

基于 MaxEnt 模型的小粒种咖啡广西适宜性区划和种植空间潜力预测

郝小玲¹, 宾振钧^{1*}, 宾哲源², 岑庆静¹, 石兰蓉¹, 宁诗琪¹, 陆祖正¹, 杨贵兵¹, 李 锐⁵, 覃剑峰¹, 陈赶林^{1,3,4**}

1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001; 2. 广西壮族自治区水果技术指导站, 广西南宁 530022; 3. 农业农村部亚热带果蔬质量安全控制重点实验室, 广西南宁 530001; 4. 广西亚热带特色水果质量安全控制重点实验室, 广西南宁 530001; 5. 广西鲜友食品科技有限公司, 广西百色 531508

摘 要: 小粒种咖啡 (*Coffea arabica*) 广西生态适宜性区划研究对于精准有效利用生态环境资源, 指导科学选址种植和合理生产布局规划具有重要参考意义。基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对广西 58 个小粒种咖啡样本点分布数据和 15 个环境变量建模, 筛选影响小粒种咖啡在广西分布的主要环境因素, 预测当前和未来气候条件下广西小粒种咖啡的潜在适宜性区划和种植空间潜力。结果表明: 模型预测结果具有较高一致性与可靠性, 受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 为 0.937, Kappa 系数为 61.6%, 真正技能统计量 (TSS) 为 0.738。气候限制因子 (降水季节性变异系数、等温性、最冷季度的降水量、最冷季度的平均温度、最冷月份的最低温度) 对广西小粒种咖啡生态适宜性区划起决定性作用。当前时期, 桂西南是广西小粒种咖啡高适宜区的核心集中地, 也是中适宜区、低适宜区的重要分布区域。地 (市) 级水平适宜区总面积排序前五的是百色 (占 46.20%)、崇左 (占 21.97%)、防城港 (占 8.26%)、南宁 (占 7.33%) 和玉林 (占 6.46%), 县 (区) 级水平高适宜区面积排序前五的是靖西 (149.58 km²)、西林 (109.77 km²)、那坡 (62.94 km²)、德保 (50.78 km²) 和上思 (47.31 km²)。未来不同气候条件下, 随着时间推移, 总适生区面积呈逐渐增加趋势, 适生环境从西南优势区向东北潜力区逐步扩增, 适生区质心从广西西南部 (百色、崇左、防城港等地) 向东北部方向 (南宁及桂中、桂东区域) 转移。

关键词: 广西; 小粒种咖啡; MaxEnt; 适宜性区划

中图分类号: S571.2 文献标志码: A

MaxEnt-based Ecological Suitability Regionalization and Cultivation Spatial Potential Prediction of *Coffea arabica* in Guangxi, China

HAO Xiaoling¹, BIN Zhenjun^{1*}, BIN Zheyuan², CEN Qingjing¹, SHI Lanrong¹, NING Shiqi¹, LU Zuzheng¹, YANG Guibing¹, LI Gao⁵, QIN Jianfeng¹, CHEN Ganlin^{1,3,4**}

1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. Guangxi Fruits Technology Guidance Institution, Nanning, Guangxi 530022, China; 3. Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning, Guangxi 530001, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruits, Nanning, Guangxi 530001, China; 5. Guangxi Xianyou Food Technology Co., Ltd., Baise, Guangxi 531508, China

Abstract: The study on the ecological suitability regionalization for *Coffea arabica* in Guangxi is of great reference significance for accurate and effective utilization of ecological and environmental resources, guiding scientific site se-

收稿日期 2025-11-20; 接受日期 2025-12-30

基金项目 广西重点研发计划项目 (桂科农 AB2506910046); 广西壮族自治区农业科学院基本科研业务费与科技发展基金项目 (No. 2025YP131, No. 2026YT018)。

作者简介 郝小玲 (1988—), 女, 硕士, 高级实验师, 研究方向: 热带作物育种与栽培; *同等贡献作者: 宾振钧 (1987—) 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热带作物育种与栽培。**通信作者 (Corresponding author): 陈赶林 (CHEN Ganlin), E-mail: ganlin-chen@163.com。

lection for planting and rational production layout planning. The MaxEnt model and ArcGIS software were used for the modeling of 58 distribution points of *C. arabica* in Guangxi and 15 environmental factors, and for the prediction of the ecological suitability regionalization and spatial potential prediction in current and future climate scenario. The model's prediction results had high consistency and reliability, with the AUC of 0.937, the Kappa coefficient of 61.6%, and TSS of 0.738. Climatic limiting factors (coefficient of variation of precipitation seasonality, isothermality, precipitation of coldest quarter, mean temperature of coldest quarter, min temperature of coldest month) played a decisive role in the ecological suitability regionalization of *C. arabica* in Guangxi. The southwest of Guangxi was the core concentration area for highly suitable area, and important distribution area for moderately and lowly suitable area in current. The top five of total suitable areas, in descending order, were Baise (46.20%), Chongzuo (21.97%), Fangchenggang (8.26%), Nanning (7.33%) and Yulin (6.46%) in the prefecture-level scale. The top five of highly suitable areas, in descending order, were Jingxi (149.58 km²), Xilin (109.77 km²), Napo (62.94 km²), Debao (50.78 km²) and Shangsi (47.31 km²) in the county scale. In the future climate scenario, the total suitable area showed an increasing trend, particularly suitable habitat expanding gradually from the southwest dominant suitable area toward the northeast potential area, with the core distribution areas shifting from the southwest area of Guangxi (Baise, Chongzuo, Fangchenggang and other regions) toward the northeast (Nanning area together with the central and eastern area of Guangxi).

Keywords: Guangxi; *Coffea arabica*; MaxEnt; suitable habitat

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.023

咖啡是茜草科咖啡属多年生常绿灌木或小乔木, 据 2021 年英国邱园 (The Royal Botanic Gardens, Kew) 发表的研究报告, 至今已获确认的咖啡属植物有 130 种, 其中生产性栽培种有小粒种咖啡 (*Coffea arabica* L.)、中粒种咖啡 (*C. canephora* Pierre ex A. Froehner) 和大粒种咖啡 (*C. liberica* Bull.)。咖啡的品种直接影响咖啡豆的整体品质^[1], 小粒种咖啡凭借独特的风味前体物质 (高蔗糖、均衡有机酸等)、较低含量的苦味物质 (咖啡因、绿原酸、奎宁酸等) 及优质的功能性成分组合, 形成了丰富、细腻、层次饱满的口感, 长期受到全球咖啡市场和消费者的广泛关注。近年来, 低咖啡因咖啡在饮品、食品等多个品类中兴起, 筛选耐碱生物菌株, 培育协同降解咖啡因的微生物群落, 可为开发高品质低咖啡因咖啡提供依据^[2]。据国际咖啡组织 (ICO) 统计数据, 2024 年全球咖啡总种植面积为 1590 万 hm², 其中小粒种咖啡种植面积为 1168 万 hm², 占 73.5%; 我国咖啡种植面积为 8.13 万 hm² (收获面积居全球第 32 位), 其中云南省的咖啡面积占 97.85%, 以小粒种咖啡为主^[3]。小粒种咖啡原是热带雨林植物, 在冬暖夏凉的中亚热带和南亚热带地区最适宜种植^[4]。随着气候变化的日益加剧, 全球高温干旱、霜冻寒害等极端气候发生频率大增, 导致作物适宜区分布有所改变。有预测报道, 南美洲、东非、中非和亚洲的咖啡种植适宜区域将增加, 咖啡的生态适宜区域转移到更高的海拔, 高纬度地区受气温上升和降雨模式变化的影响可能

较小^[5-7]。瑞士苏黎世应用科技大学 (Zurich University of Applied Sciences) 2022 年的一项研究指出, 数十年后中国云南、广西、广东、福建等地的咖啡种植适宜区将呈增加趋势, 或将成为全球咖啡主产区。广西兼具热带季风气候优势与山地温差特征, 地处南亚热带与北热带区的桂西南、桂南以及桂东南的丘陵河谷地带, 山地及喀斯特地貌明显, 立体气候特征鲜明, 雨热同期、气候温凉、昼夜温差适中, 其中靖西、那坡、德保处于南亚热带高原山地气候区, 是最适宜小粒种咖啡生长的地区。广西咖啡产业的历史可追溯至 20 世纪初期, 20 世纪 50 年代, 广西正式将咖啡作为经济作物进行规模化种植, 并在百色市成立首个专业化咖啡农场 (阳墟咖啡农场, 今阳圩农场), 1957 年全区咖啡种植面积达 296.4 hm², 奠定了广西咖啡产业的基础。百色市西林县凭借海拔 650~850 m、年均温 18~22 °C 的优越条件, 种植的咖啡品质突出, 杯测评分达 80 分以上, 为精品级^[8]。1973 年起, 广西壮族自治区亚热带作物研究所多次从云南、海南等地引入 24 份咖啡种质资源进行栽培观测^[9], 已建成咖啡种质资源圃及咖啡种苗繁育研究基地, 在西林、靖西、德保、那坡、东兴等地建立 7 个咖啡种植试验示范基地, 并辐射带动周边区域试点种植, 以卡蒂姆系列和萨奇姆系列为核心推广品种, 广西咖啡种植面积呈逐年稳步增长态势。

