

气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响*

朱颖墨¹ 窦小东^{2,3} 王瑞芳¹ 解明恩² 黄 玮⁴ 李 蒙⁴

ZHU Yingmo¹ DOU Xiaodong^{2,3} WANG Ruifang¹ XIE Ming'en² HUANG Wei⁴ LI Meng⁴

1. 云南大学地球科学学院, 昆明, 650091
2. 云南省气象服务中心, 昆明, 650034
3. 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 昆明 650034
4. 云南省气候中心, 昆明, 650034

1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

2. Yunnan Meteorological Service Center, Kunming 650034, China

3. Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming 650034, China

4. Yunnan Provincial Climate Center, Kunming 650034, China

2021-01-05 收稿, 2021-05-31 改回.

朱颖墨, 窦小东, 王瑞芳, 解明恩, 黄玮, 李蒙. 2021. 气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响. 气象学报, 79(5): 878-887

Zhu Yingmo, Dou Xiaodong, Wang Ruifang, Xie Ming'en, Huang Wei, Li Meng. 2021. Climate change impact on the region suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan province. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(5):878-887

Abstract In order to reveal the climate change impact on the region suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan province, based on the Maximum entropy (MaxEnt) model combined with the species distribution data and environmental variable data of *Coffea arabica*, an assessment and prediction model is constructed to evaluate the region suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan province under current climatic condition and predict the distribution of regions suitable for *Coffea arabica* growth under future climate condition. The prediction is analyzed. The results are as follows. (1) The constructed MaxEnt model can be used for the assessment and prediction of regions suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan province. Under current climate condition, the AUC (Area under ROC Curve) values of the training set and the test set of the evaluation model both are 0.941, and the evaluation result meets the standard of "Excellence". (2) The dominant environmental factors affecting the cultivation of *Coffea arabica* in Yunnan province are the average maximum temperature in November, rainfall in July, altitude, average minimum temperature in February, rainfall in October, mountain slope, and minimum temperature in the coldest month. The contribution rate is 91.4%. (3) Under current climatic condition, the regions suitable for *Coffea arabica* growth are mainly distributed in western Yunnan, southwestern Yunnan and Baoshan, Dehong, Pu'er, Lincang, Xishuangbanna and other areas in southern Yunnan. The total size of areas suitable for *Coffea arabica* growth is about 116300 km², which accounts for 29.51% of the land area in Yunnan. In general, there are moderately suitable areas around the periphery of highly suitable regions, and less suitable areas are distributed around the periphery of moderately suitable areas. Under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the total areas suitable for *Coffea arabica* growth are about 98300 km² and 69700 km², accounting for 24.95% and 17.69% of the land area of Yunnan province, respectively. The areas of suitable regions would decrease by 18000 km² and 46600 km², and their proportions of land area would decrease by 4.56% and 11.82%, respectively. The center of the overall suitable region would migrate from southeast to northwest. Compared with that under the RCP4.5 scenario, the migration under the RCP8.5 scenario extends further northwest. (4) Future climate change will lead to

* 资助课题: 云南省重点研发计划项目(2018BC007)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J056)、国家自然科学基金项目(41761109)。

作者简介: 朱颖墨, 主要从事气候变化、气象等方面研究。E-mail: zymk271@163.com

通信作者: 窦小东, 主要从事气候变化对生态、水文的影响研究。E-mail: 154233007@qq.com

decreases in the total area suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan province. The center of the overall suitable region would shift to higher altitudes and higher latitudes, and the magnitude of such changes is larger under higher carbon emission scenarios.

Key words Maximum entropy model, Climate change, Suitable growth zone, *Coffea arabica*, Yunnan

摘要 为揭示气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响,基于最大熵(MaxEnt)模型,结合小粒咖啡物种分布数据、环境变量数据,构建云南省小粒咖啡适生区评估及预测模型,对当前气候条件下小粒咖啡在云南省的适生区进行评估,并对未来气候条件下,小粒咖啡在云南省的适生区进行预测,再对预测结果进行对比分析。结果显示:(1)构建的最大熵模型能够较精确地用于小粒咖啡在云南省适生区的评估和预测,当前气候条件下,评估模型的训练集与测试集的AUC(Area under ROC Curve)值均为0.941,达到评估结果为极好的标准。(2)影响云南省小粒咖啡种植的主导环境因子依次为11月平均最高气温、7月降雨量、海拔高度、2月平均最低气温、10月降雨量、坡度和最冷月最低气温,共占总贡献率的91.4%。(3)当前气候条件下,小粒咖啡的适生区主要分布在滇西、滇西南以及滇南的保山、德宏、普洱、临沧、西双版纳等地区,总适生区约为116300 km²,占云南省国土面积的29.51%,且总体上,高适生区外围分布中适生区,中适生区外围分布低适生区。RCP4.5、RCP8.5情景下,小粒咖啡总适生区的面积分别约为98300、69700 km²,分别占云南省国土面积的24.95%、17.69%,两种排放情景下小粒咖啡总适生区面积分别减少了18000、46600 km²,国土面积占比分别减少了4.56%、11.82%,且总适生区的质心均由东南向西北方向移动,与RCP4.5情景相比,RCP8.5情景的移动距离更远。(4)未来气候变化将会导致小粒咖啡在云南省的总适生区面积减小,总适生区的质心位置向海拔更高与纬度更高的方向移动,且高碳排放情景下这种变化幅度更大。

关键词 最大熵模型,气候变化,适生区,小粒咖啡,云南

中图法分类号 P467

1 引言

咖啡是茜草科(Rubiaceae)咖啡属(*Coffea* genus)常绿乔木(孙彩梅等,2019),与可可、茶并称为世界三大饮料作物,原产地位于非洲的中北部地区(王彦兵等,2020),目前,种植范围已扩大到全世界的很多国家和地区,主要种植的品种有大粒咖啡(*Coffea liberica* Bull ex Hiern)、中粒咖啡(*Coffea canephora* Pierre)、小粒咖啡(*Coffea arabica*),其中,小粒咖啡的种植面积最大,总种植面积已达到全球咖啡种植面积的80%(张明达等,2020)。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,未来全球气候在人类活动、自然因素的作用下,将会持续变暖(张强等,2015;严中伟等,2020)。研究(李文庆等,2019)表明,地球上的绝大多数物种的分布格局均会较大程度地受到气候变化的影响。小粒咖啡适宜种植区的气温不宜过热,也不宜过冷,其适宜生长环境在温凉、湿润、半荫蔽或荫蔽以及静风的地区(韩志慧等,2019;张文慧等,2019),因此,冬暖夏凉的南亚热带、中亚热带最适宜种植。云南省是中国咖啡的主产区,小粒咖啡的种植面积及产量均已占到全国的98%以上(章宇阳等,2020;赵明珠等,2020),因此明确气候变化对小粒咖啡适生区的影响具有重要

