中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

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

赵金鹏， 王闫利， 陆兴利， 沈沾红， 王明田， 李庆， 王茹琳

引用本文:
赵金鹏, 王闫利, 陆兴利, 等. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1523−1532.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200244

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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. 2018, 26(1): 27−37 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170557

气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析

Impact of climate change on grain yield and its trend across Guanzhong region

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 467−479 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190752

RCP情景下中国一季稻热量资源变化动态

Thermal resource change dynamics for single−season rice in China under RCP scenarios

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1533−1542 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200211

猕猴桃果园间作模式优化构建与技术集成

Model optimized construction and technology integrated application of intercropping in kiwifruit orchard

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1430−1439 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190057

短距离样点对土壤呼吸空间变异预测精度的影响

Effects of short distance sampling on the prediction accuracy of the spatial variability of soil respiration

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 421−428 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190703

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200244

赵金鹏, 王闫利, 陆兴利, 沈沾红, 王明田, 李庆, 王茹琳. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1523−1532

ZHAO J P, WANG Y L, LU X L, SHEN Z H, WANG M T, LI Q, WANG R L. Climatic suitable area analysis and response to climate change of *Actinidia arguta* in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1523−1532

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*

赵金鹏[1,2], 王闫利[2], 陆兴利[2], 沈沾红[2], 王明田[3,4], 李 庆[5], 王茹琳[1,2,4**]

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室 成都 610072; 2. 四川省农村经济综合信息中心 成都 610072; 3. 四川省气象台 成都 610072; 4. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室 成都 610066; 5. 四川农业大学农学院 成都 611130)

摘 要: 对软枣猕猴桃在中国的适生区进行分析, 旨在为软枣猕猴桃资源调查、保护、开发利用和引种栽培提供参考依据。采用生态位建模软件 MaxEnt(maximum entropy model), 结合 ArcGIS(geographic information system)软件, 研究影响软枣猕猴桃分布的关键环境因子及取值范围, 预测当前气候状态及未来不同气候变化背景下软枣猕猴桃在中国的适生区。研究结果表明: 影响软枣猕猴桃分布的关键环境因子有 6 个, 其重要程度依次为: 7 月降水量>4 月均温>温度季节性变化标准差>3 月均温>最暖季降水量>海拔。当前情景下, 软枣猕猴桃在中国的高适生区总面积为 9.287×10^5 km^2, 主要集中于东北东南部、华北东南部、华东北部和东南部、华中西部及西南东部; 中适生区总面积为 1.786×10^6 km^2, 主要分布在东北中部和南部、华北南部、华东北部和南部、华东北部、西南西部及华南北部。在只考虑气候因子和海拔高度的情况下, RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 预测 2070s 软枣猕猴桃在中国的高适生区面积分别增加 3.758×10^5 km^2、1.725×10^5 km^2 和 6.300×10^3 km^2, 而中适生区面积在 RCP2.6 减少 1.902×10^5 km^2, 在 RCP4.5、RCP8.5 分别增加 2.617×10^5 km^2 和 9.760×10^4 km^2。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下, 高适生区和总适生区的质心到 2070s 将向东北移动; RCP8.5 情景下, 高适生区质心向东北移动, 总适生区中心将向东南移动。研究分别对当前及未来 3 种不同情景下软枣猕猴桃在中国的适生区进行了 10 次预测, 预测结果的 AUC(Area Under Curve)平均值均高于 0.98, 表明此模型预测结果具有较高的可靠性。

关键词: 软枣猕猴桃; 适生区; 气候变化响应; MaxEnt 模型; 环境因子; 中国

中图分类号: P49 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

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

ZHAO Jinpeng[1,2], WANG Yanli[2], LU Xingli[2], SHEN Zhanhong[2], WANG Mingtian[3,4], LI Qing[5], WANG Rulin[1,2,4**]

(1. Institute of Plateau Meteorological, China Meteorology Administration / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and

* 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重实验室-2018-重点-05-04, 省重实验室-2018-青年-31)和国家现代农业产业体系四川水果创新团队猕猴桃病虫害综合防治岗位项目(2013-2018)资助

** 通信作者: 王茹琳, 主要从事气候变化与病虫害关系研究工作。E-mail: wrl_1986_1@163.com
赵金鹏, 主要从事应用气象与气象服务工作。E-mail: 421508153@qq.com

收稿日期: 2020-04-01 接受日期: 2020-07-08

* This study was supported by the Fund of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Key Laboratory of Sichuan Province-2018-Key-05-04, Key Laboratory of Sichuan Province-2018-Youth-31) and the National Modern Agricultural Industrial System "Innovation Team of Fruit in Sichuan Province of Integrated Control of Diseases and Pests of Kiwifruit" (2013-2018).

** Corresponding author, E-mail: wrl_1986_1@163.com

Received Apr. 1, 2020; accepted Jul. 8, 2020

Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Rural Economic Information Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 3. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China; 4. Water-Saving Agriculture in Southern Hill Area Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 6l0066, China; 5. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: *Actinidia arguta* is suitable for growing in a cool and humid environment. Compared with other species, *A. arguta* has higher nutritional and medicinal value and is also resistant to diseases, pests, drought, and cold. Determining a climactically suitable area for *A. arguta* may provide a reference for its investigation, protection, development, utilization, and cultivation in China. The MaxEnt (maximum entropy model) and ArcGIS (geographic information system) were used to study the key environmental factors and value range affecting the distribution of *A. arguta*. Predictions for suitable areas were performed under current and future climate scenarios. Environmental factors were tested for significance (via Jackknife), correlations were determined (via Pearson correlation coefficient), and six key environmental factors affecting the distribution of *A. arguta* were found (listed in order of significance): precipitation in July > mean temperature in April > temperature seasonality > mean temperature in March > precipitation during the warmest quarter > altitude. Presently, the total highly-suitable area is 9.287×10^5 km^2 and is concentrated in the east of Southwest China, the west of Central China, the southeast of North China, the north and southeast of East China, and the southeast of Northeast China. The total moderately suitable area, distributed around the highly suitable area, is 1.786×10^6 km^2. Representative concentration pathways (RCP) (i.e., future climate scenarios) predicted that the highly suitable areas will increase (RCP2.6=3.758×10^5 km^2, RCP4.5=1.725×10^5 km^2, and RCP8.5=6.300×10^3 km^2), the moderately suitable areas will decrease in the RCP2.6 by 1.902×10^5 km^2, while it will increase in the RCP4.5 and RCP8.7 (RCP4.5=2.617×10^5 km^2, and RCP8.5=9.760×10^4 km^2). In the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios, the geometric center of the highly suitable areas and the total suitable areas will move to the northeast by the 2070s. In the RCP8.5 scenario, the geometric center of the highly suitable areas will move to the northeast, but the geometric center of the total suitable area will move to the southeast by the 2070s. The MaxEnt model was used to predict suitable cultivation areas for *A. arguta* in the present day and future climate scenarios. All of the 'area under the curve' (AUC) averages were higher than 0.98, indicating high reliability of the predicted model results.

