

广西植物

Guihaia

ISSN 1000-3142, CN 45-1134/Q

《广西植物》网络首发论文

题目: 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析
作者: 张涛, 胡菀, 贾天娇, 赵三增, 孔丹宇, 刘毅
收稿日期: 2021-05-31
网络首发日期: 2021-11-29
引用格式: 张涛, 胡菀, 贾天娇, 赵三增, 孔丹宇, 刘毅. 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析[J/OL]. 广西植物.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20211126.1840.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析

张涛¹, 胡菀¹, 贾天娇¹, 赵三增², 孔丹宇¹, 刘毅^{1*}

(1. 江西省中国科学院庐山植物园, 江西 庐山 332900; 2. 海南大学 热带作物学院 海口 570228)

*通信作者 刘毅, 博士, 副研究员, 主要从事药用与功能植物学研究, (E-mail): yiliu609@outlook.com。

摘要 为了解气候变化情景下苦参在中国的潜在分布区变化, 探讨生物气候因子与苦参适宜分布格局的关系, 该文通过收集苦参的地理分布点并结合 19 项生态因子, 运用最大熵模型 (MaxEnt) 和地理信息系统 (ArcGIS) 对苦参在末次盛冰期、当前气候、未来气候三种气候情景下在我国的适生区分布格局进行模拟, 并分析影响苦参生长的主导生态因子, 以期对苦参的野生保育及人工栽培的合理布局提供理论依据。结果表明: (1) 在当前气候条件下, 最暖季度平均温度 (bio10)、最湿季度降水量 (bio16) 是影响苦参分布的主导气候因子; (2) 苦参的适宜生境占我国国土总面积的 35.90%, 高适生区主要分布在我国 800 mm 等降水量线与 400 mm 等降水量线之间的地区; (3) 从末次盛冰期至未来气候情境下, 苦参在我国的适宜生境面积逐渐减少, 呈现递减的趋势, 且整体有向高纬度地区移动的趋势; (4) 当前气候条件下苦参的适宜生境面积较末次盛冰期减少 0.3%, 未来气候条件下苦参的适宜生境面积较当前气候减少 0.75%。全球气候变暖对苦参潜在分布区具有一定负面影响, 造成苦参适宜生境缩减, 实际生态位变窄, 一定程度上不利于苦参的生长。

关键词 苦参, MaxEnt, 气候变化, 生态因子, 潜在分布区

中图分类号 Q948.2

文献标志码 A

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202105053

Prediction of potential distribution of *Sophora flavescens* in China under climate changeZHANG Tao¹, HU Wan¹, JIA Tianjiao¹, ZHAO Sanzeng², KONG Danyu¹, LIU Yi^{1*}

(1. Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Lushan 332900, Jiangxi, China; 2. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, 570228, China)

Abstract In order to understand the changes of potential distribution of *Sophora flavescens* in China under the climate change and explore the relationship between bioclimatic factors and the suitable distribution pattern of *Sophora flavescens*, we investigated the distribution pattern of *Sophora flavescens* in China under the three climate scenarios (last glacial maximum, current climate, and future climate), and analyzed the dominant ecological factors affecting the growth of *Sophora flavescens* with Maximum Entropy Model (MaxEnt) and Geographic Information System (ArcGIS) by collecting the geographical distribution points of *Sophora flavescens* combining with 19 ecological factors. In this study, it was found that: (1) under the current climate conditions, the average temperature in the warmest quarter (bio10) and the precipitation in the wettest quarter (bio16) are the dominant climate factors affecting the distribution of *Sophora flavescens*. (2) the suitable habitat of *Sophora flavescens* accounts for 35.90% of the total land area of China. The optimum areas of *Sophora flavescens* are mainly distributed between the 800 mm isopyet and the 400 mm isopyet in China. (3) from the last glacial maximum to the future climate, the suitable habitat area of *Sophora flavescens* in China gradually decreases, and showed a trend of moving to high latitude. (4) The suitable habitat area of *Sophora flavescens* under the current climate is 0.3% less than that in the last glacial maximum, and the suitable habitat area of *Sophora flavescens* under the future climate is 0.75% less than that in the current climate. In conclusion, global warming plays a negative role on the potential distribution area and the growth of *Sophora*

收稿日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(41961009)

作者简介: 张涛(1988-), 硕士, 助理研究员, 主要从事药用植物种质资源保护与开发利用, (E-mail) zhangtao361@126.com。

Fund: [Supported by the National Natural Science Foundation of China(41961009)].

网络首发时间: 2021-11-29 11:50:17 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20211126.1840.002.html>

flavescens. It leads to the reduction of suitable habitat and the narrowing of actual niche of *Sophora flavescens*.

Key words *Sophora flavescens*, MaxEnt, climate change, ecological factor, potential distribution

苦参 (*Sophora flavescens*) 为豆科 (Leguminosae) 槐属 (*Sophora*) 多年生落叶亚灌木, 稀呈灌木状或草本, 别名地槐、白茎地骨、山槐、野槐等 (中国科学院中国植物志编辑委员会, 1994)。作为一种传统中药, 苦参在临床治疗疾病方面具有重要的应用价值。苦参入药始载于《神农本草经》, 距今已有两千多年的历史 (国家中医药管理局《中华本草》编委会, 1999)。李时珍曰: “苦以味名, 参以功名, 槐以叶形名也” (陆闻鸿, 1959)。《中国药典》载临床上常以苦参的干燥根入药, 具有清热燥湿, 杀虫, 利尿等功效 (国家药典委员会, 2020)。现代药理学研究表明, 苦参具有抗肿瘤、抗心律失常、调节免疫、抗菌、抗病毒等多种药理活性, 特别是对肿瘤细胞有显著的抑制作用 (钟赣生, 2016)。除用于中药方剂外, 苦参还是制药工业中的常用制剂、日用品、生物农药和兽药的主要原料。

随着我国中药产业的迅速发展, 对中药材的需求量日益增加, 野生资源已不能满足中药材产业的发展需求。苦参作为常用中药, 用途广泛, 用量逐年递增, 导致野生苦参资源严重匮乏 (纪琰等, 2011)。因此, 厘清苦参的全国分布格局, 分析其生态适宜性意义重大。传统的资源调查方法是开展野外调研, 但野外调查获得的数据不足以充分反映物种的整体分布格局。而药用植物资源的分布与地理环境有着直接关系, 受到诸多环境因子的制约, 以及人类活动的影响, 是在特定空间下的产物, 具有空间信息特征 (郭兰萍等, 2005)。物种能够生存和繁衍后代的所有条件的总和称谓生态位, 是定义物种的最小分布单元 (乔慧捷等, 2013)。生态位模型可利用物种已知的分布数据和相关环境变量, 根据统计学的运算方法推算被研究物种的生态需求, 将此运算结果投射至不同的空间和时间中用以预测被研究物种的潜在分布 (朱耿平等, 2013)。

近年来, 生态位模型越来越多的应用于入侵生物学、保护生物学、气候变化对物种分布的影响以及传染病空间传播等研究领域中 (朱耿平等, 2013)。基于不同的理论基础、基础数据和分析方式, 已开发出许多成熟的生态位模型算法, 主要的模型有生物气候分析系统 (BIOCCLIM)、生态因子分析模型 (ENFA)、基于规则集的遗传算法模型 (GARP)、最大熵模型 (MaxEnt) 等, 其中 MaxEnt 模型是目前应用最为广泛的生态位模型。通过对比 16 种生态位模型的预测能力, 结果发现 MaxEnt 模型的预测能力最高 (Elith et al., 2006)。MaxEnt 模型通过物种的分布数据和环境数据, 找出物种分布的最大熵, 从而对物种的分布进行预测, 相较于其他常见的生态位模型, 最大熵模型精度优于其他类型的模型, 而且在物种样本量很小甚至样本量数据残缺的情境下, 仍具有良好的预测效果和可信度 (王运生等, 2007; 邢丁亮等, 2011; 车乐等, 2014)。该模型的稳定性好且预测的结果与物种的实际分布基本吻合 (刘艳梅等, 2018)。

