

DOI: 10.5846/stxb201911092361

廖剑锋, 易自力, 李世成, 肖亮. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究. 生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305.

Liao J F, Yi Z L, Li S C, Xiao L. Maxent modeling for predicting the potentially geographical distribution of *Miscanthus nudipes* under different climate conditions. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8297-8305.

基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究

廖剑锋, 易自力, 李世成, 肖亮*

湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128

摘要: 双药芒 (*Miscanthus nudipes*) 是一种适应寒冷和干旱环境的芒属植物, 具备驯化成具有生态修复、观赏等多功能植物的潜力。在双药芒现有分布记录的基础上, 采用 Maxent 模型构建其在末次间冰期、末次盛冰期、现代以及未来 (2070 年) 的潜在分布格局, 在评价环境因子对其分布模型影响的前提下, 定量分析不同生态气候情景下双药芒适生区域的变化。结果表明: (1) 温度变化方差在 440—645, 最冷月份最低温在 $-8.5-0^{\circ}\text{C}$, 年温变化范围在 $22-30^{\circ}\text{C}$, 5 月降水量在 70—115 mm, 海拔范围在 1630—3750 m, 6 月太阳辐射小于 $15800\text{ kJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 时适宜双药芒的生长和分布。其中, 温度变化方差是影响双药芒地理分布格局的关键性气候限制条件。(2) 双药芒现代适生区面积为 632184.45 km^2 , 主要分布在四川省、云南省、西藏自治区、贵州省、陕西省、甘肃省、重庆市、湖北省和河南省。四川省中部地区、云南的北部和西藏的东部是分布中心。(3) 从末次间冰期到未来 2070 年低排放情景下潜在适生面积将缩减到 546745.02 km^2 , 缩减面积为 94867.23 km^2 , 占当前生境的 15.00%。(4) 从末次间冰期至末次盛冰期, 分布中心点向东南方向发生大幅度迁移, 从末次盛冰期至未来, 分布中心趋于稳定。总体来看未来双药芒分布中心有向冰期分布中心迁移的趋势。以上研究为研究芒属植物的起源及进化提供了参考。

关键词: 芒属植物; 双药芒; Maxent 模型; 潜在分布

Maxent modeling for predicting the potentially geographical distribution of *Miscanthus nudipes* under different climate conditions

LIAO Jianfeng, YI Zili, LI Shicheng, XIAO Liang*

College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: *Miscanthus nudipes* is the species which is highly adaptable to extremely cold and drought environments, and has the potential of being domesticated to the species with highly ecological adaptability. Based on the current distribution of the *M. nudipes*, using the Maxent model to analyze the potential geographical distributions of the *M. nudipes* in the Last Interglacial Period, the Last Glacial Maximum Period, the Modern Period and in the future (in the year of 2070), respectively. Meanwhile, based on the different species distribution models, this study quantitatively analyzed the changes of suitable habitat areas of the *M. nudipes* under different climate conditions. The results show that 1) The temperature seasonality plays a core role, which affects the geographical distributions of the *M. nudipes*. Additionally, the temperature seasonality is 440—645, the lowest temperature of the coldest month is $-8.5-0^{\circ}\text{C}$, the temperature annual range is $22-30^{\circ}\text{C}$, the precipitation in May is 70—115 mm, the altitude range is 1630—3750 m, and the solar radiation in June is less than $15,800\text{ kJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$, which provide the best factors for the growth of the *M. nudipes*; 2) The total areas of the best suitable habitat of the species of *M. nudipes* is $632,184.45\text{ km}^2$, which include Sichuan, Yunnan, Guizhou, Shanxi, Gansu, Hubei, Henan, Chongqing and Tibet Autonomous Region in China. Moreover, the distribution center is the central

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31871693); 湖南省重点领域研发计划 (2019NK2011)

收稿日期: 2019-11-09; 修订日期: 2020-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoliang@hunau.edu.cn

Sichuan, the northern Yunnan, and the eastern Xizang, respectively; 3) there will be a significant decrease of suitable habitat area from 632,184.45 to 546,745.02 km² during the period from the Last Interglacial period to the year of 2070, which will reduce 94,867.23 km²; 4) From the Last Interglacial period to the Last Glacial Maximum period, the distribution center moved forward to the southeast of China, and from the Last Glacial Maximum period to the future, the distribution center will tend to keep stable. In general, there will be a tendency of the distribution center of *M. nudipes* moving to the Last Glacial Maximum period distribution center in the future. In summary, the conclusion of this study provided a theoretical method and evidence on the analysis of the origin and genetical evolution of the *M. nudipes* in the following studies.

Key Words: Miscanthus; *Miscanthus nudipes*; Maxent model; potential distribution

生态环境因素决定了物种的分布,其中气候因素对物种分布的影响占主导地位,对生物多样性、遗传多样性以及适应性都会产生深刻的影响^[1]。末次间冰期(Last Inter Glacial, LIG)由于其记录载体较丰富、分辨率较高、相互之间可比性较强,使其成为理解目前全新世间冰期气候自然变化的最佳选择对象^[2]。研究表明,末次间冰期(LIG)以来的气候变化对物种的分布格局有较大影响^[3-6]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate, IPCC)^[7]在第五次评估报告中预测,未来全球气候将持续变暖,21世纪末全球气温将上升0.3—4.5℃左右^[8]未来气候变化对目前物种的分布范围和分布面积将会产生巨大的影响,甚至会导致某些濒危物种彻底灭绝^[9]。因此,了解不同气候情景对物种分布格局变化的影响,研究物种的潜在分布与气候条件的关系,能够为物种的起源进化提供地理分布证据,为引种以及风险防控提供理论依据。

