中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

我国金柑属植物气候适宜区的预测

章　翼，薛　帅，黄红梅，李大志，唐　帅，孔维政，易自力

Prediction of suitable climatic areas for *Fortunella* species in China

ZHANG Yi, XUE Shuai, HUANG Hongmei, LI Dazhi, TANG Shuai, KONG Weizheng, and YI Zili

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210416

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响

Climatic factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 294–302

软枣猕猴桃在中国的适生区分析及对未来气候变化的响应

Climatic suitable area analysis and response to climate change of *Actinidia arguta* in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1523–1532

四川柑橘适宜分布及其对气候变化的响应研究

Response of suitable distribution of citrus in Sichuan Province to climate change

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 845–859

气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析

Suitability analysis of key potato growth stages in Inner Mongolia under climate change

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(1): 38–48

气候低适宜区域橡胶种植模式对蚂蚁多样性的影响

Effects of rubber planting patterns on ant diversity in low climate suitable area

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1472–1480

中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究

Potential distribution of *Actinidia chinensis* in China and its predicted response to climate change

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(1): 27–37

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 11 月 第 29 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2021, 29(11): 1838−1845

DOI: 10.12357/cjea.20210416

章翼, 薛帅, 黄红梅, 李大志, 唐帅, 孔维政, 易自力. 我国金柑属植物气候适宜区的预测[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(11): 1838−1845

ZHANG Y, XUE S, HUANG H M, LI D Z, TANG S, KONG W Z, YI Z L. Prediction of suitable climatic areas for *Fortunella* species in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1838−1845

我国金柑属植物气候适宜区的预测*

章 翼[1], 薛 帅[1], 黄红梅[1], 李大志[2,3], 唐 帅[1], 孔维政[1], 易自力[1**]

(1. 湖南农业大学生物科技技术学院 长沙 410128; 2. 湖南农业大学园艺园林学院 长沙 410128; 3. 国家柑橘改良中心长沙分中心 长沙 410128)

摘 要: 近年来, 由于金柑商业种植品种单一导致种植效益降低, 种植面积不断萎缩, 而且随着黄龙病等病害的爆发导致野生金柑属资源分布面积不断缩小。在我国湖南、福建、广西等省份已开展过对金柑属野生的资源收集工作, 但尚未考虑气候对其分布的影响。因此, 亟需了解金柑气候适宜分布区, 为其种质资源的收集和保护提供基础。本研究运用最大熵模型 (MaxEnt) 和地理信息系统 (ArcGIS 10.3), 结合金柑属 (*Fortunella*) 植物的实际分布数据和 18 个影响分布的气候因子, 对金柑属 6 个种的潜在气候适宜区进行预测, 并利用刀切法 (Jackknife test) 筛选主导气候因子。结果表明, 金柑属潜在气候适宜区范围主要分布于大别山—大巴山以南地区, 山金柑 (*F. hindsii*)、罗浮金柑 (*F. margarita*)、罗纹金柑 (*F. japonica*)、长叶金柑 (*F. polyandra*)、金弹 (*F. crassifolia*) 和长寿金柑 (*F. obovata*) 的最适宜区面积为 354 000 km^2、276 100 km^2、495 800 km^2、613 600 km^2、474 400 km^2 和 663 403 km^2; 除长叶金柑外, 其他 5 个种的气候最适宜区主要分布于湖南、江西、广西、福建、浙江、广东 6 个省份; 长寿金柑的最适宜区除上述各省份外还包括重庆; 长叶金柑的气候最适宜区包括重庆、广西、广东、海南、云南南部地区。金柑属实际分布点均在预测图中的最适宜区域内, 说明预测结果与实际分布情况高度一致。金柑属 6 个种适宜区预测模型的曲线下面积 (AUC) 值均大于 0.9, 表明本研究预测分布范围精确度高, 可作为金柑属野生资源的区域调查及保护、优良品种推广的科学依据。

关键词: 金柑属; MaxEnt; 气候适宜区; 主导气候因子

中图分类号: S601.9 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Prediction of suitable climatic areas for *Fortunella* species in China*

ZHANG Yi[1], XUE Shuai[1], HUANG Hongmei[1], LI Dazhi[2,3], TANG Shuai[1], KONG Weizheng[1], YI Zili[1**]

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Horticulture and Landscape College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. National Center for Citrus Improvement, Changsha 410128, China)

Abstract: *Fortunella* is one group of the citrus fruit trees in southern China, a kind of edible hesperidium with rich flavonoids, carotenoids, limonoids, coumarins, and the fruit of these evergreen trees also have ornamental value. In recent years, areas of growth of commercial species of *Fortunella* have been decreasing due to a low net interest of planting single species. Meanwhile, natural resources have also withered due to the Huanglong disease caused by gram-negative bacteria. National collection of germplasm resources of *Fortunella* has been completed in parts of China, including Hunan, Fujian, Guangxi, etc.; however, this work did not take

* 湖南农业大学第一批重大科研项目暨创新团队培育项目 (17PYXM02) 资助

** 通信作者: 易自力, 主要研究方向为植物种质资源开发及遗传改良与利用。E-mail: yizili@hunau.net

章翼, 主要研究方向为果树种质资源评价。E-mail: 15974106701@163.com

收稿日期: 2021-06-30 接受日期: 2021-09-26

* This study was supported by the First Major Research Projects and the Cultivation Project of Innovation Teams of Hunan Agricultural University (17PYXM02).

