

未来气候变化下有机无机肥配施与灌溉对西南地区水稻产量和土壤养分的影响

张文韬^{1,2} 杨启良^{1,3} 李娜^{1,2} 梁嘉平^{1,2} 李加念^{1,3} 赵亚婷^{1,3}
刘艳伟^{1,2} 蒋富昌⁴

(1. 昆明理工大学现代农业工学院, 昆明 650500; 2. 云南省农业水资源高效利用与智慧管控重点实验室, 昆明 650500;
3. 云南省智能农业工程技术与装备国际联合实验室, 昆明 650500; 4. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 气候变化情景下,通过优化水肥管理措施以缓解气候变化对西南地区水稻生产的负面影响,可为该区域水稻生产的可持续性提供理论依据。本研究利用 APSIM-ORYZA 模型模拟分析了未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下,不同灌溉模式(常规淹灌(CK)与控制灌溉(I1、I2、I3,下限为土壤有效含水率的 50%、70%、90%,上限为田间持水量))和有机无机肥配施(20%(F1)、40%(F2)、60%(F3)有机肥替代)对西南地区水稻产量、土壤有机碳和全氮的影响。结果表明,未来不同气候变化情景对西南地区水稻产量具有负面影响,但随着灌溉水量增加减产率降低。相较于历史基准期,未来 2050s SSP2-4.5 情景 I1、I2、I3 和 CK 处理水稻产量分别减少 6.9%、5.8%、5.7% 和 5.3%;至 2080s,CK 减产率上升至 8.7%,I1~I3 处理分别上升至 10.1%、9.1%、8.9%。此外,控制灌溉处理水稻产量总体由大到小依次为 I3、I2、I1,均低于 CK,且不同灌溉模式对土壤有机碳影响不大。但未来 2080s SSP5-8.5 情景,I3 处理云南省水稻产量与淹水灌溉产量持平。随着有机肥替代比例增加水稻产量呈先增加后减少趋势。相较于常规施肥量,在 SSP2-4.5 情景下,F1 和 F2 处理水稻产量分别增加 91 kg/hm² 和 27 kg/hm²,F3 处理减少 232 kg/hm²;SSP5-8.5 情景下,F1 和 F2 处理水稻产量分别增加 97 kg/hm² 和 43 kg/hm²,而 F3 处理减少 155 kg/hm²。且未来不同气候变化情景下,有机肥替代可显著提升西南地区水稻土壤有机碳和全氮含量。未来 SSP2-4.5 (SSP5-8.5) 气候情景下,F1、F2 和 F3 处理 2050s 土壤有机碳含量分别为 209 (213)、347 (336)、346 (355) kg/hm²,相较于 CK 分别增加 71 (80)、209 (203)、208 (222) kg/hm²;F1、F2 和 F3 处理 2080s 土壤有机碳含量分别为 318 (323)、554 (533)、523 (541) kg/hm²,相较于 CK 分别增加 159 (167)、395 (376)、364 (385) kg/hm²。水肥耦合处理下,F1I3 处理增产效果最优,较常规水肥管理,该组合在 SSP2-4.5 情景增产 45~186 kg/hm²,SSP5-8.5 情景增产 38~185 kg/hm²。研究结果表明适度的水肥协同管理可在未来气候变暖背景下有效提升西南地区水稻产量并改善土壤肥力,促进农业生产可持续发展。

关键词: 水稻产量; 土壤碳氮; 未来气候变化; 水肥耦合

中图分类号: S511; S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0331-13

OSID:



Effects of Combined Organic-inorganic Fertilization and Irrigation on Rice Yield and Soil Nutrients in Southwest China under Future Climate Change

ZHANG Wentao^{1,2} YANG Qiliang^{1,3} LI Na^{1,2} LIANG Jiaping^{1,2} LI Jianian^{1,3}
ZHAO Yating^{1,3} LIU Yanwei^{1,2} JIANG Fuchang⁴