Keywords: *Actinidia arguta*; Suitable area; Response to climate change; MaxEnt model; Environmental factors; China

软枣猕猴桃[*Actinidia argute* (Sieb. & Zucc) Planch. ex Miq.]是猕猴桃科(Actinidiaceae)多年生落叶藤本植物, 适宜在凉爽和湿润的环境中生长。相较于其他品种, 软枣猕猴桃不仅营养价值和药用价值更高, 而且具有抗病虫害、抗逆性强、耐旱和耐寒的特点[1-5]。虽然我国软枣猕猴桃产业刚刚起步, 但研究和发展迅速, 例如苍晶等[6]进行的果实生长发育研究, 秦红艳等[7]进行的新品种——'佳绿'的选育等。目前, 软枣猕猴桃的研究主要集中在品种选育、栽培技术、品质分析、果实加工和处理等[8-10], 地理分布的相关研究尚少见报道。近些年, 我国在大规模引种中华猕猴桃(*Actinidia chinensis* Planch.)和美味猕猴桃[*Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) A Chev.]过程中, 由于缺乏合理的布局规划和适生性分析, 出现了品种单一化、易感病虫害等问题[11-12], 对此四川、陕西、贵州等省份不得不相继开展猕猴桃气候适应性规划的研究[13-15]。由此可见, 提前开展软枣猕猴桃气候适应性区划的研究, 对科学优化软枣猕猴桃产业结构、促进产业健康发展具有现实意义。

联合国政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告(IPCC AR5)中指出, 1880 年至 2012 年全球平均地表温度上升约 0.85 ℃, 而中国气候变暖率远高于全球平均值, 这意味着气候对软枣猕猴桃在中国分布的影响更加显著[16], 所以预测不同气候条件下软枣猕猴桃潜在地理分布, 对软枣猕猴桃的保护和可持续发展具有重要价值。MaxEnt 模型近年来被广泛应用于物种生境评价、物种适生区划和气候变化对物种分布影响研究等方面[17-19], 该模型基于生态位原理, 利用物种已知地理分布数据, 分析得出影响物种分布的环境因子, 探寻与此环境因子相似的环境像元, 以此预测目标物种的潜在地理分布。大量研究结果表明, MaxEnt 生态位模型在物种分布数据不足的情况下仍能得到较为满意的结果。

本研究利用 MaxEnt 模型预测软枣猕猴桃潜在地理分布, 揭示软枣猕猴桃对生长环境的要求, 确定软枣猕猴桃适生区, 分析不同情景下软枣猕猴桃对气候变化的敏感性, 为优化软枣猕猴桃的种植分布, 了解软枣猕猴桃对气候变化的响应提供参考。

1　材料和方法

1.1　环境数据及物种数据的获取

当前情景下的气候因子数据包括月平均气象数据、生物气候数据以及海拔数据, 从全球气候数据库 WorldClim(http://www.worldclim.org/)下载, 2050s(2041—2060 年)和 2070s(2061—2080 年)的气候变化情景数据取自 CCAFS 数据库(http://www.ccafs-climate.org/)。上述数据的空间分辨率为 2.5 arc-minutes (约 4.5 km^2)。

从全球生物多样性信息网(GBIF, https://www.gbif.org/)下载世界范围内软枣猕猴桃分布数据, 并筛选出中国的分布数据集。为了增强预测的准确性, 研究通过查阅文献对中国的分布数据集进行了修正和补充[20-23], 并删除重复记录、模糊记录和相邻记录, 然后利用谷歌地图对分布点的经纬度进行校正, 最后将处理好的 205 条有效记录保存为‘*.CSV’格式。

1.2　模型建立方法

采用 MaxEnt 模型预测软枣猕猴桃在中国的分布。MaxEnt 模型根据气候相似性挖掘样本位置与对应的气候层网格单元之间关系, 并预测研究区域其他网格单元中存在该物种的概率。MaxEnt 软件(3.4.1 版)是开源的, 可以从美国自然历史博物馆的网站下载 (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)。

软枣猕猴桃适生区预测模型构建的具体操作步骤如下: 首先, 将软枣猕猴桃在世界范围内的分布点、67 个气候变量及海拔高度导入 MaxEnt 软件中, 创建初始模型。在初始构建模型时, 将“random test percentage”设为 25, 勾选“make pictures of predictions”和“do jackknife to measure variable importance”选项, 其余的选项设置为默认。然后, 利用刀切法评估选择的关键环境因子的百分贡献率和累积贡献率。最后, 将软枣猕猴桃在中国的分布点和关键环境因子导入 MaxEnt 软件, 模拟软枣猕猴桃在中国的分布情况。在最终模型中, 选择“RandomSeed”, 重复运行 10 次, 选出 AUC 值最高的最佳模型。

1.3　模型评价方法及模型检验

常用的预测结果评价指标有很多种, 比如特异度、总体准确度等, 但这些评价指标都存在一定的缺陷[24], 本研究采用接收者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线)分析方法来评价模型模拟结果, 此方法目前被公认为最佳评价指标, 广泛用于医学诊断实验性能的评价[25-26]。

ROC 曲线分析方法步骤: 首先随机选取 75%的软枣猕猴桃在中国分布数据点作为训练集, 剩余分布数据点作为模型验证集。用训练集进行模型预测, 得到适生指数图, 提取验证集中各点的预测值, 按设定的系列阈值计算灵敏度与假阳性率(1–特异度), 并计算出 AUC 值, 用 SPSS 软件包进行 ROC 分析。AUC 的理论值在 0.5~1, AUC 值越接近 1, 模型的预测精度越高, 具体评判准则为: 0.5≤AUC<0.6 模拟效果失败, 0.6≤AUC<0.7 模拟效果较差, 0.7≤AUC<0.8 模拟效果一般, 0.8≤AUC<0.9 模拟效果良好, 0.9≤AUC<1 模拟效果极好。

1.4　适生区判定及显示方法

按照 Wang 等[26]的方法, 划分了物种分布阈值, 用不同的颜色进行标注。当软枣猕猴桃的分布概率 $P>0.66$ 时, 区域定为软枣猕猴桃高适生区, 用红色标记; 当 $0.33<P\leqslant 0.66$ 时, 区域定为中适生区, 用橙色标记; 当 $0.05<P\leqslant 0.33$ 时, 区域定为低适生区, 用黄色标记; 当 $P\leqslant 0.05$, 区域定为不适生区, 用白色标记。

MaxEnt 软件输出的数据是 ASCII 格式, 无法在地图上直观显示。所以, 研究利用 ArcGIS 中的“空间分析工具”将数据转换为“栅格”格式, 并利用“提取”函数提取软枣猕猴桃在中国的概率分布图, 对相应区域标注颜色。

