

◆ 濒危植物生态群落多样性 ◆

基于 MaxEnt 模型研究气候变化对巴戟天适生分布的影响^{*}蒋庆莲^{1,2}, 梁键明¹, 张 铭^{1,3}, 姜 垒¹, 吴玉芬¹, 邵彦清¹, 杨锦昌², 邵 玲³, 王继华⁴, 唐光大^{1**}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 3. 肇庆学院生命科学学院, 广东肇庆 526061; 4. 广东省农业科学院作物研究所, 广东广州 510640)

摘要:巴戟天(*Morinda officinalis*)的肉质根是我国著名的四大南药之一,具有较高的经济和药用价值。本研究收集了25个巴戟天有效分布信息,结合气候、地形、土壤等38个环境因子,运用最大熵(MaxEnt)模型和地理信息系统(ArcGIS),对巴戟天当前(1970-2000)及未来2050s(2041-2060)3种气候情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)的潜在地理分布进行预测,并根据贡献率及响应曲线综合评判影响巴戟天分布的主导环境因子。结果表明:(1)MaxEnt模型预测精度高,4种气候情景下的Area Under Curve(AUC)值均大于0.985。(2)对巴戟天分布贡献率较大的主导环境因子有4个,分别是最冷季度降水量(47.4%)、年平均气温(28.9%)、年降水量(10.0%)、平均气温日较差(1.7%),最适宜巴戟天生长的生态位参数分别是156.8 mm、21.8℃、1 857.1 mm、6.4℃。(3)当前巴戟天的潜在适生面积合计 $83.59 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在广东、广西等热带、亚热带地区,高适生区集中在广东(肇庆、云浮、惠州、河源)、广西(玉林、贵港、防城港)、台湾(花莲、台中)、海南(保亭、陵水)等地。未来气候情景下巴戟天潜在地理分布总体收缩,低适生区变化较为明显,中、高适生区相对稳定。(4)随着气候变暖,未来气候情景下巴戟天潜在适生分布呈现“西扩”与“东缩”的趋势,适生区由东向西迁移,云南西南部是主要增加区。适生区分布研究结果可为巴戟天栽培区域选择提供参考。

关键词:巴戟天;潜在地理分布;MaxEnt模型;气候变化;环境因子

中图分类号:Q948 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)06-1144-12

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240125.013

物种分布模型(Species Distribution Models, SDM)基于生态位理论关联物种已知分布信息与环境变量,利用特定算法估计物种的生态需求,从而预测物种在当前或未来环境条件下的适生范围^[1,2]。

相较于广义加性模型(GARP)、生物气候模型(Bio-clim)、领域模型(Domain)等物种分布模型,最大熵(MaxEnt)模型的模拟精度更高,且具有样本需求量大、操作简单、界面友好等优点^[3,4],被广泛用于珍稀

收稿日期:2023-08-11

修回日期:2023-09-20

^{*} 广东省林业局科技项目(2023KJXC001)资助。

【第一作者简介】

蒋庆莲(1999-),女,在读硕士研究生,主要从事野生动植物保护与利用研究,E-mail:867399883@qq.com。

【**通信作者简介】

唐光大(1982-),男,博士,副教授,主要从事植物分类与系统演化、森林植物资源开发与利用研究,E-mail:gdtang@scau.edu.cn。

【引用本文】

蒋庆莲,梁键明,张铭,等.基于MaxEnt模型研究气候变化对巴戟天适生分布的影响[J].广西科学,2023,30(6):1144-1155.

JIANG Q L,LIANG J M,ZHANG M,et al. Climate Change Effects on Suitable Area Distribution of *Morinda officinalis* by MaxEnt Model [J]. Guangxi Sciences,2023,30(6):1144-1155.

濒危物种的潜在适生区预测,如丹霞梧桐(*Firmiana danxiaensis*)、资源冷杉(*Abies ziyuanensis*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、独叶草(*Kingdonia uniflora*)等^[5-8],也用于三七(*Panax notoginseng*)、何首乌(*Pleuropterus multiflorus*)等中药材的生产区划研究^[9,10]。

巴戟天(*Morinda officinalis*)是茜草科(Rubiaceae)巴戟天属(*Morinda*)多年生攀缘木质藤本植物,喜温暖湿润环境,忌严寒霜冻、积水,幼株喜阴,成株喜阳^[11],其肉质干燥根是我国著名的四大南药之一,具有补肾阳、强筋骨、祛风湿的功效^[12],广泛应用于临床及多种保健品。因市场需求量大,巴戟天挖采现象严重,导致其生境遭到严重破坏^[13],被列为国家Ⅱ级重点保护野生植物。目前,对于巴戟天的研究主要集中在品种考证^[14]、种质资源^[11]、化学成分^[15]、炮制方法^[16]、含量测定^[17]等方面。在种植区域研究方面,据品种考证,巴戟天产地经历了由北至南的大变迁,道地产区由四川巴郡转移到广东德庆^[14],是历代本草中产地变迁最为典型的例子。

气候变化可能会对物种的地理分布产生影响^[18]。研究巴戟天潜在适生分布,有助于掌握巴戟天的适生区分布格局,对巴戟天的道地产区和适生栽培区选定、区域特色中药材产业发展等具有指导意义。宫璐等^[19]和姚辉等^[20]运用中药材产地适宜性分析地理信息系统(TCMGIS-I)对巴戟天产区区划进行研究,结果显示中国是巴戟天的最主要产区,以广东和广西为主要栽培中心。本研究通过标本采集记录信息,结合 MaxEnt 分布模型预测当前气候及未来 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 3 种共享社会经济路径情景下巴戟天在中国的潜在适生区,并确定影响巴戟天分布的关键环境因子,可进一步验证宫璐等^[19]和姚辉等^[20]的分析结果,并可分析巴戟天的潜在分布和产地,以期对巴戟天适生区区划提供理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据收集与筛选

本研究所需巴戟天分布数据来源包括以下 3 个部分:(1)野外实地调查,采样点均用 GPS 记录经纬度;(2)文献查阅,搜集中国知网、万方数据库等公开发表文献中巴戟天样品的采集信息;(3)共享数据库,

查询全球生物多样性信息库(<http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(CVH;<https://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(NSII;<http://www.nsii.org.cn/>)等共享信息平台。剔除经纬度信息不全的自然分布点,初步获得分布记录 41 条,并以物种名、经度、纬度的格式整理为.csv 文件。为避免空间关联性较大造成过度拟合,本研究使用 EN-MTools 软件筛选分布点,在分辨率 2.5 arc-minutes 的栅格内只保留一个分布点,最终得到 25 个巴戟天有效分布点(广西 10、广东 6、海南 4、福建 3、湖南 2),保存为.csv 格式用于 MaxEnt 模型构建。