我国广西热区部分区域的地理特征, 与小粒种咖啡起源地 (东非埃塞俄比亚高原西南部)、

全球主要生产国家以及我国云南主要咖啡产区在气候、地形、土壤等核心环境变量方面相似，因此具备种植小粒种咖啡的自然承载潜力。目前，广西咖啡种植面积仅 200 余公顷，除西林、靖西、德保、那坡、东兴等地已形成较大规模种植基地外，其余适宜种植区域仍以零星种植为主，开发潜力巨大。当前，广西咖啡产业面临“起步晚、布局散、技术弱”三重制约，且宜植区规划尚未明确。利用 GIS、Biomod、Bioclim、ENFA、Garp 和 MaxEnt 等生态位模型，研究物种分布模式与气候、地形和土壤等环境变量之间的关系^[10-13]以及对不同气候变化情景下的物种分布模式进行预测^[14-18]，已成为研究热点。在这些模型中，MaxEnt 模型因其预测准确性高、能够处理较小样本量以及在预测物种潜在分布范围方面的广泛适用性而脱颖而出。国内外关于小粒种咖啡种植适宜性的研究主要集中在全球主产区^[19-21]，国内已有学者利用 MaxEnt 模型对气候变化背景下小粒种咖啡在云南的适宜性区划进行了研究^[22]。而小粒种咖啡在广西的适宜性区划尚无报道。本研究旨在利用 MaxEnt 模型，筛选影响小粒种咖啡在广西种植分布的关键因子及阈值范围，预测气候变化背景下小粒种咖啡在广西的分布模式，明确不同区域对小粒种咖啡种植的适宜程度，量化广西小粒种咖啡的种植空间潜力，为咖啡种植者和相关产业决策者提供科学的数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西壮族自治区（以下简称“广西”）位于我国南部（ $20^{\circ}54' \sim 26^{\circ}23'N$, $104^{\circ}26' \sim 112^{\circ}03'E$ ），土地面积为 23.76 万 km^2 。地形以“广西盆地”为核心，西北高东南低，山地占 62.05%，丘陵、平原、台地分别占 14.49%、14.33%、9.13%，低海拔山地、丘陵、台地广泛分布，山系多呈弧形。海拔为 500 m 以下的区域占全区总面积的 56.50%，海拔为 500~1000 m 的区域占 33.40%，海拔在 1000 m 以上的区域仅占 10.10%^[23]。

全区气候差异显著，主要表现在热量特征方面，自北向南分为中亚热带、南亚热带、北热带等 3 个气候带。桂东南、桂南、桂西南处于南亚热带气候区（南亚热带北界经梧州北、平南北、武宣、宾阳、上林、马山、都安、巴马至田林一线），沿海处于沿海北热带气候区（包括东兴市、北海市区、

合浦县山口镇、沙田镇等地）。靖西、那坡、德保因海拔较高（636~795 m）、积温低于 $6900^{\circ}C$ ，视为南亚热带高原山地气候。积温 $6900^{\circ}C$ 等值线大致对应广西南亚热带、热带水果和经济作物的经济生产北界^[24]。年降雨量为 1000~2800 mm，5—9 月雨季的降水量占全年的 75.00%，雨热同季、光照充足。但季风失常易引发旱涝、“两寒”、台风等灾害，导致桂西春旱和桂东秋旱频发。

广西土壤类型丰富，其中红壤、赤红壤、黄壤等主要土壤类型占比超过 80%，整体偏酸性。不同类型土壤肥力差异极大，表层土壤有机质平均含量为 3.11%^[25]，而桂南、桂东平原及岩溶区的土壤有机质含量偏低（1%~2%）。

1.2 方法

1.2.1 样点数据收集 本研究中小粒种咖啡在广西的分布点信息来自课题组实地调研走访，共获得 65 个样点，剔除种植年限不足 3 a 的样点，将样本点经纬度数据转换为 .csv 格式，使用 ArcGIS10.2 软件，删除同一个栅格内的重复点，最终获得 58 个有效样点，并在广西地图上绘制小粒种咖啡分布图（图 1）。因种植水平等原因，样点的小粒种咖啡生长状况、产量和品质参差不齐。

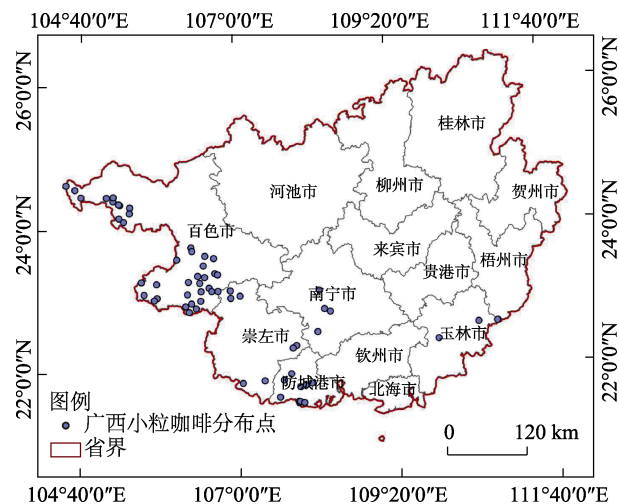


图 1 广西小粒种咖啡样点分布图
Fig. 1 Distribution map of *C. arabica* sample location in Guangxi

1.2.2 环境变量数据获取与筛选 小粒种咖啡种植主要集中在赤道附近的热带地区。本研究选择 25 个对生物分布或生态过程具有重要意义的环境变量，如气候、地形、土壤因素，当前（current）、2030s（2021—2040 年）、2050s（2041—2060 年）的 19 个环境气候因子与 3 个地形因子数据来源于

全球气候数据库 WorldClim 2.1 (<http://www.worldclim.org>, 空间分辨率 2.5'), 3 个土壤因子数据采用时空三极环境大数据平台(<http://poles.tpc.ac.cn>) 发布的中国土壤有机质数据集(空间分辨率 30"), 未来生物气候数据来自第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的 BCC-CSM2-MR 气候模型, 该模型结合共享社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCPs)^[26], 选择 SSP1-RCP2.6 (SSP126)、SSP2-RCP4.5 (SSP245) 和 SSP5-RCP8.5 (SSP585) 3 种不同浓度排放情景进行模拟, 未来气候变量空间分辨率为 2.5'。

使用 ArcGIS10.6 软件对环境变量进行预处理, 地图矢量数据来源于中国国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>), 下载其 1:25 万中国行政区划矢量图作为数据分析的底图, 对原始变量进行研究区裁剪, 采用双线性插值法对裁剪后的所有气候变量进行重采样(空间分辨率为 30"), 随机选取若干样点, 核对重采样后气候数据与原始数据的数值偏差, 偏差 $\leq 5\%$ 。将所有环境因素数据转化为 ASCII 格式便于模型分析, 经纬度采用 WGS84 坐标系。

将 58 个有效样点数据和 25 个环境变量输入 MaxEnt 模型(3.4.4 版本)预测分布区, 考虑变量之间的共线性以避免过拟合, 借助 R 语言 MaxentVariableSelection 包进行 Pearson 相关性分析, 剔除相关系数 $|r|>0.8$ 的高度冗余变量, 筛选出 15 个环境变量作为本研究的最终建模变量参数, 并利用 R 软件绘制环境因子相关性热图。

1.2.3 模型参数优化和评估 根据相关研究, 模型复杂性和特征组合(FC)与正则化参数(RM)显著相关^[27]。为进一步提高预测精准度, 本研究通过控制变量法, 迭代调整特征组合与正则化参数, 以确定最优模型构建参数组合。使用 R 语言 4.3.3 中的 Kuenm 包, 设置 RM 值为 0~4, 以 0.5 为增量进行参数组合优化。根据 AICc 值最小原则, 筛选最优参数组合并构建最终模型, 该模型具有统计学意义, 且遗漏率(OR)低于 5%^[28]。

