

# 宜昌橙地理分布区预测及其气候变化影响研究



郑雪姣<sup>1,3</sup>, 邓小芳<sup>2</sup>, 孟庭耀<sup>1</sup>, 牟凤娟<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>西南林业大学林学院, 云南昆明 650224

<sup>2</sup>国家林业和草原局管理干部学院, 北京 102600

<sup>3</sup>红河县委员会党校, 云南红河 654400

**摘要:** 宜昌橙 (*Citrus cavaleriei* Levl. ex Cavaler.) 为中国特有的抗寒性较强的野生柑橘种质资源。本文旨在了解宜昌橙在中国的生长适生区及不同气候变化情景下对其地理分布的影响, 为宜昌橙的资源开发及保护提供参考依据。本文结合不同时期的环境数据, 利用 MaxEnt 模型预测宜昌橙在中国各时期的适生区, 并通过 ArcGIS 软件和 SDMtools 工具分析不同时期宜昌橙的适生区变化特点与质心迁移路线等。基于 MaxEnt 模型预测宜昌橙适宜区结果 AUC 平均值大于 0.95, 建模结果达到极好的标准; 当前宜昌橙在中国主要分布在云南、四川、重庆、湖北、贵州、湖南、广西、甘肃、陕西等省区, 在基准气候条件下, 宜昌橙在中国的适生区总面积为  $144.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中最适生区主要位于贵州、重庆、四川和湖南; 在未来 2050 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 宜昌橙在中国的适生区面积较基准气候下的适生区面积分别增加  $22.20 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $29.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 随着气候的变化, 在未来 2070 年的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 宜昌橙在中国的适生区较 2050 年有所收缩, 与 2050 年同一情景比较收缩面积分别为  $81.76 \times 10^4 \text{ km}^2$  (RCP4.5) 和  $12.17 \times 10^4 \text{ km}^2$  (RCP8.5), 在 RCP8.5 情景下更有利于宜昌橙的生长; 从基准气候到未来 2050 年和 2070 年, 宜昌橙的适生区质心先向东迁移, 之后又向西南方向迁移, 其中 RCP8.5 情景下的质心迁移距离要大于 RCP4.5 情景下的迁移距离。

**关键词:** 宜昌橙; 分布区预测; 适生区; 气候变化

DOI: [10.57237/j.res.2024.04.001](https://doi.org/10.57237/j.res.2024.04.001)

## Studies on Geographical Distribution Prediction of *Cirtus caraleriei* in China and Influences of Climate Change

Zheng Xuejiao<sup>1,3</sup>, Deng Xiaofang<sup>2</sup>, Meng Tingyao<sup>1</sup>, Mou Fengjuan<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

<sup>2</sup>National Academy of Forestry and Grassland Administration, Beijing 102600, China

<sup>3</sup>Party School of Honghe County Committee, Honghe 654400, China

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目 (31360048).

\*通信作者: 牟凤娟, [moufengjuan@126.com](mailto:moufengjuan@126.com)

收稿日期: 2024-09-04; 接受日期: 2024-09-24; 在线出版日期: 2024-10-26

<http://www.resenvsci.org>

**Abstract:** The species *Citrus cavaleriei* Levl. ex Cavaler. is an unique wild *Citrus* germplasm resource with strong cold-resistance in China. The purpose of this paper is to understand the suitable areas of growth of *C. cavaleriei* in China and the influence of different climate change scenarios on its geographical distribution, and to provide reference for the development and protection of *C. cavaleriei* resources. Combined with the environmental data of different periods, this paper uses MaxEnt model to predict the suitable growing areas of *C. cavaleriei* in different periods in China, and uses ArcGIS software and SDMtools to analyze the changing characteristics of suitable growing areas and centroid migration routes of *C. cavaleriei* in different periods. The average AUC values are all larger than 0.95. The modeling results meet excellent standards. At present, *C. cavaleriei* is mainly distributed in Yunnan, Sichuan, Chongqing, Hubei, Guizhou, Hunan, Guangxi, Gansu, and Shanxi provinces in China. Under the benchmark climatic conditions, the total suitable area of *C. cavaleriei* in China is  $144.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ , among which the most suitable areas are mainly located in Guizhou, Chongqing, Sichuan and Hunan provinces. In 2050, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the suitable area of *C. cavaleriei* in China will increase by  $22.20 \times 10^4 \text{ km}^2$  and  $29.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; respectively compared with that under the reference climate. With climate change, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in 2070, the suitable area of *C. cavaleriei* in China has shrunk compared with that in 2050. Compared with the same scenario in 2050, the shrinking area is  $81.76 \times 10^4 \text{ km}^2$  (RCP4.5) and  $12.17 \times 10^4 \text{ km}^2$  (RCP8.5), respectively. RCP8.5 scenario is more beneficial to *C. cavaleriei* from the baseline climate to the next 2050 and 2070, the centroid of *C. cavaleriei* suitable area first moved eastward and then moved southwest, and the migration distance in RCP8.5 scenario was greater than that in RCP4.5 scenario.

**Keywords:** *Citrus cavaleriei*; Distribution Prediction; Suitable Area; Climate Change

## 1 引言

柑橘属 (*Citrus* L.) 隶属芸香科 (Rutaceae) 柑橘亚科 (Aurantioideae), 其中许多种类为重要的水果, 具有较高的食用价值和经济价值。一般认为柑橘属起源于东南亚 (包括中国南部、印度东北部和马来西亚) 及周边地区 [1, 2], 也有研究认为柑橘起源于喜马拉雅东南麓, 包括缅甸北部、印度阿萨姆邦东部和云南西部 [3]。但最新研究结果提出古印度板块可能是柑橘亚科的起源中心; 中国南部则可能是柑橘属的初生起源中心, 而喜马拉雅山东南麓和澳大利亚及附近岛屿则是柑橘的两个次生分化中心 [4]; 中国南方 (主要是云南) 及其毗邻地区 (印度和缅甸) 分布着大量柑橘属的野生、半野生种类及其近缘属的野生种类, 在现代柑橘的起源及分布等方面发挥了极为关键的作用 [5]。其中大翼橙亚属 (*C. subgen. Papeda* Swingle) 因其所有种类具有较大的翼叶而得名。有研究依据其营养器官 (如叶) 和生殖器官 (如花) 等形态特征, 认为大翼橙类是柑橘属中最原始的类型 [6]。宜昌橙 (*C. cavaleriei* Levl. ex Cavaler.) 为中国特有的野生柑橘种质资源, 具有发达的翼叶和单花, 为大翼橙亚属中较为进化的种类。但其野生种群生存现状不容乐观, 被列为国家重点保护野生植物名录 II 级 (2021)。该树