2　结果与分析

2.1　影响软枣猕猴桃分布的关键环境因子

植物生长虽然受到多种环境因素的制约, 但不是每个因子在物种预测过程中都是必须的, 因此需对环境因子进行有效筛选。研究首先参考雷军成等[27]的方法, 利用刀切法检验 68 个环境因子对软枣猕猴桃分布预测模型构建的重要性, 并选取对预测模型构建贡献百分率大于 1%的环境因子作为初选关键环境因子。然后利用 Pearson 相关系数分析法判定初选关键环境因子之间的相关性, 剔除相关性较高的环境因子, 剩余的初选关键因子即为影响软枣猕猴桃分布的关键因子。

通过计算, 7 月降水量(Prec7)、4 月均温(Tmean4)、温度季节性变化标准差(Bio4)、3 月均温(Tmean3)、最暖季降水量(Bio18)和海拔(Alt)对预测模型构建的贡献百分率分别为 29.1%、25.4%、13.5%、8.6%、2.8%和 1.5%, 置换重要性分别为 24.1%、9.0%、16.4%、10.2%、8.7%和 10.5%, 且各因子间相关系数均小于 0.8(表 1), 故选择此 6 个环境因子作为预测软枣猕猴桃地理分布的关键因子。

表 1 影响软枣猕猴桃地理分布的关键环境因子的皮尔逊相关系数

Table 1 Pearson's correlation coefficients of dominant environmental factors affecting the geographical distribution of *Actinidia argute*

环境因子 Environmental factor	7 月降水量 Precipitation in July (Prec7)	4 月均温 Average temperature in April (Tmean4)	温度季节性变化标准差 Temperature seasonality (Bio4)	3 月均温 Average temperature in March (Tmean3)	最暖季降水 Precipitation of warmest quarter (Bio18)
4 月均温 Average temperature in April (Tmean4)	−0.119**				
温度季节性变化标准差 Temperature seasonality (seasonal temperature standard deviation×100) (Bio4)	−0.209**	0.084**			
3 月均温 Average temperature in March (Tmean3)	−0.054**	0.427**	−0.243**		
最暖季降水 Precipitation of warmest quarter (Bio18)	0.071**	−0.038**	0.053**	−0.069**	
海拔 Altitude (Alt)	0.155**	−0.128**	−0.458**	0.064**	0.014**

软枣猕猴桃的物候现象与温度有密切的关系。3—4 月为软枣猕猴桃伤流期和萌芽期，此时猕猴桃植株对温度比较敏感，当土温升至一定程度时，软枣猕猴桃的根系才开始吸收土壤中的水分和养分，树液由根系送到地面植株，然后软枣猕猴桃植株开始萌芽。如果此时段温度过低，则可能推迟软枣猕猴桃伤流期、萌芽期或使花芽、嫩梢受冻，甚至冻死主干。软枣猕猴桃在不同的生育期，对水分需求量亦不同，且差异较大。7 月为软枣猕猴桃果实生长期，此时软枣猕猴桃植株对降水的需求量较大，而过多的降水亦可能造成植株根系腐烂。同时，7 月温度相对较高，降水可以有效缓解高温对藤蔓的危害，所以 7 月降水量的多少直接影响着软枣猕猴桃植株生长情况。海拔影响软枣猕猴桃接受太阳辐射的热量多少，主要表现在温度上的差异，对软枣猕猴桃的物候期亦具有重要影响。综上所述，由刀切法筛选出的 6 个环境因子与软枣猕猴桃实际生长所需的环境因子相吻合，影响着软枣猕猴在中国的分布。

2.2 关键环境因子对软枣猕猴桃地理分布的影响

研究利用 MaxEnt 软件分析了影响软枣猕猴桃地理分布的 6 个关键环境因子适宜范围和最适值(表 2)，并绘制了关键环境因子与物种存在概率关系图(图 1)。

表 2 影响软枣猕猴桃潜在地理分布的关键因子适宜范围

Table 2 Suitable ranges of dominant environmental factors affecting the potentially geographical distribution of *Actinidia argute*

	环境因子及描述 Environmental factor and description	单位 Unit	适宜范围 Suitable range	最适值 Optimum value
Prec7	7 月降水量 Precipitation in July	mm	142.3~408.2	213.4
Bio4	温度季节性变化标准差 Temperature seasonality (seasonal temperature standard deviation×100)	℃	54.5~123.9	84.4
Bio18	最暖季降水 Precipitation of the warmest quarter	mm	392.2~1126	662.3
Tmean3	3 月均温 Average temperature in March	℃	−2.1~16.1	7.3
Tmean4	4 月均温 Average temperature in April	℃	6.5~19.1	15.3
Alt	海拔 Altitude	m	140.8~3 929.6	845.1

结果表明，软枣猕猴桃 7 月降水量适宜范围是 142.3~408.2 mm，最适值为 213.4 mm；当降水量在 142.3~213.2 mm 时，软枣猕猴桃存在概率与降水量呈正相关，降水量在 213.2~408.2 mm 时，存在概率与降水量呈负相关。3 月均温适宜范围是−2.1~16.1 ℃，最适值为 7.3 ℃；当均温为−2.1~7.3 ℃时，软枣猕猴桃存在概率与均温成正相关，均温在 7.3~16.1 ℃范围时，存在概率与均温呈负相关。6 个关键环境因子的响应曲线与正态分布相似，但适宜范围和变化范围不同。在适宜范围内，关键环境因子的变化对软枣猕猴桃存在概率有一定的影响，但在适宜范围外，影响逐渐减小。

2.3 模型准确性检验

为了进一步提高预测的有效性，研究对不同情景下软枣猕猴桃在中国的地理分布进行 10 次重复预测，图 2 所示为不同气候情景下预测结果的 ROC 曲线图。从图 2 可以看出，不同情景下进行 10 次预测的 AUC 值均大于 0.98，说明模型预测效果较好。