近年来 MaxEnt 模型作为评价物种栖息地生境质量中最常用的模型, 被广泛运用于农作物适宜区预测、动植物潜在生境评价、外来入侵物种风险评估和药用植物潜在生境分布等众多研究领域。从鱼类 (Kim et al., 2020) 到两栖类 (黄勇杰等, 2017), 从昆虫 (Kamel et al., 2021; Saha et al., 2021; Ji et al., 2021) 到鸟类 (Jha & Jha, 2021), 从植物类 (Liu et al., 2021; Boral et al., 2021; Zeng et al., 2021) 到大型兽类 (Rozhnov et al., 2021; 温平等, 2021)。从全球的大尺度范围到物种廊道的小尺度范围都取得了较好的预测结果。在药用植物研究领域已被成功运用于如何首乌 (*Fallopia multiflora*) (潘石玉等, 2016)、甘遂 (*Euphorbia kansui*) (卢有媛等, 2018)、秦艽 (*Gentiana macrophylla*) (檀逸虹等, 2020)、京大戟 (*Euphorbia pekinensis*) (裴苏婷等, 2021) 等药用植物的潜在分布预测分析, 且预测效果良好。因此, 本研究选用 MaxEnt 模型来进行气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的模拟。

研究植物分布格局对气候变化的响应, 了解生物的气候需求及其与物种地理分布间的关系, 对于揭示物种的形成、迁移和扩散历史, 提出合理的物种多样性保护策略具有重要意义 (胡菀等, 2020)。当前苦参的人工栽培已成为保护苦参野生资源, 满足中药产业对苦参大量需求的最重要途径之一, 而对苦参进行在全国范围内生态适宜性区划的研究未见报道。因此, 通过对苦参进行生态位分析, 厘清苦参在全国的分布格局, 掌握其在全国的生态适宜性分布区域情况, 可为苦参种质资源调

查、野生种源保护以及分子谱系地理学等研究提供基础资料。同时，还可以在全国范围内划分合理的道地产区，指导苦参在全国的产业发展规划，建立符合 GAP 标准的苦参原药材种植基地，实现规范化、规模化生产质量稳定的道地药材。

本研究以中国为研究区域，以苦参为研究对象，选取 19 个生物气候因子作为环境变量，依托中国数字标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>) 收集苦参的分布信息，采用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析技术，通过模型模拟预测该物种在三个不同历史时期的潜在分布区和适宜生境，拟探讨以下问题：（1）预测分析苦参的潜在分布区域的时空分布格局；（2）分析苦参潜在适宜分布格局与环境因子之间的联系；（3）分析提出苦参在我国范围内的保护和开发利用的科学依据。

1、材料与方法

1.1 样本信息

查阅中国数字标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>) 已收集苦参标本的分布信息，删除重复和记录不详细样本分布信息，对有经纬度记载的数据直接使用，仅有位置记录的分布点以最小可查行政单位为准，通过百度地图坐标拾取工具获得经纬度数据，在 ArcGIS 中对获得的数据进行筛选，一个栅格中只保留一个分布信息，确保分布点间的距离均大于 1km，避免过度拟合造成的误差，最终获得 725 份苦参样本分布信息，详见图 1。

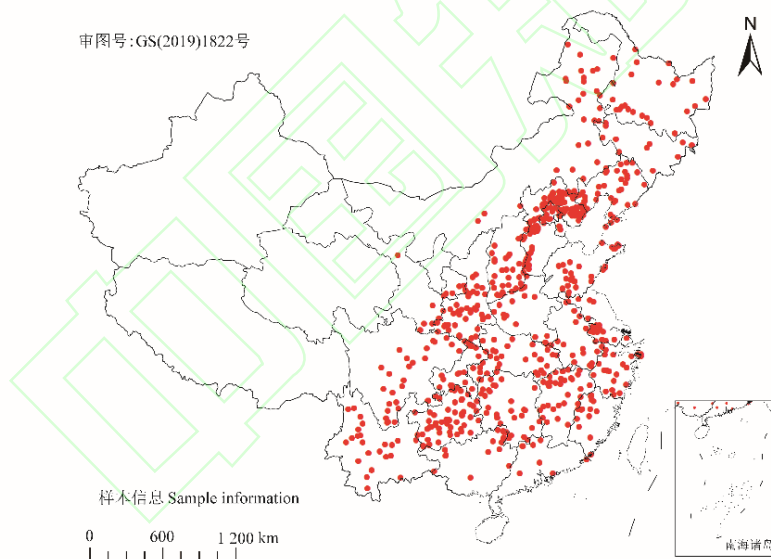


图 1 苦参样本分布
Fig.1 Distribution of *Sophora flavescens*

1.2 环境数据获取

气候是影响植物生长发育和分布的重要环境因素(胡秀等, 2015)，全球气候变化通过改变气温和

降水格局来影响物种的分布范围,而对物种分布格局的预测可以有效发掘物种的起源、散布和演化过程(李单琦等, 2020)。本研究使用的三个历史时期(末次盛冰期、当前时期、未来时期)气候数据均下载自世界气候数据库(WorldClim, <http://worldclim.org>), 包括 19 个生物气候变量(Bio01~Bio19)(表 1)。末次盛冰期选取符合中国气候类型的 CCSM4, 选择最小分辨率 2.5'(5 km×5 km); 当前气候年份选择 1970—2000(version 2.1); 未来年份选择 2070, 未来气候选取 IPCC 第 5 份报告中描述的未来 4 种气候变暖情景中代表高排放情景的 RCP8.5(高)。当前和未来的气候图层分辨率均为 30"(1 km×1 km)。中国底图下载自国家基础地理信息系统网站(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。

表1 环境变量
Table1 Environmental variables

环境变量 Environmental variables	描述 Description
bio1	年平均气温 Annual mean temperature (°C)
bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range (°C)
bio3	等温性 Isothermally [(bio2/bio7)*100]
bio4	温度季节性变化标准差 Temperature seasonality
bio5	最暖月份最高温度 Maximum temperature of warmest month (°C)
bio6	最冷月份最低温度 Minimum temperature of coldest month (°C)
bio7	年均温变化范围 Temperature annual range(bio5-bio6) (°C)
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter (°C)
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter (°C)
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter (°C)
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter (°C)
bio12	年降水量 Annual precipitation (mm)
bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest period (mm)
bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest period (mm)
bio15	降水量季变异系数 Precipitation seasonality
bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)
bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter (mm)
bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)
bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter (mm)

1.3 MaxEnt 模型设定及评价

MaxEnt 建模参数设定: 选用 MaxEnt 软件(V3.3.3K), 随机测试比例 20%, 最大迭代次数 1×10^4 , 设置响应曲线、ROC 曲线和刀切法。以响应曲线评价生态因子适宜度范围, 以 ROC 曲线及曲线下面积(即 AUC 值)评价模型精度, 以刀切法检验生态因子的权重。