芒属植物是一类 C4 多年生草本植物,具有高光效、高产量、强抗逆性和生产成本低等优点。是一类优良的纤维素能源植物,属内存在丰富的遗传变异,且自然分布广泛、生境类型多样^[10]。双药芒(*Miscanthus nudipes*)是芒属植物中适应极度寒冷、干旱环境的一个物种,适应多种生境类型且具有较高水平的遗传多样性,对气候变化也有着相应的应对策略,是一种优质的芒属植物遗传资源^[11]。我国边际土地共有 2.90 亿 hm²,其中年平均气温在-2℃以下的物理边际土地总面积为 538.22 万 hm²^[12],分析双药芒的适生分布区以及适宜生境,能为有效开发利用这些物理边际土地提供新的思路,分析不同时期双药芒适宜面积和分布中心的变化,能为芒属植物的起源进化提供地理依据。

利用生态位模型分析植物的分布范围、传播趋势、分布面积已成为研究植物与环境、植物与气候关系的常用手段^[13-15]。目前,对物种潜在分布区分析的生态模型已有多种,如 Maxent 最大熵模型,DOMAIN 模型,CLIMEX 模型,BIOCLIM 模型等。在众多生态模型中,Maxent 熵模型最具代表性,李巧云等^[16]运用 Maxent 模型预测了芒属两个广布种(芒 *M. sinensis* 和五节芒 *M. floridulus*)在我国的现代潜在分布区域,廖莎等^[17]运用 Maxent 模型预测了中国特有芒属植物南荻(*M. lutarioriparia*)和芒属广布种荻(*M. sacchariflora*)在我国的现代潜在分布区域,但上述研究并未分析地理因素对分布的影响,以及历史气候和未来气候的变化对芒属植物的分布的影响也未作出分析。本文通过文献查询,标本信息和野外调研收集分布点,利用 Maxent 模型模拟双药芒的不同时期潜在分布区。并利用 ArcGIS 软件进行适宜区与分布中心点划分,通过 Jackknife 检验、响应曲线和环境限制因子研究,分析不同时期双药芒适宜区变化,限制双药芒分布的气候因子和适宜双药芒生长及分布的气候条件,以期对双药芒的生态驯化、优质基因利用和重要种质资源保存利用提供理论依据。

1 实验方法

1.1 分布点数据的获得

通过实地调查记录 GPS 经纬度,查阅文献,查询中国植物数字标本馆(<http://www.cvh.ac.cn>)、全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org>)、PPBC 中国植物图像库(<http://ppbc.iplant.cn>)、国家标本平台(<http://www.nsii.org.cn>)、昆明植物研究所标本数据库(<http://kun.kingdonia.org>)、中国植物志([<http://www.ecologica.cn>](http://frps.</p></div><div data-bbox=)

iplant.cn)等数字标本平台,得到中国双药芒现代分布点。将获取的分布点经纬度数据存为 csv 格式,导入 ArcGIS 软件,检查并删除错误分布点,保留拉丁名正确和有图片经纬度信息的分布点^[18]。

1.2 气候变量的选取

用于模型建立的气候数据含温度相关(Bio1—11)、降水相关(Bio12—19)、平均月气候数据(Tmin 1—12、Tmax 1—12、Tavg 1—12、Prec 1—12、Srad 1—12、Wind 1—12、Vapr 1—12)和海拔数据(表 1)。运用 GisMap 软件裁剪气候图层,转换成 ASC 格式备用,本研究采用的当前气候变量从世界气候数据库中下载^[19],海拔数据从 Google Earth 中下载,图层空间分辨率为 2.5 min(大约 4.5 km)。末次间冰期(Last Inter Glacial,约 120—140ka)、末次盛冰期(Last Glacial Maximum,约 22 ka)、未来气候(2070 年)情景采用 WorldClim 数据库中的 CCSM 4 模型^[20],选用未来全球低排放情景 RCP 2.6,为了保持时空序列上模型的可比性,其海拔和太阳辐射因子在未来潜在分布模拟中保持不变^[7]。地图地理坐标系皆采用 GCS_WGS_1984 投影坐标系。

表 1 用于模型建立的气候变量

Table 1 Climate variables used for modeling

变量 Variable	描述 Describe	变量 Variable	描述 Describe
Bio 1	年平均温/°C	Bio 15	降水量变化方差/mm
Bio 2	昼夜温差月均值/°C	Bio 16	最湿季降水量/mm
Bio 3	昼夜温差与年温差比	Bio 17	最干季降水量/mm
Bio 4	温度变化方差	Bio 18	最暖季平均降水量/mm
Bio 5	最热月份最高温/°C	Bio 19	最冷季平均降水量/mm
Bio 6	最冷月份最低温/°C	Tmin1—12	1—12 月最低温/°C
Bio 7	年温变化范围/°C	Tmax 1—12	1—12 月最高温/°C
Bio 8	最湿季平均温度/°C	Tavg 1—12	1—12 月均温/°C
Bio 9	最干季平均温度/°C	Prec 1—12	1—12 月降水量/mm
Bio 10	最暖季平均温度/°C	Srad 1—12	1—12 月太阳辐射/(kJ m ⁻² d ⁻¹)
Bio 11	最冷季平均温度/°C	Wind 1—12	1—12 月风速/(m/s)
Bio 12	年平均降水量/mm	Vapr 1—12	1—12 月水蒸汽压/kPa
Bio 13	最湿月份降水量/mm	Alt	海拔 Altitude/m
Bio 14	最干月份降水量/mm		

