

气候变化对澳洲坚果在中国潜在生态适宜种植区的影响

潘尹茜雪¹, 王雪昭^{2,3,4}, 李晓娜^{2,4*}, 张淋¹, 王雷光⁵

(1. 西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 3. 香格里拉普达措国家公园碧塔海高原湿地生态系统云南省野外科学观测研究站, 昆明 650233; 4. 云南澄江抚仙湖森林生态国家长期科研基地, 云南 玉溪 651100; 5. 西南林业大学 园林园艺学院, 昆明 650224)

摘要: 气候变化深刻地影响着植物分布格局, 澳洲坚果 (*Macadamia sp.*) 属于热带至亚热带山地植物, 具有极高的经济价值和显著的生态价值, 气候变化背景下预测其潜在生态适宜区对我国山区经济发展和水土保持具有重要意义。该研究结合 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件, 基于气候、地形和土壤等环境因子和澳洲坚果 (*Macadamia sp.*) 在中国现有分布数据, 筛选出影响澳洲坚果在我国分布的关键因子, 并探讨 2040s、2060s、2080s 和 2100s 4 个未来时期澳洲坚果在我国潜在适生区分布格局及变化。结果表明: (1)MaxEnt 模型可以极好地模拟澳洲坚果在中国的潜在分布。(2)年均气温、年均降水量、等温性、年均温变化范围是影响澳洲坚果分布的关键因子。(3)各气候情景下, 澳洲坚果在云南省分布面积最大, 其次是广东和广西等东南沿海地区。(4)3 种未来气候情景下随时间变化澳洲坚果潜在适生区总面积逐渐缩减, 适生区内部破碎化程度逐渐升高, 总体质心偏移幅度均较小。该研究结果进一步明确了澳洲坚果生态适宜区在中国的分布格局, 可以为制定澳洲坚果的规模化种植规划提供科学依据。

关键词: 澳洲坚果, 潜在适生区, MaxEnt 模型, 气候变化, 中国

中图分类号: Q948

文献标识码: A

The impacts of climate change on the potential ecologically suitable plantation area of *Macadamia sp.* in China

PAN Yinxixue¹, WANG Xuezhao^{2,3,4}, LI Xiaona^{2,4*}, ZHANG Lin¹, WANG Leiguang⁵

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. Shangri-La Potatso National Park Bita Lake Plateau Wetland Ecosystem Observation and Research Station of Yunnan Province, Kunming 650233, China; 4. Yunnan Chengjiang Fuxian Lake Basin Forest Ecosystem National Long-Term Scientific Research Base, Yuxi 651100, Yunnan, China; 5. College of Landscape Architecture and Horticulture Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Climate change has exerted profound impacts on the distribution patterns of plant species. *Macadamia sp.*, a tropical to subtropical montane plant, possesses considerable economic and ecological significance. Understanding its potential ecologically suitable habitats under future climate change scenarios is of great importance for promoting sustainable economic development and soil and water conservation in mountainous regions of China. This study integrated the MaxEnt model with ArcGIS technology to analyze current distribution data of *Macadamia sp.* in China, along with environmental variables including climatic, topographic, and soil factors. Key environmental determinants influencing its distribution were identified, and the potential distribution patterns of suitable habitats were projected for four future time periods: the 2040s,

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AD080010); 西南林业大学科研启动基金(111610)。

第一作者: 潘尹茜雪 (2000—), 硕士研究生, 研究方向为自然地理学, (E-mail) panyxx2000@163.com。

通讯作者: 李晓娜, 博士, 副教授, 研究方向为景观生态学, (E-mail) xiaonali_20060429@163.com。

2060s, 2080s, and 2100s. The results were as follows: (1) The MaxEnt model demonstrated high accuracy in simulating the potential geographic distribution of *Macadamia* sp. in China. (2) Annual mean temperature, annual mean precipitation, isothermality, and temperature annual range were identified as the most influential environmental variables shaping its distribution. (3) Across all climate scenarios, Yunnan Province consistently exhibited the largest area of suitable habitat, followed by the southeastern coastal provinces such as Guangdong and Guangxi. (4) Under all three future climate scenarios, the total area of suitable habitats gradually decreased over time, accompanied by increasing fragmentation, while the spatial shifts of the overall centroid remained minimal. These findings provided a comprehensive understanding of the potential ecological distribution patterns and requirements of *Macadamia* sp. in China, offering a scientific basis for the development of large-scale, climate-adaptive cultivation strategies.

Key Words: *Macadamia* sp., potentially suitable area, MaxEnt model, climate change, China

气候变化显著地影响了动植物生存和繁衍，剧烈的气候变化导致高温干旱、热浪和暴雨洪涝等极端事件频发，物种栖息地遭到严重破坏，生境丧失及破碎化日益严重，物种生存面临严峻挑战(Bellard et al., 2012; Mantyka-pringle et al., 2012; Harrison et al., 2020; 杨佳悦等, 2025)。气候(热量和水分)是制约生物分布的主要因素之一，很大程度上控制着植物的分布、生长和繁殖(王纪军和裴铁璠, 2004; 吕佳佳和吴建国, 2009)。因此，评估物种对气候的适应性迫在眉睫，理解物种的地理分布格局及其与环境因子间的相互关系，对管理者后续开展农业生产和制定物种多样性保护措施至关重要。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)基于数学统计方法，将物种和环境变量数据相结合，预测物种分布概率的有效手段(Zhao et al., 2021)。目前，常见的物种分布模型主要有生物气候模型(BOICLIM)(Beaumont et al., 2005; Booth et al., 2014; 李垚等, 2014)、生物种群增长模型(CLIMEX)(Taylor et al., 2013; Ramirezcabral et al., 2017)、基于遗传算法的规则组合模型(GARP)(Stockman et al., 2006; Fu et al., 2024)、广义线性模型(generalized linear model, GLM)(Guisan et al., 1999)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)(Zenebe et al., 2024)、随机森林(random forest, RF)(郭恺琦等, 2021; Zhao et al., 2022)和最大熵模型(MaxEnt)(Phillips et al., 2006; Zhang et al., 2021; 应邦肯等, 2024)。其中，MaxEnt模型以最大熵理论为基础，利用物种分布数据及其相关环境变量即可预测物种潜在分布范围，操作简单、预测精度高(Phillips et al., 2006; 朱耿平和乔慧捷, 2016; 陈程浩等, 2023; 曾伟英等, 2025)，已被广泛应用于预测野生濒危动植物(张殷波等, 2019; 陈禹光等, 2022; 王亚等, 2023; 杨善云等, 2023; 吕增伟等, 2024; 石小倩等, 2025)、经济作物(王伟等, 2017; 王翠华等, 2020; 刘攀峰等, 2020; 李章贵等, 2024)、外来植物(李建宇等, 2023; 郑晓毅等, 2024)等生态适宜分布的预测。

澳洲坚果(*Macadamia* sp.)又称夏威夷果，属于山龙眼科澳洲坚果属多年生常绿乔木，原产地主要分布于澳大利亚大陆东部、苏拉威西岛和马达加斯加岛等热带地区(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1988; 贺熙勇等, 2015)。澳洲坚果素有“干果皇后”的美誉，具有极高的经济价值，是我国重要的木本油料植物之一，其果仁含油量高达70%，可用于制作加工高级色拉油和各类食品(焦云等, 2008; 朱耿平和乔慧捷, 2016)。澳洲坚果还具有丰富的药用价值，其不饱和脂肪酸含量较高(刘建福和黄莉, 2005)，不仅能预防和改善动脉粥样硬化、心血管疾病、糖尿病、肿瘤、风湿性关节炎等疾病的发生，还能提高皮肤的抗衰老能力(杜丽清等, 2010)。澳洲坚果为国外原生树种，在1974年引入广西，随后在20世纪90年代云南省大面积退耕还林行动中引入云南，在我国广东、广西、福建和海南等地均引种成功。2022年中国澳洲坚果种植面积超过 $33.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，已成为全球澳洲坚果产业发展最快、种植面积最大的国家(李章贵等, 2024; 张凤花等, 2024)，因此引种栽培澳洲坚果在促进相关地区经济增长、缓解“三农”压力等方面起着重要的作用。

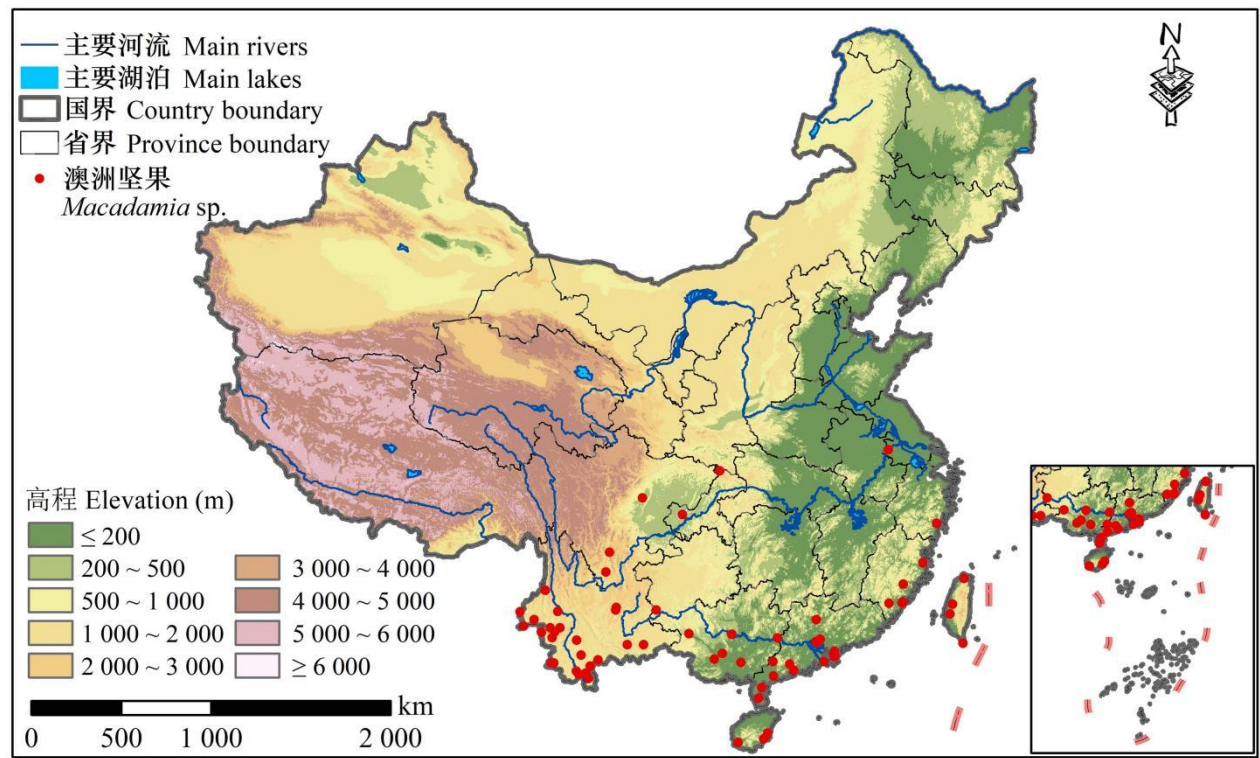
近年来，澳洲坚果相关研究主要围绕产量(Howlett et al., 2015; Perdoná & Soratto, 2015)、产品开发技