种广泛分布于中国南方多省区, 主产云南、贵州、四川和重庆, 以及湖南西部和西北部、广西北部、湖北西部、陕西南部、甘肃南部等地区 [7-9]。宜昌橙种内的变异较为丰富, 具有适应性广、耐贫瘠的优点, 同时还兼有较强的抗寒性、抗病性 (尤其是柑橘溃疡病) 及植株矮化的特点, 是柑橘杂交育种亲本及砧木的优质来源, 具有较高的育种价值。由于野外生存环境的破碎化, 加之人类活动的频繁干预, 目前宜昌橙的种群数量急剧减少, 保护工作刻不容缓。

气候变化是一个极其复杂的生物地球化学过程, 指的是气候平均状态随时间的变化; 而预测植物地理分布对气候变化的响应是当前较为热门的研究方向之一 [10]。有研究表明, 气候变化是影响植物分布的主要环境因素, 可通过促进或抑制植物生长, 从而改变其适宜区范围。例如水果、蔬菜等农产品的生产过程要强烈依赖于气候条件, 气候变化将影响其当前的适宜性区划, 最终影响其产量、品质和经济效益 [11]。在当前全球气候变暖这一大背景下, 温度和降水量的变化显著, 从而导致植物的地理生长适宜区及空间分布格局发生改变。有研究结果证实, 中国大面积栽种的水稻 (*Oryza sativa* L.) 和小麦 (*Triticum aestivum* L.) 的

种植边界较 1960 年有明显向北迁移的趋势[12, 13]。因此, 利用相关生物统计学知识和计算机技术来研究植物与气候因子间的相互作用, 探讨气候变化对不同植物分布特征的影响, 有助于深入理解整个植物生态系统对气候变化的响应机制, 对农业、林业的区域规划和生产具有重要的指导意义。

物种分布模型 (SDM, species distribution modeling) 一般被定义为: 基于物种发生与环境变量间相互关系来预测该物种在整个生态环境中存在概率的分布模型[14], 而决定物种地理尺度上分布的主要决定因素是气候因素与生物的相互关系[15]。目前用于研究物种适生区的生态位模型主要有 MaxEnt (Maximum Entropy)、GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production)、DOMAIN、BIOCLIM 和 ClimEx (Climate Matching Extremes) 等[16-20], 相较于传统的野外调查方法, 对生态位模型的研究不仅可以节省大量人力物力, 同时还具有高效、快捷和准确性高等诸多优势。其中 MaxEnt 模型软件具有准确性高、操作界面简单等优点, 被广泛应用于多个物种的适生区预测研究[21-25], 主要涉及植物适生区预测[26-28]、入侵物种风险评估[29, 30]、濒危物种保护[31, 32]以及病虫害防治[33]等多个领域。本研究利用 MaxEnt 生态模型探究宜昌橙分布生境与气候的关联, 对其种群的长期有效保护和开发具有重要意义, 而目前尚未开展相关方面的研究。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 物种分布数据获取

宜昌橙的分布数据主要通过以下平台获取: 中国数字植物标本馆 (CVH)、中国国家标本资源平台 (NSII)、中国自然标本馆 (CFH) 和 GBIF 全球生物多样性信息网络数据库等标本数据。对于部分仅有采集地没有具体坐标的分布点, 利用谷歌地图 (Google Earth) 查询对应分布点的具体经纬度信息, 最终获得共计 338 条宜昌橙有效分布记录。

#### 2.1.2 环境变量筛选

从全球气候数据库 (<http://www.worldclim.org>) 下载基准生物气候变量数据 (1960-1990 年) 及未来生物气候变量数据 (2050 年 RCP4.5 和 RCP8.5 模式、2070 年 RCP4.5 和 RCP8.5 模式), 数据的空间分辨率采用 2.5 弧分 (即地理空间分辨率 5 km) [34]。从 DEM 数字高程数据中提取获得地形因子数据 (坡度, 坡向, 海拔), 从中国科学院计算机网络信息中心和国际科学数据网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载 DEM 高程数据[35]。

#### 2.1.3 软件和地图数据

选用软件 MaxEnt3.4.4 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/>) 进行生态位模型分析, 地理信息系统软件选用 ArcGIS10.4 (<https://developers.ArcGIS.com/>), 通过国家基础地理信息系统数据库 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>) 获取中国行政区划图 (1:400 万)。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 物种分布数据处理

采用 ENMtool 工具筛选和删除宜昌橙冗余分布数据, 以降低因群集效应造成的取样偏差。同一栅格 (2.5 km×2.5 km) 内的多个分布点仅保留一个, 最终获得宜昌橙的有效分布记录 168 条, 并在 Excel 中按“物种名+纬度+经度”的顺序输入, 保存为“\*.csv”格式备用。

### 2.2.2 环境变量处理

利用 ArcGIS 软件提取宜昌橙 168 个有效分布点所对应的环境变量信息, 并利用 SPSS 软件先对 22 个环境变量进行 Person 相关性分析[36]; 相关系数 $|R|>0.8$ 的变量因子, 依据各环境变量对 MaxEnt 模型的贡献率大小, 保留贡献率较大的变量参与 MaxEnt 建模预测, 以避免过度拟合[37], 最终筛选出适用于宜昌橙适宜区预测的 11 个环境变量 (表 1)。

表 1 本研究使用的环境数据

Table 1 Environmental data used in this research

变量 Variable	描述 Description
Bio2	昼夜温差月均值 (°C) Mean diurnal lrange (Mean of monthly (maxtemp-mintemp))
Bio4	温度季节变化

变量 Variable	描述 Description
	Temperature seasonality
Bio6	最冷月份最低温 (°C) Min temperature of coldest month
Bio7	年温度变化范围 (°C) Temperature annual range
Bio9	最干季度平均温度 (°C) Mean temperature of driest quarter
Bio12	年平均雨量 (mm) Annual precipitation
Bio14	最干月份雨量 (mm) Precipitation of driest month
Bio17	最干季度雨量 (mm) Precipitation of driest quarter
Bio18	最暖季度平均雨量 (mm) Precipitation of warmest quarter
Bio19	最冷季度平均雨量 (mm) Precipitation of coldest quarter
Alt.	海拔 (m) Altitude

