

不同气候情境下飞龙掌血在中国潜在适生区的分布及变化



刘璇^{1,3}, 孟庭耀¹, 邓小芳², 吴亚妮¹, 贺相田¹, 牟凤娟^{1,*}

¹西南林业大学林学院, 云南昆明 650224

²国家林业和草原局管理干部学院, 北京 102600

³广州龙腾园林景观设计有限公司, 广东广州 510600

摘要: 飞龙掌血 (*Toddalia asiatica*) 具有诸多价值, 随着近年来对其开发利用的加强, 野生资源正日趋减少。本文基于广泛的标本记录, 利用优化后的 MaxEnt 生态模型对飞龙掌血的潜在适生区分布进行预测, 了解飞龙掌血在中国潜在适生区及在不同气候情景下适生区的变化, 为其物种保护、资源调查及引种栽培提供理论参考。结果表明, 在当前气候情境下, 飞龙掌血在中国的中高适生区主要集中在华南地区、西南地区东南部、华中地区西部和华东地区南部等热带亚热带季风气候区; 在未来气候情景下, 其适生区随气候变暖有向西南方向迁移的趋势, 且呈现出破碎化态势; 与当前气候情景相比, 飞龙掌血总适生区面积均呈减少态势, 但在 SSPs126 和 SSPs245 情景下其高适生区面积有少许增加, 出现该现象可能与碳排放增加而引起的全球气候变暖有关; 飞龙掌血扩张和收缩的适生区主要分布于整个适生区的边缘区域, 保持不变的区域主要为高适生区, 分布于重庆、贵州、广西和广东的绝大部分区域, 以及云南、四川、福建、海南和台湾的部分区域; 降水量和温度是影响飞龙掌血地理分布形成的主要原因和差异来源, 其中 bio18 (最暖季降水量) 和 bio11 (最冷季均温) 为限制飞龙掌血分布的主导环境变量因子。

关键词: 飞龙掌血; MaxEnt 模型; 潜在适生区; 限制性因子

DOI: 10.57237/j.jaf.2025.01.001

Predicting the Potential Suitable Areas and Variation of *Toddalia asiatica* in China Under Different Climatic Conditions

Liu Xuan^{1,3}, Meng Tingyao¹, Deng Xiaofang², Wu Yan¹, He Xiangtian¹, Mou Fengjuan^{1,*}

¹Faculty of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

²National Academy of Forestry and Grassland Administration, Beijing 102600, China

³Guangzhou Longteng Landscape Design Co., Ltd, Guangzhou 510520, China

Abstract: The species *Toddalia asiatica* (L.) Lam. has many values; with the strengthening of its development and

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目 (31360048, 31400181).

*通信作者: 牟凤娟, moufengjuan@126.com

收稿日期: 2024-10-07; 接受日期: 2024-11-27; 在线出版日期: 2025-01-02

<http://www.agrforestry.com>

utilization in recent years, wild resources are gradually decreasing. Based on the extensive specimen records, by using an optimized MaxEnt ecological model, the potential distribution of the suitable habitat of *T. asiatica* was predicted to understand suitable areas of *T. asiatica* in China and the changes of the suitable areas under different climate scenarios, which provides theoretical references for species protection, resource investigation, and introduction and cultivation of *T. asiatica* resources. The results showed that the medium suitable areas and high suitable areas of *T. asiatica* in China were mainly concentrated in tropical and subtropical monsoon climate areas such as South China, Southeast of Southwest China, West of Central China and South of East China, under the current climatic conditions. Under the future climate conditions, its suitable area has a tendency to migrate to the southwest with climate warming, and shows a trend of fragmentation. Compared with the current climatic conditions, the total suitable area showed a decreasing trend, but the high suitable area of *T. asiatica* increased under the SSPs126 and SSPs245 scenarios. This result may be related to global warming caused by increased carbon emissions. Under the future climatic conditions, the suitable areas for the expansion and contraction of *T. asiatica* are mainly distributed in the marginal areas of the whole suitable area, and the high suitable areas remain unchanged, which are distributed in most areas of Chongqing, Guizhou, Guangxi, and Guangdong, as well as parts of Yunnan, Sichuan, Fujian, Hainan, and Taiwan provinces. The two climatic factors of precipitation and temperature are the main causes and sources of differences limiting the geographical distribution of *T. asiatica*. Among them, bio18 (Precipitation of Warmest Quarter) and bio11 (Mean Temperature of Coldest Quarter) are the dominant environmental variables limiting the distribution of *T. asiatica*.

Keywords: *Toddalia asiatica*; MaxEnt Model; Potential Suitable Area; Limiting Factor

1 引言

飞龙掌血 (*Toddalia asiatica* (L.) Lam.) 隶属芸香科 (Rutaceae) 飞龙掌血亚科 (subfam. Toddalioidae Engl.) 飞龙掌血属 (*Toddalia* A. Juss.), 为目前本属唯一的种类[1], 各地俗称大救驾、散血丹、见血飞、八大王等。全株均可供入药, 具有祛瘀止痛、止血凝血、抗炎抑菌等多种功效, 同时还可抗流感病毒、抗心血管疾病、抗氧化, 是西南地区少数民族的传统药用植物, 在印度可用来代替金鸡纳霜治疗疟疾; 核果成熟时橙红或朱红色、味微甜, 果皮含麻辣成分, 是理想的天然黄色素资源植物 [2, 3]。由于飞龙掌血野生资源长期被大量采挖, 加之生境破碎化, 个体数量急剧减少。近年来对飞龙掌血的基础研究及开发利用研究在逐步加强, 相继推出以飞龙掌血为主药研制的各类新药, 正逐渐显示出该植物作为一种传统民族药的实用性、有效性及研究价值等[2]。据此可以预测在未来很长一段时间内, 中国对飞龙掌血植物的需求量会与日俱增。

《中国植物志》记载飞龙掌血在中国主产秦岭南坡以南各省区, 在西南部至东南部较常见, 最北限为陕西西乡, 南至海南岛, 东南至台湾岛, 西南可至西藏东南部[1], 主要分布于湖南、广西、贵州、云南、陕西、广东、福建、浙江和台湾等南方省区多地[4]。

从平地至海拔 2000 m 山地均有分布, 一般较常见于灌木、小乔木的次生林中, 常攀援于其它树上[5], 多生于箐沟、灌木丛、石头山和石岩缝里[1], 在石灰岩山地也较常见[6]。作为一种主要分布于次生林中的大型藤本植物, 飞龙掌血在其森林生态系统中具有与其他藤本植物相似的功能, 可通过对树木产生选择性干扰来抑制树木的生长, 其增长会降低乔木层树木的多样性, 增加了灌木层树木的多样性, 从而改变了森林群落组成及结构[7, 8]。

目前尚无关于飞龙掌血地理分布方面的系统研究, 其分布区的界线也不明确, 且分布区与气候因子的响应关系也尚不清楚。掌握飞龙掌血当代分布区及未来走向, 以及其环境主导因子, 可为该物种的资源调查、引种栽培、物种保护及合理开发等研究提供理论参考, 以减少因盲目开发利用所造成的种质资源浪费和破坏。