的生产实践意义。

近年来,在预测物种潜在适生区以及气候变化对物种分布格局影响方面,生态位模拟(ecological niche modelling, ENM)已成为重要研究工具(Tang, et al, 2018; 张文秀等, 2020)。而众多的物种潜在分布建模算法中,以最大熵理论为基础的最大熵(MaxEnt)模型,以其输入数据简单、易获取、操作界面友好,且预测结果精准等优势(Sanchez, et al, 2010; 陈积山等, 2019; 杜超群等, 2019),越来越受到科研工作者的青睐。姬柳婷等(2020)运用最大熵模型研究了气候变化对北重楼(*Paris verticillata* M. Bieb)潜在适生区的影响等,李文庆等(2019)运用最大熵模型对不同气候情景下四子柳(*Salix tetrasperma* Roxb.)的亚洲潜在地理分布格局变化进行了预测。沈涛等(2019)运用最大熵模型研究了滇龙胆草野生资源的生物气候特征及其地理分布。目前,关于云南小粒咖啡的研究多集中在生态适宜性区划(张明达等, 2020),以及气候因子、地理因子、土壤养分等对咖啡品质的影响等方面(陈凯, 2019; 黄丕兴, 2019; 鲁韦坤等, 2019; 马关润等, 2019),而气候变化对小粒咖啡在云南适生区的影响却很少见有公开报道。基于此,本研究运用最大熵模型,结合云南省小粒咖啡物种分布数据,当前以及RCP4.5、RCP8.5两种排放情景下的未来气候

变化数据,地形与土壤等环境变量数据,评估当前气候条件下小粒咖啡在云南省的适生区,研究气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响,并明确影响云南小粒咖啡种植的主导环境要素。研究结果可为云南省小粒咖啡产业发展提供科学依据,研究方法也可为类似研究提供参考。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 小粒咖啡分布数据收集与处理

小粒咖啡分布数据由实地调查采样与文献查询相结合获得,其中,通过实地调查获得云南省小粒咖啡 GPS 采样点 86 个,通过查阅公开发表的相关文献并结合 Google Earth 卫星定位,获得云南省小粒咖啡分布样点 11 个。利用 ArcGIS 的缓冲区分析工具对获得的 97 个样点分布数据进行筛选,缓冲区半径设置为 2.5 km,对缓冲区有叠加的样点,根据样点的相对位置删除相对密集样点,最后,获得云南省小粒咖啡分布样点数据 55 个。

2.1.2 环境变量数据种类、来源及处理

环境变量数据包含气候、地形以及土壤数据。为便于研究气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响,当前气候数据及未来气候数据采用相同的气候要素,均包括 19 个生物气候变量(具有较强的生物学意义,可反映气温与降水的特点及季节变化特征)(Hijmans, et al, 2005)、1—12 月降雨量、1—12 月平均最高气温、1—12 月平均最低气温,共 55 个气候指标数据。其中,当前的气候要素数据采用 1950—2000 年的气候指标数据,未来的气候数据采用 IPCC 第 5 次评估报告发布的 RCP4.5、

RCP8.5 两种排放情景下 CCSM4 气候模式中的 2050 年(时段为:2041—2060 年)时间段的气候指标数据。所有气候指标数据的空间分辨率均为 30",均来自于世界气候数据库 Worldclim。地形数据包含坡度、坡向、海拔 3 个要素,其中,海拔高度数据直接通过 DEM 数据获得,坡度、坡向利用 ArcGIS 空间分析模块计算得到,所需的 DEM 数据来源于云南省地图院,空间分辨率为 90 m。土壤数据包含土壤有机碳含量、土壤 pH 值等 20 个要素,数据均来源于世界和谐土壤数据库 HWSD,并经过 ArcGIS 裁剪、转换等得到。所有环境变量数据均按照最大熵模型输入文件要求,由 ArcGIS 转换为 .asc 格式。

2.2 研究方法

2.2.1 影响咖啡分布的关键环境变量数据筛选

由于本研究采用的环境变量较多,容易产生多重共线性问题,影响模型的精度(王雨生等,2019),因此,首先选取上述 55 个咖啡样点分布数据、78 个环境变量数据构建初始模型,再运用刀切法检验,剔除贡献较小的环境变量后,运用 SPSS 20.0 对贡献较大的环境变量做 pearson 相关关系分析,考虑相关系数较大($|r| > 0.8$,在 0.01 水平上显著相关)(王茹琳等,2017)且对咖啡分布的重要影响,最后筛选出关键环境变量 17 个(表 1)。

2.2.2 MaxEnt 模型应用、可靠性评价及适生区等级划分

MaxEnt 模型以最大熵理论为基础,其原理是在服从于一定限定条件的情况下,通过计算目标地区概率分布的最大熵来估计物种的概率分布(王雨生等,2019)。本研究运用 MaxEnt 3.4.1 加载 55 个

表 1 筛选出的关键环境变量

Table 1 Selected key environmental variables

序号	变量类型	变量代码	描述	序号	变量类型	变量代码	描述
1	气候	bio_01	年平均气温(°C)	10	气候	tmax_11	11月平均最高气温(°C)
2	气候	bio_02	气温日较差月均值(°C)	11	气候	tmin_02	2月平均最低气温(°C)
3	气候	bio_06	最冷月最低气温(°C)	12	地形	alt	海拔高度(m)
4	气候	prec_03	3月降雨量(mm)	13	地形	aspect	坡向(°)
5	气候	prec_07	7月降雨量(mm)	14	地形	slope	坡度(°)
6	气候	prec_10	10月降雨量(mm)	15	土壤	t_gravel	土壤碎石体积分比(%)
7	气候	prec_11	11月降雨量(mm)	16	土壤	t_oc	土壤有机碳含量(g/kg)
8	气候	prec_12	12月降雨量(mm)	17	土壤	t_PH_H2O	土壤酸碱度
9	气候	tmax_03	3月平均最高气温(°C)				