1.3 预测模型的构建

将双药芒分布点数据和裁剪后的环境因子图层导入 Maxent 软件,设置软件随机选取 75%的点进行建模,25%的点验证模型,设置最大迭代次数为 1000,Bootstrap 重复计算 10 次,绘制响应曲线(response curves)和刀切法(jackknife)分析环境因子与双药芒分布的相互关系^[3]。将构建好的模型导入 ArcGIS 软件,根据适生值百分比的大小,将双药芒潜在分布区依次划分为以下五个等级:非适生区(适生值介于 0—20%)、低适生区(适生值介于 20%—40%)、一般适生区(适生值介于 40%—60%)、中度适生区(适生值介于 60%—80%)和高度适生区(适生值介于 80%—100%)^[21]。运用受试者工作曲线(Receiver Operating Characteristic, ROC)下面积 AUC(Area Under Curve)值对模型的准确性进行评价^[22]。选用 Maxent 软件自带的刀切法(jackknife)工具来判断单个环境变量对双药芒分布的影响^[23],并利用响应曲线(Response curve)评价双药芒的适宜气候条件。运用 ArcGIS 将不同时期适宜生境分布范围缩小为单个中心点,计算不同时期分布中心的位置与变化,分析双药芒的迁移趋势与历史迁移轨迹。

2 结果与分析

2.1 双药芒的分布现状

在湖南农业大学易自力教授课题组 10 余年来对芒属植物进行资源分布调查和鉴定的基础上,通过史料查询、实地考察和标本数据库检索的手段,对双药芒的现代分布点进行系统梳理,检查并删除错误分布点,仅

保留拉丁名正确且有图片和经纬度信息的分布点,共计获得 61 个双药芒有效分布点(图 1)。按省级行政区划分,主要分布在四川省、云南省、贵州省、西藏自治区和重庆市。其中云南省丽江市、西藏自治区林芝市、四川省雅安市、阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州分布点最集中。

2.2 气候因子的筛选

气候因子是影响物种分布的主要因素,本研究选取 104 个含温度相关、降水相关、平均月气候和海拔数据的环境因子变量。由于变量之间的共线性会导致分布预测模型过度拟合,采用主成分分析和 Spearman 相关性分析,选取相关性小于 0.8 的变量(表 2),相关性大于 0.8 的则保留贡献率最大的变量。经过筛选,选取 9 个环境因子用于模型预测:5 个气候因子(Bio 3, Bio 4, Bio 6, Bio 7, Bio 15)、3 个平均月气候因子(Prec 5, Prec 7, Srad 6)和 1 个地形因子(Alt)。

表 2 环境变量的 Spearman 相关性

Table 2 Spearman correlation of environment variables

	Bio15	Bio3	Bio4	Bio6	Bio7	Prec5	Prec7	Srad6
Bio3	0.112							
Bio4	0.005	-0.683						
Bio6	0.059	-0.203	-0.353					
Bio7	0.117	0.02	0.68	-0.721				
Prec5	-0.002	-0.755	0.643	0.252	0.133			
Prec7	0.358	-0.371	0.029	0.661	-0.335	0.393		
Srad6	-0.162	0.448	0.019	-0.632	0.454	-0.32	-0.54	
Alt	-0.135	0.525	-0.203	-0.777	0.251	-0.629	-0.719	0.635

2.3 ROC 曲线对 Maxent 模型预测精度检测

ROC 曲线是通过 Maxent 软件自带函数,对训练集进行模拟得到的,曲线下的面积为 AUC 值。AUC 的值一般在 0—1 之间,AUC 值在 0—0.5 之间时,表明模型预测失败;AUC 值在 0.6—0.7 之间,表明预测效果较差;AUC 值 0.7—0.8,表明预测效果一般;AUC 值 0.8—0.9,表明预测效果良好;大于 0.9 时,表明模型预测效果优秀,越接近 1,表明模型预测效果越好^[24]。本研究运行 10 次模型,取平均值,得到 ROC 曲线,其训练 AUC 平均值为 0.987,标准差 ± 0.002 (图 2),不同的模型重复稳定性好。依据评价标准,该模型的总体预测精度达到了优秀水平,说明该模型预测的双药芒潜在适生分布结果准确。