2 材料与方法

2.1 数据来源

飞龙掌血的地理分布地主要来源于采自中国境内的腊叶标本采集信息, 数字化腊叶标本来源于中国数

字植物标本馆 (CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)、中国科学院华南植物园标本馆 (IBSC)、中国科学院昆明植物研究所标本馆 (KUN) 和西南林业大学森林植物标本室 (SWFU) 的馆藏腊叶标本, 以及中国台湾省乡土植物数据库 (HAST, <http://www.hast.biodiv.tw/Specimens/SpecimenQueryC.aspx/>)、中国台湾省植物资讯整合查询系统 (TAI, <https://tai2.ntu.edu.tw/>) 和中国台湾省林业试验所植物标本馆 (TAIF, http://taif.tfri.gov.tw/taif_ch/)。

2.2 数据获取

通过查阅数字标本和馆藏腊叶标本, 共获取于中国境内采集的飞龙掌血标本 2079 份。剔除其中复份标本, 以及鉴定错误、分布信息模糊不清、采集地点重复的标本, 最终获得飞龙掌血有效分布点 1530 个 (图

1)。利用 Google Earth 卫星图、百度坐标拾取系统或便民经纬度坐标拾取系统等获取未记载采集地经纬度坐标采集点的经纬度坐标信息。

本研究共采用 23 个环境变量 (表 1), 从世界气象数据库 (WorldClim, <https://www.worldclim.org/>) 获取 19 个生物气候数据和海拔 (Elev) 数据, 其中未来的生物气候数据采用 2061-2080 年 SSPs126、SSPs245、SSPs370 和 SSPs585 等四种共享社会经济路径; 潜在蒸散量 (PET)、实际蒸散量 (AET) 以及干旱指数 (AI) 数据来源于国际农业研究咨询小组数据库 (CGIAR-CSI, <https://cgiarcsi.community/>)。此外, 中国国界及省级行政区划矢量地图来源于标准地图服务系统 (<http://211.159.153.75/index.html/>, 审图号 GS(2019)1822 号)。

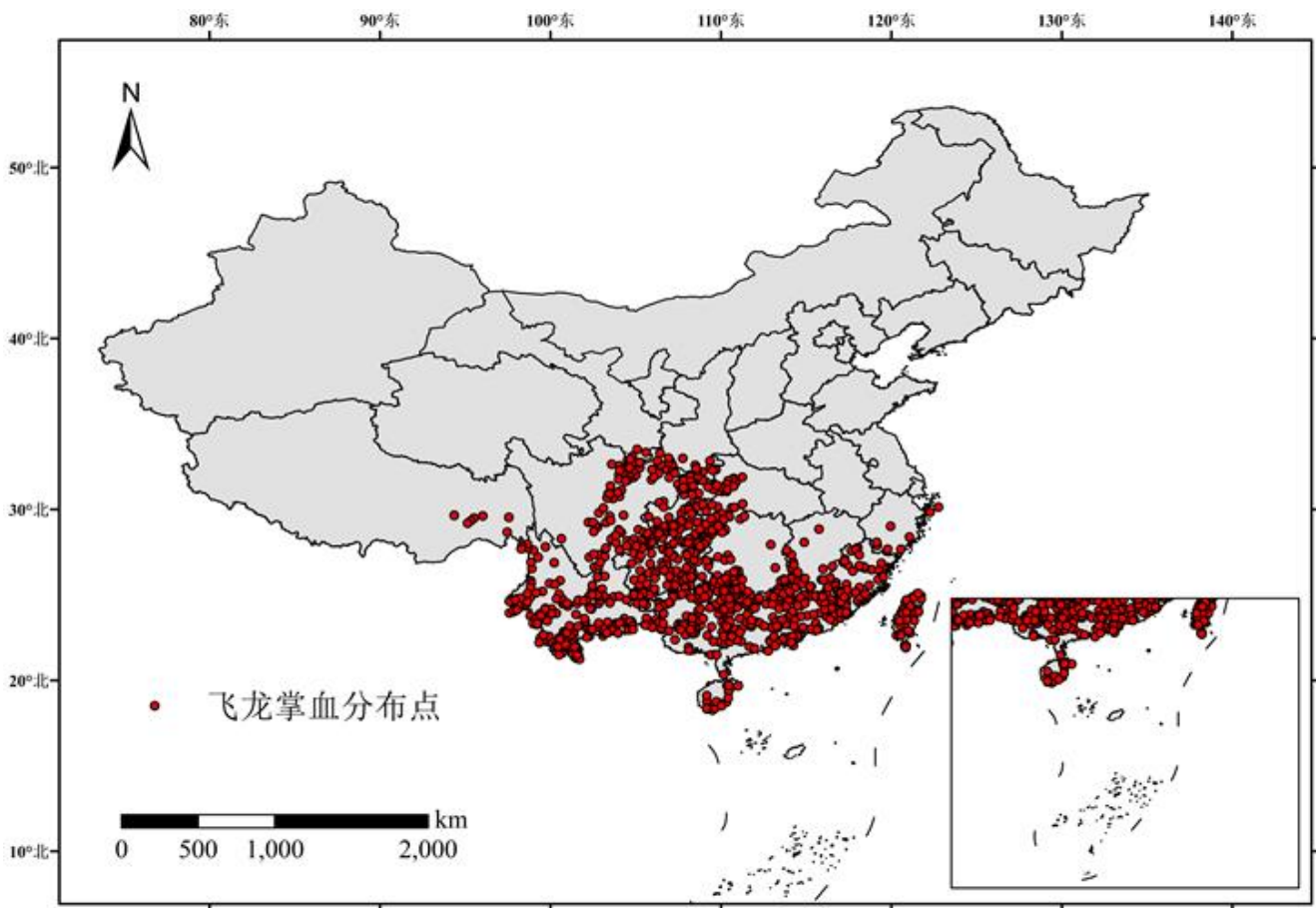


图 1 飞龙掌血在中国的分布点

Figure 1 The geographical distribution map of *Toddalia asiatica* in China

表 1 用于模拟飞龙掌血分布模型预测的 23 个环境变量
Table 1 The 23 environment variables used in the distribution model of *Toddalia asiatica*

变量 Variables	描述 Description
bio1	年均温（Annual Mean Temperature）
bio2	平均日温差（Mean Diurnal Range）
bio3	等温性（Isothermality）
bio4	季节温度变异系数（Temperature Seasonality）
bio5	极端最高温（Max Temperature of Warmest Month）
bio6	极端最低温（Min Temperature of Coldest Month）
bio7	温度年较差（Temperature Annual Range）
bio8	最湿季均温（Mean Temperature of Wettest Quarter）
bio9	最干季均温（Mean Temperature of Driest Quarter）
bio10	最暖季均温（Mean Temperature of Warmest Quarter）
bio11	最冷季均温（Mean Temperature of Coldest Quarter）
bio12	年降水量（Annual Precipitation）
bio13	最湿月降水量（Precipitation of Wettest Month）
bio14	最干月降水量（Precipitation of Driest Month）
bio15	季节降水量变异系数（Precipitation Seasonality）
bio16	最湿季降水量（Precipitation of Wettest Quarter）
bio17	最干季降水量（Precipitation of Driest Quarter）
bio18	最暖季降水量（Precipitation of Warmest Quarter）
bio19	最冷季降水量（Precipitation of Coldest Quarter）
Elev	海拔（Elevation）
AET	实际蒸散量（Actual Evapo Transpiration）
PET	潜在蒸散量（Potential Evapo Transpiration）
AI	干旱指数（Aridity index）