1.4 环境变量筛选

选取模型输出结果中贡献率大、权重高的环境变量为主导环境变量。

1.5 生态适宜区划分采用 GIS

将建模得到的输出结果中的 ASCII 文件通过 ArcGIS 中的格式转化工具转化成栅格文件, 然后通过重分类工具将图层进行重分类, 从而进行适生等级的划分。输出结果显示的是不同地区的生境适宜性, 用 P 表示, 以概率的形式体现, 取值 0~1。参考 2007 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告对于不确定性的等级划分, 本文对研究对象在全国的适生等级进行如下划分:

$P < 0.33$ 为非适生; $0.33 \leq P < 0.66$ 为较适生; $P \geq 0.66$ 为高度适生。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测精度

MaxEnt 模型预测精度以 ROC 曲线下面积(即 AUC 值)为衡量指标, AUC 值越大表明模型预测精度越高, 评价标准: 0.5~0.6 即模型预测失败; 0.6~0.7 较差; 0.7~0.8 一般; 0.8~0.9 好; 0.9~1 非常好。基于苦参 725 个样本分布点, 利用 MaxEnt 模型在过去、当前和未来三种气候模式下对苦参适生区进行预测, 结果显示过去、现在、未来三种情境的气候条件下, 模型运算的测试数据集和训练数据集的 AUC 平均值分别为 0.858(图 2:A)、0.857(图 2:B)、0.863(图 2:C), 表明由 MaxEnt 模型预测的苦参生态适宜性具有较好的准确度和可信度, 可用于苦参潜在适生区分布的研究。

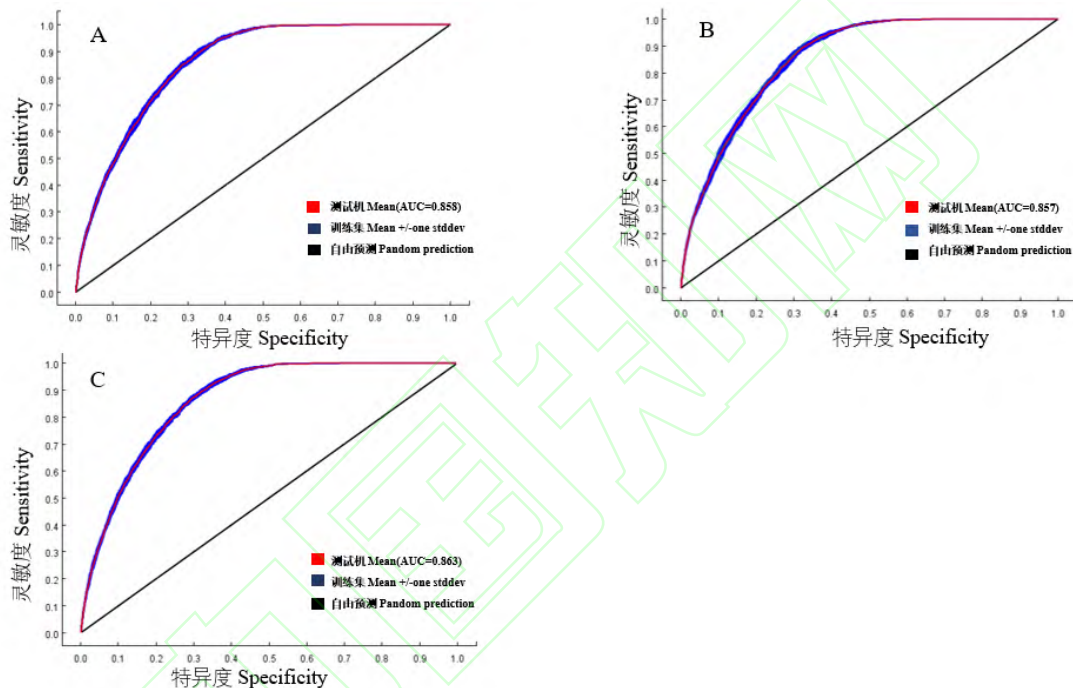


图 2 MaxEnt 模型应用 ROC 分析法检验预测结果:末次盛冰期(A), 当前气候条件下(B), 未来气候条件(C)
Fig.2 Prediction validation using ROC curve in MaxEnt modeling: last glacial maximum (A), current climate conditions(B), future climate conditions(C)

2.2 苦参潜在分布区主导气候因子

基于刀切法(Jackknife)来检验模型运算结果, 从而反映不同环境变量对于分布增益的贡献大小。当前气候条件下 19 个环境变量的贡献率排列前 11(贡献率 > 1%)依次为 bio16(最湿季度降水量, mm)、bio10(最暖季度平均温度, °C)、bio6(最冷月份最低温度, °C)、bio15(降水量季变异系数)、bio9(最干季度平均温度, °C)、bio11(最冷季度平均温度, °C)、bio4(温度季节性变化标准差)、bio8(最湿季度平均温度, °C)、bio5(最暖月份最高温度, °C)、bio14(最干月份降水量, mm)、bio13(最湿月份降水量, mm), 累计贡献率达 96.8%(表 2)。综合 19 个环境变量的相关性分析结果发现, bio16(最湿季度降水量, mm)、bio10(最暖季度平均温度, °C)是影响当代苦参适宜生境分布的主导气候因子(累计贡献率达 72.4%), 其次是 bio6(最冷月份最低温度, °C)、bio15(降水量季变异系数)、bio9(最干季度平均温度, °C)、bio11(最冷季度平均温度, °C)、bio4(温度季节性变化标准差)、bio8(最湿季度平均温度, °C)、bio5(最暖月份最高温度, °C)、bio14(最干月份降水量, mm)、bio13(最湿月份降水量, mm), 但贡献率较前两个小(表 2)。为进一步明确苦参在当前气候条件下主导气候因子与存在概率间的关系, 分别将前两个气候因子导入 MaxEnt 模型中单独建模, 绘制单变量响应曲线(图 3), 随后计算

两个主导气候因子的阈值。存在概率大于 50%时，最湿季度降水量(bio16)最适宜取值在 400 mm 到 800 mm，最暖季度平均温度(bio10)值是 20 °C 到 26 °C。

表2 当前气候条件下最大熵模型中各环境变量的贡献率
Table 2 Contribution rate of each environmental variable in MaxEnt modeling under current climate conditions

环境变量 Environmental variables	描述 Description	贡献率 Contribution rate (%)
bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)	53.9
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter (°C)	18.5
bio6	最冷月份最低温度 Minimum temperature of coldest month (°C)	6.7
bio15	降水量季变异系数 Precipitation seasonality	3.8
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter (°C)	2.7
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter (°C)	2.6
bio4	温度季节性变化标准差 Temperature seasonality	2.3
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter (°C)	2.3
bio5	最暖月份最高温度 Maximum temperature of warmest month (°C)	1.9
bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest period (mm)	1.1
bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest period (mm)	1.0
bio3	等温性 Isothermally $[(\text{bio2}/\text{bio7}) * 100]$	0.7
bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)	0.6
bio7	年均温变化范围 Temperature annual range (bio5-bio6) (°C)	0.6
bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range (°C)	0.5
bio1	年平均气温 Annual mean temperature (°C)	0.3
bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter (mm)	0.3
bio12	年降水量 Annual precipitation (mm)	0.1
bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter (mm)	0.1

