

孙光辉,段居琦,李俊儒,等. 气候-土地综合影响的我国油茶农业气候区划. 应用气象学报, 2024, 35(4): 444-455.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240405

气候-土地综合影响的我国油茶农业气候区划

孙光辉¹⁾²⁾ 段居琦^{3)*} 李俊儒⁴⁾ 廖要明³⁾

¹⁾(中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147)

²⁾(重庆市气象服务中心, 重庆 401147)

³⁾(国家气候中心, 北京 100081)

⁴⁾(香港科技大学, 香港 999077)

摘 要

从作物气候适宜性评价出发,考虑坡度、土壤厚度等土地因素影响,利用全国油茶种植点地理信息、土地数据以及 1986—2023 年 2426 个国家气象观测站观测数据,采用最大熵模型和 ArcGIS 技术,重点开展油茶种植精细化农业气候区划和省级区域扩种潜力评估。结果表明:我国油茶种植分布的主导气候因子是 1 月平均气温、大于等于 10 °C 活动积温、日最低气温小于等于 -10 °C 连续日数和年降水量;考虑气候-土地共同作用较未考虑土地影响的气候适宜区划缩减了 2/3,其适宜种植地区为长江及以南地带,尤其是四川盆地—秦岭—淮河以南及云贵高原以东至沿海地区,面积达 $7.319 \times 10^7 \text{ hm}^2$,远高于当前种植面积($4.723 \times 10^8 \text{ hm}^2$),具有较大的扩种潜力。基于此,在规划油茶种植布局时,除考虑湖南、江西、广西、湖北等主要种植区外,应考虑云南、四川、广东、重庆等扩种潜力较大的省份,适当提高其种植面积。

关键词: 油茶; 农业气候区划; 扩种潜力; 最大熵模型

引 言

粮食安全是国之大计。在我国粮食安全系统中,油料自给率低、进口量大,对外依存度高,是薄弱环节^[1-2]。为保障油料自主供给能力,近年我国提出实施大豆和油料产能提升工程,扩种大豆油料,特别指出要支持木本油料发展,落实油茶扩种和低产低效林改造任务,给油料种植科学布局提出了新要求。

油茶(*oiltea camellia*)是常绿小乔木,属山茶科山茶属,其产品茶油中不饱和脂肪酸含量高达 90%,是我国特有的优质木本食用油料经济作物,被誉为“东方橄榄油”^[3-5],也是我国木本油料的主要来源之一。油茶喜温好光,适宜种植在山坡丘陵地带,兼具蓄水保土、改良土壤条件等功能。因此,我国高度重视油茶产业发展,出台《加快油茶产业发展三年

行动方案(2023—2025 年)》(简称《行动方案》)^[6],提出扩种和低产林改造任务,迫切需要油茶种植区划作为支撑。

农业气候区划是以作物气候适宜性为基础,根据其区域分布规律做出能够阐明气候与农业生产关系的一种区域空间上的分类,可为合理布局农业生产提供科学依据^[7-9]。近年围绕支撑油茶种植布局工作,人们采用不同方法开展油茶种植气候区划研究。唐光旭等^[5]结合江西主产区气候、海拔、油茶生长等因素,采用主成分和聚类分析及回归和方差分析,将江西划分为不同的栽培区和垂直栽培区。付瑞滢等^[10]根据产量优先和因子从简的挑选原则,选取主要因子作为贵州铜仁市优质油茶种植气候区划指标,参照模糊数学二元相对比较级方案,将各因子指标强度三级化,对铜仁市油茶种植进行精细化农业气候区划。李贵琼等^[11]采用经验正交函数分析、模糊聚类分析等方法,总结得出红花油茶种植气候

2024-03-14 收到, 2024-06-18 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J043), 国家自然科学基金专项(42141007)

* 通信作者: duanjq@cma.gov.cn

适宜性指标,采用GIS技术进行精细化的贵州六盘水红花油茶种植气候适宜性区划。这些研究给出了我国不同区域的油茶种植农业气候区划,为区域油茶布局提供科学依据。

全国油茶种植规划需要国家尺度的精细化农业气候区划支撑。余优森等^[12]基于对年气温、年降水量、关键发育期气温、日照百分率及含油率等7个因子进行聚类分析,开展我国普通油茶含油率品质气候区划,并基于海拔高度对含油率的影响,给出优质气候层带;黄志伟等^[13]采用主成分分析和聚类分析方法,讨论全国油茶主栽区气候指标,并对全国50个典型油茶栽培区县进行气候区划分类。认识到上述区划结果精细化不足,邬定荣等^[14]采用改进的气候相似距法开展了全国1 km×1 km网格的普通油茶种植气候适宜性区划;王小军等^[15]基于全新世中期(距今约6000年)、1970—2000年和21世纪中后期的生物气候指标数据,运用最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型进行气候变化情景下油茶气候适宜性分析,并讨论油茶气候适宜性北界及中线点等空间分布及油茶适宜性时空变化。但上述研究未考虑母岩、土壤肥力、坡度、土层厚度、坡向和坡位等因子对油茶适宜种植区的影响^[16-18],可能会高估适宜种植区面积。因此,在进行油茶种植精细化农业气候区划时,有必要在考虑气候适宜条件的基础上,考虑土壤环境因素,为油茶种植布局提供更精准的区划信息。

近年生态位理论的物种分布预测技术快速发展,为作物种植气候适宜区划研究提供了新途径。其中最大熵模型可以根据物种分布信息和环境因子定量客观预测物种在不同区域的适宜程度,且模型模拟精度较高,在作物、林木气候适宜性区划中应用并取得良好效果^[19-21]。因此,本研究拟采用最大熵模型和ArcGIS技术进行油茶种植适宜性区划的基础上,考虑坡度、土壤厚度等土地因素,进行我国油茶种植农业气候区划,评估全国及省级适宜种植面积和扩种潜力,并结合油茶实际种植情况和《行动方案》提出的任务目标,提出油茶扩种布局建议,为油茶种植合理规划提供科学依据。

1 方法与数据

1.1 方法

最大熵模型是一种基于最大熵理论提出的生态

位模型,该模型能够根据已有的物种分布记录和环境变量数据,推算物种的生态位需求,预测物种的实际和潜在分布。最大熵模型根据受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC曲线)对模型精度进行评价,ROC曲线下方的面积(area under curve, AUC)越大,表明模型模拟效果越理想^[19,22-23]。当AUC为0.5~0.6时,模型预测失败;当AUC为0.6~0.7时,预测效果较差;当AUC为0.7~0.8时,预测效果一般;当AUC达到0.8~0.9时,表明预测效果良好;当AUC大于0.9时,预测效果优秀。最大熵模型预测结果为0~1分布概率值,由低至高表示物种的适宜程度上升。

