doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.058

未来气候变化下中国西南地区节水抗旱稻适生区变化特征研究

刘小刚[1]　普嘉鹏[1]　韩焕豪[1]　李加念[1]　李　娜[1]　崔宁博[2]

(1.昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500;2.四川大学水利水电学院,成都 610065)

摘要:节水抗旱稻对实现农业可持续发展和保障粮食安全具有重要作用,西南地区是节水抗旱稻的主要推广地区之一,气候变化会显著改变节水抗旱稻种植的水资源和热量资源,从而对适生区产生影响。本文通过构建地理信息系统(GIS)和多准则决策(MCDM)模型(BCM-GIS),考虑气候、地形和土壤因子对节水抗旱稻种植分布的影响,综合分析了当前(2000—2019 年)和未来(2020—2099 年)不同气候变化情景下(RCP4.5 和 RCP8.5)中国西南地区节水抗旱稻适生区变化特征。研究结果表明,BCM-GIS 模型预测精度较高,AUC(Area under curve)值为 0.884,表明其适用于节水抗旱稻适生区分析。年降雨量、生育期内大于等于 10℃积温、坡度和土壤质地对节水抗旱稻的适宜种植分布有显著影响。当前节水抗旱稻高适生区主要分布在云南德宏、临沧、普洱、西双版纳、文山、曲靖,贵州黔西、安顺、黔南、铜仁、黔东南,四川成都、内江、自贡、达州、广安和重庆中西部等地区,占西南地区耕地面积的 20.82%,约 3.279×10^4 km^2。中适生区和低适生区面积分别占西南地区耕地面积的 43.83% 和 35.24%,约为 6.903×10^4 km^{2}和 5.551×10^4 km^2。在未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下,2020—2099 年节水抗旱稻的高适生区面积显著增加,并呈向北移动趋势,中适生区和低适生区面积则出现一定幅度下降。研究结果可为节水抗旱稻种植和推广提供重要科学依据,并减少气候变化对农业生产的影响。

关键词:节水抗旱稻;适生区;气候变化;BCM-GIS 模型;西南地区

中图分类号:S162.2;S511.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0618-09　　**OSID**:

Suitability Area of Water-saving and Drought-resistant Rice Cultivation in Southwest China under Future Climate Scenarios

LIU Xiaogang[1]　PU Jiapeng[1]　HAN Huanhao[1]　LI Jianian[1]　LI Na[1]　CUI Ningbo[2]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *College of Water Resources and Hydropower*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: Climate change will significantly alter the water and heat resources necessary for cultivating water-saving and drought-resistant rice, thereby affecting the suitable areas for such cultivation. A geographic information system (GIS) and a multi-criteria decision-making (MCDM) model (BCM-GIS) were established. The impacts of climate, topography, and soil were comprehensively considered to evaluate the suitability area for drought-resistant and water-saving rice in the Southwest China under both currents (2000—2019) and future climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). The results indicated that the BCM-GIS model had a high prediction accuracy with an area under curve (AUC) value of 0.884, confirming its applicability for suitability analysis of water-saving and drought-resistant rice cultivation areas. Annual rainfall, equal to or greater than 10℃ cumulative temperature during the reproductive period, slope, and soil texture had significant effects on the distribution of suitable cultivation of water-saving and drought-resistant rice. The current highly suitable zones for water-saving and drought-resistant rice were primarily located in Dehong, Lincang, Pu'er, Xishuangbanna, Wenshan, and Qujing in Yunnan Province; Qianxi, Anshun, Qiannan, Tongren, and Qiandongnan in Guizhou Province; Chengdu, Neijiang, Zigong, Dazhou, and Guang'an in Sichuan Province; and the central-

收稿日期:2024-12-07　修回日期:2025-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52379040)、云南省基础研究重点项目(202301AS070030)和云南省重大科技专项计划项目(202302AE090024)

作者简介:刘小刚(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail:liuxiaogangjy@126.com

western regions of Chongqing City. These areas accounted for 20.82% of the total cultivated land in Southwest China, approximately 3.279×10^4 km^2. The medium-suitability and low-suitability zones accounted for 43.83% and 35.25% of the total cultivated land in Southwest China, respectively, amounting to approximately 6.902×10^4 km^2 and 5.552×10^4 km^2. Under the future RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, the areas of water-saving and drought-resistant rice in the highly suitable zone were increased significantly during 2020—2099 and showed a northward trend, while the areas of the medium suitable zone and the low suitable zone decreased to some extent. The latest multi-criteria decision-making methods were used and the response of suitable areas for water-saving and drought-resistant rice were analyzed.

Key words: water-saving and drought-resistant rice; suitability area; climate change; BCM – GIS; Southwest China

0　引言

节水抗旱稻是一种兼具水稻高产优质特性和旱稻节水抗旱特性的一种新型栽培稻，可在水田种植，也可在旱地栽培，与传统水稻相比具有节水降本、抗旱减排等优势[1]。由于节水抗旱稻节水减排效果明显，生态效益和经济效益显著，促进了绿色农业发展，近年来在全国已大面积推广应用，种植面积超过 3.3×10^5 hm^2[2]。西南地区是节水抗旱稻主要推广地区之一，该地区季节性干旱和水资源短缺问题突出，属气候变化敏感区和生态环境脆弱区，耕地类型以旱坡地为主[3]。节水抗旱稻不仅可以缓解水资源短缺，还可以有效抵抗干旱环境[4]，进行节水抗旱稻的推广种植对提高西南地区农业生产和保障粮食安全有重要意义。

以全球变暖和降水异常为代表的气候变化已对生态系统和人类社会产生了重要影响[5]。农业是受气候变化影响最为显著的行业之一，温度和降水变化会使农业生产系统发生重大改变，从而威胁粮食生产安全[6]。随着全球气候变暖和降水异常导致极端气候事件（干旱、高温、洪水等）进一步加剧，作物生理耐受性和生长所需资源会受到直接或间接影响，进而导致作物的生长周期缩短或延长、产量受到影响和适生区发生变化[7]。最新研究表明，未来西南地区的高山植被适生区会减少[8]，而云南松的适生区会增加[9]，随着气候的暖干化，西南地区可能更多种植耐旱作物，例如小麦、玉米、节水抗旱稻等[10]，目前未见针对气候变化对西南地区节水抗旱稻适生区影响的相关研究，因此明确西南地区影响节水抗旱稻适宜种植分布的主要环境因子和未来气候变化下节水抗旱稻适宜生境分布特征，对于节水抗旱稻种植推广和保障粮食安全具有重要意义。

