

融合 MaxEnt 模型与博弈赋权的三亚市芒果种植适宜性评价研究

李振宇^{1,2,3}, 马艺文^{1,2}, 禹 萱^{1,2}, 罗红霞^{1,2}, 叶剑秋^{1,2*}, 赵忠贺⁴, 陈 刚^{1,2}, 李汉棠^{1,2}

1. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海南海口 571101; 2. 海南省唐华俊院士工作站, 海南海口 571101; 3. 海南省土地学会, 海南海口 571132; 4. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081

摘 要: 芒果是我国热带地区种植面积最广、经济效益最为显著的果树之一, 在优化农业结构和推动乡村振兴中具有重要作用。科学划定芒果种植适宜区, 对于实现资源精准配置与促进产业高质量发展具有重要意义。然而, 现有研究多侧重于气候与地形因素, 对土壤理化性质的系统考虑不足, 且适宜性评价过程中仍存在指标选取主观性强、方法集成度低等问题。针对上述不足, 本研究以三亚市为研究区, 构建芒果种植适宜性综合评价模型。首先利用 MaxEnt 模型识别关键环境因子, 并提取响应曲线构建隶属度函数; 其次, 结合改进的三尺度层次分析法 (3-scale AHP) 与熵权法分别确定主客观权重, 并通过博弈论模型进行融合加权; 最后, 基于综合适宜性指数将研究区划分为三类种植区, 并通过实地调查进行验证。结果显示: (1) 容重、pH、阳离子交换量 (CEC)、粉粒含量、全钾、土壤类型、坡度、海拔、成熟采收期日照时数与年均最高温共 10 项因子为主导指标, 其中土壤因子在模型中占据重要地位; (2) 适宜区面积为 117 939 hm², 占全市总面积的 61%, 优势区主要集中在崖州区南部和天涯区南部等地; (3) 优势区具备“低海拔-弱酸性-富钾-通透性强-高日照”特征, 有利于实现芒果优质稳产。本研究构建的“因子筛选-隶属函数构建-博弈加权-适宜性区划”综合评价框架, 可为热带果树精准种植与区域农业空间布局优化提供理论支撑与方法参考。

关键词: 芒果; 种植适宜性评价; MaxEnt 模型; 博弈加权; 三亚市

中图分类号: S162.5; S127 **文献标志码:** A

Mango Cultivation Suitability Assessment in Sanya City Based on MaxEnt Model and Game Theory Weighting Integration

LI Zhenyu^{1,2,3}, MA Yiwen^{1,2}, YU Xuan^{1,2}, LUO Hongxia^{1,2}, YE Jianqiu^{1,2*}, ZHAO Zhonghe⁴, CHEN Gang^{1,2}, LI Hantang^{1,2}

1. Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Hainan Tang Huajun Academician Workstation, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Hainan Land Science Society, Haikou, Hainan 571132, China; 4. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Mango is one of the most widely cultivated and economically significant fruit trees in tropical regions of China, playing a vital role in optimizing agricultural structure and promoting rural revitalization. Scientifically delineating suitable planting zones for mango is essential for precise resource allocation and the high-quality development of the industry. However, most existing studies focus on climatic and topographic factors, with insufficient systematic

收稿日期 2025-07-31; **接受日期** 2025-09-25

基金项目 海南省土地学会开放课题[No. HNLSSH(2024)-06]; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630072024017); 中国热带农业科学院科技支撑县域农业产业项目 (No. KJZCCY2025001)。

作者简介 李振宇 (1994—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 热带资源遥感。*通信作者 (Corresponding author): 叶剑秋 (YE Jianqiu), E-mail: yejianqiu2006@126.com。

consideration of soil physicochemical properties. In addition, current suitability evaluations often suffer from strong subjectivity in indicator selection and low integration of evaluation methods. To address these gaps, this study took Sanya city as the research area and developed a comprehensive evaluation model for mango planting suitability. First, the MaxEnt model was employed to identify key environmental factors and extract response curves for constructing membership functions. Second, an improved three-scale Analytic Hierarchy Process (3-scale AHP) and the entropy weight method were applied to determine subjective and objective weights, respectively, which were then integrated using a game theory-based weighting approach. Finally, the study area was classified into three planting suitability zones based on a comprehensive suitability index, and field surveys were conducted for validation. Bulk density, pH, cation exchange capacity (CEC), silt content, total potassium, soil type, slope, elevation, sunshine hours during the fruit maturity and harvest period, and annual maximum temperature were the ten dominant factors, with soil-related variables playing a critical role in the model. The suitable area covered 117 939 hm², accounting for 61% of Sanya's total area, with the most advantageous zones concentrated in southern Yazhou and southern Tianya. Advantageous zones were characterized by “low elevation–slightly acidic–potassium-rich–high permeability–high sunshine” conditions, which are conducive to high and stable mango yields with premium quality. The “factor selection–membership function construction–game theory-based weighting–suitability zoning” evaluation framework proposed in this study would provide both theoretical and methodological support for precision planting of tropical fruit trees and the optimization of regional agricultural spatial layouts.

Keywords: mango; cultivation suitability assessment; MaxEnt model; Game Theory Weighting; Sanya city

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.025

芒果 (*Mangifera indica* L.) 隶属于漆树科芒果属, 是一种常绿大乔木。其果实肉质细腻、风味独特, 富含碳水化合物、可溶性膳食纤维、维生素及抗氧化物质, 素有“热带果王”之称^[1]。目前, 国内芒果种植遍及海南、广东、广西、福建、云南、四川、贵州和湖南等省(区), 产业规模持续扩大, 已成为热区农业的重要支柱产业之一, 对区域经济和农村社会发展发挥了显著作用^[2]。三亚市位于海南岛南端, 属典型热带季风气候, 全年高温多雨, 日照充足且昼夜温差明显, 其独特的自然条件为芒果的优质生长提供了坚实基础。作为海南省芒果成熟期最早、产量最高且种植规模最大的优势产区, 三亚在国内外水果市场中占据重要地位, 并展现出强劲的增长潜力^[3]。随着现代农业技术的进步和全球贸易的发展, 科学的种植模式及合理的产业布局日益重要。种植适应性评价作为评估土壤理化性质、气候条件与作物生长关系的关键工具, 能够为区域作物布局和种植策略制定提供量化依据。然而, 目前芒果种植布局仍存在一定盲目性, 尤其缺乏系统的土壤适宜性评估与科学支撑, 制约了产业的提质增效。

近年来, 学者们多聚焦于芒果气候适宜性区划研究, 如吴小波等^[4]基于 GIS 与遥感技术, 采用气象指标回归模型完成贵州省芒果气候适宜性区划; 杨凯等^[5]以福建省为例, 利用主成分分析法 (PCA) 构建芒果寒害气候指标并划分风险区;