术(Somwongin et al., 2023)、种植管理技术和产业发展(艾静汶等, 2018; 贺熙勇等, 2022; 王文林等, 2022; 聂艳丽等, 2023)等方面开展, 也有学者研究了影响澳洲坚果全球潜在适宜分布的气候因子(王伟等, 2017), 分析了气候因子对云南省澳洲坚果种植的影响(王翠华等, 2023; 李章贵等, 2024)。然而, 这些研究多集中于全球大尺度范围或具体省份, 并且仅考虑澳洲坚果地理分布对气候因子的响应, 忽略了地形和土壤因子的影响。因此, 本研究将 MaxEnt 模型和 ArcGIS 相结合, 筛选出影响澳洲坚果在我国分布的关键环境因子, 探讨不同温室气体排放情景 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5) 不同时期(2020—2100 年)澳洲坚果潜在适生区的变化, 是制定科学合理规划澳洲坚果种植范围的重要依据。以期回答以下问题: (1)我国影响澳洲坚果潜在适生区的关键环境因子有哪些; (2)不同未来气候情景下, 澳洲坚果潜在生态适宜区的空间分布如何变化; (3)不同气候情景下澳洲坚果的潜在适生区随时间变化是否发生变化。

1 材料与方法

1.1 澳洲坚果分布数据收集

澳洲坚果分布数据主要来源于中国国家标本资源平台 (<http://www.nsii.org.cn/>)、中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>)、全球生物多样性信息网络 (<https://www.Gbif.org/>) 及相关文献图书资料, 查阅后共获取 97 个全球澳洲坚果分布记录。在 ArcGIS 10.7 中将研究区划分为 1 km × 1 km 的网格, 对所收集的分布点数据进行筛选处理, 确保每个网格中仅有一条记录。剔除产地有误或重复的样点, 最终得到 72 个有效分布点 (图 1)。



该图基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图无修改。下同。

The map is based on the standard map No. GS(2024)0650, and the base map is not modified. The same below.

图 1 澳洲坚果中国分布点[高程分级参考李炳元等(2008)]

Fig. 1 Distribution points of *Macadamia* sp. in China [elevation grading reference Li et al. (2008)]

1.2 环境变量

该研究共选取 40 个环境变量构建模型, 包括 19 个生物气候变量、18 个土壤因子及 3 个地形数据 (表

1)。气候数据来源于全球气候数据库 (<https://www.worldclim.org/>)，当前(1970—2020年)和未来气候选用 HadGEM3-GC31-LL 气候模式(Williams et al., 2021; Michaelides, 2023; Adhikari et al., 2024)，包括未来3种共享经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)最新温室气体排放情景数据，即 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5，包括 2021—2040 年(2040s)、2041—2060 年(2060s)、2061—2080 年(2080s) 和 2081—2100 年(2100s) 未来4个时期，空间分辨率为 30"。其中，SSP1-2.6 表示 2100 年温室气体排放稳定在 $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的低辐射强迫情景；SSP2-4.5 表示 2100 年温室气体排放稳定在 $4.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的中等辐射强迫情景；SSP5-8.5 表示 2100 年温室气体排放稳定在 $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的高辐射强迫情景。土壤数据下载自世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version, HWSD)，空间分辨率为 1 km。数字高程数据(DEM) 数据下载自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)，采用 ArcGIS 软件提取坡度(aspect)和坡向(slope)，空间分辨率为 30 m。所有环境变量在 ArcGIS 10.7 中重采样至 1 km。

表 1 环境变量解释表

Table 1 Explanatory table of environmental variables

变量 Variable	描述 Description	单位 Unit
BIO1	年均温 Annual mean temperature	°C
BIO2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range	°C
BIO3	等温性 Isothermality (BIO2 / BIO7) (*100)	%
BIO4	温度季节性变化标准差 Temperature seasonality	—
BIO5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month	°C
BIO6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	°C
BIO7	年均温变化范围 Temperature annual range	°C
BIO8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest quarter	°C
BIO9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	°C
BIO10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest quarter	°C
BIO11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	°C
BIO12	年均降水量 Annual mean precipitation	mm
BIO13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month	mm
BIO14	最干月降水量 Precipitation of the driest month	mm
BIO15	降水量季节性变化 Precipitation seasonality	mm
BIO16	最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter	mm
BIO17	最干季度降水量 Precipitation of the driest quarter	mm
BIO18	最暖季度降水量 Precipitation of the warmest quarter	mm
BIO19	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	mm
DEM	高程 Digital elevation model	m
Aspect	坡向 Aspect	—
Slope	坡度 Slope	°
T_bs	基本饱和度 Base saturation	%
T_CaCO ₃	碳酸盐含量 Carbonate content	%weight
T_CaSO ₄	硫酸盐含量 Sulfate content	%weight
T_cec_clay	粘性层土壤的阳离子交换能力 Cation exchange capacity of cohesive layer soils	coml·kg ⁻¹
T_cec_soil	土壤的阳离子交换能力 Cation exchange capacity of soil	coml·kg ⁻¹
T_ece	导电率 Electric conductivity	dS·m ⁻¹
T_gravel	土壤碎石体积百分比 Percentage of crushed stone by volume	%vol
T_oc	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	%weight
T_ph_H2O	土壤酸碱度 Soil pH	-log(H ⁺)
T_ref_bulk	土壤容重 Soil bulk density	kg·dm ⁻³
T_sand	土壤沙石含量 Soil sand and gravel content	%wt
T_silt	土壤淤泥含量 Soil silt content	%wt
T_teb	交换性盐基 Exchangeable base	coml·kg ⁻¹
T_texture	土壤质地 Soil texture grading	—
Awc_class	土壤有效含水量 Available soil moisture	—

T_esp	可交换钠盐 Exchangeable sodium salt	%
T_clay	黏土含量 Clay content	%wt

1.2 环境变量处理与选取

为克服多重共线性的影响，本研究运用空间分析功能对 19 个生物气候变量数据、地形数据和 18 个土壤数据进行 Spearman 相关性分析，保留相关性低于 0.80 的环境变量，若两个变量相关性高于 0.80，则保留生态学意义较强的环境变量(Fick et al., 2017; 刘攀峰等, 2020)。将澳洲坚果分布数据与初筛因子输入 MaxEnt 模型，使用刀切法进行环境因子筛选，运行模型直至所选环境变量不存在 0 贡献率的因子为止。最终筛选出年均温（BIO1）、年降水量（BIO12）、等温性（BIO3）、年均温变化范围（BIO7）、土壤碎石体积百分比（T_gravel）、土壤淤泥含量（T_silt）和最干季季节降水量（BIO17）共 7 个因子作为模型最终输入变量。

