热带亚热带植物学报
JOURNAL OF TROPICAL AND SUBTROPICAL BOTANY

基于Maxent模型预测滇黄精在中国的潜在适生区

蒙真铖, 田琴, 只佳增, 朱文, 杜浩, 王树明, 张勇, 腊贵晓, 杨铁钢

引用本文:
蒙真铖, 田琴, 只佳增, 等. 基于Maxent模型预测滇黄精在中国的潜在适生区[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(6): 620–630.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11926/jtsb.4950

热带亚热带植物学报 2025, 33(6): 620 ~ 630
Journal of Tropical and Subtropical Botany

基于 Maxent 模型预测滇黄精在中国的潜在适生区

蒙真铖[1], 田琴[1], 只佳增[1], 朱文[1], 杜浩[1], 王树明[1], 张勇[1], 腊贵晓[2], 杨铁钢[2*]

(1. 云南省红河热带农业科学研究所, 云南 河口 661300；2. 河南省农业科学院经济作物研究所, 郑州 450008)

摘要：滇黄精(*Polygonatum kingianum*)作为云南重要的道地药材之一，因过度采挖，野生资源日益匮乏乃至枯竭，而人工栽培研究相对不足，严重影响到滇黄精资源保护和利用，因而预测其潜在适生区空间变化具有重要意义。该研究利用 Maxent 模型和地理信息系统，结合 63 条滇黄精在中国的有效分布记录和 15 个环境变量，预测滇黄精在中国的潜在适生区。结果表明，受试者工作特征曲线下面积为 0.971，说明模型预测能力好；滇黄精适生区主要集中在我国云南、贵州、广西、四川、重庆等西南地区；年降水量、最干季降水量、海拔、最冷月份最低温度对滇黄精地理分布起关键作用；未来时期滇黄精适宜生境重心逐渐向贵州方向转移。这为滇黄精就地、迁地保护及人工高效优质栽培基地选址提供理论依据，对滇黄精种质资源保护和利用具有重要的现实意义。

关键词：滇黄精；Maxent 模型；中国；潜在适生区

doi: 10.11926/jtsb.4950 CSTR:32235.14.jtsb.4950

Prediction of Potential Habitat Area of *Polygonatum kingianum* in China Based on Maxent Model

MENG Zhencheng[1], TIAN Qin[1], ZHI Jiazeng[1], ZHU Wen[1], DU Hao[1], WANG Shuming[1], ZHANG Yong[1], LA Guixiao[2], YANG Tiegang[2*]

(1. *Honghe Tropical Agricultural Institute of Yunnan*, Hekou 661300, Yunnan, China; 2. *Institute of Chinese Herbal Medicines*, *Henan Academy of Agricultural Sciences*, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: *Polygonatum kingianum*, as one of the important traditional Chinese medicinal materials in Yunnan, has seen a decline in its wild resources due to over-harvesting, and the research on its artificial cultivation is relatively insufficient, which has seriously affected the protection and utilization of its resources. Therefore, predicting the spatial changes of its potential suitable habitat is of great significance. The potential suitable habitat of *P. kingianum* in China was predicted by using Maxent model and geographic information system, combined with 63 valid distribution records in China and 15 environmental variables. The results showed that the area under the receiver operating characteristic curve was 0.971, indicating that the model had good predictive ability; the suitable habitat of *P. kingianum* was mainly concentrated in the southwest region of China, including Yunnan, Guizhou, Guangxi, Sichuan and Chongqing; annual precipitation, precipitation in the driest quarter, altitude and the lowest temperature in the coldest month played a key role in the geographical distribution of *P. kingianum*; in the future, the center of the suitable habitat of *P. kingianum* will gradually shift towards Guizhou. This would be provided a theoretical basis for the *in-situ* and *ex-situ* conservation of *P. kingianum* and the selection of artificial high-efficiency and high-quality cultivation bases, and has important practical significance for the protection and

收稿日期: 2024-07-24 **接受日期:** 2024-12-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1601808)资助
This work was supported by the National Key Research and Development Plan Project (Grant No. 2022YFD1601808).
作者简介: 蒙真铖(1985 年生)，男，硕士，助理研究员，主要从事植物种质资源利用与繁育。E-mail: mengzhencheng0107@163.com
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tgha@163.com

utilization of its germplasm resources.

Key words: *Polygonatum kingianum*; Maxent model; China; Potential suitable habitat

滇黄精(*Polygonatum kingianum*)是《中国药典》(2015 版)“黄精”的 3 个基源种之一[1]，具有补气养阴、润肺健脾之功效，亦是云南重要的道地药材之一[2–3]。野生滇黄精分布区域多为地形复杂，气候多变的高寒高原地区，随着人民生活水平的提高和大健康产业的发展，市场需求量越来越大，但由于过度采挖，野生资源渐趋贫乏乃至枯竭。而目前有关人工栽培研究相对欠缺，对其适宜区域及气候特征的研究尤为薄弱，这对打造滇黄精人工高效优质栽培基地极其不利。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)以现有物种已知分布坐标、环境因子、土壤因子等资料数据，通过采用特定算法来评估该物种生态位，最后进行投影，以研究物种适生区变化。常见的物种分布模型有最大熵模型(Maxent)[4]、Bio mod2[5]、Garp[6]、Climex 等[7]。Maxent 模型基于热力学第二定理，在物种潜在分布研究中，通常将物种以及其所在的生长环境当成一个系统，通过计算系统具有最大熵时的状态参数来确定物种和环境之间的稳定关系，进而估计物种的分布[8]。Maxent 在众多物种分布模型中具有精确度高[9]、所需样本量小、稳定性好[10]等优点。施晨阳等[11]通过 Maxent 模型预测水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)潜在适生区，认为制约其适生区变化的关键因子为降水因子；李垚等[12]认为影响小叶栎(*Quercus chenii*)地理分布的因子是温度和降水量；荣文文等[13]通过该模型，认为影响木贼麻黄(*Ephedra equisetina*)地理分布的主要因子为酸碱度、海拔以及年平均温度。

本文采用 Maxent 模型，结合 ArcGIS 10.8.1 软件对滇黄精适生区分布进行划分以及模拟推测其自末次盛冰期(Last Glacial Maximum, LGM, 约 22 000 年前)、全新世中期(Mid Holocene, MH, 约 6 000 年前)的演变，预测滇黄精当前(1960—1990 年)的适生分布区和 2050 年和 2070 年的潜在分布区。本研究通过明确滇黄精主要分布适宜区域和适宜生境条件，为其种植基地选择、种质资源保护等提供一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 滇黄精种质资源数据收集和处理