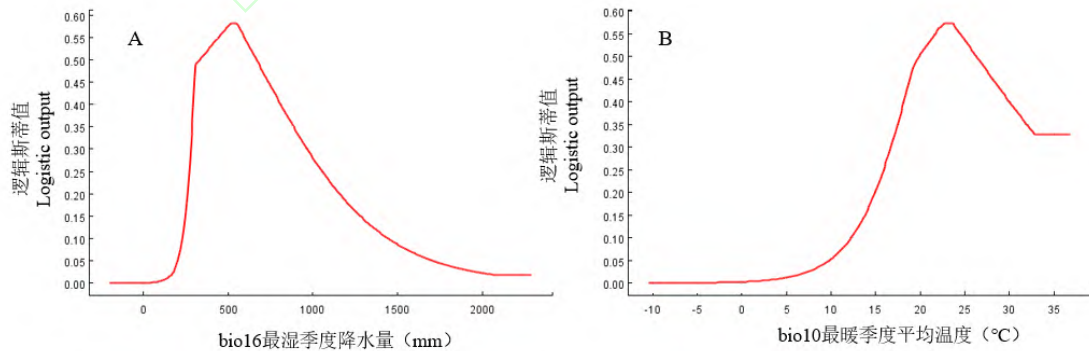


图3 主导气候因子相应曲线：最湿季度降水量(A)，最暖季度平均温度(B)

Fig.3 Corresponding curves of dominant climate factors: precipitation in the wettest quarter (A), average temperature in the warmest quarter (B)

2.3 气候变化条件下苦参在中国的适生度分布

在气候变化背景下，利用 MaxEnt 模型预测了我国苦参在末次盛冰期、当前气候、未来气候(2070)三个适宜性生境分布区域。将建模得到的输出结果中的 ASCII 文件通过 ArcGIS 中的格式转化工具转化成栅格文件，绘制不同历史时期的苦参在全国分布的适生度图(图 4, 5, 6)，图中的色带表示适生度，取值由 0 至 1，适生度取值越大表明该区域苦参适宜分布的概率越大，该区域即为苦参的潜在分布区域。

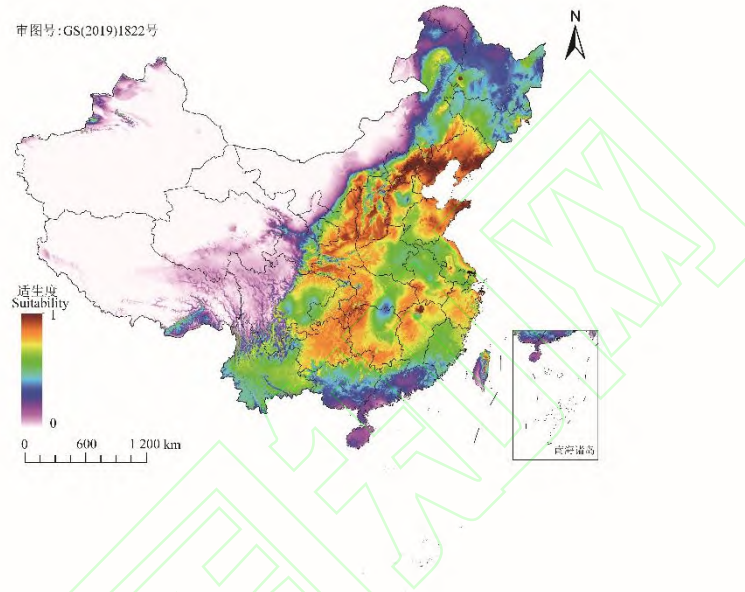


图 4 末次盛冰期苦参在全国的适生度
Fig.4 Suitability of *Sophora flavescens* in China during the last glacial maximum

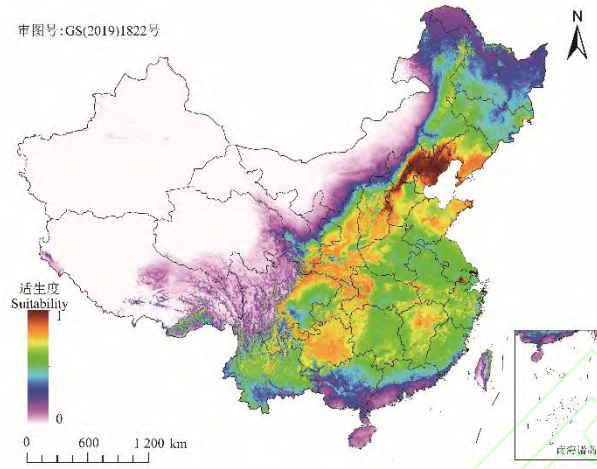


图 5 当前气候条件下苦参在全国的适生度
Fig.5 Suitability of *Sophora flavescens* in China under current climate conditions

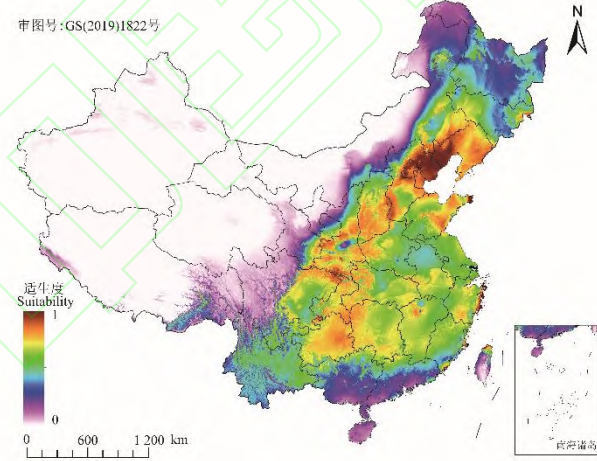


图 6 未来气候条件下苦参在全国的适生度
Fig.6 Suitability of *Sophora flavescens* in China under future climate conditions

2.4 气候变化对我国苦参适宜性生境分布的影响

在气候变化背景下,利用 MaxEnt 模型预测了我国苦参在末次盛冰期、当前气候、未来气候(2070)三个适宜性生境分布区域。将三个历史时期的适生度(图 4, 5, 6)通过重分类工具,对图层进行如下划分: $P < 0.33$ 为非适生区, $0.33 \leq P < 0.66$ 为低适生区, $P \geq 0.66$ 为高度适生区,得到三个历史时期的气候情境下苦参在全国的适宜性生境分布,如(图 7, 8, 9)所示,绿色为非适生区、紫色为低适生区、红色为高适生区,适生区包括低适生区与高适生区。

根据模型结果,从末次盛冰期开始到未来气候(2070,RCP8.5)三种气候情境下,苦参在我国的适宜生境面积逐渐减少,呈现递减的趋势,且整体有向高纬度地区移动的趋势,但变化范围较小;高适宜生境面积先减少再增加,变化范围同样较小。具体情况是:(1)末次盛冰期苦参的适宜生境面积占研究区域总面积的 36.20%,高适宜生境面积占研究区域总面积的 4.22%。(2)当前气候条件下苦参的适宜生境面积占研究区域总面积的 35.90%,较末次盛冰期减少 0.3%;当前气候条件下苦参的高适宜生境面积占研究区域总面积的 2.43%,较末次盛冰期减少 1.78%。(3)未来气候条件下苦参的适宜生境面积占我国总面积的 35.15%,较当前气候减少 0.75%;未来气候条件下苦参的高适宜生境面积占研究区域总面积的 2.87%,较当前气候增加 0.44%(图 7, 8, 9; 表 3)。