** Corresponding author, E-mail: yizili@hunau.net

Received Jun. 30, 2021; accepted Sep. 26, 2021

the effects of climatic factors on their distribution into consideration, which could provide a scientific basis for protection and collection of natural resources of *Fortunella* species. In this study, we predicted suitable climatic areas for six species (*F. hindsii* Swingle, *F. margarita* Swingle, *F. japonica* Swingle, *F. polyandra* Tanaka, *F. crassifolia* Swingle, and *F. obovata* Tanaka) of *Fortunella* using the MaxEnt (the maximum entropy, MaxEnt 3.3.3) model and the ArcGIS (the geographic information, ArcGIS 10.3) system to analyze actual geographical distribution data and 18 climate factors affecting their distribution. The dominant climate factors were screened through Jackknife test. Results showed that the suitable climatic region for the six species analyzed were distributed mainly in the southern areas of Dabie—Daba Mountain. The suitable region for the six species covered 354 000 km^2 (*F. hindsii* Swingle), 276 100 km^2 (*F. margarita* Swingle), 495 800 km^2 (*F. japonica* Swingle), 613 600 km^2 (*F. polyandra* Tanaka), 474 400 km^2 (*F. crassifolia* Swingle), and 663 403 km^2 (*F. obovata* Tanaka). The optimum climate region for *F. polyandra* Tanaka mainly extended to Chongqing, Guangxi, Guangdong, Hainan, and south of Yunnan, while that for the other five species was predominantly distributed in Hunan, Jiangxi, Guangxi, Fujian, Zhejiang, and Guangdong; some favorable region for *F.* obovata Tanaka even extended to Chongqing. The main climatic factors affecting the growth of *Fortunella* include minimum temperature, precipitation, and isothermality. The major climatic factors affecting *F. hindsii* Swingle distribution included isothermality and precipitation in April and June, while for *F. margarita* Swingle such climatic factors comprised precipitation in April and June, minimum temperature in February and July, and isothermality and precipitation in the driest month. Similarly, geographical distribution of *F. japonica* Swingle was influenced by precipitation in April and June, minimum temperature in July, isothermality and precipitation in the driest month, and precipitation in the warmest quarter. Likewise, the major climatic factors affecting natural distribution of *F. polyandra* Tanaka comprised precipitation in July and in December, minimum temperature in February and June, isothermality, and mean precipitation in the warmest quarter. Similar analytical results demonstrated that the dominant climatic factors affecting the distribution of both *F. crassifolia* Swingle and *F. obovata* Tanaka were in terms of precipitation in June, and isothermality and mean precipitation of the warmest quarter. The area under the curve (AUC) value of the MaxEnt model for all six species exceeded 0.9 and their actual distribution areas were also integrated, which indicated that the predicted distribution range of this study was highly accurate. Consequently, these results are expected to provide scientific guidance for regional investigation and protection of wild species of *Fortunella* and promotion of its varieties.

Keywords: *Fortunella*; MaxEnt Model; Climatic suitable areas; Dominant climatic factors

金柑属 (*Fortunella*) 隶属于芸香科 (Rutaceae)、柑橘亚科 (Aurantioideae)、柑橘族 (Citrea) 的一类植物, 统称为金柑[1]。金柑属起源并主要分布于我国南部地区, 目前主流的植物分类体系认为金柑属主要包括山金柑 (*F. hindsii* Swingle)、罗浮 (*F. margarita* Swingle)、罗纹 (*F. japonica* Swingle)、长叶金柑 (*F. polyandra* Tanaka)、金弹 (*F. crassifolia* Swingle) 和长寿金柑 (*F. obovata* Tanaka) 6 个种[2]。金弹果肉多汁清甜且极少刺激味, 通常带皮鲜食; 罗纹和长叶金柑味酸且有辛辣味, 一般加工成蜜饯和果酒; 罗浮和长寿金柑果皮呈金黄色, 果形不仅有特色且挂果时间长, 具有极高的园艺观赏价值。除此以外, 金柑属果肉不仅可鲜食外, 果皮中的精油可以提取抗氧化和清除体内自由基的黄酮化合物, 种子内提取的类柠檬苦素也具有抗癌作用, 是一类主要的药用植物[3-4]。

金柑中的金弹作为我国南方的一类特色水果, 在广西、福建、江西、湖南、浙江有较大面积的商业化种植[5]。根据《中国年鉴》及中国果业信息网对近 10 年金柑种植面积的统计, 广西阳朔县、融安县等金柑主要种植区保持平均每年 1333.33 hm^2 左右的增长速度; 而湖南的浏阳、桂东、蓝山和江西遂川、浙江宁波等传统金柑种植的主要县市, 金柑种植面积却逐年下降, 其主要原因之一是商业品种单一化, 导致种植效益下降。尤其自 20 世纪初黄龙病在我国华南地区发现后, 不断向云南、广西、广东、福建扩散, 该病害的发生也导致金柑的种植面积不断缩小[6]。野生金柑资源与商业栽培品种相比, 抗病虫害、抗逆境能力强, 通过挖掘野生资源的抗性基因, 可为金柑新品种的创制和改良提供基础, 有利于改善商业品种单一化的现象[7]。随着金柑野生资源不断减少, 对相应野生资源的保护与利用迫在眉睫。近年来林大盛等[5] 调查了我国金柑属分布及种类情况, 主要对不同地区分布的金柑属植物进行形态特征的描述; 崔德珍[8] 研究了湖南省金柑属种质资源, 详细描述了湖南金柑种类特征并分析了不同种之间果实品质的差异; 黄新忠等[9] 统计了福建省山金柑的分布状况, 初步了解山金柑在福建的地理分布、种群数量、濒危情况等。上述对金柑属资源进行调查过程中都尚未结合其气候适宜区域进行区域划分研究, 而且实际生产中没有制定种植金柑植物适合的规划区域, 从而导致收集资源及引种效率不高。因此, 需要预测金柑属资源的适宜地分布, 并分析其生长的气候主导因子, 为了解金柑属的整体分布概况、实施金柑野生资源调查提供科学依据, 而且对野生