云南省小粒咖啡的地理分布数据、初始模型筛选出的 17 个关键环境变量数据,所有环境变量均设置为连续变量,设置分布数据的训练集、测试集分别为 75%、25%,数据随机选取 (Wang, et al, 2019),选用刀切法计算各环境变量的重要性,输出文件采用.asc 类型,其余各模型参数均选择默认值。

模型的准确度由 AUC (Area under ROC Curve) 值,即 ROC 曲线 (Receiver operating characteristic curve) 下的面积值判断 (Kalboussi, et al, 2018)。AUC 值介于 0—1,数值越大则模拟结果越精确 (王茹琳等, 2017)。研究 (Bai, et al, 2018; 谭钰凡等, 2018; 丁新华等, 2019; 林正雨等, 2019) 表明, $AUC < 0.6$, 失败; $0.7 > AUC \geq 0.6$, 结果较差; $0.8 > AUC \geq 0.7$, 结果一般; $0.9 > AUC \geq 0.8$, 结果较好; $1.0 > AUC \geq 0.9$, 结果极好; $AUC = 1.0$, 结果完美。

MaxEnt 模型的输出结果在 0—1,数值越大表明小粒咖啡的分布概率越大 (叶永昌等, 2016; 张丹华等, 2019)。按照分布概率 (P) 的大小并结合云南实际确定小粒咖啡的适生等级: $P < 0.1$ 为非适生区, $0.1 \leq P < 0.2$ 为低适生区, $0.2 \leq P < 0.5$ 为中适生区, $0.5 \leq P \leq 1$ 为高适生区。

3 结果与分析

3.1 模型检验及主导环境变量筛选

运用 MaxEnt 加载 55 个小粒咖啡样点分布数据、17 个关键环境变量数据,设置相关参数后再次构建模型进行云南省小粒咖啡适生区预测。运行结果显示,基于关键环境变量所构建的云南省小粒咖啡适生区评估及预测模型的训练集与测试集的 AUC 值均为 0.941 (图 1),因此本次构建的模型的

准确性达到了极好的标准,此次结果可用于云南省小粒咖啡的适生区评估及预测。17 个关键环境变量的重要性排序 (表 2) 显示,以贡献率超过 5% 的环境变量作为影响云南省小粒咖啡适生区分布的主导环境变量,则主导环境变量依次为: 11 月平均最高气温、7 月降雨量、海拔高度、2 月平均最低气温、10 月降雨量、最冷月最低气温、坡度,这 7 项的累计贡献率达到 91.4%。其中,气候变量占 5 项,累计贡献率为 73.2%,地形变量占 2 项,累计贡献率为 18.2%,土壤变量未出现在主导环境变量中。三组关键环境变量中气候变量贡献率最高、地形变量次之、土壤变量最低,因此气候变量对小粒咖啡潜在适生区分布的影响至关重要。

3.2 当前气候条件下云南省小粒咖啡适生区分布 MaxEnt 模型的输出结果为小粒咖啡在云南境

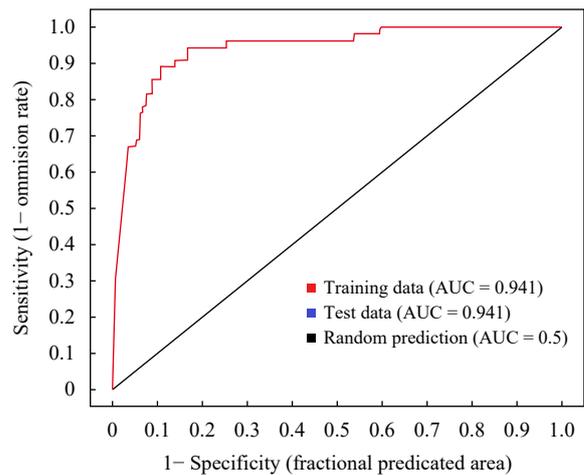


图 1 模型适用性检验的 AUC 值 (红、蓝线重合)

Fig. 1 AUC values of model suitability tests (red and blue lines overlap)

表 2 关键环境变量的贡献率

Table 2 Contribution rates of key environmental variables

序号	环境变量	贡献百分率(%)	变量类型	序号	环境变量	贡献百分率(%)	变量类型
1	11月平均最高气温	38.8	主导型	10	3月降雨量	1.1	辅助型
2	7月降雨量	15.8	主导型	11	3月平均最高气温	0.9	辅助型
3	海拔高度	12.6	主导型	12	坡向	0.5	辅助型
4	2月平均最低气温	7.1	主导型	13	气温日较差月均值	0.4	辅助型
5	10月降雨量	5.9	主导型	14	土壤碎石体积百分比	0.4	辅助型
6	最冷月最低气温	5.6	主导型	15	土壤有机碳含量	0.3	辅助型
7	坡度	5.6	主导型	16	土壤酸碱度	0.3	辅助型
8	年平均气温	2.6	辅助型	17	11月降雨量	0.1	辅助型
9	12月降雨量	2	辅助型				

内的存在概率,运用 ArcGIS 将输出结果的 ASC II 格式转换为栅格格式,经重分类后可得到当前气候条件下云南省小粒咖啡适生等级分布(图 2)。由图 2 可知,当前气候条件下,小粒咖啡的适生区主要分布在滇西、滇西南以及滇南的保山、德宏、普洱、临沧、西双版纳等地区,且总体上,高适生区外围分布中适生区,中适生区外围分布低适生区。将当前气候条件下,MaxEnt 模型对云南省小粒咖啡