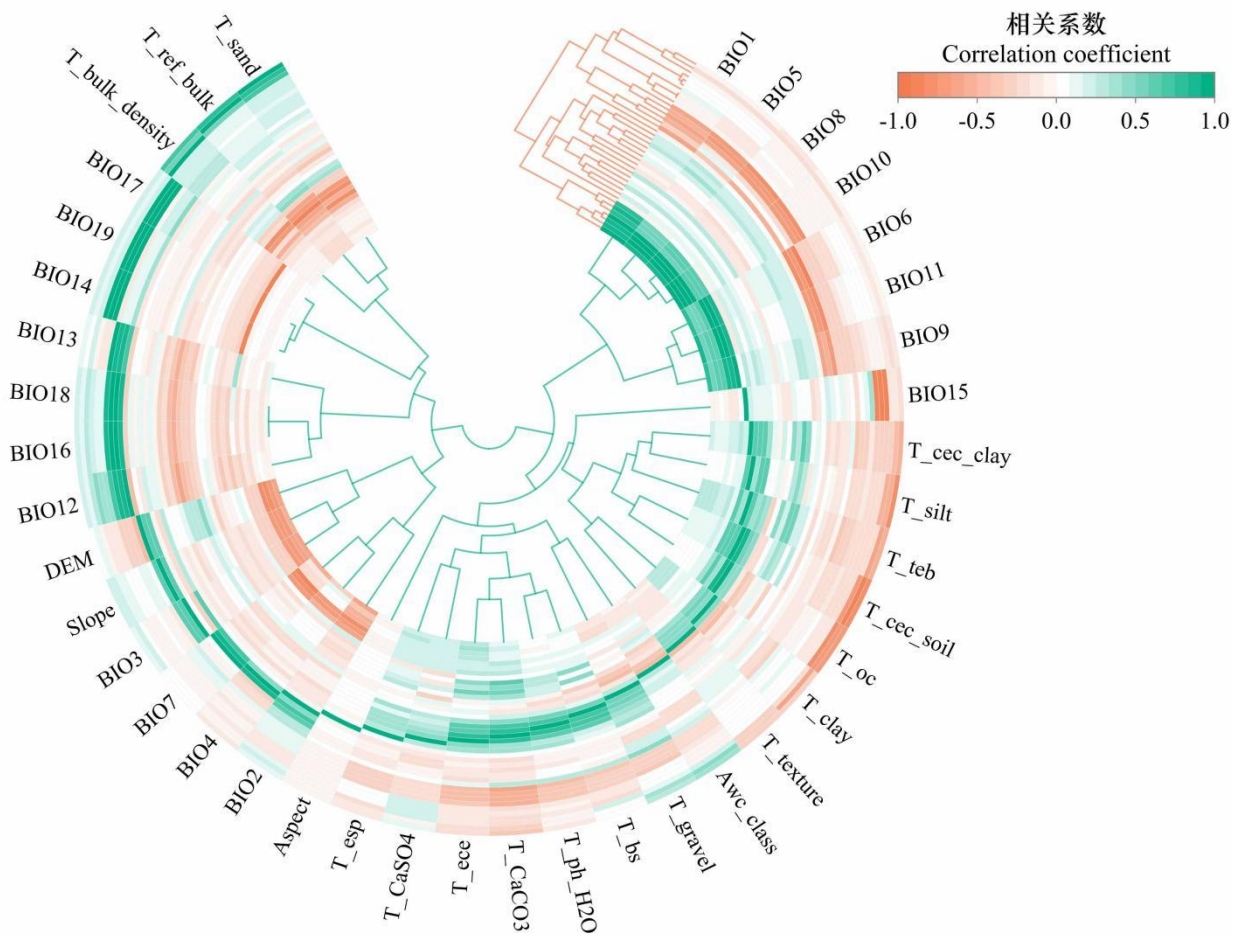


图 2 40 个环境变量 Spearman 相关性分析

Fig. 2 Spearman correlation analysis of 40 environmental variables

1.3 MaxEnt 模型预测

为保证模型的准确性，随机选取 25% 的数据作为测试集数据，其余 75% 的澳洲坚果分布点数据作为训练集数据，迭代次数设置为 10 000，重复运算 10 次。采用受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic curve, ROC 曲线）下的面积（即 AUC 值）评价预测模型精度，AUC 值的阈值为 0~1，越接近 1，表明预测精度越准确(Swets, 1988)。最后利用刀切法(Jackknife)来检验各环境变量对分布增益的贡献(Miller, 1974; Shcheglovitova et al., 2013)，从而筛选出影响澳洲坚果潜在分布的关键环境因子。

1.4 适生等级划分

本研究将澳洲坚果在我国的实际分布和自然断点法相结合,按照存在概率 P 将澳洲坚果适生区划分为 4 个等级(陈程浩等, 2023), 即 $P < 0.41$ 为非适生区、 $0.41 \leq P < 0.62$ 为低适生区、 $0.62 \leq P < 0.85$ 中适生区和 $P \geq 0.85$ 为高适生区。使用 GIS 软件统计分析各适生区的分布范围和面积, 计算现行气候与未来气候情景下的澳洲坚果适生区面积, 获得未来气候情景下扩张、收缩和保留的适生区范围和面积, 进而分析气候变化对澳洲坚果潜在适生区分布面积的影响。

1.5 质心分析

为分析不同气候情景下澳洲坚果适生区质心的变化, 在 ArcGIS 10.7 中对栅格数据进行重分类, 将适生区赋值为 1, 其余区域则为 Nodata。利用分区统计工具计算各气候情景下潜在适生区的质心, 从而分析其质心变化。质心的计算公式如下:

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^n A_i X_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad Y_G = \frac{\sum_{i=1}^n A_i Y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中: X_G 和 Y_G 分别为质点的坐标位置; A_i 为质点; i 为当前的质点; n 为质点数量; X_i 和 Y_i 分别为第 i 个离散目标物的坐标位置。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型精度检验

本研究现行气候下 ROC 曲线训练集和测试集的平均 AUC 值分别为 0.979 和 0.966, 未来不同气候情景下的 AUC 值均达到 0.960 以上 (图 3), 证明 MaxEnt 模型预测结果极佳, 该模型能够极好地模拟澳洲坚果的潜在分布。

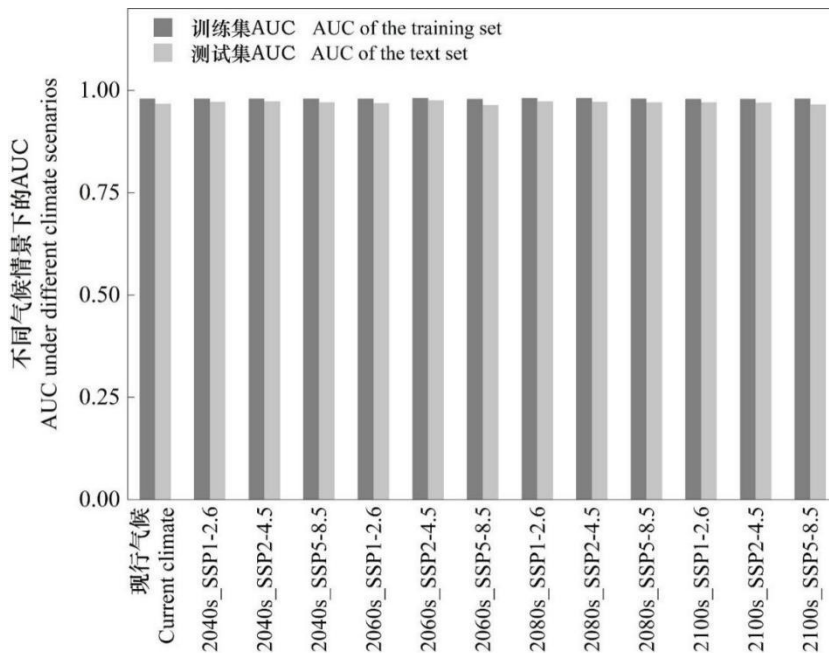


图 3 不同气候情景下的 AUC

Fig. 3 AUC under different climate scenarios

2.2 环境变量筛选结果

刀切法 (图 4) 表明, 年均温 (BIO1)、年均温变化范围 (BIO7)、年均降水量 (BIO12) 和最干旱季度降水量 (BIO17) 4 个因子的训练增益得分均超过 1.4, 其中 BIO1 得分 (>2.2) 最佳, 其余因子得分

尚未超过 1。贡献率重要排序前 4 的因子为年均温（BIO1）、年均降水量（BIO12）、等温性（BIO3）、年均温变化范围（BIO7），贡献率分别为 63.4%、14.9%、11.5%、3.6%，累计贡献率为 93.4%。气候因子是预测澳洲坚果适生区的主要因素。

本研究选择累计贡献率>90%且不低于 3%的变量作为影响澳洲坚果潜在适生区的主导环境变量。为便于寻找最适宜澳洲坚果生长发育的环境变量范围，本研究设置 MaxEnt 模型的存在概率（*P*）阈值为 0.5，最终选择年均气温（BIO1）、年均降水量（BIO12）、年均降水量、等温性（BIO3）和年均温变化范围（BIO7）作为限制澳洲坚果分布的主导环境变量进行分析（图 5）。图 5 为环境变量与存在概率间的响应曲线，该曲线显示澳洲坚果最佳适生范围如下：BIO1 为 20~25 °C；BIO12 为 1 500 ~4 300 mm；BIO3 为 45%~54%；BIO7 为<8 °C。