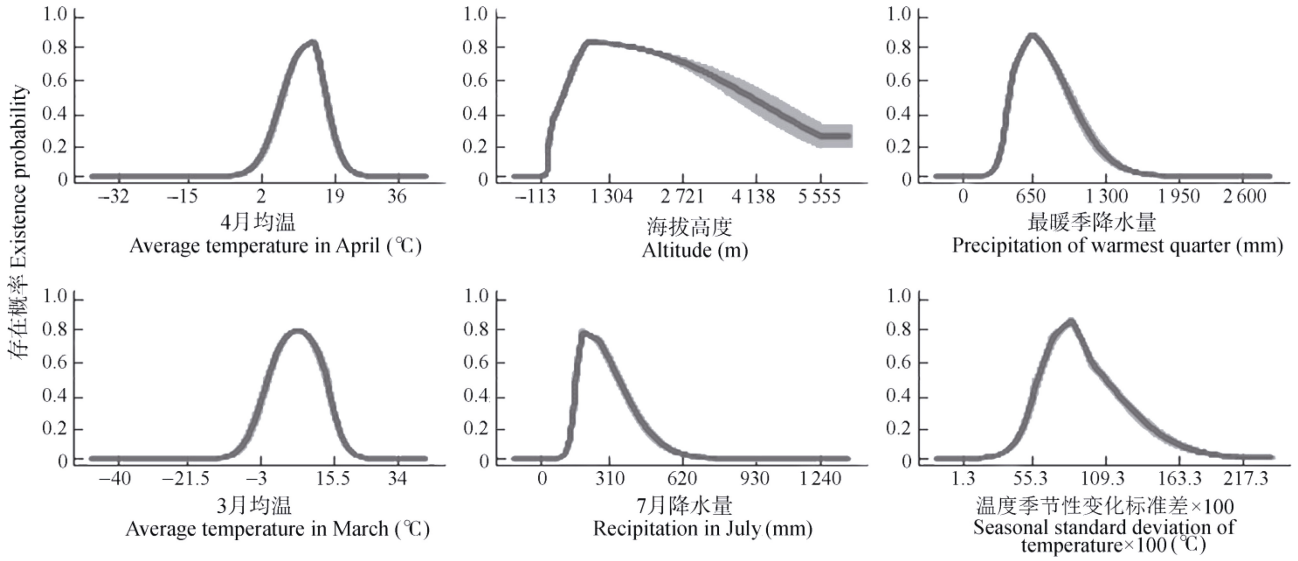


图 1　影响软枣猕猴桃地理分布的关键因子与物种存在概率关系图

Fig. 1　Relationship diagram of the probability of species' existence and key factors affecting the geographical distribution of *Actinidia argute*

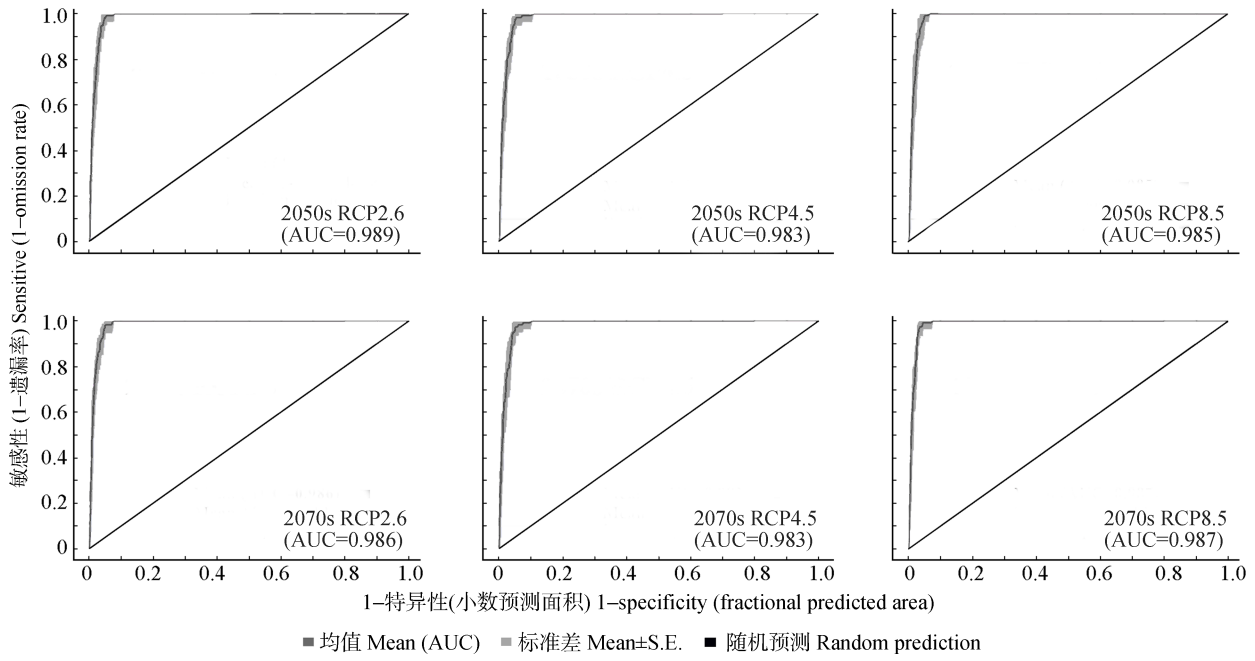


图 2　3 种气候变化情景下软枣猕猴桃 **MaxEnt** 模型的 **ROC** 曲线

Fig. 2　ROC curves of MaxEnt model of *Actinidia argute* under three climate change scenarios

2.4　当前情景下软枣猕猴桃在中国的潜在分布

使用 ArcGIS 软件将 MaxEnt 模型的预测结果叠加到我国行政区划图上, 得到当前情景下, 软枣猕猴桃在中国的潜在适生区分布图, 如图 3 所示。

从预测结果可得出, 软枣猕猴桃在中国的高适生区总面积为 9.287×10^5 km^2, 占国土面积的 9.67%, 可分为西南、华中、华东、华北和东北 5 个地区。西南地区包括四川中部和东北部、重庆中东部、贵州大部、陕西南部和西藏东南部, 面积约 3.854×10^5 km^2; 华中地区包括湖北西部、湖南西北部和河南西部, 面积约 1.626×10^5 km^2; 华东地区包括安徽西部和南部、山东中部、浙江大部、福建北部和江苏零星地区, 面积约 1.121×10^5 km^2; 华北地区包括河北东北部和山西东南部, 面积约 9.58×10^4 km^2; 东北地区包括吉林东部、辽宁东部和西部以及黑龙江的零星地区, 面积约 1.265×10^5 km^2。中适生区总面积为 $1.785\,9\times10^6$ km^2, 占国土面积的 18.55%, 主要围绕在高适生区周围, 分布在黑龙江、辽宁、吉林、河北、山西、河南、山东、江苏、四川、重庆、贵州、广西、广东和福建等省。表 3 是当前情景下, 软枣猕猴桃在中国的主要适生省份及面积。