1.2 环境变量的获取与筛选

本研究基于 38 个环境变量(表 1)分别在当前气候(1970-2000)和未来气候 2050s (2041-2060)预测巴戟天分布格局。环境变量包括 19 个生物气候因子、3 个地形因子以及 16 个土壤因子。生物气候因子(bio1-bio19)和地形因子海拔来源于世界气候数据库(<https://www.worldclim.org/>)。未来气候数据模式采用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)国家(北京)气候中心中等分辨率气候系统(BCC-CSM2-MR)模式下的 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 3 种共享社会经济路径情景。SSP1-2.6 表示可持续发展路径下,温室气体低排放情景;SSP2-4.5 表示中度发展路径下,温室气体中等排放情景;SSP5-8.5 表示以化石燃料为主的发展路径下,温室气体高排放情景^[21,22]。地形因子还包括坡度及坡向变量。土壤因子取自世界土壤数据库(<http://www.fao.org/soils-portal/>),由于巴戟天是深根性植物,因此仅选择下层土壤属性(30-100 cm)。

为避免环境因子间多重共线性造成模型过拟合,本研究对环境变量进行筛选。将巴戟天分布数据和环境数据导入 MaxEnt 模型,通过刀切法(Jackknife test)得到各环境因子的贡献率结果,直接去除贡献率小于 1%的因子。运用 IBM SPSS Statistics 22 软件对剩余因子进行 Pearson 相关性分析,当两个环境因子相关系数 $|r| > 0.8$ 时,剔除贡献率较小的因子^[8]。最终得到 9 个环境变量用于后续建模:最冷季度降水量(bio19)、年平均气温(bio1)、年降水量(bio12)、平均气温日较差(bio2)、坡向(Asspect)、坡度(Slope)、海拔(Elevation)、碎石体积百分比(S_GRAVEL)、土壤盐基饱和度(S_BS)。

表 1 影响巴戟天分布的潜在环境变量

Table 1 Potential environmental variables affecting the distribution of *M. officinalis*

| 代码 Code | 环境变量 Environmental variable | 代码 Code | 环境变量 Environmental variable |
|------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| bio1 | Annual mean temperature | Elev | Elevation |
| bio2 | Mean diurnal range | Slo | Slope |
| bio3 | Isothermality | Asp | Aspect |
| bio4 | Temperature seasonality | S_GRAVEL | Subsoil gravel content |
| bio5 | Max temperature of warmest month | S_SAND | Subsoil sand fraction |
| bio6 | Min temperature of coldest month | S_SILT | Subsoil silt fraction |
| bio7 | Temperature annual range | S_CLAY | Subsoil clay fraction |
| bio8 | Mean temperature of wettest quarter | S_USDA_TEX | Subsoil USDA texture classification |
| bio9 | Mean temperature of driest quarter | S_REF_BULK | Subsoil reference bulk density |
| bio10 | Mean temperature of warmest quarter | S_OC | Subsoil organic carbon |
| bio11 | Mean temperature of coldest quarter | S_PH_H ₂ O | Subsoil pH (H ₂ O) |
| bio12 | Annual precipitation | S_CEC_CLAY | Subsoil CEC (clay) |
| bio13 | Precipitation of wettest month | S_CEC_SOIL | Subsoil CEC (soil) |
| bio14 | Precipitation of driest month | S_BS | Subsoil base saturation |
| bio15 | Precipitation seasonality | S_TEB | Subsoil TEB |
| bio16 | Precipitation of wettest quarter | S_CACO3 | Subsoil calcium carbonate |
| bio17 | Precipitation of driest quarter | S_CASO4 | Subsoil gypsum |
| bio18 | Precipitation of warmest quarter | S_ESP | Subsoil sodicity (ESP) |
| bio19 | Precipitation of coldest quarter | S_ECE | Subsoil salinity (ECE) |

Note: S_ indicates subsoil properties (30 – 100 cm).

1.3 MaxEnt 模型预测

1.3.1 模型运行

将巴戟天分布数据和筛选出的环境变量导入 MaxEnt 3.4.1, 随机选取 75% 的巴戟天分布点作为训练集建立预测模型, 剩余 25% 作为测试集验证模型, 勾选绘制响应曲线、绘制预测图、刀切法测试变量重要性, 以 Bootstrap 模式, 重复迭代 10 次, 结果输出格式为 Logistic, 其余参数均保持默认设置, 将模型运算的平均值作为最终模拟结果。

1.3.2 模型评价

采用 Area Under Curve (AUC) 值对模型预测结果进行精度评价。AUC 值为受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristi, ROC) 与横坐标围成的面积值, 取值范围在 [0, 1], 越接近 1 表示模型精度越高。理想情况是模型预测分布区与物种实际分布区完全吻合, 此时 AUC 值为 1^[23]。MaxEnt 模型能够自动生成 ROC 曲线, 并给出相应的 AUC 值。AUC 值的评价标准^[3]: 0.5 ≤ AUC < 0.6, 预测失败; 0.6 ≤ AUC < 0.7, 预测精度较差; 0.7 ≤ AUC < 0.8,

预测精度一般; 0.8 ≤ AUC < 0.9, 预测精度好; 0.9 ≤ AUC < 1, 预测精度极好。

1.4 巴戟天适生区等级划分

将模型输出结果的平均值 asc. 文件导入 ArcGIS 10.8, 输出结果为 0 – 1 的适生逻辑指数 (P), 利用重分类 (Reclassify) 命令对输出结果进行划分。本研究参考已发表文献^[6], 结合巴戟天实际分布, 将其适生区划分为 4 个等级: P < 0.1 为非适生区, 0.1 ≤ P < 0.3 为低适生区, 0.3 ≤ P < 0.5 为中适生区, P ≥ 0.5 为高适生区。利用栅格计算得到每个分区的权重, 再根据裁剪出的国土实际面积换算每个等级的面积。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价与阈值选择

对照 AUC 值评价标准, 4 种气候情景下的巴戟天适生分布预测模型都具有较高的精度 (表 2)。当前气候及未来气候下的可持续发展路径 (SSP1-2.6)、中度发展路径 (SSP2-4.5)、化石燃烧路径 (SSP5-8.5) 模型 10 次训练模拟的 AUC 平均值都超