作物种植的分布不仅受到温度、降水、日照等气候条件影响，还受到土壤和地形的影响[11]，温度和降水是作物生长发育最重要的因素，农作物的生产很大程度上取决于当地的气候和农业资源条件，气候条件的地域差异性导致了作物分布的地域性。例如，热量和降水条件适宜的地区可能更适合水稻种植，而干旱地区可能更适合耐旱作物[12]。土壤是作物生长的基础，土壤中的有机质是作物养分的主要来源[13]，土壤质地会影响作物根系发展和水分、养分吸收，不同作物对土壤质地有不同的适应性[14]。地形则通过改变土壤特性（土壤养分、土壤质地等）和水热资源的再分配，进而对作物的生长产生影响，因此对作物分布有重要影响[15]。目前大多数对于作物适生区的研究只考虑了气候因素，而忽略了非气候因素的影响，导致预测结果无法更准确地指导作物的实际种植分布[16]。

GIS 可以处理和模拟从各方面收集的数据，将空间数据和定性定量的描述性信息数据库相结合[17]，已成为研究作物适生区的重要工具[18-19]。多准则决策方法（Multi-criteria decision making，MCDM）通过层次结构模型将多个指标信息组合在一起形成单一的评估标准，是 GIS 环境中常用的技术之一[20-21]。基准则法（Base-criterion method，BCM）是最新的 MCDM 方法之一，因其完全一致的结果和更少的比较次数优势而受到研究学者广泛关注[22-23]，然而当前尚未有研究将 BCM 应用于作物种植分布适宜性研究。本文通过构建 BCM – GIS 模型，综合考虑气候、地形和土壤环境因子对节水抗旱稻（旱地栽培）种植分布的影响，分析影响西南地区节水抗旱稻适生区的主要环境因子，并预测未来不同气候变化情景下（RCP4.5 和 RCP8.5）节水抗旱稻适生区的变化特征，为节水抗旱稻种植规划和高效生产提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

西南地区（20° ~ 35°N，98° ~ 110°E）包括云南

省、贵州省、四川省和重庆市，地理位置优越，紧邻东南亚地区，耕地面积 1.575×10^5 km^2，总面积 $1.138\,7 \times 10^6$ km^2（图 1）。区域土地辽阔，地形复杂，海拔差异大，高原、山地和平原地形交织分布，导致不同地区气候和水资源分布差异显著。西南地区地处亚热带与热带之间，受热带季风和副热带高压带影响，夏季炎热潮湿，冬季寒冷干燥，具有明显的季节性和垂直性气候变化特征。该地区热量资源丰富，降雨充沛，雨热同期，年降水量 800 ~ 1 200 mm，但时空分布不均，季节性干旱现象突出，降水整体呈“东多西少”分布。此外，西南地区土壤肥沃，主要土壤类型为红壤、黄壤和棕壤土。

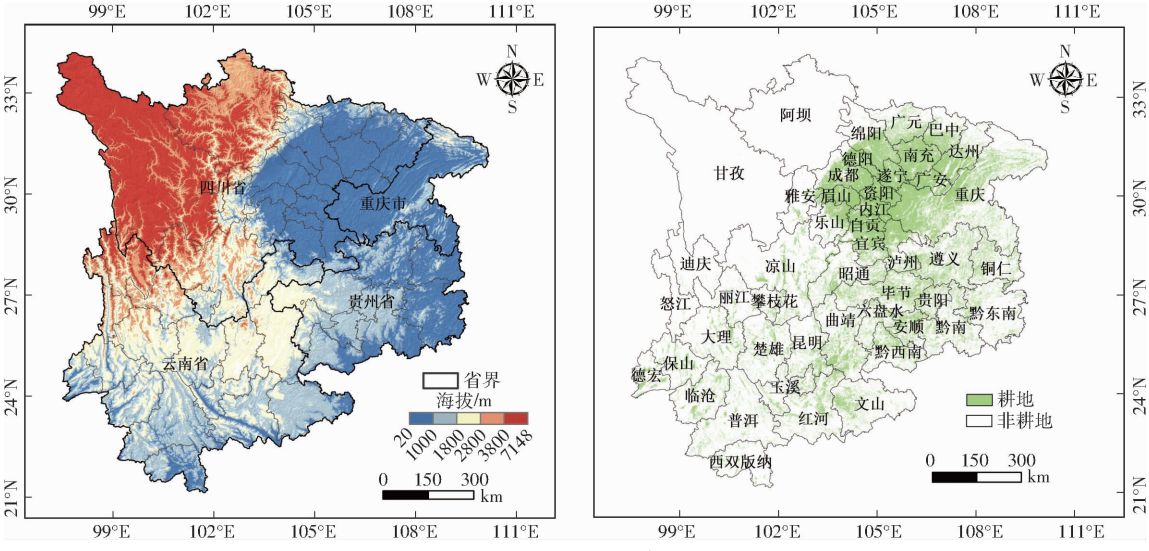

图 1 研究区域地理及耕地分布

Fig. 1 Geographical distribution of study area and distribution of cultivated land

1.2 环境变量数据

当前气象数据来源于中国气象数据网（https://data.cma.cn/），包括 2000—2019 年西南地区 342 个气象站点的日平均温度（℃）、日最高温度（℃）、日最低温度（℃）和日降水量（mm）。未来气候数据（2020—2099 年）由国家青藏高原数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/home）获得，包括 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候变化情景。地形数据来源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）的 90 m 数字高程模型（DEM）数据，包括坡度、坡向和海拔栅格数据。土壤数据来源于世界土壤数据库（HWSD）（http://westdc.westgis.ac.cn），包括表层 0 ~ 30 cm 的土壤质地（砂土（S）、壤砂土（LS）、砂壤土（SL）、砂黏壤土（SCL）、粉壤土（SiL）、粉黏壤土（SiCL）、粘壤土（CL）、壤土（L）、粉土（Si）、砂黏土（SC）、粉黏土（SiC）、黏土（C））、有机碳（OC）含量、pH 值、土壤阳离子交换量（CEC）土壤参数指标数据。

1.3 评价指标确定及指标阈值

基于以往相关研究并结合行业专家经验，选取气候（年降雨量、生育期（4—10 月）内大于等于 10℃积温（$T_{\text{sum10}(4-10)}$）、生育期内平均温度（$A_{\text{T4-10}}$）、地形（海拔、坡度、坡向）和土壤（有机碳含量、pH 值、CEC、土壤质地）3 大类 10 个指标作为节水抗旱稻种植适宜性分布的评价指标。并利用 ArcGIS 10.8 中的自然间断点分级法将研究区域分为高适生区、中适生区、低适生区和非适生区（表 1）。

