

美味猕猴桃地理分布模拟与气候变化影响分析

王茹琳^{1,2}, 文刚³, 李庆^{1*}, 王明田⁴, 郭翔⁵, 林姗², 姜淦², 沈沾红²

(1. 四川农业大学农学院, 成都 611130; 2. 四川省农村经济综合信息中心, 成都 610072; 3. 宜宾市植保植检站, 四川 宜宾 644000; 4. 四川省气象台, 成都 610072; 5. 四川省农业气象中心, 成都 610072)

摘要: 为了解气候变化对美味猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)地理分布的影响, 结合气候情景, 采用 Maxent 预测美味猕猴桃的适生区的变化趋势。结果表明, 基准气候和未来情景下构建的美味猕猴桃分布模型的 AUC 值均达到极好的标准。基准气候条件下, 美味猕猴桃在中国的适生区为 22°~38°N, 96°~122°E, 总面积为 $3.3679 \times 10^6 \text{ km}^2$, 高适生区位于秦岭-巴山、四川盆地东部、云贵高原东部、武陵山-巫山、武夷山脉。RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 美味猕猴桃在中国的高适生区面积将显著减少, 中适生区面积则呈增加趋势, 两种情景下高、中质心均向偏南或低纬度方向移动, RCP8.5 情景下质心的迁移轨迹最长, 变动范围最大。Maxent 模型的准确预测对于优化猕猴桃产业结构具有重要指导意义。

关键词: 美味猕猴桃; Maxent 模型; 气候; 适生区

doi: 10.11926/jtsb.3846

Geographical Distribution Simulation of *Actinidia deliciosa* in China and Influence of Climate Change

WANG Ru-lin^{1,2}, WEN Gang³, LI Qing^{1*}, WANG Min-tian⁴, GUO Xiang⁵, LIN Shan², JIANG Gan², SHEN Zhan-hong²

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Sichuan Provincial Rural Economic Information Center, Chengdu 610072, China; 3. Yibin Plant Protection and Quarantine Station, Yibin 644000, Sichuan, China; 4. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China; 5. Sichuan Province Agro-meteorological Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to understand the effect of climate change on geographical distribution of *Actinidia deliciosa*, the distribution change trend of *A. deliciosa* in China under current and future climate scenarios was predicted by using Maxent model. The results showed that the AUC values of distribution models established under current and future climate scenarios were all excellent. Under the present climatic conditions, the potential suitable zone for *A. deliciosa* were mainly distributed from north latitude 22° to 38°, and east longitude from 96° to 122°, with total area was $3.3679 \times 10^6 \text{ km}^2$. The high suitable zone was in Qinba Mountain, eastern Sichuan Basin, eastern Yunnan-Guizhou Plateau, Wuling-Wushan Mountain and Wuyi Mountain. Area of high suitable zone would decrease, while that of medium suitable zone would increase under scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The mean centers will move to low latitude area in the future under scenarios RCP4.5 and RCP8.5, and the centroid under RCP8.5 scenario has the longest moving trajectory and the largest change range among three climate scenarios. So, the perfect forecast of Maxent model has important guiding significance for optimizing *A. deliciosa* planting pattern in China.

收稿日期: 2017-11-06

接受日期: 2018-01-14

基金项目: 国家现代农业产业体系四川水果创新团队项目(2013-2018); 四川省三农气象服务专项资助

This work was supported by the Project for Sichuan Fruit Innovation Team of National Modern Agriculture Industry System (Grant No. 2013-2018), and the Special Project for Sichuan Three Agriculture Meteorological Service.

作者简介: 王茹琳, 男, 工程师, 在读博士, 主要从事农作物及病虫害与气候关系研究。E-mail: wrl_1986_1@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liq8633@163.com

Key words: *Actinidia deliciosa*; Maxent model; Climate; Suitable region

猕猴桃(*Actinidia* spp.)种类繁多,美味猕猴桃(*A. deliciosa*)、中华猕猴桃(*A. chinensis*)和软枣猕猴桃(*A. arguta*)在我国均有栽培,以‘秦美’、‘海沃德’、‘徐香’、‘米良’等品种为代表的美味猕猴桃主要种植于陕西、四川、重庆、贵州、湖北、河南、浙江和安徽等省份,栽培面积占全国猕猴桃栽培面积的67%^[1]。在全球范围内,美味猕猴桃种植面积约占85%,主要分布在亚洲、欧洲、大洋洲和南美洲,是世界上种植最广、经济价值最高的栽培种^[2]。研究美味猕猴桃在中国适宜性区划,对避免盲目扩大引种造成的经济和生态损失具有重大意义。

气候变化是极其复杂的生物地球化学过程,预测植物地理分布对气候变化的响应是目前十分热门的研究方向^[3]。研究表明,在区域尺度上,气候是影响物种分布的主要环境因素,气候变化可促进或抑制植物生长,进而改变其适宜分布范围。农业生产强烈依赖气候生态条件,气候变化将改变农作物已有的适宜性区划,影响其生长、发育及产量^[4]。气候变暖背景下,中国农业气候资源(热量和降水量)变化显著,进而导致作物地理分布范围和空间格局发生改变。多项研究证实,目前我国水稻、玉米和小麦的种植北界较20世纪60年代均显著北移^[5-6]。因此,利用科学手段探讨植物与气候之间相互作用,研究气候变化对植物分布规律的影响,有助于深入理解植物生态系统对气候变化的适应,对资源合理规划、布局和利用具有重要指导意义。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)是基于点数据定量分析目标物种在目标区域潜在分布、研究环境因素对物种分布影响的一类数学模型,此类模型的成功应用为研究目标植物气候适宜性区划提供了新途径^[7]。Maxent模型利用物种分布点与相应环境变量(气候、海拔、植被等)之间的非随机关系,计算熵最大时物种的概率分布,预测物种在目标区域的适生性,揭示物种空间分布规律与环境变量之间的关系。作为一种定量化分析工具,Maxent模型具有模拟精度高、样本需求少、运行结果稳定等优势,已广泛应用于入侵植物分布区预测、动植物地理分布预测和植物潜在分布区预测等方面,取得了较好的模拟效果^[8-10]。