### 2.2.3 MaxEnt 建模和精度检验

利用 MaxEnt 软件对宜昌橙在中国的适生区建模, 将筛选出的 168 条分布数据和 11 个环境变量导入 MaxEnt 软件, 将 75% 的随机分布点设置为训练集 (training data) 用于构建模型, 其余 25% 的分布点作为测试集 (testing data) 来验证模型; 并用刀切法 (jackknife) 功能测定各变量因子的重要性, 设置模型以 subsample 重复运行 10 次, 最终采用重复 10 的平均值作为研究结果[38, 39]。

ROC 曲线 (Receiver Operating Characteristic) 是反映 MaxEnt 生态模型敏感性和特异性的综合指标, 取其下方面积 AUC 值 (Area under Curve) 作为衡量模型精度的指标。一般认为  $0.5 \leq AUC < 0.6$  时建模预测失败,  $0.6 \leq AUC < 0.7$  时模型的结果较差,  $0.7 \leq AUC < 0.8$  时模型结果一般, 而  $0.8 \leq AUC < 0.9$  时模型结果良好,  $0.9 \leq AUC < 1.0$  时模型结果极好[40, 41]。

### 2.2.4 适生区等级划分和适生区变化

通过 MaxEnt 生态模型获得宜昌橙分布模拟结果, 将预测结果获得的 ASCII 数据导入 ArcGIS 软件中, 并通过其 Conversion 工具将其转换为栅格数据, 再利用 Reclassify 工具对宜昌橙的适生区等级进行详细划分[42]。依据前期资源调查的信息, 按照适生指数 P 值将

宜昌橙适生区划分为 4 个等级:  $0 \leq P < 0.1$  时为不适生区,  $0.1 \leq P < 0.2$  时为低适生区,  $0.2 \leq P < 0.5$  时为中适生区,  $0.5 \leq P \leq 1$  时为最适生区。

模拟结果使用 SDMtool 工具计算不同时期情景下宜昌橙的分布质心和面积变化[43], 利用 ArcGIS 软件加载 SDMtoolbox 工具包, 加载成功后利用 ArcGIS 软件和 SDMtools 工具包分别将宜昌橙不同时期的预测结果文件转换为二进制的栅格文件, 再选择“SDMTools”模块中“Universal Tools”子目录下“Distribution Changes Between Binary SDMs”工具, 分别计算不同时期情景下宜昌橙适生区的扩张区域、稳定区域和收缩区域等; 最后利用“Centroid Changes (Line)”工具计算不同时期下预测分布的几何中心位移情况, 以检测宜昌橙适生区的总体变迁趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 宜昌橙的地理分布

目前的标本记录统计结果表明, 宜昌橙在中国主要分布在南方的云南、四川、重庆、湖北、贵州、湖南、广西、甘肃、陕西等省区 (图 1)。从中可以看出该物种主要分布在热带、亚热带季风气候区, 其地理分布与海拔、降水量、温度等因素密切相关。

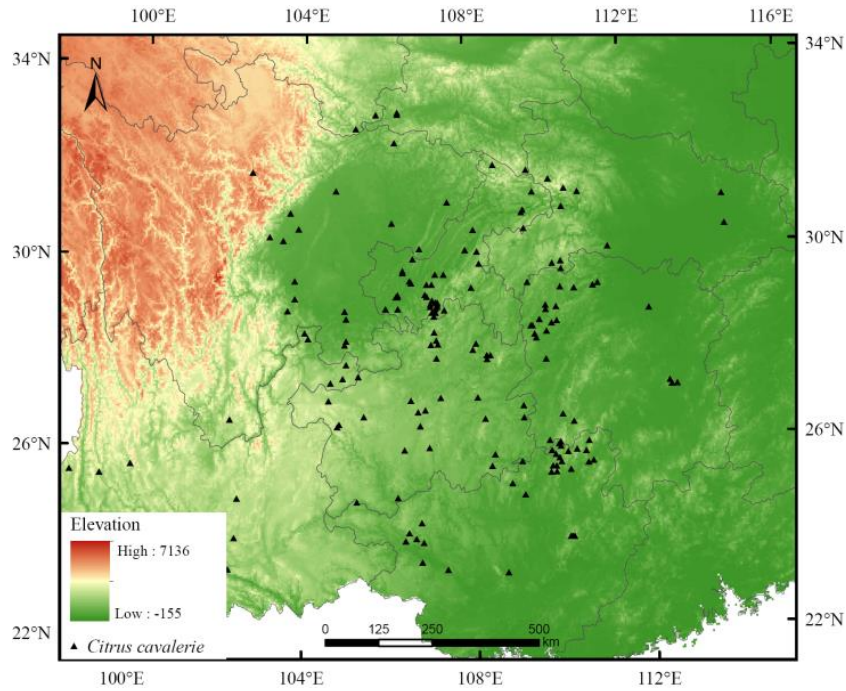


图1 宜昌橙地理分布图

Figure 1 Geographical distribution of *Citrus cavaleriei*

### 3.2 MaxEnt 模型预测精度

基于 MaxEnt 模型建模并重复运行 10 次后得出的 AUC 分析结果 (图 2), 其中训练数据 (training data) 的 AUC 值范围在 0.955-0.961, 平均值为 0.959; 而测

试数据 (testing data) 的 AUC 值范围在 0.942-0.957 范围, 平均值为 0.951。依据 AUC 值的评估标准, 说明本研究构建模型的准确性极高, 预测结果可信。