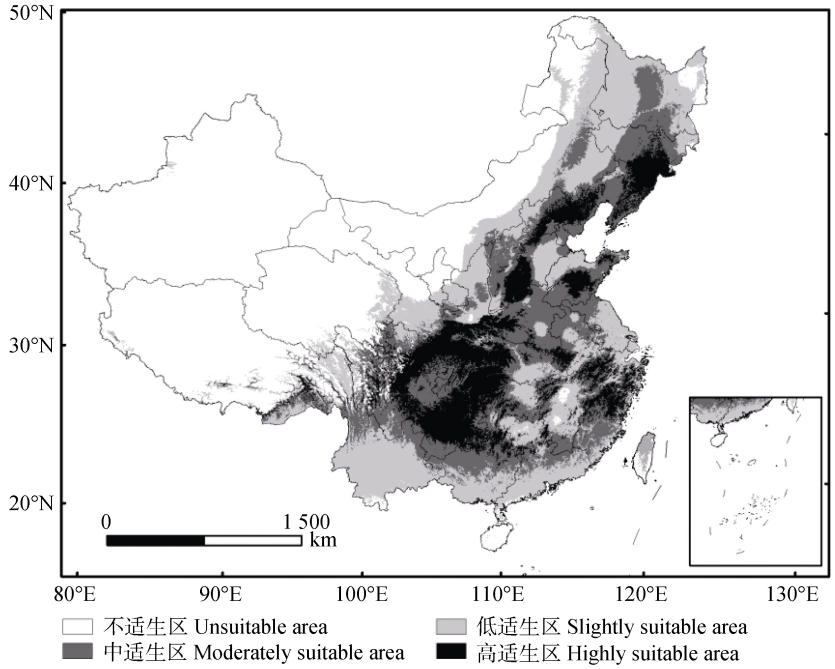


图 3 当前情景下软枣猕猴桃在中国潜在适生区分布图

Fig. 3 Potentially suitable distribution areas of *Actinidia arguta* in China under the current scenarios

表 3 当前情形下软枣猕猴桃主要适生省份及面积

Table 3 Main suitable provinces and area of *Actinidia arguta* under the current scenario $\times 10^4$ km^2

区域 Region	省份 Province	面积 Area 低适生区 Slightly suitable	中适生区 Moderately Suitable	高适生区 Highly suitable	区域 Region	省份 Province	面积 Area 低适生区 Slightly suitable	中适生区 Moderately suitable	高适生区 Highly suitable
西南 Southwest China	四川 Sichuan	4.57	20.82	14.62	华东 East China	安徽 Anhui	4.15	6.92	2.29
	贵州 Guizhou	0.02	4.71	11.23		山东 Shandong	4.57	7.09	3.73
	重庆 Chongqing	0.01	2.64	6.22		浙江 Zhejiang	2.98	3.07	3.30
	陕西 Shaanxi	8.66	4.84	5.09		福建 Fujian	2.50	6.45	1.84
	西藏 Tibet	12.15	5.43	1.38		江苏 Jiangsu	6.10	3.54	0.05
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	0.74	8.38	6.54	华中 Central China	湖北 Hubei	3.79	6.87	6.90
	吉林 Jilin	6.21	8.88	5.97		河南 Henan	1.55	11.93	2.65
	黑龙江 Heilongjiang	31.94	11.97	0.14		湖南 Hunan	4.44	8.11	6.71
华北 North China	河北 Hebei	6.99	7.80	4.85					
	山西 Shanxi	3.36	7.86	4.73					