2.4 影响双药芒分布的环境变量

根据 Maxent 模型对双药芒气候变量贡献分析结果

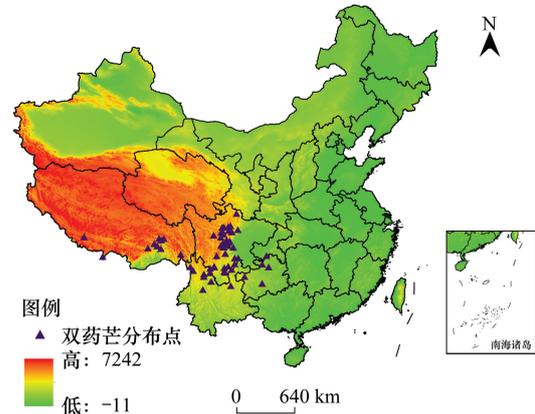


图 1 双药芒现代分布点分布格局

Fig.1 Modern distribution pattern of *Miscanthus nudipes*

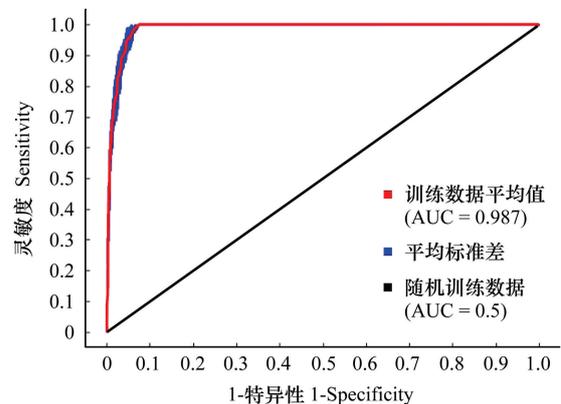


图 2 Maxent 模型对双药芒预测结果的 ROC 曲线验证

Fig.2 ROC curve verification of distribution of *Miscanthus nudipes* predicted by Maxent model

AUC: Area under curve; ROC: Receiver operating characteristic

(图 3) 占主导地位的气候因子有 6 个, 分别是温度变化方差、最冷月最低温度、年温变化范围、5 月降水量、6 月太阳辐射和海拔。其中, 温度变化方差、最冷月份最低温和年温变化范围可归结为气温因子, 5 月降水量是降水因子, 6 月太阳辐射是光照因子, 海拔则是地形因子。另外, 当使用单独变量进行模型预测时, 温度变化方差的正规化训练增益值、测试增益值和 AUC 值最高, 其测试增益大于 1.7, 正规化训练增益大于 1.6, 受试者工作特征曲线下的面积大于 0.93, 因此温度变化方差被认为是影响双药芒分布的主要气候限制条件。

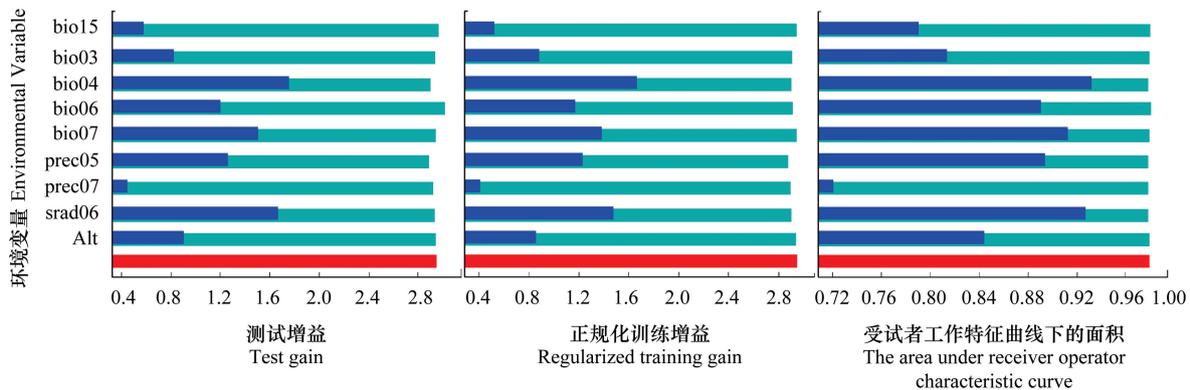


图 3 Maxent 模型对环境变量重要性的刀切法检验

Fig.3 Jacknife text of the importance of environment variables in Maxent

Bio15: 降水量变化方差; Bio3: 昼夜温差与年温差比; Bio4: 温度变化方差; Bio6: 最冷月份最低温; Bio7: 年温变化范围; Prec5: 5 月降水量; Prec7: 7 月降水量; Srad 6: 6 月太阳辐射; Alt: 海拔

2.5 双药芒最适气候条件

为了进一步分析环境因子对双药芒分布的影响, 将 6 个主要环境因子分别导入到 Maxent 模型中, 建立单因子模型, 同时绘制出单变量响应曲线, 即双药芒地理分布概率与主要环境因子的关系(图 4)。

一般认为, 当分布概率大于 0.5 时, 其对应的生态因子值适宜物种的生长^[25]。根据环境因子的响应曲线(图 4)可以得到温度变化方差在 440—645 时适宜双药芒的生长及分布; 最冷月份最低温在 -8.5—0℃ 时适宜双药芒的生长及分布; 年温变化范围在 22—30℃ 时适宜双药芒的分布及生长; 5 月降水量在 70—115 mm 时适宜双药芒的分布及生长; 海拔范围在 1630—3750 m 时适宜双药芒的分布及生长; 太阳辐射 < 15800 kJ m⁻² d⁻¹ 时适宜双药芒的生长及分布。