过 0.985 ($SD \leq 0.005$), 精度达到极好水平, 且不同模型重复间的稳定性较好, 说明 MaxEnt 模型的预测结果可信用度高。

表 2 不同气候情景下的 MaxEnt 模型 AUC 平均值与标准差
Table 2 AUC average values and standard deviation of MaxEnt model under different climate scenarios

| 气候情景 Climate scenarios | AUC 平均值 (\pm 标准差) AUC average values (\pm SD) |
|-----------------------------|--|
| Current climate (1970–2000) | 0.988 \pm 0.005 |
| SSP1-2.6 (2041–2060) | 0.985 \pm 0.005 |
| SSP2-4.5 (2041–2060) | 0.986 \pm 0.003 |
| SSP5-8.5 (2041–2060) | 0.986 \pm 0.005 |

2.2 影响巴戟天分布的主导环境因子

本研究主要根据贡献率、置换重要值和刀切法检验结果 3 个指标综合评价气候变量对巴戟天适生区分布的影响, 并根据响应曲线对巴戟天分布概率与主导气候因子之间的联系进行分析。用于模型构建的

表 3 用于 MaxEnt 建模的环境因子

Table 3 Environmental factors for MaxEnt modelling

| 代码 Code | 环境变量 Environmental variable | 贡献率/% Contribution rate/% | 置换重要值/% Permutation importance/% | 适宜区间 Suitable range | 最适值 Optimum value |
|------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| bio19 | Precipitation of coldest quarter | 47.4 | 2.2 | 111.3–209.3 mm | 156.8 mm |
| bio1 | Annual mean temperature | 28.9 | 60.1 | 19.9–29.1 °C | 21.8 °C |
| bio12 | Annual precipitation | 10.0 | 5.4 | 1 585.7–3 781.7 mm | 1 857.1 mm |
| Asp | Aspect | 5.7 | 3.4 | North slope, northwest slope | North slope |
| S_GRAVEL | Subsoil gravel content | 1.8 | 2.2 | 8.5%–31.7% | 29.9% |
| S_BS | Subsoil base saturation | 1.7 | 1.0 | 0.0%–61.1% | 11.0% |
| bio2 | Mean diurnal range | 1.7 | 22.4 | 3.7–7.8 °C | 6.4 °C |
| Slo | Slope | 1.6 | 1.2 | 7.2°–27.0° | 14.0° |
| Elev | Elevation | 1.1 | 2.1 | 5.4–415.4 m | 126.4 m |

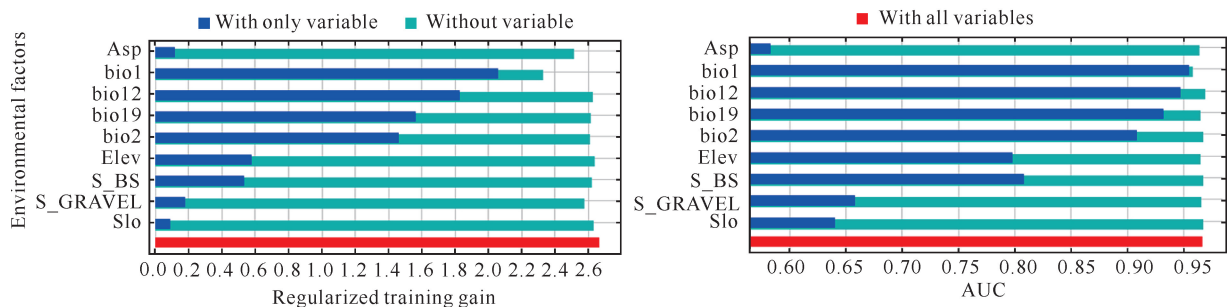


图 1 环境因子刀切法检验结果

Fig. 1 Jackknife test result for environmental factors

单因子响应曲线可以揭示巴戟天分布概率与各主导环境因子间的相关变化趋势。从单因子响应曲

9 个环境因子中(表 3), 贡献率排名前三位的因子为最冷季度降水量(bio19)、年平均气温(bio1)、年降水量(bio12), 贡献率依次为 47.4%、28.9%、10.0%, 累积贡献率达 86.3%, 表明这 3 个环境因子对巴戟天的地理分布有重要影响; 置换重要值排名前三位的因子为年平均气温(bio1)、平均气温日较差(bio2)、年降水量(bio12), 置换重要值依次为 60.1%、22.4%、5.4%, 累积置换重要值达 87.9%, 表明模型对这 3 个变量的依赖性更强; 从刀切法检验结果看(图 1), 正则化训练增益和 AUC 值的“仅此变量”排名前三位的因子均为年平均气温(bio1)、年降水量(bio12)、最冷季度降水量(bio19), 表明这 3 个因子对巴戟天的地理分布有较强的预测能力。综上, 最冷季度降水量(bio19)、年平均气温(bio1)、年降水量(bio12)、平均气温日较差(bio2)是影响巴戟天地理分布的主导环境因子。

线可知(图 2), 最冷季度降水量(bio19)、年平均气温(bio1)、年降水量(bio12)、平均气温日较差(bio2)对

巴戟天的分布概率总体上均呈现出先促进后抑制的趋势, 分别在取值为 156.8 mm、21.8 °C、1 857.1 mm、6.4 °C 时达到峰值。通常认为分布概率大于 0.5 时, 其对应的环境因子值适宜物种生长^[24,25]。因

此巴戟天分布区各主导因子的适宜范围取值为最冷季度降水量 111.3–209.3 mm, 年平均气温 19.9–29.1 °C, 年降水量 1 585.7–3 781.7 mm, 平均气温日较差 3.7–7.8 °C。