2.3 模型构建及精度评估

MaxEnt 生态模型被广泛应用于诸多领域的研究[9]。有研究发现，选择过多的环境变量会降低模型 MaxEnt 预测结果的精度[10, 11]，而经过筛选的环境变量则可增强 MaxEnt 模型的性能[12]。因此，为提升 MaxEnt 模型预测结果的准确性，本研究采取以下步骤对预测模型进行进一步优化：(1) 为解决分布点过近会导致预测结果过拟合从而降低预测结果准确性的问题[9]，将飞龙掌血分布点数据做去空间自相关处理，以保证 10 km×10 km 的栅格范围内仅有一个分布点，最终得到用于构建模型的分布点数据共计 857 个；(2) 为进一步提高 MaxEnt 模型的预测精度，将去空间自相关的分布点数据与 23 个环境变量输入 MaxEnt 模型进行测试，根据测试结果去除贡献率小于 1 的环境变量（表 2），并根据测试结果中正规化训练增益去除增益值小于 0.1

的变量（图 2a），得到 7 个环境变量；(3) 由于 MaxEnt 模型的精度还会受到环境变量之间存在的相关性的影响，对 7 个环境变量进行皮尔逊(Pearson)相关性分析，去除两个环境变量（相关性系数 $|r| \geq 0.8$ ）中贡献率小的环境变量[13]（图 2b）。经过上述三个步骤筛选，最终选得 6 个环境变量用于飞龙掌血适生区预测研究。

表 2 模型测试中 23 个环境变量的贡献率和置换重要值
Table 2 The percent contribution (%) and permutation importance of 23environmental variables in distribution modelling test

变量 Variable	贡献率 Percent contribution (%)	置换重要值 Permutation importance
bio18	65.1	19.1
bio11	10	1.3
bio3	9	12.6
bio15	6.6	7.7
bio6	3	0.4
bio7	2.5	35.7
aet	1	0.3
bio14	0.8	2.3
ai	0.4	5.5
bio4	0.3	1
bio2	0.3	0.3
pet	0.2	5.4
bio9	0.2	0
bio19	0.1	1
bio10	0.1	3.3
bio16	0.1	0.2
bio1	0.1	1.7
bio12	0.1	1.3
bio5	0	0.2
elev	0	0.6
bio8	0	0.1
bio17	0	0.1
bio13	0	0

本研究验证 MaxEnt 模型的精度是依据 ROC（receiver operating characteristic curve）曲线分析。ROC 曲线基于非阈值依赖判断模型精度，被认为是最佳评价指标[14-16]。ROC 曲线下与坐标轴间的面积为 AUC（area under curve）值，其范围为 0-1 [9, 15]。AUC 值越大，离随机分布的距离越远，其环境变量与预测物种地理分布间的相关性越大，说明该模型的预测效果越好；反之，则表明模型的预测效果越差[15]。如 AUC 值在 0.5-0.6 之间，说明模型的模拟效果不理想，0.6-0.7 表示拟合效果极差，0.7-0.8 表示拟合效果一般，0.8-0.9

表示模拟效果较好, 若 0.9-1.0 表示模拟效果很好[9, 17-19]。本研究中优化后的模型 AUC 值为 0.966 > 0.9

(图 2c), 表明此模型下的预测结果好, 拟合效果佳, 用于模拟飞龙掌血适生区的精度较高。

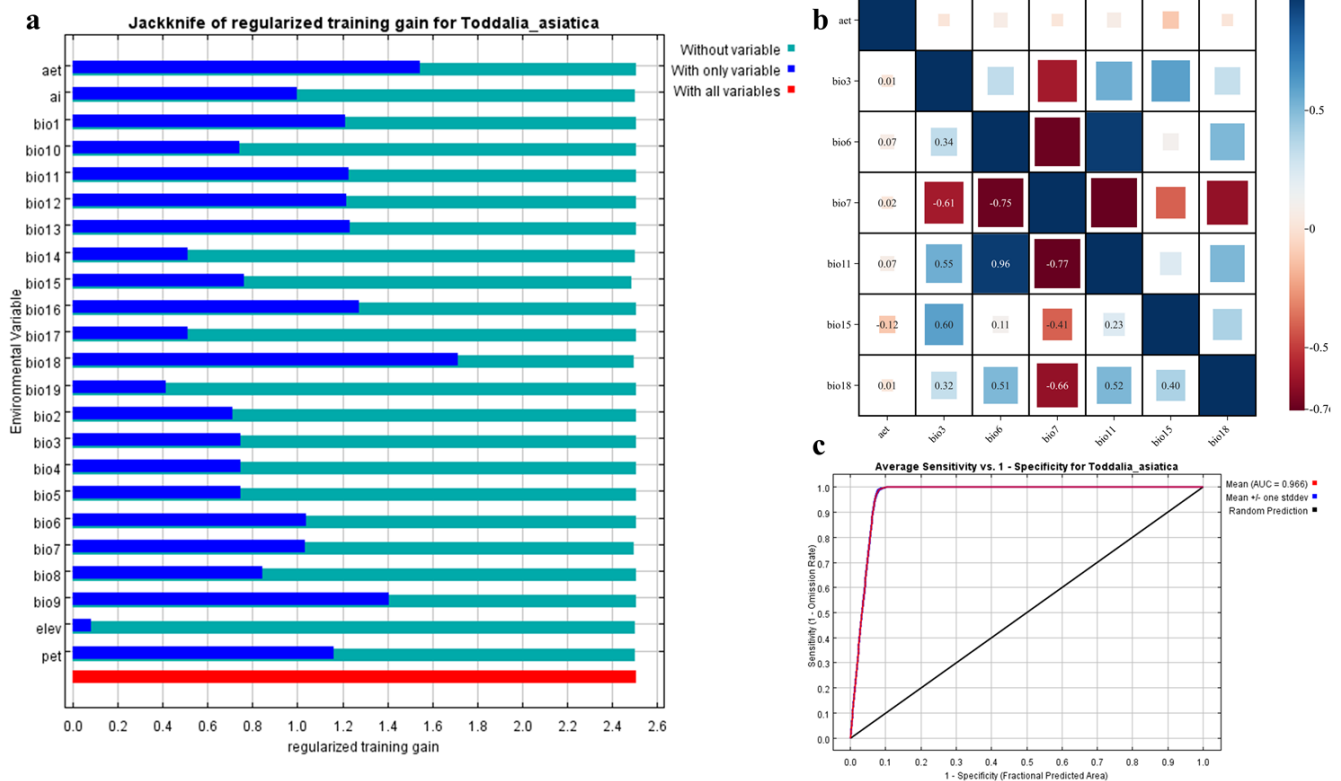


图 2 MaxEnt 模型的优化

(a) 23 环境变量的重要性分析; (b) 8 个环境变量的皮尔逊相关性分析 (该图通过 Chiplot web: <https://www.chiplot.online/>制作); (c) 筛选后的 7 个环境变量构建模型的 ROC 曲线和 AUC 值