综合运用受试者工作特征(ROC)曲线^[15]、Kappa 系数及真正技能统计量(TSS)3 项指标, 对优化后模型的预测性能进行综合评估, 以验证模型有效性, 其中, $AUC \geq 0.8$, 表明模型预测效果良好; $Kappa \geq 0.6$ 且 $TSS \geq 0.5$, 表明模型预测结果具有较高一致性与可靠性。基本参数设置中, 随机选择样点的 25%作为测试数据, 75%作为训

练数据, 模型重复运行 10 次。

为了精确划分分布区域, 使用 ArcMap 10.5 中的詹克斯自然断点法, 将研究区域划分为高、中、低适宜性及其他区域四类^[29]。

2 结果与分析

2.1 模型优化和准确性评估

使用优化后的 MaxEnt 模型, 选择广西小粒种咖啡 58 个分布点和 15 个环境变量层, 根据最小信息准则(AICc), 对当前和未来气候情景下潜在分布区进行 MaxEnt 模拟, 最优模型参数、平均遗漏率和预测面积(OPA 曲线)如图 2~图 4 所示, 特征组合(FC)选择 LQH、RM 为 2.5 时, 遗漏率(OR)为 1.8%, AICc 最小。表明该特定参数组合的预测准确性较高。模拟结果的受试者工作特征曲线下面积(AUC)为 0.937, 总体分类精度为 78.5%, Kappa 系数为 61.6%, 真正技能统计量(TSS)为 0.738, 表明模型预测结果具有较高一致性与可靠性。

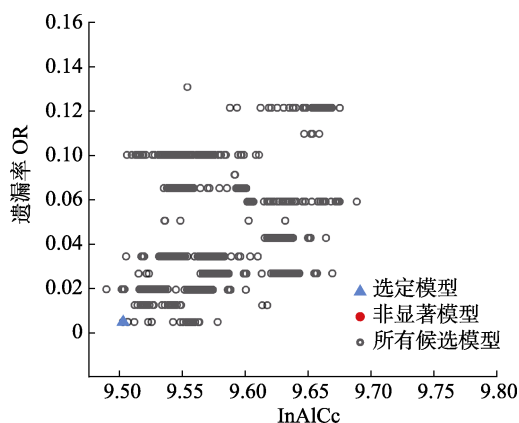


图 2 最优模型参数组合选择

Fig. 2 Optimal model parameter combination selection

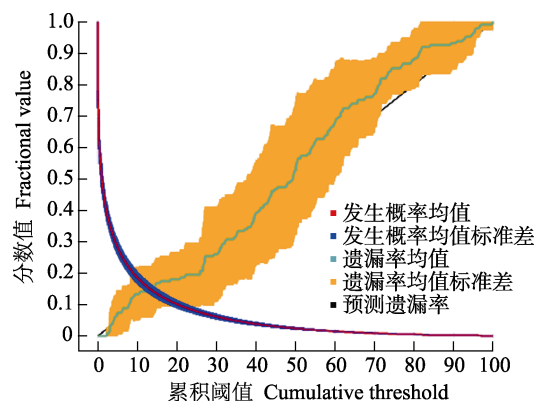


图 3 MaxEnt 模型对广西小粒种咖啡预测结果的 OPA 曲线

Fig. 3 OPA plot of Maxent model's predictions for *C. arabica* in Guangxi

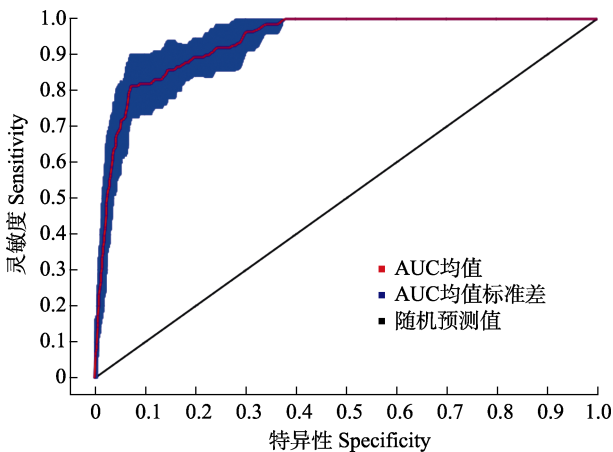


图 4 MaxEnt 模型对广西小粒种咖啡预测结果的 ROC 曲线

Fig. 4 ROC plot of Maxent model's predictions for *C. arabica* in Guangxi

2.2 广西小粒种咖啡潜在生境分布的主要环境变量

对 25 个环境因子进行相关性分析,根据相关性检验结果和预实验结果,剔除相关系数 $|r|>0.8$ 的高度冗余变量,最终筛选出 15 个环境因子用于建模(图 5、表 1)。

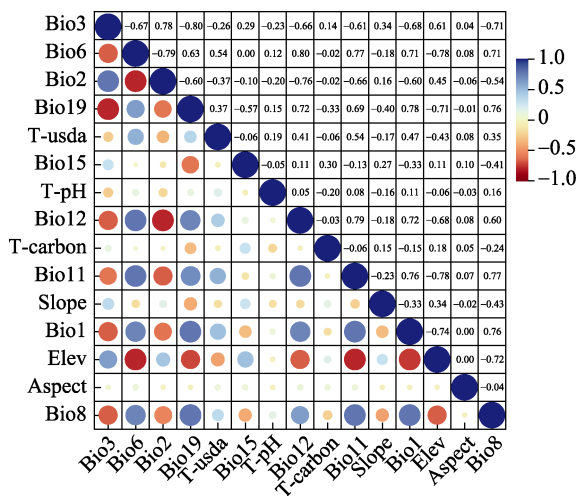


图 5 环境变量 Pearson 检验相关分析

Fig. 5 Pearson test correlation analysis of environmental variables

贡献率(PC)和置换重要性(PI)是用于评估环境变量重要性的关键指标,较高的指标值表明所评估的环境变量更为重要^[25]。Maxent 模型内部算法及刀切法检验表明,对预测模型构建贡献率排名前五的变量为降水季节性变异系数(Bio15, 54.7%)、等温性(Bio3, 12.0%)、坡向(Aspect, 6.8%)、土壤酸碱度(T-pH, 5.3%)、最冷季度

的平均温度(Bio11, 4.5%),累计 83.3%。置换重要性排名前五的变量为 Bio15 (38.0%)、Bio3 (20.8%)、Bio11 (12.9%)、Aspect (8.5%)、土壤质地分类(T-usda, 3.4%),累计 83.6%(表 1)。

结合 PC、PI 值和 Jacknife 测试结果(图 6),对环境变量的综合分析表明, Bio15 (降水季节性)、Bio3 (等温性)、Bio19 (最冷季度的降水量)、Bio11 (最冷季度的平均温度)、Bio6 (最冷月份的最低温度)是影响小粒种咖啡在广西分布的主要因素。

2.3 广西小粒种咖啡潜在分布对主要环境变量单因子的响应

物种响应曲线展示了物种对环境变量的耐受性和生境偏好选择,反映了环境因素与物种出现可能性之间的关系。为了更准确地描述不同环境变量对小粒种咖啡自然分布的影响,将具有显著贡献率的变量降水季节性变异系数(Bio15)、等温性(Bio3)、最冷季度降水量(Bio19)、最冷季度平均温度(Bio11)和最冷月份的最低温度(Bio6)分别进行单因素建模分析。结果表明,基于优化后的 MaxEnt 模型生成的响应曲线,降水季节性变异系数(Bio15)范围为 50%~97%, Bio15 在 86%~97%范围内,物种存在概率稳定在 0.7, 83%~97%是小粒种咖啡分布适宜(出现概率 0.5 以上)的降水季节性变异系数范围(图 7A)。

表 1 环境数据贡献率及置换重要率

Tab. 1 Contribution rate and replacement importance rate of environmental data

代码 Code	环境变量 Environmental variables	贡献率 PC/%	置换重要性 PI/%
Bio1	年平均温度	1.0	2.4
Bio2	平均昼夜范围(每月平均值)	2.3	1.5
Bio3	等温性(Bio2/Bio7)	12.0	20.8
Bio6	最冷月份的最低温度	2.9	1.0
Bio8	最潮湿季度的平均温度	0	0.6
Bio11	最冷季度的平均温度	4.5	12.9
Bio12	年降水量	1.0	1.5
Bio15	降水季节性变异系数	54.7	38.0
Bio19	最冷季度的降水量	3.3	0.8
Aspect	坡向	6.8	8.5
Elev	海拔	3.6	2.6
Slope	坡度	1.2	3.1
T-pH	土壤酸碱度(pH)	5.3	1.6
T-usda	土壤质地分类	1.0	3.4
T-carbon	土壤碳氮比	0.3	1.3