本文利用最大熵模型基于影响油茶生长的主导气候因子,研究油茶种植气候区划和种植边界。考虑坡度、土壤厚度等土地条件与气候因子相互独立性较强的特点,结合相关研究^[17-18,24-27]直接量化影响油茶种植的坡度和土壤厚度,进行考虑土地影响的我国油茶种植精细化农业气候区划和扩种潜力评估。具体包括以下5个步骤:①利用我国油茶种植分布经纬度数据和潜在气候因子,经过最大熵模型迭代训练,通过潜在气候因子对种植分布的贡献率和置换重要性评价各气候因子作用,确定影响油茶种植分布的主导气候因子;②利用油茶种植分布数据和主导气候因子重新训练模型,根据AUC评价模型模拟效果;③依据模型输出的种植分布概率 P ,结合断点法进行油茶种植4级气候适宜性划分,即 $P \geq 0.5$ 为最适宜区, $0.35 \leq P < 0.5$ 为次适宜区, $0.1 \leq P < 0.35$ 为适宜区, $P < 0.1$ 为不适宜区,将气候适宜以上等级作为油茶可种植区,绘制油茶种植边界;④结合坡度为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 和土壤厚度在50 cm以上的油茶适宜生长地形和土壤条件,利用ArcGIS数据管理和空间分析功能,对油茶气候适宜区进行掩膜处理,得到气候-土地共同影响的精细化油茶气候区划,并分析各适宜种植范围和气候特征;⑤基于气候-土地共同影响的油茶种植气候区划结果,统计各省份适宜种植面积,比较适宜种植面积、实际种植面积和扩种目标的差值,进而提出油茶扩种布局建议。

1.2 数据

本研究所使用的油茶实际种植分布数据来源于文献[4];气候数据来自国家气象信息中心,包括1986—2023年2426个国家地面气象观测站(图1)的日平均气温、最高气温、最低气温、降水、日照时

数、相对湿度等要素,以站点数据为基础采用克里金插值方法对日平均气温、最高气温、最低气温等气象数据网格化;2021年7月土壤厚度和数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来自国家地球系统科学数据中心,根据 DEM 提取空间分辨率为 $7\text{ km}\times 7\text{ km}$ 的坡度数据。利用 ArcGIS 对多源数

据进行矢量化处理、矢栅转换,将数据统一到同一坐标投影和 $7\text{ km}\times 7\text{ km}$ 空间分辨率。

本文插图中所涉及的中国国界和行政区域界线基于审图号为 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图无修改。

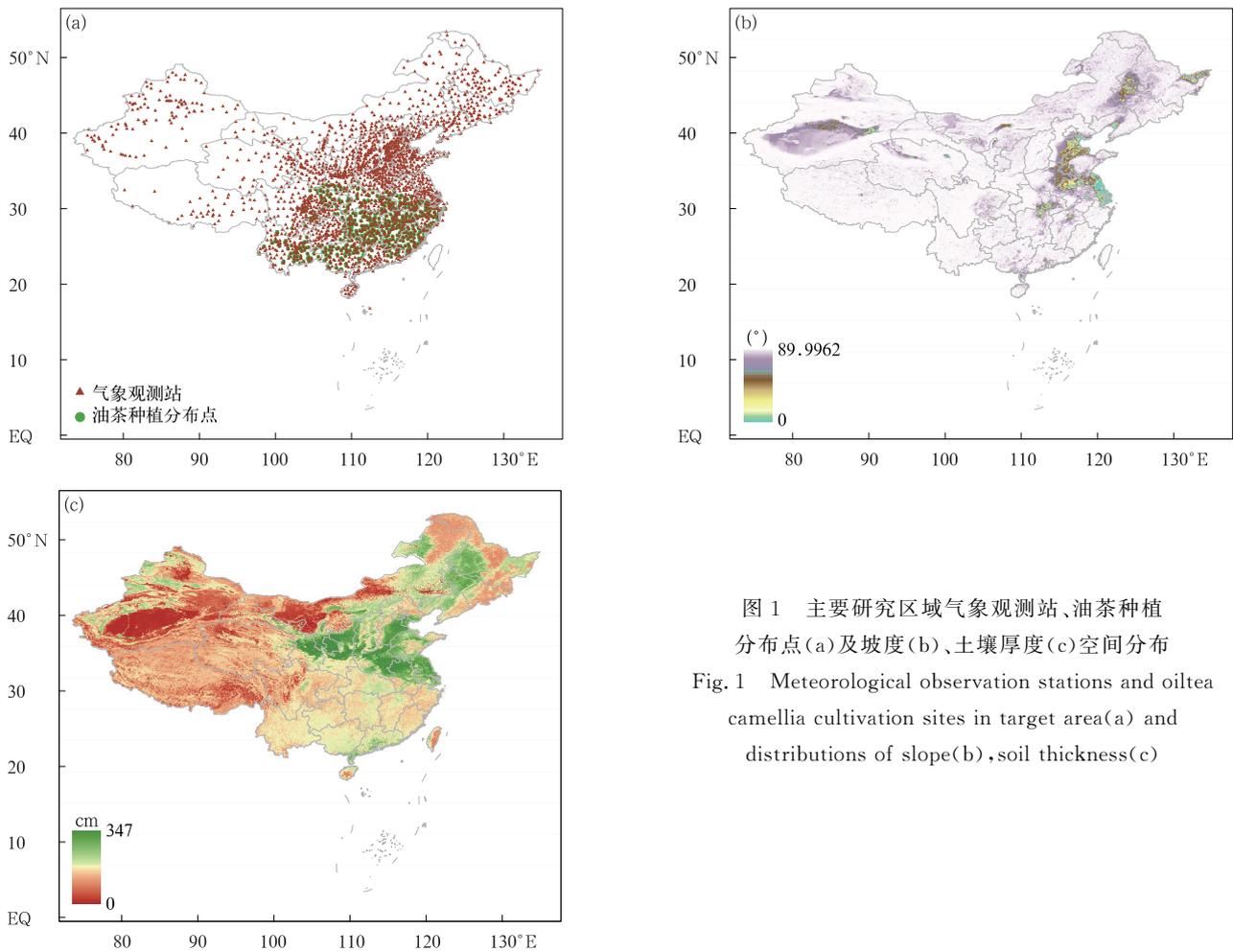


图 1 主要研究区域气象观测站、油茶种植分布点(a)及坡度(b)、土壤厚度(c)空间分布
Fig. 1 Meteorological observation stations and oiltea camellia cultivation sites in target area(a) and distributions of slope(b), soil thickness(c)

1.3 影响因子

气候是影响油茶生长和发育的重要环境条件^[3-4, 28-30]。油茶喜温好光忌寒,结合已有研究选取影响油茶种植分布的潜在影响因子。以年平均气温、大于等于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温反映平均和累积的热量条件,以 1 月平均气温和 7 月平均气温反映热量条件的强度,以连续小于等于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数和连续大于等于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数反映热量条件的持续时间,以年降水量、年降水日数以及年相对湿度反映油茶对水分条件的需求,以年日照日数和年日照累积时数反映油茶对光照条件的需求。

土地是油茶生长的直接条件。坡度影响油茶的采光和土壤水分保持,坡度过大,光照时间短、土壤水分流失快,还会带走土壤中的养分,严重影响油茶植株的生长及果实品质^[16-18];随着坡度变缓,油茶的树高、冠幅、叶面积、单株产果量均有一定增大,但在平原地区倾向于种植大宗粮食作物。因此,油茶一般种植在坡度 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域。土壤是植物根系生长的环境,土壤厚度反映土壤蓄水能力、保肥能力及抗旱能力,油茶种植一般要求土壤厚度在 50 cm 以上^[18, 24-26]。