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Agricultural Water Resources Efficient Utilization and Smart Management and Control, Kunming 650500, China
3. Yunnan Provincial International Joint Laboratory of Intelligent Agricultural Engineering Technology and Equipment, Kunming 650500, China
4. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: Under climate change scenarios, optimizing water and fertilizer management measures to

收稿日期: 2025-09-16 修回日期: 2025-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52409059)、云南省科技厅重大科技专项计划项目(202302AE090024)、云南省基础研究计划项目(202301AU070068)、云南省“兴滇英才支持计划”产业创新人才项目(KKXY202423011)、云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目和云南省智能水肥药一体化技术与装备创新团队项目(202505AS350025)

作者简介: 张文韬(2000—),男,博士生,主要从事作物模型决策分析研究,E-mail: dh1340967596@163.com

通信作者: 李娜(1993—),女,副教授,主要从事气候变化和农田生态环境调控研究,E-mail: lina_nafu1221@163.com

mitigate the negative impacts of climate change on rice production in Southwest China can provide a theoretical basis for the sustainability of rice production in this region. The APSIM – ORYZA model was used to simulate and analyze the impacts of different irrigation modes (conventional flooding irrigation (CK) and controlled irrigation (I1, I2, I3, with lower limits of 50%, 70%, and 90% of the soil available moisture content and upper limits of the field capacity)) and combined application of organic and inorganic fertilizers (20% (F1), 40% (F2), 60% (F3) organic fertilizer substitution) on rice yield, soil organic carbon, and total nitrogen in Southwest China under the future SSP2 – 4.5 and SSP5 – 8.5 climate scenarios. The results showed that different future climate change scenarios had negative impacts on rice yield in Southwest China, but the yield reduction rate was decreased with the increase in irrigation water volume. Compared with the historical baseline period, in the 2050s under the SSP2 – 4.5 scenario, the rice yields of the I1, I2, I3, and CK treatments were decreased by 6.9%, 5.8%, 5.7%, and 5.3%, respectively; by the 2080s, the yield reduction rate of the CK treatment was increased to 8.7%, and those of the I1 ~ I3 treatments were increased to 10.1%, 9.1%, and 8.9%, respectively. In addition, the rice yields of the controlled irrigation treatments were generally decreased in the order of I3, I2, I1, all of which were lower than that of the CK, and different irrigation modes had little impact on soil organic carbon. However, in the 2080s under the SSP5 – 8.5 scenario, the rice yield of the I3 treatment in Yunnan Province was equal to that of the flooding irrigation. With the increase in the organic fertilizer substitution ratio, the rice yield was firstly increased and then decreased. Compared with the conventional fertilization rate, under the SSP2 – 4.5 scenario, the rice yields of the F1 and F2 treatments were increased by 91 kg/hm² and 27 kg/hm², respectively, while that of the F3 treatment was decreased by 232 kg/hm²; under the SSP5 – 8.5 scenario, the rice yields of the F1 and F2 treatments were increased by 97 kg/hm² and 43 kg/hm², respectively, while that of the F3 treatment was decreased by 155 kg/hm². Moreover, under different future climate change scenarios, organic fertilizer substitution could significantly increase the soil organic carbon and total nitrogen contents of rice in Southwest China. Under the future SSP2 – 4.5 (SSP5 – 8.5) climate scenario, the soil organic carbon contents of the F1, F2, and F3 treatments in the 2050s were 209 (213) kg/hm², 347 (336) kg/hm², 346 (355) kg/hm² respectively, which were increased by 71 (80) kg/hm², 209 (203) kg/hm², 208 (222) kg/hm², respectively compared with that of CK; the soil organic carbon contents of the F1, F2, and F3 treatments in the 2080s were 318 (323) kg/hm², 554 (533) kg/hm², 523 (541) kg/hm², respectively, which were increased by 159 (167) kg/hm², 395 (376) kg/hm², 364 (385) kg/hm², respectively compared with that of CK. Under the water-fertilizer coupling treatment, the F1I3 treatment had the best yield-increasing effect. Compared with the conventional water and fertilizer management, this combination increased the yield by 45 ~ 186 kg/hm² under the SSP2 – 4.5 scenario and by 38 ~ 185 kg/hm² under the SSP5 – 8.5 scenario. The research result showed that moderate coordinated water and fertilizer management can effectively increase rice yield and improve soil fertility in Southwest China under the background of future climate warming, promoting the sustainable development of agricultural production.

