间的共存性与多样性维持和发展。

本研究仍然存在一些不足,本次模型中没有考虑到极端天气事件,病虫害事件,人类活动和经济发展等非关键环境因子因素。MaxEnt 模型具有精确快速的优点,并且保证半夏分布数据的完备性,但是这些非关键环境因子因素带来的预测偏差仍然是我们需要关注以及考虑的因素。因此,在后续研究中,需综合考虑多种因素的影响,运用多种模型方法,从而获得更精确的结果。

参考文献

- [1] 周志伟,李嫣然,李海英.半夏药材的进出口贸易现状及产业化发展思考[J].中药材,2022,45(5):1021-1028.
- [2] 裴艺菲.基于物种-种质-器官三个维度的半夏资源学研究[D]:[博士学位论文].北京:中国中医科学院,2024.
- [3] 徐丹洋,张金星,姚奕然,等.UPLC-MS/MS法测定半夏中根茎膨大剂的残留[J].中南药学,2024,22(11):3000-3005.
- [4] 翟兴英,曹浩时,巫志辉,等.半夏属药用植物化学成分的研究进展[J].江西中医药大学学报,2023,35(6):123-127+132.
- [5] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:北京科学出版社,1979.
- [6] 王化东,吴发明.我国半夏资源调查研究[J].安徽农业科学,2012,40(1):150-151+200.
- [7] 寸竹,董益,张广辉,等.云南省野生半夏资源调查及种质评价[J].南方农业学报,2021,52(8):2069-2077.

- [8] 穆二廷, 周建理. 半夏生药学研究概况[J]. 安徽中医学院学报, 2013, 32(5): 91-94.
- [9] 窦全慧, 陈程浩, 曾太乙亥, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测龙胆科重要药用植物在青藏高原的生境适宜性研究[J/OL]. 草地学报, 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.s.20250318.1817.014>, 2025-03-19.
- [10] Urbani, F., D'Alessandro, P., Frasca, R. and Biondi, M. (2015) Maximum Entropy Modeling of Geographic Distributions of the Flea Beetle Species Endemic in Italy (Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini). *Zoologischer Anzeiger—A Journal of Comparative Zoology*, **258**, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2015.08.002>
- [11] 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 ID: 116515. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116515>
- [12] Xin, X.G., Wu, T.W. and Zhang, J. (2019) Introduction to the BCC Model and Its CMIP6 Experiment. *Progress in Climate Change Research*, **15**, 533-539.
- [13] Zhang, K., Zhang, Y., Zhou, C., Meng, J., Sun, J., Zhou, T., *et al.* (2019) Impact of Climate Factors on Future Distributions of *Paeonia ostii* across China Estimated by Maxent. *Ecological Informatics*, **50**, 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.01.004>
- [14] Ünal, Y. (2023) Potential Distribution of the Caracal (Caracal Caracal Schreber, 1776) under Climate Change. *Applied Ecology and Environmental Research*, **21**, 1109-1128. https://doi.org/10.15666/aecr/2102_11091128
- [15] Azeem, A., Ahmed, S.R., Qadir, A. and Hussainy, A.S. (2021) Predictive Habitat Suitability Modelling of *Axis porcinus* (Hog Deer) under Current and Future Climate Change Scenarios in Punjab, Pakistan. *Applied Ecology and Environmental Research*, **19**, 3181-3201. https://doi.org/10.15666/aecr/1904_31813201
- [16] Karakaya, T. and Yücel, E. (2021) Potential Distribution Modelling and Mapping of Dog Rose (*Rosa canina* L.) in the Nur Mountains of Gaziantep District, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, **19**, 2741-2760. https://doi.org/10.15666/aecr/1904_27412760
- [17] Moreno, R., Zamora, R., Molina, J.R., Vasquez, A. and Herrera, M.Á. (2011) Predictive Modeling of Microhabitats for Endemic Birds in South Chilean Temperate Forests Using Maximum Entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, **6**, 364-370. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.07.003>
- [18] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [19] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 刘祥林, 李星, 孙涛, 陈浩宇, 李捷. 基于 MaxEnt 模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1420-1428.
- [20] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情境下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [21] Swets, J.A. (1988) Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems. *Science*, **240**, 1285-1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>
- [22] 张童, 黄治昊, 彭杨靖, 王泳腾, 王萍, 王诗童, 崔国发. 基于 Maxent 模型的软枣猕猴桃在中国潜在适生区预测[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4921-4928.
- [23] 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>
- [24] Tsoar, A., Allouche, O., Steinitz, O., Rotem, D. and Kadmon, R. (2007) A Comparative Evaluation of Presence-Only Methods for Modelling Species Distribution. *Diversity and Distributions*, **13**, 397-405. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00346.x>
- [25] 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>
- [26] Guo, F.L., Xu, G.B., Lu, M.Z., Meng, Y.H., Yuan, C.Z. and Guo, K.Q. (2020) Analyzing the Potential Suitable Distribution Area of Poplar Based on MaxEnt Model. *Forest Science*, **56**, 184-192.
- [27] Song, C. and Liu, H. (2019) Habitat Differentiation and Conservation Gap of *Magnolia biondii*, *M. denudata*, and *M. sprengeri* in China. *PeerJ*, **6**, e6126. <https://doi.org/10.7717/peerj.6126>
- [28] Ashrafi, M., Azimi-Moqadam, M., Moradi, P., MohseniFard, E., Shekari, F. and Kompany-Zareh, M. (2018) Effect of Drought Stress on Metabolite Adjustments in Drought Tolerant and Sensitive Thyme. *Plant Physiology and Biochemistry*, **132**, 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.009>
- [29] 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>
- [30] 王家禄, 王璐, 牟兰, 等. 半夏全球生态适宜性分析与品质生态学研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(11): 1864-1868.