样本收集分为野外调查和室内网络检索。2022—2023 年对云南红河、文山、西双版纳、保山、怒江、普洱、玉溪、昆明、大理、曲靖、昭通以及贵州黔西南、毕节等省市开展滇黄精野外种质资源调查及收集工作，获得 205 个滇黄精野外分布记录；通过网络检索，在中国国家标本资源平台(NSII, http://www.nsii.org.cn)上检索获得滇黄精分布记录 429 份，共计 634 条。参照施晨阳[11]、李垚等[12]的方法对 634 条信息进行筛选，去掉栽培种、分布点位置缺失、重复记录等，以 10 km×10 km 为网格，每个网格保留 1 个分布点进行缓冲区处理，获得滇黄精野外有效分布数据 63 个(图 1)。

1.2 环境因子的获得及相关性分析

环境因子(含 19 种气候因子和 1 种海拔因子, 表 1)来自 1.4 版本的世界自然数据库(http://worldclim.org)，通过 ArcGIS 10.8.1 软件对环境因子进行重采样、掩膜，最后获得像元大小相同的栅格数据图层，图层以 asc 格式进行保存[11]。

为避免过度拟合，采用 origin 2021 软件中的 Pearson 相关系数对 20 个环境因子进行双变量相关性分析；再将其导入到 Maxent 3.4.1 软件中，模型运行 5 次，得到 20 个环境因子的贡献率，并结合贡献率和相关性，确定主要环境因子[13–14]。

1.3 Maxent 模型建立和精度检验

采用 Maxent3.4.1 软件预测滇黄精在中国的潜在分布。导入滇黄精有效分布点坐标数据及主要环境因子图层，随机选择 75%数据进行建模，25%数据验证模型[15]。背景点最大数量为 10 000 次，模型重复运行 10 次，通过刀切法对环境因子进行重检验，绘制相应曲线及预测图[13]。

采用受试者特征曲线(ROC)下面积 AUC 值(取值范围为 0~1)评估 Maxent 模型预测的准确性。其中 AUC≤0.7 表示精度较差，0.7<AUC≤0.8 表示精度一般，0.8<AUC≤0.9 表示精度好，0.9<AUC≤1 表示精度极好，AUC 值越大表示预测效果越好，其适生区和不适生区之间的区分可信度就越高[15]。

1.4 滇黄精适生区划分

将滇黄精出现点位和环境因子一同导入 Maxent 3.4.1 软件，模拟出滇黄精的栖息地适宜度指数(HSI)。参考胡强等[16]的方法，将 HIS 值大于测试敏感性和特异性逻辑阈值的区域作为滇黄精的适宜区。

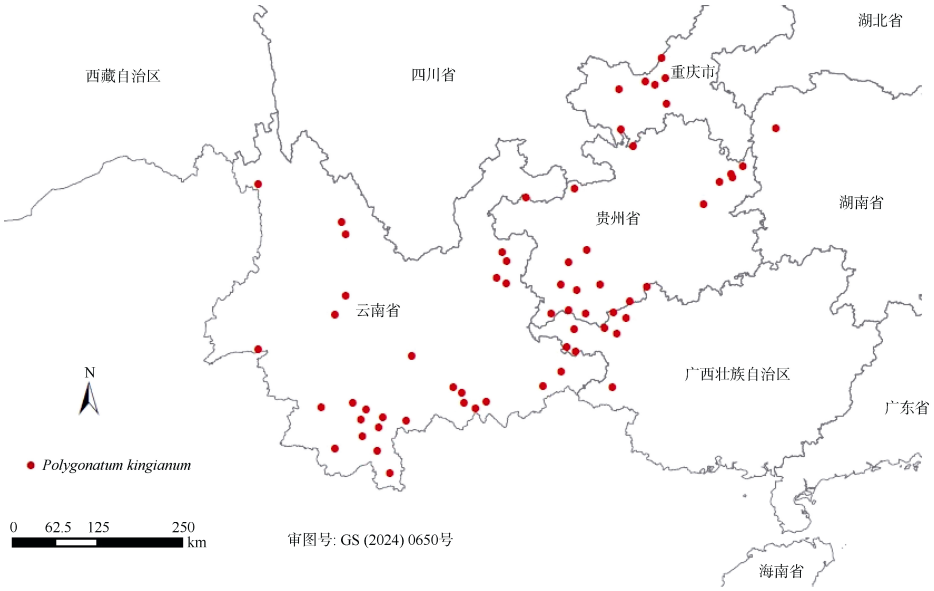

图 1 滇黄精野外分布点

Fig. 1 Distribution of *Polygonatum kingianum*

表 1 环境因子

Table 1 Environmental factors

环境因子 Environmental factor		描述 Description	单位 Unit
气候因子 Climatic factor	bio1	年均温 Annual mean temperature	×10 ℃
	bio2	平均日差[月平均值(最高温度−最低温度)] Mean diurnal range (mean of monthly (max temp−min temp))	×10 ℃
	bio3	等温性 Isothermality (bio2/bio7×100)	–
	bio4	温度季节性(标准差×100) Temperature seasonality (standard deviation×100)	–
	bio5	最暖月份最高气温 Max temperature of warmest month	×10 ℃
	bio6	最冷月份最低温度 Min temperature of coldest month	×10 ℃
	bio7	年温差 Temperature annual range (bio5−bio6)	×10 ℃
	bio8	最潮湿季节的平均气温 Mean temperature of wettest quarter	×10 ℃
	bio9	最干燥季节的平均温度 Mean temperature of driest quarter	×10 ℃
	bio10	最暖季平均气温 Mean temperature of warmest quarter	×10 ℃
	bio11	最冷季节的平均温度 Mean temperature of coldest quarter	×10 ℃
	bio12	年降雨量 Annual precipitation	mm
	bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	
	bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	
	bio15	降水季节性(变异系数) Precipitation seasonality (coefficient of variation)	–
	bio16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	mm
	bio17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	mm
	bio18	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	mm
	bio19	最暖季降水量 Precipitation of coldest quarter	mm
地形因子 Terrain factor	elev	海拔 Elevation	m

利用 ArcGIS 10.8.1 软件导入模拟 10 次的平均值，转化为栅格数据，此栅格数值为滇黄精的生存概率 P；对 P 进行重分类，将滇黄精预测分布区分成 4 类，其中 P<MTSPS 为非适生区、MTSPS≤P<0.3 为一般适生区、0.3≤P≤0.6 为中等适生区、P>0.6 为高等适生区[17]。

1.5 滇黄精适生区空间格局和质心转移变化

Maxent3.4.1 软件模拟过去、当前、未来情景模式下的 10 次预测结果平均值，并保存为 ASC 格式，利用 ArcGIS 10.8.1 将 ACS 结果文件转换成栅格文件，再将栅格文件转换成二进制文件。