张明洁等^[6]采用集优法对海南地区开展气候适宜性精细化区划; 孙朝锋等^[7]结合寒冻害指数、层次分析法 (AHP) 与熵权法评价华南芒果种植区寒冻风险。然而, 上述研究主要聚焦气候因素, 忽视了土壤属性对芒果生长的深远影响。实际上, 芒果对土壤理化性质 (如 pH、阳离子交换量) 高度敏感, 这些因素直接影响根系发育及养分利用效率^[8]。最大熵 (MaxEnt) 模型作为一种空间环境与物种分布预测工具, 不仅可整合气候变量, 还能引入地形及土壤属性, 且对样本需求较低、预测效果优良, 已被广泛应用于植物适宜性研究^[9-13]。尽管如此, 这些研究仍存在不足: 其一, 这些研究多以粮食作物或经济作物为研究对象, 针对热带水果的研究较为缺乏; 其二, 构建的评价指标较多依赖经验判断, 缺少数据驱动的权重优化; 其三, 空间表达较为粗糙, 缺乏精细分区及具体管理建议; 其四, 不同物种的生理特性和生态适应能力存在差异, 单纯依赖 MaxEnt 预测结果难以满足实际需求。

针对上述问题, 本研究以三亚市为例, 结合野外实地调研和大量考察资料, 针对芒果种植适宜性构建系统的评价技术路径。首先, 基于专家经验及优势产区的土壤、气候和地形因子, 筛选预选评价指标; 其次, 结合相关性分析与 MaxEnt 模型筛选关键影响因子; 再次, 依据 MaxEnt 变量响应曲线构建隶属度函数, 然后进一步融合

AHP 主观权重与熵权法客观权重,通过博弈论方法优化综合权重;最后,基于各评价单元的指标值、隶属度和权重,计算综合适宜性指数,并划分优势区、适宜区与不适宜区。本研究旨在构建科学、实用的芒果土壤适宜性评价体系,为三亚市芒果产业空间优化和资源高效利用提供决策依据,同时为热带特色水果种植区划、标准制定与政策建议提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三亚市位于海南岛南端(108°56′~109°48′E, 18°09′~18°37′N),总面积 1921 km²,辖 4 个区。地形以近海低平原为主,东北部有小规模山地和丘陵,海拔在 10~200 m 之间。气候属热带季风气候区,年平均气温为 24.5 °C,年降雨量约为 1600 mm,年日照时数约为 2000 h,具有温暖湿润、光热资源丰富的特点^[14]。

1.2 数据来源

1.2.1 样点数据 本研究团队于 2019 年在研究区共采集 208 个芒果种植样点,覆盖三亚市各主要区域,其中崖州区 71 个样点,天涯区 91 个,吉阳区 14 个,海棠区 32 个。其空间分布如图 1 所示。

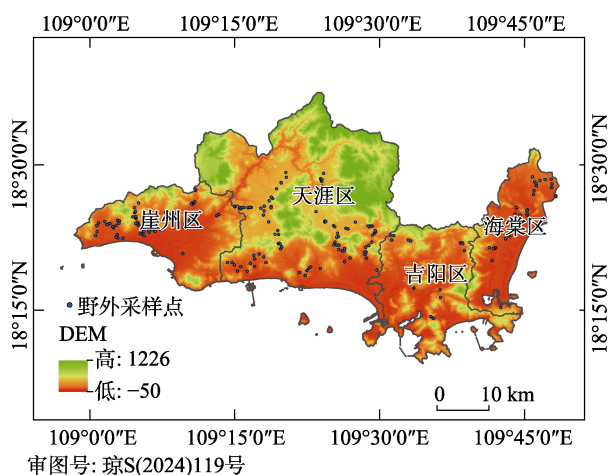


图 1 野外样点空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of field samples

1.2.2 环境变量数据 本研究所用气象数据来自三亚市 2016—2018 年 1 个国家气象站和 5 个区域气象站的月度观测记录,利用 ANUSPLIN 气象插值软件进行空间插值,生成空间分辨率为 90 m×90 m 的 1—12 月月平均气温、最高气温、最低气温、昼夜温差、相对湿度、风速、降水量和日照

时长等气象因子的栅格数据。采用加和法合成年均气候数据。

土壤数据取自国家系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/oldindex.html>)发布的“中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018 年)”,该数据集为全国土壤物理与化学基本属性的高分辨率空间分布图,包含 pH(H₂O)、有机碳含量、阳离子交换量、全氮、全磷、全钾、容重、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、土壤质地类型和土体厚度等指标,空间分辨率为 90 m×90 m,垂向数据涵盖 0~5、5~15、15~30、30~60、60~100、100~200 cm 共 6 个土层。采用等面积二次样条函数法^[15-17],结合平滑参数确定方法,根据各子层厚度及属性值,对 0~20 cm 表层土壤属性进行插值计算,获得研究区各栅格的土壤属性值。

土壤类型数据基于《1:100 万中华人民共和国土壤图》数字化生成,采用“土壤发生分类”系统作为分类依据,基本制图单元为亚类,共划分 12 个土纲、61 个土类和 227 个亚类。数据库共记录 2647 条土壤类型数据,包含 16 项主要土壤属性,全面覆盖了全国主要土壤类型及其特征。数据原始分辨率为 1 km×1 km,在 ArcGIS 10.8 软件中利用最邻近法重采样至 90 m×90 m。

地形数据来源于由航天飞机雷达地形任务(SRTM)提供的 90 m 空间分辨率数字高程模型(DEM),提取地形因子包括海拔、坡度、坡向、剖面曲率和地形湿度指数。其中,坡度和坡向通过 ArcGIS 软件计算,剖面曲率与地形指数则由 SAGA GIS 软件(<http://www.saga-gis.org>)基于 DEM 计算获得。

所有空间数据均统一采用 WGS-84 地理坐标系进行投影,并裁剪至三亚市行政范围,实现统一栅格化处理。

1.3 方法

为系统开展三亚市芒果土壤适宜性评价,本研究融合多源数据,构建了包含指标预选与筛选、隶属度函数构建与权重确定、综合适宜性指数计算在内的三大核心技术环节,整体技术流程如图 2 所示。

1.3.1 指标预选 通过文献检索^[4-8,18-20]及专家咨询,结合三亚市芒果生长的生态环境特征,初步确定土壤、气候和地形三大类评价指标。为提高适宜性评价对作物实际需求的响应能力,依据

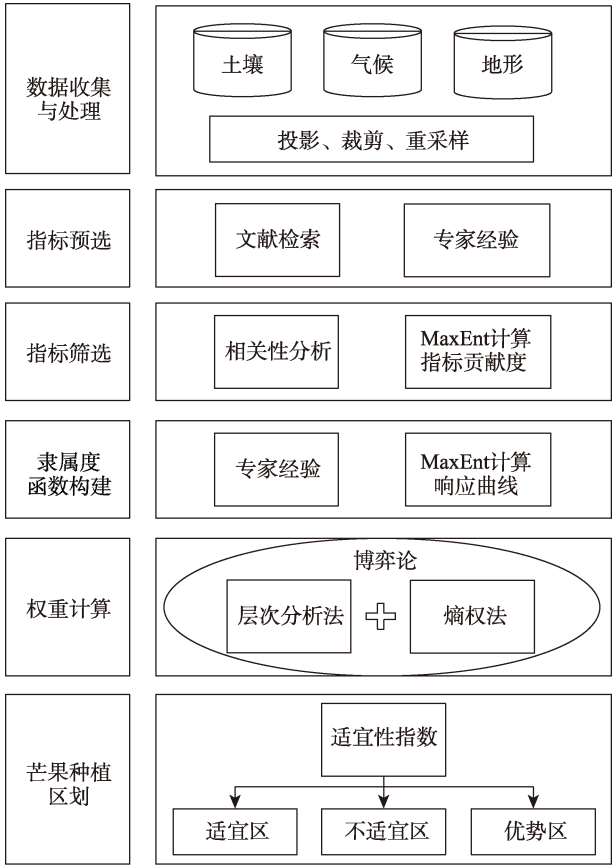


图 2 技术流程图
Fig. 2 Technical flow chart

芒果全年物候节律划分典型生育期，并针对不同阶段提取相应核心气象因子。参考多年物候观测资料及地方种植经验，将年度生育过程划分为 4 个关键阶段，并形成指标备选集（表 1）。