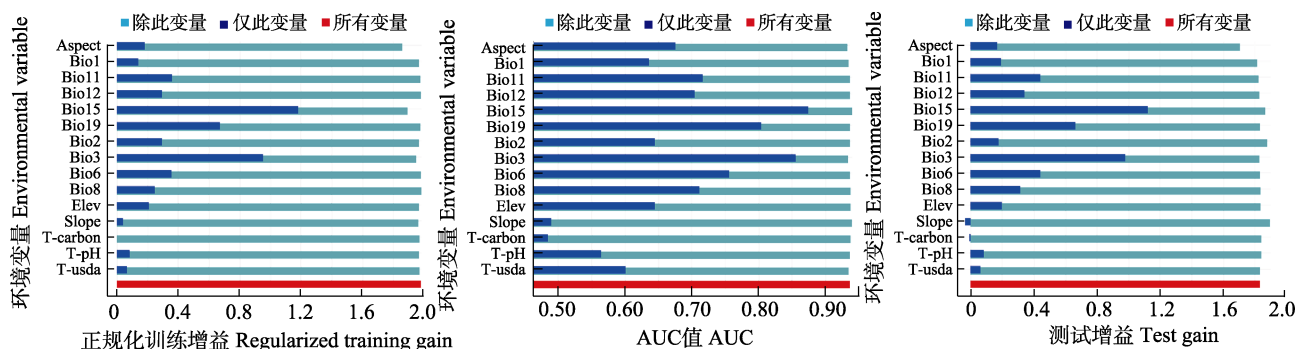


图 6 环境变量的 Jackknife 测试

Fig. 6 Jackknife test of environmental variables

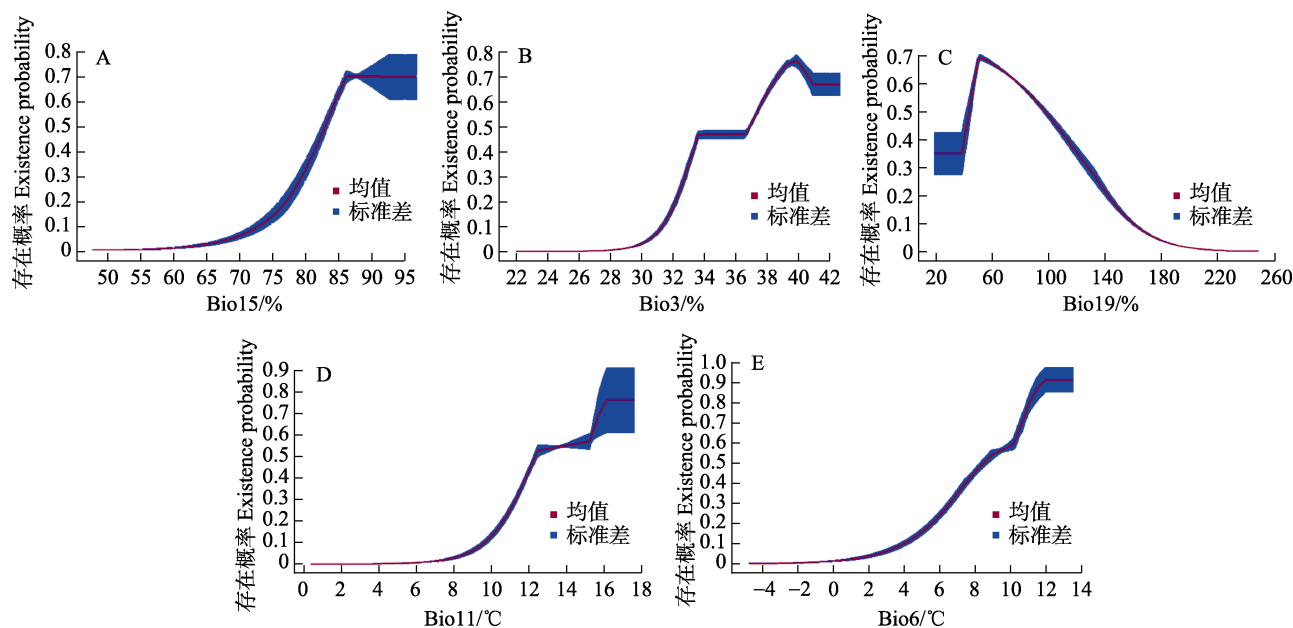


图 7 小粒种咖啡 MaxEnt 模型中关键环境因子响应曲线

Fig. 7 Response curves for important environmental predictors in MaxEnt model for *C. arabica*

等温性 (Bio3) 系数范围为 22%~43%，当处于最佳值 39.8% 时，出现概率为 0.85；在 39.8%~40.8% 范围内，出现概率降低；Bio3 为 40.8%~43%，概率稳定在 0.75；Bio3 为 33.5%~36.8%，概率稳定在 0.525；33.5%~43% 是广西小粒种咖啡分布适宜 (出现概率 0.5 以上) 的等温性系数范围 (图 7B)。最冷季度的降水量 (Bio19) 范围为 20~250 mm，最佳值约为 45 mm 时，出现概率为 0.69，43~95 mm 是广西小粒种咖啡分布适宜 (出现概率 0.5 以上) 的最冷季度的降水量范围 (图 7C)。最冷季度的平均温度 (Bio11) 范围为 0.5~17.6 °C，在 12.5~15.6 °C 范围内，概率为 0.52~0.56，16.1~17.6 °C 范围内，概率稳定在 0.77，12.5~17.6 °C 是广西小粒种咖啡分布适宜 (出现概率 0.5 以上) 的最冷季度平均温度范围

(图 7D)。最冷月份的最低温度 (Bio6) 范围为 -5.0~13.5 °C，12.0~13.5 °C 范围内，概率稳定在 0.9，8.5~13.5 °C 是广西小粒种咖啡分布适宜 (出现概率 0.5 以上) 的最低温度范围 (图 7E)。

2.4 当前时期广西小粒种咖啡适宜性区划及其面积

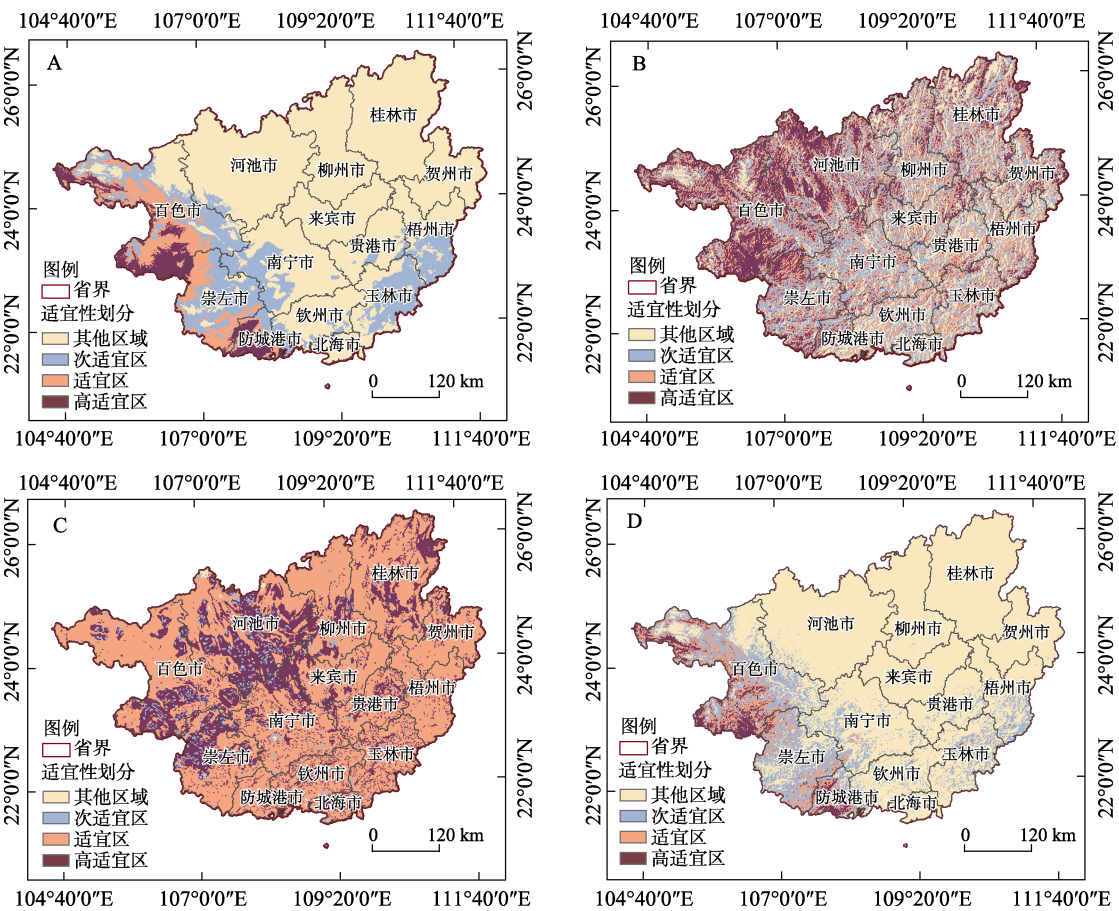
2.4.1 当前时期广西小粒种咖啡气候、地形、土壤及生态综合适宜性区划 基于 MaxEnt 模型的预测结果，采用等间距法对广西小粒种咖啡的气候、地形、土壤及生态综合因素进行适宜性区划 (图 8)。从气候适宜性区划结果来看，广西小粒种咖啡高适宜区核心集中在百色市的南部地区、西北地区以及右江河谷区域，防城港市的上思县、防城区，以及东兴市等部分区域，崇左市的宁明县等部分区域也有分布；中适宜区主要集