金柑资源的就地保护、异地保护及新品种适生地推广具有重要的指导意义。

目前, 地理信息系统 (GIS) 与生态位统计模型 (SDM) 相结合被广泛用于物种适生范围的预测研究。最常用的生态位统计模型有遗传算法 (Garp)、生态位因子分析 (Enfa)、生物气候模型 (Bioclim) 和最大熵模型 (MaxEnt)[9]。最大熵模型 (MaxEnt) 是根据目标物种分布样本数据及其分布区环境数据的关系, 推论出与其相似的群落生境, 从而预测出物种的潜在分布地。在物种分布样本数据不完全的情况下, MaxEnt 模型预测精度值仍较高, 所以 MaxEnt 模型是一类优于其他预测物种潜在分布的生态位模型[10-12]。MaxEnt 模型作为最常用的生态位模型, 已被广泛用于濒临物种的探索、药用植物的潜在分布地预测及规划种植、物种入侵危险性评价、未来气候变化趋势下物种的分布区域变化等研究[13-17]。本文采用实地考察访问和查询相关平台的方法获得金柑属分布点样本数据, 结合对应的环境数据, 通过 MaxEnt 模型预测金柑属 6 个种在我国的潜在适生区域, 并分析限制金柑属各个种分布的环境因子, 旨在为金柑属野生资源收集、保护和优良品种推广提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 分布数据来源

通过查阅全球生物多样性信息网 (GBIF)、中国数字植物标本馆平台 (CVH)、中国农业科学院柑桔研究所 (CRIC)、中国作物种质资源信息网 (CGRIS)、中国科学院植物研究所 (IBCAS)、中国国家标本平台 (NSII)、中国物种信息系统 (CESIS) 等相关网站, 以及中国植物志、中国果树志、地方植物志等各类相关专著, 共检索金柑属植物分布点: 山金柑 53 个、罗浮 22 个、罗纹 12 个、长叶金柑 11 个、金弹 37 个、长寿金柑 9 个。

2016—2018 年实地调查历史上有金柑属分布记录的 8 个省共 33 个县 (市), 获得分布点: 山金柑 26 个、罗浮 11 个、罗纹 16 个、长叶金柑 9 个、金弹 23 个、长寿金柑 14 个。

通过整理和统计共获得金柑属 6 个种的实际分布点数据: 山金柑 79 个、罗浮 33 个、罗纹 28 个、长叶金柑 20 个、金弹 60 个、长寿金柑 23 个, 用于 MaxEnt 模型的运算。

1.2 环境变量数据来源

从 Worldclim (http://www.worldclim.org/) 网站下载分辨率为 5arc-min 的 55 个环境监测数据 (1950—2000 年), 包括 bio1−bio19 (全称见 Worldclim) 和 1—12 月份的最低温度、最高温度、降雨量。运用 Diva-GIS 软件导出金柑属 6 个种所有分布点对应的 55 个环境变量数据, 然后利用 SPSS 16.0 软件对所有分布点对应的环境数据进行多重共线性分析, 记录每个环境变量与其他环境变量相关性绝对值≥80% 的个数, 个数的多少决定该环境变量对金柑属植物生长的重要性程度, 若 2 个环境变量相关性绝对值同时≥80% 的个数相同, 则选择其中相关性系数较高的变量。通过 4 次不断筛选, 最终确定了与金柑属植物生长密切相关的 18 个环境变量 (表 1) 用于建模[18-19]。

1.3 Maxent 模拟预测

将 6 个种的地理分布数据和 18 个环境因子变量导入 MaxEnt 预测模型, 选取分布数据 75% 为训练点, 剩余 25% 为测试点, 其他为默认参数[20-21]。通过模型运算输出预测图层 (.asc) 格式。在 ArcGIS 中将 MaxEnt 预测图层导出, 并且通过统计学概率“存在性”概念表述和实际分布情况 (reclassily) 分为 4 个等级: 不适宜区、低适宜区、较适宜区和最适宜区[22]。此外, 还根据《中国种子植物区系地理》将金柑属最适宜区进行区系划分。

同时采用受试者工作曲线 (ROC 曲线) 对 Max-

表 1 用于金柑适生范围预测的 18 个环境因子

Table 1 Environment factors used to predict the potential distribution area of *Fortunella*