综上所述,考虑影响油茶生长发育的气候和土

地条件等,选取影响油茶种植分布的潜在因子如 表1所示。

表1 影响油茶种植分布的潜在因子

环境条件	类型	潜在因子	文献出处
气候条件	热量	年平均气温/°C	[3-4,14-18]
		1月平均气温/°C	[3-4,18,28-30]
		7月平均气温/°C	[3-4,18,28-30]
		大于等于10°C活动积温/(°C·d)	[3-4,10,15,18,30]
		日最低气温小于等于-10°C日数/d	[3,30]
	水分	日最高气温大于等于40°C日数/d	[3,30]
		年降水量/mm	[3-4,14,26]
		年降水日数/d	[4,30]
		年平均相对湿度/%	[3-4,14]
		光照	年日照日数/d
年日照累积时数/h	[3-4,11-14]		
土地条件	地形	坡度/(°)	[16-18]
	土壤	土壤厚度/cm	[17,24-26]

2 我国油茶农业气候区划结果

2.1 模型模拟效果评价

利用11个气候因子构建最大熵模型,以分布数据的75%作为训练数据集,其余25%作为测试数据集,利用ROC曲线对模型模拟准确性进行验证。结果表明:基于潜在的气候因子构建的油茶种植分布最大熵模型AUC为0.92,初始模型预测准确性达到优秀标准。

2.2 主导气候因子及其阈值

基于最大熵模型得到潜在气候因子对模型的贡献率和置换重要性如表2所示。气候因子的贡献率和置换重要性结果表明:年降水量贡献率高达60.9%,日最低气温小于等于-10°C日数、大于等于10°C活动积温、年降水量日数的贡献率或置换重要性超过10%,表明模型对这4个因子依赖程度较高;年日照累积时数、年日照日数、年平均气温、7月平均气温、年平均相对湿度、日最高气温大于等于40°C日数和1月平均气温的贡献率和置换重要性

表2 潜在气候因子的贡献率和置换重要性

气候因子	贡献率/%	置换重要性/%
年降水量	60.9	2.6
日最低气温小于等于-10°C日数	14.1	0.7
年日照累积时数	6.5	5.0
大于等于10°C活动积温	4.5	16.3
年降水日数	3.9	46.1
年日照日数	3.7	7.8
年平均气温	2.1	2.0
7月平均气温	1.6	3.7
年平均相对湿度	1.2	5.1
日最高气温大于等于40°C日数	1.0	0.8
1月平均气温	0.7	9.8

相对较低,表明模型对这7个因子的依赖性较小。

刀切法检验各气候因子对油茶种植分布影响的重要性结果如图2所示,单一潜在气候因子对油茶分布模型的增益情况与贡献率的结果基本一致,当仅保留1个因子时,年平均气温、年降水量、大于等

于10°C活动积温、1月平均气温、日最低气温小于等于-10°C日数对油茶最大熵模型的增益较大,而年日照累积时数、年降水日数、年平均相对湿度、7月平均气温、日最高气温大于等于40°C日数、年日照日数对模型的增益较小。

气候因子作为植物生长发育的必要环境条件^[12-15,31-34],相互间存在一定相关性和地域性,综合考虑潜在气候因子贡献率、置换重要性、相关性,选择热量条件 1 月平均气温、大于等于 10 °C 活动积温、最低气温小于等于 -10 °C 日数和水分条件年降

水量作为影响油茶地理分布的主导气候因子。基于主导气候因子和油茶的种植分布数据重新构建最大熵模型,结果表明:重新构建的最大熵模型 ROC 曲线的 AUC 为 0.918,预测准确性达到优秀标准(图 3),可用于油茶种植区的潜在分布预测。

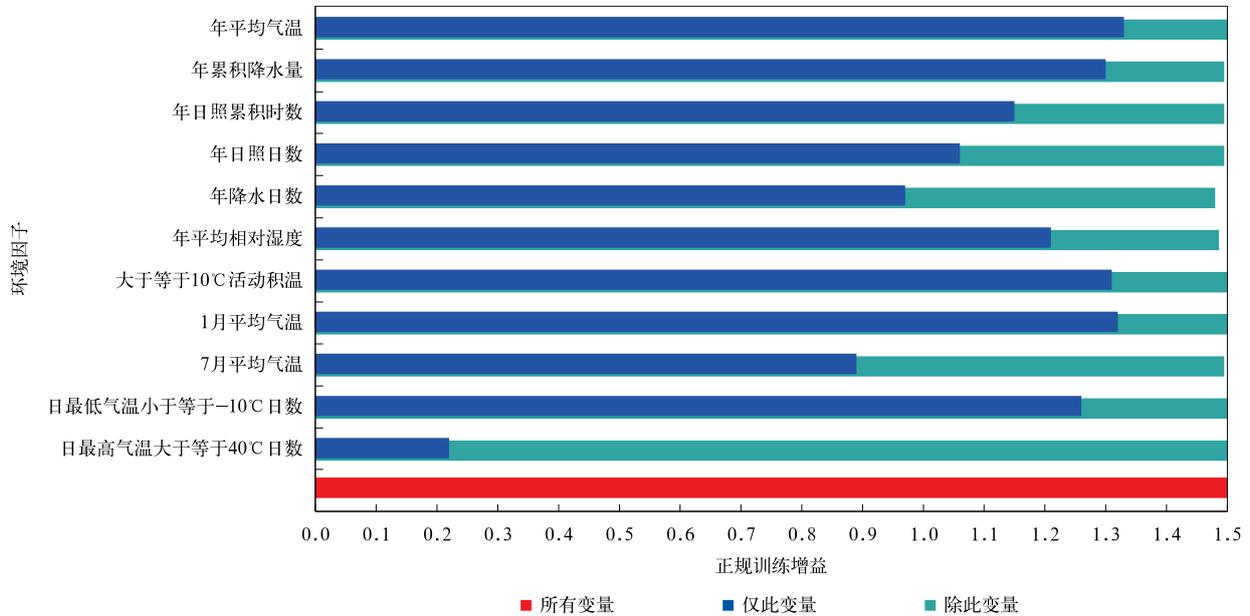


图 2 各潜在气候因子对油茶种植分布贡献

Fig. 2 Contribution of potential climate factors to oiltea camellia cultivation distribution

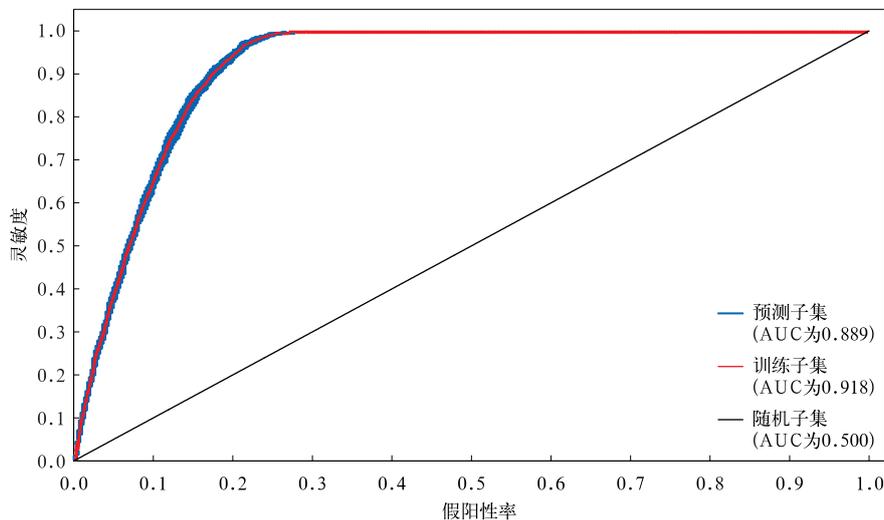


图 3 油茶适宜性 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of suitability for oiltea camellia