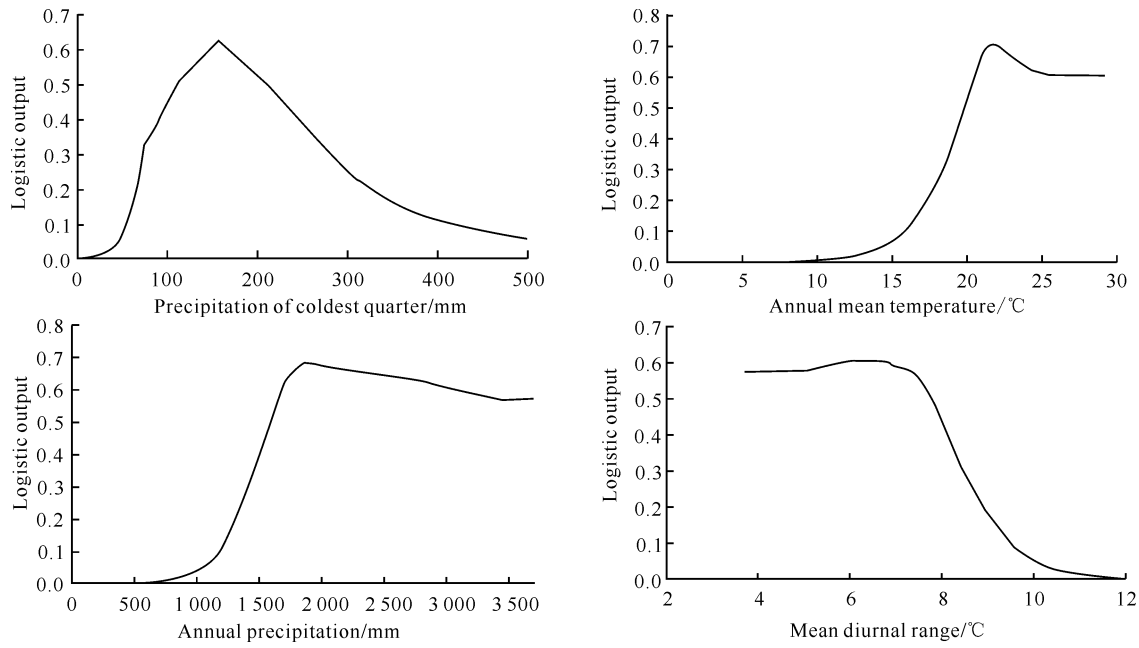


图2 主导环境因子响应曲线

Fig. 2 Response curves of the key environmental factors

2.3 当前及未来巴戟天适生区分布

当前气候下, 巴戟天总适生区面积约为 $83.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表4), 分布于广东、广西、福建、海南、台湾、西藏、云南、贵州、湖南、江西、浙江、湖北、安徽等省区。高适生区面积约为 $8.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沿山脉分布, 主要集中在广东西部的云雾山和云开山(肇庆、云浮等地)以及东部的莲花山(惠州、河源等地)、广西东部的大瑶山(玉林、贵港等地)以及南部十万大山(防

城港等地)、台湾中央山脉及雪山山脉(花莲、台中等地)、海南五指山(保亭、陵水等地)等山脉附近, 西藏山南及福建漳州、南平等地有少量高适生区分布; 中适生区面积约为 $23.48 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沿高适生区边缘分布, 主要集中在广东、广西、海南、台湾等地, 西藏、福建等地有少量分布; 低适生区面积约为 $51.38 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布于湖南、江西、福建、浙江等地[图3(a)]。

表4 不同气候情景下巴戟天适生区面积

| 适生类型 Suitable area | 指标 Indicators | 当前气候 Current climate | 未来气候 2050s Future climate 2050s | | |
|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|----------|----------|
| | | | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP5-8.5 |
| Low suitable area | Area | 51.38 | 44.84 | 45.70 | 45.63 |
| | Area changes | | -6.54 | -5.68 | -5.75 |
| Medium suitable area | Area | 23.48 | 23.18 | 23.31 | 23.13 |
| | Area changes | | -0.30 | -0.17 | -0.35 |
| High suitable area | Area | 8.73 | 8.85 | 10.69 | 8.98 |
| | Area changes | | 0.12 | 1.96 | 0.25 |
| Total suitable area | Area | 83.59 | 76.87 | 79.70 | 77.74 |
| | Area changes | | -6.72 | -3.89 | -5.85 |

Note: “-” indicates the reduced area compared to the current climate.

相较于当前气候,未来3种气候情景下巴戟天的中、低适生分布均收缩,仅高适生分布有小幅度扩张。SSP1-2.6情景下,巴戟天总适生区面积约为 $76.87 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候减少 $6.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。广西、海南、云南等地高适生分布增加,广东、台湾等地则减少,高适生区面积约为 $8.85 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候增加 $0.12 \times 10^4 \text{ km}^2$;中适生区面积约为 $23.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候减少 $0.30 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要收缩的省份为广东及台湾,湖南、江西、福建等地面积增加;低适生区面积约为 $44.84 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候减少

$6.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,湖南、江西、福建、浙江等地收缩最为明显,云南地区则明显扩大[图3(b)]。

SSP2-4.5情景下,巴戟天总适生区面积约为 $79.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候减少 $3.89 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高适生区面积约为 $10.69 \times 10^4 \text{ km}^2$,较当前气候增加 $1.96 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要为广东、广西及海南等地扩张,台湾收缩,西藏、云南等地高适生面积也有少量增长;中适生区面积约为 $23.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布于广东、广西、海南、台湾等地,较当前气候减少 $0.17 \times 10^4 \text{ km}^2$;低适生区面积约为 $45.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,