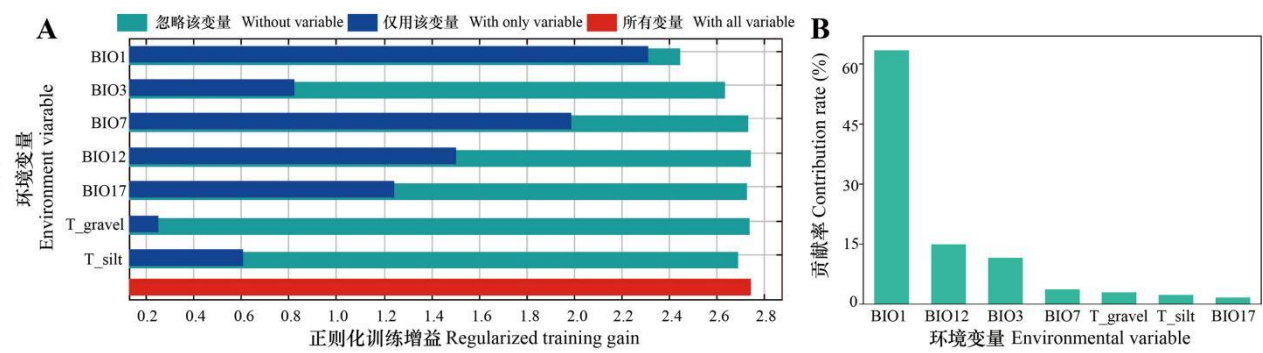


图 4 环境变量刀切法检验及贡献率

Fig. 4 Jackknife test and contribution rate of environmental variables

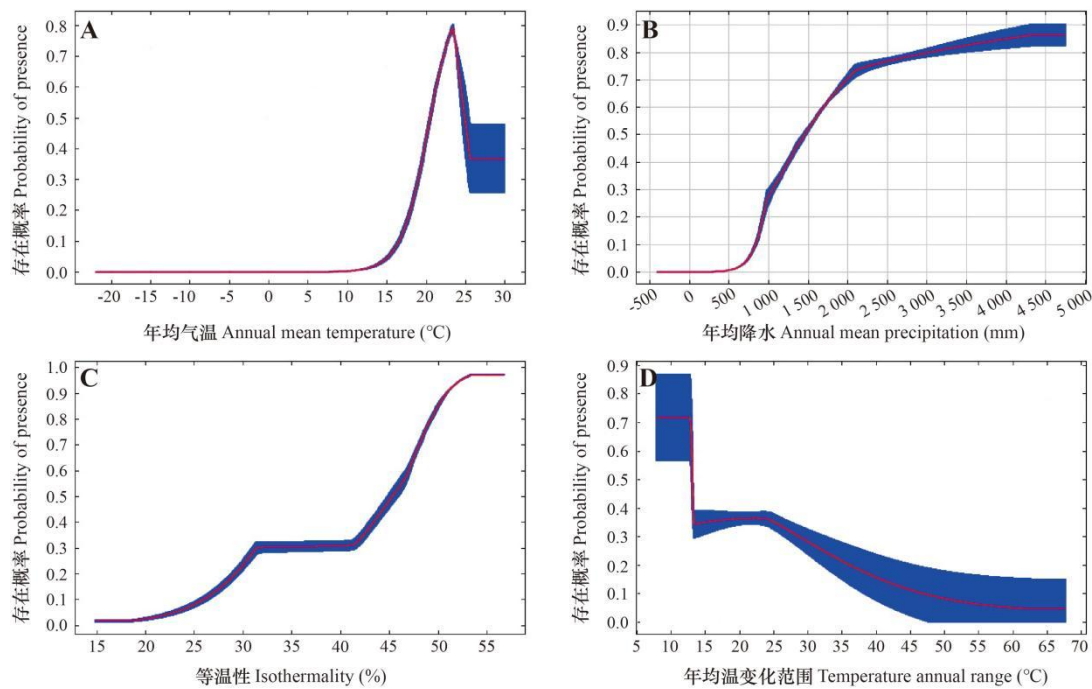


图 5 主导环境变量响应曲线

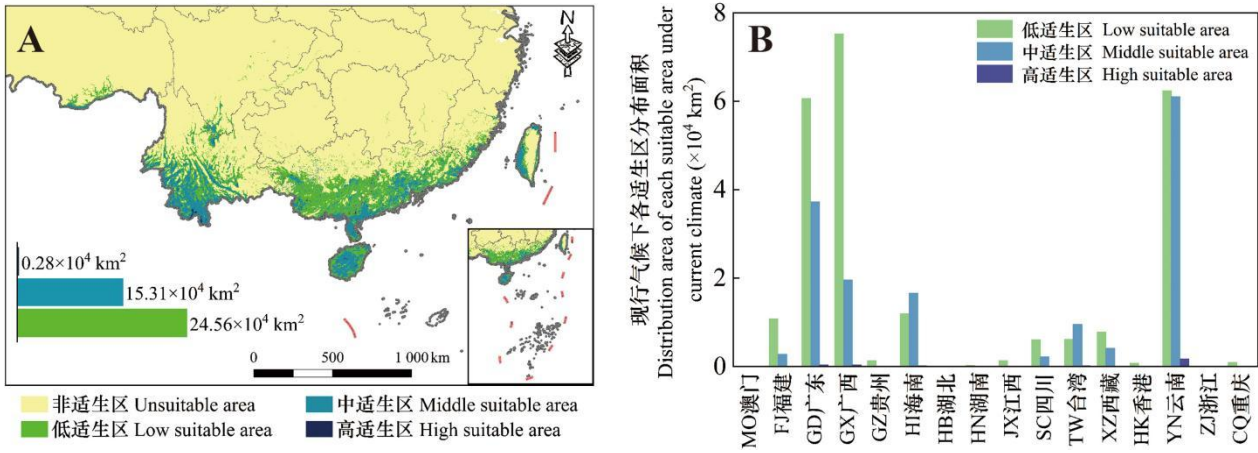
Fig. 5 Dominant environmental variable response curve

2.3 澳洲坚果当前在中国的潜在适生区预测

现行气候情景下，结果如图 6 所示，澳洲坚果在中国西南和东南沿海地区分布最密集，仅四川南部、重庆西南部、贵州、湖北、湖南、江西、香港、浙江等地呈碎片化分布，地理分布范围为 91.0—122.0° E、

18.1°—31.6° N，总面积为 $40.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的 4.18%。

低、中、高适生区面积分别为 $24.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2.56%)、 $15.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ (1.59%)、 $0.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ (0.29%)。澳洲坚果适生区从北至南依次呈低-中-高连片分布，低适生区环绕于中适生区周围，中适生区则沿高适生区向四周延伸。其中，高适生区主要集中在西藏（林芝市）、云南（德宏市、临沧市、普洱市、西双版纳州、楚雄州、玉溪市和红河州）、广西（百色市、崇左市、南宁市和北海市）、广东（湛江市、茂名市、阳江市、江门市、东莞市及汕尾市）、海南、台湾西部沿海平原。



MO. 澳门；FJ. 福建；GD. 广东；GX. 广西；GZ. 贵州；HI. 海南；HB. 湖北；HN. 湖南；JX. 江西；SC. 四川；TW. 台湾；XZ. 西藏；HK. 香港；YN. 云南；ZJ. 浙江；CQ. 重庆。下同。

MO. Macao; FJ. Fujian; GD. Guangdong; GX. Guangxi; GZ. Guizhou; HI. Hainan; HN. Hunan; HB. Hubei; JX. Jiangxi; SC. Sichuan; TW. Taiwan; XZ. Xizang; HK. Hong Kong; YN. Yunnan; ZJ. Zhejiang; CQ. Chongqing. The same below.

图 6 澳洲坚果当前在中国的适生区分布

Fig. 6 Current distribution of *Macadamia* sp. in China's suitable areas

2.4 未来不同气候情景下中国澳洲坚果适生区预测

不同时间阶段，各气候情景适生区面积有较大差异（图 7 和图 8）。2040s 时期，SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 气候情景下澳洲坚果适生区总面积分别为 19.40×10^4 、 20.47×10^4 、 $19.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，分别占总适生区面积的 2.02%、2.13%、2.00%。其中，2040s SSP5-8.5 云南省适生区面积最大，达到 $7.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2060s 适生区面积从大到小依次为 SSP1-2.6 ($20.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.11%) > SSP2-4.5 ($19.69 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.05%) > SSP5-8.5 ($18.51 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1.93%)，云南、西藏、福建、海南等地适生区面积有所增加。2080s 适生区面积依次为 SSP1-2.6 ($19.89 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.07%) > SSP2-4.5 ($19.70 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.05%) > SSP5-8.5 ($18.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1.96%)。2100s 适生区面积依次为 SSP1-2.6 ($20.84 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.17%) > SSP5-8.5 ($19.98 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2.08%) > SSP2-4.5 ($19.03 \times 10^4 \text{ km}^2$, 1.98%)。由此可见，在 SSP1-2.6 更适宜澳洲坚果的生长发育。

不同气候情景下高适生区面积的变化也有差异，SSP1-2.6 气候情景下，澳洲坚果高适生区面积呈降低趋势，2040s 是高适生区面积最大 ($0.42 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的时期；SSP2-4.5 气候情景下，高适生区面积呈增加趋势，2100s 高适生区面积增至 $0.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；在 SSP5-8.5 气候情景下，2020—2100 年高适生区面积表现为“增-减-增-减”，2040s、2060s、2080s 和 2100s 高适生区面积分别为 0.51×10^4 、 0.39×10^4 、 0.69×10^4 、 $0.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

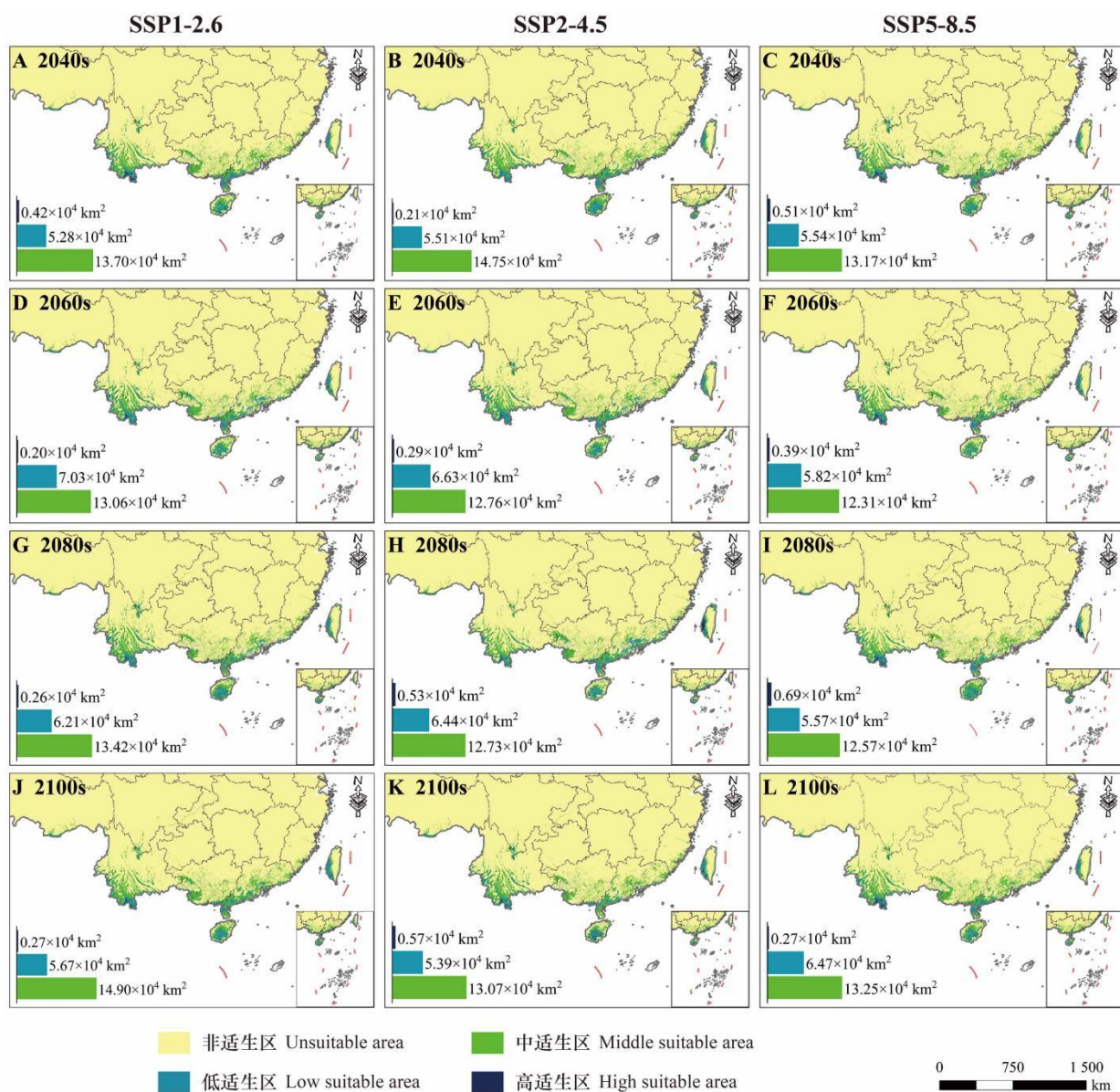


图 7 不同气候情景下澳洲坚果不同适生等级面积变化

Fig. 7 Changes in the area of different suitability classes of *Macadamia* sp. under different climatic scenarios