2.6 不同气候情景下双药芒潜在适生区的变化

与末次间冰期(图 5A)相比, 双药芒现代适宜生境(图 5C)范围收缩了 9427.80 km², 现代适宜生境范围呈现出向西藏西南部、河南省南部和湖北省北部地区扩散, 其适生中心依旧在四川省中南部地区无明显变化。相比之下现代高度适宜面积缩减了 4023.65 km²(占当前生境的 0.63%), 高度适宜区由西藏东部地区、四川省西南部向中部地区收缩, 但是西藏的灵芝县也有小面积的高度适生区, 说明在演化过程中, 一部分向西藏地区扩散, 另一部分向四川中部地区收缩。相比末次间冰期双药芒的现代中度适宜面积缩减了 538.73 km²(占当前生境的 0.09%), 虽然面积缩减了少许, 但是其范围却相对扩散, 尤其是甘肃省南部, 在末次间冰期无中度适生区, 但是到现代却出现了小面积的适生区。而云南的西部也有小面积的扩散。相比末次间冰期现代双药芒的一般适宜面积增加了 6245.92 km²(占当前生境的 0.99%), 范围向西藏的中南部、云南中部地区扩散, 陕西省更是由无到有, 出现少面积的一般适宜面积。现代低度适宜面积缩减了 11111.33 km²(占当前生境的 1.76%), 陕西省的低度适生区进一步扩增到河南省和湖北省。在末次间冰期云南的南部有一般适生区分布, 但是到现代后变为不适生区。

与末次盛冰期(图 5B)相比, 双药芒当前适宜生境(图 5C)范围变化较小, 仅仅扩增了 606.07 km²(占当前生境的 0.10%), 现代生境范围向西藏自治区西北部、云南省南部、陕西省北部地区扩散, 而甘肃省的南部、西

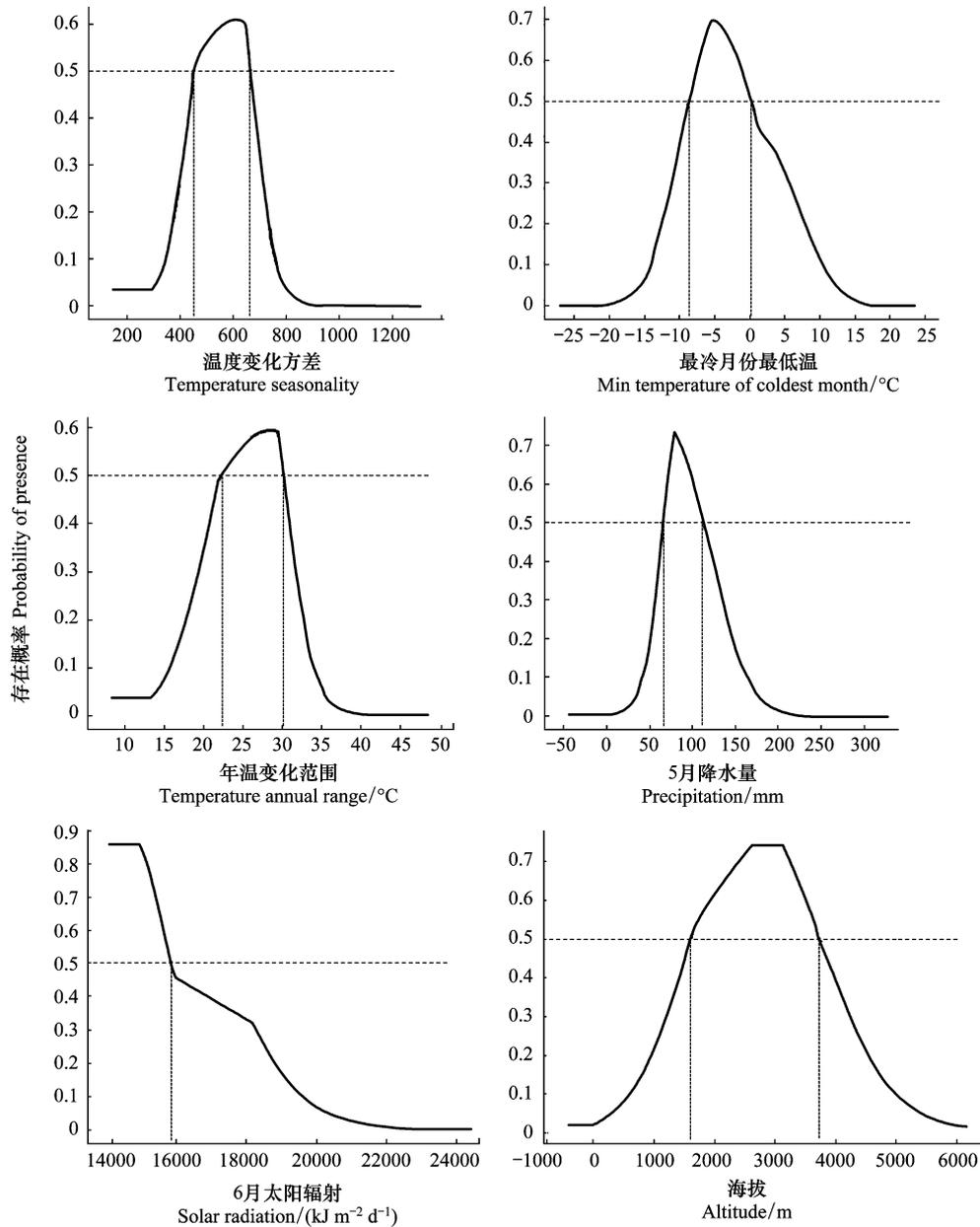


图 4 重要气候因子与双药芒生存概率的关系

Fig.4 Probability of survival between dominant climate factors and *Miscanthus nudipes*

藏自治区的东北方向、贵州省的东部地区和云南省的东部小范围区域出现收缩。相比末次盛冰期,现代高度适生区收缩了 3114.54 km²(占当前生境的 0.49%),高适宜区的分布中心变化不大,但分布范围有小幅度的收缩;中度适生面积收缩了 11094.50 km²(占当前生境的 1.75%),一般适生面积扩增了 22929.75 km²(占当前生境的 3.63%),低度适宜面积缩减了 8114.64 km²(占当前生境的 1.28%)。