中在桂西南的百色市中部、崇左市西北部和南部以及防城港市部分地区；低适宜区主要集中在桂西南，同时在桂中、桂东等地也有分布。整体而言，桂西南是高适宜区的核心集中地，也是中适宜区、低适宜区的重要分布区域（图 8A）。

从地形地貌适宜性区划结果来看，高适宜区主要集中在广西百色市和河池市部分区域，中、低适宜区则广泛分布于桂中、桂南及桂东的部分区域，如南宁、钦州、玉林等地的部分县（区）也有覆盖。整体来看，适宜性区域的分布更偏向桂西（图 8B）。

从土壤理化性质适宜性区划结果来看，高适宜区主要集中在广西百色市和河池市部分区域（图 8C）。

基于气候、地形地貌和土壤理化性质 3 个层次环境因子，构建生态适宜性模型，并划分适宜性区划（图 8D）。高适宜区主要集中在南亚热带高原山地气候区，包括百色市的南部地区（靖西县、德保县、那坡县）、西北地区（西林县、隆林县）以及右江区、田阳区、田东县等右江河谷区域，防城港市的上思县、防城区、东兴市等部分区域，崇左市的天等县、宁明县、大新县等部分区域；中适宜区主要是高适宜区的延展，南宁市、钦州市、玉林市、梧州市等少数地区有分布；低适宜区主要是高、中适宜区的延展，南宁市、玉林市、梧州市、钦州市部分地区落在低适宜区，此外，河池市、贵港市、北海市有零星分布。



A: 气候; B: 地形; C: 土壤; D: 生态。
A: Climate; B: Terrain; C: Soil; D: Ecology.
图 8 广西小粒种咖啡适宜性区划
Fig. 8 Suitability regionalization of *C. arabica* in Guangxi

2.4.2 当前环境条件下广西小粒种咖啡地（市）级潜在分布及面积 基于 MaxEnt 模型的预测结果，采用等间距法对广西小粒种咖啡的生态适宜性面积进行统计分析。结果表明，当前（1970—

2000 年）环境条件下，广西小粒种咖啡的总适生区面积为 50 316.09 km²，占预测总面积（含不适宜区）的 24.15%，其中，高适宜区面积为 6403.65 km²，占预测总面积的 3.07%；中适宜区

围绕高适生区向四周扩散,面积为 13 494.36 km²,占预测总面积的 6.48%;低适宜区面积为 30 418.08 km²,占预测总面积的 14.60%(表 2)。

高适宜区涉及 38 个县(区)部分区域,百色市分布区(4776.13 km²)占高适生区总面积的 74.58%,主要集中在靖西市(149.58 km²)、西林县(109.77 km²)、那坡县(62.94 km²)、德保县(50.78 km²)以及田阳区、右江区、田林县等地;防城港市分布区(1153.70 km²)占高适生区总面积的 18.02%,主要集中在上思县(47.31 km²)、防城区(47.28 km²)、东兴市(20.56 km²)等地;此外崇左市的天等县、宁明县等地有少量

分布,玉林市的玉州区、江州区、北流市、博白县等地有少量分布(表 3)。

中适宜区的分布相对广泛,涉及 58 个县(区)部分区域,百色市分布区(8152.57 km²)占中适生区总面积的 60.41%,主要集中在田林县(172.96 km²)、右江区(115.91 km²)、德保县(111.72 km²)、靖西市(104.78 km²)、西林县(92.09 km²)等地;崇左市分布区(3111.34 km²)占中适生区总面积的 23.06%,主要集中在宁明县(96.84 km²)、天等县(72.60 km²)等地;防城港市分布区(1296.56 km²)占中适生区总面积的 9.61%,主要集中在上思县(66.18km²)、防城区

表 2 当前和未来环境条件下广西小粒种咖啡适宜区面积
Tab. 2 Suitable habitat area of *C. arabica* in Guangxi in current and future environment conditions

情景 Scenario	时期 Period	高适宜区 Highly suitable area		中适宜区 Moderately suitable area		低适宜区 Lowly suitable area		总适宜区 Total suitable area	
		面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
当前	1970—2000	6403.65	3.07	13 494.36	6.48	30 418.08	14.60	50 316.09	24.15
SSP126	2021—2040	23 731.98	11.39	21 025.05	10.09	39 505.58	18.97	84 262.61	40.45
	2041—2060	20 704.75	9.94	24 253.11	11.64	49 188.37	23.62	94 146.23	45.20
SSP245	2021—2040	33 931.05	16.29	23 251.93	11.16	36 029.84	17.30	93 212.82	44.75
	2041—2060	36 146.43	17.35	36 834.36	17.69	47 967.98	23.03	120 948.77	58.07
SSP585	2021—2040	19 117.16	9.18	17 682.40	8.49	30 931.80	14.85	67 731.36	32.52
	2041—2060	32 284.67	15.50	24 398.81	11.71	43 541.10	20.91	100 224.58	48.12

表 3 当前环境条件下广西小粒种咖啡适宜区地(市)级水平的分布面积
Tab. 3 Suitable habitat area of *C. arabica* in Guangxi on the prefecture-level city scale in current environment conditions

地区 Region	高适宜区 Highly suitable area		中适宜区 Moderately suitable area		低适宜区 Lowly suitable area		总适宜区 Total suitable area	
	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
百色市	4776.13	74.58	8152.57	60.41	10 317.19	33.92	23 245.89	46.20
崇左市	420.98	6.57	3111.34	23.06	7522.34	24.73	11 054.66	21.97
防城港市	1153.70	18.02	1296.56	9.61	1703.77	5.60	4154.03	8.26
河池市	2.08	0.03	22.06	0.16	504.50	1.66	528.65	1.05
南宁市	14.65	0.23	371.39	2.75	3300.45	10.85	3686.49	7.33
钦州市	6.25	0.10	44.61	0.33	1251.63	4.11	1302.48	2.59
梧州市	4.17	0.07	98.93	0.73	1993.26	6.55	2096.36	4.17
玉林市	25.69	0.40	381.25	2.83	2844.63	9.35	3251.57	6.46
北海市	0.00	0.00	1.39	0.01	136.03	0.45	137.42	0.27
贵港市	0.00	0.00	14.26	0.11	759.20	2.50	773.46	1.54
桂林市	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.01	2.08	0.00
贺州市	0.00	0.00	0.00	0.00	15.25	0.05	15.25	0.03
来宾市	0.00	0.00	0.00	0.00	42.05	0.14	42.05	0.08
柳州市	0.00	0.00	0.00	0.00	25.69	0.08	25.69	0.05
总计	6403.65	100	13494.36	100	30 418.08	100	50316.09	100

(52.79 km²)、扶绥县(49.15 km²)；此外，玉林市的江州区、北流市、容县有少量分布，南宁市的江南区、武鸣区有少量分布(表 3)。

低适宜区的分布广泛，涉及 87 个县(区)部分区域，百色市分布区(10 317.19 km²)占低适生区总面积的 33.92%，主要集中在田林县(222.24 km²)、右江区(166.98 km²)等地；崇左市分布区(7522.34 km²)占低适生区总面积的 24.73%，主要集中在宁明县(160.56 km²)、大新县(131.35 km²)等地；南宁市分布区(3300.45 km²)占低适生区总面积的 10.85%；此外，玉林市(2844.63 km²)、梧州市(1993.26 km²)、防城港市(1703.77 km²)、钦州市(1251.63 km²)、贵港市(759.20 km²)、河池市(504.50 km²)、北海市(136.03 km²)等地有分布(表 3)。