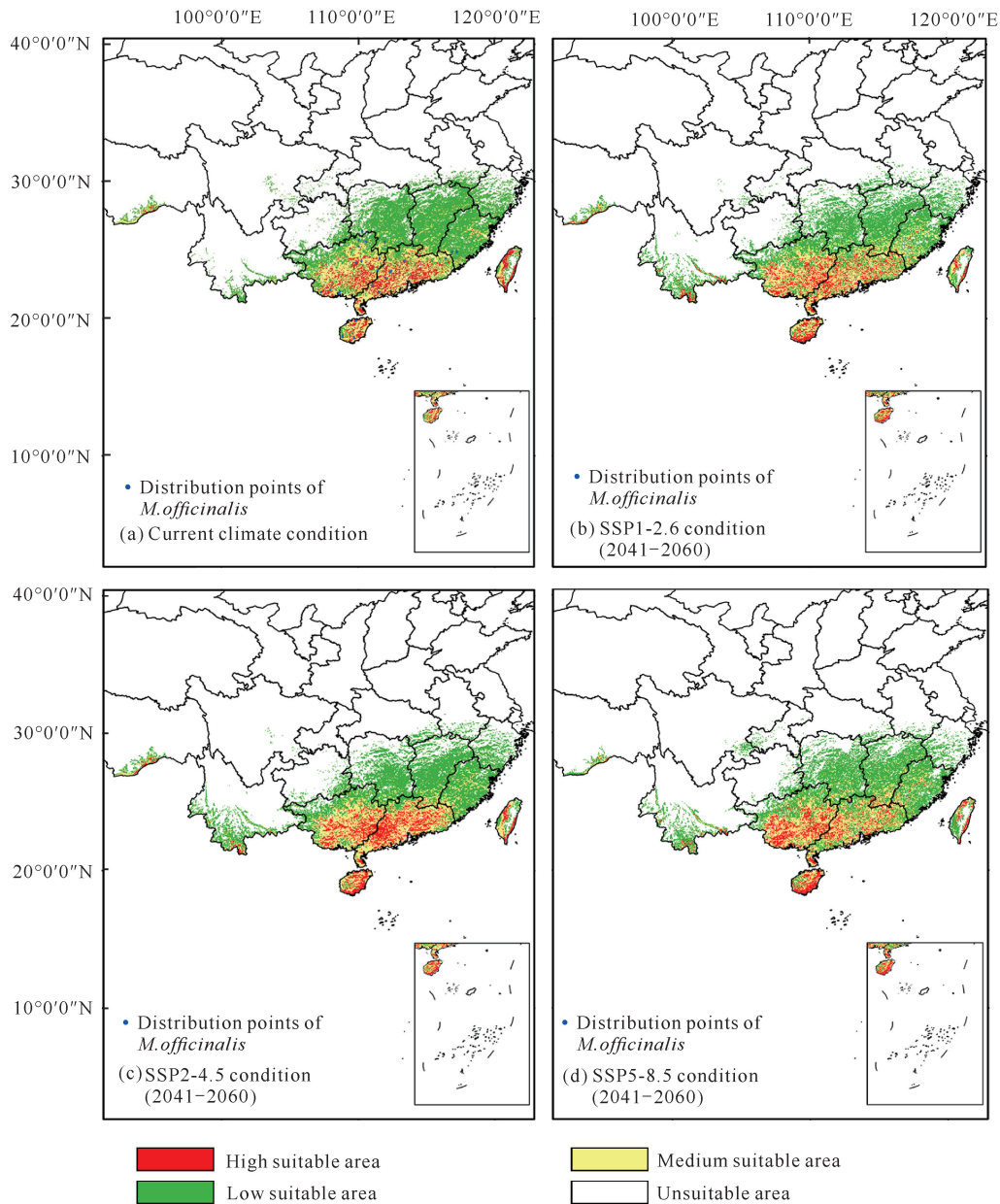


图3 不同气候情景下巴戟天的潜在适生分布[审图号:GS(2019)1822]

Fig. 3 *M. officinalis* potential suitable distribution under different climate condition [Number:GS(2019)1822]

较当前气候减少 $5.68 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要为湖南及江西北部地区、浙江地区收缩, 云南地区低适生分布扩大 [图 3(c)]。

SSP5-8.5 情景下, 巴戟天总适生区面积约为 $77.74 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候减少 $5.85 \times 10^4 \text{ km}^2$; 高适生面积为 $8.98 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要集中在广西及海南地区, 广东、台湾地区高适生分布明显减少; 中适生区面积约为 $23.13 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候减少 $0.35 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在广东、广西、海南地区, 其中广东地区大部分中适生分布在当前气候情景下为高适生区, 福建、江西地区的中适生分布有所增长; 低适生区面积约为 $45.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候减少 $5.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要为湖南、江西、福建、浙江及广西西北部地区低适生分布收缩, 云南、台湾地区低适生分布增加 [图 3(d)]。

总的来看, 未来气候情景下巴戟天潜在适生分布呈现“西扩”与“东缩”的趋势, 适生区由东向西迁移 [图 4:(a) - (c)]。西部的云南地区是主要增加区, 消失区主要为东部地区的浙江、安徽以及湖南、江西的东北部。以高适生区为例 [图 4:(d) - (f)], 随着温室气体的排放, 广东地区高适生分布缩减明显, 高适生区向广西迁移。SSP2-4.5 情景下高适生区仍大面积集中在广东西部及中北部地区, 当温室气体排放到达 SSP5-8.5 情景时, 广东高适生区几乎消失, 广西高适生分布明显增加, 并主要集中在广西的西南部。海南、云南也为高适生分布增加区, 东部的台湾地区则出现较大面积的缩减。此外, 广东、广西、海南、台湾的巴戟天分布较为稳定且适生范围广, 西藏地区也存在小面积稳定分布的巴戟天适生区。