代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal temperature range	Tmax4	4月最高温度 Maximum temperature of April
Bio3	等温性 Isothermality	Prec4	4月降雨量 Precipitation of April
Bio5	最热月份最高温度 Max temperature of the warmest month	Tmin6	6月最小温度 Minimum temperature of June
Bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	Tmax6	6月最高温度 Maximum temperature of June
Bio14	最干月降雨量 Precipitation of the driest month	Prec6	6月降雨量 Precipitation of June
Bio15	降水量变异系数 Variation coefficient of precipitation	Tmin7	7月最小温度 Minimum temperature of July
Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	Prec7	7月降雨量 Precipitation of July
Bio19	最冷季度平均降水量 Precipitation of the coldest quarter	Prec10	10月降雨量 Precipitation of October
Tmin2	2月最低温度 Minimum temperature of February	Prec12	12月降雨量 Precipitation of December

Ent 模型预测的金柑适生性分布结果进行预测精度测评[23]。AUC 值范围为 [0, 1], 不同的 AUC 值代表不同的预测效果, AUC 值越大表明模型判断力越准确。AUC 预测分为 4 个标准: 较差 [0.5, 0.6), 一般 [0.6, 0.7), 较准确 [0.7, 0.8), 准确 [0.8, 0.9), 极准确 [0.9, 1][22]。

在 MaxEnt 预测模型结果中, 通过刀切法 (Jackknife) 显示主要环境因子对金柑生长的贡献率, 根据贡献率的大小判断环境因子对金柑属分布的重要性。进一步分析气候因子对金柑属 6 个种的适宜性响应曲线, 以分布概率 P>0.5 为分界线, 确定其主导气候因子的参数范围[22-25]。

2　结果与分析

2.1　山金柑在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

MaxEnt 对山金柑适宜区预测结果的 AUC 值为 0.987, 表明预测结果非常好。由预测图 1a 可见, 从植物区系层面来看, 山金柑的最适宜分布区为闽北山地地区、粤北亚地区、浙南山地亚地区、赣南—湘东丘陵亚地区、粤桂山地地区、台湾亚地区。山金柑在我国的潜在适生区面积达 504 700 km^2, 其中最适宜区域面积达 354 000 km^2, 占我国国土总面积的 3.69%, 其中江西 (最适合区总面积的 31.16%)、湖南 (24.94%)、福建 (24.29%)、广东 (12.88%)、广西 (6.05%) 是最适生区面积最大的 5 个省。

从表 2 可以看出, 影响山金柑生长的主要气候因子有 4 月降雨量、6 月降雨量、等温性, 以上 3 个气候因子累计贡献率达 91.5%。山金柑生长的主导气候因子的适宜范围为: 4 月降雨量 145~225 mm, 6 月降雨量 200~250 mm, 等温性比值为 28.5~35.0。

2.2　罗浮在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

在对罗浮生境适宜性预测精度测评中, AUC 值为 0.990, 表明 MaxEnt 模型对罗浮在我国的潜在分布预测极准确。预测图 1b 可见, 罗浮在我国的潜在适生区和最适合区面积分别占我国国土面积的 6.56% 和 2.88%, 分别达 906 500 km^2 和 276 100 km^2。最适宜区主要集中在闽北山地地区、赣南—湘东丘陵亚地区、粤桂山地地区, 其中湖南 (85 800 km^2)、江西 (85 500 km^2)、福建 (39 000 km^2)、浙江 (32 400 km^2) 省最适宜面积较大。

从表 2 可以看出, 影响罗浮潜在分布的主要气候因子有 4 月降雨量、6 月降雨量、2 月最低温度、7 月最低温度、等温性和最干月降雨量, 以上 6 个气候因子累计贡献率达 82.1%。罗浮主导气候因子参数范围为: 4 月降雨量 145~225 mm、6 月降雨量 200~300 mm、2 月最低温度 5~10 ℃、7 月最低温度 23~26 ℃、等温性比值 28.5~35.0、最干月份降雨量 26.5~49.0 mm。

2.3　罗纹在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

MaxEnt 对罗纹适生区预测结果也极准确, 其 AUC 值为 0.973。根据图 1c, 罗纹在我国的潜在适生面积为 962 000 km^2, 最适宜区面积达 495 800 km^2, 最适宜区占国土面积的 5.16%。罗纹最适生区主要在闽北山地地区、浙南山地亚地区、赣南—湘东丘陵亚地区, 其中江西 (占最适宜区面积比 15.17%)、湖南 (24.75%)、福建 (15.17%)、浙江 (10.41%)、广西 (7.85%)、广东 (6.49%) 和湖北 (4.20%) 是最适生区面积最大的 7 个省份。

从表 2 可以看出, 影响罗纹生长的气候因子主要有 4 月降雨量、6 月降雨量、7 月最低温度、等温性、最干月降雨量和最暖季度平均降雨量, 以上 6 个主要的气候因子累计贡献率达 87.4%。罗纹适合生长的主导气候因子的参数范围: 4 月降雨量 132~150 mm, 6 月降雨量 133~166 mm, 7 月最低温度 23~26 ℃, 等温性比值 25~35, 最干月份降雨量 37.5~50.0 mm, 最暖季度平均降雨量 403~750 mm。