2.5 未来环境条件下广西小粒种咖啡适宜性区划

2.5.1 SSP126 情景下未来广西小粒种咖啡适宜性区划变化 结果表明，在 SSP126 情景下，2021—2040 年广西小粒种咖啡总适宜区占比升至 40.45%(表 2)，高适宜区占比从 3.07%升至 11.39%，中、低适宜区占比也明显提升，适宜区等级结构向“高、中适宜区扩容”转变。在 2041—2060 年总适宜区占比进一步升至 45.20%，但高适宜区占比降至 9.94%，中适宜区占比升至 11.64%，低适宜区占比持续增长(23.62%)，整体呈现“中、低适宜区主导，高适宜区小幅回落”的特点。整体表现在高适宜区新增百色市的那坡县、凌云县、乐业县等部分区域，中适宜区新增百色市田林县、西林县，南宁市武鸣区、隆安县，崇左市大新县、天等县等部分区域(图 9)。

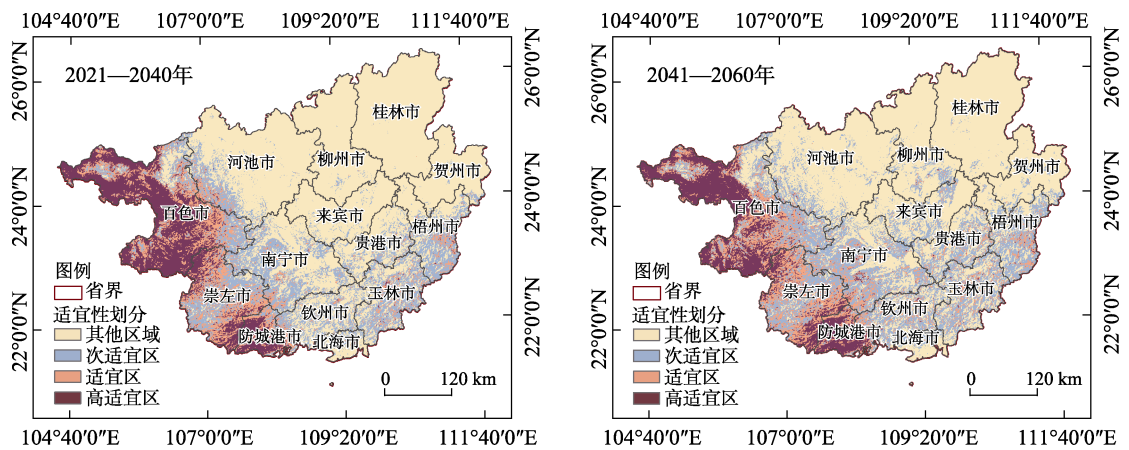


图 9 SSP126 情景下未来广西小粒种咖啡生态适宜区分布
Fig. 9 Distribution of ecological suitable areas of *C. arabica* in Guangxi under SSP126 scenario

2.5.2 SSP245 情景下未来广西小粒种咖啡适宜性区划变化 结果表明，在 SSP245 情景下，2021—2040 年总适宜区占比为 44.75%(表 2)，高适宜区占比(16.29%)为各情景同期最高，中适宜区占比为 11.16%，低适宜区占比为 17.30%，适宜区结构以高、中适宜区为核心，是咖啡适生潜力最突出的情景。在 2041—2060 年总适宜区占比突破 58.00%，高适宜区占比为 17.35%，中适宜区占比为 17.69%，低适宜区占比为 23.03%，“高、中、低适宜区同步扩容”成为未来咖啡适宜区最广泛的情景。整体表现在高适宜区新增百色市右江区、田阳区、田东县、德保县、靖西市、那坡县、凌云县、乐业县，崇左凭祥市、宁明县等部分区域。中适宜区新增百色市田林县、西林县，南宁市江南区、西乡塘区、邕宁区、武鸣区、隆安县，崇左市江州

区、扶绥县、龙州县、大新县、天等县，钦州市钦南区、钦北区，玉林市福绵区、博白县，贵港市港南区，梧州岑溪市、龙圩区等部分区域(图 10)。

2.5.3 SSP585 情景下未来广西小粒种咖啡适宜性区划变化 结果表明，在 SSP585 情景下，2021—2040 年总适宜区占比为 32.52%，仅高于当前水平，高适宜区占比为 9.18%(低于 SSP126、SSP245 同期)，中适宜区占比为 8.49%(为各情景同期最低)，低适宜区占比为 14.85%，适宜区结构以低适宜区为主，高、中适宜区增长有限，表现出高排放对咖啡适生潜力的抑制。在 2041—2060 年总适宜区占比升至 48.12%，高适宜区占比为 15.50%，中适宜区占比为 11.71%，低适宜区占比为 20.91%，虽有增长但仍低于 SSP245 同期水平，说明高排放情景下咖啡适宜区扩张的“滞后性”(表 2，图 11)。

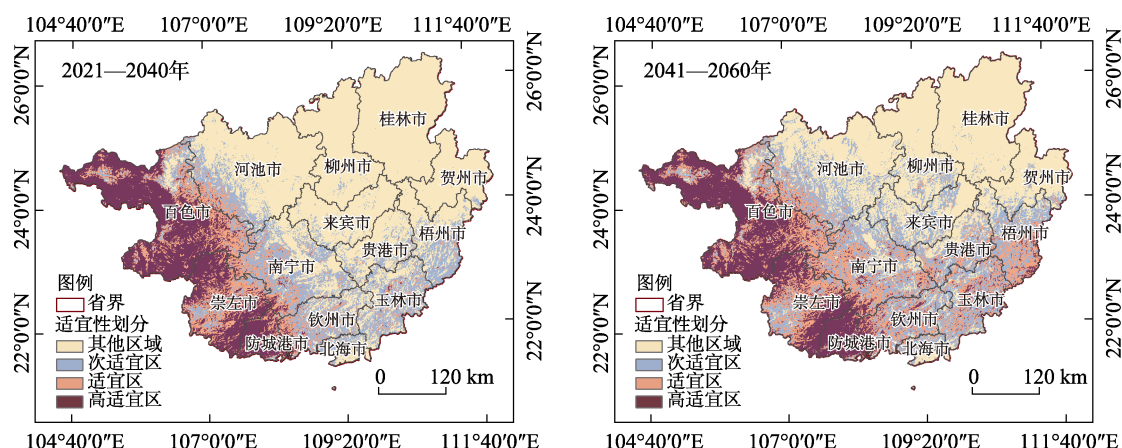


图 10 SSP245 情景下未来广西小粒种咖啡生态适宜区分布

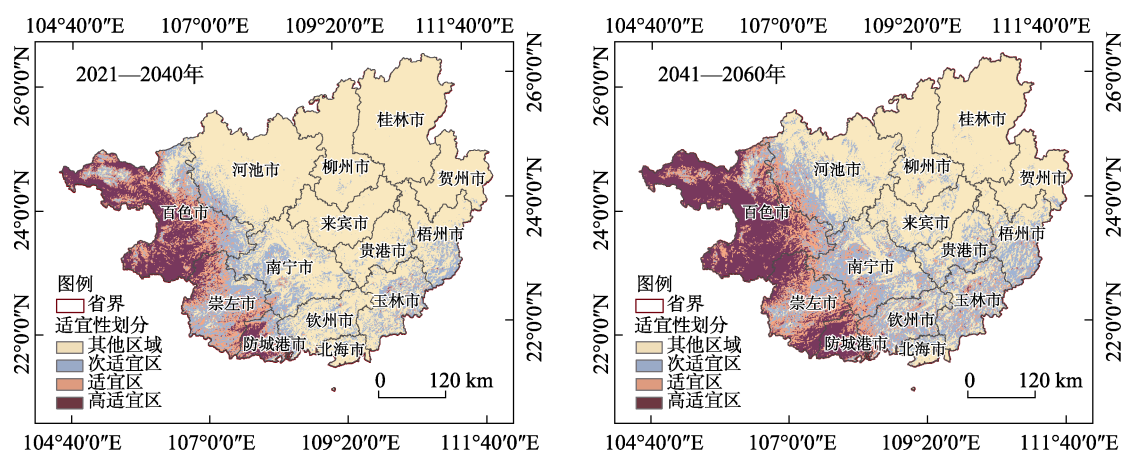
Fig. 10 Distribution of ecological suitable areas of *C. arabica* in Guangxi under SSP245 scenario