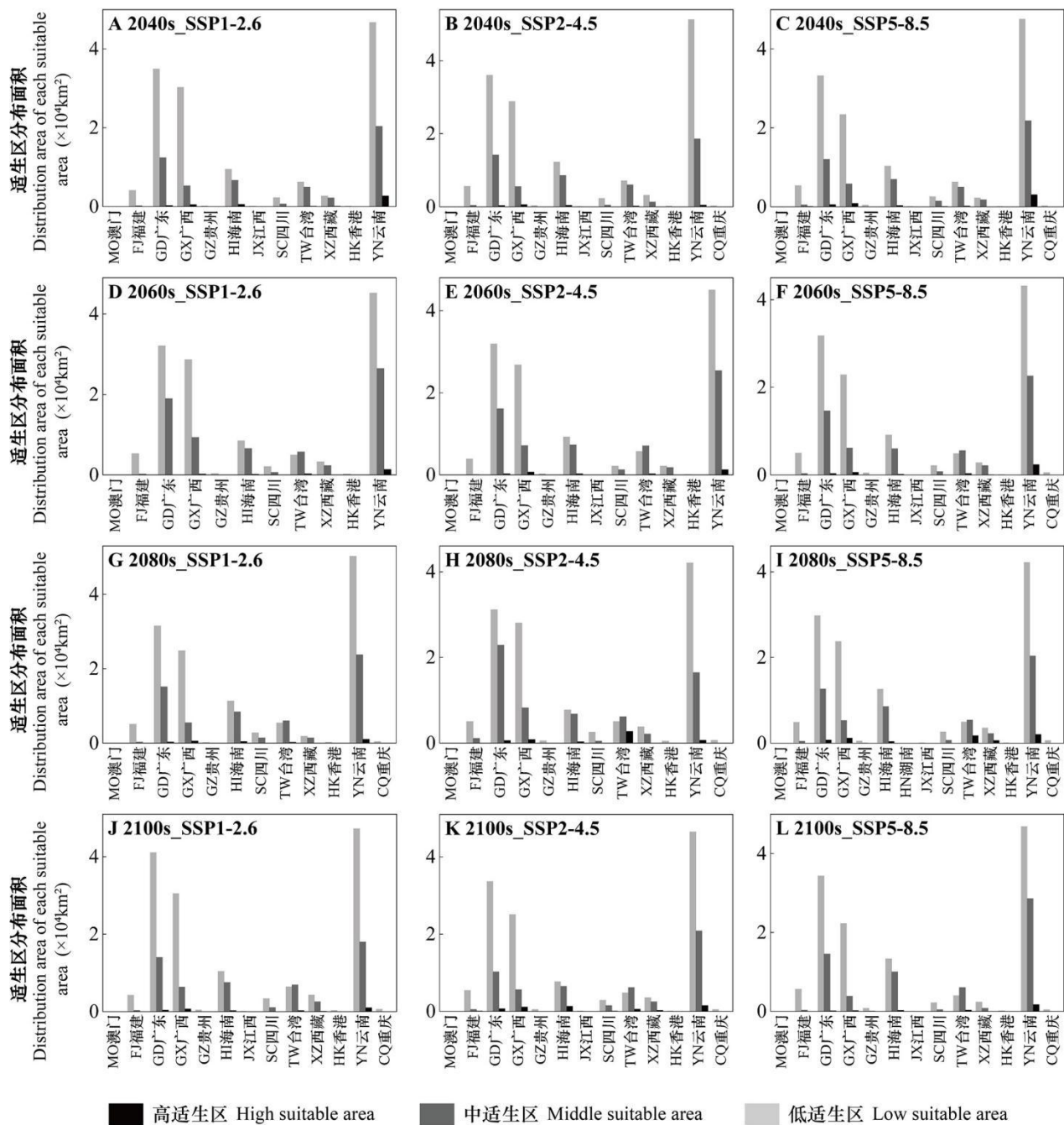


图 8 不同气候情景下澳洲坚果各适生区在我国不同省（区）的面积变化

Fig.8 Changes in the area of various *Macadamia* sp. growing areas in different provinces (regions) of China under different climate scenarios

2.5 澳洲坚果适生区范围变化

与现行气候相比，2020—2100 年，4 种气候情景下澳洲坚果适生区总面积呈下降趋势，随时间变化，澳洲坚果适生区面积呈现波动变化，适生区内部逐渐破碎化，由集中连片分布转变为不连续、破碎化分布（图 9），总适生区面积与现行气候相比减少了 48.10%~53.89%，适生区主要分布于云南、广西、广东、海南等西南和华南地区，四川、重庆、江西、澳门和香港有零星分布，其中云南省澳洲坚果适生区面积最广，广东和广西次之。

SSP1-2.6 气候情景下，随时间变化，澳洲坚果适生区面积先收缩后稍有扩张，总体呈现收缩趋势，

现行气候至 2040s，澳洲坚果适生区呈现收缩面积最大 ($25.27 \times 10^4 \text{ km}^2$)，收缩比例为 51.63%，收缩区域集中在云南、广西中部及西南部、广东和海南等地；2040s 至 2060s，澳洲坚果适生区面积稍呈扩张趋势，扩张面积为 $2.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；2060s 至 2080s，澳洲坚果适生区面积变化较小，扩张和收缩面积分别为 $2.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；2080s 至 2100s，澳洲坚果潜在适生区扩张面积 ($3.24 \times 10^4 \text{ km}^2$) 最大，扩张区域集中于云南和福建等地，收缩区域集中在广西、广东、台湾和西藏。

SSP2-4.5 气候情景下，现行气候至 2040s，澳洲坚果适生区分布范围收缩，收缩面积为 $23.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，收缩比例为 48.97%；2040s 至 2060s，收缩面积 ($2.59 \times 10^4 \text{ km}^2$) 大于扩张面积 ($1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$)，收缩区域主要集中在云南中东部、广西西北部和广东沿海地区；2060s 至 2080s，扩张面积达 $2.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，扩张比例为 10.69%，扩张区域主要集中在云南、海南、广西中东部；2080s 至 2100s，澳洲坚果潜在适生区范围呈收缩趋势，收缩面积为 $3.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，收缩区域集中于云南、广西西部、广东沿海地区、海南北部和台湾东北部。

SSP5-8.5 气候情景下，现行气候至 2060s，澳洲坚果适生区呈收缩趋势，其中前 20 年收缩了 $25.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，收缩比例为 52.24%，收缩区域主要为云南中部，广西中东部，海南大部分及台湾东北部；2060s 至 2100s，澳洲坚果适生区呈扩张趋势，扩张面积分别为 $2.07 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $3.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，扩张区域分布在西藏林芝和山南地区、云南南部、广西中东部、海南、福建和台湾。