Figure 2 Optimization of the MaxEnt model

(a) Importance analysis of 23 environmental variables based on Jackknife test; (b) Pearson correlation analysis of 8 environmental variables. Created by Chiplot web (<https://www.chiplot.online/>); (c) Receiver operating characteristic (ROC) curve and AUC values of the MaxEnt model using seven selectively environmental variables

2.4 适生区划分

基于 MaxEnt 模型输出的适生指数(P)范围为 0-1, 利用 ArcMap 10.8 软件的重分类工具将其适生区等级划为 4 个等级, 即高适生区 ($P \geq 0.6$)、中适生区 ($0.4 \leq P < 0.6$)、低适生区 ($0.2 \leq P < 0.4$)、非适生区 ($P < 0.2$) [20], 最终生成飞龙掌血在中国的潜在适生区分布图。

3 结果与分析

3.1 飞龙掌血的当前潜在适生区

依据 MaxEnt 模型预测结果表明, 飞龙掌血于当前

气候条件下在中国的潜在适生区的北界与热带亚热带季风气候界线基本一致, 主要位于秦岭-淮河以南各地区, 占全国陆地面积 24.62% (图 3a)。其中高适生区占全国总面积 12.68%, 包括广东、广西、贵州、重庆和福建的绝大部分区域, 以及云南、四川、湖南、湖北、西藏和台湾等地的部分区域。依据预测结果, 广西绝大部分区域的环境非常适合飞龙掌血生长, 虽然广西西南部的崇左市目前尚无飞龙掌血分布记录, 结果说明该地区极为适应飞龙掌血生长, 可以考虑作为飞龙掌血的潜在种植区。其次, 中适生区面积占全国总面积的 6.06%, 主要分布于云南的北部和西南部、四川的中部和南部、陕西南部、湖北西部、湖南中部、

安徽南部、江西中南部、江苏省东南部、浙江省西南部、海南省中北部以及西藏南部和台湾省的部分区域。在这些区域中，安徽南部目前尚未发现飞龙掌血的分布。说明在这两个地区存在飞龙掌血居群的可能性较高，可能的原因是标本数据采集不全面、标本采集工作未覆盖或人为破坏导致暂时未有标本记录。此外，低适生区仅占全国面积的 5.89%，涵盖了秦岭-淮河以

南除中适生区和高适生区外的绝大部分地区，主要位于湖南、湖北，以及安徽、浙江和江苏。飞龙掌血在这些地区出现的可能性较低，但也不排除有少量居群分布的可能。而非适生区基本覆盖了青藏高原东南沿线至秦岭-淮河线以北的地区，在全国占有较大面积。这些地区的年降雨量少于 800 mm，最冷月平均气温低于 0℃，气候条件基本不适合飞龙掌血的生长发育。

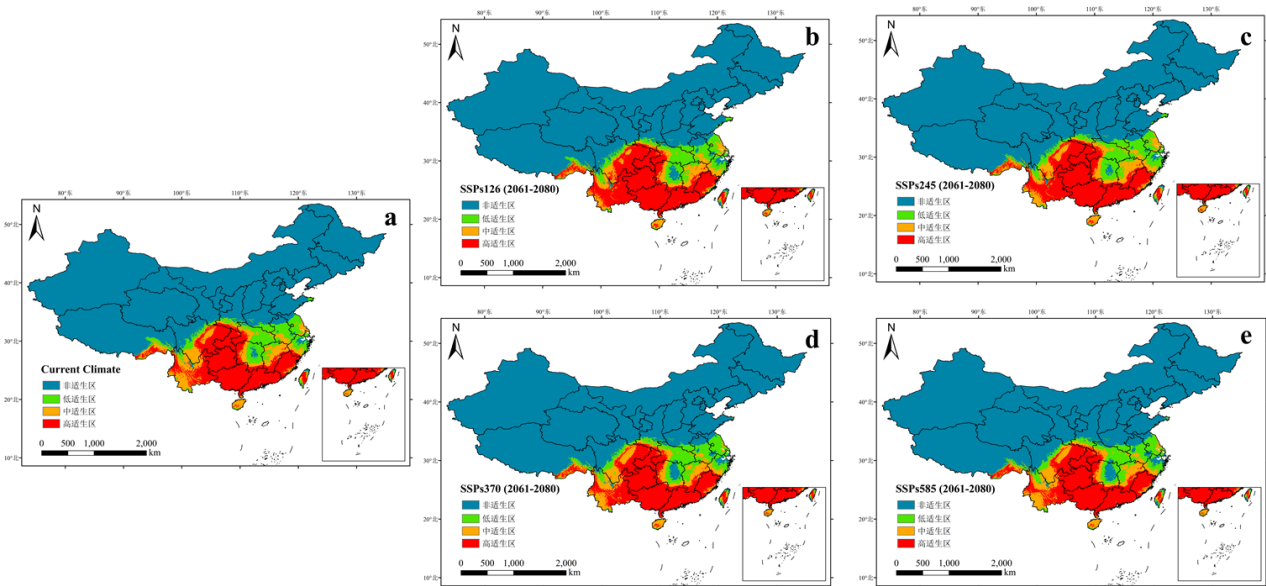


图 3 基于 MaxEnt 模型在不同气候情景下飞龙掌血在中国的潜在分布区

Figure 3 The potential suitable areas of *Toddalia asiatica* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model

3.2 未来潜在适生区及变化

根据飞龙掌血在 2061-2080 年不同气候情境下分布区预测结果，未来飞龙掌血在中国的潜在适生区范围与当前气候环境下的潜在适生范围基本一致，主要分布于中国南方绝大部分地区，但在一定区域内有不同程度的迁移，且呈现出破碎化的趋势（图 3）。根据不同气候情景下飞龙掌血适生区面积的变化表明，在未来不同气候情景下飞龙掌血的潜在总适生区面积均呈现出不同程度的减少，但在个别气候情境下高适生区仍有少量增加。与当前气候条件下的潜在适生区相比，飞龙掌血在 SSPs245 情景下的适生区面积变化最小，而在 SSPs585 情景下的变化为最大。在 SSPs126 情景下总适生区面积减少了 0.62%，其中，高适生区面积增加了 0.92%，而中适生区和低适生区面积则分别减少了 1.20%和 0.34%；在 SSPs245 情景下总适生区面积增加了 0.30%，其中，高适生区面积增加了 0.45%，中

适生区和低适生区面积则分别减少了 0.71%和 0.04%；在 SSPs370 情景下总适生区面积减少了 1.01%，其中，高适生区、中适生区和低适生区面积则分别减少了 0.22%、0.68%和 0.11%；在 SSPs585 情景下总适生区面积减少了 1.37%，其中高适生区、中适生区和低适生区面积分别减少了 0.48%、0.50%和 0.40%（表 3，图 3）。总之，与当前环境条件下的潜在适生区相比飞龙掌血在未来环境条件下的潜在总适生区、中适生区及低适生区均表现为减少趋势，而高适生区在 SSPs126 和 SSPs245 情境下出现少量增加现象。随着在 SSPs126、SSPs245、SSPs370 和 SSPs585 等四个情景下的碳排放量不断增加，即随着温度增加，飞龙掌血总适生区面积的变化为 SSPs585 > SSPs370 > SSPs126 > SSPs245。