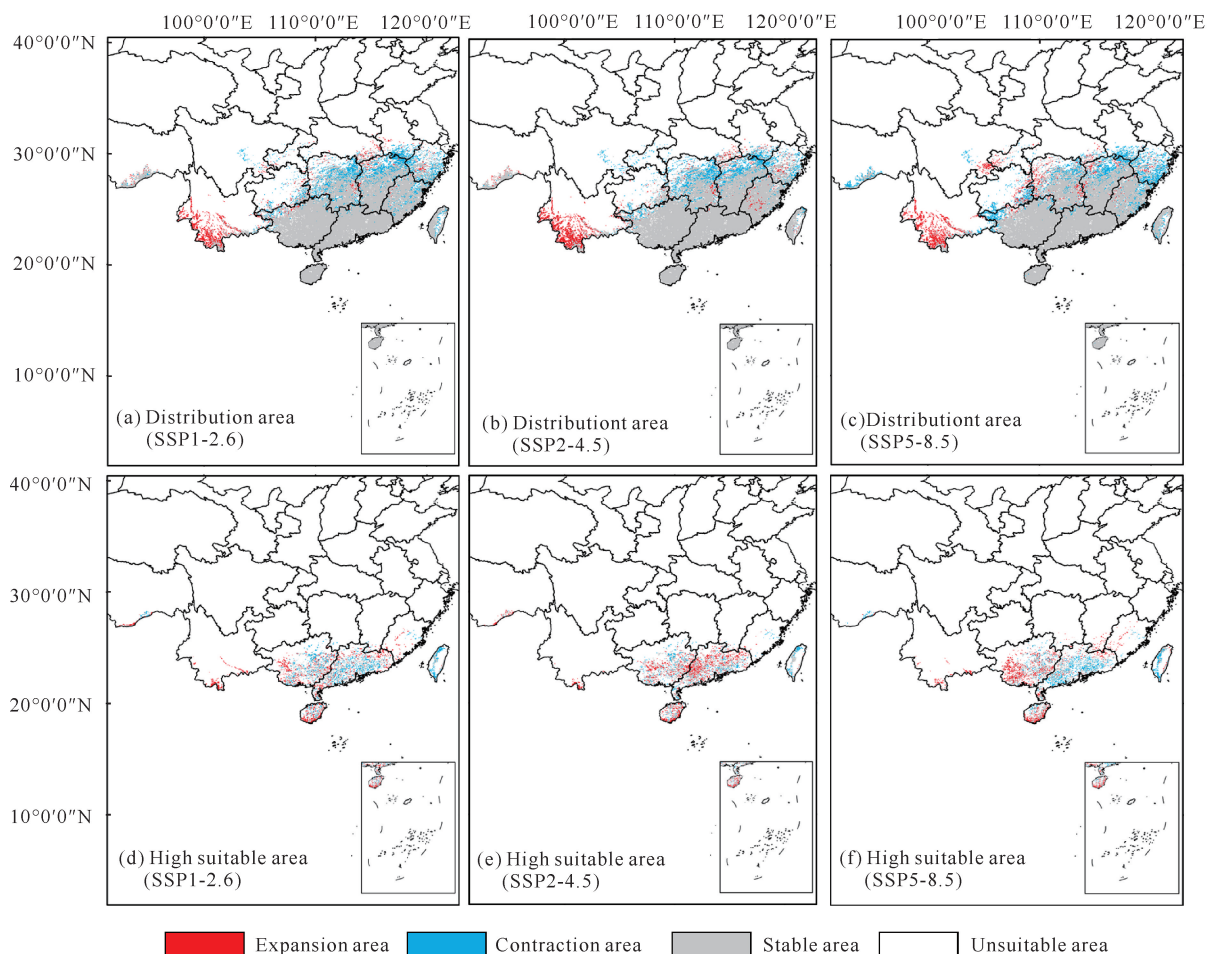


图 4 不同气候情景下巴戟天潜在适生区及高适生区分布变化 [审图号:GS(2019)1822]

Fig. 4 *M. officinalis* distribution and high suitable area change under different climate condition [Number:GS(2019)1822]

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型的可靠性

近年来气候数据与物种分布数据的更新,为物种分布的模型预测和模拟提供了有力的数据支撑^[26-28]。目前,有关物种分布预测的模型主要有 GARP、Bioclim、Domain、MaxEnt 等生态位模型。本研究运用 MaxEnt 模型对中国范围内巴戟天的潜在适生分布进行预测,在 4 种气候情景下的 AUC 值均超过 0.985(SD≤0.005)。根据 AUC 值评价标准,精度为极好水平,且模型预测当前气候下巴戟天的潜在适生区与收集的自然分布点普遍重合[图 3(a)],模拟结果可信度较高。

MaxEnt 模型是通过结合物种的实际地理分布信息与对应的环境变量,计算熵最大时物种在预测地区的可能分布情况,这一运算原理决定了其对物种现存分布点具有较高的依赖性。在样本量少的条件下获得预测精度较高的结果是 MaxEnt 模型的突出优点之一,因此被广泛用于濒危植物、珍稀药用植物等分布范围狭窄的物种研究^[29]。陈新美等^[30]通过设置不同样本量进行模拟计算发现,样本量的大小对 MaxEnt 模型预测物种空间分布的精度影响不大,但样本量较小时,会在一定程度上影响模型的稳定性。本研究通过标本、文献记录、野外采样等方式收集具有准确经纬度坐标的野生巴戟天分布点,为防止分布点过密导致模型过拟合,经筛选后得到的巴戟天有效分布点有 25 个,满足 MaxEnt 模型预测物种空间分布的数据要求^[31,32]。

此外,MaxEnt 模型对物种适生区的预测主要考虑物种对非生物因子影响下的基础生态位需求,但物种的实际生态位还受到人为因素、种间关系等生物因子干扰,在特定的模型中无法考虑所有因素的影响,模拟结果仅为理想状态的潜在分布范围^[33-35]。此外,模型预测结果还受建模方法的选择、模型参数设置等多种因素的影响^[36]。因此,对物种分布点收集、影响因子选取、适宜区指标划分等方面需要进行长期连续的科学调查,以提高模型精度,进一步缩小与物种实际地理分布的差异。

3.2 主导环境因子对巴戟天适生分布的影响

气候是决定物种地理分布的关键因素之一^[37],例如张世林等^[21]运用 MaxEnt 模型预测樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 在我国的潜在分布时,发现温度和降水相关因子的累积贡献率达到

98.3%,对樟子松的分布起决定性作用。本研究中,气候因素(降水、气温)累积贡献率达 88%,是影响巴戟天潜在适生分布的主导因子。根据阈值 0.5 划定的气候因子适宜区间,预测巴戟天宜生长在雨量充沛、气候温暖且气温变化幅度缓和的地区,与巴戟天自然分布的热带、亚热带地区环境条件相符。参与建模的环境因子中,最冷季度降水量的贡献率最高,说明其是限制巴戟天地理分布的关键,这可能与巴戟天独特的生长发育过程有关。巴戟天为多年生木质藤本,每年冬季至次年春季都要经历休眠再萌发的生理过程^[38]。在此过程中,若土壤水分不足,植株含水量下降,促进休眠的相关激素将会明显提高,导致萌芽受抑制;随着温度持续回升,植株水分蒸发加快,而处于休眠状态的植株根系吸水能力尚未完全恢复,最终可能造成巴戟天植株枯萎^[39]。此外,雨热同期是热带、亚热带地区突出的气候特点,最冷季度降水量的适宜区间为 111.3 - 209.3 mm,说明适生区在早期仍需要保证一定程度的降水,与巴戟天不耐干旱的生活习性一致^[38]。

本研究还考虑了非气候因素的影响作用,结果显示地形和土壤因子的累积贡献率仅为 11.9%,对巴戟天分布格局的限制作用较小。坡向因子是贡献率最高的非气候因素,适宜区间对应为北坡至西北坡。我国位于北半球,北半球的北坡、西北坡多为阴坡,相对于阳坡,阴坡水分蒸发量小,土壤较湿润。碎石体积百分比是贡献率最高的土壤因子,适宜区间为 8.5% - 31.7%,说明巴戟天需要生长在含有一定碎石成分的土壤中。这是由于巴戟天喜湿润,但忌土壤积水,土壤水分过多易引起根系缺氧^[40],导致巴戟天根部腐烂甚至全株死亡。碎石能够增加土壤孔隙,促进水分入渗^[41,42],以减缓水流集聚。可见,非气候因素主要是通过影响水热资源的二次分配以限制巴戟天的适生分布。