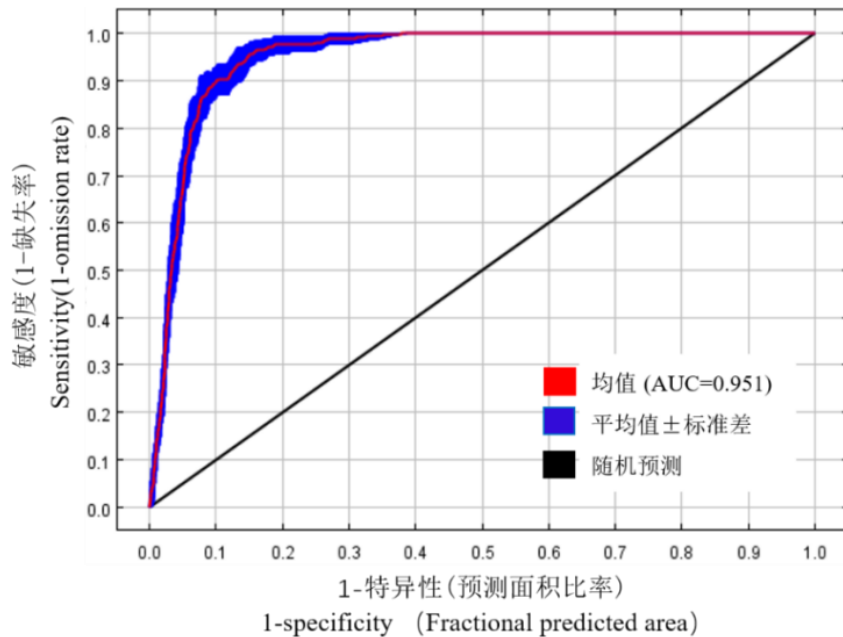


图2 宜昌橙 MaxEnt 模型的 ROC 检验

Figure 2 ROC test of the MaxEnt model of *Citrus cavaleriei*

### 3.3 环境变量重要性分析

综合分析 Jackknife 检验、贡献率和置换重要值的结果如表 2 和图 3 所示，发现影响宜昌橙分布的主导因子是最干月份雨量 (bio14)、年平均雨量 (bio12)、海拔 (Alt.)、最冷月份最低温 (bio6) 和最冷季度平

均雨量 (bio19)。其最适的生长条件是最干月份雨量 20 mm，年平均雨量 1100 mm 左右，海拔 200-1000 m，最冷月份最低温为 0-6 ℃，最冷季度平均雨量在 50-100 mm。

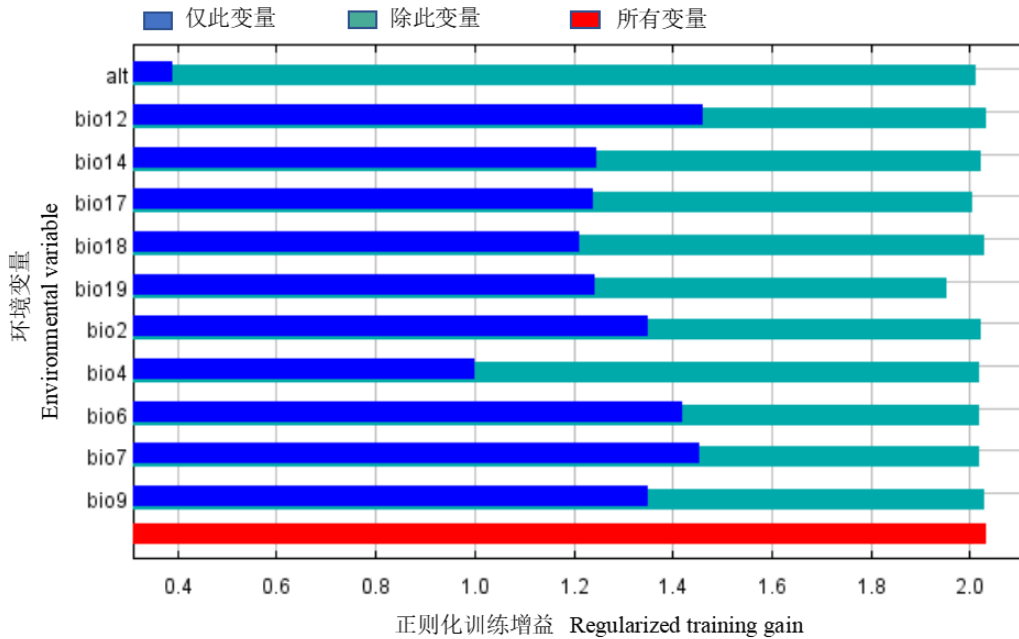


图 3 基于 Jackknife 法的各环境变量重要性分析

Figure 3 The analysis of importance of each environmental variable based on Jackknife test

表 2 各环境变量建模中贡献率和置换重要值

Table 2 Contribution rate and permutation importance value of each environmental variable

环境变量 Environmental variable	贡献率 Percent contribution	置换重要值 Permutation importance
Bio14	41.2	9.2
Bio12	22.2	0.3
Alt.	8.3	2.9
Bio2	7.1	1.9
Bio6	4.8	23.6
Bio7	4.6	12.9
Bio9	4	2.8
Bio19	3.9	14.2
Bio4	2.8	5
Bio17	1	27
Bio18	0.2	0.3

### 3.4 宜昌橙在中国的潜在分布

将宜昌橙的分布图层与中国地图相叠加，得到当

前宜昌橙适生区分布图 (图 4)。当前宜昌橙在中国主要分布在四川、甘肃、重庆、湖北、贵州、湖南、广西、云南、陕西等南方地区，宜昌橙的适生区主要集中在在中国南部各省区，其中最适生区主要集中在贵州、

重庆、四川和湖南，以最适生区为中心向外扩张逐渐变为中适生区、低适生区以及非适生区。最适生区、中适生区和低适生区的区域面积分别达  $43.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、

$46.57 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $54.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中适生区总面积占国土总面积的 15.26%。