表 1 不同适生区等级评价指标阈值划分

Tab. 1 Classification of thresholds for evaluation indicators in different habitats

评价指标	高适生区	中适生区	低适生区	非适生区	文献序号
降雨量/mm	>1 200	800 ~ 1 200	600 ~ 800	0 ~ 600	[24]
$T_{\text{sum10}(4-10)}$/℃	>3 000	2 800 ~ 3 000	2 600 ~ 2 800	0 ~ 2 600	[25-26]
$A_{\text{T4-10}}$/℃	>24	18 ~ 24	12 ~ 18	<12	[27]
海拔/m	<1 000	1 000 ~ 1 400	1 400 ~ 1 700	>1 700	[26,28]
坡度/(°)	0 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	>20	[28]
坡向	阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡	[28]
有机碳含量/%	1.2 ~ 2	2 ~ 3	0.6 ~ 1.2	<0.6，>3	[24,27]
pH 值	5 ~ 7	4.5 ~ 5,7 ~ 7.5	7.5 ~ 8	<4.5，>8	[24,29]
CEC/(cmol·kg^{-1})	>40	25 ~ 40	15 ~ 25	0 ~ 15	[29]
土壤质地	SC、C、SiC	CL、SiCL、SCL	L、Si、SiL	S、SL、LS	[29]

1.4　基准则法

基准则法(BCM)是一种较新的 MCDM 方法之一,该方法通过在决策指标中选择其中一个指标作为基本标准,并使用 1/9 ~ 9 的数字来衡量不同指标之间的相对重要性。然后根据基本标准与其他指标之间的成对比较获得指标权重。选择年降雨量作为基本标准,并将其他指标与其进行比较以获得指标权重(表 2),计算过程在 Lingo 18.0 软件中进行。计算分析结果表明,降雨量、$T_{sum10(4-10)}$ 和坡度是排名前 3 的关键指标,权重分别为 0.279 0、0.186 0 和 0.139 5,而 CEC 排名最低。

表 2　各项指标标准权重分析

Tab.2　Weighting analysis of indicators

标准	子标准	相对重要性	权重	排名
气候	降雨量	1.0	0.279 0	1
	$T_{sum10(4-10)}$	1.5	0.186 0	2
	A_{T4-10}	4.0	0.069 7	5
地形	坡度	2.0	0.139 5	3
	坡向	5.0	0.055 8	6
	海拔	7.0	0.039 8	8
土壤	有机碳含量	7.5	0.037 2	9
	pH 值	6.0	0.046 5	7
	CEC	8.0	0.034 9	10
	土壤质地	2.5	0.111 6	4

1.5　BCM－GIS 模型建立

通过基准则法(BCM)得到各个指标所占权重,在 ArcGIS 10.8 中分别将气候、地形和土壤 3 大类指标根据各自的子指标图层和所占权重进行加权叠加分析得到节水抗旱稻的气候适宜性、地形适宜性和土壤适宜性,再将 3 种适宜性根据权重进行加权叠加分析得到节水抗旱稻的综合适生区。

2　结果与分析

2.1　BCM－GIS 模型模拟精度评价

通过统计年鉴和相关资料等收集获取了西南地区节水抗旱稻实际种植分布点。为确保数据独立性并减少空间自相关性,对样本进行逐一筛查和建立缓冲区后,最终确定 45 个节水抗旱稻实际分布点,并利用 GIS 随机生成 455 个种植点。然后利用 BCM－GIS 模型进行西南地区节水抗旱稻综合种植适生区模拟,模拟结果如图 2 所示,模型 AUC(Area under curve)值为 0.884,表明所构建的模型模拟精度较高,可用于西南地区节水抗旱稻适生区模拟分析。

2.2　当前节水抗旱稻种植分布适宜性

2.2.1　气候适宜性

利用年降雨量、生育期内大于等于 10℃ 积温和生育期内平均温度进行西南地区节水抗旱稻种植分布气候适宜性分析,结果如图 3 所示。高适生区面积占西南地区耕地面积的 17.41%,约 $2.742\ 1\times10^4$ km^2,主要分布在云南德宏、普洱、西双版纳,贵州黔西南、六盘水、安顺、黔南、黔东南、铜仁,四川达州以及重庆东北部和东南部等地。中适生区面积占西南地区耕地面积的 82.18%,为 $1.294\ 33\times10^5$ km^2,主要分布在云南丽江、大理、临沧、楚雄、玉溪、红河、文山、昆明、曲靖、昭通,贵州贵阳、毕节、遵义,四川攀枝花、凉山、成都平原、内江、自贡、南充、广元、广安以及重庆西部等地。低适生区面积占西南耕地面积的 0.28%,约 441 km^2,主要分布在云南迪庆南部和四川甘孜南部、阿坝南部等地。非适生区面积占西南地区耕地面积的 0.13%,约 205 km^2,主要分布在云南迪庆北部、四川甘孜和阿坝等地。

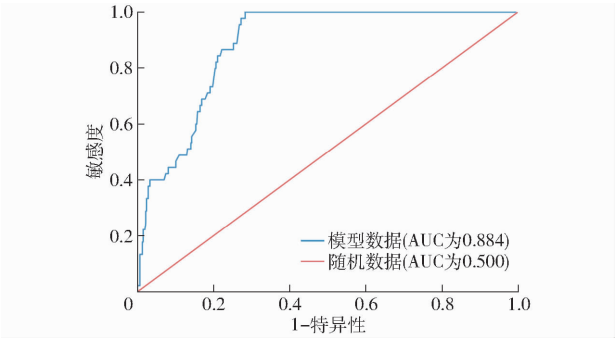

图 2　模型精度评价

Fig.2　Evaluation of model accuracy

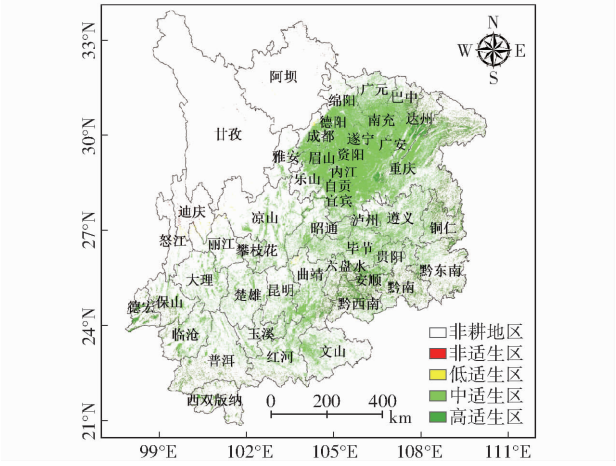

图 3　当前西南地区节水抗旱稻种植分布气候适宜性

Fig.3　Current climatic suitability of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China