2.4　长叶金柑在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

长叶金柑适宜分布区预测 Maxent 模型的 AUC 值为 0.996, 说明预测结果非常准确。预测图 1d 的统计结果显示, 长叶金柑在我国的潜在适生区和最适合区面积分别占我国国土面积的 16.56% 和 6.39%, 分别为 3 002 400 km^2 和 613 600 km^2。长叶金柑的最适宜分布区主要集中在琼西南亚地区、琼中亚地区、南岭东段亚地区、四川盆地亚地区、粤桂山地亚地区、黔桂亚地区、红水河亚地区、北部湾地区、滇东南石灰岩亚地区、滇西亚区域、滇东亚地区、滇缅泰地区、台湾亚地区, 其中广西 (170 400 km^2)、广东 (114 000 km^2) 和云南 (102 800 km^2) 3 个省份最适宜面积超过 100 000 km^2。

从表 2 可以看出, 影响长叶金柑分布的主要气候因子有 7 月降雨量、12 月降雨量、2 月最低温度、6 月最低温度和最暖季度平均降雨量, 以上 5 个主要气候因子累计贡献率为 76.0%。长叶金柑适合生长的主导气候因子参数范围为: 7 月降雨量 150~

500 mm、12 月降雨量 32~100 mm、2 月最低温度 3.2~17.5 ℃、6 月最低温度 23.2~30.0 ℃、最暖季度平均降雨量 500~2000 mm。

2.5 金弹在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

MaxEnt 对金弹适生区预测结果的 AUC 值为 0.918, 表明预测结果可靠。根据图 1e 预测分布范围的统计可知, 金弹在我国的潜在适生面积为 955 200 km^2, 最适生长区面积为 474 400 km^2, 其中最适宜区域占我国国土面积的 4.94%。金弹的最适宜分布区位于粤桂山地亚地区、粤北亚地区、闽北山地亚地区、赣南—湘东丘陵亚地区、浙江山地亚地区、台湾亚地区。金弹的适生区属于亚热带季风气候, 江西 (占最适宜区总面积 26.20%)、湖南 (19.52%)、福建 (14.82%)、广西 (11.76%) 是最适生区面积最大的 4 个省份。