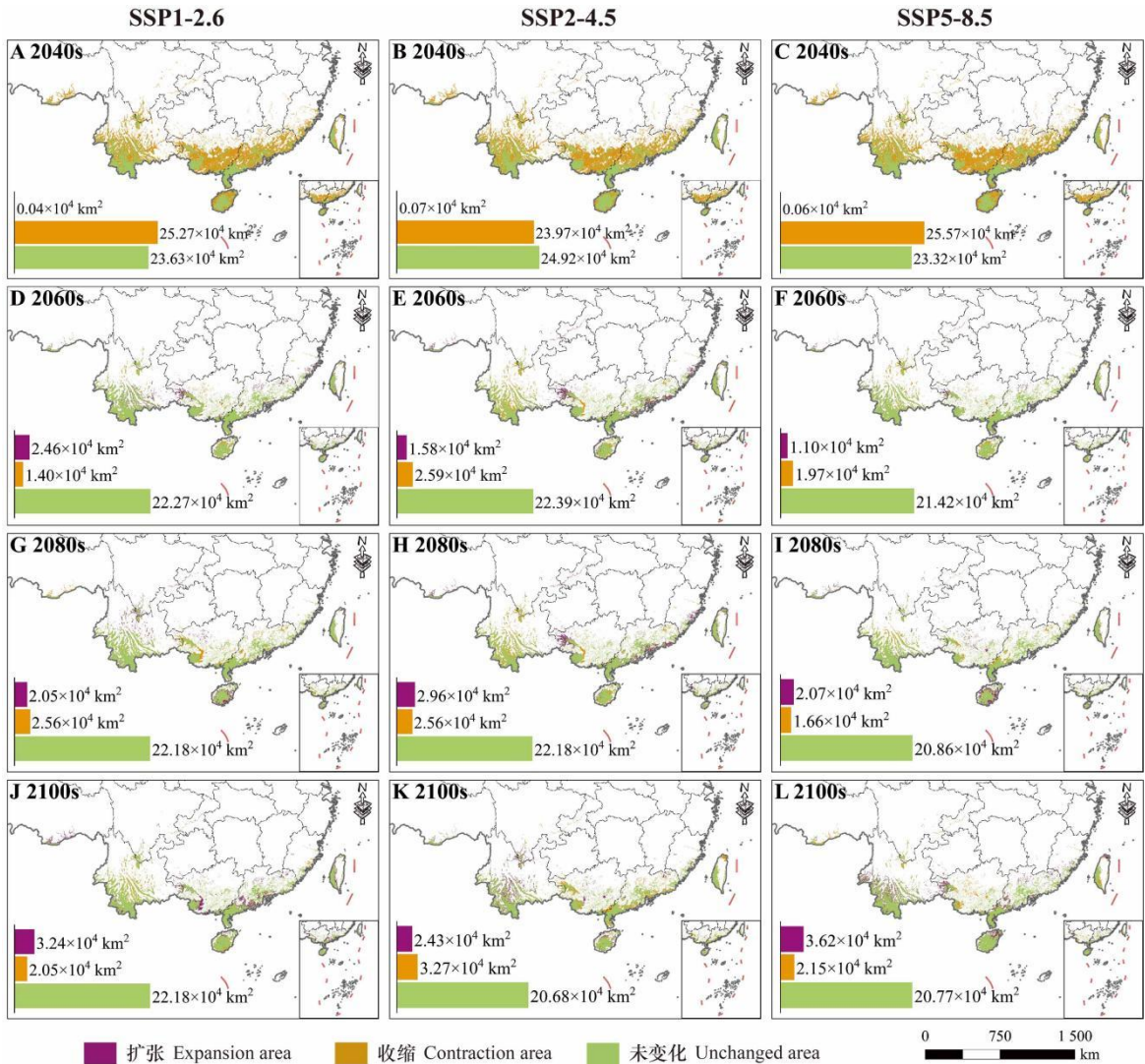


图 9 不同气候情景下我国澳洲坚果适生区分布的变化

Fig.9 Changes in the distribution of *Macadamia* sp. suitable areas in China under different climate scenarios

2.6 气候情景下澳洲坚果适生区质心分布的变化

质心分析表明, 澳洲坚果当前质心中心坐标为 (107.67° E、23.23° N), 位于广西南宁市。以现行气候质心为参照, 不同气候情景及不同时期下澳洲坚果的适生区范围整体上偏移幅度均较小 (图 10)。

SSP1-2.6 气候情景下, 4 个时期, 澳洲坚果适生区质心先向西南方向迁移 63.17 km (2040s, 107.24° E、22.85° N), 又向东北小幅移动 8.06 km (2060s, 107.28° E、22.91° N), 随后向南迁移 6.72 km (2080s, 107.28° E、22.85° N), 再向东北迁移 35.16 km (107.60° E、22.90° N), 4 个时期均位于现行气候的南偏西方向。SSP2-4.5 气候情景下, 澳洲坚果适生区质心先向东南偏移 48.94 km (2040s, 107.69° E、22.80° N), 再向西北移动 35.15 km (2060s, 107.37° E、22.88° N), 随后向东迁移 72.40 km (2080s, 108.05° E、22.95° N), 到 2100s 向西迁移了 92.75 km (107.18° E、23.03° N), 位于现行气候情景下澳洲坚果适生区之心的西南方; SSP5-8.5 气候情景下, 澳洲坚果适生区质心向南偏移距离最大, 4 个时期均位于现行气候质心的西南方向, 其中 2040s 迁移距离最大, 为 53.43 km。

SSP1-2.6 气候情景下质心呈现西南-东北-南-东北的迁移趋势, SSP2-4.5 气候情景下质心呈现南-西北-东北-西的迁移趋势, SSP5-8.5 气候情景下质心呈现西南-西南-东南-西南的迁移趋势。

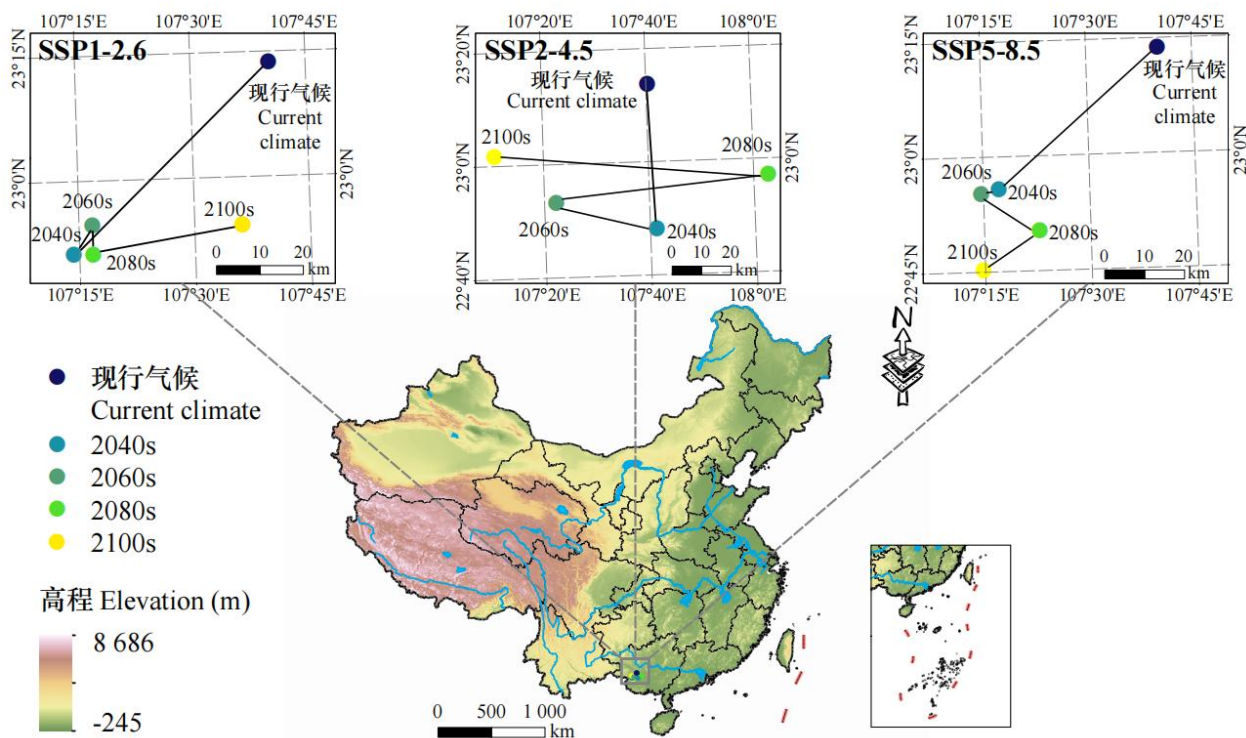


图 10 不同气候情景下澳洲坚果适生区质心变化

Fig.10 Changes in *Macadamia* sp. suitable area center of mass under different climate scenarios

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型预测结果的可靠性

本研究基于 CMIP6 气候模式(Li et al., 2020), 在现行气候基础上, 选取 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 3 种代表性气候情景对 2040s 至 2100s 的澳洲坚果潜在适生区变化进行模拟分析。各气候情景下模型运行结果 AUC 值在 0.900 以上, 预测结果准确。

虽然 MaxEnt 已被广泛应用于潜在地理分布预测研究, 但 MaxEnt 模型仍然存在部分局限性, 如环境变量和物种样本量选择不当或遗漏将会对模型运行及预测结果产生一定影响(朱耿平等, 2013; 王雨生等, 2019)。本研究选用了气候、地形和土壤等环境变量输入 MaxEnt 模型, 并使用刀切法剔除了贡献率较小

的环境变量，虽然降低了其他多余信息对模拟结果的影响，但是仅考虑了常用的非生物因素，忽略了生物因素（如物种间的相互作用和植被类型等）以及人类活动等环境变量对生态位的影响。在后续研究中应综合考虑其他环境变量，以保证模型预测结果的准确性，从而有助于扩大澳洲坚果的引种和人工栽培范围。

3.2 影响澳洲坚果分布的主导因子

不同的环境深刻地影响着植物的生长发育和地理分布格局(杨佳悦等, 2025)，而引种树木的关键是气候(吕增伟等, 2024)。本研究研究发现我国澳洲坚果分布主要受到气温和降水的影响，当年均气温为 20~25 °C、年均降水量在 1 550~4 800 mm 范围内、等温性为 45%~54%、年均气温变化范围<8°C时，澳洲坚果的适生程度最高。以往研究认为澳洲坚果能耐受低温和轻度干旱，最理想的生长条件为年均气温 20~25 °C、年均降水>1 500 mm(冯源等, 1999)，这与本研究结果大致相符。

澳洲坚果原产于澳大利亚亚热带雨林地区（25°—30° S），这与澳洲坚果高适生区在我国的分布范围（19°—29° N）相似，这说明我国的澳洲坚果分布范围与原产地的气候条件大致对应。此外，西南地区和华南沿海地区受南亚季风和东亚季风影响，降水充足且湿期长(杜军凯等, 2023)，降水量也会影响土壤 P 含量和澳洲坚果的生物量(唐涛等, 2024)。后续可以不同地区开展长期气候定点监测，引进优良种源进行种植，获得适应性更强的种源，从而扩大澳洲坚果引种范围。

3.3 澳洲坚果潜在适生区的分布

本研究借助各环境因子评估澳洲坚果在中国的分布情况和适宜程度进行评估，旨在为澳洲坚果种植区划和规模化种植提供科学依据，对推动地区优势特色产业和经济链发展具有重要理论意义和实践价值。各情景下澳洲坚果分布在空间上发生位移且逐渐显现出破碎化和面积减少的特点，我国高适生区均主要分布于我国西藏南部、云南、广西、广东、海南、四川南部、重庆西南部、贵州、湖北、湖南、江西、香港、浙江等热带和亚热带地区。现行气候下适生区集中分布于云南、广西、广东、海南、台湾等省份和地区，其中云南是澳洲坚果适生区分布最广的省份，广东次之。澳洲坚果倾向于在热量充足、降水充沛的地区生长。不同未来气候情景下的澳洲坚果潜在适生区稳定分布于我国西南及华南地区、西藏东南边缘、海南和台湾等地。目前，澳洲坚果种质资源不断创新，为保证澳洲坚果的质量和产量，澳洲坚果规模化种植同样应考虑水热条件对澳洲坚果的影响，因地制宜制定澳洲坚果种植区划，发展现代澳洲坚果产业。在未来新增加的适生区内可选取适宜的优良品种进行种植，根据当地生境特点制定合理的生态调控措施，逐步开展人工引种栽培实验。