2.3 油茶种植边界

基于油茶种植分布的主导气候因子,结合最大熵模型输出油茶种植分布概率 $P \geq 0.1$ 作为划分标准,得到气候-土地共同影响的油茶潜在种植界限

(图 4)。与我国油茶实际种植边界相比,油茶潜在种植边界偏北,考虑气候-土地共同作用较未考虑土地影响的潜在种植边界相对更靠近油茶实际种植边界。气候-土地共同影响的潜在种植边界与实际种

植边界间面积约为 $3.19 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 说明油茶种植分布还存在很大扩展空间。油茶潜在种植边界以南地区为油茶适宜种植区, 主要分布在长江沿线及以南省份, 尤其是四川盆地—秦岭—淮河以南及云贵高原以东至沿海地带, 包含云南、四川、河南、安徽及江苏南部及以南省份, 覆盖我国大部分南方地区, 该区域主要为亚热带季风气候, 光热条件丰富; 油茶潜在种植边界以北为非种植区, 主要是青藏高原、秦岭北部, 相对南方比气温较低、降水少, 特别是秋冬季节极易出现霜冻、冰雪天气不宜油茶生长; 油茶潜在种植边界交界处云南、四川、安徽等地, 以山地地形为主, 气候变化大, 与油茶种植生长的最佳气候、生态条件有所差异。

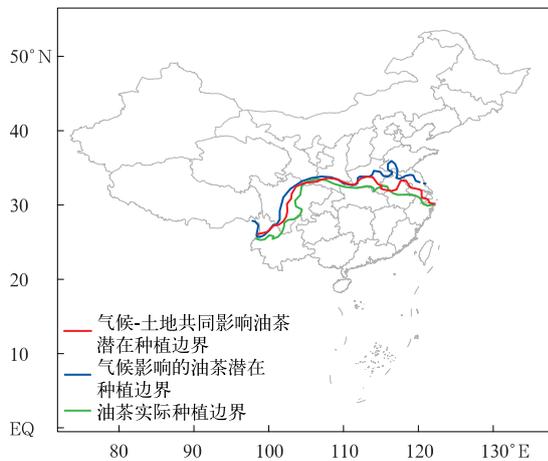


图 4 油茶种植区边界

Fig. 4 Oiltea camellia cultivation boundaries in China

2.4 油茶种植适宜性区划

湖南、江西、广西、湖北、广东、福建、浙江、贵州等是我国主要的油茶栽培区和油茶产区。本研究在最大熵模型得到油茶种植分布概率 P 的基础上, 采用 ArcGIS 技术, 得到我国油茶种植适宜性气候区划(图 5a), 其中最适宜区、次适宜区和适宜区适宜种植的生产潜力分别为 $6.9553 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、 $7.5216 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、 $6.2694 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。引入地形坡度和土壤厚度因子, 得到气候-土地影响的油茶种植精细化农业气候区划(图 5b), 对比图 5a 可见, 最适宜区、次适宜区和适宜区面积从 $2.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 减少至 $7.319 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 缩小 2/3。油茶不同适宜区主导气候因子阈值如表 3 所示。根据图 5b 和表 3, 得到气候-土地影响的油茶种植精细化农业气候区划下不同等级适宜区分布及气候特征。

油茶种植最适宜生长的地区主要包括湖南、江西、福建、浙江的大部分地区、广西北部部分地区、湖北、安徽、四川, 以及重庆的零散小部分地区, 这些地区位于长江流域以南的湿热气候地区, 面积达 $3.003 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占油茶适宜区总面积的 41%。该地区部分地形为丘陵和盆地, 相对地势平坦, 气候湿热, 全年气温大于等于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对温度较高, 光照充足, 降水充沛。油茶最适宜种植地区的气候特点是 1 月平均气温为 $5 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$, 大于等于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 活动积温为 $5400 \sim 8000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 小于等于 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 持续日数小于 2 d, 年降水量为 $1300 \sim 1900 \text{ mm}$ 。

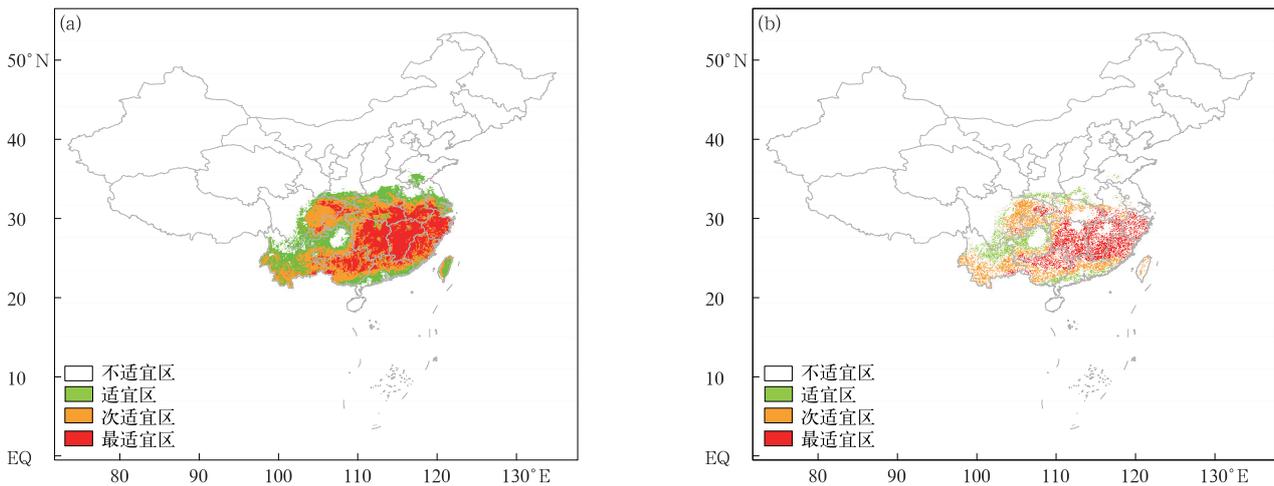


图 5 油茶种植气候适宜区划

(a)气候因子影响的油茶种植区气候适宜区划, (b)气候-土地条件共同影响的油茶种植区气候适宜性区划

Fig. 5 Climatic suitability of oiltea camellia cultivation

(a)climatic suitability of oiltea camellia cultivation in China under effects of climate,

(b)climatic suitability of oiltea camellia cultivation in China under combined effects of climate and soil

表 3 油茶不同种植适宜区等级主导气候因子阈值

主导气候因子	最适宜区	次适宜区	适宜区	不适宜区
1月平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	[5,12]	[4,15]	[2,17]	(-40,2)
大于等于 10°C 活动积温/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	[5400,8000)	[4200,5400)	[2800,4200)	(0,2800)
最低温度小于等于 -10°C 日数/d	[0,2)	[2,5)	[5,10)	[10,200)
年降水量/mm	[1300,1900)	[1100,2100)	[800,1100)	[0,800)

次适宜区主要分布在云南中南部、广西中部、广东北部、重庆大部分地区、湖北中部、四川东北部、湖北西南和安徽南部小部分地区,面积达 $2.858 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约占油茶适宜区总面积的39%。该地区自然环境多样,地形复杂,主要以高原气候和亚热带季风气候为主,气候温暖湿润,降水充沛,能满足油茶的生长发育基本要求。油茶次适宜种植地区的气候特点是1月平均气温为 $4\sim 15^{\circ}\text{C}$,大于等于 10°C 活动积温为 $4200\sim 5400^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,小于等于 -10°C 持续日数小于5 d,年降水量为 $1100\sim 2100 \text{ mm}$ 。