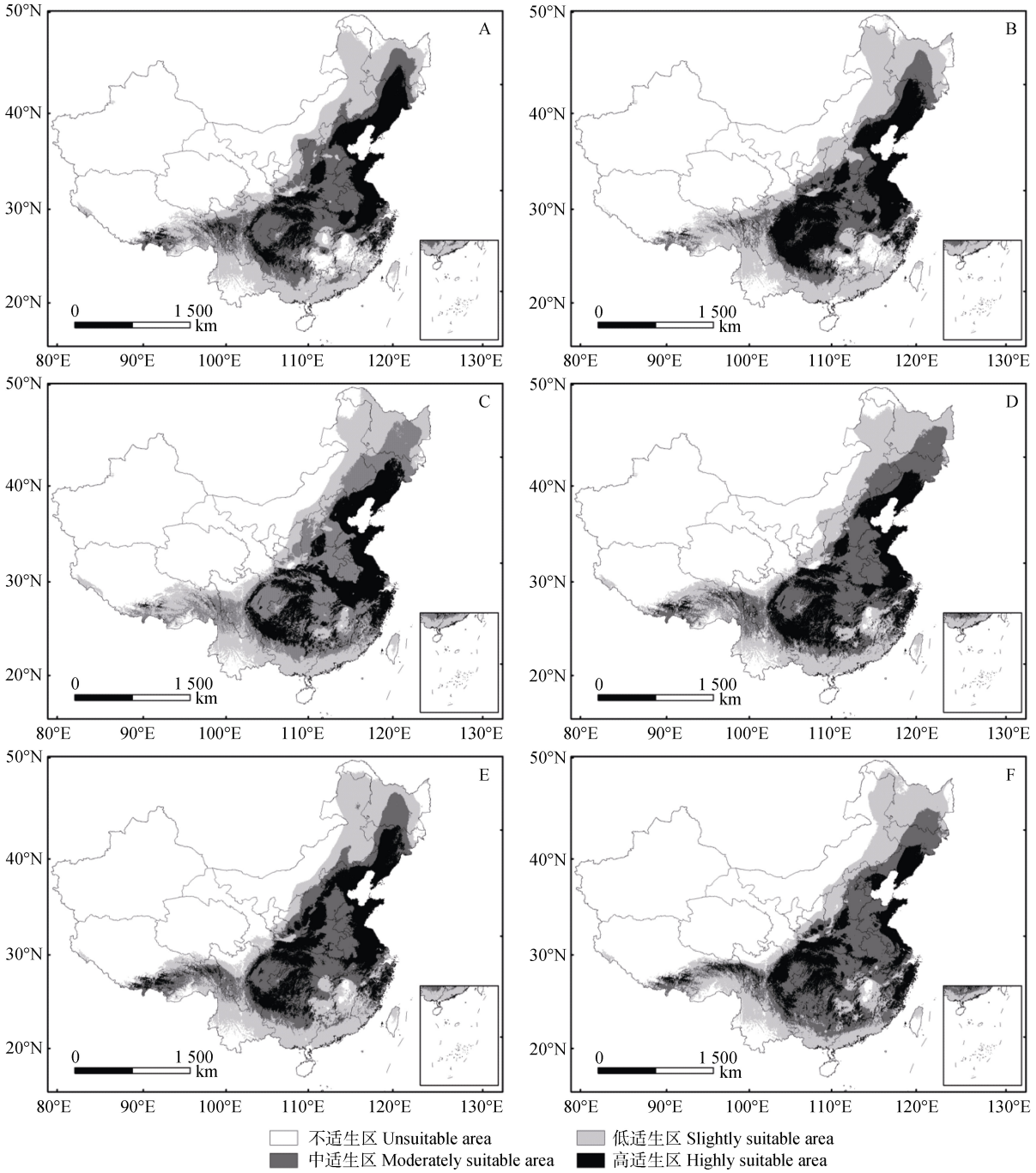
2.5 未来情景下软枣猕猴桃在我国的潜在分布

图 4 和表 4 分别描述的是未来情景下, 软枣猕猴桃在中国的潜在适生区分布图和面积。

从表 4 可看出, 在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 到 2050s, 软枣猕猴桃在中国的高适生区面积较当前情景下分别增加 1.276×10^5 km^2、3.19×10^5 km^2 和 2.639×10^5 km^2, 总适生面积较当前情景下分别增加 4.18×10^4 km^2、3.955×10^5 km^2 和 1.675×10^5 km^2, 同时高适生区和中适生区面积在 RCP4.5 情景下增幅最大, 分别增加 34.35%和 32.38%; 到 2070s, 高适生区面积较在当前情景下分别增加 3.758×10^5 km^2、1.725×10^5 km^2 和 6.3×10^3 km^2, 中适生区面积在 RCP2.6 较在当前情景下减少 1.902×10^5 km^2, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 分别增加 2.617×10^5 km^2 和 9.76×10^4 km^2, 同时高适生区在 RCP2.6 情景下面积增幅最大, 增加了 40.47%, 而总适生区在 RCP4.5 情景下面积增幅最大, 增加了 30.98%。

2.6 未来软枣猕猴桃分布质心移动轨迹

为分析气候变化对软枣猕猴桃地理分布的影响, 研究根据 Yue 等[28]的计算公式, 利用 ArcGIS 空间分析功能, 计算出未来情景下软枣猕猴桃适生区质心迁移轨迹和方向(图 5)。



A: 2050s RCP2.6; B: 2070s RCP2.6; C: 2050s RCP4.5; D: 2070s RCP4.5; E: 2050s RCP8.5; F: 2070s RCP8.5.

图 4　未来情景下软枣猕猴桃在中国潜在适生区分布图

Fig. 4　Potentially suitable distribution of *Actinidia arguta* in China under the future scenarios

表 4　未来情景下软枣猕猴桃适生面积

Table 4　Potentially suitable areas of *Actinidia arguta* under the future scenarios　　$\times 10^4$ km^2

年代 Decade	气候情景 Climate scenario	低适生区 Slightly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	高适生区 Highly suitable area
当前 Current (1950–2000)	—	215.88	178.59	92.87
21 世纪 50 年代 2050s	RCP2.6	197.86	170.01	105.63
	RCP4.5	178.43	186.24	124.77
	RCP8.5	197.17	168.95	119.26
21 世纪 70 年代 2070s	RCP2.6	217.16	121.99	130.45
	RCP4.5	192.37	187.51	110.12
	RCP8.5	180.59	187.72	93.50

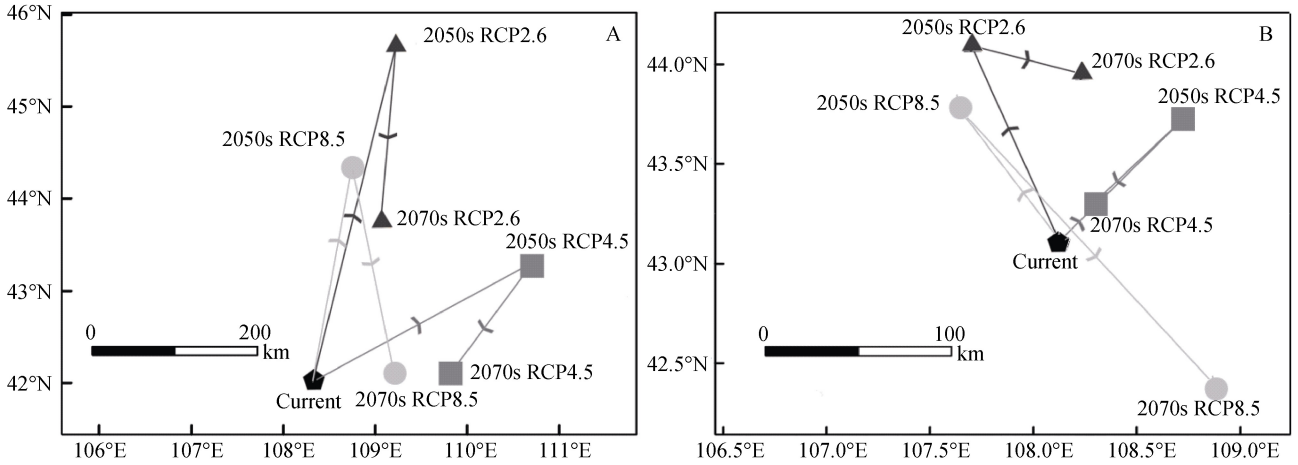


图 5 未来情景下软枣猕猴桃适生区质心迁移轨迹**(A**: 高适生区; **B:** 总适生区**)**

Fig. 5 Shift distance of the distribution center of *Actinidia arguta* under the future scenarios (A: highly suitable area; B: total suitable area)

从图 5A 可知, 在 RCP2.6 情景下, 高适生区质心向东北方向移动 376 km, 然后向西南方向移动 191 km, 到 2070s 共向东北方向移动 189 km。在 RCP4.5 情景下, 高适生区质心向东北方向移动 267 km, 然后向西南方向移动 146 km, 到 2070s 共向东北方向移动 148 km。在 RCP8.5 情景下, 高适生区质心向东北方向移动 234 km, 然后向东南方向移动 228 km, 到 2070s 共向东北方向移动 88 km。

从图 5B 可知, 在 RCP2.6 情景下, 总适区质心先向西北方向移动 108 km, 然后向东南方向移动 56 km, 到 2070s 共向东北方向移动 86 km。在 RCP4.5 情景下, 总适区质心与最适区的移动轨迹相似, 向东北方向移动 85 km, 然后向西南方向移动 60 km, 到 2070s 共向东北方向移动 25 km。在 RCP8.5 情景下, 总适区质心向西北方向移动 83 km, 然后向东南移动 188 km, 到 2070s 共向东南方向移动 105 km。

3 讨论和结论

研究利用刀切法分析了 67 个气象因子和海拔高度对软枣猕猴桃分布预测模型构建的重要性, 并利用 Pearson 相关系数分析法剔除了相关性较高的环境因子, 最终选取 7 月降水量、4 月均温、温度季节性变化标准差、3 月均温、最暖季降水量和海拔高度共 6 个关键环境因子作为预测模型自变量。通过查阅相关文献和实地调查, 表明这 6 个关键环境因子是影响软枣猕猴桃分布的重要因素, 同时此 6 个关键环境因子的适宜值范围与软枣猕猴桃实际生长需求相符。3 月初, 当气温高于 6 ℃时, 软枣猕猴桃的汁液开始流动。3 月中旬, 当温度高于 8.5 ℃时, 植株开始发芽。3 月中旬—4 月初, 当温度高于 10 ℃, 叶开始生长。软枣猕猴桃的花期为 5—7 月, 果实期为 6—8 月。7 月是软枣猕猴桃生长最旺盛的时期, 也是用水量最大的月份[29], 降水量范围为 142.3~408.2 mm, 既可以满足软枣猕猴桃的用水需求, 又不会因水分过多造成根系腐烂, 这对软枣猕猴桃的生长和分布有重要影响。温度季节性变化标准差反映了适宜软枣猕猴桃生长的平均温度及其变化范围, 生态位参数分析结果表明, 温度季节性变化标准差的变化小有利于软枣猕猴桃生存, 比较典型的是我国西南地区, 该地区的气候受西南季风、西风环流和青藏高原影响, 年温差小、日温差大, 该地区是我国软枣猕猴桃的主要分布区。