适生区的评估结果,运用 ArcGIS 的空间分析模块进行计算,得到当前气候条件下各适生区的面积(表 3)。由表 3 可知,当前气候条件下,小粒咖啡适生区的总面积约为 $11.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占云南省国土面积的 29.51%,其中高、中、低适生区的面积分别约为 1.58×10^4 、 5.34×10^4 、 $4.71 \times 10^4 \text{ km}^2$,占比分别约为 4.01%、13.55%、11.95%。

3.3 RCP4.5、RCP8.5 情景下云南省小粒咖啡适生区变化

3.3.1 RCP4.5、RCP8.5 情景下云南省小粒咖啡适生区面积变化

由 RCP4.5、RCP8.5 排放情景下小粒咖啡在云南的适生区分布(图 3)可知,两种排放情景下,云南省小粒咖啡的适生区虽然也主要位于滇西、滇西南、滇南地区,但适生区的面积及位置均出现了不同程度的变化。将 RCP4.5、RCP8.5 情景下,MaxEnt 模型对云南省小粒咖啡适生区的预测结果,运用 ArcGIS 的空间分析模块进行计算,得到 RCP4.5、RCP8.5 情景下各适生区的面积(表 3)。由表 3 可知,在 RCP4.5 排放情景下,小粒咖啡适生区的总面

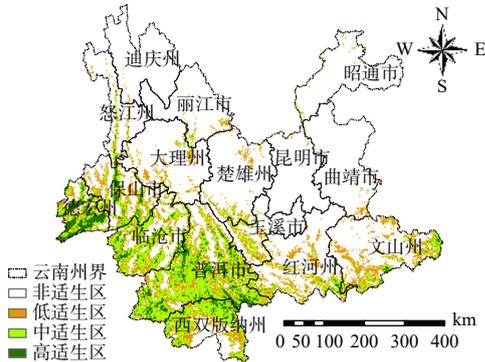


图 2 当前气候条件下云南省小粒咖啡适生区分布
Fig. 2 Distribution of areas suitable for *Coffea arabica* in Yunnan province under current climate condition

表 3 云南小粒咖啡适生区在当前、未来气候条件下的面积评估及预测
Table 3 Assessment and prediction of regions suitable for *Coffea arabica* growth under current and future climate conditions

	当前气候条件		RCP4.5气候模式下		RCP8.5气候模式下	
	评估面积(10^4 km^2)	全省面积占比	预测面积(10^4 km^2)	全省面积占比	预测面积(10^4 km^2)	全省面积占比
非适生区	27.78	70.49%	29.58	75.05%	32.44	82.31%
低适生区	4.71	11.95%	7.25	18.40%	5.41	13.73%
中适生区	5.34	13.55%	2.54	6.45%	1.53	3.88%
高适生区	1.58	4.01%	0.04	0.10%	0.03	0.08%
总适生区	11.63	29.51%	9.83	24.95%	6.97	17.69%

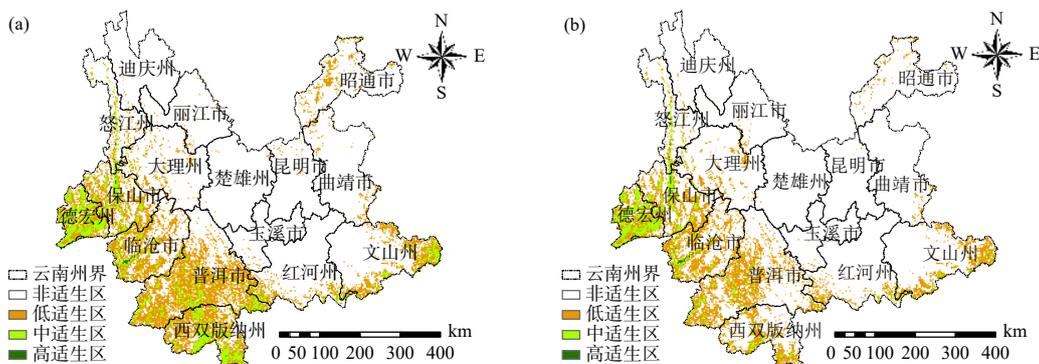


图 3 RCP4.5 (a)和 RCP8.5 (b) 气候情景下小粒咖啡在云南的适生区分布
Fig. 3 Distributions of areas suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan under the RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) scenarios

积约 $9.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占云南省国土面积的 24.95%，其中高、中、低适生区的面积分别约为 0.04×10^4 、 2.54×10^4 、 $7.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占比分别约为 0.10%、6.45%、18.40%。在 RCP8.5 排放情景下，小粒咖啡适生区的总面积约 $6.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占云南省国土面积的 17.69%，其中高、中、低适生区的面积分别约为 0.03×10^4 、 1.53×10^4 、 $5.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占比分别约为 0.08%、3.88%、13.73%。

相较于当前气候条件下(图 4)，在 RCP4.5、RCP8.5 排放情景下云南小粒咖啡的总适生区面积呈减少趋势，分别减少 1.80×10^4 、 $4.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占云南省国土面积的比率分别减少了 4.56%、11.82%，且碳排放更高的 RCP8.5 模式的减少幅度更大。其中，中、高适生区的变化均为减少趋势，与总适生区变化趋势一致，且 RCP8.5 模式的减少幅度均高于 RCP4.5 模式。而低适生区的面积在两种情景下，均有不同程度的增幅，这主要是减少的中适生区面积大部分均转变为低适生区，因此才导致了低适生区面积的增加。

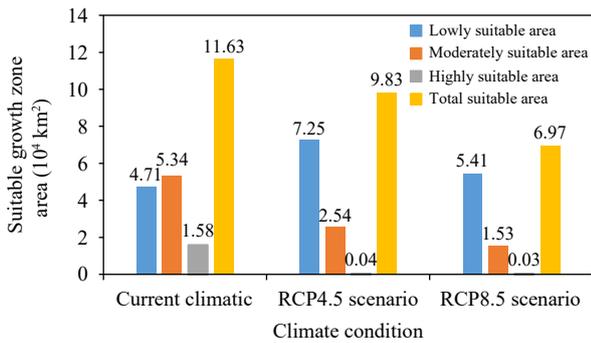


图 4 不同气候情景下小粒咖啡在云南的适生区分布变化

Fig. 4 Changes in the distribution of areas suitable for *Coffea arabica* growth in Yunnan under different climate scenarios