参照前人[11,18]的方法，将 0.5 设置为预值，滇

黄精的分布概率 P<0.5 设为非适生区，P≥0.5 为适生区；建立滇黄精在过去、当前和未来时期潜在空间格局。

在 ArcGIS 10.8.1 中加载过去、当前、未来时期的二进制预测结果文件，利用 SDM Toolbox 工具预测滇黄精质心(适生区中心点)转移变化。

2 结果和分析

2.1 环境因子的最终筛选

相关性分析结果表明 20 个环境因子间存在一定的相关性(图 2)，如全部用来建模，可能会出现模型过度拟合现象，导致预测结果不准确；结合贡献率(表 2)和相关性，当 2 个环境因子间的|r|≥0.8 时，舍弃贡献率为 0 的环境因子，最终选取 15 个环境因子用于建模，分别为 bio1、bio2、bio3、bio4、bio6、bio7、bio8、bio11、bio12、bio15、bio16、bio17、bio18、bio19 和 elev。

2.2 Maxent 模型优化结果

根据 63 个滇黄精有效分布数据及 15 个环境因子，采用 Maxent 模型对其潜在适生区进行预测，AUC 值为 0.965~0.977，平均 0.971±0.004，说明该

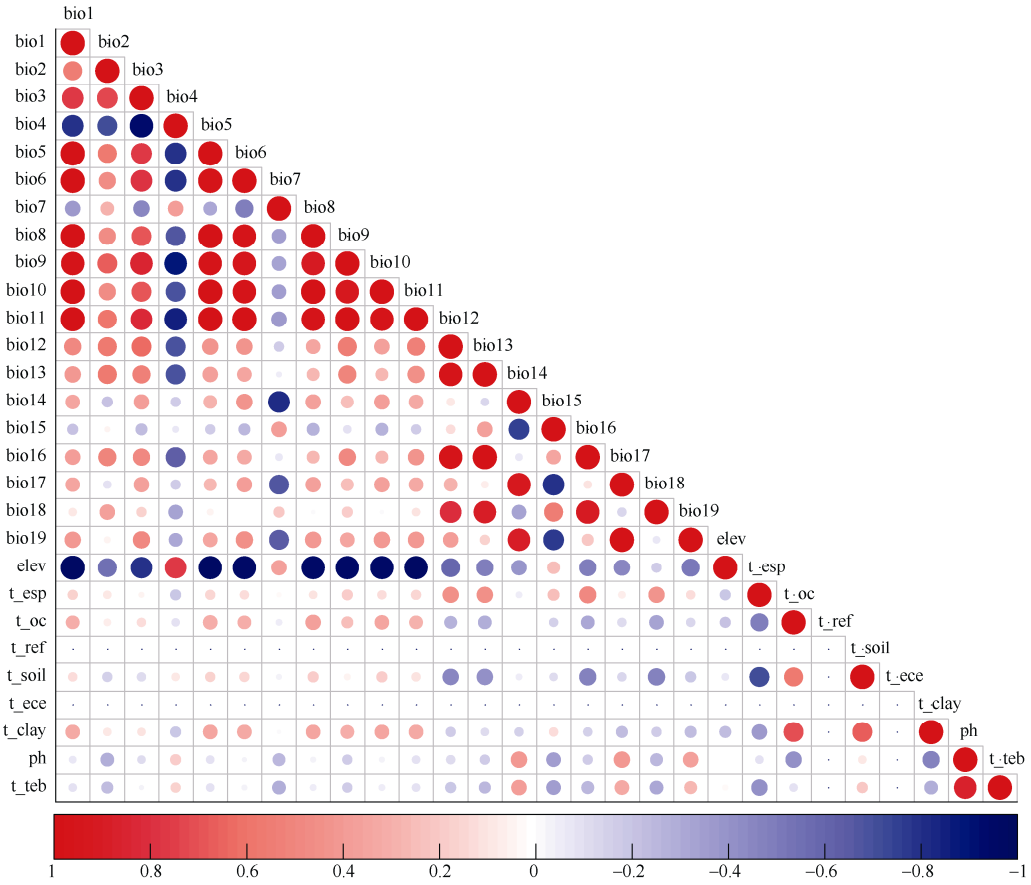

图 2　当前时期(1960—1990 年)环境因子相关性热图。*: P≤0.05; **: P≤0.01; 环境因子见表 1。下同

Fig. 2 Heat map of correlation of environmental factor in current period (1960—1990). *: P≤0.05; **: P≤0.01. Environmental factor see Table 1. The same below

表 2　参与建模的 20 个环境因子的贡献率

Table 2 Contribution rates of 20 environmental factors involved in modeling

因子 Factor	贡献率 PC /%	因子 Factor	贡献率 PC /%	因子 Factor	贡献率 PC /%	因子 Factor	贡献率 PC /%
bio1	0.1	bio6	8.1	bio11	0.7	bio16	0.2
bio2	0.1	bio7	1.2	bio12	21.6	bio17	33.2
bio3	1.7	bio8	0.3	bio13	0	bio18	0.2
bio4	6.4	bio9	0	bio14	0	bio19	6.0
bio5	0	bio10	0	bio15	0.1	elev	20.1

模型的预测结果具有非常高的准确度(图 3)。

2.3 影响滇黄精分布的环境因子

环境因子中，贡献率(PC)比较靠前的有年降水量(bio12, 27.6%)、最干季降水量(bio17, 25.6%)、海拔(elev, 19.2%)、最冷月份最低温度(bio6, 10.3%)、温度季节性(bio4, 9%)和等温性(bio3, 3.2%)，这 6 个因子累计值达 94.9%；置换重要值(PI)靠前的因子有最冷月份最低温度(bio6, 81.6%)、海拔(elev, 7.9%)、年温差(bio7, 2.5%)、最干季降水量(bio17, 1.8%)、年降雨量(bio12, 1.7%)、最冷季降水量(bio19, 1.4%)，其累计值达 96.9%；当用仅此变量(AUCo)进行模拟时，对 AUC 值影响最大的因子是最干季降水量(bio17, AUC 值为 0.94)和最冷季降水量(bio19, AUC 值为 0.94) (表 3，图 4)。年降水量、最干季降水量、最冷月份最低温度和海拔是影响滇黄精分布的重要环境因子。