目前对猕猴桃植物学、栽培学、品种选育等方

面研究较为深入,而对其适生分布及其与气候变化关系等的研究较少^[11-13]。屈振江等^[14]利用Maxent模型划分了美味猕猴桃在中国的气候适宜区,分析了猕猴桃种植分布与气候因子之间的关系,但该研究未考虑未来气候变化对猕猴桃种植分布的影响。本研究以美味猕猴桃为分析对象,通过实地调查、搜索数据库和查阅文献等方式获得分布数据,利用Maxent模型并结合GIS技术,模拟美味猕猴桃在中国的适生分布,并预测、对比、分析2050和2070时段不同气候情景下美味猕猴桃分布范围和空间格局的变化规律,旨在探索美味猕猴桃合理区划的有效手段,为科学引种栽培、生产布局、精细化种植管理及对未来应对气候变化的对策提供基本的数据支持。

1 材料和方法

1.1 环境变量的选择

构建物种生态位模型,需选取合适的环境变量。本研究从worldclim网站下载了67种气候因子作为初始环境变量,包括19个生物气候因子、月均温、最高温、最低温和月均降雨量^[15]。基准时段的时间跨度为1950-2000年,未来时段的时间跨度为2041-2060年(2050s)和2061-2080年(2070s)。选取IPCC发布的RCP4.5(温室气体排放中等情景)和RCP8.5(温室气体排放最高情景)两种典型浓度路径作为未来气候情景^[16]。上述变量分辨率为2.5arc-minutes(约4.5 km²)。

1.2 美味猕猴桃的空间分布位点数据的获取

通过田间调查、搜索数据库和文献检索3种方式获取美味猕猴桃有效的空间分布位点数据,其中四川和陕西境内采样点为笔者通过田间调查方式获得,采用GPS记录经纬度,共获得有效分布记录46条;通过搜索全球物种分布信息库和全国高校教学标本资源共享平台等得到分布记录236条;查阅公开发表的相关文献获得65条分布记录。利用百度坐标拾取系统对上述分布坐标逐一校对,去除重复、模糊和邻近的分布位点^[17],最终获得有效记录275条(图1),使用Excel软件处理,保存格式为*.CSV。

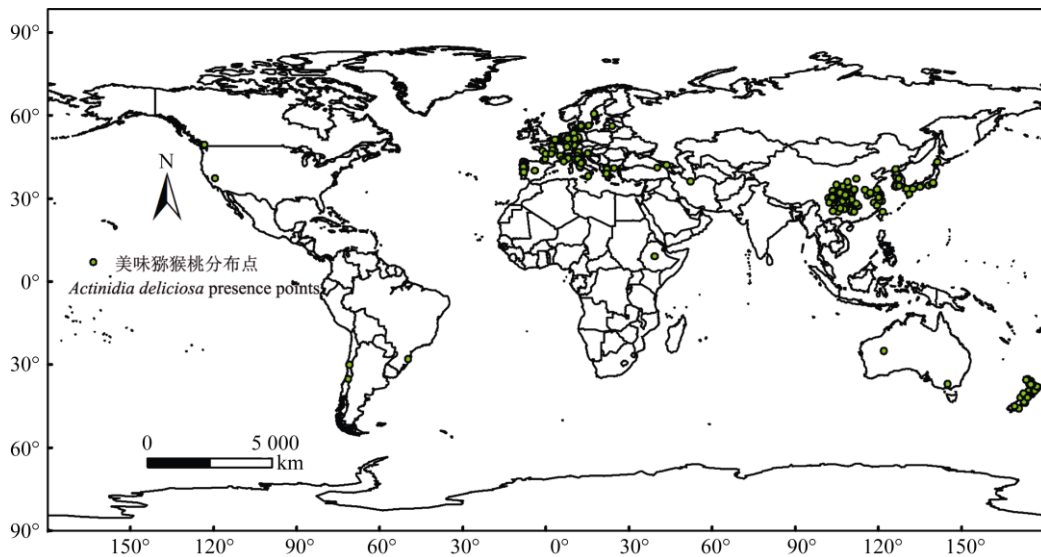


图1 美味猕猴桃全球分布图

Fig. 1 Current global distribution of *Actinidia deliciosa*

1.3 预测软件和研究方法

美味猕猴桃在中国适生分布模拟由 Maxent V 3.4.1 软件^[18]完成。软件设置方法: 将美味猕猴桃分布点数据和气候变量数据导入 Maxent 软件中, 程序运行时, 选择刀切法(do jackknife to measure variable importance)功能测定各气候变量重要性, 设置创建响应曲线(create response curves)功能以获得分布概率与环境变量之间的逻辑斯蒂曲线, 设置受试者工作特征曲线(ROC)评价模型预测的准确性, 随机测试集比例(random test percentage)设置为 25, 模型重复次数(replicates)设置为 10, 剩余参数均设置为默认。模拟结果使用 ArcGIS V 10.0 软件^[19]进行分级显示、面积统计和质心计算等后期处理。

模型检验: ROC 曲线是评估物种分布模型模拟准确性的有效方法, 该方法以曲线下面积值(area under curve, AUC)为衡量准确性的指标, 参考 Fielding 等^[20]和王运生等^[21]的方法将 AUC 阈值划分为: $0.5 \leq AUC < 0.6$ 模拟结果失败(fail); $0.6 \leq AUC < 0.7$ 模拟结果较差; $0.7 \leq AUC < 0.8$ 模拟结果一般; $0.8 \leq AUC < 0.9$ 模拟结果良好; $0.9 \leq AUC < 1$ 模拟结果极好。

2 结果和分析

2.1 环境变量筛选和模拟评价

筛选有效环境变量 研究表明, 环境变量间

的相关性会降低模型预测的准确性, 因此本研究参考 Worthington 等^[22]方法对环境变量进行有效筛选, 以提高模拟精度。首先利用刀切法测定 67 个环境变量对初始模拟贡献的大小, 保留贡献率大于 0 的环境变量。其次, 对剩余环境变量进行 Pearson 相关系数分析, 逐对比较环境变量之间的共线性, 若相关系数 $r < 0.8$, 则全部保留; 若 $r \geq 0.8$, 则对比初始模型中二者的贡献率, 保留贡献率较大的变量用于模型预测, 最终确定了 21 个环境变量(表 1), 在此基础上重建美味猕猴桃在中国分布的最大熵模型, 并对模拟结果进行准确性评价。

ROC 曲线和 AUC 值对模型准确性评价 表 2 为不同气候变化情景下美味猕猴桃在中国分布的 Maxent 模型的 AUC 值, 可见, 本研究所构建模型的训练数据 AUC 值均大于 0.972 (标准差 $SD \leq 0.002$), 测试数据 AUC 值均大于 0.961 (标准差 $SD \leq 0.016$)。这说明本研究所构建模型的准确性极高, 预测结果可用。