3.3.2 RCP4.5、RCP8.5 情景下云南省小粒咖啡适生区质心变化

采用各适生区的几何中心即质心(李文庆等, 2019; 姬柳婷等, 2020)的位置变化来研究气候变化对云南省小粒咖啡适生区的影响, 各质心位置由 ArcGIS 计算得到。RCP4.5、RCP8.5 情景下, 云南省小粒咖啡适生区质心迁移的方向与距离, 清晰地展现了气候变化对小粒咖啡适生区的影响(图 5)。

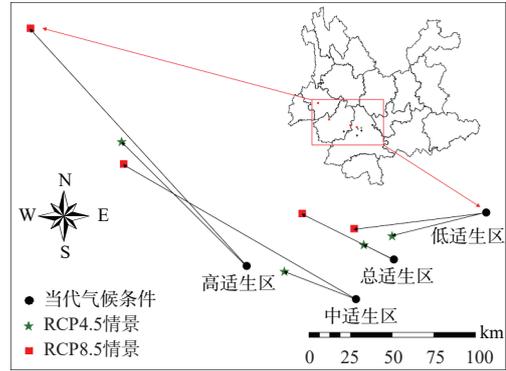


图 5 云南省小粒咖啡适生区在不同气候情景下的质心变化

Fig. 5 Changes in the centroid of suitable areas for *Coffea arabica* in Yunnan province under different climate scenarios

结果显示, 两种情景下, 云南省小粒咖啡总适生区的质心均由东南向西北方向迁移, 且质心在 RCP8.5 情景下移动的距离更大。中、高适生区的质心位置变化与总适生区的变化总体一致, 均是由东南向西北方向移动。而云南的地形总体上东南海拔较低, 西北海拔较高, 因此随着 RCP4.5、RCP8.5 情景下, 云南气温的升高, 小粒咖啡的适生区由气温相对较高的东南地区迁移至气温相对较低而海拔较高的地区。RCP4.5、RCP8.5 情景下, 云南省小粒咖啡低适生区的质心则均向西偏南方向迁移, 而没有向海拔相对更高的西北方向迁移, 这主要是由于低适生区大部由原来的中适生区转变而来, 而中适生区质心位于低适生区的西南方向, 因此, 才导致了云南省小粒咖啡的低适生区质心向西南方向变化。

由此可见, RCP4.5、RCP8.5 情景下, 云南省小粒咖啡总适生区的面积均会减少, 总适生区的位置也均会向海拔相对更高的西北方向迁移。且碳排放更高的 RCP8.5 情景下, 小粒咖啡总适生区面积减少幅度更大, 质心位置向西北方向迁移的幅度也更大。

3.4 主导环境变量对小粒咖啡分布概率的影响

本研究以 0.1 作为阈值划分小粒咖啡适生区范围, 结合云南省小粒咖啡地理分布概率与主导环境因子的关系(图 6), 研究 7 个主导环境变量对小粒咖啡分布概率的影响。结果显示, 11 月最高气温高于 18.8°C 即适合小粒咖啡的生存, 其中, 气温在 $18.8\text{—}24.4^\circ\text{C}$, 小粒咖啡的分布概率随着气温升高