通过分析飞龙掌血适生区的变化，进一步分析在未来气候情景下飞龙掌血潜在适生区的变化。结果表明，与当前气候条件相比，在未来不同气候情景下飞龙掌血潜在适生区在较大区域内仍保持不变，该区域主要为飞

龙掌血的潜在高适生区，包括重庆、贵州、广西、广东和福建在内的大部分区域，以及云南、四川、湖南、湖北、江西、陕西、海南和台湾的部分区域。此外，在未来气候情境下，维持稳定区域的面积变化不大，但也呈现出逐渐减少的趋势；同时也存在不同程度的收缩和扩张，扩张的面积也随碳排放的增加而减少，收缩的面积在 SSPs126 和 SSPs245 情境下差异不大，但在 SSPs370 和 SSPs585 情境下收缩逐渐增多（图 4）。

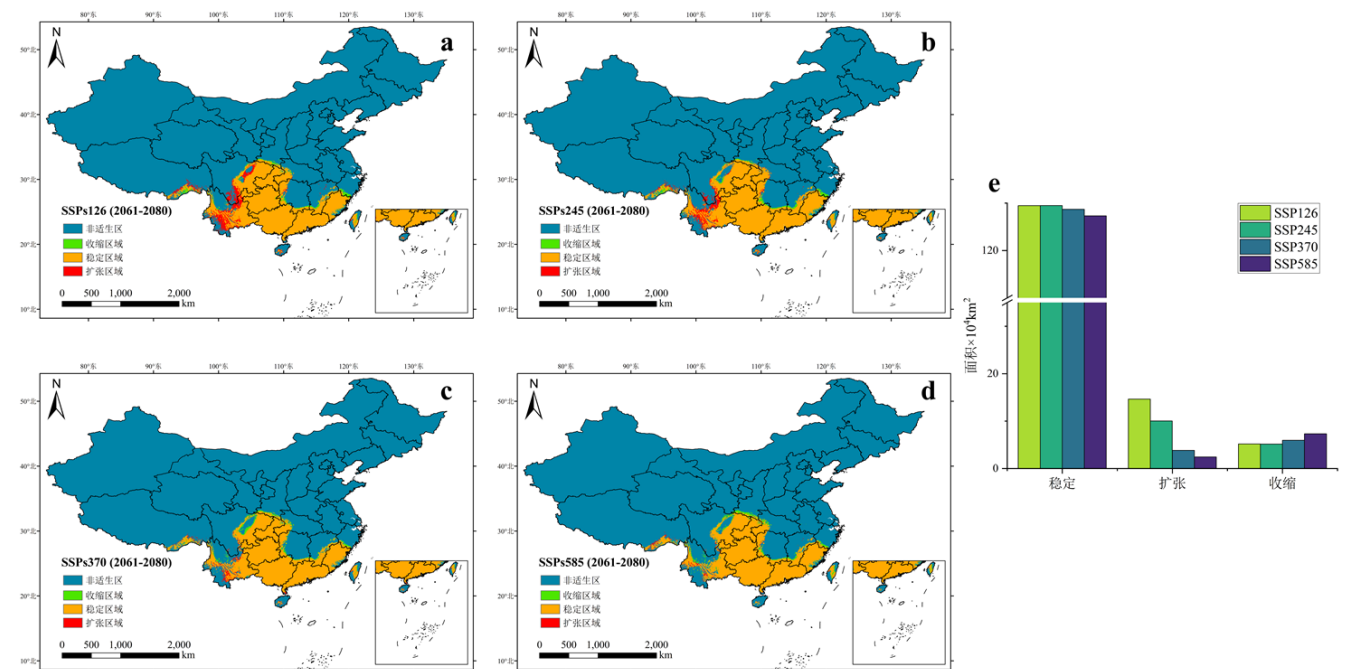


图 4 不同气候情景下飞龙掌血在中国的潜在适生区变化

Figure 4 Changes of suitable areas of *Toddalia asiatica* under different climate change scenarios

表 3 基于不同气候条件下飞龙掌血潜在适生区面积及变化

Table 3 Area and variation in the suitable area predicted potentially suitable area of *Toddalia asiatica* based on different climate

气候情景 Scenario	高适生区			中适生区		
	面积 (×10 ⁴ km ²) High suitable area	占比 (%) Proportion	变化 (%) Change	面积 (×10 ⁴ km ²) Medium suitable area	占比 (%) Proportion	变化 (%) Change
Current	121.8715	12.68	-	58.1997	6.06	-
SSP126	130.7188	13.60	0.92	46.6458	4.85	-1.20
SSP245	126.1910	13.13	0.45	51.4045	5.35	-0.71
SSP370	119.7413	12.46	-0.22	51.6372	5.37	-0.68
SSP585	117.2969	12.20	-0.48	53.4306	5.56	-0.50

气候情景 Scenario	低适生区			总适生区		
	面积 (×10 ⁴ km ²) Low suitable area	占比 (%) Proportion	变化 (%) Change	面积 (×10 ⁴ km ²) Total suitable area	占比 (%) Proportion	变化 (%) Change
Current	56.5920	5.89	-	236.6632	24.62	-
SSP126	53.3299	5.55	-0.34	230.6945	24.00	-0.62
SSP245	56.2170	5.85	-0.04	233.8125	24.33	-0.30
SSP370	55.5677	5.78	-0.11	226.9462	23.61	-1.01
SSP585	52.7656	5.49	-0.40	223.4931	23.25	-1.37

3.3 适生区质心迁移

对飞龙掌血在未来不同气候条件下的迁移趋势进行分析,结果表明在当前气候条件下,飞龙掌血适生区的质心位于贵州省黎平县(26.391°N, 108.783°E)。与当前气候条件相比,在未来 2061-2080 年的气候条件下飞龙掌血适生区质心将向西南方向迁移。其中,

在 SSPs585 情境下的迁移距最小,约为 23 km,质心坐标仍在贵州省黎平县内(26.249°N, 108.653°E);在 SSPs126 情景下的迁移距离最远,约为 83 km,质心坐标将迁移至贵州省雷山县(26.319°N, 108.095°E);在 SSPs245 和 SSPs370 情境下迁移距离分别约为 65 km 和 25 km,质心坐标分别迁移至贵州雷山县(26.312°N, 108.252°E)和榕江县(26.215°N, 108.639°E)(图 5)。