2.2 美味猕猴桃在中国的潜在分布

2.2.1 基于 Maxent 模拟美味猕猴桃在中国适生分布

根据 Maxent 模拟, 美味猕猴桃在中国生态适宜区主要位于 $22^{\circ} \sim 38^{\circ} \text{N}$, $96^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$, 由东向西呈不连续分布, 高适生区、中适生区和低适生区的区域面积分别为 9.0×10^5 、 1.270×10^6 和 $1.198 \times 10^6 \text{ km}^2$, 适生区总面积占中国国土面积的 35%。由图 2 可知,

表 1 21 个环境变量

Table 1 List of 21 environmental variables used in this study

代码 Code	变量 Variable	单位 Unit
bio2	平均日较差 Mean diurnal range	°C
bio4	温度季节性变化标准差 Standard deviation of temperature seasonality	°C
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest season	°C
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest season	°C
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest season	°C
bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest season	°C
bio14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
bio17	最干季度降水量 Precipitation of the driest season	mm
Prec4, 5, 6, 8, 9, 10	4、5、6、8、9、10 月平均雨量 Mean precipitation of April, May, June, August, September, October	mm
Tmax4, 5, 10, 12	4、5、10、12 月最高温度 Maximum temperature of April, May, October, December	°C
Tmin4	4 月最低温度 Minimum temperature of April	°C
Tmean2, 11	2、11 月平均温度 Mean temperature of February, November	°C

表 2 气候变化情景下 Maxent 模型的 AUC 值

Table 2 AUC Values of habitat distribution from two different scenarios (Rcp4.5 and 8.5) in current and two future periods (2050s and 2070s)

气候情景 Climate scenario	训练数据 Training data	测试数据 Test data
Current	0.972 ±0.001	0.961 ±0.014
2050s (Rcp4.5)	0.972 ±0.001	0.962 ±0.012
2050s (Rcp8.5)	0.974 ±0.002	0.964 ±0.009
2070s (Rcp4.5)	0.973 ±0.002	0.964 ±0.013
2070s (Rcp8.5)	0.975 ±0.001	0.962 ±0.016

美味猕猴桃在中国的高适生区集中分布在四川盆地东部(四川中东部和重庆大部), 秦岭-巴山(四川东北部、陕西和甘肃南部), 贵州高原周边(贵州大部、云南西北部、湖南西部和重庆南部), 武陵山-巫山(贵州东部、湖北西南部、湖南西北部和重庆东部)和武夷山脉(浙江和福建东部), 约占中国国土面积 9%, 四川、湖南、贵州、湖北、重庆和陕西的高适生区面积较大, 均大于 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表 3); 中适生区沿高适生区周围分布, 主要分布在河南、湖北、安徽、江苏、山东、江西、福建和浙江等省份, 占中国国土面积的 13% (图 2 和表 3); 低适生区包括云南、广西、广东、山西和宁夏等省份, 占中国国土面积的 12% (图 2 和表 3)。

2.2.2 美味猕猴桃在中国适生区面积变化

高适生区变化趋势: 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 美味猕猴桃在中国的高适生区面积比基准气候下的均呈减少趋势。模拟显示(图 3, 4), RCP4.5 情景下, 至 2050s, 高适生区面积将减至 $7.373 \times 10^5 \text{ km}^2$, 减少 18%, 减少的区域主要位于陕西、重庆、湖南、湖北、江西、安徽、浙江等省, 新增的破碎化区域分布在贵州、甘肃、湖北、广西、福建、江西和安徽等省。2070s 的变化趋势与 2050s 相似, 高适生区面积将减至 $6.882 \times 10^5 \text{ km}^2$, 减少 24%, 新增的

成片适生区域位于安徽和江苏两省。RCP8.5 情景下, 至 2050s, 美味猕猴桃在中国的高适生区面积将减至 $8.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 减少的适生区域位于陕西、四川、湖南、安徽、江西、浙江和福建等省, 新增的破碎化适生区域主要位于湖北、湖南、贵州、广西和江苏。至 2070s, 高适生区面积锐减至 $4.572 \times 10^5 \text{ km}^2$, 减少 49.2%, 四川盆地东部的大片适生区域将退至

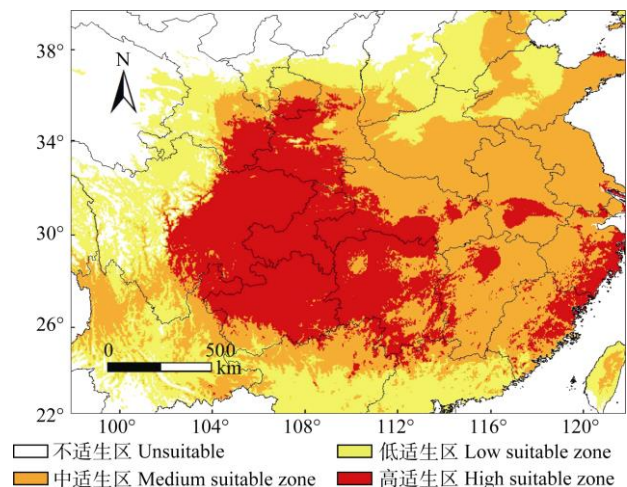


图 2 基于 Maxent 模型预测的美味猕猴桃在中国适生分布

Fig. 2 Potential distribution of *Actinidia deliciosa* in China based on Maxent under current climate

表 3 美味猕猴桃在中国适生区面积分析

Table 3 Analysis of highly suitable main distribution of *Actinidia deliciosa*

省 Province	高适生区面积 Area of high suitable zone (km ²)	中适生区面积 Area of medium suitable zone (km ²)	低适生区面积 Area of low suitable zone (km ²)
四川 Sichuan	177 135.42	33 125.00	142 274.31
重庆 Chongqing	75 538.19	1 770.83	34.72
陕西 Shaanxi	50 086.80	64 684.03	41 961.81
湖北 Hubei	62 013.88	113 506.95	38.73
湖南 Hunan	157 413.20	36 475.70	0
贵州 Guizhou	135 486.11	21 267.36	2 864.58
福建 Fujian	36 128.47	67 170.14	5 190.97
甘肃 Gansu	41 388.89	58 541.67	59 010.42
浙江 Zhejiang	32 517.36	59 670.14	0
云南 Yunnan	18 506.94	112 204.86	15 4097.22
中国 China	900 034.74	1 270 277.80	1 197 586.83