2.2.2　地形适宜性

利用坡度、坡向和海拔 3 个地形因子对西南地区节水抗旱稻种植分布进行地形适宜性分析,结果如图 4 所示。高适生区面积占西南地区耕地面积的 54.33%,约 8.557×10^4 km^2,主要分布在四川成都平原、内江、自贡、宜宾、广安、南充、广元和重庆中西

部等地。中适生区面积占西南地区耕地面积的21.47%,约3.382×10⁴ km²,主要分布在云南楚雄、昆明、玉溪、曲靖、文山,贵州黔西南、毕节、安顺、贵阳、遵义,四川广元、巴中、达州和重庆中部等地。低适生区面积占西南地区耕地面积的14.46%,约2.277×10⁴ km²,零散分布在西南各个地区。非适生区面积占西南地区耕地面积的9.74%,约1.534×10⁴ km²,主要分布在云南临沧、丽江、昭通,贵州毕节西部和四川凉山、攀枝花等地。

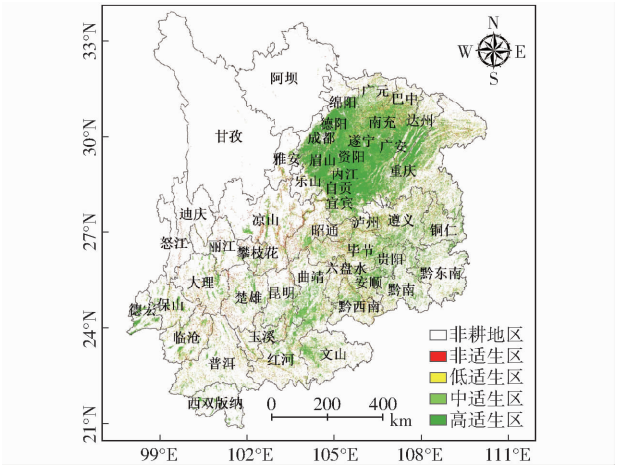

图4 当前西南地区节水抗旱稻种植分布地形适宜性

Fig. 4 Current topographical suitability of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China

2.2.3 土壤适宜性

利用有机碳含量、pH值、CEC和土壤质地4个土壤因子进行西南地区节水抗旱稻土壤适宜性分析,结果如图5所示。高适生区占西南地区耕地面积的8.98%,约1.414×10⁴ km²,主要分布在云南文山和贵州黔西南、遵义等地。中适生区占西南地区耕地面积的14.74%,约2.322×10⁴ km²,主要分布在云南临沧、普洱、昭通和贵州安顺、贵阳、黔东南、铜仁等地。低适生区占西南地区耕地面积的48.63%,约7.659×10⁴ km²,主要分布在云南大理、楚雄、玉溪、红河、昆明、曲靖,四川成都、眉山、内江、自贡、宜宾、广安、达州和重庆中西部等地。非适生区占西南地区耕地面积的27.65%,约4.355×10⁴ km²,主要分布在四川德阳、遂宁、资阳、南充、广元等地。

2.2.4 综合适宜性

综合考虑气候、地形和土壤环境因子对西南地区节水抗旱稻进行适宜性分析,结果如图6所示。高适生区占西南地区耕地面积的20.82%,约3.279×10⁴ km²,主要分布在云南德宏、临沧、普洱、西双版纳、文山、曲靖,贵州黔西、安顺、黔南、铜仁、黔东南,四川成都、内江、自贡、达州、广安和重庆中西部等地。中适宜区占西南地区耕地面积的43.83%,约

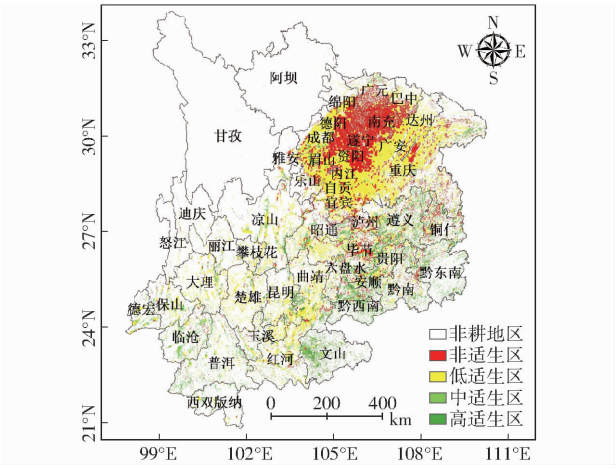

图5 当前西南地区节水抗旱稻种植分布土壤适宜性

Fig. 5 Current soil suitability of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China

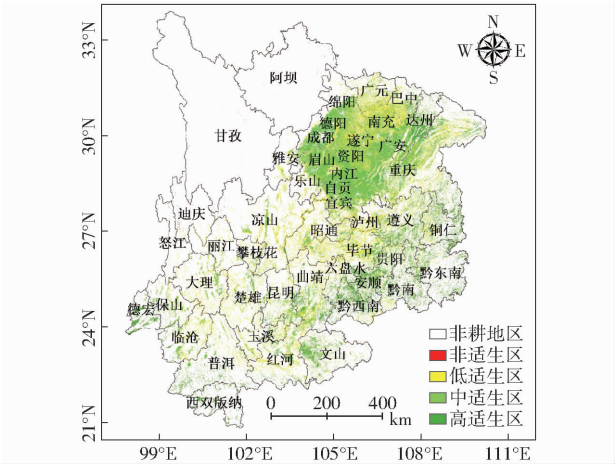

图6 当前西南地区节水抗旱稻种植分布综合适宜性

Fig. 6 Current comprehensive suitability of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China

6.903×10⁴ km²,主要分布在四川成都平原、自贡、南充、广安和重庆西部等地,较为零散均匀地分布在云南西南部、东南部和贵州中部。低适生区占西南地区耕地面积的35.24%,约5.551×10⁴ km²,主要分布在云南大理、丽江、玉溪、红河、昆明、昭通,贵州毕节、遵义和四川凉山、攀枝花、宜宾、广元等地。非适生区占西南地区耕地面积的的0.11%,约170 km²,主要分布在云南最北部的迪庆和四川西北部的甘孜、阿坝。