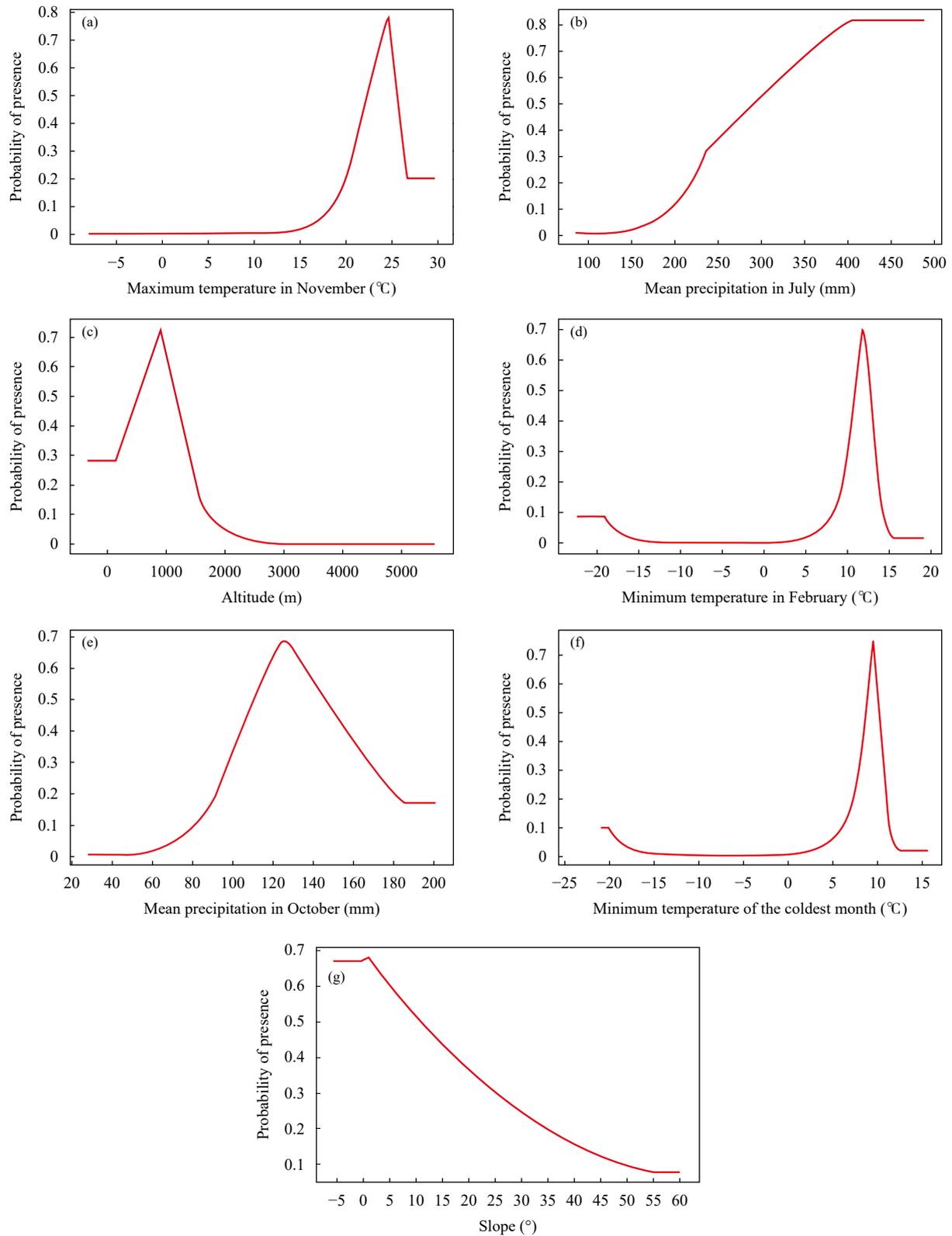


图 6 云南省小粒咖啡的主导环境因子与地理分布概率的关系

Fig. 6 Relationship between geographical distribution probability of *Coffea arabica* and dominant environmental factors in Yunnan Province

而增大, 24.4—26.5℃小粒咖啡的分布概率随着气温升高而减小, 气温高于26.5℃后, 分布概率保持稳定, 因此, 最适宜气温为24.4℃。7月降雨量超过193.8 mm即适合小粒咖啡的生存, 随着降雨量的增加分布概率随着增大, 降雨量达到404 mm时小粒咖啡分布概率达到最大, 其后随着降雨量的增加小粒咖啡的分布概率维持稳定。海拔高度低于1719 m均为小粒咖啡生长的适宜区, 其中海拔在144—906 m小粒咖啡分布概率随着海拔高度的上升而增大, 海拔高度在906—1719 m, 随着海拔高度的继续上升小粒咖啡分布概率逐渐减小, 最适宜的海拔高度为906 m。2月最低气温为8.3—14.3℃属适宜区域, 最适宜气温为12.0℃, 其中, 气温介于8.3—12.0℃时, 分布概率随着气温升高而增大, 气温介于12.0—14.3℃时, 分布概率随着气温升高而减小。10月降雨量大于82.0 mm即适合小粒咖啡的生存, 其中, 降雨量在82.0—125.3 mm时, 随着降雨量的增多小粒咖啡的分布概率逐渐增大, 降雨量介于125.3—185.8 mm时, 随着降雨量的继续增多小粒咖啡的分布概率逐渐降低, 最适宜降雨量为125.3 mm。最冷月最低气温适宜范围为6.1—11.4℃, 其中, 气温在6.1—9.4℃时, 随着气温升高小粒咖啡分布概率逐渐增大, 气温在9.4—11.4℃时, 随着气温升高分布概率逐渐降低, 最适宜气温为9.4℃。坡度低于50.4°即适合小粒咖啡的生存, 总体上随着坡度的增大分布概率逐渐降低, 坡度为1.1°时最适宜小粒咖啡的生存。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)小粒咖啡在云南的适生区主要位于滇西、滇西南、滇南地区, 总适生区的面积约为 $11.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占云南省国土面积的29.51%, 其中高、中、低适生区的面积分别约为 1.58×10^4 、 5.34×10^4 、 $4.71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分别约占云南省国土面积的4.01%、13.55%、11.95%, 且总体上高适生区的外围分布中适生区, 中适生区的外围分布低适生区。

(2)RCP4.5、RCP8.5情景下小粒咖啡适宜区面积分别约为 9.83×10^4 、 $6.97 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占云南省国土面积的24.95%、17.69%, 两种排放情景下小粒咖啡适生区的面积均呈减小趋势, 在碳排放更高的

RCP8.5情景下减少幅度更为明显, 且两种排放情景下小粒咖啡适生区的质心总体上均由东南向西北迁移, 其中, 中、高适生区质心由东南向西北迁移, 低适生区质心略向西南迁移。

(3)影响云南省小粒咖啡种植的主导环境变量依次为11月平均最高气温、7月降雨量、海拔高度、2月平均最低气温、10月降雨量、最冷月最低气温、坡度, 这7项的累计贡献率达到91.4%。

4.2 讨论

本研究共获取物种分布数据97个, 其中大部分(86个)数据由实地采样获得, 少数(11个)数据由文献查询获得, 而实地采样数据难免因为数据获取的难度, 采样点选取的合理性等原因而影响模型的准确度, 文献查询也难免由于个别样点数据不精确, 对模型的模拟结果造成影响。此外, 环境变量的合理与否也会增加模拟结果的不确定性, 本研究在参考其他学者的科研成果基础上, 选取78个环境变量构建初始预测模型, 根据初始预测结果中各环境变量的重要性, 再结合SPSS统计分析软件对相关系数较高的环境变量进行筛选, 剔除相关系数较高的环境变量中生物学意义相对较小的环境变量, 以此消除各环境变量的共线性问题, 但也难免因为模型环境变量的筛选不够准确而影响模型的准确度。同时, 本研究所使用的当前气候条件数据是1980—2000年的数据, 与当前的气候条件必然存在一定的差异, 这也会增加模型预测结果的不确定性。尽管如此, 本次模拟结果中测试集与训练集的AUC值均达到了0.941, 达到模型预测结果为极好的评判标准, 因此, 本次模拟能够很好地用于云南小粒咖啡适生区分布的预测。

本研究结果显示, 云南省小粒咖啡的适生区主要位于滇西、滇西南、滇南的德宏、保山、临沧、普洱、版纳以及怒江河谷等地区, 这些地区主要属亚热带气候区, 符合小粒咖啡的生物学特性, 也与云南省小粒咖啡的实际分布区相符。在RCP4.5、RCP8.5两种气候情景下, 云南省小粒咖啡的适生区面积均会呈现不同程度的减小, 适生区的质心位置会由海拔较低的东南方向向海拔相对较高的西北方向移动, 而Walther等(2005)、李垚等(2014)的研究结论表明气候变暖会导致物种适生区面积不同程度的减少, 同时适生区会向海拔较高的地区