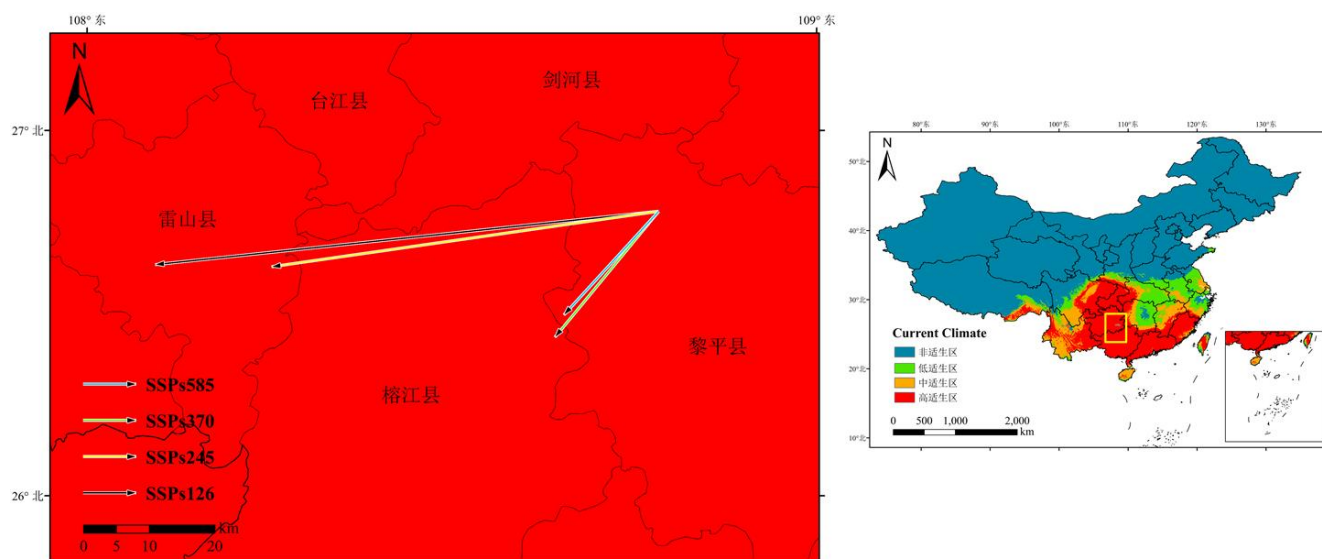


图 5 在未来不同气候条件下的飞龙掌血分布区质心迁移

Figure 5 The centroid movement of distribution area of *Toddalia asiatica* under different future climatic conditions

3.4 主导环境因子分析

采取 Jackknife (刀切法) 模块给出的各环境变量分析对目标物种分布影响的重要性,筛选出限制飞龙掌血分布的主导环境因子。图 6a 中横坐标代表各环境变量对飞龙掌血分布的贡献程度,纵坐标代表各环境变量;红色代表所有变量的贡献;蓝色条带代表该变量对飞龙掌血分布的贡献,该条带越长,说明该变量越重要;绿色条带长度代表除该变量以外,其他所有变量组合的贡献,绿色条带越短,代表该变量含有其他变量不具有的信息越多[21]。基于刀切法测试当仅有单个环境变量时, bio18 (最暖季降水量)、AET (实际

蒸散量)和 bio11 (最冷季均温)在正规化增益最高。结果表明,这 3 个环境变量在预测飞龙掌血的潜在分布区时较其他环境变量贡献更多有效的信息,并且对于飞龙掌血的分布具有巨大的影响(图 6a)。

在 6 个环境变量中, bio18 (最暖季降水量, 65.6%)、bio3 (等温性, 10.6%) 和 bio11 (最冷季均温, 10.2%) 这 3 个环境变量在飞龙掌血的潜在分布区预测中具有重要作用,这 3 个环境变量累计贡献率达到 86.4%。结合对刀切法和贡献率分析表明, bio18 (最暖季降水量)和 bio11 (最冷季均温)是影响飞龙掌血分布的主要环境因子(图 6b-c)。这 2 个因子表明了影响飞龙掌血分布的因素主要为夏季的降水量和冬季的温度。

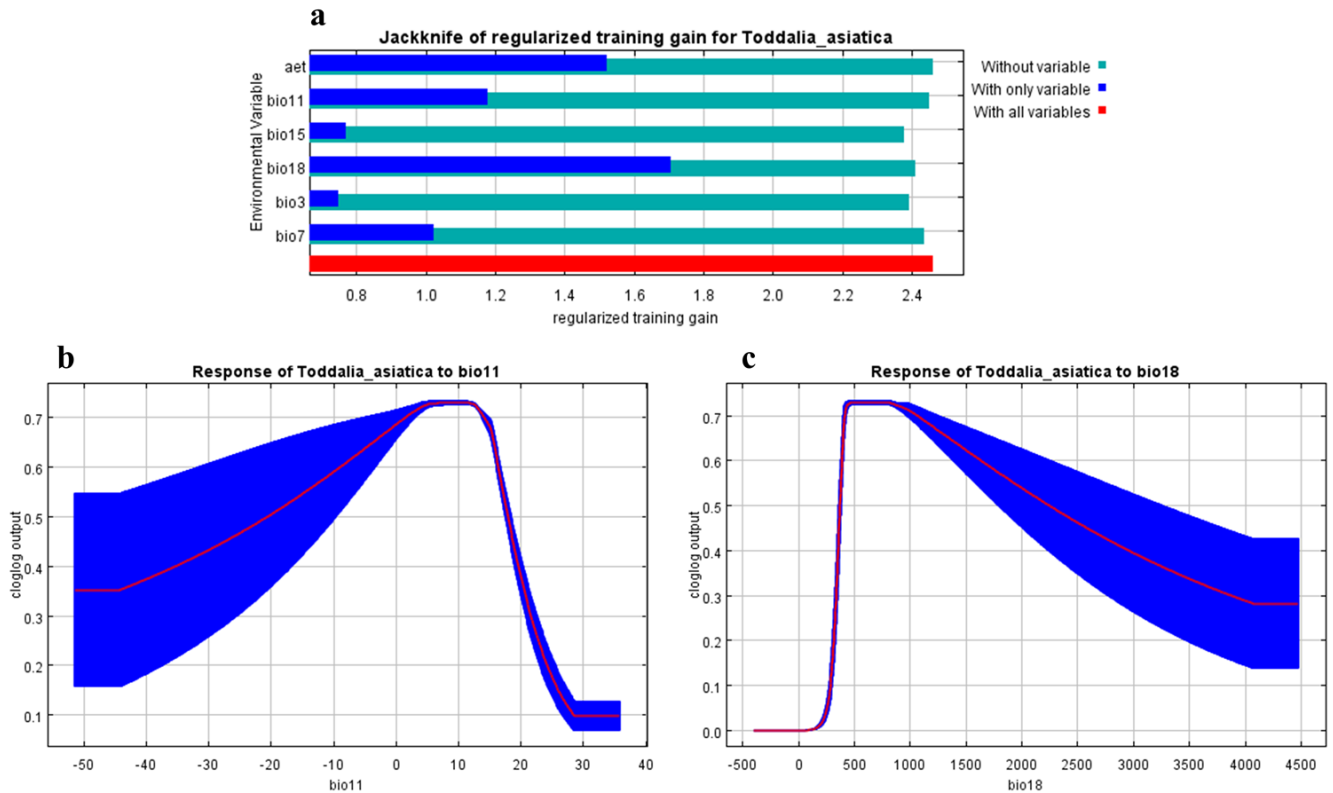


图 6 影响飞龙掌血分布的限制性因子分析

(a) 正规化训练增益图; (b-c) 响应曲线

Figure 6 Analysis of factors limiting the distribution of *Toddalia asiatica*

(a) Jackknife test of regularized training gain contribution of seven selectively environmental variables and their importance for habitat suitability prediction of *T. asiatica*; (b-c) Response curves of seven selectively environmental variables used in the predictive distribution modeling of *T. asiatica*