MaxEnt 基于最大熵理论, 利用物种分布数据和环境数据分析最大熵发生时物种的分布情况。MaxEnt 是研究物种地理分布的理想工具, 具有独特的优势, 被广泛用于生态学中, 如 Petitpierre 等[30]利用 MaxEnt 验证入侵生物的生态位保守性, 表明 MaxEnt 是研究的有效工具, 适合分析物种地理分布与气候的关系; Elith 等[31]比较了 16 个生态位模型的预测精度, 结果表明 MaxEnt 的预测精度高于其他模型。本研究利用 MaxEnt 模型分别在当前和未来 3 种气候变化情景(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)下对软枣猕猴桃在中国适生区进行 10 次重复预测, 经测算 AUC 值均大于 0.9, 表明模型预测结果具有较高的可靠性。在只考虑气候因子和海拔高度的情况下, 预测到 2070s(即 2070 年代), 未来 3 种气候变化情景下软枣猕猴桃在中国的高适生区面积分别增加 3.758×10^5 km^2、1.725×10^5 km^2 和 6.3×10^3 km^2, 中适生区面积分别增加-1.902×10^5 km^2、2.617×10^5 km^2 和 9.76×10^4 km^2; 未来 3 种气候变化情景下高适生区

质心将向东北移动, 总适生区质心在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下向东北移动, 在 RCP8.5 情景下向东南移动。同时, 根据预测结果可得出: 1)3 种情景下, 软枣猕猴桃的适生面积和分布存在差异, 说明气候变化对软枣猕猴桃潜在分布的影响是不确定的。2)与当前情景相比, 3 种情景下软枣猕猴桃高适生区面积将随着时间的推移而增加, 但增长范围不是无限扩大的, 影响植物潜在分布的因素很多, 例如土壤因素[32], 软枣猕猴桃虽然具有耐盐性, 但对土壤盐渍化的耐受性有限。3)土地利用在很大程度上也影响物种分布。目前还没有不同气候变化情景下的土壤和土地利用数据, 气候变化对土壤和土地利用变化的影响也不清楚, 所以研究没有考虑这一点。如果考虑到软枣猕猴桃的生长适宜土壤和土地利用条件, 气候变化对软枣猕猴桃适应性分布影响的不确定性将会增大。

由于软枣猕猴桃目前还处于新品推广过程中, 国内相关研究较少, 群众认知程度低, 所以种植规模及应用范围等方面基本上一片空白。但是, 软枣猕猴桃产业的发展前景十分广阔, 从政府层面看, 中华人民共和国国家发展改革委员会高度重视软枣猕猴桃产业发展, 由中国科学院武汉植物研究所王彦昌博士牵头成立软枣猕猴桃专题研究专家组; 从需求量方面看, 中国有 15 亿人口的巨大消费市场, 而我国现有软枣猕猴桃种植面积仅 1 300 多 hm^2, 后期种植潜力巨大。此研究可对软枣猕猴桃的种植、管护提供参考, 根据研究结果, 河北、山东、江苏、安徽、浙江、河南、湖南、贵州、重庆、宁夏和云南等地也有较大面积的猕猴桃适宜种植区($P \geqslant 33\%$), 可以根据实际情况扩大种植规模, 也可以考虑在尚未种植的地区引进和种植。

生态位预测模型假设的生态位需求是保守的, 环境变量、样本数据和地区经济等因素都会对预测结果产生影响。研究中发现以下问题: 1)物种分布数据越全面, 利用生态位模型模拟物种地理分布准确性越高。由于研究使用的软枣猕猴桃分布数据主要来源于 GBIF 和文献, 数量远低于实际数量, 所以预测结果存在一定的局限性和不足。2)通过检索 GBIF 和查阅文献得到的软枣猕猴桃分布点, 部分没有明确的经纬度记录, 所以需要通过坐标定位软件来确定相关信息, 不可避免地存在一定的地理误差。3)研究使用的环境数据来自世界气候数据库, 该数据库是 1950—2000 年数据的平均值。近 20 年来, 随着全球变暖的加剧, 物种的生长和分布格局发生了显著变化, 缺乏的 20 年气候数据可能会造成预测结果与实际分布的偏离。4)软枣猕猴桃生长不仅受气候、地形特征、土壤类型、土壤理化性质和栽培密度等非生物因子影响, 地区经济结构、引种栽培技术等因素同样会对其潜在分布产生重要影响。基于以上问题, 该模型预测的生态位比软枣猕猴桃实际占据的生态位要宽。

因此, 在下一步工作中, 应着重解决上述问题, 获取尽可能全面且准确的分布数据、气候数据、地区经济结构数据以及其他因素数据, 加强软枣猕猴桃适生分布区预测的准确性。

参考文献 References

[1] KANG S G, SEONG Y H. Inhibitory effect of the leaves and stems of *Actinidia arguta* on Aβ (25-35)-induced neuronal cell death and memory impairment[J]. Journal of Biomedical and Translational Research, 2018, 19(2): 26–31

[2] KIM D, CHOI J, KIM M J, et al. Reconstitution of anti-allergic activities of PG102 derived from *Actinidia arguta* by combining synthetic chemical compounds[J]. Experimental Biology and Medicine, 2013, 238(6): 631–640

[3] 侯芳玉, 陈飞, 陆意, 等. 长白山产软枣猕猴桃茎多糖抗感染和抗肿瘤作用的研究[J]. 白求恩医科大学学报, 1995, 21(5): 472–475
HOU F Y, CHEN F, LU Y, et al. Studies on anti-infective and antitumor effects of *Actinidia arguta* stem polysaccharide (AASP)[J]. Journal of Norman Bethune University of Medical Science, 1995, 21(5): 472–475

[4] LIU Y Y, LIU C J. Antifatigue and increasing exercise performance of *Actinidia arguta* crude alkaloids in mice[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(4): 738–745

[5] 刘旸旸. 软枣猕猴桃中生物碱的提取纯化及生物活性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
LIU Y Y. Extraction, purification and biological activities of alkaloid from *Actinidia arguta*[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016