Key words: rice yield; soil organic carbon; future climate change; water-fertilizer coupling

0 引言

以全球变暖为特征的气候变化已成为主要环境问题之一^[1]。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,全球气温持续上升,当前比工业化前水平高 1.1℃,相较于 1850—1900 年,预计 2021—2040 年全球平均气温可能升高 1.5℃,即使未来全球各国减排目标完全实现,全球气温上升仍是必然趋势^[1]。农业是对气候变化反应最为敏感和脆弱的领域之一,气候变化会影响农业生产、水文平衡及其农业系统管理的其他组成部分,特别是极端天气气候事件诱发的自然灾害将造成农业生产波

动,危害社会稳定和社会经济的可持续发展^[2]。

水稻是世界三大粮食作物之一,在社会民生和经济发展中发挥重要作用^[3]。然而,气候变化引发的极端天气事件正严重威胁着水稻生产系统。2022 年我国西南地区接连遭遇历史性气象灾害,造成农作物受灾面积达 1.289 × 10⁶ hm²^[4];同年 10 月南方稻区又面临强降水引发的洪涝灾害,导致秋粮减产近千万吨^[5]。相关研究表明,气候变暖已导致水稻生育周期缩短和单位产量下降^[6]。这种气候驱动的生物学响应机制,使得传统栽培模式面临重大调整需求。在我国西南稻作区(贵州、云南、四川和重庆),水稻种植总面积约为 3.89 × 10⁶ hm²,承载着维系区域粮食安全的核心功能,其年产量约占全国总

产量的十分之一。然而,西南地区水稻种植发展却面对多重制约:①水资源利用效率低,灌溉效率仅为 0.5,较国际先进水平(0.73 以上)存在明显差距。②区域降雨时空分布不均和季节性干旱频发,导致水稻产量不稳、品质不高和水分利用效率低,危害水稻生产安全。③受地形和土壤类型影响,耕地易发生水土流失,长期耕作引发的土壤结构破坏和肥力退化问题,已通过增施肥料获得暂时性缓解^[7]。然而,过度依赖化肥导致的土壤板结硬化与酸化现象,加速了养分流失进程,逐渐形成制约水稻生长的恶性循环^[8-9]。

水稻生理代谢和产量形成受多重环境因子调控,其中水分和氮素营养耦合效应是影响水稻生长的重要环境因素^[10]。淹水灌溉是水稻最主要的种植模式。淹水灌溉条件下,不仅水分消耗大,还会导致农田土壤通气性差,抑制水稻根系的生长,且易引发病虫害。淹水灌溉易使植株早衰,缩短水稻叶片功能期,降低产量^[11]。此外,稻区每年因干旱天气减产的现象时常发生。相较于淹水灌溉,控制灌溉能够改善田间微环境,促进水稻群体与个体的协调发育,进而提高产量构成要素^[12]。马锐等^[13]研究表明,充分的灌溉条件有利于未来气候变化情景下水稻的生产,但这种适应措施是一种成本很高的农业管理选择,尤其是与能源使用相关的成本,而这些成本在未来会更大。因此,用更少的水实现水稻稳定生产,对于维持未来的水稻生产系统至关重要。崔宁博等^[14]指出,绿色高效灌排技术是西南区域实现节水稳产增效的关键举措,基于水稻在不同生育期对水分的敏感性进行控制灌溉,通过在水稻插秧至返青期建立约 25 mm 水层,其余时期为无水层灌溉,上限为田间持水量,下限控制为田间持水量的 70% 左右,可以最大程度发挥水稻节水潜力,兼顾节水节能和高产高效。水稻旱作是对传统水作一次栽培的技术革新。汤广民^[15]在研究水稻旱作的水分调控指标时设置了轻旱、中旱和重旱的土壤水分控制区间(占田间持水量百分数),研究结果表明从节水和高产角度出发,各生育阶段土壤水分的调控标准为:分蘖前期 70%~80%、分蘖后期 55%~65%、拔节孕穗期大于 80%、抽穗乳熟期 70%~80%。孙龙泉等^[16]在江苏省不同生态稻区进行了水稻浅湿灌溉多点试验,研究发现水稻大田生长期除栽秧活棵期保持浅水层外,其余生育期采取土壤含水率不低于 80% 田间持水量的灌溉方式,不会造成显著减产,且节水率高达 60%。