对年降水量(bio12)、最干季降水量(bio17)、最冷月份最低温度(bio6)、海拔(elev)等 4 个因子单因子建模，当存在概率>0.1762 时(低适生区)，boi12 适宜值为 871~1 934 mm；bio17 适宜值约 33~107.2 mm；适宜 elev 高度约为 372~3 178 m；bio 为–2 ℃~10.8 ℃ (表 3)。而当存在概率≥0.6 时(高适生区)，bio12 为 1 367~1 372 mm；bio17 为 47.8~70.8 mm；bio6 为 3.9 ℃~ 6.9 ℃；elev 为 1 732~2 066 m (图 5)。

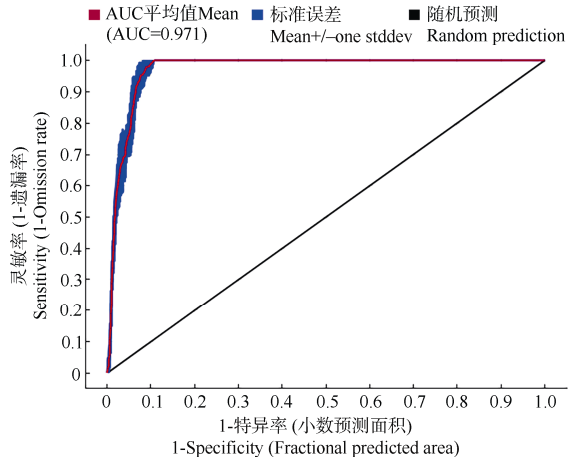

图 3 模型拟合的受试者工作特征曲线

Fig. 3 Receiver operating characteristic curve of model fitting

表 3 滇黄精的环境因子

Table 3 Environmental factors of *Polygonatum kingianum*

环境因子 Environmental factor	贡献率 /% PC	置换重要值 /% PI	仅此变量 AUCo	适宜值域 Range of threshold value	单位 Unit
bio12	27.6	1.7	0.93	871~1 934	mm
bio17	25.6	1.8	0.94	33~107.2	mm
elev	19.2	7.9	0.79	372~3 178	m
bio6	10.3	81.6	0.93	–20.2~108.1	×10 ℃
bio4	9	0	0.91	1 178~7 295.5	–
bio3	3.2	0.6	0.71	21.4~58.6	–
bio19	1.6	1.4	0.94	34.2~112.6	mm
bio7	1.3	2.5	0.93	100.6~292.7	×10 ℃
bio11	0.8	1.3	0.92	31.5~207.4	×10 ℃
bio1	0.7	0.1	0.89	121.4~231	×10 ℃
bio18	0.2	0.2	0.92	450.9~1 902.6	mm
bio8	0.2	0	0.79	167.4~281.6	×10 ℃
bio2	0.1	0.4	0.81	37.9~126.2	×10 ℃
bio15	0.1	0.4	0.85	45.9~95.4	–
bio16	0	0	0.89	445~2 689	mm

2.4 滇黄精潜在适生区面积变化

滇黄精在当前时期(1960—1990 年)的潜在适生区主要分布在云南、贵州、广西、四川、重庆等省市，其潜在适生区总面积是 75.29×10^4 km^2，其中，低适生区 20.98×10^4 km^2、中适生区 43.22×10^4 km^2、高适生区 11.09×10^4 km^2。从历史到未来的面积变化来看，滇黄精种群的适生区总面积呈逐渐增加的趋势；在 CCSM4 RCP85 情景中，2050 年滇黄精适生区总面积为 89.13×10^4 km^2，相对当前约增加 13.84×10^4 km^2；2070 年适生区总面积为 102.59×10^4 km^2，相对当前约增加 27.3×10^4 km^2 (表 4)。