与现代适生区(图 5C)相比,2070 年双药芒的适宜生境(图 5D)范围收缩了 85439.43 km²(占当前生境的 13.51%),双药芒分布中心南移,西藏自治区的适生区向东部收缩,湖北省、河南省和陕西省的适生区消失,云南省适生区向西南和东南方向扩散,相对现代适生区,2070 年高度适生区面积扩增了 2946.19 km²(占当前生境的 0.46%);中度适生面积缩减了 23468.49 km²(占当前生境的 3.71%);一般适生面积缩减了 54041.49 km²(占当前生境的 8.55%);低度适生面积扩增了 10875.63 km²(占当前生境的 1.72%)。双药芒在未来 2070 年

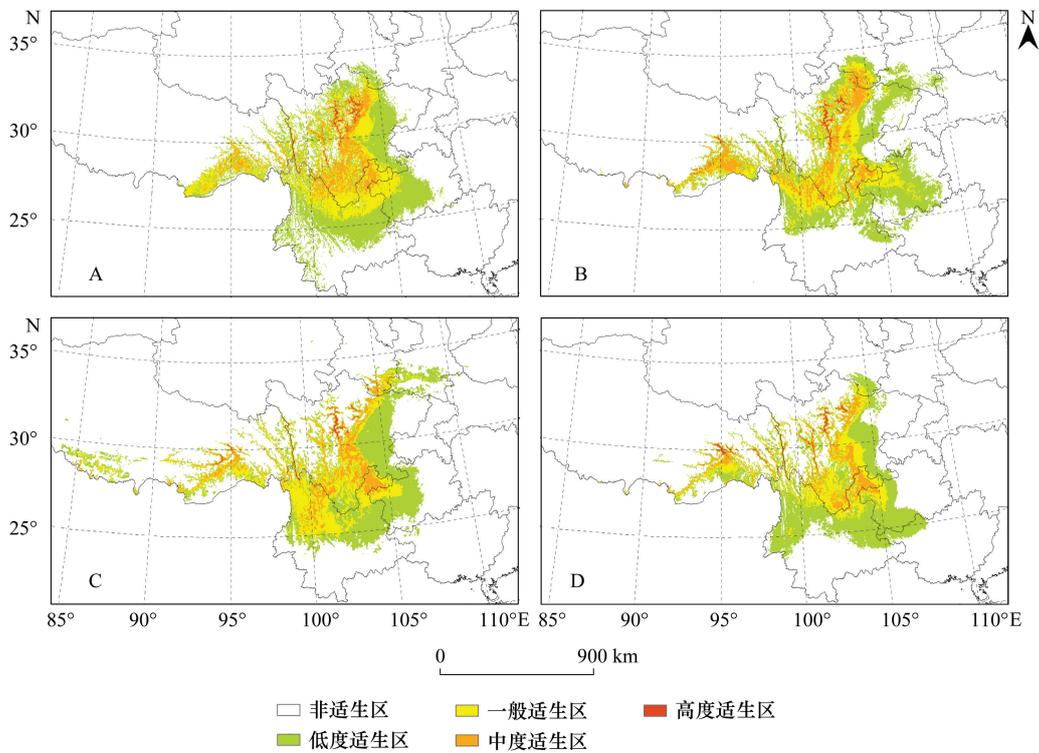


图 5 不同气候情景下双药芒潜在空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution for *Miscanthus nudipes* under climate change scenarios

A: 末次间冰期潜在空间分布格局; B: 末次盛冰期潜在空间分布格局; C: 现代潜在空间分布格局; D: RCP2.6-2070 潜在空间分布格局

的适生范围预测总趋势为适生范围面积缩减,说明双药芒的潜在适生范围与全球环境变化具有相关性,气候变暖导致双药芒的适生区面积逐渐减少。

Maxent 模型预测结果显示(图 6):末次间冰期适宜面积为 641612.25 km²,末次盛冰期适宜面积为 631578.37 km²,现代适宜面积为 632184.45 km²,RCP2.6-2070 年适宜面积为 546745.02 km²。可以看出双药芒的总适生面积在末次间冰期最大,然后逐渐收缩,到本世纪 70 年代,其适生区将缩小 94867.23 km²。

2.7 不同气候情景下双药芒分布中心的变化

双药芒在末次间冰期的分布中心位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县唐央乡,坐标为北纬 29.06°,东经 100.88°(图 7)。末次盛冰期的分布中心位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县倮波乡,坐标为北纬 28.62°,东经 101.41°,双药芒分布中心整体向东南方向迁移。在现代气候条件下的分布中心位于四川省甘孜藏族自治州九龙县乃渠乡,坐标为北纬 28.84°,东经 101.59°,相较于冰期,分布中心向东北方向迁移。在 RCP2.6—2070 气候情景下的分布中心位于四川省甘孜藏族自治州九龙县三岩龙乡,坐标为北纬 28.76°,东经 101.37°,可以看出双药芒在末次间冰期至末次盛冰期,中心点向东南方向发生大幅度迁移,但是末次盛冰期以后,分布中心变化较小,坐标变化范围在 28.62—28.84°N,101.37—101.59°E。可能是由于末次间冰期以来气候逐渐稳定,到末次盛冰期以后气候变化逐渐平稳,双药芒的分布中心稳定在四川省甘孜藏族自治州九龙县。总体来看未来双药芒分布中心有向冰期分布中心迁移的趋势。