1.3.2 指标筛选 环境变量是模型预测的核心输入，但过多的变量可能导致模型过拟合并降低泛化能力。为优化模型性能，本研究对备选环境变量进行 Pearson 相关性分析，相关系数阈值设为 $|r| > 0.8$ ^[21]。当 2 个变量的相关系数超过该阈值时，结合后续 MaxEnt 模型的变量重要性评估结果，保留贡献度较高的变量。通过 ArcGIS 10.8 软件在样点位置提取环境变量，输入 ENMTools 前需用 Pearson 相关系数检验变量的相关性。

MaxEnt 模型基于最大熵原理，通过构建最平滑的概率分布预测物种潜在适生区，并利用最大似然估计计算各变量的重要性^[22]。本研究综合采用百分比贡献值、排列重要性与折刀检验 3 项指标进行重要性评估，运行 10 次 MaxEnt 模型取平均值，根据综合排序结果，并结合相关性分析，最终筛选出对模型预测精度与稳定性贡献最大的环境变量。

表 1 预选指标
Tab. 1 Pre-selected indicators

类别 Class	名称 Name	简称 Abbreviation	单位 Unit
土壤	pH (H ₂ O)	ph	
	有机质	om	%
	阳离子交换量	cec	cmol/kg
	全氮	tn	%
	全磷	tp	%
	全钾	tk	%
	容重	bd	g/cm ³
	砂粒含量	sand	%
	粉粒含量	silt	%
	黏粒含量	clay	%
	土壤质地	soiltex	
	土壤类型	soiltype	
气候	年均温	mat	℃
	年积温	aat	℃
	年最高温	atmax	℃
	年最低温	atmin	℃
	年均昼夜温差	adtr	℃
	年总降水量	tap	mm
	年总日照时长	asd	h
	年均相对湿度	marh	%
	年均风速	maws	m/s
	萌芽-开花期均温 (1—3 月)	mat0103	℃
地形	幼果膨大期降水量 (4—6 月)	tap0406	mm
	成熟采收期日照时 数(7—9 月)	asd0709	h
	休眠恢复期气温 (10—12 月)	mat1012	℃
	海拔	elev	m
	坡度	slope	°
	坡向	aspect	°
	剖面曲率	curv	
	地形湿度指数	twi	

1.3.3 隶属度函数构建 为消除指标单位和量纲差异，采用模糊数学中的隶属度函数方法对各评价因子进行标准化处理。根据环境变量与芒果种植适宜性之间的关系，将其归类为戒上型、戒下型、峰型和概念型四类隶属度函数^[23]。关键参数（上限值、下限值及最适宜值）通过 MaxEnt 模型响应曲线确定^[24]，以提取变量对芒果适宜性的响应区间并代入隶属度函数。

1.3.4 权重计算 在多指标综合评价中，指标权

重的设定直接影响评价结果的科学性与可靠性。常见权重确定方法分为主观赋权与客观赋权两类。主观赋权法（如 3-scale AHP）基于专家经验与判断，方法灵活、便于融入专业知识，但易受主观偏差影响^[25]；客观赋权法（如熵权法）则依据指标数据的统计特性量化其对系统差异性的贡献，具有较强的客观性，但对数据质量要求较高，且难以体现专家偏好^[26]。在本研究中，熵权法的计算基于 208 个样点的环境因子数据，以确保权重结果能够充分反映区域差异性。为兼顾两类方法的优点，本研究引入博弈论加权策略^[27]，将主客观权重进行组合优化，使权重分配既具有数据驱动的客观性，又保留专家知识的指导性，从而提升评价体系的科学性与适应性。博弈论确定组合权重的步骤如下：

第一步，构建权重向量 $W_k = \{W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}\}$ ($k=1, 2, \dots, s$)，可以线性组合表示为：

$$W = \sum_{k=1}^s \alpha_k \times W_k^T (\alpha_k > 0)$$

第二步，优化式中的线性组合系数 α_k ，使 W 与每个 W_k 的离散度最小，得到最满意的 W_k^* 。对策模型如下：

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k W_k^T - W_k \right\| (k=1, 2, \dots, L)$$

第三步，根据矩阵的微分性质，得到等价于方程的最优导数条件线性方程组：

$$\begin{array}{ccccccc} W_1 W_1^T & \cdots & W_1 W_L^T & \alpha_1 & W_L W_1^T & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ W_L W_1^T & \cdots & W_L W_L^T & \alpha_L & W_L W_L^T & & \end{array}$$

第四步，归一化解 ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L$):

$$\alpha_k^* = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^L \alpha_k}$$

则可得到综合权重：

$$W_k^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* W_k^T$$

1.3.5 综合指数计算与种植区划 基于上述分析方法获得各评价指标的隶属度与权重，遍布三亚市的所有栅格，采用累加法计算各栅格的适应性评价综合指数，其函数关系如下：

$$S(x) = \sum_{i=1}^n W_i u_i$$

式中， $S(x)$ 为适应性评价综合指数， W_i 为第 i 个指标的综合权重， u_i 为指标 i 在单元的隶属度值。在得到综合指数后，采用自然断点法结果划分为优势区、适宜区与不适宜区。

2 结果与分析

2.1 指标筛选与变量特征分析

2.1.1 环境变量筛选结果 Pearson 相关性分析表明，部分环境变量之间存在高度相关性 ($|r| > 0.8$)，如土壤全钾与有机质、年均最高温与年均温差/年均最低温等（图 3）。在此基础上，结合 MaxEnt 模型的百分比贡献值、排列重要性及折刀检验结果，综合重要性排名前 15 的变量包括土壤类的全钾、有机质、容重、阳离子交换量、粉粒含量、土壤类型、pH，气候类的年均最高温、年均温差、年均最低温、成熟采收期日照时数，以及地形类的海拔、坡度、坡向（图 4~图 5）。剔除高相关且贡献度较低的变量后，最终保留 10 个核心环境变量：容重（bd）、全钾（tk）、阳离子交换量（cec）、粉粒含量（silt）、pH（ph）、年最高温（atmax）、成熟采收期日照时数（asd0709）、坡度（slope）、海拔（elev）。

2.1.2 隶属度函数构建结果 基于 MaxEnt 模型的响应曲线，不同环境变量与芒果适宜性呈现出差异化的响应模式。本研究选取响应值 > 0.5 的区间进行隶属度函数拟合（图 6），并提取关键参数 a 值与 c 值。土壤因子中，pH、阳离子交换量、粉粒含量呈峰型响应；容重呈戒下型，在容重为 1.48 g/cm^3 时达到峰值；全钾呈戒上型，全钾含量为 71.58% 时最适宜；土壤类型以砖红壤、水稻土、