移动,这与本研究结论一致。因此,未来云南小粒咖啡产业布局既要考虑到对现有咖啡种植园的合理改造,增强现有咖啡种植园抵御干旱、持续低温等气象灾害的能力,又要考虑气候变化对咖啡产业的影响,在新建咖啡种植园时合理布局、规避不利因素,总体上产业布局应逐渐向海拔更高、纬度更高的方向迁移,并在小粒咖啡选种方面挑选优质的适合云南特定气候的品种种植。同时,根据环境因子的贡献率结果(表2)可知,11月平均最高气温的贡献率最大,达到38.8%,是影响云南小粒咖啡适生区的决定性因子,这与10—12月为云南小粒咖啡的果实成熟期,需要充足的光热条件的生物学特性相吻合。因此本研究结果对云南小粒咖啡产业的合理布局具有较好的参考价值。

参考文献

- 陈积山,刘杰淋,朱瑞芬等. 2019. 基于 MaxEnt 分析我国羊草分布区的生物气候特征. 草地学报, 27(1): 35-42. Chen J S, Liu J L, Zhu R F, et al. 2019. Analysis of suitable bioclimatic characteristics of *Leymus chinensis* using Maxent model. Acta Agrestia Sinica, 27(1): 35-42 (in Chinese)
- 陈凯. 2019. 气候因子对小粒咖啡品质的影响. 保山学院学报, 38(2): 40-46. Chen K. 2019. Effect of climate factors on the quality of *Coffea arabica* L. J Baoshan Univ, 38(2): 40-46 (in Chinese)
- 丁新华,李超,王小武等. 2019. 稻水象甲在新疆的潜在分布及适生性研究. 生物安全学报, 28(2): 116-120. Ding X H, Li C, Wang X W, et al. 2019. Potential distribution and adaptability of the rice water weevil (*Lissorhoptus oryzophilus*) in Xinjiang. J Biosafety, 28(2): 116-120 (in Chinese)
- 杜超群,王起富,曾勇等. 2019. 湖北省杉木栽培区划及气候特征研究. 中南林业科技大学学报, 39(4): 5-10. Du C Q, Wang Q F, Zeng Y, et al. 2019. Study on cultivation regionalization and climate features of *Cunninghamia lanceolata* in Hubei province. J Cen South Univ For Technol, 39(4): 5-10 (in Chinese)
- 韩志慧,郝琨,刘小刚等. 2019. 荫蔽栽培与亏缺灌溉对干热区小粒咖啡生长和冠层结构的影响. 中国生态农业学报(中英文), 27(10): 1537-1545. Han Z H, Hao K, Liu X G, et al. 2019. Effects of shade cultivation and deficit irrigation on the growth and canopy structure of *Coffea arabica* L. in dry-hot region. Chinese J Eco-Agric, 27(10): 1537-1545 (in Chinese)
- 黄丕兴. 2019. 小粒种咖啡品质的影响因素及咖啡质量控制技术探讨. 农业与技术, 39(20): 119-120. Huang P X. 2019. Discussion on influencing factors and quality control technology of *Coffea arabica*. Agric Technol, 39(20): 119-120 (in Chinese)
- 姬柳婷,郑天义,陈倩等. 2020. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子. 应用生态学报, 31(1): 89-96. Ji L T, Zheng T Y, Chen Q, et al. 2020. Responses of potential suitable area of *Paris verticillata* to climate change and its dominant climate factors. Chinese J Appl Ecol, 31(1): 89-96 (in Chinese)
- 李文庆,徐润峰,史鸣明等. 2019. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测. 生态学报, 39(9): 3224-3234. Li W Q, Xu Z F, Shi M M, et al. 2019. Prediction of potential geographical distribution patterns of *Salix tetrasperma* Roxb. in Asia under different climate scenarios. Acta Ecol Sinica, 39(9): 3224-3234 (in Chinese)
- 李焱,张兴旺,方炎明. 2014. 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测. 应用生态学报, 25(12): 3381-3389. Li Y, Zhang X W, Fang Y M. 2014. Predicting the impact of global warming on the geographical distribution pattern of *Quercus variabilis* in China. Chinese J Appl Ecol, 25(12): 3381-3389 (in Chinese)
- 林正雨,陈强,邓良基等. 2019. 基于 MaxEnt 和 MCR 的四川省柑橘生产布局模拟. 中国农业资源与区划, 40(9): 64-74. Lin Z Y, Chen Q, Deng L J, et al. 2019. Simulation of citrus production layout in Sichuan province based on MaxEnt and MCR. Chinese J Agric Res Reg Plan, 40(9): 64-74 (in Chinese)
- 鲁韦坤,李湘,李蒙等. 2019. 地理因子对云南咖啡生豆品质的影响研究. 热带农业科学, 39(2): 13-19. Lu W K, Li X, Li M, et al. 2019. Effects of geographical factors on the quality of coffee beans produced in Yunnan. Chinese J Trop Agric, 39(2): 13-19 (in Chinese)
- 马关润,刘汗青,田素梅等. 2019. 云南咖啡种植区土壤养分状况及影响咖啡生豆品质的主要因素. 植物营养与肥料学报, 25(7): 1222-1229. Ma G R, Liu H Q, Tian S M, et al. 2019. Soil nutrient status in coffee plantation of Yunnan and the main factors related to quality of green coffee beans. J Plant Nutr Fert, 25(7): 1222-1229 (in Chinese)
- 沈涛,虞泓,王元忠. 2019. 滇龙胆草野生资源的地理分布与生物气候特征. 应用生态学报, 30(7): 2291-2300. Shen T, Yu H, Wang Y Z. 2019. Geographical distribution and bioclimatic characteristics of the wild *Gentiana rigescens* resources. Chinese J Appl Ecol, 30(7): 2291-2300 (in Chinese)
- 孙彩梅,罗吉,王琨等. 2019. 云南不同产地及品种小粒种咖啡豆化学及卫生指标比较. 西南农业学报, 32(11): 2550-2556. Sun C M, Luo J, Wang K, et al. 2019. Comparison of chemical and health indexes of *Coffea arabica* bean from different producing areas and varieties in Yunnan. Southwest China J Agric Sci, 32(11): 2550-2556 (in Chinese)
- 谭钰凡,左小清. 2018. 基于 GIS 与 Maxent 模型的金花茶潜在适生区与保护研究. 热带亚热带植物学报, 26(1): 24-32. Tan Y F, Zuo X Q. 2018. Studies on potential suitable growth areas and protection of *Camellia nitidissima* based on GIS and Maxent model. J Trop Subtrop Bot, 26(1): 24-32 (in Chinese)
- 王茹琳,李庆,封传红等. 2017. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 37(24): 8556-8566. Wang R L, Li Q, Feng C H, et al. 2017. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling. Acta Ecol Sinica, 37(24): 8556-8566 (in Chinese)