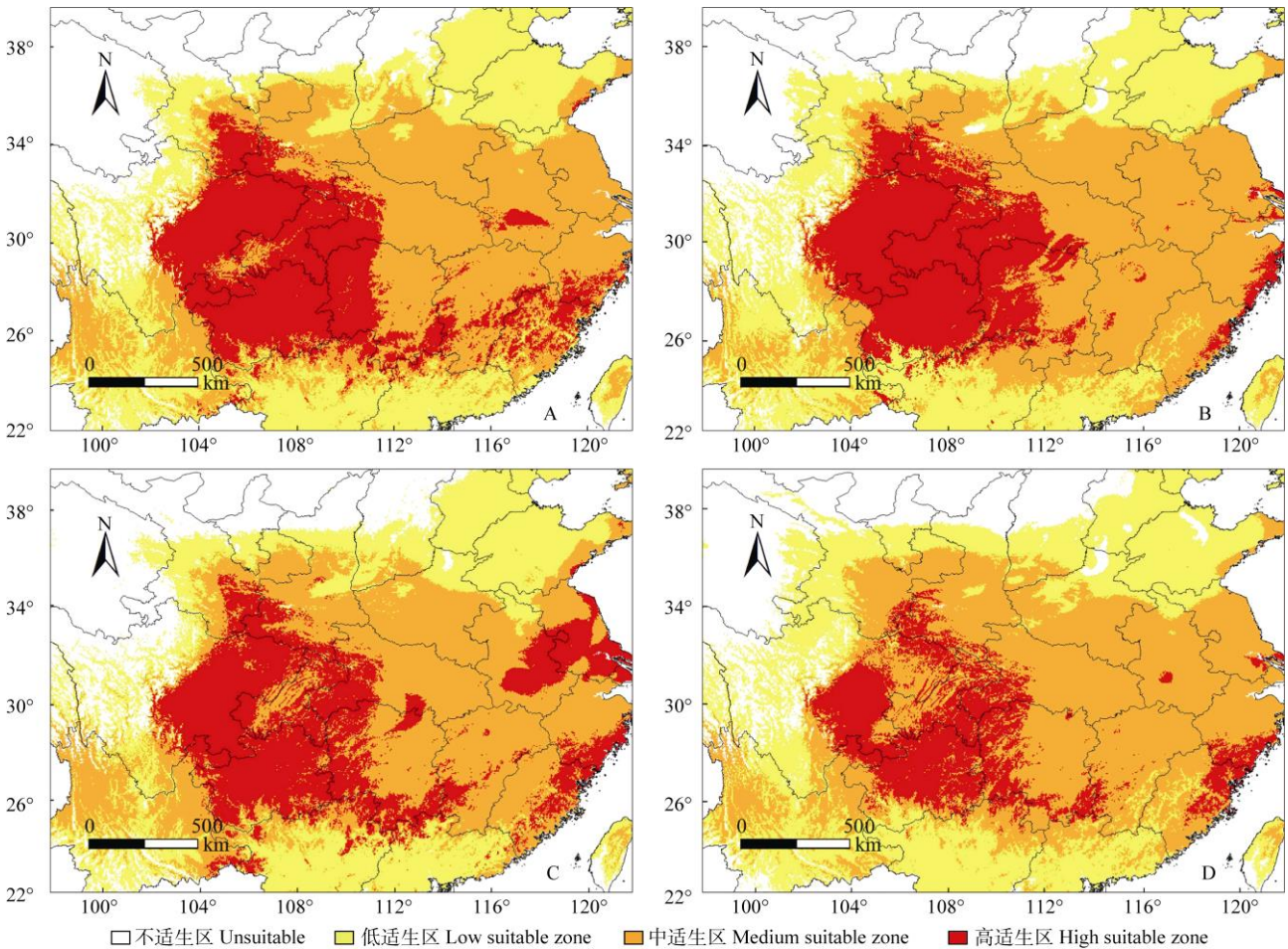


图 3 不同气候变化情景下美味猕猴桃在中国的适生性分布。A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5。

Fig. 3 Potential distribution of *Actinidia deliciosa* modeled by Maxent under RCP4.5 and RCP8.5. A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5.

盆地中部区域, 陕西境内大片适生区将移至川陕交界的秦岭山区一带, 新增的高适生区呈零星分布, 主要位于湖南、浙江和福建。

同基准气候相比(图 3,5), 未来在 RCP4.5 和

RCP8.5 情景下美味猕猴桃在中国的中适宜区面积均呈增加趋势, 分别增加 9.11% (2050s, RCP4.5)、6.41% (2070s, RCP4.5)、8.96% (2050s, RCP8.5)和 21% (2070s, RCP8.5)。在 RCP4.5 情景下, 新增较大