本研究未见澳洲坚果在西藏的分布记录，但 MaxEnt 模型输出结果表明澳洲坚果在现行气候下集中分布于西藏东南部的山南市和林芝市南部，这一区域均属于藏南谷地，该地无高大山脉阻挡，且南部印度洋暖湿气流带来热量和水分，具有亚热带气候特征(陈禹光等, 2022)，因此澳洲坚果适宜在该地生长发育。2017 年西藏自治区农牧科学院蔬菜研究所引进澳洲坚果，在藏东南地区成功种植，这说明该研究结果符合实际(王文华等, 2018)。但西藏南部和云南等内陆地区远离海洋，光热充足，但由于降水分布不均匀，容易出现干旱问题(冯源等, 1999)，在后续引种植时应当合理制定保护措施。澳洲坚果根系较浅、抗风能力弱(刘姚等, 2023)，台湾、海南和华南等地区临近海洋，夏季容易出现台风，因此在沿海地区种植时需选择背风坡或建造防风林。

4 结论

MaxEnt 模型极好地模拟了澳洲坚果在中国的潜在分布（AUC=0.966），并筛选出影响澳洲坚果在中国潜在分布最关键的主导因子是年均温，其贡献率达到 64.9%，其次是年均降水量和等温性，贡献率分别为 14.9%和 11.5%。澳洲坚果最适生长条件为年均气温 20~25 °C，年均降水量高于 1 500 mm，具有较高的等温性的热带亚热带湿润区域。

现行气候情景下，澳洲坚果当前在中国的潜在生态适宜范围为 91.0°—122.0° E、18.1°—31.6° N，适生区总面积为 40.15×10⁴ km²，占全国总面积的 4.18%。与现行气候情景相比，各气候变化情景各时期中

国澳洲坚果适生区面积均大幅下降, SSP5-8.5 气候情景下澳洲坚果的适生区面积最小, 中、低适生区面积在各时期各气候情景下均低于现行气候的水平, 这说明相较于其他未来气候情景, SSP5-8.5 气候情景下更不适宜澳洲坚果的生长。中国各省域相比, 3 种未来气候情景下, 澳洲坚果均在云南省分布面积最大, 其次是广东和广西等东南沿海地区。气候变化过程中, 中国澳洲坚果适生区分布范围变化同时呈现收缩和扩张状态。随气温升高, 虽然澳洲坚果潜在适生区面积总面积降低, 但高适生区面积则不断增加。未来气候情景下澳洲坚果适生区质心迁移各异, 但适生区质心始终位于热带地区。

参考文献:

- ADHIKARI RK, YILMAZ AG, MAINALI B, et al., 2024. Performance evaluation of CMIP6 models for application to hydrological modelling studies — A case study of Australia. *Science of the Total Environment*, 945: 174015.
- AI JW, LIU GD, HUANG XX, et al., 2018. Analysis of current situation and development trend regarding *Macadamia nut* industry [J]. *The Food Industry*, 39(11): 282-285. [艾静汶, 刘功德, 黄欣欣, 等, 2018. 澳洲坚果产业发展现状与趋势[J]. *食品工业*, 39(11): 282-285.]
- BEAUMONT LJ, HUGHES L, POULSEN M, 2005. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions[J]. *Ecological Modelling*, 186(2): 251-270.
- BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity[J]. *Ecology Letters*, 15(4): 365-377.
- BOOTH TH, NIX HA, BUSBY JR, et al., 2014. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies[J]. *Diversity and distributions*, 20(1): 1-9.
- CHEN CH, LONGZHU DJ, LU XW, et al., 2023. Habitat suitability of *Corydalis* based on the optimized MaxEnt model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 43(24): 10345-10362. [陈程浩, 龙主多杰, 陆徐伟, 等, 2023. 基于优化 MaxEnt 模型的中国紫堇属植物生境适宜性研究[J]. *生态学报*, 43(24): 10345-10362.]
- CHEN YG, LE XG, CHEN YH, et al., 2022. Identification of the potential distribution area of *Cunninghamia lanceolata* in China under climate change based on the MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33(5): 1207-1214. [陈禹光, 乐新贵, 陈宇涵, 等, 2022. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布[J]. *应用生态学报*, 33(5): 1207-1214.]
- DU JK, QIU YQ, LI YL, et al., 2023. Evolution characteristics of the inter-annual and intra-annual precipitation in China from 1956 to 2016 [J]. *Advances in Water Science*, 34(2): 182-196. [杜军凯, 仇亚琴, 李云玲, 等, 2023. 1956—2016 年中国年降水量及其年内分配演变特征[J]. *水科学进展*, 34(2): 182-196.]
- DU LQ, ZOU MH, ZENG H, et al., 2010. Analysis of the Nutritional Components of *Macadamia integrifolia* Kernel [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 32(1): 95-96. [杜丽清, 邹明宏, 曾辉, 等, 2010. 澳洲坚果果仁营养成分分析[J]. *营养学报*, 32(1): 95-96.]
- Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences, 1988. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae* [M]. Beijing: Science Press, 24: 28. [中国科学院中国植物志编辑委员会, 1988. *中国植物志* [M]. 北京: 科学出版社, 24: 28.]
- FENG Y, HE Y, 1999. Analysis of climatic adaptability for introduction of Australian nut in Guangxi [J]. *Journal of Guangxi Meteorology*, 20(4): 43-45. [冯源, 何燕, 1999. 广西引种澳洲坚果的气候适应性分析[J]. *广西气象*, 20(4): 43-45.]
- FICK SE, HIJMANS RJ, 2017. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315.
- FU C, WEN X, SHI Z, et al., 2024. Potential distribution prediction of *Ceracris kiangsu* Tsai in China [J]. *Scientific Reports*, 14(1), 13375.

- GUISAN A, WEISS S B, WEISS AD, 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution [J]. *Plant Ecology*, 143: 107-122.
- GUO KQ, JIANG XL, XU GB, 2021. Potential suitable distribution area of *Quercus lamellosa* and the influence of climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 40(8): 2563-2574. [郭恺琦, 姜小龙, 徐刚标, 2021. 薄片青冈潜在适生区及气候变化对其分布的影响 [J]. *生态学杂志*, 40(8): 2563-2574.]
- HARRISON S, SPASOJEVIC MJ, LI D, 2020. Climate and plant community diversity in space and time[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(9): 4464-4470.
- HE XY, NIE YL, WU X, et al., 2022. Suggestions for high-quality development of Yunnan macadamia nut industry [J]. *South China Fruits*, 51(4): 205-210. [贺熙勇, 聂艳丽, 吴霞, 等, 2022. 云南澳洲坚果产业高质量发展的建议[J]. *中国南方果树*, 51(4): 205-210.]
- HE XY, TAO L, LIU J, et al., 2015. Overview and development trend of the world macadamia industry [J]. *South China Fruits*, 44(4): 151-155. [贺熙勇, 陶亮, 柳颀, 等, 2015. 世界澳洲坚果产业概况及发展趋势 [J]. *中国南方果树*, 44(4): 151-155.]
- HOWLETT BG, NELSON WR, PATTEMORE DE, GEE M, 2015. Pollination of macadamia: Review and opportunities for improving yields [J]. *Scientia Horticulturae*, 197: 411-419.
- JIAO Y, ZOU MH, ZENG H, et al., 2008. Research Progress of Macadamia [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36(8): 3366-3368. [焦云, 邹明宏, 曾辉, 等, 2008. 澳洲坚果研究进展[J]. *安徽农业科学*, 36(8): 3366-3368.]
- LI BY, PAN BT, HAN JF, 2008. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions [J]. *Quaternary Sciences*, 28(4): 535-543. [李炳元, 潘保田, 韩嘉福, 2008. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. *第四纪研究*, 28(4): 535-543.]
- LI JY, CHEN YT, GUO YQ, et al., 2023. Potential suitable areas of *Symphytotrichum subulatum* based on MaxEnt under future climate scenarios [J]. *Plant Protection*, 49(2): 92-102. [李建宇, 陈燕婷, 郭燕青, 等, 2023. 基于 MaxEnt 预测未来气候条件下钻叶紫菀在中国的潜在适生区[J]. *植物保护*, 49(2): 92-102.]
- LI SY, MIAO LJ, JIANG ZH, et al., 2020. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 11(3): 210-7.
- LI Y, ZHANG XW, FANG YM, 2014. Predicting the impact of global warming on the geographical distribution pattern of *Quercus variabilis* in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(12): 3381-3389. [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[J]. *应用生态学报*, 25(12): 3381-3389.]
- LI ZG, RUAN FY, ZHANG XQ, 2024. Potential suitable habitats for *Macadamia integrifolia* under climate change scenarios based on maximum entropy model [J]. *Forest Inventory and Planning*, 49(2): 191-197. [李章贵, 阮方佑, 张学全, 2024. 基于最大熵模型的气候变化情景下澳洲坚果潜在适宜生境研究[J]. *林业调查规划*, 49(2): 191-197.]
- LIU JF, HUANG L, 2005. Nutritional value of macadamia nuts and its exploitation and utilization [J]. *Food and Nutrition in China*(2): 25-26. [刘建福, 黄莉, 2005. 澳洲坚果的营养价值及其开发利用[J]. *中国食物与营养*(2): 25-26.]
- LIU PF, WANG L, DU QX, et al., 2020. Estimation of potential suitable distribution area and the ecological characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliv. in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(16): 5674-5684. [刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 等, 2020. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析[J]. *生态学报*, 40(16): 5674-5684.]
- LIU Y, HE N, ZENG XS, et al., 2023. Literature analysis and future development of macadamia research [J]. *South China Fruits*, 52(3): 247-249. [刘姚, 何楠, 曾小姗, 等, 2023. 关于澳洲坚果研究的文献分析及发