从末次盛冰期(LGM)到全新世中期(MH)，滇黄精在云南、贵州、广西、四川、重庆的潜在适生区逐渐增加；CCSM4 RCP85 情景中，2050 年滇黄精

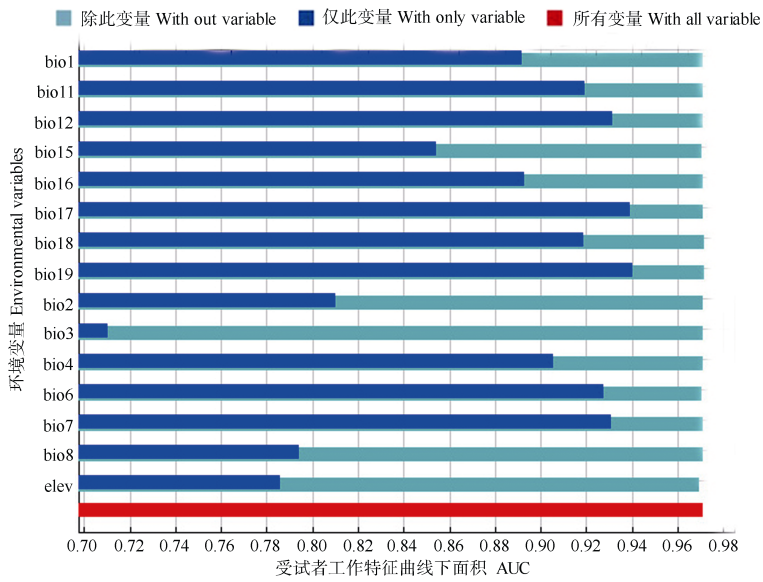

图 4 环境因子的 Jackknife 检验

Fig. 4 Jackknife test for environmental factors

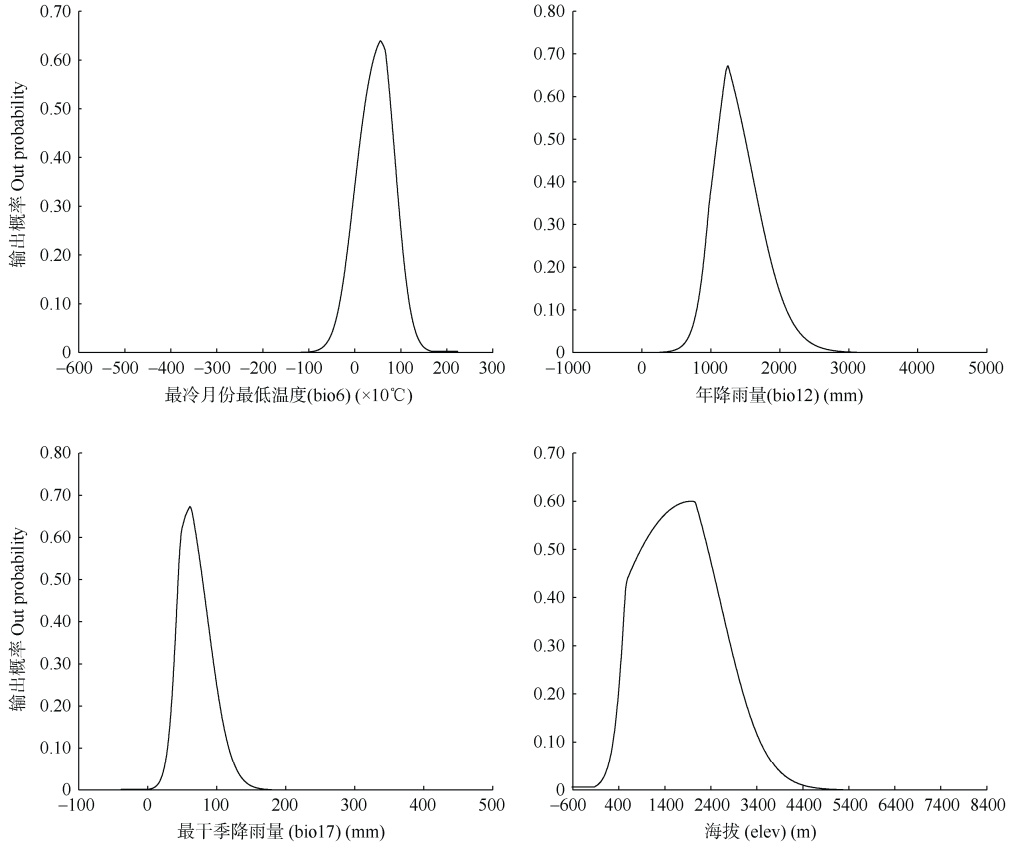

图 5 滇黄精地理分布与主导环境因子的关系

Fig. 5 Relationships between each dominant climate factors and the distribution probability of *Polygonatum kingianum*in

潜在适生区逐渐向广东、海南、福建等地区扩张; 到 2070 年，滇黄精的适生区面积在福建、浙江等省份增加较明显(图 6)。

2.5 滇黄精潜在适生区空间格局变化

不同时期滇黄精适宜生境重心(质心)呈云南东南-云南东北-贵州西南转移的空间变化格局。末次

盛冰期(LGM)、全新世中期(MH)到当前时期，滇黄精适宜生境重心(质心)向滇东北转移，转移距离分别约 184.01 和 115.97 km；当前到 2050 年和 2070 年，滇黄精适宜栖息地重心均向贵州方向转移，转移距离分别约为 127.2 (2050s CCSM4 RCP85)和 272.19 km (2070s CCSM4 RCP85) (图 7)。

表 4 滇黄精不同时期适生区面积变化(×10⁴ km²)

Table 4 Change in suitable area of *Polygonatum kingianum*in at different periods (×10⁴ km²)

适生区 Suitable area	末次盛冰期 LGM	全新世中期 MH	当前 1960—1990 年	2050 年 CCSM4 RCP85	2070 年 CCSM4 RCP85
非适生区 Uninhabitable area	913.43	897.81	884.71	871.86	867.41
低适生区 Low suitable area	17.02	19.68	20.98	22.61	26.41
中适生区 Medium suitable area	21.71	35.15	43.22	55.04	61.07
高适生区 High suitable area	7.84	7.36	11.09	11.48	15.11
总适生区 Total suitable area	46.57	62.19	75.29	89.13	102.59

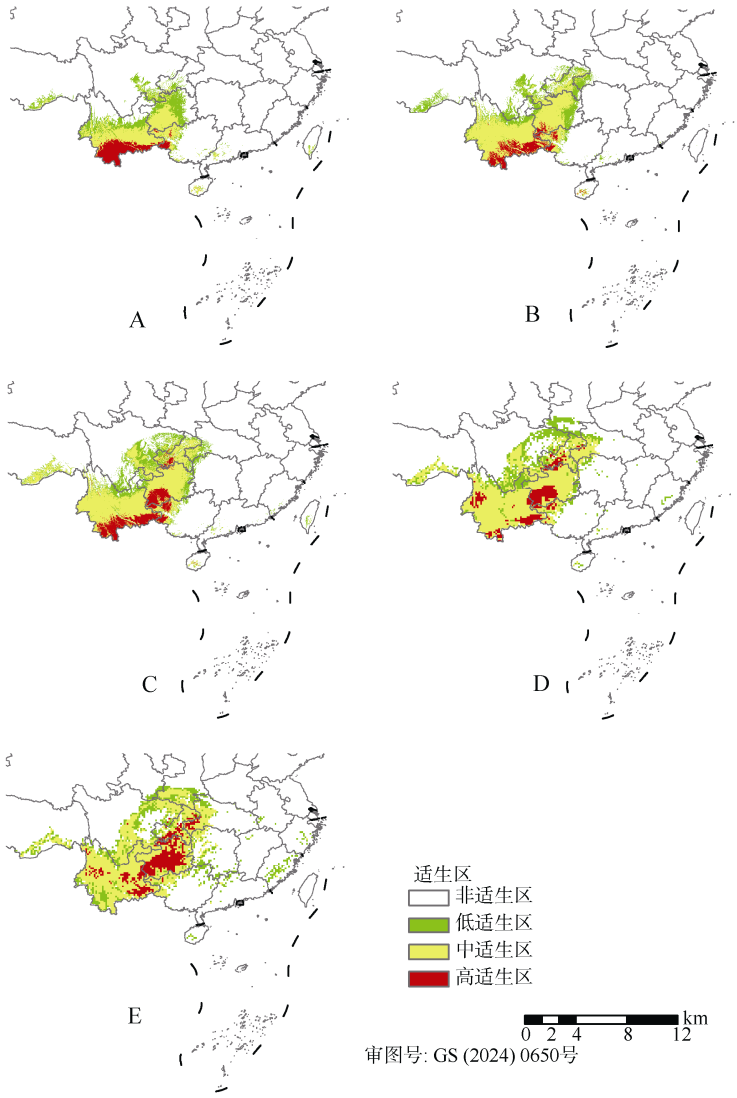

图 6 滇黄精不同时期潜在适生区面积预测。A: 末次盛冰期 CCSM4 30s; B: 全新世中期 CCSM4 2.5m; C: 当前(1960—1990 年); D: 2050 年 CCSM4 RCP85; E: 2070 年 CCSM4 RCP85。下同

Fig. 6 Predicted potential suitable areas of *Polygonatum kingianum* at different periods. A: Last Glacial Maximum CCSM4 30s; B: Mid Holocene CCSM4 2.5m; C: Current (1960—1990); D: 2050 CCSM4 RCP85; E: 2070 CCSM4 RCP85. The same below

从适宜生境新增和消失情况来看(表 5, 图 8)，末次盛冰期(LGM)到 2070 年，滇黄精适宜生境新增面积呈逐渐上升的趋势。适宜生境新增面积从 LGM 的 1.76×10^4 km^2 到 2070 年的 25.1410^4 km^2，增加面积大幅度扩增；保留面积呈现增加后减小的趋势，但总体面积相差不大；不同气候时期的丧失面积亦相差不大。