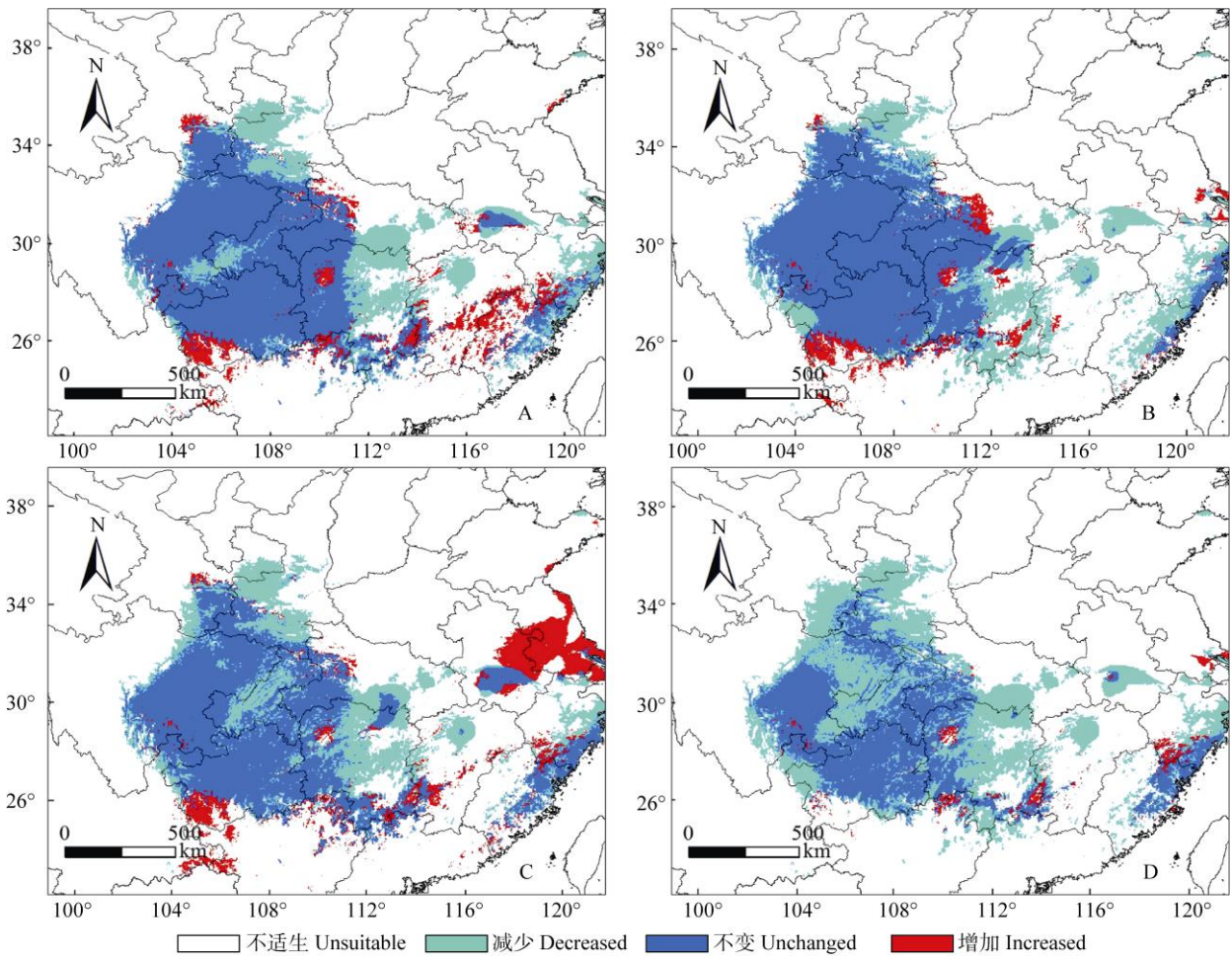


图 4 不同气候变化情景下美味猕猴桃在中国高适生区的变化。A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5。

Fig. 4 Change in high suitable zone distribuiton of *Actinidia deliciosa* under different climate change scenarios. A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5.

面积的中适宜区域位于陕西、宁夏、湖北、湖南、重庆、河南和江西等省，破碎化区域位于云南、贵州、福建和浙江等地；在 RCP8.5 情景下，新增的中适生区由 2050s 零星分布的片状区域，至 2070s 连为成片整体，主要分布在四川、陕西、甘肃、贵州、湖北、湖南、江西、安徽和浙江等省。

本研究利用 ArcGIS 的空间分析功能，结合 Maxent 的模拟结果，研究气候变化情景下美味猕猴桃

桃适生区质心(几何中心)的迁移特征。结果表明(图 6, 表 4)，基准气候情景下，高适生区质心位于湖北省恩施州来凤县境内，在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，总体上呈向东南、西南迁移的趋势，在 RCP4.5 情景下，质心首先沿西南方向移动 75.4 km 至重庆市酉阳县，再向东北迁移 118.97 km 至湖南省湘西州永顺县，总体上向东南方向移动 67.97 km；在 RCP8.5 情景下美味猕猴桃质心先向西南移动至重庆市彭

表 4 不同气候变化情景下美味猕猴桃高适生区质心位移距离和方向

Table 4 Moving distance and direction of gravity center of high suitable zone of *Actinidia chinensis* under different climate change scenarios

时期 Period	RCP4.5			RCP8.5		
	位移 (km) Displacement	方向 Direction	角度 (°) Angle	位移 (km) Displacement	方向 Direction	角度 (°) Angle
2018-2050s	75.40	西南 Southwest	220.84	114.48	西南 Southwest	186.28
2050s-2070s	118.97	东北 Northeast	8.87	87.88	东南 Southeast	319.90
2018-2070s	67.97	东南 Southeast	332.90	83.36	西南 Southwest	236.04