3 讨论

气候模型是根据特定的算法,通过已有数据预测其物种分布,不同的算法得到的模型之间会有一定差异,但是这种方法仍然是评估和预测物种分布格局演化的重要工具^[26],近年来 Maxent 模型在植物和动物等领域

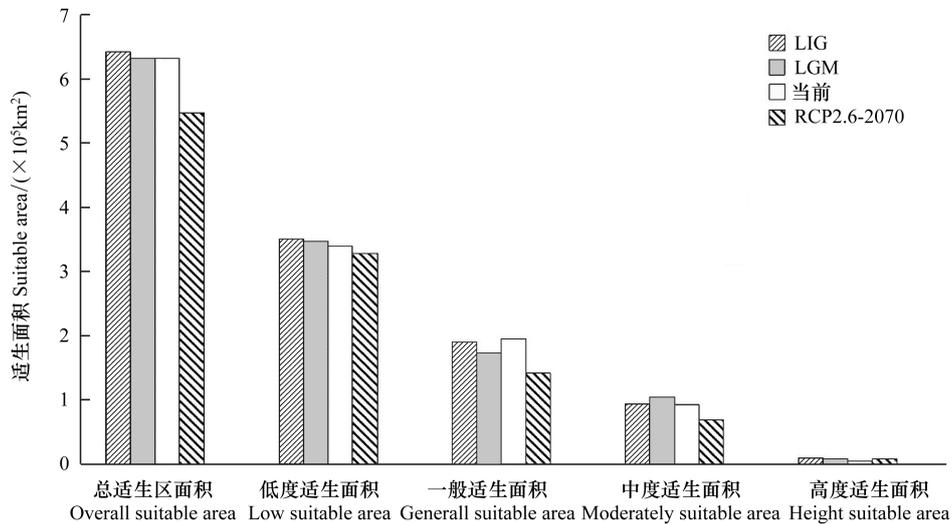


图 6 不同气候情景下双药芒潜在适生面积

Fig.6 potential area of *Miscanthus nudipes* different climate scenarios

LIG: 末次间冰期 Last inter glacial; LGM: 末次盛冰期 Last glacial maximum

得到广泛的运用^[27-29]。本文基于 Maxent 模型采用了 19 个全年气候因子、84 个单月份气候数据和 1 个海拔数据,通过主成分分析法筛选出独立贡献率大且彼此间相关性小的气候因子进行建模,再结合现有的双药芒分布点信息,预测了双药芒在过去、现代和未来的分布格局,并讨论影响双药芒分布的气候限制因子问题。研究表明,气候变化会对双药芒的适生地理分布格局产生较大的影响,这与前人的研究结果一致^[30-32]。

双药芒潜在中国现代适生区域集中分布在西南地区(川渝云贵藏),这与实际分布点分布范围一致。影响双药芒分布的环境因子主要为气候因子,温度变化方差是双药芒分布的生境限制因子,前人在进行模型构建时,大多只考虑气候因子,但是在实际考察中发现,除了气候因子,地形因子也对物种的分布起作用。因此本研究加入了影响植物生存最重要的地形因子——海拔因子,进行气候模型构建。根据气候因子的响应曲线可知温度变化方差在 440—645,最冷月份最低温在 -8.5—0℃,年温变化范围在 22—30℃,5 月降水量在 70—115 mm,海拔范围在 1630—3750 m,太阳辐射小于 15800 $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 为双药芒分布的最适环境因子范围。

第四纪的冰期气候变化对物种历史分布影响重大^[33]。研究结果显示双药芒在末次间冰期至末次盛冰期,中心点向东南方向发生大幅度迁移,但是从末次盛冰期至未来,分布中心趋于稳定。总体来看未来双药芒分布中心有向冰期分布中心迁移的趋势。适宜区域在末次间冰期、末次盛冰期得到大范围的扩散,这可能是由于末次间冰期温度逐渐回暖,温度波动范围变小,并逐步趋于稳定,导致双药芒的生存能力和适应性大幅度提高,最终致使其分布范围大面积扩散。这一现象与李文庆等在末次间冰期情景下研究四子柳 (*Salix tetrasperma* Roxb.) 的分布变化结果一致^[7]。就本文而言,从末次间冰期至近现代双药芒的适生面积一直呈现逐渐缩减趋势。根据气候模型的预测,预计到 2070 年,低排放情景下双药芒的潜在适生面积将缩减 94867.23 km^2 (占当前生境的 15.00%)。这种植物分布区域随气候变暖而出现递减的现象与张晓玲等人关于茶适宜区

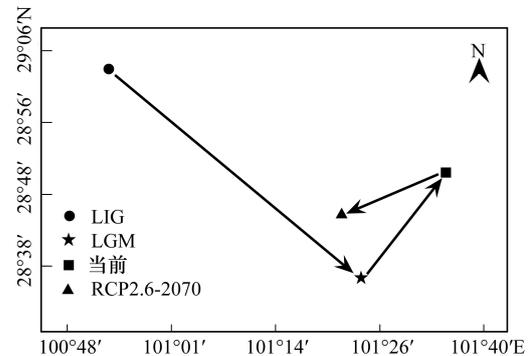


图 7 不同气候情景下双药芒适宜生境分布中心的变化

Fig.7 The core distributional shifts under different climate scenario for *Miscanthus nudipes*