图 11 SSP585 情景下未来广西小粒种咖啡生态适宜区分布

Fig. 11 Distribution of ecological suitable areas of *C. arabica* in Guangxi under SSP585 scenario

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型在广西小粒种咖啡适宜性分布预测应用中的评估及局限性分析

本研究中,采用 MaxEnt 模型预测广西小粒种咖啡的适宜性分布,取得了较高的预测精度,但 MaxEnt 模型的输出结果受参数设置、生态因子和样本选择等因素影响。尤为重要的是样本选择,本研究中样点除示范点外,因种植模式、种植水平等差异,各样点的小粒种咖啡生长状况、产量和品质参差不齐,可能对预测结果造成影响。部分样点在经历极端气候后能恢复长势;部分样点通过全冠覆膜或行间覆膜(防寒专用膜)提升局部环境温度以应对低温期;另有部分样点虽已挂果,但其产量与品质等经济性状仍不稳定。此外,防城港东兴市与玉林市福绵区的部分样点,因受低海拔、昼夜温差不足及病虫害(如咖啡锈病、炭疽病)频发的影响,导致咖啡豆空瘪率高、

品质波动较大^[9]。同时,品种特性、人为干扰以及政策导向等因素可能会对预测结果造成一定的偏差。此外,有报道指出,不同产区咖啡土壤和叶片的 C、N、P 含量及化学计量比相互间紧密关联^[30]。广西喀斯特地貌广布,石漠化区域生态脆弱,虽经治理后植被恢复与生态改善成效初显,但仍对预测结果造成影响。如何将品种特性、人为因素和土地利用空间因素量化并加入 MaxEnt 模型中进行建模,值得进一步研究。

3.2 广西小粒种咖啡适宜性区划特征与主要环境因素的关系

适宜性区划本质是环境因素与物种生长习性的梯度匹配,整体而言,桂西南是广西小粒种咖啡高适宜区的核心集中地,也是中适宜区、低适宜区的重要分布区域。地(市)级水平适宜区总面积排序前五为百色市(46.20%)、崇左市(21.97%)、防城港市(8.26%)、南宁市(7.33%)

和玉林市(6.46%)。县(区)级水平高适宜区面积排序前五的是靖西市(149.58 km²)、西林县(109.77 km²)、那坡县(62.94 km²)、德保县(50.78 km²)和上思县(47.31 km²)。气候、地形地貌和土壤理化性质3个层次空间叠加分析表明,气候因素对小粒种咖啡在广西的分布起决定性限制作用,这与张明达等^[21]的结论相符,也与小粒种咖啡的生长习性基本一致。结果表明,影响小粒种咖啡在广西种植分布的关键因子主要是Bio15(降水季节性变异系数)、Bio3(等温性)、Bio19(最冷季度的降水量)、Bio11(最冷季度的平均温度)和Bio6(最冷月份的最低温度)。其中,Bio15为86%~97%时,存在概率稳定在0.70,受季风气候影响,桂西南其降水集中在5—9月,旱季(10—4月)明显,这种较高变异的降水模式,既满足咖啡生长期(雨季)的水分供给,又通过旱季短期干旱促进花芽分化,符合小粒种咖啡“耐季节性波动”的习性;Bio3为39.8%~43.0%时,存在概率稳定在0.75,温度波动幅度适中,温和的昼夜温差与年温差,利于咖啡光合产物积累和果实糖分沉淀;Bio19为43~95 mm时,存在概率大于0.50;Bio11为12.5~17.6℃时,存在概率大于0.50;Bio6为8.5~13.5℃时,存在概率大于0.50。

结合适宜性区划特征及广西地形、地貌和水系,可以看出独特的山脉和流域共同塑造了不同类型适宜区的温差、海拔、降水、水源等条件。桂西北云贵高原余脉(金钟山、黄连山、云山等支脉及云贵高原边缘岩溶山原地貌)和西江水系(南盘江—驮娘江流域)为西林县、德保县、靖西县、那坡县等高适宜区提供与小粒种咖啡生长习性适配的海拔温差及暖湿河谷的生境;桂西南山地勾漏山系十万大山和周边发达的水系网络(左江—明江流域)对上思县、宁明县等小粒种咖啡种植非常重要,十万大山能屏障台风与咸湿气流,是当地重要的天然生态屏障;此外,大瑶山、大明山边缘缓坡(武鸣、宾阳等)及六万大山、云开大山山系周边的广西玉林市、钦州市、苍梧、岑溪、容县等市、县适合小规模种植。

3.3 基于不同气候情景的广西小粒种咖啡可能的未来分布

未来2个时期(2021—2040年、2041—2060年),广西小粒种咖啡适宜区整体呈扩张趋势,

随着时间推移,适宜区质心从广西西南部(百色、崇左、防城港等地)向东北(南宁及桂中、桂东区域)持续转移。该结果与周秀华等^[31]基于BCC-CSM2-MR模式对广西未来气候变化的预估结果一致,即未来50 a广西气温呈显著线性上升趋势,增温程度由西北部向东部和南部递增。

但不同气候情景扩张趋势各有特点,本研究表明,与当前总适宜区面积相比,在SSP126低排放情景下广西小粒种咖啡总适宜区面积稳定增长,但高适宜区后期有小幅回落;在SSP245排放情景下,对咖啡适生潜力的促进作用最显著,高、中适宜区占比持续提升;在SSP585高排放情景下,适宜区增长相对缓慢,且前期高、中适宜区发展受限。周秀华等^[31]报道,在21世纪近期SSP245情景下可能出现相对冬季干旱,而中期广西东北部可能经历较严重的极端低温时期,SSP585情景下各地年平均气温和降水将分别增加1.6~2.5℃和3%~21%,广西西北部由极端降水带来的洪涝灾害可能性更大,这与在SSP245和SSP585情景下适宜区扩张趋势基本一致。

4 结论

本研究基于MaxEnt模型,对小粒种咖啡在广西的适宜区分布进行预测,明确影响其种植分布的关键因子、阈值范围及不同区域对小粒种咖啡种植的适宜程度,量化广西小粒种咖啡的种植空间潜力,并预测未来分布格局。气候限制因素对小粒种咖啡在广西分布起决定作用,广西大部分地区属于亚热带季风气候,具有温暖、雨水充沛、雨热同期、干湿分明、冬短夏长的特点,但台风、干旱等气象灾害频发^[32]。咖啡种植者及产业决策者可根据区域适宜性差异,遵循因地制宜原则,科学布局产业:在百色市、崇左市等高适宜区,加强规划和推广力度,增加布局小粒种咖啡产业发展重点县(区)、乡(镇),发掘种植潜力,扩大种植规模;在中、低适宜区,应加强风险防范,探索坚果+咖啡、芒果+咖啡、桉树+咖啡、雨林+咖啡等立体种植模式和林下经济,形成差异化发展。

参考文献

- [1] HUANG G R, LIU S M, CHEN G L, ZHAO Y, HUANG Q L, CEN Q J, REN E F. Effects of harvesting periods and cul-