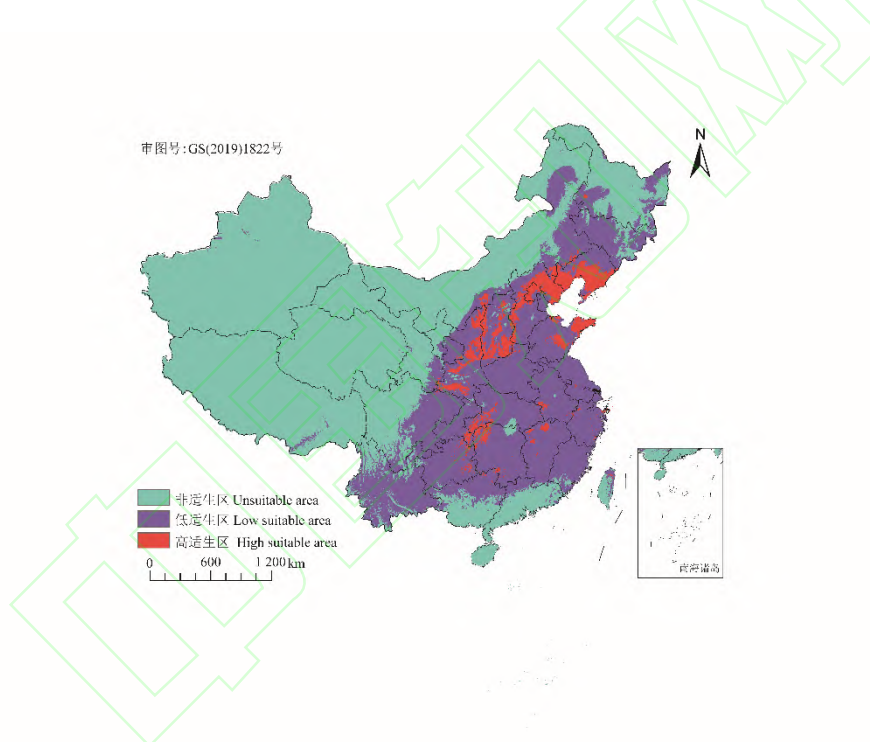


图 7 末次盛冰期苦参在全国适宜分布区的划分
Fig.7 Division of suitable distribution areas of *Sophora flavescens* in China during the last glacial maximum

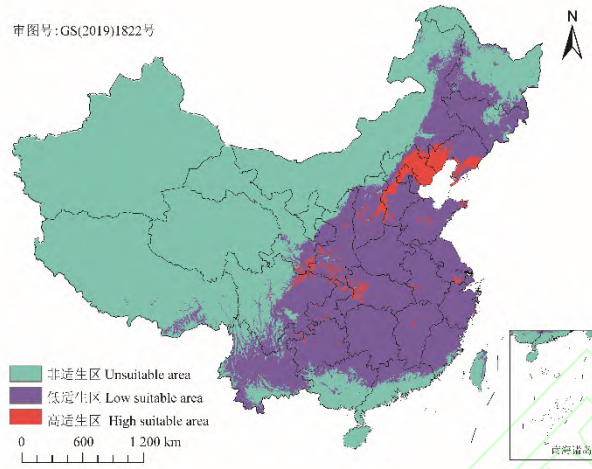


图 8 当前气候条件下苦参在全国适宜分布区的划分
Fig.8 Division of suitable distribution areas of *Sophora flavescens* in China under current climate conditions

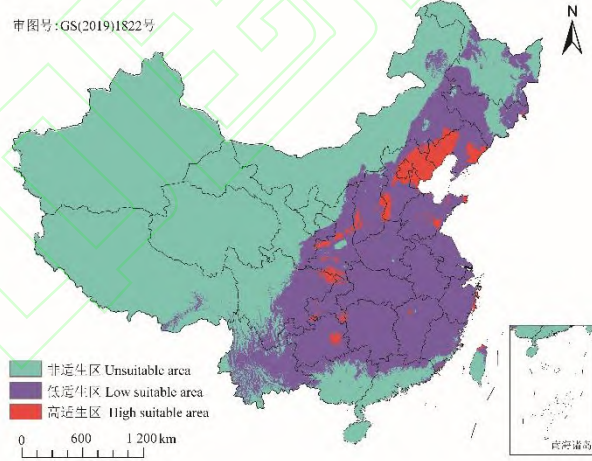


图 9 未来气候条件下苦参在全国适宜分布区的划分
Fig.9 Division of suitable distribution areas of *Sophora flavescens* in China under future climate conditions

2.5 苦参在全国适宜分布区的面积统计

在 ArcGIS 中将三个不同历史时期气候情境下的适生度重分类, 进行几何计算, 统计各图层的面积。末次盛冰期、当前气候及未来气候下的适生总面积分别: 348.6215×10^5 、 345.28×10^5 、 $337.8676 \times 10^5 \text{ km}^2$ (见表 3)。

表3 不同历史时期苦参在全国的适生面积统计
Table 3 The suitable area of *Sophora flavescens* in China in different historical periods

历史时期 Historical periods	重分类 Reclassification	面积统计(10^5 km^2) Area statistics	适生面积汇总(10^5 km^2) Suitable area
过去 Past	非适生区 Unsuitable area	614.1163	---
过去 Past	低适生区 Low suitable area	308.0347	348.6215
过去 Past	高适生区 High suitable area	40.58681	
当前 Now	非适生区 Unsuitable area	616.5338	---
当前 Now	低适生区 Low suitable area	321.8887	345.2801
当前 Now	高适生区 High suitable area	23.39139	
未来 Future	非适生区 Unsuitable area	623.3508	---
未来 Future	低适生区 Low suitable area	310.2965	337.8676
未来 Future	高适生区 High suitable area	27.57104	

3 讨论与结论

3.1 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区模拟

目前对模型精度评价应用最广泛的方法是 ROC 曲线法 (AUC 法), AUC 值被公认为生态位模型评价领域的最佳评价指标。AUC 的取值范围在 0.5~1, 值越接近于 1, 模型精度越高。本研究基于苦参的 725 个地理分布点和 19 个气候因子, 采用 MaxEnt 模型和地理信息系统(ArcGIS)对苦参在末次盛冰期、当前气候、未来气候(2070,RCP8.5)三种气候情景下在我国的适生区分布格局进行预测。受试者工作特征曲线显示, 三种情境的气候条件下, MaxEnt 模型训练集和测试集的 AUC 平均值均大于 0.85, 显著高于随机预测的 AUC 值(0.5), 这说明模型此次模型预测的地理分布与苦参实际分布拟合度较高, 拟合效果优秀, 预测结果可信度高。

模型结果显示, 从末次盛冰期开始到未来气候(2070,RCP8.5)三种气候情境下, 苦参的适宜生境区域主要集中分布在我国大兴安岭-张家口-兰州-拉萨-喜马拉雅山东南端一线的东南部地区。末次盛冰期至当前气候情境下, 苦参在呼伦贝尔高原和三江平原的适宜生境分布范围变小, 在东北平原和横断山脉有向北移动的趋势。当前气候情境至未来气候情境下苦参在呼伦贝尔高原、东北平原和长白山区域适宜生境面积向北扩张增加。

当前气候情境下, 高适宜生境区域主要集中分布辽东半岛、河北东北部与辽宁西南部的燕山区域、河北与山西交接的太行山区域、陕西南部、甘肃西南部、湖北西部、四川和重庆北部等地区; 山东中部和胶东半岛、江苏南部、安徽西南部大别山区以及江西中部等地区有零星分布。末次盛冰期至当前气候情境下, 陕北高原、山西中部的吕梁山区和东南部的太行山、中条山和胶东半岛、辽东半岛等地区的高适宜生境区域减少。当前气候情境至未来气候下, 燕山和辽东半岛区域的高适宜生境分布区向北扩展, 大巴山区和鄂西地区的高适宜生境分布区域减少, 山东东南部、陕西中部、贵州中部、重庆南部、江西北部、浙江和福建沿海地区以及台湾北部等地区将发展成为新的高适宜生境分布区域。