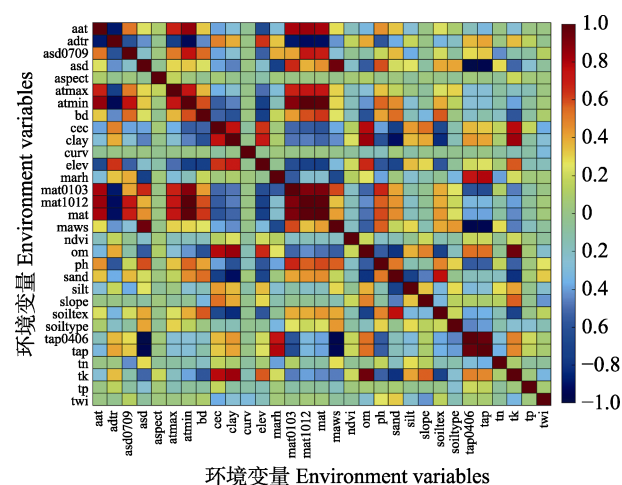


图 3 指标间 Pearson 相关性热力图

Fig. 3 Pearson correlation heat map between indicators

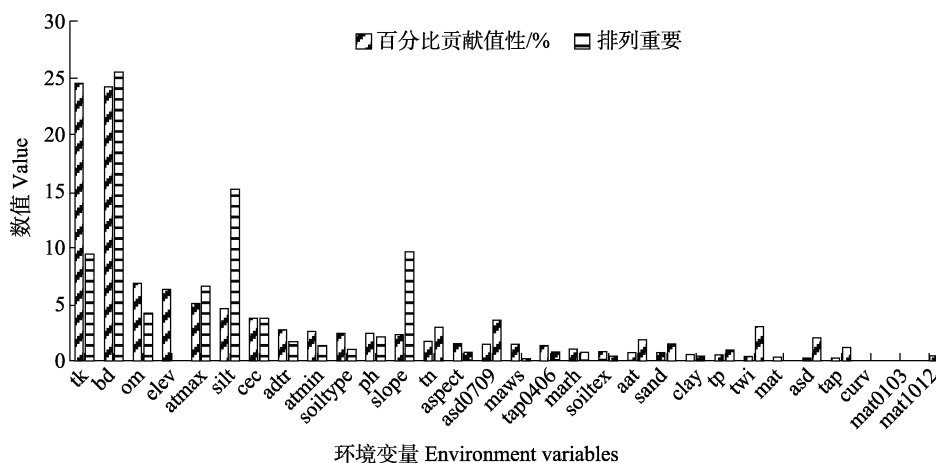


图 4 指标百分比贡献值与排列重要性柱状图

Fig. 4 Indicator percentage contribution value and ranking importance bar chart

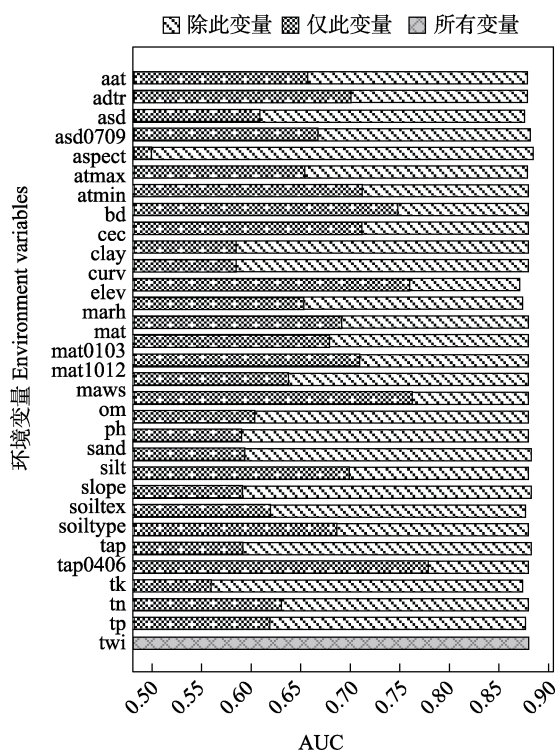


图 5 基于 AUC 的变量重要性 Jackknife 分析图

Fig. 5 Jackknife analysis of variable importance based on AUC

潮土与燥红土的适宜性最高。地形因子中,坡度与海拔均表现为戒下型响应,最优值分别为 1.93° 、 32.23 m 。气候因子中,成熟采收期日照时数呈峰型响应,年均最高温呈戒上型,最优值为 31.26°C 。

根据不同变量的响应类型与参数,结合原始响应曲线的适宜区间(峰型函数的上下限值及戒上/戒下型的下限值),构建相应的隶属度函数(表 2)。土壤亚类砖红壤、水稻土、潮土、燥红土的隶属度均为 1。

2.1.3 权重计算与种植区划分布 3-scale AHP 与熵权法在权重计算中存在一定差异(表 3)。AHP 主观赋权突出土壤理化性质与气候因子的作用,其中容重、全钾、阳离子交换量、土壤类型、年均最高温及成熟采收期日照时数权重较高;熵权法则更强调土壤类型与容重的变异性。通过博弈论组合赋权,最终权重体系在土壤、气候与地形三类因子间实现均衡。土壤因子总权重占比 69.3%,气候因子占比 23.3%,地形因子占比 7.4%,进一步凸显了土壤条件在三亚芒果种植适宜性中的核心地位。

将隶属度矩阵与组合权重相乘,得到三亚市芒果种植综合适宜性指数分布,并利用自然间断法将其划分为优势区、适宜区与不适宜区(图 7)。

2.2 评价结果验证

通过 15 个验证点与三亚市芒果主产区对评价结果进行验证。验证点的选取遵循代表性与空间均衡性相结合的原则,优先选取具有典型芒果种植历史、种植面积大且长期稳定的主产区,同时兼顾覆盖范围。数据主要来自实地调研,包括对典型样点的芒果实际产量调查以及现有种植分布情况的记录。

验证结果表明,所选验证点基本分布在适宜区范围内,其中有 12 个验证点位于优势区(图 7)。芒果主产区如崖州区的大毛村、南滨农场与天涯区的红糖村、黑土村、台楼村均处于评价结果所划定的优势区内;吉阳区的红花村、大茅村与海棠区的东溪村、南田农场、林旺洪李村等均落在适宜区范围。此外,实际产量水平与适宜性等级总体一致,进一步支持了评价结果的可靠性。同