2.3 未来不同气候情景下节水抗旱稻种植分布综合适宜性

利用构建的BCM-GIS模型预测分析当前基准期(2000—2019年)和未来(2020—2099年)RCP4.5和RCP8.5气候情景下西南地区节水抗旱稻综合适生区变化特征。结果如表3和图7所示,RCP4.5情景下,未来2020—2039年、2040—2059年、2060—2079年、2080—2099年4个时期西南地

表 3　未来不同时间段内适生区面积及变化率

Tab. 3　Area and future changes in comprehensive suitability of water-saving and drought-resistant rice

气候情景	年份	适生区	面积/km^2	变化率/%
基准期	2000—2019	高适生区	3.279×10^4	
		中适生区	6.903×10^4	
		低适生区	5.551×10^4	
		非适生区	1.700×10^2	
RCP4.5	2020—2039	高适生区	4.960×10^4	10.67
		中适生区	5.182×10^4	−10.93
		低适生区	5.512×10^4	−0.25
		非适生区	9.600×10^2	0.51
	2040—2059	高适生区	5.352×10^4	13.16
		中适生区	5.069×10^4	−11.64
		低适生区	5.245×10^4	−1.94
		非适生区	8.400×10^2	0.42
	2060—2079	高适生区	5.776×10^4	15.85
		中适生区	5.026×10^4	−11.91
		低适生区	4.892×10^4	−4.19
		非适生区	5.600×10^2	0.25
	2080—2099	高适生区	5.619×10^4	14.85
		中适生区	5.135×10^4	−11.22
		低适生区	4.933×10^4	−3.93
		非适生区	6.410×10^2	0.30
RCP8.5	2020—2039	高适生区	7.933×10^4	29.55
		中适生区	4.178×10^4	−17.30
		低适生区	3.595×10^4	−12.43
		非适生区	4.400×10^2	0.18
	2040—2059	高适生区	9.573×10^4	39.96
		中适生区	3.083×10^4	−24.26
		低适生区	3.070×10^4	−15.75
		非适生区	2.400×10^2	0.05
	2060—2079	高适生区	9.844×10^4	41.68
		中适生区	3.037×10^4	−24.54
		低适生区	2.858×10^4	−17.10
		非适生区	1.100×10^2	−0.04
	2080—2099	高适生区	1.035×10^5	44.92
		中适生区	2.912×10^4	−25.34
		低适生区	2.478×10^4	−19.51
		非适生区	60	−0.07

区节水抗旱稻综合高适生区面积分别为 4.960×10^4、5.352×10^4、5.776×10^4、5.619×10^4 km^2，较当前基准期分别增加 10.67%，13.16%、15.85% 和 14.85%。其中，贵州贵阳、铜仁、毕节、黔东南、遵义及四川成都平原和重庆等地增加区域较为明显，高适生区整体呈现北移趋势；中适生区面积分别为 5.182×10^4、5.069×10^4、5.026×10^4、5.135×10^4 km^2，较当前基准期分别减少 10.93%、11.64%、11.91% 和 11.22%，面积减少区域主要位于云南楚雄、昆明、曲靖、红河，贵州遵义，四川成都和重庆西部地区，表现出向南移动趋势；低适生区面积分别为 5.512×10^4、5.245×10^4、4.892×10^4、4.933×10^4 km^2，较当前基准期分别减少 0.25%、1.94%、4.19% 和 3.93%，面积减少区域主要位于贵州毕节、遵义，四川宜宾、南充和重庆中部等地，整体变化趋势不明显。非适生区面积分别为 960、840、560、641 km^2，较当前基准期分别增加 0.51%、0.42%、0.25% 和 0.3%，主要位于云南丽江、楚雄和四川雅安。

RCP8.5 情景下，4 个时期高适生区面积分别为 7.933×10^4、9.573×10^4、9.844×10^4、1.035×10^5 km^2，较当前基准期分别增加 29.55%、39.96%、41.68% 和 44.92%。面积增加区域主要位于云南临沧、普洱、文山，贵州遵义、毕节，四川成都平原、广元、广安、南充和重庆西部等地区，整体呈现向北移动趋势。中适生区面积分别为 4.178×10^4、3.083×10^4、3.037×10^4、2.912×10^4 km^2，较当前基准期分别减少 17.30%、24.26%、24.52% 和 25.34%，四川成都平原、重庆西部地区减少较为明显，呈现向南移动趋势。低适生区面积分别为 3.595×10^4、3.070×10^4、2.858×10^4、2.478×10^4 km^2，较当前基准期分别减少 12.43%、15.75%、17.10% 和 19.51%，面积减少区域主要位于云南普洱，贵州毕节、遵义，四川成都平原、南充和重庆市中部地区，整体呈现向西移动趋势。非适生区面积分别为 440、240、110、60 km^2，较当前基准期分别增加 0.18%、0.05% 及减少 0.04%、0.07%，整体变化不明显。未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，西南地区节水抗旱稻综合适生区的分布与当前情景大体一致，但中适生区和低适生区面积会有不同程度减少，高适生区会明显增加，尤其是在 RCP8.5 情景下。

3　讨论

3.1　节水抗旱稻适生区主要环境影响因子

本研究发现年降雨量、生育期内大于等于 10℃积温、坡度和土壤质地为影响节水抗旱稻种植适宜性的主导环境因子，其贡献率分别为 27.9%、18.6%、13.95% 和 11.16%。自然降水作为节水抗旱稻生长所需的主要水分来源，适量的降雨可以保证节水抗旱稻生长所需的水分[30]，尤其是在雨季和节水抗旱稻生长季重合的西南地区[31]。干旱条件下，节水抗旱稻光合作用会减弱，导致干物质积累减少，进而影响产量[32]。而过多的降雨又会抑制节水抗旱稻的有氧呼吸，根系吸收能力下降，积累大量酒精，使其生长受阻[33]，长时间的持续降雨或暴雨还易形成洪涝灾害，造成大面积减产或者绝收[34]。温度也是影响节水抗旱稻种植分布的关键气候因子之