在响应曲线上,物种存在概率反映的是单一环境变量的作用,但其地理分布、生长发育活动是气候条件、地形地貌、人为因素、种间关系、植被条件等各种环境因子综合影响的结果^[3,43]。本研究基于单因子响应曲线对参与模型预测的气候、地形及下层土壤因子的讨论,可作为判断巴戟天与所选环境变量之间关系的参考,但不足以准确解释二者之间的关系。在后续研究中,需要对更多环境因子进一步研究,从而更全面地揭示环境条件对巴戟天生命活动的影响。

3.3 巴戟天潜在地理分布变化及种质资源保护

气候变暖可导致物种地理分布动态变化及适生区范围的改变,许多生物的分布区向更高纬度、更高海拔的地区移动,向冷边缘范围拓展^[44-46],这在资源冷杉(*Abies ziyuanensis*)、橡胶树(*Hevea brasiliensis*)等物种的分布格局研究结果中均已得到证实^[4,8]。本研究中,未来气候情景下巴戟天潜在适生分布呈现“西扩”与“东缩”的趋势,适生区由东向西迁移,云南西南部是主要增加区,西藏地区也有小面积增加。在未来低(SSP1-2.6)、中(SSP2-4.5)、高(SSP5-8.5)温室气体浓度排放路径下,巴戟天总适生区面积大小排序依次为 SSP2-4.5 > SSP5-8.5 > SSP1-2.6。研究表明,由于中国在高浓度排放情景下增加的降水量高于低浓度排放情景下增加的降水量^[47],高浓度排放情景下增加的降水量可能会降低或解决降水因子对物种分布的限制,但低浓度排放情景不能降低或解除这一限制,反而会随着气温升高导致可供物种吸收的有效水减少^[48],这可能是 SSP1-2.6 情景下巴戟天分布面积小于 SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景的原因。此外,温度也是限制巴戟天地理分布的因素之一,SSP5-8.5 情景增温幅度大,部分地区气温可能超出巴戟天生长发育的适宜范围,导致该情景下的巴戟天适生分布面积小于增温幅度较小的 SSP2-4.5 情景。

与当前气候相比,未来3种气候情景下巴戟天潜在地理分布均收缩,低适生区面积变化较为明显,中、高适生区相对稳定,说明气候变暖在一定程度上会减少巴戟天的生存空间,需要对其进行及时、有效的保护。当前巴戟天已被列入国家Ⅱ级重点保护野生植物,野生种已极为少见。广东西部、广西东部、台湾中央山脉两侧、海南南部一带均是巴戟天高适生稳定分布区,因此可在广东云开山国家级自然保护区等地开展巴戟天野生种质资源回归重建工作。同时,为满足巴戟天日益增长的市场需求,这些区域也可作为巴戟天引种栽培的优先发展区域。未来亦可尝试在适生分布的新增区(云南、西藏等地)引种巴戟天,扩大巴戟天的种植范围。由于巴戟天是药用植物,从药材利用角度而言,产区选址除了要利用生境适宜度找到适合巴戟天生长的环境,还要考虑该地区是否适合其有效成分积累^[49]。因此,后续还需要通过对巴戟天药材的品质适宜性进行研究,加以验证。

4 结论

本研究基于 MaxEnt 模型,对中国范围内巴戟天

自然分布点的气候、地形、土壤因子进行分析,结果表明 MaxEnt 模型检验 AUC 值均在 0.985 以上,预测精确度和可信度高。降水(最冷季度降水量、年降水量)和温度(年平均气温、平均气温日较差)因子是限制巴戟天地理分布的主导环境变量。当前,巴戟天主要分布在广东、广西等热带、亚热带地区,高适生区集中在广东(肇庆、云浮、惠州、河源)、广西(玉林、贵港、防城港)、台湾(花莲、台中)、海南(保亭、陵水)地区,预测结果与实际情况相符。未来气候情景下巴戟天潜在地理分布均收缩,低适生区面积变化较为明显,中、高适生区相对稳定;分布呈现“西扩”与“东缩”的趋势,适生区由东向西迁移,云南西南部是主要增加区。本研究模拟得到的不同气候下巴戟天的潜在分布区及其生态适宜性,可为该物种的野生种质资源保护提供理论依据,亦可为该物种引种栽培、种植区划提供参考。

参考文献

- [1] 李国庆,刘长成,刘玉国,等.物种分布模型理论研究进展[J].生态学报,2013,33(16):4827-4835.
- [2] 李建宇,陈燕婷,郭燕青,等.基于 MaxEnt 预测未来气候条件下钻叶紫菀在中国的潜在适生区[J].植物保护,2023,49(2):92-102.
- [3] 王茹琳,李庆,封传红,等.基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测[J].生态学报,2017,37(24):8556-8566.
- [4] 易琦,高宇亭,彭启洋,等.全球变暖背景下云南省橡胶林潜在适生区的预测及变化[J].中国农业资源与区划,2023,44(7):129-138.
- [5] 李单琦,胡苑,韩彩霞,等.基于 MaxEnt 模型的濒危观赏植物福建柏潜在适生区预测[J].植物科学学报,2020,38(6):743-750.
- [6] 徐军,曹博,白成科.基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J].生态学杂志,2015,34(12):3354-3359.
- [7] 朱满乐,韦宝婧,胡希军,等.基于 MaxEnt 模型的濒危植物丹霞梧桐潜在适生区预测[J].生态科学,2022,41(5):55-62.
- [8] 李莎,莫舜华,胡兴华,等.基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测濒危植物资源冷杉潜在适生区分析[J/OL].生态学杂志,2023:1-11(2023-03-13)[2023-06-12].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230311.1445.004.html>.
- [9] 陈鹏崑,官会林,王勇,等.不同气候情景下我国三七潜在分布研究[J].中国中医药信息杂志,2023,9(9):11-16.