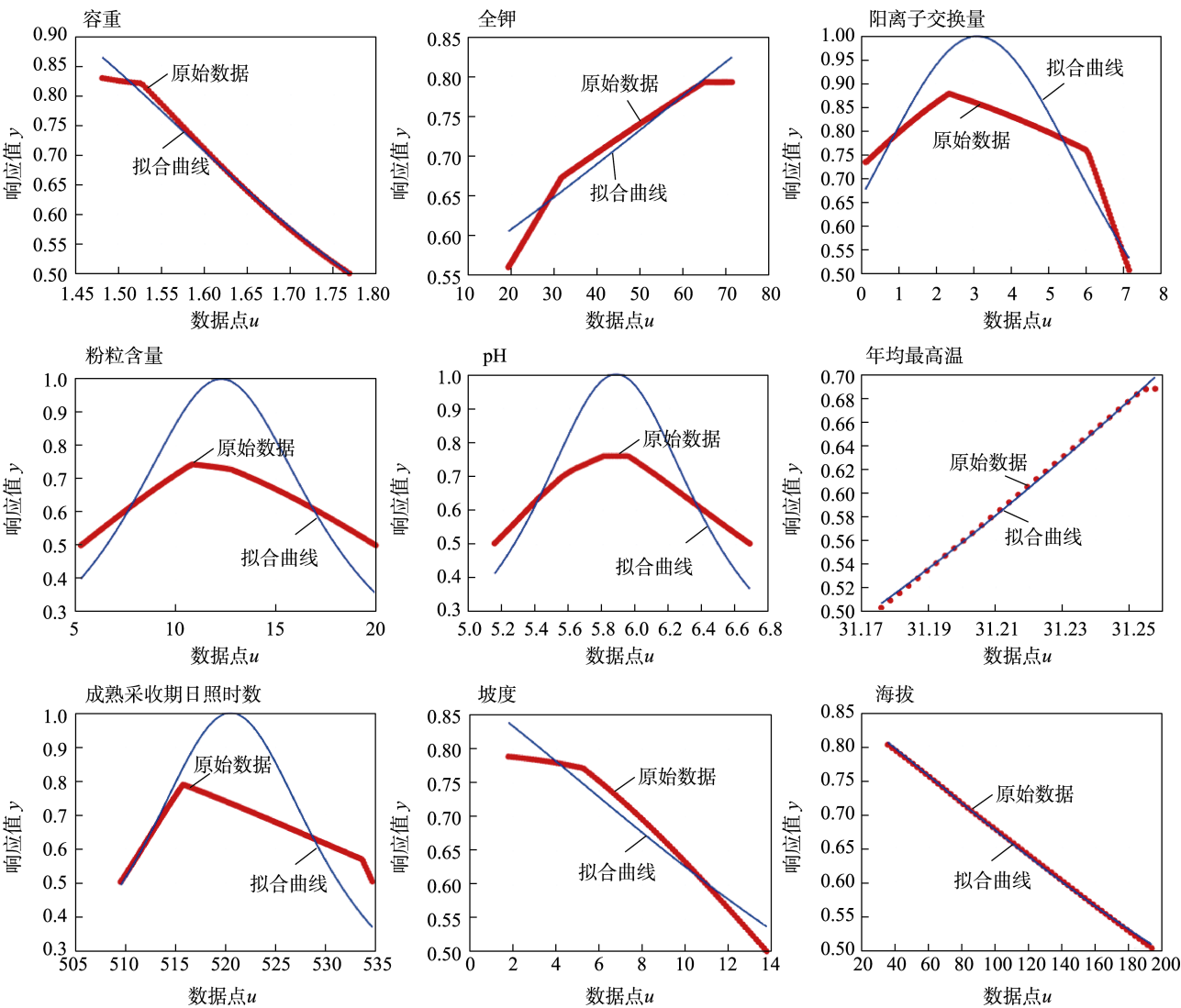


图 6 响应值拟合曲线图
Fig. 6 Response value fitting curve

表 2 隶属度函数形式及参数
Tab. 2 Membership function form and parameters

环境变量 Environment variables	函数类型 Function type	函数公式 Function formula	a 值 a value	c 值 c value	下限值 Lower limit	上限值 Upper limit
容重	戒下型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	4.3882	1.48	1.8	1.48
全钾	戒上型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0001	71.58	19.0	71.58
阳离子交换量	峰型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0537	3.11	0.1	8.00
粉粒含量	峰型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0302	12.25	0	34.00
pH	峰型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	2.6925	5.87	4.5	9.00
年均最高温	戒上型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	16.0040	31.26	30.0	31.26
成熟采收期日照时数	峰型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0085	520.49	485.0	542.00
坡度	戒下型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0016	1.93	45.0	1.93
海拔	戒下型	$y=1/[1+a(u-c)^2]$	0.0001	32.23	500.0	32.23

时，部分验证点覆盖不同地形、土壤类型和气候条件，验证了模型对多样性环境的适应能力。

综上，本研究的芒果种植适宜性评价结果与实际种植分布高度一致，验证了模型的空间识别能力与适用性，为区域芒果种植规划与品种布局提供了可靠依据。

表 3 各指标权重
Tab. 3 Weight of each indicator

环境变量 Environment variables	3 标度层次 分析法 3-scale AHP	熵权法 Intercriteria correlation	综合权重 Comprehensive weight
容重	0.163	0.226	0.173
全钾	0.163	0.040	0.102
阳离子交换量	0.163	0.063	0.129
粉粒含量	0.058	0.016	0.044
pH	0.058	0.017	0.045
土壤类型	0.163	0.515	0.201
年均最高温	0.163	0.010	0.115
成熟采收期日 照时数	0.163	0.018	0.118
坡度	0.012	0.014	0.012
海拔	0.058	0.083	0.062

2.3 芒果种植适宜性空间分布

根据三亚市芒果种植区划以适宜区为主,总面积约 117 715 hm²,约占全市总面积的 61%(表 4)。适宜区主要集中分布于崖州区北部(22 511 hm²,占崖州区总面积的 59%)、天涯区中部(43 717 hm²,占天涯区总面积的 48%)、吉阳区中部(28 498 hm²,占吉阳区总面积的 77%)及海棠区大部分区域(22 989 hm²,占海棠区总面积的 91%)。

不适宜区总面积约为 45 722 hm²,约占全市总面积的 24%。主要分布于天涯区北部(34 744 hm²,占天涯区总面积的 37%)、吉阳区南部(6236 hm²,占吉阳区总面积的 17%)、崖州区北部(3188 hm²,占崖州区总面积的 9%)以及海棠区北部局部区域(1554 hm²,占海棠区总面积的 6%)。

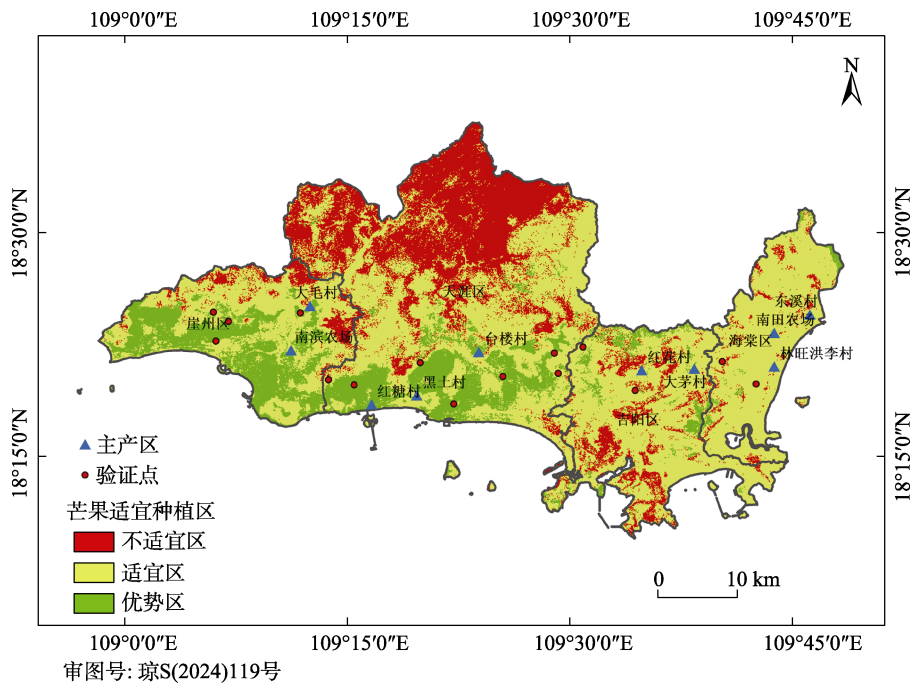


图 7 评价结果验证点与芒果种植主产区空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of evaluation result verification points and main mango production areas