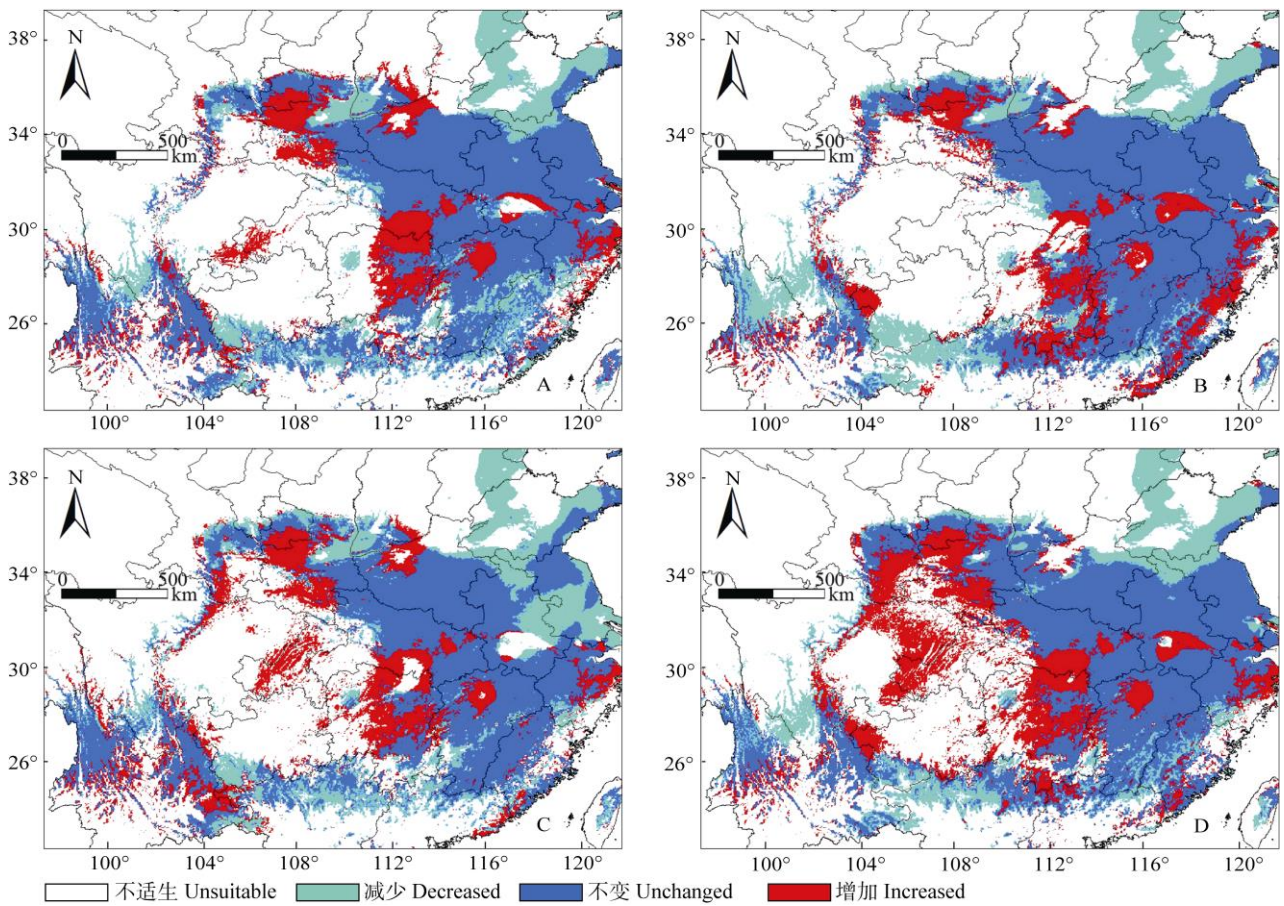


图 5 不同气候变化情景下美味猕猴桃在中国中适生区的变化。A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5。

Fig. 5 Change in medium suitable zone distribuiton of *Actinidia deliciosa* under different climate change scenarios. A: 2050RCP4.5; B: 2050RCP8.5; C: 2070RCP4.5; D: 2070RCP8.5.

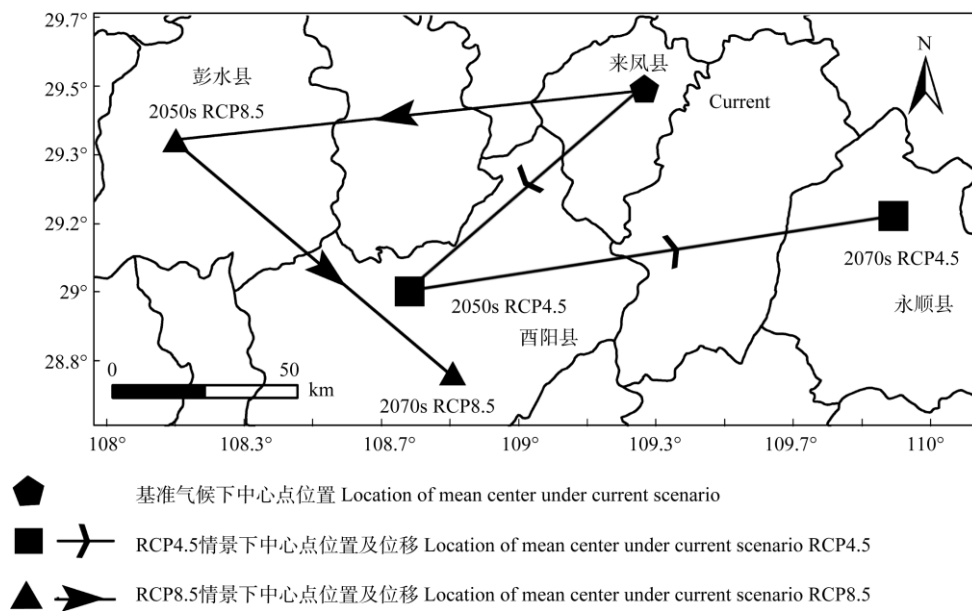


图 6 不同气候变化情景下美味猕猴桃高适生区的质心迁移轨迹

Fig. 6 Gravity center moving trajectory of high suitable zone of *Actinidia deliciosa* under different climate change scenarios

水县,再向东南迁移 87.88 km 至重庆酉阳县,总体上向西南方向迁移 83.36 km。

基准气候情景下,美味猕猴桃在中国的中适生区质心位于湖北省潜江市;未来 RCP4.5 情景下,质心由当前位置经湖北省公安县(2050s)迁移至湖南

省临澧县(2070s),总体上向西南方向移动 149.59 km;在 RCP8.5 情景下,中适生区质心将从当前位置向东南方向迁移 60.6 km 至湖北省监利县,之后沿西北方向移动 123 km 至湖北公安县,总体上向西南方向移动 108.24 km (图 7 和表 5)。

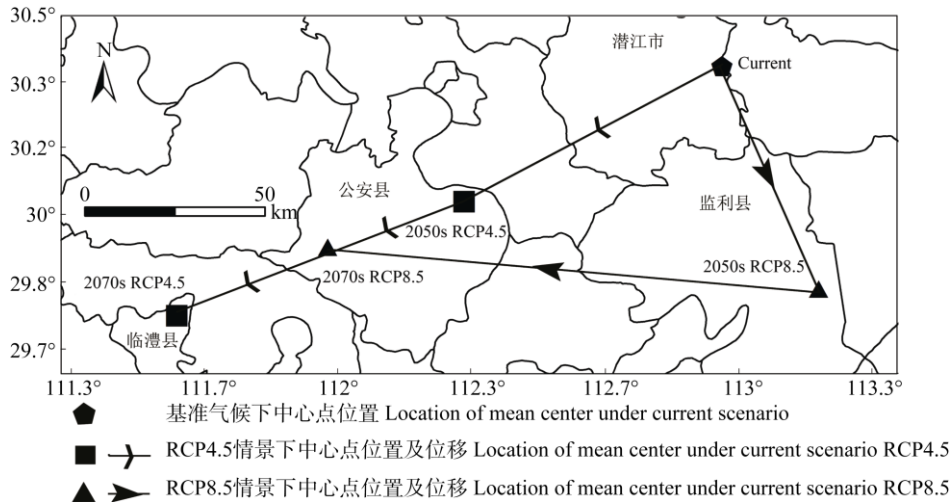


图 7 不同气候变化情景下美味猕猴桃中适生区的质心及其迁移轨迹

Fig. 7 Gravity center moving trajectory of medium suitable zone of *Actinidia deliciosa* under different climate change

表 5 不同气候变化情景下美味猕猴桃中适生区质心位移距离和方向

Table 5 Moving distance and direction of gravity center of medium suitable zone of *Actinidia chinensis* under different climate change scenarios