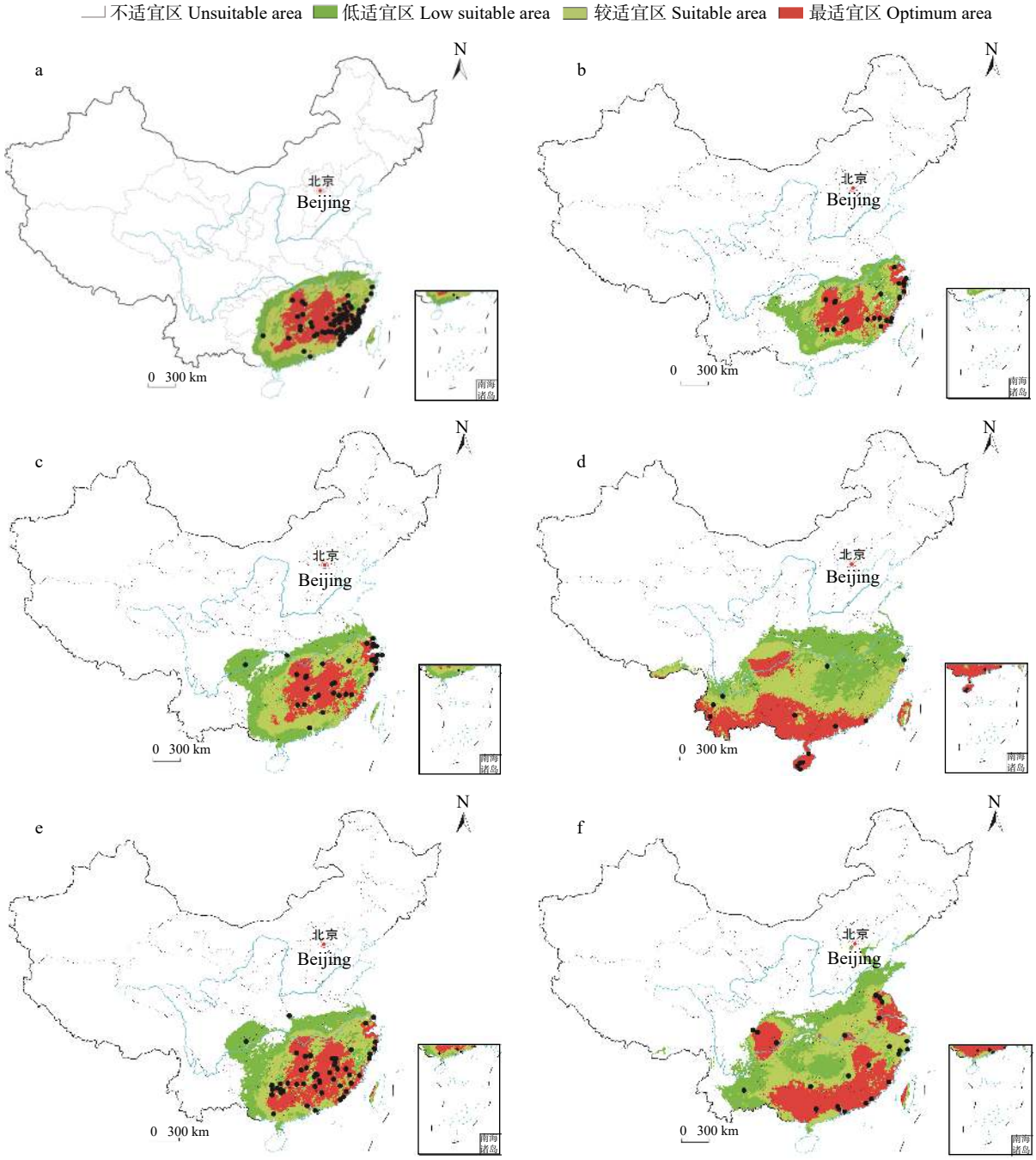

图 1 金柑属植物山金柑 (a)、罗浮 (b)、罗纹 (c)、长叶金柑 (d)、金弹 (e) 和长寿金柑 (f) 在我国的潜在适生分布范围

Fig. 1 Prediction results of suitable distribution areas of six species of *Fortunella* in China based on MaxEnt model (a: *F. hindsii* Swingle; b: *F. margarita* Swingle; c: *F. japonica* Swingle; d: *F. polyandra* Tanaka; e: *F. crassifolia* Swingle; f: *F. obovata* Tanaka)

从表 2 可以看出, 影响金弹生长的主要气候因子有 4 月降雨量、6 月降雨量、等温性、最暖季度平均降雨量和 7 月最低温度, 以上 5 个环境因子的贡献率累计达 92.0%。金弹适合生长的主导气候因子的参数范围为: 4 月降雨量为 150~275 mm、6 月降雨量为 150~350 mm、等温性比值为 15~35、最暖季度平均降雨量为 333~666 mm、7 月最低温度为 23.2~25.0 ℃。

表 2　金柑属 6 个种的主要气候因子贡献率及气候因子参数范围

Table 2　Relative contributions of the main Climatic variables to suitable distribution of six *Fortunella* species

种名 Species	环境因子 Climatic factor	相对贡献率 Contribution rate (%)	气候参数范围 Climatic factor range
山金柑 *F. hindsii* Swingle	6月降雨量 Precipitation of June	42.5	200~250 mm
	4月降雨量 Precipitation of April	30.8	145~225 mm
	等温性 Isothermality	18.2	28.5~35.0
罗浮 *F. margarita* Swingle	6月降雨量 Precipitation of June	45.9	200~300 mm
	等温性 Isothermality	12.9	28.5~35.0
	最干月降雨量 Precipitation of driest month	6.4	26.5~49.0 mm
	2月最低温度 Minimum temperature of February	6.1	5~10 ℃
	4月降雨量 Precipitation of April	6.1	145~225 mm
	7月最低温度 Minimum temperature of July	4.7	23~26 ℃
罗纹 *F. japonica* Swingle	6月降雨量 Precipitation of June	41.6	133~166 mm
	等温性 Isothermality	13.5	25~35
	7月最低温度 Minimum temperature of July	8.9	23~26 ℃
	最干月降雨量 Precipitation of driest month	8.6	37.5~50.0 mm
	最暖季度平均降雨量 Precipitation of warmest quarter	8.0	403~750 mm
	4月降雨量 Precipitation of April	6.8	132~150 mm
长叶金柑 *F. polyandra* Tanaka	最暖季度平均降雨量 Precipitation of warmest quarter	23.7	500~2000 mm
	6月最低温度 Minimum temperature of June	17.5	23.2~30.0 ℃
	2月最低温度 Minimum temperature of February	16.7	3.2~17.5 ℃
	12月降雨量 Precipitation of December	9.6	32~100 mm
	7月降雨量 Precipitation of July	8.5	150~500 mm
金弹 *F. crassifolia* Swingle	6月降雨量 Precipitation of June	43.6	150~350 mm
	等温性 Isothermality	18.9	15~35
	4月降雨量 Precipitation of April	14.3	150~275 mm
	最暖季度平均降雨量 Precipitation of warmest quarter	9.2	333~666 mm
	7月最低温度 Minimum temperature of July	6.0	24~26 ℃
长寿金柑 *F. obovata* Tanaka	最暖季度平均降雨量 Precipitation of warmest quarter	42.4	457~832 mm
	6月降雨量 Precipitation of June	18.9	166~400 mm
	等温性 Isothermality	12.9	25~35
	7月最低温度 Minimum temperature of July	12.3	23.2~25.0 ℃

2.6　长寿金柑在我国的气候适宜区及主导气候因子参数范围

MaxEnt 模型对长寿金柑的适宜区预测结果也比较好, 预测结果的 AUC 值为 0.951。长寿金柑在我国的潜在适生区和最适宜区面积分别占我国国土面积的 15.03% 和 6.91%。由图 1f 可知, 长寿金柑的最适宜区主要集中在黄淮平原亚地区、赣南—湘东丘陵亚地区、闽北山地亚地区、粤北亚地区、粤桂山地亚地区、南岭东段亚地区、黔桂亚地区、红水河亚地区、滇东南石灰岩亚地区、四川盆地亚地区、台湾亚地区。从行政区划分布来看, 广西 (156 500 km^2)、广东 (119 600 km^2)、福建 (85 500 km^2)、江西 (82 100 km^2) 和四川 (80 100 km^2) 为长寿金柑的主要适生分布区, 面积占总适生区面积的 31.49%。