- [10] 陈亚. 何首乌质量评价及产地适宜区划研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2013.
- [11] 章润菁, 李倩, 屈敏红, 等. 巴戟天种质资源调查研究[J]. 中国现代中药, 2016, 18(4): 482-487.
- [12] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 2010年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 75-76.
- [13] 林仁昌. 永定县野生巴戟天资源短缺原因与林下种植思路[J]. 现代农业科技, 2013(11): 218-220, 226.
- [14] 吴振宁, 姚玲玲, 李文兰, 等. 经典名方中巴戟天的本草考证[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(10): 176-183.
- [15] 李竣, 张华林, 蒋林, 等. 南药巴戟天化学成分[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 53-56.
- [16] 谭丽容, 代文豪, 罗志锋, 等. 不同菌种发酵对巴戟天活性成分含量的影响[J]. 中国酿造, 2018, 37(12): 121-125.
- [17] 沈焱, 孙艺琦, 张奇, 等. 不同产地和生长年限对巴戟天中环烯醚萜苷类成分形成和积累的影响[J]. 中草药, 2022, 53(17): 5484-5490.
- [18] 万辛如, 程超源, 白德凤, 等. 气候变化的生态影响及适应对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 518-527.
- [19] 宫璐, 汪鹏, 谭瑞湘, 等. 南药巴戟天的全球产地区划[J]. 世界中医药, 2017, 12(5): 986-988.
- [20] 姚辉, 陈士林, 谢彩香, 等. 巴戟天的产地适宜性分析[J]. 广州中医药大学学报, 2009, 26(2): 176-180.
- [21] 张世林, 高润红, 高明龙, 等. 气候变化背景下中国樟子松潜在分布预测[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 560-568.
- [22] LI S Y, MIAO L J, JIANG Z H, et al. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015 - 2099 [J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 210-217.
- [23] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [24] 廖剑锋, 易自力, 李世成, 等. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305.
- [25] ZHAN P, WANG F Y, XIA P G, et al. Assessment of suitable cultivation region for *Panax notoginseng* under different climatic conditions using MaxEnt model and high-performance liquid chromatography in China [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176(6): 114416.
- [26] NASHWAN M S, SHAHID S. A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate [J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(10): 4422-4443.
- [27] 高薇, 邓丽丽, 韦霄, 等. 广西药食两用植物资源调查研究[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(1): 35-44.
- [28] 陶文琴, 廖初琴, 黄建睿, 等. 广东野生珍稀濒危南药植物资源调查研究[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(11): 74-79.
- [29] 白君君, 侯鹏, 赵燕红, 等. 物种生境适宜性模型及验证的研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1423-1432.
- [30] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- [31] PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, et al. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar [J]. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102-117.
- [32] HERNANDEZ P A, GRAHAM C H, MASTER L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. Ecography, 2006, 29(5): 773-785.
- [33] XU D P, ZHUO Z H, WANG R L, et al. Modeling the distribution of *Zanthoxylum armatum* in China with MaxEnt modeling [J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 19: e00691.
- [34] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战[J]. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(11): 915-927.
- [35] CHAKRABORTY A, JOSHI P K, SACHDEVA K. Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region [J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 593-609.
- [36] 庞丽芳, 庾太林. 基于 MaxEnt 模型的黄腹角雉的潜在生境预测[J/OL]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023; 1-18(2023-02-28)[2023-06-15]. <https://link.cnki.net/doi/10.16088/j.issn.1001-6600.2022092101>.
- [37] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [38] 罗新华, 陈瑞云. 巴戟天栽培技术[J]. 福建农业, 2010(8): 20-21.
- [39] 李丽霞, 梁宗锁, 韩蕊莲. 干旱对沙棘休眠、萌芽期内源激素及萌芽特性的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 35-40.
- [40] 董国强, 胡勇, 陈小凤, 等. 旱涝胁迫对作物根系吸水影

- 响研究进展[J]. 江淮水利科技, 2023(4): 7-12.
- [41] 王小燕, 蔡崇法, 李鸿, 等. 三峡库区碎石含量对紫色土容重和孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 379-386.
- [42] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 662-669.
- [43] 杨善云, 安明态, 刘锋, 等. 基于 MaxEnt 模型的贵州省楠木潜在适生区预测[J]. 广西植物, 2023, 43(5): 846-857.
- [44] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [45] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.
- [46] LENOIR J, GÉGOUT J, GUISAN A, et al. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate [J]. Ecology, 2010, 33(2): 295-303.
- [47] 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估[J]. 水文, 2016, 36(4): 37-43.
- [48] 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.
- [49] 柳鑫, 杨艳芳, 宋红萍, 等. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的黄连生长适宜性区划研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(17): 3186-3193.

Climate Change Effects on Suitable Area Distribution of *Morinda officinalis* by MaxEnt Model

JIANG Qinglian^{1,2}, LIANG Jianming¹, ZHANG Ming^{1,3}, JIANG Lei¹, WU Yufen¹,
SHAO Yanqing¹, YANG Jinchang², SHAO Ling³, WANG Jihua⁴, TANG Guangda^{1* *}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, 510642, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong, 510520, China; 3. School of Life Science, Zhaoqing University, Zhaoqing, Guangdong, 526061, China; 4. Crop Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Science, Guangzhou, Guangdong, 510640, China)

Abstract: The fleshy root is one of the four famous southern medicines in China, with high economic and medicinal value. We utilized the MaxEnt model and ArcGIS to predict the potential geographical range of *M. officinalis* in current climate (1970–2000) and three climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) for the future 2025s (2041–2060), based on its distribution records of 25 valid specimens and 38 environmental factors including climate, topography and soil. The dominant environmental variables that affect the distribution of *M. officinalis* were comprehensive evaluated according to the results of the contribution rates and response curves. The results showed: (1) The MaxEnt model exhibited high prediction accuracy, with AUC values greater than 0.985 for all four climate scenarios. (2) Four dominant environmental variables that contributed significantly to the distribution of *M. officinalis* were precipitation of coldest quarter (47.4%), annual mean temperature (28.9%), annual precipitation (10.0%), mean diurnal range (1.7%); among which, parameters of the ecological niche best suited for the growth of *M. officinalis* are 156.8 mm, 21.8 °C, 1 857.1 mm, and 6.4 °C, respectively. (3) The current potential suitable habitat area for *M. officinalis* is estimated to be $83.59 \times 10^4 \text{ km}^2$. It is mainly distributed in Guangdong, Guangxi and other tropical and subtropical areas, with high suitable area concentrated in Guangdong (Zhaoqing, Yunfu, Huizhou, Heyuan), Guangxi (Yu-

lin, Guigang, Fangchenggang), Taiwan (Hualien, Taichung), Hainan (Baoting, Lingshui) and ect. The suitable habitat distribution of *M. officinalis* will be contraction in all three future climate scenarios. Distribution changes are more pronounced in the low suitable area and relatively stable in the medium and high suitable area. (4) In the context of global warm, the suitable area of *M. officinalis* generally shows a trend of "Westward expansion" and "Eastward contraction". Suitable areas are migrating from east to west, with southwestern Yunnan being the main increase area. The results of this study on the distribution of suitable areas can provide references for the selection of cultivation areas for *M. officinalis*.

Key words: *Morinda officinalis*; potential geographical distribution; MaxEnt model; climate change; environmental factors

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>