适宜区主要位于次适宜区的边缘,包括云南北部、广西东南部、贵州西南部小部分地区、重庆东南、四川偏南,以及陕西和河南南部的小部分地区,面积达 $1.458 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约占油茶适宜区总面积的20%。该地区主要以温暖湿润的亚热带季风气候为主,夏季炎热多雨,冬季相对温暖干燥。降水量充沛,气温适中,四季分明,但部分地区的热量条件、水分条件及地形相对较差。油茶适宜种植地区的气候

特点是1月平均气温为 $2\sim 17^{\circ}\text{C}$,大于等于 10°C 活动积温为 $2800\sim 4200^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,小于等于 -10°C 持续日数小于10 d,年降水量为 $800\sim 1100 \text{ mm}$ 。

不适宜区主要分布在云南、四川、陕西、河南中北部及偏北地区(图4适宜边界以北),该区域受地形、气候等自然条件影响,偏北地区温度低、降水少,不具备种植优势。

2.5 油茶适宜扩种潜力评估

油茶作为我国重要的油料作物,其种植面积的扩大对于满足市场需求及促进农业产业发展具有显著意义。由图6可见,15个主要产区的适宜种植面积均远高于规划面积(实际种植与新增扩种之和),表明各产区扩种潜力较大。适宜种植面积超过 $6 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的产区有云南、湖南、江西、广西、四川,其中,处于核心发展区的湖南、江西、广西的适宜种植面积分别达 $8.275 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $6.487 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $7.593 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其实际种植面积分别约为 $1.518 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $1.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $0.586 \times 10^6 \text{ hm}^2$,而新增扩

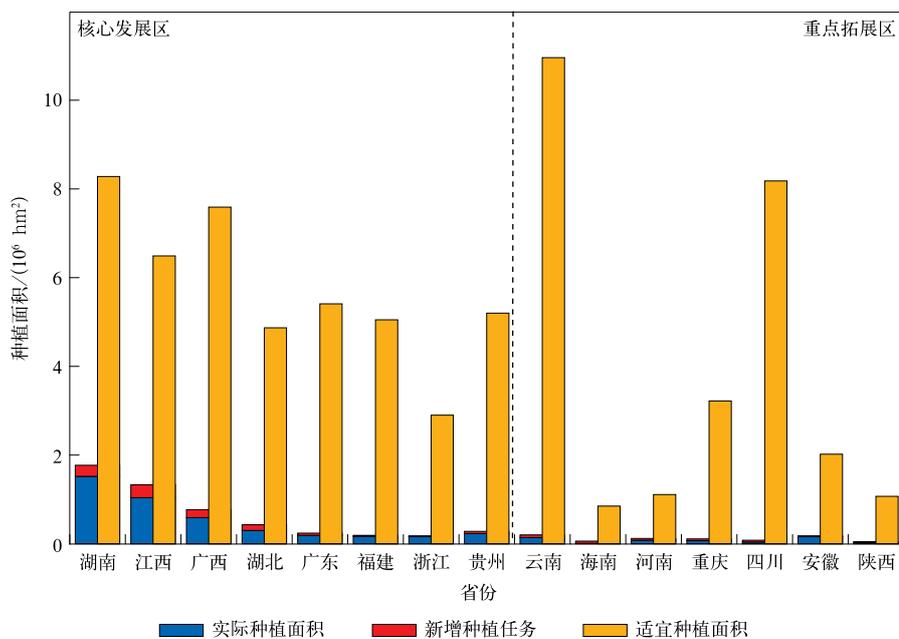


图 6 主要种植省份实际、新增及适宜性种植面积

Fig. 6 Target cultivation area and suitable cultivation area in main cultivation provinces

种规划分别为 $0.254 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $0.285 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $0.182 \times 10^6 \text{ hm}^2$,这3个主产区适宜种植面积是规划种植面积的4倍以上。另外,核心发展区广东适宜种植面积达 $5.408 \times 10^6 \text{ hm}^2$,实际种植面积为 $0.188 \times 10^6 \text{ hm}^2$,新扩种规划面积仅为 $0.0504 \times 10^6 \text{ hm}^2$,广东扩种潜力相对较大。处于重点拓展区的云南和四川,其适宜种植面积高达 $8.275 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $8.176 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其实际种植面积分别为 $0.138 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $0.0449 \times 10^6 \text{ hm}^2$,新增扩种规划为 $0.0577 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $0.0408 \times 10^6 \text{ hm}^2$,新增扩种规划面积占当前实际种植面积的40%和90%。该比例反映了云南和四川在油茶种植方面潜在增长空间大。另外重点拓展区,重庆、河南等虽然现有种植面积相对较低,但适宜种植面积远超过现有水平,表明这些地区的油茶种植潜力尚未被充分挖掘。

3 我国油茶农业气候区划及扩种潜力评估

本文利用最大熵模型和 ArcGIS 技术筛选影响油茶种植分布的主导气候因子,开展基于气候-土地共同影响的油茶种植精细化农业气候区划和主要产区的气候适宜面积评估,对比油茶实际种植和《行动方案》发展规划,提出核心发展区和主要拓展区内的15个主要油茶种植省份的扩种潜力,可为农业气候资源开发利用和优化油茶生产布局提供科学依据。

3.1 我国油茶种植潜力评估

科学评估扩种潜力是油茶种植合理规划的前提和基础。油茶潜在种植边界在四川盆地—秦岭—淮河以南及云贵高原以东至沿海地带,种植地区扩展至山地或者丘陵相对平缓的安徽、河南、陕西、四川等省份。本研究基于气候-土地共同作用条件下的我国油茶气候区划,评估得到油茶适宜种植面积约 $7.319 \times 10^7 \text{ hm}^2$,仅为王小军等^[15]所评估油茶种植潜力($2.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$)和邬定荣等^[14]所评估油茶种植潜力($2.3 \times 10^8 \text{ hm}^2$)的1/3左右,主要原因是在进行气候适宜性区划时,进一步考虑了坡度、土壤厚度等关键土地因素对油茶种植的影响。从油茶种植潜力看,云南、四川、广东、重庆等省份种植面积相对较少,但种植潜力较大,其中云南种植潜力最高达 $1.096 \times 10^7 \text{ hm}^2$,高于湖南、江西等主要产区,因此,在制定油茶种植扩种规划时,除对核心发展区的湖南、江西、广西、湖北等地关注外,可适当提高云南、四川、广东、重庆等地区的扩种指标。

3.2 油茶种植的主导农业气候因子及其综合作用

农业气候因子间存在相互依存性,不同农业气候因子对油茶种植所起的作用不同,有些因子起主导作用。本研究对初步筛选的年平均气温、年降水量、年日照时数、大于等于 10°C 积温等11项农业气候因子进行分析,通过综合考虑各因子对油茶种植分布的贡献,筛选确定1月平均气温、小于等于 10°C 活动积温、最低气温小于等于 -10°C 日数、年降水量4项农业气候因子是影响油茶种植分布的主导气候因子。油茶适宜生长于温暖湿润的环境,最冷月平均气温、活动积温、极端最低气温等气候因子代表了油茶生长所需的热量指标^[3-4],如果最低月平均气温过低或者持续时间过长,会导致油茶大量落花落果。年降水量是影响油茶生长发育的重要气候因子,也是油茶生长的重要水分指标。环境过度干燥或过度湿润必然影响油茶的生长和油脂的转化。该筛选过程符合对影响植物的农业气候因子的一般认识,所得结果反映了主导气候因子对油茶种植的影响。