表 4 不同种植区划区域面积统计
Tab. 4 Statistics of area of different planting zones hm²

区域 Area	不适宜区 Unsuitable area	适宜区 Suitable area	优势区 Advantage area	面积总计 Total area
海棠区	1554	22 989	800	25 343
吉阳区	6236	28 498	2508	37 242
天涯区	34 744	43 717	12 780	91 241
崖州区	3188	22 511	12 626	38 325
三亚市	45 722	117 715	28 714	192 151

优势区面积共计约 28 714 hm²,占三亚市总面积的 15%。该区域主要分布在崖州区南部

(12 626 hm²,占崖州区总面积的 33%)、天涯区南部(12 780 hm²,占天涯区总面积的 14%)、吉阳区北部(2508 hm²,占吉阳区总面积的 7%)和海棠区东北部(800 hm²,占海棠区总面积的 3%)。

2.4 不同分区的环境差异

为深入探究芒果种植适宜性空间格局的形成机制,本研究对不适宜区、适宜区和优势区 3 个等级的主要土壤与环境因子进行统计分析,结果见表 5。总体而言,随着适宜性等级的提升,各项土壤理化性质及生态环境条件均呈现明显的梯度差异。

表 5 不同种植区划环境差异统计
Tab. 5 Statistics on environmental differences among different planting regions

环境变量 Environment variables	不适宜区 Unsuitable area	适宜区 Suitable area	优势区 Advantage area
容重/(g·cm ⁻³)	1.34±0.05	1.40±0.10	1.44±0.10
全钾/%	24.44±5.99	24.63±8.24	29.06±7.93
阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	8.37±1.04	6.67±1.91	5.47±1.65
粉粒含量/%	18.10±3.42	15.13±5.17	13.48±3.51
pH	5.37±0.52	5.73±0.68	5.96±0.53
年均最高温/℃	31.20±0.22	31.37±0.14	31.39±0.08
成熟采收期日 照时数/h	510.99±13.36	524.53±11.13	521.25±6.63
坡度/(°)	16.54±9.70	10.67±9.20	6.75±7.40
海拔/m	292.64±173.04	167.41±182.54	88.91±140.30

地形因子方面，优势区、适宜区与不适宜区的平均海拔分别为 88.91、167.41、292.64 m，优势区的平均海拔明显低于适宜区与不适宜区；坡度亦呈现相同趋势，优势区仅为 6.75°，明显低于适宜区（10.67°）与不适宜区（16.54°）。说明地势低平的区域更有利于芒果的栽培与田间管理。

土壤理化特性方面，pH 随适宜性等级逐渐升高（5.37→5.73→5.96），接近芒果适宜的弱酸性土壤范围（pH 为 5.5~6.5），有助于养分的有效释放和根系吸收。优势区的土壤容重略高（1.44 g/cm³），但仍处于芒果根系可接受范围内，未形成明显的物理障碍。粉粒含量随适宜性提升而降低，优势区平均粉粒含量为 13.48%，表明其土壤质地偏砂，具备良好的排水性和通透性，有利于根系发育。阳离子交换量则呈递减趋势，从不适宜区的 8.37 cmol/kg 降至优势区的 5.47 cmol/kg，可能反映出土壤矿物组成与风化程度的差异。虽然阳离子交换量通常与土壤肥力呈正相关，但过高的阳离子交换量可能导致持水性过强，不利于排水与根系生长，尤其对芒果这类耐贫瘠的作物而言，适度的阳离子交换量反而更具优势。

养分供给方面，全钾含量在优势区最高（29.06 mg/kg），明显高于适宜区（24.63 mg/kg）和不适宜区（24.44 mg/kg），说明钾素供给对提升芒果果实品质与增强抗逆能力具有积极作用。

光热资源方面，成熟采收期日照时数在不同区域差异较小，但适宜区略高（524.53 h），有利于芒果果实糖分积累和风味物质的形成。年均最高温范围为 31.20~31.39℃，区域间差异较小，但

优势区略高的温度更契合芒果对高温光照环境的生态需求。

综上所述，芒果优势区普遍具备地势低平、土壤偏砂、pH 适中、钾素丰富及光照充足等生态特征，这些因素协同作用，共同营造出更为有利的土壤与环境条件，验证了地形与土壤因子在芒果适宜性区划中的关键作用。

3 讨论

本研究筛选出容重、pH、粉粒含量、阳离子交换量、全钾、土壤类型、坡度、海拔高度、成熟期日照时数与年均最高温 10 项关键环境因子，构建了三亚市芒果种植适宜性评价模型，表明土壤理化特性是影响芒果空间分布的核心因素。优势区土壤呈现“微酸-疏松-富钾-高阳离子交换量”特点，配合“低海拔/坡度-高日照/温度”的地形与光热条件，共同构建芒果高产优质的生态优势窗口。该结论与廖香俊等^[8]的研究结果一致，其研究指出，海南芒果园的土壤 pH、阳离子交换量及养分含量等环境条件对果实品质具有显著影响。这与本研究强调的高阳离子交换量和富钾土壤对果品质量的促进作用高度契合，进一步验证了土壤指标在适宜性评价中的关键作用。

从区域代表性角度来看，三亚市作为海南乃至全国重要的芒果主产区，拥有完整的气候、土壤和地形梯度，其代表性能够满足方法验证与推广的需求^[28]。因此，尽管本研究样本范围未覆盖海南省全域或整个华南热区，其方法框架依然具备较强的可迁移性。已有研究表明，基于 MaxEnt 模型的适宜性评价方法在单一区域完成参数优化与验证后，可迁移应用于生态背景相似的其他区域，且不影响方法有效性^[29-30]。类似的果树种植区划研究，如李艳春等^[31]在云南省元阳县的芒果适宜性区划，习文勇等^[32]在湖北省通山县的柑橘适宜性分析，姚莉等^[33]在四川省眉山市东坡区进行的柑橘适宜性评价，均在有限空间范围内开展，其方法体系已被广泛借鉴并推广至更大尺度。因此，本研究结论不仅对三亚芒果产业布局具有指导价值，也可为气候、地形及土壤条件相似的热带果树种植区提供可行的技术参考。

现有芒果种植区划的研究大多聚焦气候因子^[4-7]，缺乏土壤理化因子的量化处理，也未形成系统模型验证机制。也有研究引入了土壤与地形作为评价指标^[34-35]，但未涉及土壤理化指标的精

细分析。而本研究在此基础上结合空间土壤因子数据,使评价结果更加精细化,同时提升模型对栽培条件的适用性。张明洁等^[6]对海南岛芒果气候适宜性进行了区划,指出三亚市优势区主要分布在崖州区南部、天涯区南部、吉阳区西南与海棠区东部;不适宜区则集中在崖州区西北、天涯区中北和吉阳区北部。这与本研究结果的空间分布高度重合,尤其在崖州区南部和吉阳区西南区取得一致,增强了模型的空间识别可信度。但该研究结果在天涯区中部与崖州区西部也划定了大面积不适宜区,然而这些区域目前仍广泛种植芒果,表明仅考虑气候因素可能会对现实栽培条件形成偏差。本研究纳入的土壤与地形变量补充了这一不足,使适宜性预测更加符合真实种植格局。