总体来看，滇黄精适宜生境从 LGM 到 2070 年，重心逐渐向贵州方向转移；其中滇黄精新增适宜生境中心逐渐向云南的东北部和西北部区域、贵州全境、重庆大部分区域，湖北的西南部以及四川小部分区域转移；原云南分布区的东南、西南部以及广西的西部区域会有适宜生境消失。

表 5 不同气候情景下滇黄精适生区空间变化

Table 5 Changes in suitable distribution area of *Polygonatum kingianum* in different climate scenarios

时期 Period	面积 Area ($\times10^4$ km^2)			
	增加 Increment	保留 Retain	丧失 Lose	变化 Change
末次盛冰期 LGM	1.76	13.91	13.94	–12.18
全新世中期 MH	2.41	18.91	8.82	–6.41
2050CCSM4 RCP85	13.24	18.94	7.78	5.46
2070CCSM4 RCP85	25.14	13.82	12.90	12.24

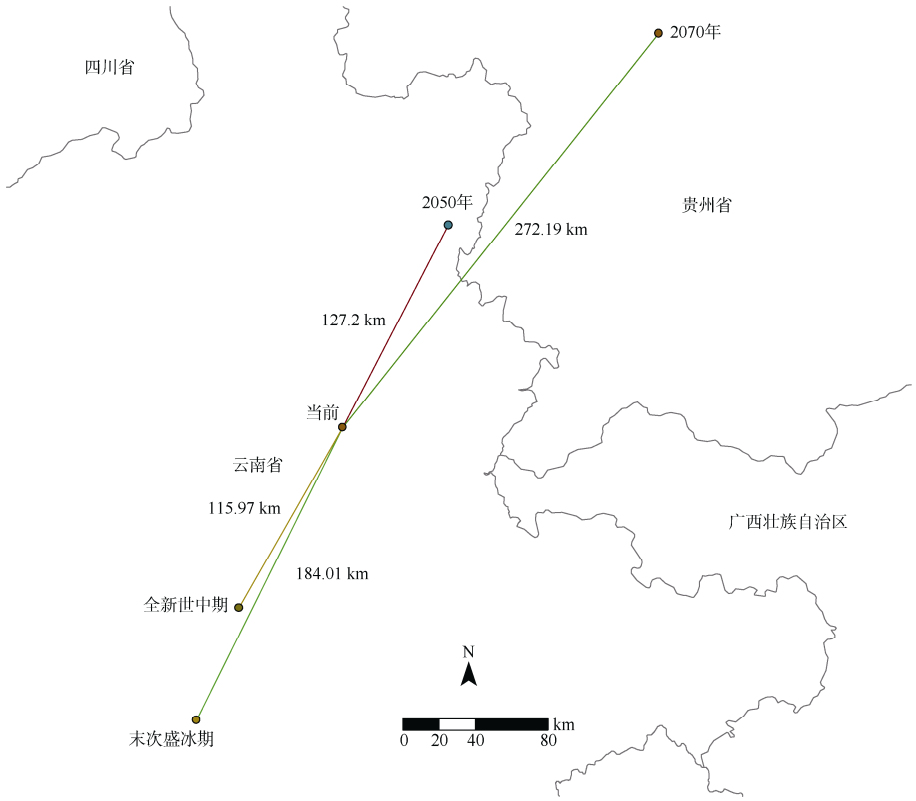

图 7 滇黄精在不同时期下质心转移变化

Fig. 7 Potential distribution centroid of *Polygonatum kingianum* under different climate scenarios

3 讨论和结论

3.1 滇黄精地理分布受环境因子的影响

年降雨量(bio12)、最干季降水量(bio17)、海拔(elev)和最冷月份最低温度(bio6)等 4 个环境因子的贡献率和重要置换值总和分别为 82.7%和 93%，其中置换重要值最大的因子为 bio6，达 81.6%；4 个因子中用仅此变量模拟时 AUC 值影响最大的是 bio12、bio17 和 bio6。本研究认为影响滇黄精分布的环境因子按重要性从大到小为降水因子、温度和海拔，其中降水因子和温度是制约滇黄精分布最重要的 2 个因子。滇黄精主产于云南，多分布于西南