4 讨论

4.1 模型精度评估

有研究指出, MaxEnt 模型的核心问题是环境变量的选择[22], 许多研究在建立模型前会进行相关性分析并除去共线性强的部分因子, 以此来减少影响[23-25], 但同时也可能导致信息遗漏。保留所有环境因子尽管共线性较强, 需进行综合评价, 但仍要保留尽可能多的原始信息。此外, 预测物种潜在分布是基于一个理想的状态, 即排除外在因素的干扰, 如人为活动、物竞天择等, 如果能考虑这些非生物因素的影响, 则可大大提高预测结果的准确性[26, 27]。本研究获取大量飞龙掌血的分布数据, 包括有 1530 个有效分布点, 再依据 ROC 曲线分析来验证 MaxEnt 模型的精度, 本模型的 AUC 为 0.966, 大于 0.95, 具有较高的可行性

[28]。因此, 本研究应用 MaxEnt 生态学模型来用于预测飞龙掌血在中国的潜在适生区, 其结果较为准确可靠。

4.2 评估潜在种植区

本研究通过对预测结果与实际地理分布进行对比分析发现, 预测的当前潜在分布区与实际收集到的分布数据有一定差异。如依据预测结果, 广西全区范围内应分布飞龙掌血, 但实际广西区西南部的崇左市目前没有任何采集点, 可在该区域进行实地考察, 综合考虑后可将该地区划分为飞龙掌血的潜在种植区。

4.3 限制性因子分析

在全球范围内, 飞龙掌血属植物的适宜生境为热带亚热带地区, 其年降水量约为 500 mm-3 500 mm 左

右、年均温大于 14℃, 并提出中国当前飞龙掌血的中高适生区主要集中在华南地区、西南地区东南部、华中地区西部和华东地区南部等热带亚热带季风气候地区, 其高适生区多数位于最暖季降水量 550 mm-1100 mm、年降水量 1300 mm-1900 mm 且最冷季均温 4-13℃ 的地区, 其生长环境年均温为 14℃-28℃、年降水量 500 mm-3500 mm [4]。本研究结果支持此观点, 结合中国热带亚热带季风气候界线可推断, 飞龙掌血的分布主要与热带、亚热带季风气候区有关, 其地理分布与降水量、温度关系密切。Nabwami 等[29]研究了东非维多利亚湖盆地中飞龙掌血属植物的自然栖息地特征, 发现该属植物的栖息地通常位于河流和森林边缘。值得注意的是, 飞龙掌血在海拔低于 3 m 的热带亚热带季风气候区域极少有分布, 如江苏、安徽、上海等地。生境条件不符合其生存是原因之一, 但推测人为活动频繁干扰也是造成在当地没有分布的重要原因。

Gregor 通过研究欧洲始新世至上新世地层的飞龙掌血属植物种子化石分布数据, 发现该属植物在中新世的捷克、德国、波兰和葡萄牙等地发展鼎盛, 在上新世的法国和荷兰仍然存在; 后由于气候逐渐寒冷, 到上新世晚期时就已在欧洲灭绝, 并据此推测飞龙掌血属可能是从欧洲分别向东和向南退缩到上新世的欧洲、亚洲及非洲的亚热带地区和湿润地区。说明飞龙掌血属植物的分布区会随着气候的改变而迁移, 且受降雨量和温度的影响较大[4]。Li 等也指出, 目前发现的飞龙掌血种子化石主要来源于欧洲始新世至上新世时期的化石, 在现代则主要在西非、南亚、东南亚和东亚的热带和亚热带地区[30]。在中国云南首次发现的飞龙掌血属植物化石标本为在亚洲的第一份记录, 表明飞龙掌血属的地理分布可能至少从中新世开始就已从欧洲逐渐扩展到了亚洲[30]。飞龙掌血属植物在世界范围内主要分布于西非至东亚 (30°S-30°N) 这一范围内, 包括西非、南非、马达加斯加、印度、泰国、越南、菲律宾、中国及日本等地区[4]。本研究重新界定了飞龙掌血在中国的分布范围, 主要分布于云南、广西、广东、贵州、四川、福建、重庆、湖南和台湾等省市区, 基本属于热带亚热带季风气候区, 这与 Gregor 关于飞龙掌血在中国的分布范围研究结果基本一致[4]。

4.4 未来的迁移方向

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在其第五次报告中指

出, 目前全球气候正在变暖[31], 许多学者通过研究后发现全球变暖所导致的显著变化正在发生[32], 其中变化较为显著的是全球降雨格局的改变[33]。气候变化会影响物种分布格局, 水热条件也会严重限制植物的分布[34, 35], 降雨格局的改变和温度的升高会导致植物分布区的迁移[36, 37]。有研究指出制约闽楠 [*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yen C. Yang] 的地理分布变迁的重要气候因子可能是温度和降水量的变化[38]。受全球变暖趋势影响, 许多植物会向高纬度地区迁移[39], 物种分布区在未来会有不同程度的减少[40, 41], 如气候变暖是观光木 *Tsoongiodendron odorum* Chun 分布区在未来大幅缩减的主要因素[42]。Ni 研究预测中国在 80 年后均温将上升 0.6℃-6.3℃ 不等[43]; 在未来环境下, 中国甘肃、陕西等地的气候将由暖干向暖湿变化[44]。在诸多类似研究中, 研究物种大多则向东北方向迁移, 但本研究发现飞龙掌血在中国的适生区出现向西南方向迁移的趋势。本研究结果表明, 影响飞龙掌血分布的限制性因子为温度和降水, 其中 bio18 (最暖季降水量) 和 bio11 (最冷季均温) 为限制飞龙掌血未来分布的主要环境因子, 当以高适生区的适生概率 0.6 作为阈值, bio18 (最暖季降水量) 在约 400 mm-1700 mm, bio11 (最冷季均温) 在约 -5℃ 至 18℃ 时最适宜飞龙掌血生长。随着全球气候变暖, 温度逐渐升高, 可能当前最冷季均温和最暖季降水量在未来难以满足飞龙掌血的适生要求, 因此其适生区向南迁移; 又可能由于东南沿海地区最暖季降水量超过了其适合生范围, 综合以上飞龙掌血的生长条件, 推测其适生区向西南方向迁移。结果显示, 虽然在 SSPs126 和 SSPs245 气候情境下高适生区有少许增加, 但总适生区面积却减少, 飞龙掌血的高适生区呈破碎化态势。这也说明在未来, 野生飞龙掌血的资源储量还会面临因其高适生区面积的严重收缩而减少的风险。为满足生产和物种保护需求, 可依据其潜在适生区制定其合理科学的资源保护和开发计划。

5 结论

飞龙掌血是具有较高价值的资源植物, 近年来随着对飞龙掌血的基础研究及应用研究的逐步加强, 预计在将来中国对飞龙掌血植物的需求量会与日俱增。本研究利用优化后的 MaxEnt 模型对飞龙掌血的潜在适生区分布进行预测, 旨在了解飞龙掌血在中国的潜在分布区及其在不同气候情景下适生区范围的变化。