模型的模拟结果可以指导以后的实际调研方向和范围, 进一步探索和丰富苦参的现实分布区域。

3.2 气候变化对苦参潜在分布区域的时空分布格局的影响

气候变化是人类当前面临的最为严峻的环境问题, 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告 (intergovernmental panel on climate change, IPCC)指出, 相比于 1850 至 1900 年, 21 世纪末全球气温

增幅可能会超过 1.5 °C，在 RCP6.0 和 RCP8.5 情景下，温度升高可能会超过 2°C(Stocker, 2013)。气候变化对植物的生长发育、地理分布及种群数量大小等都将产生极大的影响(Alan et al., 2006)。越来越多的研究发现，气候变暖可能会导致植物适生区范围减小(刘洋等, 2009)，使得植物向高海拔、高纬度地区迁移(Wardle et al., 1992; 吴军等, 2011)。然而，气候变化对不同植物的影响不一致，因此研究植物对气候变化的响应对保护生物多样性具有十分重要的意义。

本研究在气候变化背景下，利用 MaxEnt 模型预测了苦参在末次盛冰期、当前气候、未来气候(2070,RCP8.5)三个适宜性生境分布区域。根据模型结果，从末次盛冰期开始到未来气候(2070,RCP8.5)三种气候情境下，苦参在我国的适宜生境面积逐渐减少，呈现递减的趋势，且整体有向高纬度地区移动的趋势。当前气候条件下苦参的适宜生境面积较末次盛冰期减少 0.3%，未来气候条件下苦参的适宜生境面积较当前气候减少 0.75%。这可能与全球气候变暖，海平面上升，低纬度地区变热，高纬度地区逐渐变暖，使得原有的较低纬度适生区变成了低适生区或者非适生区，原有的高纬度非适生区域变成了适生区域。全球气候变暖对苦参潜在分布区具有强烈的影响，暖期让苦参实际生态位变窄，不利于苦参生存。

气候变暖情景下，苦参高适生区面积将减少，说明气候变暖对苦参的扩张有消极影响，使得非适生区域增加。在气候变暖情境下，可能导致北半球中高纬度地区降水强度增加，同时全国各地地区极端高温指数显著增加，进而使得苦参的非适生区域增加，高适生区域减少且向高纬度地区移动(赵宗慈等, 2008)。这符合苦参喜凉、不耐涝的生物学特性。

另外，研究表明，预计到 21 世纪末气候变暖情景下，中国中西部地区夏季降水量将显著减少，这导致苦参原本不适宜生长的区域更加不适宜其扩张(梁玉莲和延晓冬, 2016)。这与本研究模型运算得到三种气候情境下苦参非适生区域面积逐渐增加的结果一致，也与 Wardle 等得到的气候变暖会使得植物向高海拔、高纬度地区迁移的研究结论一致(Wardle et al., 1992)。

3.3 生物气候因子与苦参适宜分布格局的关系

MaxEnt 模型的刀切法检验和主导因子响应曲线分析表明，苦参的潜在适生区分布影响较大的气候因子是：最暖季度平均温度(bio10)、最湿季度降水量(bio16)，其最适宜区间分别为 20~26 °C、400~800 mm。可见，温度和降水量是影响苦参分布的主导因子。温度和降水作为重要的气候因子显著影响着植物的生理生态特征、分布范围、多样性和丰富度等。

温度对苦参潜在分布的影响：苦参茎叶和根系均在 7、8 月份进入快速生长的阶段，在 8 月下旬种子乳熟，随后进入种子脱水阶段，9 月上旬种子完全成熟，荚果开裂，种子掉落，完成生殖生长。这一阶段正好与我国大部分地区最暖季度重合，而 20~26 °C 的最暖季度平均温度有利于苦参种子的乳熟和脱水，从而影响其在地理尺度上的分布格局。因此，在苦参的生产实践中，在选取作为选育优质种源的种植基地时要注意当地温度，应优先选择最暖季度平均温度的适宜取值在 20-26°C 之间的地域。

降水对苦参潜在分布的影响：相对于干旱胁迫，苦参植株受涝害影响更严重，高温高湿条件下更容易引起苦参根腐病等病害的发生(张文龙等, 2018)。适宜程度的降水可以提供充足的水分供应，促进植物生长。但水分过多却严重阻碍植物生长产生，土壤中过量水分导致土壤透气性变差，影响根系正常呼吸作用，不利于植物生长发育。同时过多水分引起的高湿度有利于病原体的快速繁殖，形成严重病害，威胁苦参的存活，从而影响其在地理尺度上的分布格局(Xin XF et al., 2016)。

我国疆域辽阔，经纬跨度大，地形落差显著，一些特定的等降水量线反而成为中国自然区划的重要参考指标。如 800 mm 等降水量线是中国南方湿润区和北方半湿润区的重要分界线；400 mm 等降水量线将中国划分为东部湿润半湿润区、西部干旱半干旱区两部分；而 200 mm 等降水量线以东为半干旱区，以西为干旱区(车彦军等, 2020)。我国降水的时空分布极不均匀，从时间分布上看，夏季降水较多，我国大部分地区夏季降水占全年降水量的 40%以上，春、秋季次之，冬季最少；从空间上看东南沿海地区降水丰沛，西北内陆地区降水稀少(肖潺等, 2015)。

由模型输出结果可知，三个历史时期气候情景下苦参在我国高适生区主要分布在我国 800 mm 等

降水量线与 400 mm 等降水量线之间。未来气候条件下苦参的适宜生境面积较当前气候减少 0.75%，这与未来排放情景下，我国 400 mm 等降水量线将发生西移和北抬的研究结果相一致(高艳红等，2020)。因此，在苦参的生产实践中，在选取作为高品质药材的种植基地的选取时要注意当地降水量，尤其要重点关注最湿季度降水量的适宜取值在 400~800 mm 的地域。

但是，物种存在概率对环境变量的反馈曲线反映的是单一环境变量的作用，苦参生命活动受到各种环境变量(包括气候因子、天敌种类、植被条件等)的综合影响，因此，此结果可作为判断苦参与环境变量之间关系的参考。

3.4 苦参在我国范围内的保护和开发利用的建议。

研究植物分布格局对气候变化的响应，了解植物的气候需求及其与物种地理分布间的关系，对于揭示物种的形成、迁移和扩散历史，提出合理的物种多样性保护策略及合理利用、生态恢复与建设具有重要意义(胡菀等，2020；王绮等，2020)。科学预测药用植物适宜分布区，并规划建立野生种质资源库、自然保护区，已成为保护药用植物资源的一种有效保护途径(Yan HY et al., 2020)。

本研究通过模型预测发现，在当前气候条件下苦参在全国高适宜生境区域主要集中在分布辽东半岛、河北东北部与辽宁西南部的燕山区域、河北与山西交接的太行山区域、陕西南部、甘肃西南部、湖北西部、四川和重庆北部等地区；山东中部和胶东半岛、江苏南部、安徽西南部大别山区以及江西中部等地区有零星分布。这些地区为苦参的生态适宜分布区，也是野生苦参资源的重点分布区域，是未来苦参重点保育区。

气候变暖情景下，当前气候条件下苦参在我国的适宜生境面积较末次盛冰期减少 0.3%，未来气候条件下苦参的适宜生境面积较当前气候减少 0.75%。未来气候条件下，受气候变化影响，四川、重庆、贵州、湖北和江西将成为苦参适宜分布的高风险地区，这些地区的野生苦参资源在未来要加强保护或迁地保育等工作。

气候变化情景下，苦参在我国相对稳定的高适生区主要分布在河北西部和东北部山区、内蒙古西南部、辽宁南部等地区，在这些地区合理优化布局等措施，进一步加强保护力度，建立自然保护区，禁止滥采滥挖，同时，建立广泛的苦参种植和生产加工等基地。