从表 2 可以看出, 影响长寿金柑潜在分布的主要气候因子有 6 月降雨量、7 月最低温度、等温性比值、最暖季度平均降雨量, 以上 4 个主要气候因子累计贡献率达 86.5%。长寿金柑适合生长的主导气候因子的参数范围: 6 月降雨量 166~400 mm, 7 月最低温度 23.2~25.0 ℃, 等温性比值为 25~35, 最暖季度平均降雨量为 457~832 mm。

3　讨论

本研究系统对金柑属 6 个种植物在我国的潜在气候适宜区进行了详细的分析, 并首次绘制出了金柑属在我国气候适宜区分布图, 明确了主导气候的参数范围值。本研究中金柑属 6 个种适宜区预测模型的 AUC 值均大于 0.9, 说明本研究预测分布范围

与实际分布拟合度较高,可作为实际引种的参考。

3.1 金柑属在我国潜在分布区范围

根据图 1 可知, 6 个种适生区主要分布于大别山—大巴山以南地区。此地以低丘陵和平原为主, 海拔在 500~1500 m, 气候温暖湿润, 属于中亚热带季风气候到热带季风气候过渡区。从行政区层面来看, 除长叶金柑外, 其他 5 个种适生区主要集中于湖南、江西、广西、福建、浙江、广东 6 个省份, 而本研究的金柑潜在分布是以实际分布为中心向四周蔓延, 这些省份与最适宜区省份相邻, 在环境特征上有相似性。潜在适生区可扩大至贵州东部、四川东南部、重庆、湖北东南地区、安徽东南地区、江苏南部地区、台湾西北部。叶荫民[2] 研究的金柑的实际分布区域在南岭以南地区, 长叶金柑最适宜地分布除上述各省份外包括海南岛和云南省大部分面积。长叶金柑分布这一结果与林大盛等[5] 的研究不一致, 前者结果表明长叶金柑仅分布于海南及广州, 分布区属热带季风气候, 年降雨量在 1500~2000 mm, 最低温高于 10 ℃。本研究预测模型中长叶金柑的预测最适宜区还包括四川南部、重庆、贵州南部、云南南部、广西、台湾。其最适宜区多以山地为主, 气候为热带半湿润气候伴随多云雾等特点。这与苗平生[26] 对长叶金柑的生长环境描述一致。长叶金柑喜阴喜湿, 但因其抗涝性差所以多生长在山坡非积水地带。在中国数字植物标本馆平台查询到源自贵州南部长叶金柑标本 (采集号: 5426), 因此该模型预测出的长叶金柑最适宜区与实际分布较吻合。

3.2 影响金柑分布的气候限制因子

本研究发现限制金柑属植物资源生长的主要气候因子包括: 2 月、7 月最低温度, 4 月、6 月降雨量, 昼夜温差与年温差比值, 最干月降水量。1—3 月金柑的腋芽处于休眠状态, 但其仍然具有生长活动的潜势, 此时腋芽受到过低温度影响后, 春梢的萌发将受到阻碍。此时萌发的抽出新梢发育成熟后是当年结果的母枝, 只有当 2 月前后的温度符合花芽萌发温度时, 金柑在 4 月左右才能正常的抽出春梢, 从而保证当年金柑的结果量。金柑一年开 4 批花, 开花时间从 4 月中旬延续到 8 月初。金柑一年开 4 批花, 开花时间从 4 月中旬延续到 8 月初。尤其金弹鲜食价值最高, 前 2 批花的质量决定果实产量。因此如果 4—6 月份降雨量在 150~275 mm, 花粉传播才不会受影响, 从而不会影响坐果率。6 个种对 6、7 月份的温度要求均在 23 ℃ 以上, 最暖季度平均降雨量达 333 mm 以上, 才不会影响金柑的正常生长。

4 结论

本文运用物种分布模型对 6 种金柑属植物的气候适宜区进行预测, 定量地展示了 6 个种在我国的气候适宜区的范围。MaxEnt 精度模拟 AUC 值达 0.9 以上, 预测结果与结合实际调查分布状况相符, 从一定程度上说明预测结果的真实性, 并且反映了该模型对金柑属气候适宜区评价的实用性。通过对气候适宜区进行分析, 金柑属中山金柑、罗浮、罗纹、金弹主要种植优势区域有: Ⅰ. 湘东—闽西规划带, 主要包括湖南浏阳、衡阳、岳阳等地, 江西大部分地区, 福建龙岩市、三明市等地; Ⅱ. 浙东—闽东—粤北规划带, 主要包括浙江宁波和温州、福建莆田和泉州市、广州韶关和河源等地区; Ⅲ. 赣南—湘南—桂北规划带, 主要包括江西吉安、赣州, 湖南邵阳、郴州、永州和广西桂林、柳州等地。长寿金柑主要种植优势区域有: Ⅰ. 闽—粤—桂规划带, 主要包括福建、广东、广西 3 省; Ⅱ. 蜀东规划带, 主要包括四川宜宾地区; Ⅲ. 苏南—鄂北—赣南—浙南规划带, 主要包括湖北、江西、浙江、安徽、江苏省份。长叶金柑主要种植优势区域有 Ⅰ. 滇南—台东规划带, 主要包括云南南部、贵州南部、广西、海南、广东、台湾东部; Ⅱ. 蜀南—渝西, 主要包括四川南部至重庆西部地区。MaxEnt (最大熵模型) 是预测一个物种在无任何竞争物种的限制下在某一地区占据的最大的生态位, 即一物种除了气候的影响, 并不会受到非生物因素 (地形、土壤) 和生物因素 (中间相互竞争、繁殖能力、病虫害传播) 的影响[27]。金柑属作为经济价值较高的果树, 其分布往往由环境因子、经济政策结构、土地分布利用以及人为因素综合影响[28]。本文并未结合综合因素进行统一的分析, 因此模型预测中的精确度会有一定的差异。然而本研究是合理规划保护金柑资源的第一步, 这对金柑属资源的收集和合理化种植起着非常重要的作用。同时有助于土地资源合理分配, 这为金柑优质品种的商业栽培及推广提供了基础,