时期 Period	RCP4.5			RCP8.5		
	位移 (km) Displacement	方向 Direction	角度 (°) Angle	位移 (km) Displacement	方向 Direction	角度 (°) Angle
2018-2050s	72.67	西南 Southwest	207.73	60.60	东南 Northwest	293.49
2050s-2070s	77.13	西南 Southwest	201.62	123.00	西北 Southeast	175.13
2018-2070s	149.59	西南 Southwest	204.58	108.24	西南 Southwest	204.65

3 讨论

目前对模型精度评价应用最广泛的方法为 ROC 曲线法(即 AUC 法),AUC 不受诊断阈值影响,并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,其值越接近于 1 模型精度越高^[23]。本研究所建模型的测试数据和训练数据 AUC 值均大于 0.961,预测效果非常理想,说明此次模型预测的地理分布与美味猕猴桃实际分布拟合度较高,可以用于美味猕猴桃在中国地理分布与气候关系的研究。

通过 Maxent 模拟和 ArcGIS 软件的分析,美味猕猴桃在中国的生态适宜区总面积达 $3.3679 \times 10^6 \text{ km}^2$,高适生区主要分布在秦岭-巴山一线、四川盆地东部、云贵高原东部、武陵山-巫山、武夷山

脉,且四川、湖南、贵州、湖北、重庆和陕西的高适生区面积较大,主要分布在我国西南地区,与调查的分布区域和前人的研究结果一致。黄宏文等^[24]对中国野生猕猴桃代表种的调查表明,美味猕猴桃在中国总体上偏西分布;屈振江等^[14]分析了中国猕猴桃主栽品种的地理分布,结果表明高气候适宜区包括四川中东部、重庆中西部、贵州高原、湘西南和陕西秦岭北麓。目前陕西和四川的猕猴桃总产量分别占全国的 40%和 30%,是中国猕猴桃种植最为集中的区域,同时也是中国野生猕猴桃资源最为丰富的区域,因此川陕两省作为国内猕猴桃产业领军省份,需注重提高品质和效益,而湖南、贵州和重庆等省市应因地制宜,选择合适品种促进产业发展。

气候是影响物种地理分布的主要因素之一,气

气候变化对不同物种适生分布的影响不同。气候变暖使有些物种适生范围扩大, 而有些物种则受到威胁, 适生范围不断减少, 面临濒危或灭绝。本研究参考 Yue 等^[19]的方法, 分析气候变化对美味猕猴桃地理分布的可能影响, 结果表明, 在未来气候变化情景下, 美味猕猴桃在中国的高适生区面积将显著减少, 中适生区面积则呈增加趋势。RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 至 2070s, 高适生区面积由 $9.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ 分别减至 6.882×10^5 和 $4.572 \times 10^5 \text{ km}^2$, 中适生区则由 $1.270 \times 10^6 \text{ km}^2$ 分别增至 1.352×10^6 和 $1.537 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。秦岭北麓的陕西省猕猴桃年产量占全国 40% 左右, 种植品种以美味猕猴桃为主, 猕猴桃产业在当地经济中占有举足轻重的地位, 且种植面积呈不断增加趋势, 本研究中, 未来该区域高适生区面积将明显减少, 提醒我们对农业规划调整时应充分考虑气候变化的影响, 针对气候变化敏感的区域, 有关部门应出台相应指导方案, 通过调整种植品种和规模以应对气候变化。

研究证实, 中国不同区域气候变化的程度和趋势不同, 对各地植物生长和农林生产的影响也不同。气候变暖导致热量分布改变, 影响植物的种植界线、品种布局和种植结构。对美味猕猴桃在中国的适生区质心移动特征的分析表明, 至 2070s, 两种情景下高、中适生区质心均向偏南或低纬度方向移动, RCP8.5 情景下质心的迁移轨迹最长, 变动范围最大。贺文丽等^[25]指出温度是左右猕猴桃地理分布的最关键气象因素, 张杰等^[26]研究表明温差和最低温对猕猴桃地理分布起决定性作用。因此美味猕猴桃适生区面积变化和质心迁移可能是由于限制其分布的环境变量特别是温度条件变化所致。

气候是限制物种大尺度地理分布的关键要素, 但影响猕猴桃种植分布的环境因素不仅包括气候条件, 土壤类型、植被类型和地形因子、品种类型、人类活动等非生物因子以及社会经济结构、生产技术水平等因素同样会对其分布产生重要影响^[27-28]。本研究以气候因子作为环境变量, 未考虑其它因素对分布的影响, 预测的地理分布可能比美味猕猴桃的实际分布范围要广。因此, 在以后的工作中, 还应注重考量各种因素相互作用的可信表达, 以改善模型的预测效果。

本研究采用 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候情景, 从气候变化角度探讨 2050 和 2070 时段美味猕猴桃在中国地理分布的变化情况。针对气候变化, 国内

外共发布了 30 余种气候模式, 由于不同气候模式下不同排放情景对中国温度、降水模拟结果具有差异^[29], 为客观、全面地认识和评价气候变化对美味猕猴桃种植分布的影响, 并探求其对气候变化的响应机制, 未来的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。

参考文献

- [1] XU X B, ZHANG Q M. Researches and utilizations of germplasm resource of kiwifruit in China [J]. *Chin Bull Bot*, 2003, 20(6): 648-655. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2003.06.002.
徐小彪, 张秋明. 中国猕猴桃种质资源的研究与利用 [J]. *植物学通报*, 2003, 20(6): 648-655. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2003.06.002.
- [2] ZHANG J Y, MO Z H, HUANG S N, et al. Development of kiwifruit industry in the world and analysis of trade and international competitiveness in China entering 21st century [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(23): 48-55.
张计育, 莫正海, 黄胜男, 等. 21 世纪以来世界猕猴桃产业发展以及中国猕猴桃贸易与国际竞争力分析 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(23): 48-55.
- [3] GUO X Y, AN C L, WANG Y J, et al. Study on pollination effect of different time on the same day for delicious kiwifruit [J]. *N Hort*, 2016, 40(11): 34-37. doi: 10.11937/bfy.201611009.
郭学雨, 安成立, 王逸珺, 等. 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. doi: 10.11937/bfy.201611009.
- [4] ZHAI J, YUAN F H, WU J B. Research progress on vegetation phenological changes [J]. *Chin J Ecol*, 2015, 34(11): 3237-3243. doi: 10.13292/j.1000-4890.20151023.030.
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. doi: 10.13292/j.1000-4890.20151023.030.
- [5] CHEN Z B, DONG W, HUO Z G, et al. Research advances and the development direction of key techniques for agriculture addressing climate change in China [J]. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(15): 3097-3104. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.15.003.
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. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.15.003.
- [6] YE Q, YANG X G, XIE W J, et al. Tendency of use efficiency of rice growth season in southern China under the background of global warming [J]. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(21): 4399-4415. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.21.002.