与三亚市现有芒果种植分布情况对比,本研究划定的优势区高度契合于崖州区大毛村、南滨农场,吉阳区大茅村、红毛村等区域,这些地区目前已形成大面积的芒果标准化种植带。尤其崖州区作为全市最主要的芒果产区,集中了早熟、优质芒果主产基地,其具备的光热条件、地势地貌与本研究评价高度一致,进一步验证了模型结果的可信度与应用价值。同时,本研究将部分当前未充分开发但具有较高潜力的区域纳入适宜区,如天涯区西部边缘丘陵带,建议在条件允许下开展土地整理、土壤改良等措施,推动资源转化为生产力。

与传统经验性等级评价方法不同,本研究集成 MaxEnt 模型、隶属度函数构建方法与 AHP-熵权-博弈论权重融合策略,构建了理论与实证相结合的多因子综合评价体系。在评价机制层面,MaxEnt 模型的响应曲线为隶属函数提供了定量设定依据,避免了函数形态设定过程中的主观性问题;博弈权重法兼顾了主客观赋权的优点,提升了评价结果的稳定性与可推广性。同时,本研究利用 90 m 空间分辨率的气候、土壤与遥感数据,结合芒果全年物候特征进行分期指标提取,使模型在时间和空间 2 个维度实现了精细化适配,为后续开展芒果适宜性动态监测奠定了坚实基础。

尽管本研究在指标选取、模型构建与适宜性分区方面取得了较为理想的结果,但仍存在以下不足:一是气候数据虽覆盖连续 3 a,但未深入探讨年际波动与极端气候事件对芒果种植适宜性的干扰机制;二是尚未纳入社会经济因子(如交通

可达性、劳动力资源、土地利用政策等),限制了评价结果向产业布局建议的直接转化;三是模型尚未引入实地产量与品质数据进行反演验证,需进一步构建“产量-环境-适宜性”三元耦合模型,以增强其实用性与决策支持能力。

未来研究应重点拓展至多年份遥感与气象数据的综合分析,强化热带果树物候过程与生态因子的动态模拟,提升对极端气候变化的响应预测能力;同时加强实地调查数据的对接与模型反演能力,推动芒果种植适宜性评价从静态“分区识别”迈向动态“精准管理”,为区域芒果产业的可持续发展与科学布局提供理论支撑与技术路径。

4 结论

本研究以三亚市芒果为研究对象,基于多源环境因子构建适宜性评价指标体系,采用层次分析法(AHP)、熵权法和博弈论组合权重方法,系统评估了芒果种植的空间适宜性,并通过典型样点进行实地验证。主要结论如下:

(1) 经因子筛选与优化,确定了土壤理化性质(如 pH、CEC、全钾等)、地形因子(坡度、海拔)和气候条件(光照、温度)等 10 个核心指标。结果表明,土壤理化特性、地形与光热条件共同决定了芒果的空间分布,优势区具有“微酸-疏松-富钾-高 CEC”的土壤特征以及“低海拔/坡度-高日照/温度”的地形光热条件。

(2) 综合评价结果显示,三亚市芒果优势适宜区集中分布于崖州区、天涯区和吉阳区部分地带,与现有芒果主产区空间格局高度一致;同时识别出若干具有发展潜力的适宜区域,为扩展芒果产业提供科学参考。

(3) 基于 15 个典型样点与主产区数据的对比验证表明,验证点均落在评价结果划定的优势或适宜区内,说明模型在空间识别和环境适应性上具有较高可靠性。

(4) 本研究提出的组合赋权-适宜性评价框架兼顾了专家知识与数据驱动的优势,能够有效支撑热带果树精准布局与区域产业规划。

参考文献

- [1] 陈冠宇, 谢辉, 凌秋月. 海南省优势水果资源分布及其品牌价值提升策略[J]. 中国果树, 2023(8): 116-120.
CHEN G Y, XIE H, LING Q Y. The distribution of dominant fruit resources in Hainan province and the promotion

- strategy of its brand value[J]. *China Fruits*, 2023(8): 116-120. (in Chinese)
- [2] 铁万祝, 罗关兴, 王友富, 王军. 我国芒果产业发展概况与主要问题[J]. *中国热带农业*, 2013(5): 16-19
TIE W Z, LUO G X, WANG Y F, WANG J. Overview of the development of China's mango industry and its main problems[J]. *China Tropical Agriculture*, 2013(5): 16-19. (in Chinese)
- [3] 白大娟, 严海, 周开兵, 龚家建. 三亚芒果产业现状、存在问题及其发展对策[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(9): 94-97.
BAI D J, YAN H, ZHOU K B, GONG J J. Present situation, existing problems and development countermeasures of mango industry in Sanya[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(9): 94-97. (in Chinese)
- [4] 吴小波, 韩树全, 黄海, 龚德勇, 范建新. 基于 GIS 与 RS 的贵州省芒果种植气候区划[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(20): 268-271.
WU X B, HAN S Q, HUANG H, GONG D Y, FAN J X. Climate zoning for mango planting in Guizhou province based on GIS and RS[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(20): 268-271. (in Chinese)
- [5] 杨凯, 陈彬彬, 陈惠, 李丽纯, 陈斌源, 李政. 基于寒害过程的福建芒果种植气候风险区划[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(11): 723-732.
YANG K, CHEN B B, CHEN H, LI L C, CHEN B Y, LI Z. Climatic risk regionalization of mango planting in Fujian province based on cold injury process[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(11): 723-732. (in Chinese)
- [6] 张明洁, 张亚杰, 张京红, 杨静, 林邵伍. 基于 GIS 的海南岛芒果气候适宜性精细化区划研究[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12): 3678-3684.
ZHANG M J, ZHANG Y J, ZHANG J H, YANG J, LIN S W. Fine regionalization of Hainan island mango climate suitability based on GIS[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(12): 3678-3684. (in Chinese)
- [7] 孙朝锋, 林雯, 黄川容, 吴立, 陈家金, 王加义, 林辉阳. 华南芒果种植区寒冻害危险性区划与评估[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(7): 563-574.
SUN C F, LIN W, HUANG C R, WU L, CHEN J J, WANG J Y, LIN H Y. GIS-based risk zoning and assessment of mango cold and freezing injury in south China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(7): 563-574. (in Chinese)
- [8] 廖香俊, 唐树梅, 吴丹, 冯亚生, 夏长健. 海南芒果园土壤环境及其对芒果品质的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 727-733.
LIAO X J, TANG S M, WU D, FENG Y S, XIA C J. Effect of the soil environment of mango plantation on mango quality in Hainan province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2008, 17(2): 727-733. (in Chinese)
- [9] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006(3/4): 190.
- [10] YANG S, WANG H, TONG J, BAI Y, ALATALO J M, LIU G, FANG Z, ZHANG F. Impacts of environment and human activity on grid-scale land cropping suitability and optimization of planting structure, measured based on the MaxEnt model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155356.
- [11] 尹芳, 朱家政, 孟文睿, 金子悦. 基于 MaxEnt 模型的陕西省菊芋种植潜在适宜区分析[J]. *中国农业气象*, 2024, 45(3): 268-280.
YI F, ZHU J Z, MENG W R, JIN Z Y. Analysis of potential suitable region for jerusalem artichoke in Shaanxi province by the MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(3): 268-280. (in Chinese)
- [12] HENG S J, LI N, YANG Q L, LIANG J P, LIU X G, WANG Y Z. Effects of environment and human activities on rice planting suitability based on MaxEnt model[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2024, 68(11): 2413-2429.
- [13] ZENG J R, LI C M, LIU J Z, LI Y Y, HU Z Z, HE M L, ZHANG H Y, YAN H J. Ecological assessment of current and future *Pogostemon cablin* Benth. potential planting regions in China based on MaxEnt and ArcGIS models[J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2021, 24: 100308.
- [14] 李娟, 彭镇华, 高健. 三亚市土地利用变化及影响因素驱动力分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(36): 17794-17797, 17835.
LI J, PENG Z H, GAO J. Study on driving forces of the land-use change in Sanya city[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(36): 17794-17797, 17835. (in Chinese)
- [15] PONCE-HERNANDEZ R, MARRIOTT F H C, BECKETT P H T. An improved method for reconstructing a soil profile from analyses of a small number of samples[J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37(3): 455-467.
- [16] BISHOP T F A, MCBRATNEY A B, LASLETT G M. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines[J]. *Geoderma*, 1999, 91: 27-45.
- [17] MALONE B P, MCBRATNEY A B, MINASNY B, LASLETT G M. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 138-152.
- [18] DA SILVA CALDANA N F, NITSCHKE P R, FERREIRA L G B, MARTELÂCIO A C, CARAMORI P H, ZACCHEO P