随着农业科技进步,农业种植系统中氮肥施用量持续增加。李荣等^[10]在模拟不同施氮量对水稻

产量的影响中发现,未来气候变暖会加速土壤有机碳分解,造成土壤肥力下降,需增加施氮量稳定水稻生产,但长期依赖施用氮肥会导致土壤养分失衡,降低农田有机碳储量和土壤肥力,进而降低作物产量。大量研究结果表明,有机无机肥配施能显著提高土壤肥力,在改善土壤养分的同时能促进水稻生长^[7,17]。但过量施加有机肥会导致水稻前期吸收营养不佳,发育缓慢,进而降低产量^[18]。因此,在水稻种植管理中应合理设置有机肥施加量。全球变暖加剧了水稻生育期内热胁迫效应,补充灌溉被认为可以降低高温胁迫。然而,这种措施是一种成本很高的农业管理选择,尤其是与能源使用相关的成本,而这些成本在未来会更大^[19]。因此,合理的水肥施用对保障未来水稻生产稳定具有重要意义。

本文通过 APSIM-ORYZA 作物模型,系统模拟未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下西南地区水稻生产系统对不同水肥管理措施的响应,重点探讨控制灌溉(下限为土壤有效含水率的 50%、70%、90%)与有机无机肥配施(20%、40%、60% 有机肥替代)对水稻产量、土壤有机碳及全氮含量的影响机制,旨在量化气候变化胁迫下优化水肥协同管理的潜力,为提升区域水稻生产韧性和土壤可持续性提供实证依据与决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南地区(97°21′~110°11′E,21°08′~33°41′N)是我国七大自然地理分区之一,包括四川、贵州、云南和重庆地区。以高原山地为主,地形复杂且气候多样,涵盖北亚热带至中亚热带季风气候区。四川和贵州高原是全国云雾较多、日照较少地区,年日照时长 1 000~1 600 h,为全国较低值区。一般年降水量 800~1 000 mm,高的可达 1 800 mm 以上。其中,四川盆地属湿润北亚热带气候,云贵高原则呈低纬高原季风特征,独特的地理格局为水稻种植提供了充足的水热资源,使其成为全国水稻主产区。本研究选取西南地区 24 个典型水稻站点作为研究对象(图 1),分析研究 24 个站点水稻生育期农业气候资源变化特征以及未来气候变化对 24 个站点水稻生产的影响。

1.2 数据来源

1.2.1 历史气候、作物和土壤数据

各站点历史气候数据、水稻物候期和产量数据从中国气象局网(<http://data.cma.cn/>)下载获取,气象指标包括逐日最高温度(℃)、最低温度(℃)、平均温度(℃)、降水量(mm)、日照时数(h)和相对

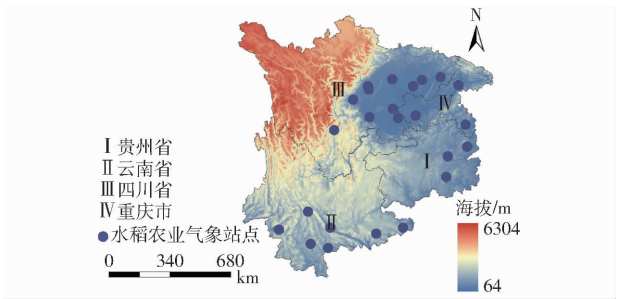


图1 西南地区水稻站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological warfare points in Southwest China