- 展趋势[J]. 中国南方果树, 52(3): 247-249.]
- LÜ JJ, WU JG, 2009. Advances in the effects of climate change on the distribution of plant species and vegetation in China [J]. Environmental Science & Technology, 32(6): 85-95. [吕佳佳, 吴建国, 2009. 气候变化对植物及植被分布的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 32(6): 85-95.]
- LÜ ZW, ZHU XR, YE XZ, et al., 2024. Impacts of climate change on the suitable habitats and spatial migration of *Tetraena mongolica* [J]. Acta Ecologica Sinica, 44(3): 1164-1176. [吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 等, 2024. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响[J]. 生态学报, 44(3): 1164-1176.]
- MANTYKA-PRINGLE CS, MARTIN TG, et al., 2012. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: a systematic review and meta-analysis[J]. Global Change Biology, 18(4): 1239-1252.
- MICHAELIDES S, 2023. Modes of atmospheric energetics based on HadGEM3-GC3. 1-LL simulations in the framework of CMIP6[J]. Advances in Meteorology, 2023(1): 3956086.
- MILLER RG, 1974. The jackknife-a review[J]. Biometrika, 61(1): 1-15.
- NIE YL, LI CP, WANG L, et al., 2023. Effects of planting scale and management level on macadamia nut yield [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 43(3): 161-168. [聂艳丽, 李翠萍, 王丽, 等, 2023. 种植规模及管理水平对澳洲坚果产量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 43(3): 161-168.]
- PERDONÁ MJ, SORATTO RP, 2015. Higher yield and economic benefits are achieved in the macadamia crop by irrigation and intercropping with coffee [J]. Scientia Horticulturae, 185: 59-67.
- PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE RE, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 190(3-4): 231-59.
- RAMIREZ-CABRAL NYZ, KUMAR L, SHABANI F, 2017. Global alterations in areas of suitability for maize production from climate change and using a mechanistic species distribution model (CLIMEX)[J]. Scientific Reports, 7(1): 5910.
- SHCHEGLOVITOVA M, ANDERSON RP, 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes[J]. Ecological Modelling, 269: 9-17.
- SHI XQ, SHEN JX, HE CL, et al., 2025. Analysis of habitat suitability and conservation gap of the Yunnan snub-nosed Monkey based on MaxEnt model [J]. Chinese Journal of Wildlife, 46(1): 14-23. [石小倩, 沈金祥, 和春兰, 等, 2025. 基于 MaxEnt 模型的滇金丝猴生境适宜性及保护空缺分析[J]. 野生动物学报, 46(1): 14-23.]
- SOMWONGIN S, SIRILUN S, CHANTAWANNAKUL P, ANUCHAPREEDA S, YAWOOTTI A, CHAIYANA W, 2023. Ultrasound-assisted green extraction methods: An approach for cosmeceutical compounds isolation from *Macadamia integrifolia* pericarp [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 92: 106266.
- STOCKMAN AK, BEAMER DA, BOND JE, 2006. An evaluation of a GARP model as an approach to predicting the spatial distribution of non-vagile invertebrate species[J]. Diversity and Distributions, 12(1): 81-89.
- SWETS JA, 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 240(4857): 1285-1293.
- TANG T, WEN SJ, CHAI JQ, et al., 2024. Research progress on regularity of nutrient activation and phosphorus nutrition in macadamia rhizosphere soil [J]. South China Fruits, 53(6): 276-281. [唐涛, 文思捷, 柴佳琪, 等, 2024. 澳洲坚果根际土壤养分活化与磷素营养规律研究进展[J]. 中国南方果树, 53(6): 276-281.]
- TAYLOR S, KUMAR L, 2013. Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: A case study of *Lantana camara* L. in Queensland, Australia [J]. Journal of Environmental Management, 114: 414-422.
- WANG CH, WEN YB, REN WZ, 2023. Classification of suitable planting areas for *Macadamia ternifolia* in Yunnan based on GIS [J]. Forest Inventory and Planning, 48(3): 46-49. [王翠华, 文涌彬, 任万竹, 2023.

- 基于 GIS 的澳洲坚果在云南适宜种植区划分研究[J]. 林业调查规划, 48(3): 46-49.]
- WANG JJ, PEI TF, 2004. Effects of climate change on forest succession [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(10): 1722-1730. [王纪军, 裴铁璠, 2004. 气候变化对森林演替的影响[J]. 应用生态学报, 15(10): 1722-1730.]
- WANG W, TIAN RR, NA LY, et al., 2017. Predicting potential geographic suitable regions of *Macadamia integrifolia* based on MaxEnt [J]. Forest Research, 30(3): 444-449. [王伟, 田荣荣, 那立妍, 等, 2017. 基于 MaxEnt 生态软件划分澳洲坚果的潜在地理适生区[J]. 林业科学研究, 30(3): 444-449.]
- WANG WH, 2018. Climate adaptation analysis of introduced tropical fruit trees in southeast Tibet [J]. China Tropical Agriculture(1): 6-8,5. [王文华, 2018. 藏东南引种热带果树气候适应性分析[J]. 中国热带农业(1): 6-8,5.]
- WANG WL, ZHANG T, TANG XH, et al., 2022. Overview and development model exploration of *Macadamia* industry in China [J]. Journal of Agricultural Research and Application, 35(4): 44-50. [王文林, 张涛, 汤秀华, 等, 2022. 中国澳洲坚果产业概况与发展模式探索[J]. 农业研究与应用, 35(4): 44-50.]
- WANG Y, WANG JH, WANG FD, et al., 2023. Simulation of suitable distribution areas of *Picea koraiensis* in China since the last interglacial and under future climate scenarios [J]. Scientia Silvae Sinicae, 59(12): 1-12. [王亚, 王军辉, 王福德, 等, 2023. 末次间冰期以来及未来气候情景下红皮云杉适生分布区模拟[J]. 林业科学, 59(12): 1-12.]
- WANG YS, WANG ZH, XING HF, et al., 2019. Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucrata* Baill in China based on MaxEnt [J]. Chinese Journal of Ecology, 38(4): 1230-1237. [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[J]. 生态学杂志, 38(4): 1230-1237.]
- WILLIAMS CJR, SELLAR AA, REN X, et al., 2021. Simulation of the mid-Pliocene Warm Period using HadGEM3: experimental design and results from model-model and model-data comparison[J]. Climate of the Past, 17(5): 2139-2163.
- YANG JY, DING GY, TIAN XJ, 2025. Research progress on the application of the MaxEnt model in species habitat prediction [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 36(2): 614-624. [杨佳悦, 丁国玉, 田秀君, 2025. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 36(2): 614-624.]
- YANG SY, AN MT, LIU F, et al., 2023. Prediction of potential suitable area of *Phoebe zhennan* Guizhou Province based on MaxEnt model [J]. Guihaia, 43(5): 846-857. [杨善云, 安明态, 刘锋, 等, 2023. 基于 MaxEnt 模型的贵州省楠木潜在适生区预测[J]. 广西植物, 43(5): 846-857.]
- YING BK, TIAN K, GUO HY, et al., 2024. Predicting potential suitable habitats of *Kandelia obovate* in China under future climatic scenarios based on MaxEnt model [J]. Acta Ecologica Sinica, 44(1): 224-234. [应邦肯, 田阔, 郭浩宇, 等, 2024. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情境下红树秋茄(*Kandelia obovata*)在中国潜在适生区的变化[J]. 生态学报, 44(1): 224-234.]
- ZENEBE G, ZENEBE A, BIRHANE E, et al., 2024. Revealing suitable habitats for *Juniperus procera* and *Olea europaea* tree species in the remnant dry Afromontane forests of Ethiopia: Insights from ensemble species distribution modeling approach [J]. Ecology and Evolution, 14(10): e70343.
- ZENG WY, WANG DZ, YE C, et al., 2025. Prediction of potential distribution of *Cupressus gigantea* W. C. Cheng & L. K. Fu in China based on optimized MaxEnt modeling [J]. Plant Science Journal, 43(1): 52-62. [曾伟英, 王德智, 叶琛, 等, 2025. 基于优化的 MaxEnt 模型对全国巨柏潜在分布的预测[J]. 植物科学学报, 43(1): 52-62.]
- ZHANG FH, YANG Q, SONG XM, et al., 2024. Progress in physiology and technology of *Macadamia integrifolia* cultivation in the last 5 years [J]. China Fruit News, 41(12): 83-86, 89. [张凤花, 杨倩, 宋喜梅, 等, 2024. 近 5 年澳洲坚果栽培生理与技术研究进展[J]. 中国果业信息, 41(12): 83-86, 89.]

- ZHANG Y, TANG J, REN G, et al., 2021. Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on MaxEnt model[J]. Scientific Reports, 11(1): 16545.
- ZHANG YB, LIU YL, QIN H, et al., 2019. Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 30(2): 496-502. [张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 等, 2019. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测[J]. 应用生态学报, 30(2): 496-502.]
- ZHAO Y, DENG XW, XIANG WH, et al., 2021. Predicting potential suitable habitats of Chinese fir under current and future climatic scenarios based on MaxEnt model [J]. Ecological Informatics, 64(15): 101393.
- ZHAO Z, XIAO N, SHEN M, et al., 2022. Comparison between optimized MaxEnt and random forest modeling in predicting potential distribution: A case study with *Quasipaa boulengeri* in China[J]. Science of the Total Environment, 842: 156867.
- ZHENG XY, WANG QZ, TIAN YQ, et al., 2024. Prediction of potential suitable of tea shot-hole borer *Euwallacea fornicatus* in China based on MaxEnt model [J]. Journal of Plant Protection, 51(6): 1518-1530. [郑晓毅, 王钦召, 田语卿, 等, 2024. 基于 MaxEnt 模型预测茶方胸小蠹在中国的潜在适生区[J]. 植物保护学报, 51(6): 1518-1530.]
- ZHU GP, LIU GQ, BU WJ, 2013. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. Biodiversity Science, 21(1): 90-98. [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等, 2013. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 21(1): 90-98.]
- ZHU GP, QIAO HJ, 2016. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions [J]. Biodiversity Science, 24(10): 1189-1196. [朱耿平, 乔慧捷, 2016. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 24(10): 1189-1196.]