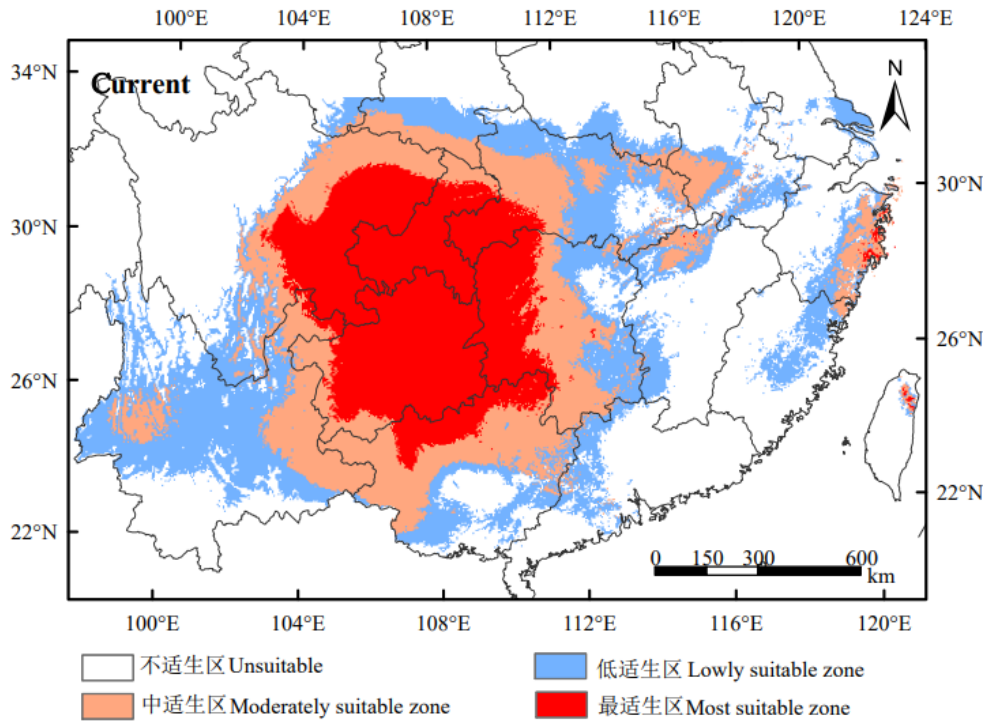


图 4 宜昌橙的适生区分布图

Figure 4 Distribution of suitable area of *Citrus cavaleriei*

### 3.5 宜昌橙在中国适生区面积变化

宜昌橙在中国适生区变化趋势如图 5 和图 6 所示。与基准气候模式下宜昌橙在中国的适生区面积相比，未来 2050 年和 2070 年的适生区面积均有明显增加(表 3)，RCP8.5 情景下的气候条件比 RCP4.5 情景下的气候条件更有利于宜昌橙的生长。其中未来 2050 年在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，宜昌橙在中国的适生区面

积比基准气候下的适生区面积分别增加  $22.20 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $29.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。但随着气候的变化，在未来 2070 年的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，宜昌橙在中国的适生区较 2050 年会有所收缩，与 2050 年同一情景比较，在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下收缩面积分别达到  $81.76 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $12.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

表 3 宜昌橙适生区面积统计

Table 3 Statistics of suitable areas of *Citrus cavaleriei*

时期 Period	高适生区 High suitable areas		中适生区 Moderate suitable areas		低适生区 Low suitable areas		非适生区 Non-suitable areas	
	占比%	面积 $\times 10^4 \text{ km}^2$	占比%	面积 $\times 10^4 \text{ km}^2$	占比%	面积 $\times 10^4 \text{ km}^2$	占比%	面积 $\times 10^4 \text{ km}^2$
Current	4.58	43.98	4.85	46.57	5.65	54.27	84.74	813.51
2050-RCP4.5	5.32	51.07	5.61	53.87	6.29	60.42	82.60	792.97
2050-RCP8.5	5.57	53.45	6.46	62.03	5.91	56.71	81.89	786.14
2070-RCP4.5	5.08	48.73	5.22	50.12	6.09	58.49	83.44	800.98
2070-RCP8.5	5.16	49.53	5.62	53.91	5.97	57.27	83.08	797.61

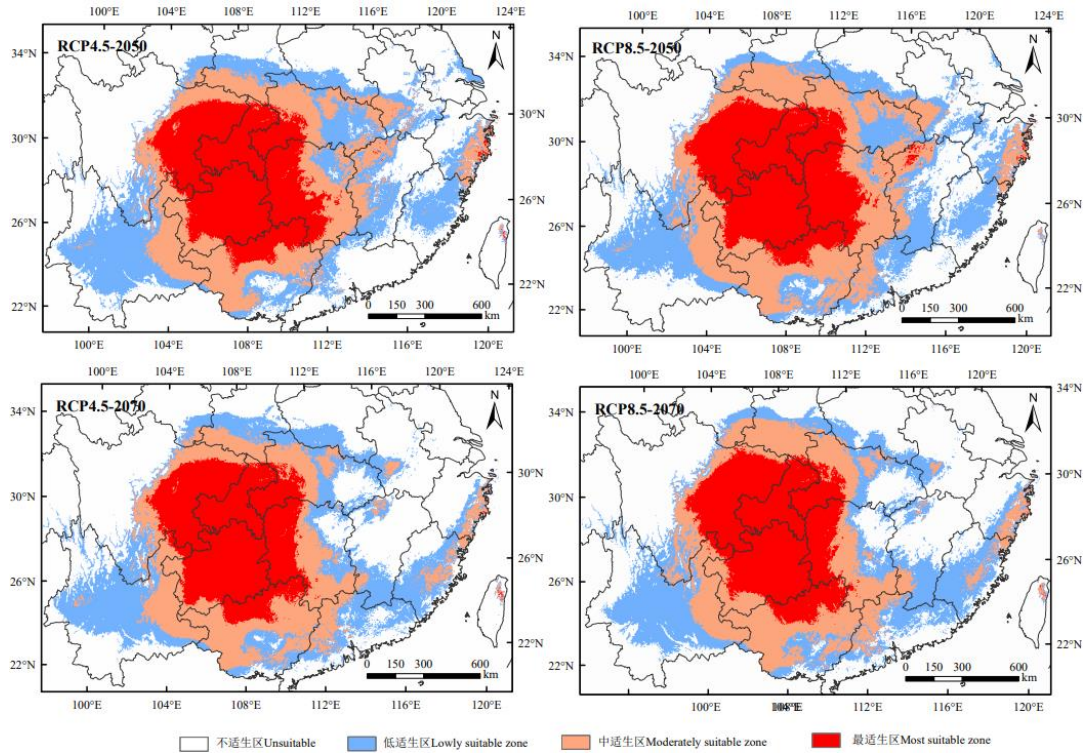


图 5 不同气候变化情景下宜昌橙在中国的适生性分布

Figure 5 Potential distribution of *Citrus cavaleriei* under different climate change scenarios