[6] 苍晶, 王学东, 张达, 等. 软枣猕猴桃果实生长发育的研究[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(1): 77–83
CANG J, WANG X D, ZHANG D, et al. Studies on the growth development of fruit of *Actinidia arguta* Planeh[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2004, 35(1): 77–83

[7] 秦红艳, 杨义明, 艾军, 等. 软枣猕猴桃新品种——‘佳绿’的选育[J]. 果树学报, 2015, 32(4): 733–735
QIN H Y, YANG Y M, AI J, et al. A new cultivar of *Actinidia arguta* Planch. ‘Jialü’[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(4): 733–735

[8] LI W Q, LU Y Z, XIE X M, et al. The complete chloroplast genome sequence of *Actinidia arguta*: Gene structure and genomic resources[J]. Conservation Genetics Resources, 2018, 10(3): 423–425

[9] KLAGES K, DONNISON H, BOLDINGH H, et al. myo-Inositol is the major sugar in *Actinidia arguta* during early fruit development[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1998, 25(1): 61–68

[10] LI S Q, LIU C J, XIN G, et al. Study on properties of PG

separated and purified from *Actinidia arguta*[J]. Advanced Materials Research, 2014, 850/851: 1197–1201

[11] 王茹琳, 李庆, 王明田. 中华猕猴桃在中国种植适宜性区划[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(9): 1504–1512
WANG R L, LI Q, WANG M T. Climatic suitability regionalization of *Actinidia chinensis* in China[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(9): 1504–1512

[12] 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
WANG R L, WEN G, LI Q, et al. Geographical distribution simulation of *Actinidia deliciosa* in China and influence of climate change[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(4): 335–345

[13] 于成, 叶丽君, 刘泽全, 等. 都江堰市海沃特猕猴桃种植的气候适应性区划[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5741–5743
YU C, YE L J, LIU Z Q, et al. Climate adaptability division of *Actinidia deliciosa* cv. Hayward in Dujiangyan[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(11): 5741–5743

[14] 贺文丽, 李星敏, 朱琳, 等. 基于 GIS 的关中猕猴桃气候生态适宜性区划[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 202–207
HE W L, LI X M, ZHU L, et al. Climate ecological applicability regionalization for kiwifruit based on GIS in Guanzhong of Shaanxi Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(22): 202–207

[15] 池再香, 肖艳林, 李贵琼, 等. 贵州红心猕猴桃气候区划指标体系研究[J]. 贵州气象, 2016, 40(3): 1–5
CHI Z X, XIAO Y L, LI G Q, et al. Research of red cartridge kiwifruit climatic zoning index system in Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2016, 40(3): 1–5

[16] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1–11
GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1–11

[17] 曹学仁, 陈林, 周益林, 等. 基于 MaxEnt 的麦瘟病在全球及中国的潜在分布区预测[J]. 植物保护, 2011, 37(3): 80–83
CAO X R, CHEN L, ZHOU Y L, et al. Potential distribution of *Magnaporthe grisea* in China and the world, predicted by MaxEnt[J]. Plant Protection, 2011, 37(3): 80–83

[18] 洪宇辰, 杨星萍, 贺倩, 等. 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
HONG Y C, YANG X P, HE Q, et al. Evaluation of habitat suitability of *Eupatorium* spp. in Sichuan Province based on GIS and MaxEnt model[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2018, 49(5): 759–762

[19] 张海娟, 陈勇, 黄烈健, 等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 413–418
ZHANG H J, CHEN Y, HUANG L J, et al. Predicting potential geographic distribution of *Mikania micrantha* planting based on ecological niche models in China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 413–418

[20] 朴一龙, 赵兰花. 延边地区软枣猕猴桃资源分布和开发利用前景[J]. 延边大学农学学报, 2009, 31(1): 32–35
PIAO Y L, ZHAO L H. Distribution and development utilization of *Actinidia arguta* resource in Yanbian[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2009, 31(1): 32–35

[21] 高扬, 贾爱军, 李树海, 等. 天津地区野生软枣猕猴桃资源开发利用现状分析与建议[J]. 天津农业科学, 2014, 20(3): 94–96
GAO Y, JIA A J, LI S H, et al. Analysis and suggestions for utilized condition of wild *Actinidia arguta* resources in Tianjin[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2014, 20(3): 94–96

[22] 邹念梁. 辽宁野生软枣猕猴桃生态及物候调查[J]. 中国林副特产, 2017, (1): 74–75
ZOU N L. Liaoning wild *Actinidia arguta* ecological and phenological study[J]. Forest by-Product and Speciality in China, 2017, (1): 74–75

[23] 李旭, 曹万万, 姜丹, 等. 长白山野生软枣猕猴桃资源分布与果实和叶片性状多样性[J]. 北方园艺, 2015, (15): 22–27
LI X, CAO W W, JIANG D, et al. Resource distribution and character diversity of fruit and leaf of wild *Actinidia arguta* from Changbai Mountain Area[J]. Northern Horticulture, 2015, (15): 22–27

[24] 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

[25] REMYA K, RAMACHANDRAN A, JAYAKUMAR S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. Using MaxEnt model in the eastern Ghats, India[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 184–188

[26] KUMAR S, YEE W L, NEVEN L G. Mapping global potential risk of establishment of *Rhagoletis pomonella* (Diptera: Tephritidae) using MaxEnt and CLIMEX niche models[J]. Journal of Economic Entomology, 2016, 109(5): 2043–2053

[27] WANG R L, LI Q, HE S S, et al. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *Actinidiae* under climate change in China[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192153

[28] 雷军成, 徐海根, 吴军, 等. 基于 IPCC AR5 的我国常绿阔叶林潜在适宜生境变化分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 69–76
LEI J C, XU H G, WU J, et al. IPCC AR5-based analysis of variation of potential suitable habitats for evergreen broadleaf forest in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(1): 69–76

[29] YUE T X, FAN Z M, CHEN C F, et al. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2342–2361

[30] 贾爱军, 袁福江, 樊春芬, 等. 野生软枣猕猴桃的生长习性及栽培要点[J]. 河北果树, 2018, (1): 42
JIA A J, YUAN F J, FAN C F, et al. Growth habit and cultivation of wild *Actinidia arguta* [J]. Hebei Fruits, 2018, (1): 42

[31] PETITPIERRE B, KUEFFER C, BROENNIMANN O, et al. Climatic niche shifts are rare among terrestrial plant invaders[J]. Science, 2012, 335(6074): 1344–1348

[32] 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

[33] 黄圆博, 曹万万, 徐聆粤, 等. 野生软枣猕猴桃生境土壤养分含量及相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(18): 114–115
HUANG Y B, CAO W W, XU L Y, et al. Wild *Actinidia arguta* habitat soil nutrient content and correlation analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(18): 114–115