结果表明,在当前气候情境下,飞龙掌血在中国的潜在适生区范围与热带亚热带季风气候界线基本一致,适生区主要分布于中国南部各地,占全国面积的24.62%;在未来气候情景下,飞龙掌血在中国的潜在适生区有向西南方向迁移的趋势,且呈现出破碎化的态势。与当前气候条件相比,在 SSPs126 和 SSPs245 情景下飞龙掌血高适生区面积呈现递减式增加,而在 SSP370 和 SSP585 情景下飞龙掌血的高适生区面积逐渐减少,出现该现象可能与碳排放增加而引起的全球气候变暖有关。飞龙掌血扩张和收缩的适生区主要分布于整个适生区的边缘地区,保持不变的区域主要为高适生区。bio18(最暖季降水量)和 bio11(最冷季均温)两个气候因子是影响中国飞龙掌血地理分布形成的主要原因和差异来源,即限制中国飞龙掌血分布的主导环境变量因子。本研究结果可为药用植物飞龙掌血的物种保护、资源调查及引种栽培提供理论参考。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会 [M]. 中国植物志, 第 34 卷第 2 册. 北京: 科学出版社, 1997: 182-184.
- [2] 徐小勤, 朱华, 邓婷元, 等. 瑶药飞龙掌血药理作用研究进展[J]. 壮瑶药研究, 2023(3): 54-56.
- [3] 中国科学院昆明植物研究所 [M]. 云南植物志, 第六卷. 北京: 科学出版社, 1995: 740-742.
- [4] Gregor H J. Systematics, biostratigraphy and paleoecology of the genus *Toddalia* Jussieu (Rutaceae) in the European tertiary [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1979, 28(3-4): 311-363.
- [5] 高宝莼, 谭仲明. 四川植物志编辑委员会, 四川植物志 (第九卷, 种子植物) [M]. 成都: 四川人民出版社, 1989: 138-140.
- [6] 王小军, 谢小伟, 刘自刚. 小陇山林区 20 种木本野生新记录植物 [J]. 甘肃林业, 2018(5): 33-35.
- [7] 唐一思, 石慰, 曾文豪, 等. 广西天然林中藤本植物区系组成及系统发育多样性 [J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8750-8757.
- [8] 宋述灵. 官山大样地木质藤本对树木生长与群落结构的影响 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [9] Shi X D, Wang J W, Zhang L, et al. Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model [J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110093.
- [10] Morales N S, Fernández I C, Baca-González V. MaxEnt's parameter configuration and small samples: Are we paying attention to recommendations? A systematic review [J]. PeerJ, 2017, 5(2): e3093.
- [11] Zhu G P, Qiao H J. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [12] Pan S, Peng D L, Li Y M, et al. Potential global distribution of the guava root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* under different climate change scenarios using MaxEnt ecological niche modeling [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(7): 2138-2150.
- [13] Khan A M, Li Q, Saqib Z, et al. MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important Chilgoza Pine (*Pinus gerardiana* Wall.) in South Asia [J]. Forests, 2022, 13(5): 715.
- [14] Wiley E O, Mcnyset K M, Peterson A T, et al. Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm [J]. Oceanography, 2003, 16(3): 120-127.
- [15] Broennimann O, Treier U A, Muller S H. Evidence of climatic niche shift during biological invasion [J]. Ecology Letters, 2007, 10(60): 701-709.
- [16] 段义忠, 鱼慧, 王海涛, 等. 孑遗濒危植物四合木 (*Tetraena mongolica*) 的地理分布与潜在适生区预测 [J]. 植物科学学报, 2019, 37(3): 337-347.
- [17] Zhang Y, Tang J, Ren G, et al. Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on MaxEnt model [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 16545.
- [18] Kong F, Tang L, He H, et al. Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using Maxent [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 34655-34663.
- [19] Ye X Z, Zhang M Z, Yang Q Y, et al. Prediction of suitable distribution of a critically endangered plant *Glyptostrobos pensilis* [J]. Forests, 2022, 13(2): 257.
- [20] 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.
- [21] 林丽丽. 茶条槭种群表型差异研究及潜在分布区预测 [D]. 太原: 山西师范大学, 2015.
- [22] 马青江, 孙操稳, 张乐英, 等. 东亚四照花群体中国潜在适生区预测研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43(5): 135-140.
- [23] 王雨生, 王召海, 邢汉发, 等. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1230-1237.

- [24] 唐燕, 赵儒楠, 任钢, 等. 基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23-32.
- [25] 樊玉科, 任菊, 王润龙, 等. 气候变化背景下白皮松在中国潜在适宜分布预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10): 1719-1730.
- [26] 罗楚滢, 余济云, 唐子朝. 基于 SSPs 气候场景的濒危植物银杉潜在分布区预测[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(1): 161-168.
- [27] 周杰, 王旭虎, 杜维波, 等. 气候变化背景下的天山云杉潜在分布区预测 [J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1167-1176.
- [28] 叶利奇, 张伟皓, 叶兴状, 等. 基于 Maxent 模型的珙桐潜在分布预测及其重要影响因子分析 [J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(5): 604-612.
- [29] Nabwami J, Tabuti J, Bekunda M A. Characterization of the natural habitat of *Toddalia asiatica* in the Lake Victoria basin: Soil characteristics and seedling establishment [A]. In 8th African Crop Science Society Conference, El-Minia, Egypt, 2007, pp: 2057-2061.
- [30] Li Y, Awasthi N, Yang J, et al. Fruits of *Schima* (Theaceae) and seeds of *Toddalia* (Rutaceae) from the Miocene of Yunnan Province, China [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2013(193): 119-127.
- [31] IPCC. Summary for Policymakers/Climate Change 2013: The physical science basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [32] 方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 全球变暖、碳排放及不确定性 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10): 1385-1395.
- [33] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change // Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment. Summary for Policymakers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [34] Pearson RG, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? [J]. Global Ecology & Biogeography, 2003, 12(5): 361-371.
- [35] R ó S D, Penas Á. Potential distribution of semi-deciduous forests in Castile and Leon (Spain) in relation to climatic variations [J]. Plant Ecology, 2006, 185(2): 269-282.
- [36] Chapin III F S, Zavaleta E S, Eviner V T, et al. Consequences of changing biodiversity [J]. Nature, 2000, 405(6783): 234-242.
- [37] Hamann A, Wang T L. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia [J]. Ecology, 2006, 87(11): 2773-2786.
- [38] 肖建华, 丁鑫, 蔡超男, 等. 闽楠 (*Phoebe bournei*, Lauraceae) 地理分布及随气候变化的分布格局模拟. 生态学报, 2021, 41(14): 5703-5712.
- [39] Sekercioglu C H, Schineider SH, Fay J P, et al. Climate change, elevational range shifts, and bird extinctions [J]. Conservation Biology, 2007, 22(1): 140-150.
- [40] 吴建国. 气候变化对我国 7 种植物潜在分布的影响 [J]. 广西植物, 2011, 31(5): 595-607, 694.
- [41] Engler R, Randin C F, Thuiller W, et al. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe [J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2330-2341.
- [42] 胡苑, 张志勇, 陈陆丹, 等. 末次盛冰期以来观光木的潜在地理分布变迁 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(1): 44-55.
- [43] Ni J. Impacts of climate change on Chinese ecosystems: Key vulnerable regions and potential thresholds [J]. Regional Environmental Change, 2011, 11(1): 49-64.
- [44] 李双双, 延军平, 杨蓉, 等. 气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1552-1559.