参考文献 References

[1] SWINGLE W T, TEECE P C. The botany and citrus and its wild relatives[J]. Citrus Industry, 1967, 1: 190−430

[2] 叶荫民. 中国金柑种质资源[J]. 作物品种资源, 1983, (4): 2−5
YE Y M. Germplasm resources of *Fortunella* in China[J]. China Seed Industry, 1983, (4): 2−5

[3] LOU S N, LAI Y C, HUANG J D, et al. Drying effect on flavonoid composition and antioxidant activity of immature kumquat[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 356−363

[4] ZHANG J C, TAO N G, XU Q, et al. Functional characterization of *Citrus PSY* gene in Hongkong kumquat (*Fortunella hindsii* Swingle)[J]. Plant Cell Reports, 2009, 28(11): 1737−1746

[5] 林大盛, 吴方崇. 我国金柑分布和种类[J]. 中国柑桔, 1987, 16(1): 3−5
LIN D S, WU F C. Distribution and species of *Fortunlla* in China[J]. South China Fruits, 1987, 16(1): 3−5

[6] REINKING O A. Diseases of economic plants in southern China[J]. Philippine Agriculturist, 1919, 8: 109−135

[7] KUMAR S, JENA S N, NAIR N K. ISSR polymorphism in Indian wild orange (*Citrus indica* Tanaka, Rutaceae) and related wild species in Northeast India[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 123(3): 350−359

[8] 崔德珍. 湖南省金柑种质资源的初步研究[J]. 湖南农学院学报, 1987, 13(4): 29−35
CUI D Z. A preliminary study on kumquat (*Fortunella*) germplasm resources in Hunan[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 1987, 13(4): 29−35

[9] 黄新忠, 雷龑, 陈小明, 等. 福建山橘、金豆野生资源调查与分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(4): 509−513
HUANG X Z, LEI Y, CHEN X M, et al. Investigation and analysis of wild *Fortunella hindsii* and *Fortunella venosa* resources in Fujian[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(4): 509−513

[10] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. 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, 2007, 15(4): 365−372
WANG Y S, XIE B Y, WAN F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365−372

[11] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. Ecography, 2006, 29(2): 129−151

[12] PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, et al. Original article: predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar[J]. Journal of Biogeography, 2006, 34(1): 102−117

[13] CAO B, BAI C K, ZHANG L L, et al. Modeling habitat distribution of *Cornus officinalis* with Maxent modeling and fuzzy logics in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(6): 742−751

[14] 王茹琳, 李庆, 何仕松, 等. 中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 27−37
WANG R L, LI Q, HE S S, et al. Potential distribution of *Actinidia chinensis* in China and its predicted response to climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1): 27−37

[15] CHEJARA V K, KRITICOS D J, KRISTIANSEN P, et al. The current and future potential geographical distribution of *Hyparrhenia hirta*[J]. Weed Research, 2010, 50(2): 174−184

[16] MA B B, SUN J. Predicting the distribution of *Stipa purpurea* across the Tibetan Plateau via the MaxEnt model[J]. BMC Ecology, 2018, 18(1): 10

[17] 李颖, 姜小龙, 邓敏, 等. 乌冈栎的潜在分布模拟及分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2971−2978
LI Y, JIANG X L, DENG M, et al. Potential distribution modeling and analysis of *Quercus phillyraeoides*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2971−2978

[18] YANG X Q, KUSHWAHA S P S, SARAN S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in lesser Himalayan foothills[J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 83−87

[19] 吴建国, 周巧富. 中国嵩草属植物地理分布模式和适应的气候特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(3): 199−221
WU J G, ZHOU Q F. Geographical distribution pattern and climate characteristics of adaptation for *Kobresia* in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(3): 199−221

[20] PEARCE J, FERRIER S. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression[J]. Ecological Modelling, 2000, 133(3): 225−245

[21] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43−57

[22] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189−1196
ZHU G P, QIAO H J. Effect of the Maxent model' complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1189−1196

[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] MUSCARELLA R, GALANTE P J, SOLEY-GUARDIA M, et al. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(11): 1198−1205

[25] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 389−395

[26] 苗平生. 长叶金柑[J]. 果树科学, 1990, 7(4): 238−239
MIAO P S. *Fortunella polyandra* Tanaka[J]. Journal of Fruit Science, 1990, 7(4): 238−239

[27] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231−259

[28] 祁春节. 中国柑橘产业的经济分析与政策研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2001
QI C J. The citrus industry in China: An economic analysis and policy studies[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2001