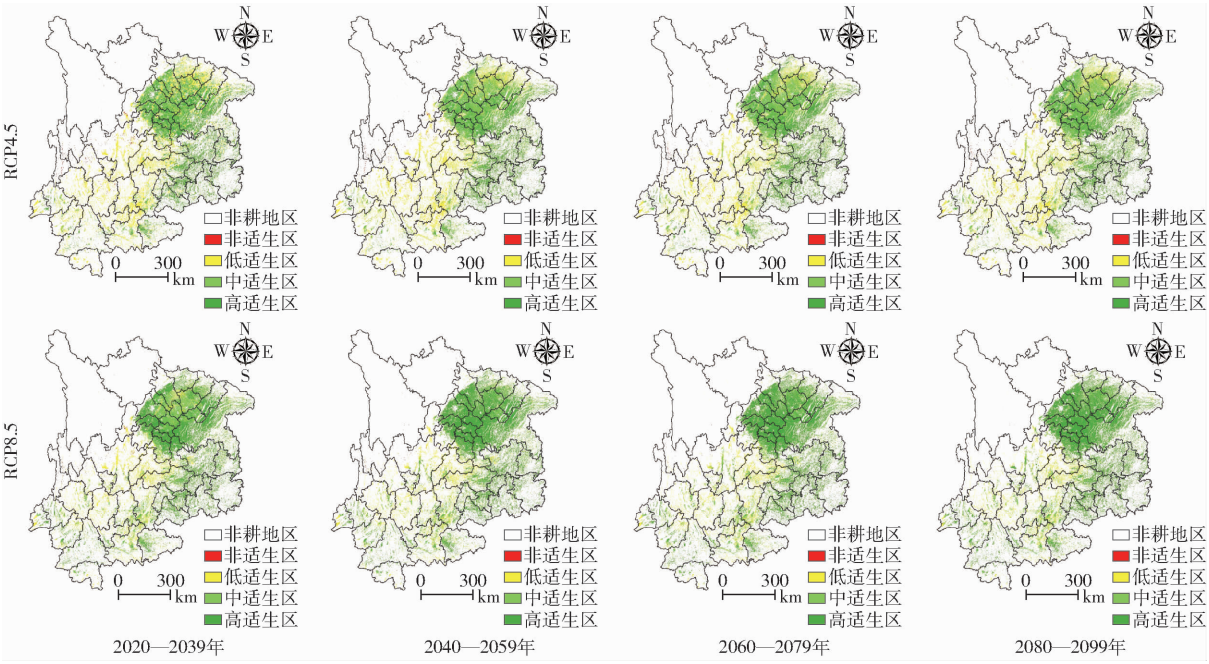

图 7 未来不同气候情景下西南地区节水抗旱稻种植分布综合适宜性

Fig. 7 Comprehensive suitability of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China under future climate change scenarios

一,适宜的温度可以保证节水抗旱稻在关键生育时期(如灌浆期)获得充足热量,使其提前成熟,促进光合作用和干物质积累,从而提高产量[35]。而过高或者过低的温度会对节水抗旱稻的生长过程产生影响,如幼穗分化期遭遇高温胁迫,会显著增加颖花退化数和降低颖花受精率,进而导致结实率显著下降[36]。在节水抗旱稻营养生长期持续性低温则会导致积温不足,使得穗分化延迟及籽粒不能正常时间成熟,进而降低产量[37]。坡度则与降水和光照时长等多个方面密切相关,是影响节水抗旱稻分布的重要因素之一。一方面,在坡度较大地区,降水时易发生水土流失,导致节水抗旱稻可利用水分变少,根系吸水困难,土壤肥力变低,进而影响其正常生长。且不同坡度地区接受光照的时长和强度可能会有所差异,另一方面,坡度较大地区限制了农作机械使用和增加管理难度,降低了农民种植意愿,对农业生产产生负面影响[38]。

3.2 节水抗旱稻潜在适生区地理分布

模型模拟结果显示当前中国西南地区节水抗旱稻高适生区和中适生区(核心适生区)主要分布在云南西南部和东南部,四川成都平原,贵州西南部、东南部和重庆中西部等地。非适生区主要分布在云南最北部的迪庆和四川西北部的甘孜、阿坝地区。目前,节水抗旱稻主要在云南文山、西双版纳、红河、普洱,四川乐山、宜宾、成都、德阳,贵州黔南、遵义、黔东南和重庆秀山、涪陵等地区推广种植,与模型模拟的核心适生区分布相符。

在当前基准气候条件下,节水抗旱稻总适生区总面积为 $1.573\ 3\times10^5$ km^2,核心适生区面积为 $1.018\ 2\times10^5$ km^2,RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下,西南地区节水抗旱稻适生区分布与当前基准期大体一致,核心适生区呈不同程度增加,且都以中适生区减少、高适生区增加的规律呈现向北迁移趋势。其中,云南地区核心适生区减少较为明显,可能是因为未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下云南中部地区降水减少导致[39]。贵州、四川和重庆地区核心适生区增加较为明显,可能是因为该地区温度升高和降水增多导致[40],温度和降水是影响节水抗旱稻种植分布最主要的 2 个环境因子,从而导致西南地区各个省市节水抗旱稻适生区面积都有不同程度变化。本研究中的节水抗旱稻种植主要以雨养旱地栽培为主,以减少人工投入成本,但如果加强人工管理,如在自然降水不足时进行补充灌溉,也可改善节水抗旱稻适宜种植区分布情况。

3.3 局限性与未来展望

本研究使用 BCM-GIS 构建了西南地区节水抗旱稻种植分布预测模型,但由于数据不精确性和人为因素的主观影响,大多数 MCDM 方法会出现不确定性。未考虑极端气候因子和光照的影响,其也会对节水抗旱稻的种植和生长产生重要影响。此外,节水抗旱稻种植的实际过程中会受到灌溉、新栽培品种、作物管理、劳动力转移、市场、交通基础设施变化和城市化等人为因素的影响。未来研究中可引入模糊集理论对 MCDM 方法进行扩展以解决其不确

定性[22]。模糊集理论不仅可以克服真实环境的模糊性和不确定性，丰富决策者的表达方式，而且可以大大降低计算复杂度，并且由于综合考虑数据和专家意见，降低了决策者之间的冲突程度，可使决策结果更加合理。

4　结论

（1）年降雨量、生育期内大于等于 10℃积温、坡度和土壤质地是影响西南地区节水抗旱稻种植分布的主导环境因子。

（2）当前西南地区节水抗旱稻高适生区面积为 3.279×10^4 km^2，占西南地区耕地面积的 20.82%。主要分布在云南德宏、临沧、普洱、西双版纳、文山、曲靖，贵州黔西、安顺、黔南、铜仁、黔东南，四川成都、内江、自贡、达州、广安和重庆中西部等地。中等适生区和低适生区面积占西南地区耕地面积的 43.83% 和 35.24%。

（3）在未来气候变化下，节水抗旱稻适宜区的分布与当前大体一致，与当前基准期相比，RCP4.5 情景下高适生区面积在 2020—2099 年内增加 10.67% ~15.85%，RCP8.5 情景下增加 29.55% ~44.92%，高适生区呈往北移动趋势，贵州贵阳、铜仁、毕节、黔东南、遵义，四川成都平原、南充和重庆西部等地会显著增加；中适生区面积在 2020—2099 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下分别减少 10.93% ~11.91% 和 17.30% ~25.34%，贵州黔西南、安顺、黔南，四川成都平原、达州和重庆西部等地减少较为明显。