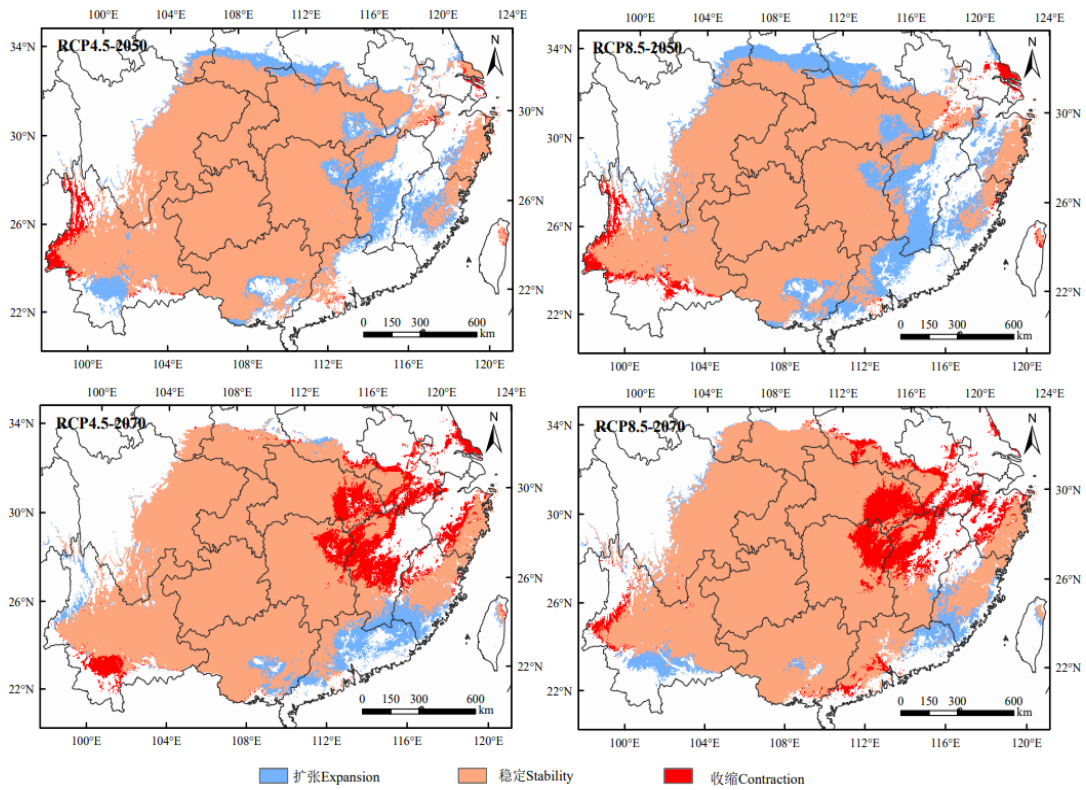


图 6 不同气候变化情景下宜昌橙在中国高适生区的变化

Figure 6 Changes in high suitable region distribution of *Citrus cavaleriei* under different climate change scenarios



利用 ArcGIS 软件的空间分析功能,并结合 MaxEnt 模型的模拟结果,分析气候变化情景下宜昌橙在中国适生区质心(几何中心)的迁移特征(图 7)。结果表明,在基准气候情景下,其适生区质心位于贵州省印江土家族苗族自治县(27°56'43"N, 108°31'18"E)。与基准气候下的适生区质心相比,未来 2050 年的适生区质心向东迁移,RCP4.5 情景下迁移的距离为 57.00 km,质心坐标迁移至贵州省松桃县(28°1'36"N,

109°11'48"E);RCP8.5 情景下迁移的距离为 66.90 km,质心坐标迁移至湖南省凤凰县(28°1'5"N, 109°19'40"E)。从 2050 年到 2070 年,随着气候的变化,宜昌橙适生区的质心又向西南方向迁移至贵州省江口县,其质心迁移距离分别达 67.85 km (RCP4.5) 和 79.56 km (RCP8.5),迁移后的质心坐标分别为 27°42'7"N, 108°44'53"E 和 28°1'5"N, 109°19'40"E。

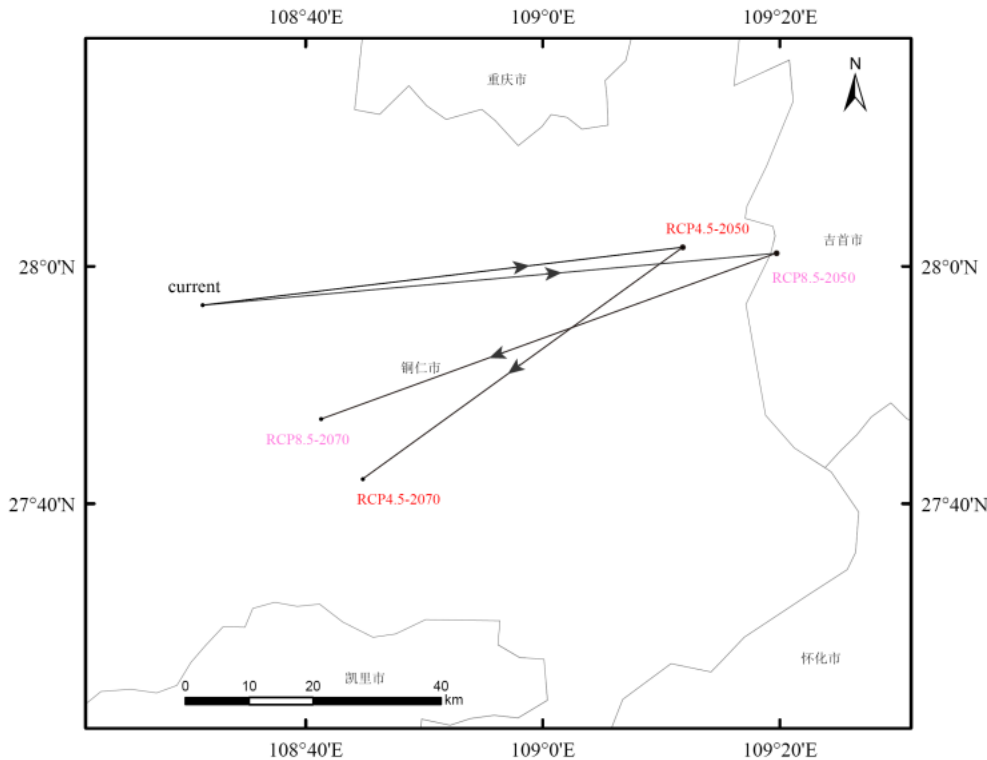


图 7 不同气候变化情景下宜昌橙适生区的质心迁移轨迹

Figure 7 Gravity center moving trajectory of suitable region of *Citrus cavaleriei* under different climate change scenarios

## 4 结论

### 4.1 MaxEnt 预测潜在分布区的有效评价

基于 MaxEnt 生态模型预测宜昌橙的未来适生区,研究结果的准确性主要受到现有宜昌橙的分布数据以及所选环境变量的综合影响。本文通过植物标本馆数据库获取了 338 条宜昌橙的分布数据,并利用 ENMtools 工具剔除了冗余分布点数据,避免模型过拟合,最终获得 168 条有效分布数据用于建模研究,数据量可满足 MaxEnt 软件的建模和验证要求。对于环境变量,本研究采用 SPSS 软件对 22 个变量进行相关性