同时,植物生长需要一定的光、温、水等农业气候资源配合,农业气候因子综合作用于植物,气候适宜性是衡量气候因子综合作用的常用指标^[3-4,28-30,34]。20世纪80年代的农林作物农业气候区划较多进行分级农业气候区划,如丘宝剑^[35]主张依据主要和辅助农业热量气候指标将中国农业气候区划分为区域、带和亚带3级;高亮之等^[36]将热量、水分、作物生长季及地形水利等因素划分为种植带、气候生态带和气候生态区3级。在油茶气候区划方面,则多基于对影响种植的气候因子进行主成分分析和聚类分析^[13],得到不同空间类型划分。在农业气候区划中如何确定不同因子对气候适宜性作用的大小是研究者关注的问题之一,常通过多因子等权重平均^[37]、加权求和^[38]、层次分析^[26,39]等方法计算综合作用指数评价气候适宜性高低。对气候因子作用权重处理的不同可能是区划结果不确定性的来源之一。本研究在筛选主导气候因子的基础上,基于最大熵模型的迭代计算,得到各主要气候因子的贡献权重及其影响的油茶种植存在概率,是对多因子综合作用的一种有效量化表达。

3.3 气候-土地综合作用与油茶精细化农业气候区划

精细化农业气候区划对油茶种植布局更具指导意义。以往较多区域^[11,37]和全国尺度^[14-15,26]的油茶种植农业气候区划多从气候条件评价与划分出发,

得到国土空间范围的气候区划结果,忽略了地表因素与气候共同作用对油茶种植分布的影响,制约了研究结果对农业生产的指导作用。认识到土地对油茶种植的影响,赖晓玲等^[40]在江西龙南县油茶种植气候区划研究中考虑土地利用作用;江涤非等^[39]将坡度、坡向作为油茶地形区划指标,得到更具指导意义的该县区划结果。在更广泛的气候-植被关系研究中,翁恩生等^[41]根据植物冠层特征和水热气候条件进行我国植物功能型划分;周广胜等^[42]考虑地形因素,发展地形-气候-遥感信息结合的区域植被制图方法,提高了植被类型绘制精度;陈育峰等^[43]将土壤和海拔引入我国气候-植被建模中,使模型精度由40%提高至74%,且改善了单项植被类型模拟精度;吴伟光等^[44]将气候与土壤和坡度条件相结合分析了我国生物柴油原料树种麻疯树种植的土地潜力。上述研究表明在气候分析的基础上,考虑土地因素有助于提高植被分布模拟的精准度。本研究在进行农业气候适宜性区划的基础上,进一步考虑坡度、土壤厚度对油茶生长的限制作用,得到气候-土地因素综合影响的全国范围的油茶种植精细化农业气候区划,其研究结果更具生产指导意义。

需要指出的是,农业气候区划成果可以为作物种植布局提供依据^[9,20-21,24,45],但油茶作为一种经济林业,其实际种植是自然生态和社会经济综合作用的结果,一些适宜油茶种植的土地可能被用于种植其他作物,因此,油茶气候适宜种植区和实际种植分布间可能存在差异,不能根据实际种植分布作为气候区划结果的判定标准;本研究侧重从气候适宜性方面进行油茶种植气候适宜性区划,未对适宜种植区内农业气象灾害风险进行评估。另外,当前全球变化背景下气候变化迅速,未来气候变化情景下我国油茶种植气候适宜性可能发生变化。

4 结 论

1) 影响我国油茶种植分布的主导气候因子为1月平均气温、大于等于10℃活动积温、日最低气温小于等于-10℃日数和年降水量。

2) 考虑气候-土地共同作用提高了油茶种植农业气候区划的精细程度,其中适宜种植面积达 $7.319 \times 10^7 \text{ hm}^2$,较气候适宜区划缩减2/3。

3) 我国油茶种植边界主要分布在四川盆地—秦岭—淮河以南及云贵高原以东至沿海地带,可种

植区包括云南、四川、河南、安徽及江苏南部及以南省份,覆盖我国大部分南方地区,该区域主要为亚热带季风气候,光水热条件丰富。

4) 根据自然断点法将油茶农业气候区划分为最适宜区、次适宜区、适宜区和不适宜区4个等级,其中最适宜区面积为 $3.003 \times 10^7 \text{ hm}^2$,次适宜区面积达 $2.858 \times 10^7 \text{ hm}^2$,适宜区面积达 $1.458 \times 10^7 \text{ hm}^2$,各省油茶种植潜力远超过实际种植面积和《行动方案》种植规划,可适当提高云南、四川、广东、广西等绝对生产潜力较大省份的扩种目标。

参 考 文 献

- [1] 王瑞元. 发展木本油料产业是提高我国食用油自给率的重要举措. 粮食与食品工业, 2016, 23(4): 1-4.
Wang R Y. Developing woody oil industry is an important measure to improve the self-sufficiency rate of edible oil in China. *Cereal Food Ind*, 2016, 23(4): 1-4.
- [2] 马艳. 国家粮油安全与生态绿色发展——我国油茶产业现状的发展路径. 绿色中国, 2022(2): 50-59.
Ma Y. National food and oil security and ecological green development—Current situation and development path of China's oil tea industry. *Green China*, 2022(2): 50-59.
- [3] 蒋元华, 廖玉芳. 油茶气象影响指标研究综述. 中国农学通报, 2015, 31(28): 179-183.
Jiang Y H, Liao Y F. Research summary on meteorological influence indicators of oil tea *Camellia*. *Chinese Agric Sci Bull*, 2015, 31(28): 179-183.
- [4] 廖玉芳, 郭凌曜, 蒋元华, 等. 油茶与气候. 长沙: 湖南大学出版社, 2020.
Liao Y F, Guo L Y, Jiang Y H, et al. *Camellia oleifera* and Climate. Changsha: Hunan University Press, 2020.
- [5] 唐光旭, 林小凡. 江西省油茶栽培区划和立地类型划分的研究. 江西林业科技, 1988, 16(4): 1-12.
Tang G X, Lin X F. Study on cultural division and classification of site type for *Camellia oleifera* in Jiangxi Province. *Jiangxi For Sci Technol*, 1988, 16(4): 1-12.
- [6] 国家林业和草原局, 国家发展和改革委员会, 财政部. 加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025年). 2023.
State Forestry and Grassland Administration, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance. Accelerating the Three-year Action Plan for the Development of *Camellia* Industry(2023—2025). 2023.
- [7] 宋艳玲, 周广胜, 郭建平, 等. 北方冬小麦冬季冻害及播期延迟应对. 应用气象学报, 2022, 33(4): 454-465.
Song Y L, Zhou G S, Guo J P, et al. Freezing injury of winter wheat in northern China and delaying sowing date to adapt. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 454-465.
- [8] 宋艳玲, 周广胜, 郭建平, 等. 气候变暖对冬小麦徐麦33产量和品质影响. 应用气象学报, 2023, 34(5): 552-561.