本研究首次在全国范围内对苦参进行了潜在分布区和适宜生境进行了预测和分析，得出全球气候变暖对苦参潜在分布区具有一定负面影响的结论，即全球气候变暖让苦参适生生境缩减，实际生态位变窄，一定程度上不利于苦参的生长。基于本研究结果，在苦参的生产实践中，应综合考虑温度和降水这两个生态因子，即在选取作为选育优质种源的种植基地时要注意当地温度，应优先选择最暖季度平均温度的适宜取值在 20~26 °C 之间的地域；在选取作为高品质药材的种植基地的选取时要注意当地降水量，尤其要重点关注最湿季度降水量的适宜取值在 400~800 mm 的地域。

参考文献：

- [1] ALAN PJ, BUSTAMANTE MR, COLOMA LA, et al. , 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming [J]. Nature, 439: 161-167.
- [2] BORAL D, MOKTAN S, 2021. Predictive distribution modeling of *Swertia bimaculata* in Darjeeling-Sikkim Eastern Himalaya using MaxEnt: current and future scenarios[J]. Ecol Process, 10(1): 1-16.
- [3] Editorial Committee of *flora of China*, Chinese Academy of Sciences, 1994. *Flora of China* (Vol. 40) [M]. Beijing: Science Press: 81-82. [中国科学院中国植物志编辑委员会, 1994. 中国植物志(第四十卷)[M]. 北京: 科学出版社: 81-82.]
- [4] ELITH J, GRAHAM CH, ANDERSON RP, et al. , 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. Ecography, 29(2): 119-151.
- [5] GAO YH, XU JW, ZHANG M, et al. , 2020. Advances of the 400 mm isohyet and wetness and dryness changes in the mainland of China[J]. 35 (11), 1101-1112. [高艳红, 许建伟, 张萌, 等, 2020. 中国 400 mm 等降水量线和干湿变化研究进展 [J]. 地球科学进展. 35 (11), 1101-1112.]
- [6] GUO LP, HUANG LQ, JIANG YX, 2005. Application of "3S" technologies in continuous usage of traditional Chinese medicine resources [J]. Chin J chin Mat Med, 30 (18): 1397-1400. [郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 2005. "3S"技术在中药资源可持续利用中的应用[J]. 中国中药杂志, 30 (18): 1397-1400.]
- [7] HU W, ZHANG ZY, CHEN LD, et al. , 2020. Changes in potential geographical distribution of *Tsoongiodendron odorum* since the Last Glacial Maximum [J]. Chin J Plant Ecol, 44 (1): 44-55. [胡菀, 张志勇, 陈陆丹, 彭焱松, 汪旭, 2020. 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, 44 (1): 44-55.]

- [8] HU X, GUO W, WU FC, et al., 2015. Application of MaxEnt ecology model in near-nature forestry plant introduction regionalization with *Hedychium coccineum* as an example [J]. *Guihaia*, 35 (3): 325-330. [胡秀, 郭微, 吴福川, 刘念, 2015. MaxEnt 生态学模型在野生植物近自然林引种区划中的应用—以红姜花为例[J]. *广西植物*, 35 (3): 325-330.]
- [9] HUANG YJ, LU JB, WANG FT, 2017. Predicting the potential geographical distribution of Hainan Odorous Frog (*Odorrana hainanensis*) in Hainan Province by MaxEnt [J]. *Chin J Zool*, 52 (1): 30-41. [黄勇杰, 卢佳斌, 王锋堂等, 2017. 基于 MaxEnt 模型预测海南岛海南臭蛙的潜在地理分布[J]. *动物学杂志*, 52 (1): 30-41.]
- [10] JHA KK, JHA R, 2021. Study of vulture habitat suitability and impact of climate change in central India Using MaxEnt[J]. *J Resour Ecol*, 12(1), 30-42.
- [11] JI W, GAO G, WEI JF, 2021. Potential global distribution of *Daktulosphaira vitifoliae* under climate change based on MaxEnt [J]. *Insect*, 12(4): 347.
- [12] JI Y, DU YB, WANG B, et al., 2011. Study on growth dynamics of *Sophora flavescens* from different germplasm sources [J]. *Pratac Sci*, 28 (5): 802-806 [纪瑛, 杜彦斌, 王斌, 张庆霞, 2011. 不同来源地苦参生长动态的研究[J]. *草业科学*, 28 (5): 802-806.]
- [13] JU L, CAO B, BAI CK, et al., 2014. Predictive distribution and habitat suitability assessment of *Notholirion bulbiferum* based on MaxEnt and ArcGIS. [J]. *Chin J Ecol*, 33 (6): 1623-1628. [车乐, 曹博, 白成科, 王娟娟, 张琳琳, 2014. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价[J]. *生态学杂志*, 33 (6): 1623-1628.]
- [14] JUN YJ, GUAN XC, WANG SJ, et al., 2020. Spatial analysis of annual precipitation lines of 800 mm in the eastern monsoon of China[J]. *Plateau Meteorol*, 39 (5): 997-1006. [车彦军, 管小春, 王世金, 武荣, 2020. 中国东部季风区 800 mm 等降水量线的空间变化分析[J]. *高原气象*, 39 (5): 997-1006.]
- [15] KAMEL M, BREM A S, MOURS Y MM, et al., 2021. Predicting the geographic distribution habitats of *Schizomyia buboniae* (Diptera: Cecidomyiidae) and its host plant *Deverra tortuosa* (Apiaceae) in Egypt by using MaxEnt modeling[J]. *J Basic Appl Zool*, 82(1): 1-13.
- [16] KIM Z, SHIM T, KOO YM, et al., 2020. Predicting the impact of climate change on freshwater fish distribution by incorporating water flow rate and quality variables[J]. *Sustainability*, 12(23): 10001.
- [17] LI DQ, HU W, HAN CX, et al., 2020. Prediction of potential suitable distribution of *Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas based on MaxEnt model [J]. *Plant Sci J*, 38 (6): 743-750. [李单琦, 胡苑, 韩彩霞, 陈陆丹等, 2020. 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*, 38 (6): 743-750.]
- [18] LIANG YL, YANG XD, 2016. Prediction of climate change over china and uncertainty analysis during the 21st century under RCPs [J]. *J Tropical Meteorol*, 32 (2): 183-192. [梁玉莲, 延晓冬, 2016. RCPs 情景下中国 21 世纪气候变化预估及不确定性分析[J]. *热带气象学报*, 32 (2): 183-192.]
- [19] LIU L, GUAN LL, ZHAO HX, et al., 2021. Modeling habitat suitability of *Houttuynia cordata* Thunb (Ceercac) using MaxEnt under climate change in China[J]. *Ecol Inform*, 2021, 63: 101324.
- [20] LIU YM, ZHOU SD, XIE DF, et al., 2018. Potential distribution of *Fritillaria unibracteata* predicted by the MaxEnt model[J]. *Guihaia*, 2018, 38 (3): 352-360. [刘艳梅, 周颂东, 谢登峰, 黄娇, 何兴金, 2018. 基于最大熵模型 (MaxEnt) 预测暗紫贝母的潜在分布[J]. *广西植物*, 38 (3): 352-360.]
- [21] LIU Y, ZHANG J, YANG WQ, 2009. Responses of alpine biodiversity to climate change[J]. *Biodivers Sci*, 17 (1): 88-96. [刘洋, 张健, 杨万勤, 2009. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展[J]. *生物多样性*, 17 (1): 88-96.]
- [22] LU WH, 1959. Study on materia medica of *Sophora flavescens* [J]. *J Chengdu Coll traditional Chin med*, (3): 49-53. [陆闻鸿, 1959. 苦参的本草学研究[J]. *成都中医学院学报*, (3): 49-53.]
- [23] LU YY, GUO S, YAN H, et al., 2018. Ecological suitability study on *Euphorbia kansui*[J]. *Mod Chin Med*, 20 (12): 1471-1475+1482. [卢有媛, 郭盛, 严辉, 钱大玮, 姜建明等, 2018. 甘遂生态适宜性区划研究[J]. *中国现代中药*, 20 (12): 1471-1475+1482.]
- [24] National Administration of Traditional Chinese Medicine, Editorial board of Chinese Materia Medica, 1999. Chinese materia medica [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press: (4): 634. [国家中医药管理局《中华本草》编委会, 1999. 中华本草[M]. 上海: 上海科学技术出版社: (4): 634.]
- [25] National Pharmacopoeia Commission, 2020. Pharmacopoeia of the people's Republic of China (Volume I, 2020 Edition) [M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press: 211-212. [国家药典委员会, 2020. 中华人民共和国药典 (2020 年版一部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社: 211-212.]
- [26] PAN SY, ZHU ZH, YAO TH, et al., 2016. Predicting suitable habitats of medicinal plant *Fallopia multiflora* in China under climate change scenarios[J]. *J Northwest A & F Univ (Nat. Sci. Ed.)*, 44 (1): 192-198. [潘石玉, 朱志红, 姚天华, 王彦星, 周佩, 2016. 气候变化背景下药用植物何首乌在中国适生区分布预测[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 44 (1): 192-198.]
- [27] PEI ST, ZHANG H, ZHANG PF, et al., 2021. Study on ecological suitability of *Euphorbiae Pekinensis* Rupr. [J]. *Chin. J. Inf. Tradit Chin Med*, 28 (05): 1-4. [裴苏婷, 张虹, 章鹏飞, 潘雅楠, 刘守金, 2021. 京大戟生态适宜性区划研究[J]. *中国中医药信息杂志*, 28 (05): 1-4.]
- [28] QIAO HJ, HU JH, HUANG JH, 2013. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models [J]. *Sci Sinica (Vitae)*, 43 (11): 915-927. [乔慧捷, 胡军华, 黄继红, 2013. 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*, 43 (11): 915-927.]
- [29] ROZHNOV V, PSHEGUSOV RH, et al., 2021. MaxEnt modeling for predicting suitable habitats in the North Caucasus (Russian Part) for Persian Leopard (*P. p. ciscaucasica*) based on GPS data from collared and released animals[J]. *Izv. Atmos Oceanic Phys*, 56(9): 1090-1106.
- [30] SAHA A, RAHMAN S, ALAM S, 2021. Modeling current and future potential distributions of desert locust *Schistocerca gregaria* (Forskål) under climate change scenarios using Maxent. [J]. *J Asia-Pac Biodivers* (prepublish), 14: 399-409.
- [31] Stocker, T.F., D. Qin, et al., 2013. 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, United Kingdom: Cambridge University Press: 5-6.
- [32] TAN YH, ZHANG XJ, YUAN SS, et al., 2020. Prediction of the ecological suitability of *Gentiana macrophylla* Pall. under