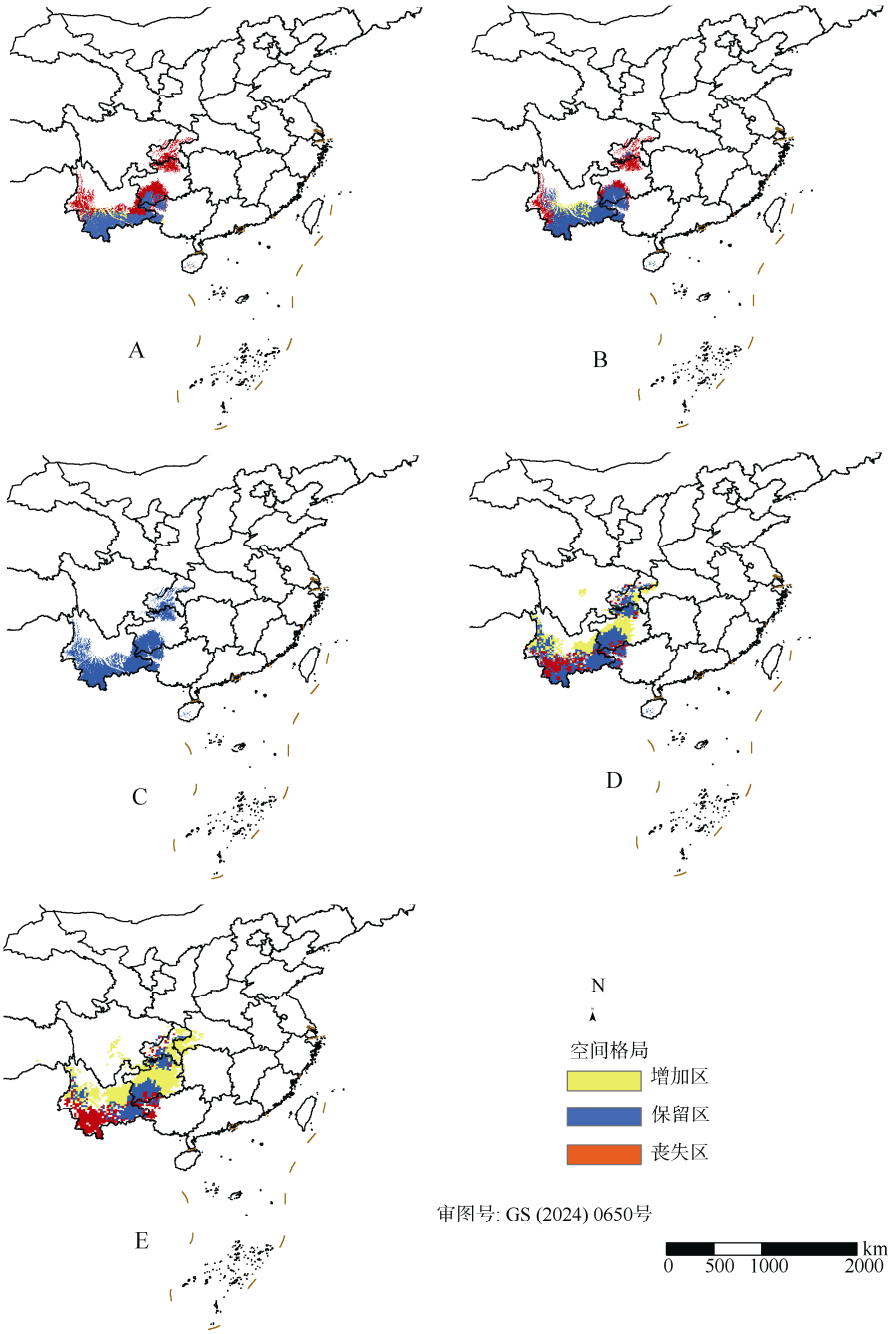

图 8 滇黄精在不同气候情景下适宜生境的空间变化

Fig. 8 Spatial variation of suitable habitat area of *Polygonatum kingianum* under different climate scenarios.

地区，常生于具腐殖质土壤的山地或林下，耐荫、耐寒、喜荫湿潮润环境[19]。西南地区主要气候特征为亚热带季风气候和热带雨林气候，气温、降水与海拔存在显著的相关性，山地垂直气候现象明显；降水、温度、相对湿度等气候因子从西北至东南逐渐递增，年均温约 4.3 ℃~24.3 ℃，年均降水量约 340~2 300 mm，雨季多集中在 5 月—8 月[20]；而滇黄精最适宜的年降水量区间为 1 367~1 372 mm；最干季降水量区间为 47.8~70.8 mm；最冷月份最低温度为 3.9 ℃~6.9 ℃；海拔为 1 732~2 066 m。由此可见，西南地区的气候特征更适宜滇黄精的生长，从而在一定程度上影响其地理分布。姚馨等[21]研究认为最冷月最低温度、7 月最低温度、5 月—8 月太阳辐射、最干月降水量、4 月和 9 月—11 月平均降水量和海拔是制约滇黄精地理分布的重要环境因子，与本研究结论具有相似之处。

3.2 滇黄精潜在适生区的地理变迁

滇黄精在我国的适生区面积从末次盛冰期(LGM)到 2070 年呈逐渐扩大的趋势，主要分布在西南地区；其新增适宜生境中心(质心)逐渐向高纬度转移。西南地区大部分属中亚热带，少数地区(滇南)为南亚热带，滇黄精适生区气候特征冬季温暖，夏季凉爽，雨量充沛，气候整体较湿润，较适合滇黄精的生长[21]。

本研究中，在 CCSM4 RCP85 气候情景下，到 2070 年，全国年降雨量约 15~4 513 mm。其中广西西北部，云南、贵州、四川、重庆等大部分区域的年降雨量都比当前时期有所增加，而滇东南和滇西南的极小部分区域以及桂西小分布区域年降雨量比当前时期有所减少。最干季降雨量在西南地区(除云南北部、四川中北部外)出现下降缩减；最冷月份最低温度较当前气候明显提高；其中广西、云南、贵州、重庆等最冷月份最低温度约提高 2 ℃~6 ℃，四川则达 6 ℃~8 ℃。综合本研究预测结果中对滇黄精影响最大的环境因子可以看出，2070 年，随着全国气候的变化，特别是年降雨量的增加和温度的升高，大部分区域气候条件与滇黄精生长环境相似，能满足滇黄精的生长发育，从而使得滇黄精适生区不断扩大，适宜生境中心也随着环境的变化逐渐向高纬度转移。

3.3 滇黄精种质资源保护和开发利用

本团队在野外调查和走访中发现，滇黄精野生资源被人为肆意采挖，其生境受到严重破坏，导致野生资源日益匮乏。由此可见，滇黄精虽然没有被列为国家重点保护植物，但仍然受到人类无序乱挖的威胁。因此，加强滇黄精的保护和利用工作可从以下几个方面进行：(1) 在未来，滇黄精在云南东南部出现一部分丧失区。结合预测模型，可能原因是该区域年降雨量较当前时期相对减少，该地区的气候条件已不适合滇黄精的生长，应通过迁地保护，将滇黄精种质资源迁往年降雨量较高、温度适宜的区域；并努力开展滇黄精生态学、种苗繁育、栽培等方面的研究工作；(2) 在新增区，如云南的中北部、贵州以及重庆的大部分区域，该区域的气候条件比较适宜滇黄精的生长，降雨量充沛，温度适宜，可结合滇黄精的生物学特性，分阶段建立滇黄精引种区和示范区；(3) 保留区可作为滇黄精的回归保育区，积极开展滇黄精种苗快繁技术研究，通过人工繁殖的种苗种植于自然生境中，使其慢慢生长、恢复，从而使其种群能自然更新；(4) 林下经济可持续开发利用。滇黄精属药食同源植物，在其适宜区内拥有面积巨大的经济林，通过选择适宜的区域，开展滇黄精仿野生林下种植研究，打造人工高效优质栽培基地，既能解决中药材市场的巨大需求，又能在根本上保护其野生资源。

本研究以滇黄精野外分布数据和环境因子，通过Maxent模型结合ArcGIS模拟滇黄精潜在适生区，并分析影响其分布的主要环境因子。年降水量、最干季降水量、最冷月份最低温度和海拔是制约滇黄精分布的重要环境因子。滇黄精在当前时期的潜在适生区主要分布在云南、贵州、广西、四川、重庆等西南地区，其潜在适生区总面积为 75.29×10^4 km^2，其中一般适生区 20.98×10^4 km^2、中等适生区 43.22×10^4 km^2、高度适生区 11.09×10^4 km^2，高等适生区主要集中在我国滇东南，黔西南和桂西北等地。滇黄精在我国的适生区面积从末次盛冰期(LGM)到2070 年呈逐渐扩大的趋势；其新增适宜生境中心(质心)逐渐向高纬度(云南的东北部及西北部区域、贵州全境、重庆大部分区域、湖北的西南部以及四川小部分区域)转移。这可为滇黄精潜在种植区的规划和设计、种质资源保护和创新利用提供一些依据。

参考文献

[1] National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China, Vol. 1 [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015: 8–9. [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, 2015: 8–9.]