- Song Y L, Zhou G S, Guo J P, et al. Influences of global warming on yield structure and quality of winter wheat Xumai 33. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 552-561.
- [9] 李凯伟, 张继权, 魏思成, 等. 东北春大豆精细化气候区划. 应用气象学报, 2021, 32(4): 408-420.
- Li K W, Zhang J Q, Wei S C, et al. Refined climatic zoning of spring soybean in Northeast China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 408-420.
- [10] 付瑞滢, 宴理华, 武建华. 铜仁优质油茶气候适应性研究及精细化区划. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(5): 150-158.
- Fu R Y, Yan L H, Wu J H. On climate adaptability analysis and planting regions of high quality oil-tea in Tongren. *J Southwest China Norm Univ Nat Sci Ed*, 2015, 40(5): 150-158.
- [11] 李贵琼, 蒋文家, 莫建国, 等. 六盘水市红花油茶种植气候精细化区划研究. 现代农业科技, 2018(13): 12-15.
- Li G Q, Jiang W J, Mo J G, et al. Fine climate zoning of *Camellia oleifera* cultivation in Liupanshui City. *Mod Agric Sci Technol*, 2018(13): 12-15.
- [12] 余优森, 任三学, 谭凯炎. 中国普通油茶含油率品质气候区域划分与层带研究. 自然资源学报, 1999, 14(2): 123-127.
- Yu Y S, Ren S X, Tan K Y. Study on climatic division and stratification of oil content and quality of common *Camellia oleifera* in China. *J Nat Resour*, 1999, 14(2): 123-127.
- [13] 黄志伟, 曹剑, 袁德彪, 等. 基于主成分聚类分析的中国油茶栽培区划. 西部林业科学, 2016, 45(3): 155-160.
- Huang Z W, Cao J, Yuan D Z, et al. Cultural regionalization of *Camellia oleifera* C. Abel. based on principal component analysis and cluster analysis. *J West China For Sci*, 2016, 45(3): 155-160.
- [14] 郭定荣, 王培娟, 霍治国, 等. 中国普通油茶种植气候适宜性区划. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1313-1323.
- Wu D R, Wang P J, Huo Z G, et al. Climatic suitability regionalization of *Camellia oleifera* Abel. in China. *Chinese J Ecol*, 2021, 40(5): 1313-1323.
- [15] 王小军, 刘光旭, 肖彤. 气候变化情景下油茶生长的适宜性特征. 热带地理, 2020, 40(5): 868-880.
- Wang X J, Liu G X, Xiao T. Suitability characteristics of *Camellia oleifera* growth under climate change scenarios. *Trop Geogr*, 2020, 40(5): 868-880.
- [16] 何方, 吕芳德, 漆龙霖, 等. 湖南油茶栽培区划及立地类型划分的研究. 经济林研究, 1986, 4(1): 7-29.
- He F, Lu F D, Qi L L, et al. A study of the classification of the oil-tea culturing areas and the types of their stands in Hunan Province. *Econ For Res*, 1986, 4(1): 7-29.
- [17] 曾宇怀, 钟凯文, 王小辉, 等. 基于 GIS 的兴宁市油茶种植适宜性评价. 热带地理, 2014, 34(1): 104-107.
- Zeng Y H, Zhong K W, Wang X H, et al. Suitability evaluation of *Camellia* cultivation based on GIS in Xingning City. *Trop Geogr*, 2014, 34(1): 104-107.
- [18] 陈倩倩, 薛冬冬, 邱权, 等. 基于 GIS 空间分析的广东省油茶种植适宜性评价. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(4): 62-70.
- Chen Q Q, Xue D D, Qiu Q, et al. Suitability evaluation of *Camellia oleifera* planting based on GIS spatial analysis in Guangdong Province. *J South China Norm Univ Nat Sci Ed*, 2016, 48(4): 62-70.
- [19] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究. 中国农业科学, 2012, 45(2): 218-227.
- Duan J Q, Zhou G S. Climatic suitability of double rice planting regions in China. *Sci Agric Sinica*, 2012, 45(2): 218-227.
- [20] 程晋昕, 段长春, 闫生杰. 基于 MaxEnt 模型的薄壳山核桃气候适宜性区划. 应用气象学报, 2020, 31(5): 631-640.
- Cheng J X, Duan C C, Yan S J. Climate suitability regionalization of pecan based on MaxEnt model. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 631-640.
- [21] 唐俊贤, 王培娟, 俄有浩, 等. 中国大陆茶树种植气候适宜性区划. 应用气象学报, 2021, 32(4): 397-407.
- Tang J X, Wang P J, E Y H, et al. Climatic suitability zoning of tea planting in China's Mainland. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 397-407.
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Model*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [23] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. *Biodivers Sci*, 2007, 15(4): 365-372.
- [24] 柏明娥, 曾岳明, 刘跃钧, 等. 美丽胡枝子对油茶林地土壤肥力和水土保持作用的影响. 浙江林业科技, 2014, 34(4): 68-71.
- Bai M E, Zeng Y M, Liu Y J, et al. Effect of interplanting *Lespedeza formosa* in *Camellia oleifera* forest on soil fertility and water and soil conservation. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2014, 34(4): 68-71.
- [25] 胡娟娟, 宋浩, 蒋年芹, 等. 不同培土厚度对油茶叶片抗寒性生理指标的影响. 皖西学院学报, 2022, 38(2): 13-18.
- Hu J J, Song H, Jiang N Q, et al. Effect of different moulding depth on physiological indicators of cold resistance of *Camellia oleifera* leaves. *J West Anhui Univ*, 2022, 38(2): 13-18.
- [26] 宋英强, 杨粉莉, 杨博, 等. 我国油茶种植环境适宜性评价初步研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(2): 180-188.
- Song Y Q, Yang F L, Yang B, et al. A primary study on the suitability of *Camellia oleifera* Abel planting environment in China. *J Shandong Agric Univ Nat Sci Ed*, 2015, 46(2): 180-188.
- [27] 周刚. 湖南省水土保持林树种选择及配置模式研究. 北京: 北京林业大学, 2008.
- Zhou G. Study on the Trees Species Selection and Configuration Model for Soil and Water Conservation Forest in Hunan