- 王彦兵, 王晓媛, 肖兵等. 2020. 小粒咖啡果皮总黄酮提取工艺优化及其体外抗氧化活性分析. *南方农业学报*, 51(2): 385-393. Wang Y B, Wang X Y, Xiao B, et al. 2020. Optimization of extracting total flavonoids from *Coffea arabica* peel and its antioxidant activity *in vitro*. *J South Agric*, 51(2): 385-393 (in Chinese)
- 王雨生, 王召海, 邢汉发等. 2019. 基于 MaxEnt 模型的珙桐在中国潜在适生区预测. *生态学报*, 38(4): 1230-1237. Wang Y S, Wang Z H, Xing H F, et al. 2019. Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucrata* Baill in China based on MaxEnt. *Chinese J Ecol*, 38(4): 1230-1237 (in Chinese)
- 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂等. 2020. 近百年中国气候变暖趋势之再评估. *气象学报*, 78(3): 370-378. Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, et al. 2020. Re-assessing climatic warming in China since the last century. *Acta Meteor Sinica*, 78(3): 370-378 (in Chinese)
- 叶永昌, 周广胜, 殷晓洁. 2016. 1961—2010 年内蒙古草原植被分布和生产力变化——基于 MaxEnt 模型和综合模型的模拟分析. *生态学报*, 36(15): 4718-4728. Ye Y C, Zhou G S, Yin X J. 2016. Changes in distribution and productivity of steppe vegetation in Inner Mongolia during 1961 to 2010: Analysis based on MaxEnt model and synthetic model. *Acta Ecol Sinica*, 36(15): 4718-4728 (in Chinese)
- 张丹华, 胡远满, 刘森. 2019. 基于 Maxent 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布. *应用生态学报*, 30(7): 2329-2337. Zhang D H, Hu Y M, Liu M. 2019. Potential distribution of *Spartina alterniflora* in China coastal areas based on Maxent niche model. *Chinese J Appl Ecol*, 30(7): 2329-2337 (in Chinese)
- 张明达, 王睿芳, 李艺等. 2020. 云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划. *中国生态农业学报(中英文)*, 28(2): 168-178. Zhang M D, Wang R F, Li Y, et al. 2020. Ecological suitability zoning of *Coffea arabica* L. in Yunnan province. *Chinese J Eco-Agric*, 28(2): 168-178 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 郝晓翠等. 2015. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性. *气象学报*, 73(6): 1092-1103. Zhang Q, Han L Y, Hao X C, et al. 2015. On the impact of the climate change on the Agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South. *Acta Meteor Sinica*, 73(6): 1092-1103 (in Chinese)
- 张文慧, 刘小刚, 王露等. 2019. 不同遮光和施氮水平对小粒咖啡生长和光合特性的影响. *华南农业大学学报*, 40(1): 32-39. Zhang W H, Liu X G, Wang L, et al. 2019. Effects of shading and nitrogen application levels on growth and photosynthesis characteristics of *Coffea arabica*. *J South China Agric Univ*, 40(1): 32-39 (in Chinese)
- 张文秀, 寇一翮, 张丽等. 2020. 采用生态位模拟预测濒危植物白豆杉 5 个时期的适宜分布区. *生态学杂志*, 39(2): 600-613. Zhang W X, Kou Y X, Zhang L, et al. 2020. Suitable distribution of endangered species *Pseudotsuga chienii* (Cheng) Cheng (Taxaceae) in five periods using niche modeling. *Chinese J Ecol*, 39(2): 600-613 (in Chinese)
- 章宇阳, 刘小刚, 余宁等. 2020. 不同遮荫条件下施肥量对西南干热区小粒咖啡产量和肥料利用的影响. *应用生态学报*, 31(2): 515-523. Zhang Y Y, Liu X G, Yu N, et al. 2020. Effects of fertilizer application on yield and fertilizer utilization of *Coffea arabica* in southwest dry-hot region of China under different shading levels. *Chinese J Appl Ecol*, 31(2): 515-523 (in Chinese)
- 赵明珠, 郭铁英, 马关润等. 2020. 土壤因子与小粒咖啡品质产量形成关系研究. *热带作物学报*, 41(6): 1065-1075. Zhao M Z, Guo T Y, Ma G R, et al. 2020. Relationship between soil factors, quality and yield formation in *Coffea arabica*. *Chinese J Trop Crops*, 41(6): 1065-1075 (in Chinese)
- Bai D F, Chen P J, Atzeni L, et al. 2018. Assessment of habitat suitability of the snow leopard (*Panthera uncia*) in Qomolangma national nature reserve based on MaxEnt modeling. *Zool Res*, 39(6): 373-386
- Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int J Climatol*, 25(15): 1965-1978
- Kalboussi M, Achour H. 2018. Modelling the spatial distribution of snake species in northwestern Tunisia using maximum entropy (Maxent) and Geographic Information System (GIS). *J For Res*, 29(1): 233-245
- Sanchez A C, Osborne P E, Haq N, et al. 2010. Identifying the global potential for baobab tree cultivation using ecological niche modelling. *Agroforest Syst*, 80(2): 191-201
- Tang C Q, Matsui T, Ohashi H, et al. 2018. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia. *Nat Commun*, 9(1): 4488
- Walther G R, Berger S, Sykes M T. 2005. An ecological 'footprint' of climate change. *Proc Roy Soc B Biol Sci*, 272(1571): 1427-1432
- Wang Z L, Zhang B, Zhang X Z, et al. 2019. Using MaxEnt model to guide marsh conservation in the Nenjiang River Basin, Northeast China. *Chinese Geogr Sci*, 29(6): 962-973