- 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. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.21.002.
- [7] ZHOU G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China [J]. Meteor Environ Sci, 2015, 38(1): 80–94. doi: 10.3969/j.issn.1673-7148.2015.01.012.
- 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望 [J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80–94. doi: 10.3969/j.issn.1673-7148.2015.01.012.
- [8] XU Z L, PENG H H, PENG S Z. The development and evaluation of species distribution models [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(2): 557–567. doi: 10.5846/stxb201304030600.
- 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557–567. doi: 10.5846/stxb201304030600.
- [9] DUAN J Q, ZHOU G S. Potential distribution of rice in China and its climate characteristics [J]. Acta Ecol Sin, 2011, 31(22): 6659–6668.
- 段居琦, 周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6659–6668.
- [10] HE Q J, ZHOU G S. Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(12): 3931–3939. doi: 10.5846/stxb201111161744.
- 何奇瑾, 周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性 [J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3931–3939. doi: 10.5846/stxb201111161744.
- [11] QI X J, XU S K, ZHANG W Y, et al. Studies on compatibility of interspecific hybridization between *Actinidia deliciosa* ‘Xuxiang’ and *A. longicarpa* by anatomy [J]. Acta Hort Sin, 2013, 40(10): 1897–1904. doi: 10.3969/j.issn.0513-353X.2013.10.004.
- 齐秀娟, 徐善坤, 张威远, 等. 美味猕猴桃‘徐香’与长果猕猴桃远缘杂交亲和性的解剖学研究 [J]. 园艺学报, 2013, 40(10): 1897–1904. doi: 10.3969/j.issn.0513-353X.2013.10.004.
- [12] XU Y D, YIN L. Study on triterpenes from roots of *Actinidia deliciosa* [J]. Chin Trad Herb Drugs, 2013, 44(8): 935–937. doi: 10.7501/j.issn.0253-2670.2013.08.002.
- 徐一达, 尹莲. 美味猕猴桃根中三萜类成分研究 [J]. 中草药, 2013, 44(8): 935–937. doi: 10.7501/j.issn.0253-2670.2013.08.002.
- [13] GOULD N, MORRISON D R, CLEARWATER M J, et al. Elucidating the sugar import pathway into developing kiwifruit berries (*Actinidia deliciosa*) [J]. New Zeal J Crop Hort, 2013, 41(4): 189–206. doi: 10.1080/01140671.2013.801356.
- [14] QU Z J, ZHOU G S. Regionalization of climatic suitability for major kiwifruit cultivars in China [J]. Chin J Agrometeorol, 2017, 38(4): 257–266. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2017.04.007.
- 屈振江, 周广胜. 中国主栽猕猴桃品种的气候适宜性区划 [J]. 中国农业气象, 2017, 38(4): 257–266. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2017.04.007.
- [15] OSTROWSKI M F, PROSPERI J M, DAVID J. Potential implications of climate change on *Aegilops* species distribution: Sympatry of these crop wild relatives with the major European crop *Triticum aestivum* and conservation issues [J]. PLoS One, 2016, 11(4): e0153974. doi: 10.1371/journal.pone.0153974.
- [16] DONG S Y, GAO X J. Long-term climate change: interpretation of IPCC fifth assessment report [J]. Prog Inquist De Mutat Climat, 2014, 10(1): 56–59. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.012.
- 董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC 第五次评估报告解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56–59. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.012.
- [17] GAO B, WEI H Y, GUO Y L, et al. Using GIS and MaxEnt to analyze the potential distribution of *Abies chensiensis* [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(3): 843–852. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0114.
- 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843–852. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0114.
- [18] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2): 161–175. doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- [19] YUE T X, FAN Z M, CHEN C F, et al. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios [J]. Ecol Model, 2011, 222(14): 2342–2361. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.11.026.
- [20] FIELDING A H, BELL J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models [J]. Environ Conserv, 1997, 24(1): 38–49.
- [21] 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]. Biodiv Sci, 2007, 15(4): 365–372. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2007.04.005.
- 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. doi: 10.3321/j.issn:1005-0094.2007.04.005.
- [22] WORTHINGTON T A, ZHANG T J, LOGUE D R, et al. Landscape and flow metrics affecting the distribution of a federally-threatened fish: Improving management, model fit, and model transferability [J]. Ecol Model, 2016, 342: 1–18. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.09.016.
- [23] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. Divers Distrib, 2011, 17(1): 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.
- [24] HUANG H W. History of 100 years of domestication and improvement of kiwifruit and gene discovery from genetic introgressed populations

- in the wild [J]. *Bull Bot*, 2009, 44(2): 127–142. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2009.02.001.
- 黄宏文. 猕猴桃驯化改良百年启示及天然居群遗传渐渗的基因发掘 [J]. *植物学报*, 2009, 44(2): 127–142. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2009.02.001.
- [25] 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]. *Chin Agric Bull*, 2011, 27(22): 202–207.
- 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.
- [26] ZHANG J, AO Z Q, WU Y M, et al. Prediction of potential geographic distribution of *Actinidia chinensis* in China based on maximum entropy niche model and ArcGIS [J]. *Trop Geogr*, 2017, 37(2): 218–225. doi: 10.13284/j.cnki.rddl.002926.
- 张杰, 敖子强, 吴永明, 等. 中华猕猴桃(*Actinidia chinensis*)在中国的适生性及其潜在地理分布模拟预测 [J]. *热带地理*, 2017, 37(2): 218–225. doi: 10.13284/j.cnki.rddl.002926.
- [27] MO J G, CHI Z X, TANG B, et al. Climate suitability for red cartridge kiwifruit planting in Guizhou mountainous area [J]. *Chin J Agro-meteorol*, 2016, 37(1): 36–42. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2016.01.0054.
- 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2016.01.0054.
- [28] REN D, QI Y B, YU W Y, et al. Research on the degree of use and the influencing factors of farmers' machinery: Based on the survey of 205 households of kiwifruit farmers in Sichuan province [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2016, 34(4): 528–534. doi: 10.16036/j.issn.1000-2650.2016.04.022.
- 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. doi: 10.16036/j.issn.1000-2650.2016.04.022.
- [29] QU Y J, LI Y H, CHEN Y H. Major progress of global and China regional climate change projection [J]. *J Arid Meteorol*, 2013, 31(4): 803–813. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0803.
- 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. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0803.