- Province. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [28] 谢培雄. 气候因子与油茶产量的关系. 湖南林业科技, 1984, 11(3): 21-23.
Xie P X. Relationship between climate factors and *Camellia oleifera* yield. *Hunan For Sci Technol*, 1984, 11(3): 21-23.
- [29] 刘中新, 周汝宝, 陶列, 等. 引起鄂东北油茶落花落果的气象灾害研究. 中低纬山地气象, 2019, 43(2): 34-38.
Liu Z X, Zhou R B, Tao L, et al. Study on meteorological disasters causing *Camellia* flower and fruit drop in the northeast of Hubei. *Mid Low Latitude Mt Meteor*, 2019, 43(2): 34-38.
- [30] 郭凌曜, 蒋元华, 廖玉芳. 油茶气象灾害普查和风险区划研究——以湖南为例. 灾害学, 2023, 38(1): 125-129.
Guo L Y, Jiang Y H, Liao Y F. *Camellia oleifera* meteorological disaster census and risk zoning research: Taking Hunan as an example. *J Catastrophology*, 2023, 38(1): 125-129.
- [31] 鲁韦坤, 李蒙, 胡雪琼, 等. 气候变化对云南橡胶潜在种植区的影响. 应用气象学报, 2023, 34(3): 379-384.
Lu W K, Li M, Hu X Q, et al. Impact of climate change on potential planting areas of rubber trees in Yunnan. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 379-384.
- [32] 王俊方, 周广胜, 宋艳玲, 等. 气象条件对廉玉1号玉米产量的影响. 应用气象学报, 2023, 34(3): 373-378.
Wang J F, Zhou G S, Song Y L, et al. Effects of meteorological conditions on the yield of Lianyu No. 1 maize. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 373-378.
- [33] 刘维, 宋迎波. 基于气象要素的逐日玉米产量气象影响指数. 应用气象学报, 2022, 33(3): 364-374.
Liu W, Song Y B. A daily meteorological impact index of maize yield based on weather elements. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 364-374.
- [34] 李欣, 王培娟, 唐俊贤, 等. 江南华南茶树高温热害等级指标及分布特征. 应用气象学报, 2024, 35(1): 57-67.
Li X, Wang P J, Tang J X, et al. High temperature heat damage grade index of tea plants and its distribution characteristics in southern Yangtze River and South China. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(1): 57-67.
- [35] 丘宝剑. 中国农业气候区划再论. 地理学报, 1983, 38(2): 154-162.
Qiu B J. Further study on the regionalization of agroclimate of China. *Acta Geogr Sinica*, 1983, 38(2): 154-162.
- [36] 高亮之, 李林, 金之庆. 中国水稻的气候资源与气候生态研究. 农业科技通讯, 1986(4): 5-8.
Gao L Z, Li L, Jin Z Q. Study on climate resources and climate ecology of rice in China. *Bull Agric Sci Technol*, 1986(4): 5-8.
- [37] 陆魁东, 宋忠华, 杜东升, 等. 湖南油茶 GIS 精细化气候区划研究. 中国农学通报, 2011, 27(8): 362-365.
Lu K D, Song Z H, Du D S, et al. Refined climate regionalization of *Camellia* in Hunan based on GIS. *Chinese Agric Sci Bull*, 2011, 27(8): 362-365.
- [38] 林宏建, 曾钦文, 钟东良, 等. 河源市油茶种植气候适宜性精细化区划. 广东气象, 2023, 45(3): 87-90.
Lin H J, Zeng Q W, Zhong D L, et al. Fine division of climate suitability of *Camellia oleifera* planting in Heyuan City. *Guangdong Meteor*, 2023, 45(3): 87-90.
- [39] 江涤非, 郭海峰, 卿燃莉, 等. 邵阳县油茶种植气候适宜性评价. 江西农业学报, 2021, 33(1): 76-81.
Jiang D F, Guo H F, Qing R L, et al. Climate suitability evaluation of *Camellia* in Shaoyang County. *Acta Agric Jiangxi*, 2021, 33(1): 76-81.
- [40] 赖晓玲, 黄伟, 张理宁, 等. 龙南县油茶种植气候分析与区划. 现代农业科技, 2017(11): 202-203.
Lai X L, Huang W, Zhang L N, et al. Climatic Analysis and Regionalization of *Camellia oleifera* Planting in Longnan County. *Mod Agric Sci Technol*, 2017(11): 202-203.
- [41] 翁恩生, 周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分. 植物生态学报, 2005, 29(1): 81-97.
Weng E S, Zhou G S. Defining plant functional types in China for global change studies. *Acta Phytoecol Sinica*, 2005, 29(1): 81-97.
- [42] 周广胜, 任鸿瑞, 刘通, 等. 一种基于地形-气候-遥感信息的区域植被制图方法及其在青藏高原的应用. 中国科学(地球科学), 2023, 53(2): 227-235.
Zhou G S, Ren H R, Liu T, et al. A new regional vegetation mapping method based on terrain-climate-remote sensing and its application on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sci Sinica Terrae*, 2023, 53(2): 227-235.
- [43] 陈育峰. 基于土壤分类的中国气候-植被模型. 自然科学进展, 1999, 9(7): 606-611.
Chen Y F. Climate-vegetation model of China based on soil classification. *Natural Science Progress*, 1999, 9(7): 606-611.
- [44] 吴伟光, 黄季焜, 邓祥征. 中国生物柴油原料树种麻疯树种植土地潜力分析. 中国科学(地球科学), 2009, 39(12): 1672-1680.
Wu W G, Huang J K, Deng X Z. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstocks for biodiesel in China. *Sci China (Earth Sci)*, 2009, 39(12): 1672-1680.
- [45] 刘聪, 李凯伟, 张继权, 等. 基于气候适宜度的南方柑橘种植精细化气候区划. 应用气象学报, 2021, 32(4): 421-431.
Liu C, Li K W, Zhang J Q, et al. Refined climatic zoning for citrus cultivation in Southern China based on climate suitability. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 421-431.

Agro-climatic Zoning of Oiltea Camellia in China Based on Climate-land Integrated Impacts

Sun Guanghui¹⁾²⁾ Duan Juqi³⁾ Li Junru⁴⁾ Liao Yaoming³⁾

¹⁾ (CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147)

²⁾ (Chongqing Meteorological Service Center, Chongqing 401147)

³⁾ (National Climate Center, Beijing 100081)

⁴⁾ (The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077)

Abstract

In recent years, China has accelerated the development of oiltea camellia industry and promoted the expansion of oiltea camellia cultivation nationwide, necessitating a refined agricultural climate zoning for oiltea camellia cultivation across the country. Considering soil factors is crucial for enhancing the precision of agricultural climate zoning for oiltea camellia. Therefore, based on the selection of potential climate factors affecting oiltea camellia cultivation distribution, as well as land conditions such as slope and soil thickness, dominant climate factors are analyzed using maximum entropy (MaxEnt) model and ArcGIS technology. It provides a refined climate zoning of oiltea camellia cultivation in China based on the joint effect of climate and land, identifying the potential for expansion and offering a scientific basis for the planning and implementation of oiltea camellia expansion. Results indicate the dominant climate factors affecting oiltea camellia cultivation distribution in China are the average temperature in January, accumulated temperature above or equal to 10 °C, consecutive days with minimum temperature equal to or below -10 °C, and annual cumulative precipitation. Taking into account the impact of slope and soil thickness on climatic suitability analysis, the climate zoning for oiltea camellia is divided into four suitability levels: The most suitable, more suitable, suitable region, and unsuitable region. The area for the most suitable region is $3.003 \times 10^7 \text{ hm}^2$, more suitable region is $2.858 \times 10^7 \text{ hm}^2$, and suitable region is $1.458 \times 10^7 \text{ hm}^2$. The precision of regional climate zoning for oiltea camellia cultivation is enhanced, reducing the suitable planting area for oiltea camellia by two-thirds compared to those not considering land factors. Suitable cultivation areas for oiltea camellia in China are in the region south of Yangtze River, especially from Sichuan Basins to the Qinling Mountains to the south of Huai River, and the east of Yungui Plateau to the coastal areas. Compared to the current planting area and range, oiltea camellia in China has significant potential for expansion. The potential planting boundaries, considering the joint effect of climate and land, tend to be further north. It suggests significant potential for expansion in the distribution of oiltea camellia in China. Therefore, when planning the layout of oiltea camellia cultivation, in addition to considering major planting areas such as Hunan, Jiangxi, Guangxi and Hubei, provinces with significant expansion potential such as Yunnan, Sichuan, Guangdong and Chongqing should also be taken into account, and their planting areas should be appropriately increased.

Key words: oiltea camellia; agricultural climate zoning; expansion potential; MaxEnt model