分布的研究结果一致^[34]。

双药芒是芒属植物中一个能适宜极端低温和高海拔的种,由于芒属植物具有自交不亲和,且种间能够杂交,产生基因交流,是改良芒属植物抗寒种质的重要遗传资源,但是由于在人类活动、农业活动和工业活动的影响下,导致芒属植物分布范围逐渐缩减,我们希望能够通过探明双药芒的潜在分布和环境限制因子,用于珍贵种质的收集保存,为以后芒属植物在寒冷等极端边际土地的引种与开发提供遗传资源与理论基础。

参考文献 (References):

- [1] Hamann A, Wang T L. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology*, 2006, 87(11): 2773-2786.
- [2] 管清玉. 末次冰期旋回气候高度不稳定性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [3] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- [4] 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 韩家, 郭正堂. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演替的植物硅酸体记录. *第四纪研究*, 1999, 19(4): 336-349.
- [5] 葛永刚, 魏明建. 北京西山末次间冰期植被演化与环境变迁研究. *地质科技情报*, 2008, 27(6): 5-12.
- [6] 张爱平, 王毅, 熊勤犁, 伍小刚, 孙晓铭, 黄艳蒙, 张林, 潘开文. 末次间冰期以来 3 种云杉属植物的历史分布变迁及避难所. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2411-2421.
- [7] 李文庆, 徐洲锋, 史鸣明, 陈家辉. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测. *生态学报*, 2019, 39(9): 3224-3234.
- [8] Metz B, Davidson O R, Bosch P R, Dave R, Meyer L A. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 18(2): 95-123.
- [9] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [10] 易自力. 芒属能源植物资源的开发与利用. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2012, 38(5): 455-463.
- [11] 马洪峥. 芒属系统发育重建和双药芒类群变异式样研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [12] 陈瑜琦, 郭旭东, 刘俊杰, 张智杰. 我国可用于能源作物种植的边际土地数量及空间分布研究. *土地开发工程研究*, 2017, 2(7): 1-7.
- [13] 王一凯, 张蒙蒙, 段卫虎, 杨凯悦, 周汝良, 叶江霞. 基于 DOMAIN 模型的干热河谷稀树灌木丛空间分布. *福建林业科技*, 2015, 42(4): 116-120, 124-124.
- [14] 陈璐. 基于生态位模型的风眼莲分布区预测分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [15] 马骏, 胡学难, 彭志强, 刘海军, 梁帆, 陆永跃. 基于 CLIMEX 模型的扶桑绵粉蚧在中国潜在地理分布预测. *植物检疫*, 2011, 25(1): 5-8.
- [16] 周婧, 李巧云, 肖亮, 蒋建雄, 易自力. 芒和五节芒在中国的潜在分布. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 504-510.
- [17] 廖莎. 荻与南荻在中国的潜在分布研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [18] Chen S L, Renvoize S A. *Miscanthus*//Wu Z Y, Raven P H, eds. *Flora of China*. Beijing & St. Louis: Science Press, Missouri Botanical Garden Press, 2006: 581-583.
- [19] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1 - km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [20] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, Jones P G, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [21] 王璐, 许晓岗, 李垚. 末次盛冰期以来陀螺果潜在地理分布格局变迁预测. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 278-286.
- [22] 朱耿平, 范靖宇, 王梦琳, 陈敏, 乔慧捷. ROC 曲线形状在生态位模型评价中的重要性——以美国白蛾为例. *生物安全学报*, 2017, 26(3): 184-190.
- [23] 李望军, 冯图, 周瑞伍, 何斌, 崔涛, 邓芳芳, 彭明春. 基于 Maxent 模型的贵州省天然黄杉林的潜在分布预测研究. *西部林业科学*, 2019, 48(3): 47-52.
- [24] 何淑婷, 白碧玉, 但佳惠, 赵静滢, 高馨琪, 景鹏飞. 基于 MaxEnt 的南丹参在中国的潜在分布区预测及适生性分析. *安徽农业科学*, 2014, 42(8): 2311-2314.
- [25] 张雷, 王琳琳, 刘世荣, 孙鹏森, 余振, 黄书涛, 张旭东. 生境概率预测值转换为二元值过程中 4 个阈值选择方法的比较评估——以珙桐和杉木生境预估为例. *植物生态学报*, 2017, 41(4): 387-395.
- [26] Iverson L R, McKenzie D. Tree-species range shifts in a changing climate: detecting, modeling, assisting. *Landscape Ecology*, 2013, 28(5): 879-889.
- [27] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [28] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 张蕾, 江幸福. 基于 Maxent 模型的不同气候变化情景下我国草地螟越冬区预测. *生态学报*, 2017, 37(14): 4852-4863.
- [29] 王书越, 潘少安, 王明睿, 王明馨, 叶吉. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布. *生态学报*, 2019, 39(9): 3277-3286.
- [30] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 周莉, 于大炮, 秦静, 代力民. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 464-473.
- [31] 沈阳, 于晶, 郭水良. 不同气候变化情境下中国木灵藓属和藓属植物的潜在分布格局. *生态学报*, 2015, 35(19): 6449-6459.
- [32] 赵连春, 赵成章, 王小鹏, 文军. 秦王川湿地怪柳分布与环境因子的关系. *生态学报*, 2018, 38(10): 3422-3431.
- [33] Qiu Y X, Fu C X, Comes H P. Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2011, 59(1): 225-244.
- [34] 张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. *生物多样性*, 2019, 27(6): 595-606.