分析,剔除相关系数 $|R|>0.8$ 的变量,最终保留 11 个环境变量用于建模,从而极大地提高了模拟结果的可靠性。当前,对生态模型的精度进行评价应用最广泛的方法是 ROC 曲线法(即 AUC 法)。AUC 法不受诊断阈值的影响,同时还可提供所有阈值范围上的性能评价结果。AUC 的取值范围在 0.5~1,其值越接近 1,模型的精度就越高[44]。本研究建模的训练数据和测试数据的平均 AUC 值均大于 0.95,预测效果较为理想。说明此次模型预测的宜昌橙地理分布与其实际分布区的拟合度较高,同时也表明现有的宜昌橙分布数据与 MaxEnt 模型的拟合效果较好,预测结果可靠性极高,可用于宜昌橙在地理分布与气候关系方面的研究。

## 4.2 气候变化对宜昌橙分布的影响

在本研究中，基于 Jackknife 检验表明温度与降水是影响宜昌橙分布的两个重要因素，随着时间推移，宜昌橙的分布中心和适生区面积均发生不同程度的变化，与未来全球气候变暖和降雨变化有关[45]。作为影响物种地理分布的主要因素之一，气候变化对不同物种未来适生分布的影响并不相同。气候变暖一般会导致部分物种的适生范围扩大，反之有些物种则会受到威胁，其适生范围会不断减少，甚至面临濒危或灭绝的危险[46]。在当前气候情景下，宜昌橙的适宜生境面积达到  $144.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占中国陆地国土总面积的 15.26%，说明宜昌橙在中国拥有极为广阔的土地适于生存。宜昌橙在 2050 年（RCP4.5 和 RCP8.5）的适生区与基准气候下的相比明显增加，而且在最大  $\text{CO}_2$  排放模式下（RCP8.5）的适生区面积要远大于低  $\text{CO}_2$  排放模式下（RCP4.5）的适生区面积。宜昌橙在 2070 年气候模式下的适生区面积与基准气候下的适生区面积相比有明显增加，但是与 2050 年相比却有所减少。

气候条件是限制物种大尺度地理分布的关键因素，除上述的温度和降水两个因素，影响宜昌橙分布的环境因素还包括土壤类型、植被类型，以及地形因子、人类活动等非生物因子；同时，社会经济结构及生产技术水平等其他因素也会对其分布有着重要影响[47, 48]。本研究以气候因子作为环境变量，并未考虑其他因素对宜昌橙分布的影响，预测获得的地理分布区可能比宜昌橙的实际分布范围要更为广阔。因此，在宜昌橙的后续相关研究中还要注重考虑各种因素相互作用的可靠表达，从而提高生态模型的预测效果。宜昌橙在柑橘属植物的起源、进化及育种等多方面的研究具有重要地位[49]，开展宜昌橙地理分布预测研究对掌握该物种的分布和生存状况，以及探索相关保护措施等具有重要指导意义，并为宜昌橙的种质保护以及资源开发等提供理论依据。

本研究采用了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候情景，从气候变化角度分别探讨 2050 和 2070 时期宜昌橙在中国的地理分布变化情况。就气候变化而言，国内外共发布了 30 多种气候模式，但不同气候模式下不同排放情景对中国境内的温度、降水的模拟结果却存在差异[50]。未来研究应参考不同气候模式，特别是与中国气候变化最为接近的气候情景，以客观、全面地认识和评价气候变化对宜昌橙种植分布区的影响，并进一步探求其对气候变化的响应机制。

## 4.3 宜昌橙潜在适生区与其种质保护

宜昌橙作为国家重点保护 II 级野生植物，其自然分布范围较为有限，且目前生境呈现破碎化，其生存面临多种威胁，建立自然保护区与种子园可有效地保护宜昌橙种群持续发展。在自然保护区范围内，可对宜昌橙进行有效的就地保护，最大程度防止人为破坏；而种子园的建立则可有效保护其种质资源及遗传多样性水平，但两者的建立与宜昌橙的适宜生境密切相关。目前的物种分布模型有利于大尺度地预测宜昌橙的潜在分布区，可为扩大宜昌橙的人工栽培规模及扩大生产面积提供参考，以避免盲目引种造成的人力和物力的损失，也利于探寻野生宜昌橙资源分布现状及其资源保护手段。

本文利用 MaxEnt 模型对宜昌橙的潜在适生区进行预测，并对其分布格局变化进行分析，基于研究结果对宜昌橙的种质资源保护在此提出以下建议：除现有广西（猫儿山国家级保护区、花坪国家级自然保护区、大瑶山国家级自然保护区、九万山国家级自然保护区）、重庆（金佛山国家级保护区）和湖南（衡山国家级自然保护区）等国家级自然保护区外，还可在贵州（印江、荔波）和四川（青城山）等高适分布区内建立地方自然保护区和种子园，将宜昌橙种质保护与种子育苗繁殖等相结合，最大程度保护现有种群，并进行扩繁；在目前宜昌橙中等适宜区以及未来气候条件下的高适分布区范围内，如云南东北部、贵州东南部和湖北西北部等地区可以考虑进行人工引种，未来可将其作为柑橘的优良砧木大力发展；而在预测为低适生区或非适生区的范围，则尽量不要选择种植宜昌橙，避免不必要的损失。

## 5 结论

基于目前馆藏标本统计数据发现宜昌橙在中国主要分布在南方的四川、甘肃、重庆、湖北、贵州、湖南、广西、云南以及陕西等省区；预测宜昌橙于基准气候条件下在中国的最适生区主要位于贵州、重庆、四川和湖南等地；在未来 2050 年宜昌橙在中国的适生区面积相较基准气候下的适生区面积有所增加，但在未来 2070 年时的适生区又较 2050 年的有所收缩。从基准气候到未来 2050 年和 2070 年，宜昌橙适生区的质心先向东迁移，之后又向西南方向迁移。研究结果可为宜昌橙的种质资源保护，以及柑橘类经济树种的