参　考　文　献

[1] 罗利军. 节水抗旱稻的培育与产业发展[J]. 中国稻米, 2022, 28(5): 14 - 19.
LUO Lijun. Breeding and industrial development of water-saving and drought-resistance rice[J]. China Rice, 2022, 28(5): 14 - 19. (in Chinese)

[2] 周洲. 节水抗旱稻的推广实践与发展刍议[J]. 杂交水稻,2024,39(6):112 - 116.
ZHOU Zhou. Discussion on the promotion practice and development of water-saving and drought-resistant rice[J]. Hybrid Rice, 2024,39(6):112 - 116. (in Chinese)

[3] 王谢, 杨琴, 刘禹池, 等. 中国西南地区旱坡地碳减排研究进展与展望[J]. 作物学报, 2024, 50(7): 1635 - 1646.
WANG Xie, YANG Qin, LIU Yuchi, et al. Carbon emission reduction in dry sloping land in southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(7): 1635 - 1646. (in Chinese)

[4] 李兴华, 汪吴凯, 杨特武, 等. 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 84 - 91.
LI Xinghua, WANG Wukai, YANG Tewu, et al. Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 84 - 91. (in Chinese)

[5] 陈立霞, 刘敬泽, 吴立柱, 等. 粮食安全: 现状、问题及应对策略[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(11): 7 - 14.
CHEN Lixia, LIU Jingze, WU Lizhu, et al. Food security: current situation, problem and countermeasure[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(11): 7 - 14. (in Chinese)

[6] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8): 140 - 152.
SU Fang, LIU Yu, WANG Sangui, et al. Impact of climate change on food security in different grain producing areas in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(8): 140 - 152. (in Chinese)

[7] AKPOTI K, GROEN T, DOSSOU-YOVO E, et al. Climate change-induced reduction in agricultural land suitability of west-Africa's inland valley iandscapes[J]. Agricultural Systems, 2022, 200: 103429.

[8] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9033 - 9043.
XIONG Qiaoli, HE Yunling, DENG Fuying, et al. Assessment of alpine mean response to climate change in southwest China based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9033 - 9043. (in Chinese)

[9] 霍红, 孙昌平. 气候变化背景下西南地区云南松的潜在分布[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(2): 371 - 377.
HUO Hong, SUN Changping. Potential distribution of *Pinus yunnanensis* in southwest China under climate change[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(2): 371 - 377. (in Chinese)

[10] 陈敏鹏, 苏询. 趋利避害: 农业面临的气候变化影响及适应举措[J]. 可持续发展经济导刊, 2023(增刊 1): 66 - 70.
CHEN Minpeng, SU Xun. Impacts of climate change on agriculture and adaptation measures[J]. China Sustainability Tribune, 2023(Supp. 1): 66 - 70. (in Chinese)

[11] HENG S, LI N, YANG Q, et al. Effects of environment and human activities on rice planting suitability based on MaxEnt model[J]. International Journal of Biometeorology, 2024, 68(11): 2413 - 2429.

[12] PAN Y, YANG R, QIU J, et al. Forty-year spatio-temporal dynamics of agricultural climate suitability in China reveal shifted major crop production areas[J]. CATENA, 2023, 226: 107073.

[13] 李天乐,赵泉华,贾淑涵,等.土壤有机质含量反演方法:土壤高光谱数据微分-瞬时频率变换[J].地球信息科学学报,2024,26(7):1733 - 1744.
LI Tianle, ZHAO Quanhua, JIA Shuhan, et al. Soil organic matter content inversion methods: differential-instantaneous frequency transform of soil hyperspectral data[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(7): 1733 - 1744. (in Chinese)

[14] DO V H, LA N, BERGKVIST G, et al. Spatial and temporal variation in crop productivity and relation with soil fertility within upland agroforestry[J]. Field Crops Research, 2025, 320: 109675.

[15] WANG C, ZHANG Z, ZHANG J, et al. The effect of terrain factors on rice production: a case study in Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 287 - 305.

[16] LI X, ZHANG L, CHEN N, et al. Potential dynamic changes of single-season rice planting suitability across China[J]. International Journal of Biometeorology, 2023, 67(5): 875 - 886.

[17] 赵丽. 浅析地理信息系统在测绘工程中集成与数据共享[J]. 华北自然资源, 2024 (5): 97 - 100.
ZHAO Li. Analyzing the integration and data sharing of geographic information system in surveying and mapping engineering [J]. Huabei Natural Resources, 2024 (5): 97 - 100. (in Chinese)

[18] 邓利君, 姚远, 黄梦奇, 等. 基于 GIS 的四川省李子气候适宜性区划研究[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(3): 554 - 560.
DENG Lijun, YAO Yuan, HUANG Mengqi, et al. GIS-based study on ecoclimatic suitability regionalization study of plum in Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(3): 554 - 560. (in Chinese)

[19] 吴立, 杜晓杰, 孙朝锋, 等. 基于 GIS 的福建芙蓉李气候适宜性区划[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(2): 321 - 329.
WU Li, DU Xiaojie, SUN Chaofeng, et al. Climatic suitability regionalization of Furong plums based on GIS in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(2): 321 - 329. (in Chinese)

[20] CHEN Y, YU J, KHAN S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(12): 1582 - 1591.

[21] 肖潇,刘明,何奇瑾,等.基于光谱混合分解的果园扩张特征与种植适宜性研究[J].农业机械学报,2023,54(3):234 - 245.
XIAO Xiao, LIU Ming, HE Qijin, et al. Expansion characteristics and planting suitability assessment of orchard based on linear spectral mixed decomposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 234 - 245. (in Chinese)

[22] HASELI G, JAFARZADEH GHOUSHCHI S. Extended base-criterion method based on the spherical fuzzy sets to evaluate waste management[J]. Soft Computing, 2022, 26(19): 9979 - 9992.

[23] HASELI G, YARAN ÖGEL İ, ECER F, et al. Luxury in female technology (FemTech): selection of smart jewelry for women through BCM - MARCOS group decision-making framework with fuzzy ZE-numbers[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 196: 122870.

[24] AL-HANBALI A, SHIBUTA K, ALSAAIDEH B, et al. Analysis of the land suitability for paddy fields in Tanzania using a GIS-based analytical hierarchy process[J]. GEO-Spatial Information Science, 2022, 25(2): 212 - 228.