- tivar on the physicochemical and sensory properties of two coffee bean varieties[J]. *Foods*, 2025, 14: 3135.
- [2] RAN L X, WEI X Y, REN E F, QIN J F, RASHEED U, CHEN G L. Application of microbial fermentation in caffeine degradation and flavor modulation of coffee beans[J]. *Foods*, 2025, 14: 2606.
- [3] 黄家雄, 吕玉兰, 罗心平, 张晓芳, 胡发广, 李亚男, 李维锐. 2024 年中国咖啡产业发展报告[J]. *热带农业科技*, 2025, 48(4): 44-48.
HUANG J X, LYU Y L, LUO X P, ZHANG X F, HU F G, LI Y N, LI W R. Chinese coffee industry development report 2024[J]. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2025, 48(4): 44-48. (in Chinese)
- [4] FAIR S J, MAYA Q, NORA L. Climate change and coffee: assessing vulnerability by modeling future climate suitability in the Caribbean island of Puerto Rico[J]. *Climatic Change*, 2018, 146(1/2): 175-186
- [5] DAVIS A P, GOLET T W, BAENA S, MOAT J. The impact of climate change on indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities[J]. *PLoS One*, 2012, 7(11): e47981.
- [6] MIGHTY M A. Site suitability and the analytic hierarchy process: how GIS analysis can improve the competitive advantage of the Jamaican coffee industry[J]. *Applied Geography*, 2015, 58: 84-93.
- [7] HAILU B T, MAEDA E E, PELLIKKA P, PFEIFER M. Identifying potential areas of under storey coffee in Ethiopia's highlands using predictive modelling[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(11): 2898-2919.
- [8] 钟云婕, 麦荷, 岑庆静, 郑学娜, 赵媛, 陈赶林, 任二芳. 基于 SWOT-PEST 模型和消费者偏好调查的广西咖啡产业发展现状及对策研究[J]. *农业研究与应用*, 2025, 38(4): 336-349.
ZHONG Y J, MAI H, CEN Q J, ZHENG X N, ZHAO Y, CHEN G L, REN E F. Research on the state quo and countermeasures of Guangxi coffee industry based on SWOT-PEST model and consumer preference investigation[J]. *Journal of Agricultural Research and Application*, 2025, 38(4): 336-349. (in Chinese)
- [9] 罗俊奇, 高兴, 宾哲源, 李政, 李珍, 宾振钧. 西林县咖啡产业现状调查及发展建议浅析[J]. *南方园艺*, 2025, 36(5): 66-69.
LUO J Q, GAO X, BIN Z Y, LI Z, LI Z, BIN Z J. Survey on the current situation and brief analysis of development suggestions for the coffee industry in Xilin county[J]. *Southern Horticulture*, 2025, 36(5): 66-69. (in Chinese)
- [10] ABDELAAL M, FOIS M, FENU G, BACCHETTA G. Using MaxEnt modeling to predict the potential distribution of the endemic plant *Rosa arabica* Crép. in Egypt[J]. *Ecological Informatics*, 2019, 50: 68-75.
- [11] 钟云婕, 唐恒伟, 唐秀观, 杜英俊, 周海兰, 欧景莉, 朱鹏锦. 基于 GIS 的中国菠萝蜜生态适宜性区划和种植空间潜力分析[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(4): 1004-1014.
ZHONG Y J, TANG H W, TANG X G, DU Y J, ZHOU H L, OU J L, ZHU P J. GIS-based ecological suitability regionalization and spatial potential analysis of jackfruit in China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(4): 1004-1014. (in Chinese)
- [12] WANG Y Y, CHAO B X, DONG P, ZHANG D, YU W W, HU W J, MA Z Y, CHEN G C, LIU Z H, CHEN B. Simulating spatial change of mangrove habitat under the impact of coastal land use: coupling MaxEnt and Dyna-CLUE models[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147914.
- [13] HE K, FAN C J, ZHONG M C, CAO F L, WANG G B, CAO L. Evaluation of habitat suitability for Asian elephants in Sipsongpanna under climate change by coupling multi-source remote sensing products with MaxEnt model[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 1047.
- [14] 李晓霞, 胡宽义, 曾安逸, 董定超. 基于 MaxEnt 模型预测海南外来入侵植物新记录种—沼生金纽扣在中国的潜在适生区[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(9): 1989-1997.
LI X X, HU K Y, ZENG A Y, DONG D C. MaxEnt modeling prediction of the potential distribution of *Acmella uliginosa*, a newly recorded invasive plant in Hainan, China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(9): 1989-1997. (in Chinese)
- [15] TAN Y F, TAN X H, YU Y P, ZENG X P, XIE X Q, DONG Z T, WEI Y L, SONG J Y, LI W X, LIANG F. Climate change threatens *Barringtonia racemosa*: conservation insights from a MaxEnt model[J]. *Diversity*, 2024, 16(7): 429.
- [16] OBAN H O, MER K R, ARALAN E S. MaxEnt modeling for predicting the current and future potential geographical distribution of *Quercus libani* Olivier[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 2671.
- [17] 吕玉玲, 潘文豪, 饶鑫媛, 刘虎岐. 基于优化 MaxEnt 模型的火炬树在我国潜在适生区预测[J]. *生物安全学报(中英文)*, 2025, 34(3): 249-257.
LYU Y L, PAN W H, RAO X Y, LIU H Q. Prediction of potential suitable habitats of *Rhus typhina* in China based on an optimized MaxEnt model[J]. *Journal of Biosafety*, 2025, 34(3): 249-257. (in Chinese)
- [18] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 全占军, 赵相健, 宫璐. 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区[J]. *植物保护报*, 2016, 43(6): 1041-1048.
LIU X Y, LI J S, ZHAO C Y, QUAN Z J, ZHAO X J, GONG L. Prediction of potential suitable area of *Ambrosia*

- artemisiifolia* L. in China based on MaxEnt and ArcGIS[J]. Journal of Plant Protection, 2016, 43(6): 1041-1048. (in Chinese)
- [19] LADERACH P, RAMIREZ-VILLEGAS J, NAVARRO-RACINES C, ZELAYA C, MARTINEZOVALLA A, JARVIS S. Climate change adaptation of coffee production in space and time[J]. Climatic Change, 2017, 141(1): 47-62.
- [20] SCHROTH G, LADERACH P, BLACKBURN CUERO D C, NEILSON J, BUNN C. Winner or loser of climate change? A modeling study of current and future climatic suitability of Arabica coffee in Indonesia[J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(7): 1473-1482
- [21] 张明达, 王睿芳, 李艺, 胡雪琼, 李蒙, 张茂松, 段长春. 云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 168-178
- ZHANG M D, WANG R F, LI Y, HU X Q, LI M, ZHANG M S, DUAN C C. Ecological suitability zoning of *Coffea arabica* L. in Yunnan province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 168-178. (in Chinese)
- [22] ZHANG S, LIU X G, LI R M, WANG X L, CHENG J H, YANG Q L, KONG H. AHP-GIS and MaxEnt for delineation of potential distribution of Arabica coffee plantation under future climate in Yunnan, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108339.
- [23] 广西壮族自治区自然资源厅. 自然地理[EB/OL]. (2025-5-14)[2025-11-5]. <http://www.gxzf.gov.cn/mlgxi/gxrw/zrdl/t20881719.shtml>.
Department of Natural Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Physical geography[EB/OL]. (2025-5-14)[2025-11-5]. <http://www.gxzf.gov.cn/mlgxi/gxrw/zrdl/t20881719.shtml>. (in Chinese)
- [24] 广西壮族自治区气候中心. 广西壮族自治区气候规划[EB/OL]. (2018-1-20)[2025-11-5]. <https://www.gxnews.com.cn/staticpages/20180120/newgx5a62cd1e-16859911.shtml>.
Guangxi Climate Center. Climate plan of Guangxi Zhuang Autonomous Region[EB/OL]. (2018-1-20)[2025-11-5]. <https://www.gxnews.com.cn/staticpages/20180120/newgx5a62cd1e-16859911.shtml>. (in Chinese)
- [25] 钟聪, 李小洁, 何园燕, 邱微文, 李杰, 张新英, 胡宝清. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 478-485.
- ZHONG C, LI X J, HE Y Y, QIU W W, LI J, ZHANG X Y, HU B Q. Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 478-485. (in Chinese)
- [26] KRIEGLER E, EDMONDS J, HALLEGATTE S, EBI K, VUUREN D V. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions[J]. Climatic Change, 2014, 122: 401-414.
- [27] ZHU G P, QIAO H J. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24: 1189-1196.
- [28] COBOS M E, PETERSON A, BARVE N, OSORIO-OLVERA L. Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using MaxEnt[J]. PeerJ, 2019, 7: e6281.
- [29] NORTH M A. A method for implementing a statistically significant number of data classes in the Jenks algorithm[C]. 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Tianjin, China. IEEE, 2009: 35-38.
- [30] 吕玉, 孟石荣, 周晓华, 侯明兴, 黄茜蕊. 云南 3 个咖啡主产区土壤和咖啡叶片养分含量及生态化学计量特征[J]. 热带作物学报, 2025, 46(10): 2436-2446.
- LYU Y, MENG S R, ZHOU X H, HOU M X, HUANG Q R. Nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics of soil and leaf of coffee from the main coffee producing areas of Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(10): 2436-2446. (in Chinese)
- [31] 周秀华, 何莉阳, 何洁琳, 黄卓. 基于 BCC-CSM2-MR 模式的广西未来气候变化预估[J]. 气象研究与应用, 2024, 45(4): 75-83.
- ZHOU X H, HE L Y, HE J L, HUANG Z. Future climate change prediction over Guangxi based on BCC-CSM2-MR model[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(4): 75-83. (in Chinese)
- [32] 广西壮族自治区气候中心. 广西气候[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- Guangxi Climate Center. Guangxi climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)