- scenarios of global climate change [J]. *Chin J Ecol*, 39 (11): 3766-3773. [檀逸虹, 张喜娟, 原树生, 于景华, 2020. 全球气候变化背景下秦艽生态适宜性预测[J]. *生态学杂志*, 39 (11): 3766-3773.]
- [33] WEN P, PENG K, CHEN X, et al., 2021. Habitat suitability evaluation of four ungulate species in Baishuihe National Nature Reserve based on maxent model[J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 42 (1): 70-75. [温平, 彭科, 陈旭, 韦怡, 杨志松, 戴强, 2021. 基于 MaxEnt 模型的白水河国家级保护区有蹄类保护动物生境适宜性评价[J]. *四川林业科技*, 42 (1): 70-75.]
- [34] WANG Q, FAN BG, ZHAO GH, 2020. Prediction of potential distribution area of *Corylus mandshurica* in China under climate change[J]. *Chin J Ecol*, 39 (11): 3774-3784. [王绮, 樊保国, 赵光华, 2020. 气候变化下毛榛在中国的潜在适生区预测[J]. *生态学杂志*, 39 (11): 3774-3784.]
- [35] WANG YS, XIE BY, WAN FH, et al., 2007. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. *Biodivers Sci*, (4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英, 2007. 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*, (4): 365-372.]
- [36] WARDLE P, COLEMAN MC, 1992. Evidence for rising upper limits of four native New Zealand forest trees [J]. *N Z J Bot*, 30: 303-314.
- [37] WU J, XU HG, CHEN L, 2011. A review of impacts of climate change on species[J]. *J Ecol Rural Environ*, 27 (4): 1-6. [吴军, 徐海根, 陈炼, 2011. 气候变化对物种影响研究综述[J]. *生态与农村环境学报*, 27 (4): 1-6.]
- [38] XIAO C, YU RC, YUAN WH, et al., 2015. Spatial and temporal differences characteristics of the rainy season of mainland China [J]. *Acta Meteorol Sin*, 73 (1): 84-92. [肖潺, 宇如聪, 原韦华, 李建, 2015. 中国大陆雨季时空差异特征分析[J]. *气象学报*, 73 (1): 84-92.]
- [39] XIN XF, NOMUR K, AUNG K, et al., 2016. Bacteria establish an aqueous living space in plants crucial for virulence[J]. *Nature*, 539, 524-529.
- [40] XING DL, HAO ZQ, 2011. The principle of maximum entropy and its applications in ecology[J]. *Biodivers Sci*, 19 (3): 295-302. [邢丁亮, 郝占庆, 2011. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. *生物多样性*, 19 (3): 295-302.]
- [41] YAN HY, FENG L, ZHAO YF, et al., 2020. Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt [J]. *Glob Ecol Conservation*, 21: 1-8.
- [42] ZENG JR, LI CM, et al., 2021. Ecological assessment of current and future *Pogostemon cablin* Benth. potential planting regions in China based on maxent and ArcGIS models [J]. *J Appl Res Med Aromat Plants*(prepublish), 100308.
- [43] ZHANG WL, DU FQ, HUANG XL, et al., 2018. The outbreak regularity and control methods of the main diseases and insect pests for artificially planted *Sophora flavescens* [J]. *Lishizhen Med Mat Med Res*, 29 (9): 2241-2243 [张文龙, 杜富强, 黄旭龙, 严毅, 罗永慧, 2018. 贵州特色药材苦参人工栽培常见病虫害发生规律及防治措施[J]. *时珍国医国药*, 29 (9): 2241-2243.]
- [44] ZHAO ZC, LUO Y, JIANG Y, et al., 2008. Assessment and prediction of precipitation and droughts/floods changes over the world and in China[J]. *Sci Technol Rev*, (6): 28-33. [赵宗慈, 罗勇, 江滢, 徐影, 2008. 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估[J]. *科技导报*, (6): 28-33.]
- [45] ZHONG GS, 2016. *Traditional Chinese medicine (The fourth edition of the new century)* [M]. Beijing: China traditional Chinese Medicine Press: 98. [钟赣生, 2016. *中药学(新世纪第四版)* [M]. 北京: 中国中医药出版社: 98.]
- [46] ZHU GP, LIU GQ, BU WJ, et al., 2013. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodivers Sci*, 21 (1): 90-98. [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆, 2013. 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*, 21 (1): 90-98.]