[25] LI X H, ZHANG L, CHEN N, et al. Potential dynamic changes of single-season rice planting suitability across China[J]. International Journal of Biometeorology, 2023, 67(5): 875 - 886.

[26] 郑小波,康为民,汪圣洪,等.贵州旱稻栽培的气候适应性分析[J].贵州农业科学,2004(4):43 - 45.
ZHENG Xiaobo, KANG Weimin, WANG Shenghong, et al. Analysis on climatic adaptability of upland rice planting in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2004(4): 43 - 45. (in Chinese)

[27] SYS C, VAN RANST E, DEBAVEYE J. et al. Land evaluation part 3: crop requirements[M]. Brussels: General Administration for Development Cooperation, 1993.

[28] 王杏锋,李代超,吴升,等.水稻种植环境综合适宜性评价方法研究[J].地球信息科学学报,2021,23(8):1484 - 1496.
WANG Xingfeng, LI Daichao, WU Sheng, et al. Research on comprehensive suitability evaluation method of rice planting environment[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(8): 1484 - 1496. (in Chinese)

[29] EVEREST T, SUNGUR A, ÖZCAN H. Applying the best-worst method for land evaluation: a case study for paddy cultivation in Northwest Turkey[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(4): 3233 - 3246.

[30] 龚丽英, 赵洪阳, 李刚, 等. 节水抗旱稻水种旱管栽培技术初探[J]. 杂交水稻, 2020, 35(4): 55 - 57.
GONG Liying, ZHAO Hongyang, LI Gang, et al. Discussion on cultivation techniques of wet seeding and water conservation management for water-saving and drought-resistant rice[J]. Hybrid Rice, 2020, 35(4): 55 - 57. (in Chinese)

[31] 晏红明,李清泉,孙丞虎,等.中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究[J].大气科学,2013,37(5):1111 - 1128.
YAN Hongming, LI Qingquan, SUN Chenghu, et al. Criterion for determining the onset and end of the rainy season in Southwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(5): 1111 - 1128. (in Chinese)

[32] KORRES N E, NORSWORTHY J K, BURGOS N R, et al. Temperature and drought impacts on rice production: an agronomic perspective regarding short- and long-term adaptation measures[J]. Water Resources and Rural Development, 2017, 9: 12 - 27.

(下转第 652 页)

[45] 张富仓,严富来,范兴科,等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(22):111 – 120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(22):111 – 120. (in Chinese)

[46] 周罕觅,孙旗立,张硕,等. 基于多目标综合评价的滴灌苹果水肥协同调控研究[J]. 农业机械学报,2023,54(11):335 – 346.
ZHOU Hanmi, SUN Qili, ZHANG Shuo, et al. Cooperative regulation of water and fertilizer in drip irrigation apple based on multi-objective comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):335 – 346. (in Chinese)

[47] FENG Z, MIAO Q, SHI H, et al. Simulation of water balance and irrigation strategy of typical sand-layered farmland in the Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management,2023,280:108236.

[48] 高翠民,丁晋利,张洁梅,等. 水氮运筹对玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2022,41(2):44 – 51.
GAO Cuimin, DING Jinli, ZHANG Jiemei, et al. The combined effects of irrigation and nitrogen fertilization on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(2):44 – 51. (in Chinese)

[49] 闵迪,王增红,李援农,等. 不同灌水和施氮水平对河西春玉米水氮利用效率和经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(5):153 – 160.
MIN Di, WANG Zenghong, LI Yuannong, et al. Effects of different irrigation and nitrogen application levels on the yield and water and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2020,38(5):153 – 160. (in Chinese)

[50] 雒文鹤,师祖姣,王旭敏,等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报,2020,46(6):924 – 936.
LUO Wenhe, SHI Zujiao, WANG Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica,2020,46(6):924 – 936. (in Chinese)

[51] LI J, JIAO X, JIANG H, et al. Optimization of irrigation scheduling for maize in an arid oasis based on simulation-optimization model[J]. Agronomy,2020,10(7):935.

[52] GUO D, OLESEN J E, MANEVSKI K, et al. Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios[J]. Agricultural Water Management,2021,245:106575.

(上接第 626 页)

[33] 云勇, 严小微, 唐清杰, 等. 海南台风暴雨对水稻的危害及灾后补救措施[J]. 杂交水稻, 2014, 29(1): 44 – 45.
YUN Yong, YAN Xiaowei, TANG Qingjie, et al. Damages to rice production caused by typhoon rainstorm and post-disaster remedial cultivation measures in Hainan[J]. Hybrid Rice, 2014, 29(1): 44 – 45. (in Chinese)

[34] 杨建莹,霍治国,吴立,等. 西南地区水稻洪涝等级评价指标构建及风险分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):135 – 144.
YANG Jianying, HUO Zhiguo, WU Li, et al. Evaluation level construction and analysis of risk on rice flood in Southwest China [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(16):135 – 144. (in Chinese)

[35] LIU Y, ZHOU W, GE Q. Spatiotemporal changes of rice phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Climatic Change, 2019, 157(2): 261 – 277.

[36] 何爱斌,郭夏宇,赵廷丞,等. 高温对湖南省一季稻及再生稻结实的影响及应对策略[J]. 杂交水稻,2024,39(2):89 – 96.
HE Aibin, GUO Xiayu, ZHAO Tingcheng, et al. Effects of high temperature on grain filling of single-season rice and ratoon rice in Hunan Province and its countermeasures[J]. Hybrid Rice, 2024,39(2):89 – 96. (in Chinese)

[37] 李可,蒋伟勤,车阳,等. 水稻冷害成灾机制与调控机理研究进展及展望[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):31 – 40.
LI Ke, JIANG Weiqin, CHE Yang, et al. Research progress and prospect on mechanism and regulation of cold damage in rice [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024,52(2):31 – 40. (in Chinese)

[38] AKINCI H, ÖZALP A Y, TURGUT B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 97: 71 – 82.

[39] 张寒博, 窦世卿, 温颖. 基于遥感降水产品的西南地区降水时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 265 – 278.
ZHANG Hanbo, DOU Shiqing, WEN Ying. Analysis of spatiotemporal dynamics of precipitation in Southwest China based on remote sensing precipitation products[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 265 – 278. (in Chinese)

[40] 胡祖恒, 李永华, 胡跃文, 等. CMIP5 和 RegCM4.0 模式对西南区域未来降水的预估[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(5): 19 – 25.
HU Zuheng, LI Yonghua, HU Yuewen, et al. Prediction of future precipitation in Southwest China by CMIP5 and RegCm4.0 models[J]. Journal of Mountain Meteorology, 2020, 44(5): 19 – 25. (in Chinese)