[2] ZHANG X C, DUAN B Z, TAO A E, et al. Antidiabetic effect of polysaccharides from *Polygonatum kingianum* in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. Chin J Ethnomed Ethnopharm, 2022, 31(12): 19–24. [张晓灿, 段宝忠, 陶爱恩, 等. 云南道地药材滇黄精中多糖抗 2 型糖尿病作用研究 [J]. 中国民族民间医药, 2022, 31(12): 19–24. doi: 10.3969/j.issn.1007-8517.2022.12.zgmzmjyyzz202212007.]

[3] XIA C L. The pure medicinal material of *Polygonatum kingianum* [J]. J Dali Univ, 2022, 7(2): F0004. [夏从龙. 云南道地药材——滇黄精 [J]. 大理大学学报, 2022, 7(2): F0004.]

[4] LI F F, LI L, WU G S, et al. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling [J]. Acta Ecol Sin, 2023, 43(6): 2202–2209. [李芳菲, 李丽, 吴巩胜, 等. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2202–2209. doi:10.5846/stxb202009192440.]

[5] CHEN L L, LI Z F, LIU T M. Changes in potentially suitable habitats

for *Epilobium hirsutum* based on Biomod2 models [J]. Hort Seed, 2023, 43(12): 9–14. [陈丽玲, 李志芳, 刘天猛. 基于 Biomod2 组合模型的野生柳叶菜(*Epilobium hirsutum*)潜在适宜生境的变化 [J]. 园艺与种苗, 2023, 43(12): 9–14.]

[6] WANG Y C, ZHENG P, PAN W B. Predicting the potential suitable distribution area of *Pomacea canliculate* in China based on the GARP ecological niche modeling [J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci), 2018, 47(1): 21–25. [王奕晨, 郑鹏, 潘文斌. 运用 GARP 生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(1): 21–25. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2018.01.004.]

[7] LIU X X, LI L, WANG T, et al. Predicting the potential geographical distribution of *Oulema melanopu* (Coleoptera: Chrysomelidae) in China based on CLIMEX [J]. J Biosafety, 2020, 29(2): 106–114. [刘孝贤, 李兰, 王婷, 等. 基于 CLIMEX 预测黑角负泥虫在中国的潜在地理分布 [J]. 生物安全学报, 2020, 29(2): 106–114. doi: 10.3969/j.issn.2095-1787.2020.02.005.]

[8] ARAÚJO M B, PEARSON R G. Equilibrium of species' distributions with climate [J]. Ecography, 2005, 28(5): 693–695. doi: 10.1111/j.2005.0906-7590.04253.x.

[9] GUISAN A, THUILLER W. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models [J]. Ecol Lett, 2005, 8(9): 993–1009. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x.

[10] XU Z L, PENG H H, PENG S Z. The development and evaluation of species distribution models [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(2): 557–567. [许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557–567. doi: 10.5846/stxb201304030600.]

[11] SHI C Y, LAI W F, WEN G W, et al. Prediction of the potentially suitable area of *Fraxinus mandshurica* based on Maxent model [J]. J NW For Univ, 2022, 37(2): 149–156. [施晨阳, 赖文峰, 文国卫, 等. 基于 Maxent 模型预测水曲柳的潜在适生区 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 149–156. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.02.20.]

[12] LI Y, ZHANG X W, FANG Y M. Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum [J]. Chin J Plant Ecol, 2016, 40(11): 1164–1178. [李垚, 张兴旺, 方炎明. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032.]

[13] RONG W W, HUANG X, NIU P X, et al. Potentially suitable areas for traditional Chinese medicinal material *Ephedra equisetina* based on MaxEnt model [J]. Acta Ecol Sin, 2023, 43(20): 8631–8646. [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. doi: 10.20103/j.stxb.202209162641.]

[14] YAO Z Y, HAN Q F, LIN B. Prediction of distribution area of main noxious and miscellaneous weeds in Xinjiang based on MaXent model [J]. Acta Ecol Sin, 2023, 43(12): 5096–5109. [姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测 [J]. 生态学报, 2023, 43(12): 5096–5109. doi: 10.5846/stxb202205061252.]

[15] HUANG Z C, SHU J P, YAN Y H, et al. Simulation of potential distribution of *Paphiopedilum* in China based on MaxEnt model [J]. J Trop Subtrop Bot, 2024, 32(1): 17–26. [黄智聪, 舒江平, 严岳鸿, 等. 基于最大熵模型的中国兜兰属植物潜在分布模拟 [J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(1): 17–26. doi: 10.11926/jtsb.4703.]

[16] HU Q, LIN H Q, DAI Q, et al. Niche differentiation among three middle-sized carnivores in Wolong Nature Reserve [J]. Chin J Zool, 2020, 55(6): 685–691. [胡强, 林红强, 戴强, 等. 卧龙保护区三种中型食肉动物的生态位差异 [J]. 动物学杂志, 2020, 55(6): 685–691. doi: 10.13859/j.cjz.202006001.]

[17] ANSARI H M, GHODDOUSI A. Water availability limits brown bear distribution at the southern edge of its global range [J]. Ursus, 2018, 29(1): 13–24. doi: 10.2192/URSUS-D-16-00017.1.

[18] ZHANG Y B, LIU Y L, QIN H, et al. Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(2): 496–502. [张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 496–502. doi: 10.13287/j.1001-9332.201902.040.]

[19] YANG X X, MU J K, GU W, et al. Advances and prospect analysis on development and application of *Polygonatum kingianum* [J]. Biotic Resour, 2019, 41(2): 138–142. [杨兴鑫, 穆健康, 顾雯, 等. 滇黄精资源的开发应用进展及前景分析 [J]. 生物资源, 2019, 41(2): 138–142. doi: 10.14188/j.ajsh.2019.02.007.]

[20] MA R X. Spatiotemporal evolution of vegetation cover and its driving forces in southwest China [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021. [马瑞雪. 西南地区植被覆盖时空演变特征及其驱动力分析 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.]

[21] YAO X, ZHANG J Y, WAN Q Q, et al. Potential geographical distribution of *Polygonatum kingianum* and its climatic suitability analysis [J]. J Trop Subtrop Bot, 2018, 26(5): 439–448. [姚馨, 张金渝, 万清清, 等. 滇黄精的潜在分布与气候适宜性分析 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(5): 439–448. doi: 10.11926/jtsb.3874.]