- V C, MARTINS J A. Agroclimatic risk zoning of mango (*Mangifera indica*) in the hydrographic basin of Paran River III, Brazil[J]. African Journal of Agricultural Research, 2020, 16(7): 983-991.
- [19] 郑良永, 邓万刚. 土壤类型及土地利用历史对海南芒果园土壤养分的影响[J]. 现代农业科技, 2013(4): 246-247.
- ZHENG L Y, DENG W G. Effects of soil type and land use history on soil nutrients in Hainan mango orchards[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(4): 246-247. (in Chinese)
- [20] 芒果对土壤和地形地势的要求[J]. 世界热带农业信息, 2004(4): 25.
- Mango's requirements for soil and terrain[J]. World Tropical Agriculture Information, 2004(4): 25. (in Chinese)
- [21] 曾伟英, 王德智, 叶琛, 龚宇, 王昱熙, 张全发. 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, 2025, 43(1): 52-62.
- ZENG W Y, WANG D Z, YE C, GONG Y, WANG Y X, ZHANG Q F. Prediction of potential distribution of *Cupressus gigantea*[J]. Plant Science Journal, 2025, 43(1): 52-62. (in Chinese)
- [22] 陈孟焱, 梁子怡, 舒琦, 闹增措, 陈岩, 曾哲飞, 拉琼, 王俊伟. 基于 MaxEnt 模型预测入侵植物鬼针草在中国的潜在分布及适生性[J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1749-1758.
- CHEN M Y, LIANG Z Y, SHU Q, NAO Z C, CHEN Y, ZENG Z F, LA Q, WANG J W. Predicting potential distribution and adaptability of the invasive plant *Bidens pilosa* in China based on the MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1749-1758. (in Chinese)
- [23] 张炳宁, 张月平, 张秀美, 刘宝喜, 刘林旺, 徐茂, 王绪奎, 沈其荣. 基本农田信息系统的建立及其应用——I. 耕地地力等级体系研究[J]. 土壤学报, 1999(4): 510-521.
- ZHANG B N, ZHANG Y P, ZHANG X M, LIU B X, LIU L W, XU M, WANG X K, SHEN Q R. Establishment and application of basic farmland information system: I. Study on the cultivated land fertility grading system[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999(4): 510-521. (in Chinese)
- [24] 张云, 资锋, 曹运江, 成湘伟, 韩用顺, 唐龙. 基于 MaxEnt 模型的沅陵县滑坡易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(1): 105-116.
- ZHANG Y, ZI F, CAO Y J, CHENG X W, HAN Y S, TANG L. Evaluation of landslide susceptibility in Yuanling county based on MaxEnt model[J]. Journal of Natural Disasters, 2025, 34(1): 105-116. (in Chinese)
- [25] ZHANG F, WANG Y, MA X J, WANG Y, YANG G C, ZHU L. Evaluation of resources and environmental carrying capacity of 36 large cities in China based on a support-pressure coupling mechanism[J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 838-854.
- [26] LIAO X, REN Y T, SHEN L Y, SHU T H, HE H M, WANG J H. A "carrier-load" perspective method for investigating regional water resource carrying capacity[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122043.
- [27] PENG T, DENG H W, LIN Y, JIN Z Y. Assessment on water resources carrying capacity in karst areas by using an innovative DPESBRM concept model and cloud model[J]. Science of The Total Environment, 2021, 767: 144353.
- [28] LUO H X, DAI P S, LI M F, LIU P E, ZHENG Q, LIU Y Y, YI P X. Comparison of machine learning algorithms for mapping mango plantations based on Gaofen-1 imagery[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2815-2828.
- [29] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [30] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, DUDIK M, CHEE Y E, YATES C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [31] 李艳春, 谢映海, 朱黎阳. 基于 GIS 的元阳县芒果种植的气候适宜性区划[J]. 绿色科技, 2020(6): 83-85.
- LI Y C, XIE Y H, ZHU L Y. Climatic suitability zoning of mango planting in Yuanyang county based on GIS[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(6): 83-85. (in Chinese)
- [32] 习文勇, 傅佩红. 基于模糊数学的柑橘种植土地适宜性评价[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 141-152.
- XI W Y, FU P H. Land suitability evaluation of citrus cultivation based on fuzzy mathematics[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(1): 141-152. (in Chinese)
- [33] 姚莉, 唐彪, 陈章全, 卢昌艾, 赵玉国, 邓春秀, 张奇, 代天飞, 王宏, 欧阳平, 黄耀蓉, 武娟, 李渊洪, 林超文. 基于第三次全国土壤普查的眉山市东坡区晚熟柑橘适宜性评价[J]. 土壤, 2024(6): 1165-1172.
- YAO L, TANG B, CHEN Z Q, LU C A, ZHAO Y G, DENG C X, ZHANG Q, DAI T F, WANG H, OUYANG P, HUANG Y R, WU J, LI Y H, LIN C W. Suitability evaluation and analysis of late maturing citrus in Dongpo district, Meishan city based on the 3rd national soil survey[J]. Soils, 2024(6): 1165-1172. (in Chinese)
- [34] SALUNKHE S, NANDGUDE S, TIWARI M, BHANGE H, CHAVAN S B. Land suitability planning for sustainable mango production in vulnerable region using geospatial multi-criteria decision model[J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2619.
- [35] YI S, HUANG Y, LIU Z, ZHU Z, SU H. Predicting the potential geographical distribution of mango, an important tropical economic tree species, under current and climate change based on MaxEnt model[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1633654.