栽培区域规划提供可参考依据。

## 参考文献

- [1] Roose M L, Frederick Jr. G G, Lee R, et al. Development of a global conservation strategy for *Citrus* genetic resources [J]. *Acta Horticulturae*, 2015, 1065: 75-83.
- [2] Roose M L, Gmitter F G, Lee R, et al. Conservation of *Citrus* germplasm: an international survey [J]. *Acta Horticulturae*, 2015, 1101: 33-38.
- [3] Wu G H A, Terol J, Ibanez V, et al. Genomics of the origin and evolution of *Citrus*. *Nature*, 2018, 554: 311-316.
- [4] Huang Y, He J X, Xu Y T, et al. Pangenome analysis provides insight into the evolution of the orange subfamily and a key gene for citric acid accumulation in citrus fruits. *Nature Genetics*, 2023, 55(11): 1964-1975.
- [5] Gmitter F G, Hu X. The possible role of Yunnan, China, in the origin of contemporary *Citrus* species (Rutaceae) [J]. *Economic Botany*, 1990, 44(2): 267-277.
- [6] 方德秋, 章文才, 肖顺元. 应用同工酶进行柑桔分类和进化研究 [J]. *植物分类学报*, 1993, 31(4): 329-352.
- [7] 黄成就. 中国植物志 (第43卷, 第2分册) [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] Zhang D-X, Hartley T G, Mabberley D. Rutaceae. In: Wu Z-Y, Raven P, Hong D-Y (eds), *Flora of China*. Vol. 11 (Oxalidaceae through Aceraceae). Beijing: Science Press, 2010: 51-97.
- [9] 郑重. 湖北植物大全 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1993.
- [10] 郭学雨, 安成立, 王逸珺. 美味猕猴桃同日不同时间授粉效果研究 [J]. *北方园艺*, 2016, 40(11): 34-37.
- [11] 翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3237-3243.
- [12] 陈兆波, 董文, 霍治国, 等. 中国农业应对气候变化关键技术研究进展及发展方向 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3097-3104.
- [13] 叶清, 杨晓光, 解文娟, 等. 气候变暖背景下中国南方水稻生长季可利用率变化趋势 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(21): 4399-4415.
- [14] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [15] 应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4): 94-102.
- [16] 孙杰杰, 江波, 朱锦茹, 等. 应用生态位模型预测檫木在浙江省的潜在适生区与主导环境因子 [J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(2): 1-6.
- [17] 张琴, 张东方, 吴明丽, 等. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区 [J]. *植物生态学报*, 2017, 41(7): 770-778.
- [18] 王国峥, 耿其芳, 肖孟阳, 等. 基于4种生态位模型的金钱松潜在适生区预测 [J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6096-6104.
- [19] Wittmann M E, Barnes M A, Jerde C L, et al. Confronting species distribution model predictions with species functional traits [J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(4): 873-879.
- [20] Souza P G C, Aidoo O F, Farnezi P K B, et al. *Tamarixia radiata* global distribution to current and future climate using the climate change experiment (CLIMEX) model. *Scientific Reports*, 2023, 13: 1823.
- [21] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.
- [22] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区 [J]. *植物保护学报*, 2016, 43(6): 1041-1048.
- [23] Moreno R, Zamora R, Molina J R, et al. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (MaxEnt) [J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6(6): 364-370.
- [24] Solhjoui-Fard S, Sarafrazi A. Patterns of niche overlapping and richness among *Geocoris* species (Hemiptera: Geocoridae) in Iran [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2016, 26(9): 1197-1211.
- [25] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [26] 董光, 何兰, 程武学. 基于 MaxEnt 和 GIS 技术的桔梗适宜性分布区划研究 [J]. *中药材*, 2019, 42(1): 66-70.
- [27] 王哲, 李波, 姜大成, 等. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术的吉林省玉竹主导环境因子与生态适宜性区划研究 [J]. *时珍国医国药*, 2018, 29(9): 2250-2253.
- [28] 王丹, 卫海燕, 杨洋, 等. 基于 MaxEnt 和 GIS 的竹叶柴胡适生区分布预测 [J]. *中药材*, 2017, 40(2): 301-305.
- [29] 洪宇辰, 杨星萍, 贺倩. 基于 GIS 和 MaxEnt 模型的川内泽兰属植物生境适宜性评价 [J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2018, 49(5): 759-762.
- [30] 张颖. 基于 GIS 的生态位模型预测源自北美的菊科入侵物种的潜在适生区 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.

- [31] 谭钰凡, 左小清. 基于 GIS 与 MaxEnt 模型的金花茶潜在适生区与保护研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(1): 24-32.
- [32] 席庆. 基于 GIS 技术的白头叶猴潜在分布研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [33] 王茹琳, 余华彬, 王闫利, 等. 基于 MaxEnt 的华山松大小蠹在中国潜在分布区预测 [J]. 气象科技进展, 2016, 6(5): 644-649.
- [34] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [35] 王艳君. 大香格里拉地区酿酒葡萄气候区划研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [36] Jiang X-L, Deng M, Li Y. Evolutionary history of subtropical evergreen broad-leaved forest in Yunnan Plateau and adjacent areas: an insight from *Quercus schottkyana* (Fagaceae) [J]. Tree Genetics and Genomes, 2016, 12(6): 104-116.
- [37] 胡淑萍, 何礼文. 基于 MaxEnt 与 ArcGIS 对白水江国家级自然保护区缺苞箭竹适生区分析 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2115-2122.
- [38] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5674-5684.
- [39] Santana Jr P A, Kumar L, Da Silva R S, et al. Assessing the impact of climate change on the worldwide distribution of *Dalbulus maidis* (DeLong) using MaxEnt [J]. Pest Management Science, 2019, 75(10): 2706-2715.
- [40] 古元阳, 张芳玲, 梁晓玉. 基于东北虎潜在栖息地保护的天然保护地整合 [J]. 生态学杂志, 2020, 39 (5): 1590-1599.
- [41] 秦思思, 颜玉娟, 欧阳晟. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测蜡梅适生域在中国的潜在分布 [J]. 生态科学, 2020, 39(3): 49-56.
- [42] Qin A, Jin K, Batsaikhan M E. Predicting the current and future suitable habitats of the main dietary plants of the Gobi Bear using MaxEnt modeling [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22(2): 01032.
- [43] Brown J L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 116-128.
- [44] Elith J, Phillips S J, Hastie T A, et al. statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [45] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局及其气候解释 [J]. 生物多样性, 2008, 16(5): 470-476.
- [46] 王茹琳, 文刚, 李庆, 等. 美味猕猴桃地理分布模拟与气候变化影响分析 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(4): 335-345.
- [47] 莫建国, 池再香, 汤苾, 等. 贵州山区红心猕猴桃种植气候区划 [J]. 中国农业气象, 2016, 37(1): 36-42.
- [48] 任丹, 漆雁斌, 于伟咏, 等. 农户机械使用程度及其影响因素研究—基于四川省 205 户猕猴桃种植户的调查 [J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(4): 528-534.
- [49] 陈洪明, 江东, 胡忠荣, 等. 云南元江县首次发现原始宜昌橙群落 [J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(6): 929-935.
- [50] 翟颖佳, 李耀辉, 陈玉华. 全球及中国区域气候变化预估研究主要进展简述 [J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 803-813.