湿度(%)。针对部分气象站点数据缺失问题,采用以下处理方法以确保数据完整性:对于短期缺失(≤ 3 d)采用线性插值法进行补全;对于连续缺失(> 3 d)基于反距离权重法(Inverse distance weighting, IDW),利用周边最近气象站点数据进行空间插值填补;对于系统性缺失(如整个季节或年际数据不完整)则进行剔除^[20]。最终,经数据处理和筛选后,确定采用西南地区具有完整长时间序列气象数据的24个站点开展研究。土壤容重、pH值和电导率从国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<https://www.ncdc.ac.cn/portal/>)获取;不同土层深度饱和土壤含水率(Saturated soil water content, SAT)、凋萎系数(Wilting point, WP)和田间持水量(Field moisture capacity, FC)等土壤物理参数从国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)获取。

1.2.2 未来气候数据

在全球气候变化研究的学术前沿中,气候模式模拟数据已成为探究气象要素时空演变规律的重要工具。基于国际耦合模式比较计划第六阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)构建的多情景模拟体系,为揭示气候资源演变机制提供创新性研究平台。CMIP6通过多模型、

多情景和多变量的模拟数据,为气候变化研究提供丰富的资源,数据集的高分辨率和长时间序列使其成为未来气候研究和政策制定的重要基础^[21]。CMIP6包含27个气候模式,各模式模拟精度不同,为了减少单一气候模式的不确定性,通过计算27个全球气候模式输出的气象数据平均值进行未来气候变化影响评估^[22]。选取SSP2-4.5(中等强迫情景)和SSP5-8.5(高等强迫情景)2种气候情景,时间序列为1990—2100年,其中将1990—2020年定义为气候基准期,未来预估时期为2030—2065年(2050s)和2066—2100年(2080s)。

采用Nwai-WG统计降尺度方法,对SSP2-4.5和SSP5-8.52种共享社会经济路径情景下27个GCM原始输出数据(包括降雨量、最高温度、最低温度及太阳辐射)等未来气候数据进行空间和时间降尺度,进而得到西南地区24个站点的未来逐日气象数据^[20]。

1.3 研究方法

1.3.1 APSIM-ORYZA模型原理

APSIM-ORYZA是农业系统模拟框架APSIM(Agricultural Production Systems Simulator)与水稻生长模型ORYZA的耦合模型。通过整合APSIM的环境驱动模块(土壤-水-养分动态)与ORYZA的水稻生理生态模块,实现对水稻生长发育、产量形成与环境互作过程的系统模拟。APSIM-ORYZA在每日时间步长下模拟水稻生产,主要由生物模块、管理模块、数据输入输出以及模型引擎4部分组成。模型需输入的数据主要包括作物生育期的逐日气象数据、土壤物理和化学性质数据、作物管理数据、试验观测数据和作物遗传参数等;模型最终输出数据主要包括作物物候期、生物量、叶面积指数和收获时产量。利用DVRJ、DVRI、DVRP和DVRR4个遗传参数对各个站点品种参数进行调整,见表1。

表1 APSIM-ORYZA模型水稻遗传参数名称与取值范围

Tab.1 Genetic parameters of rice and their ranges in APSIM-ORYZA model					(℃·d) ⁻¹
参数	下限	上限	下限	上限	基值
	(基值-30%)	(基值+30%)	(基值-50%)	(基值+50%)	
幼年期发育速率(DVRJ)	0.0007	0.0013	0.0005	0.0015	0.0010
光周期敏感期发育速率(DVRI)	0.000525	0.000975	0.000375	0.001125	0.000750
穗发育的发育速率(DVRP)	0.000595	0.001105	0.000425	0.001275	0.000850
生殖阶段发育速率(DVRR)	0.0014	0.0026	0.001	0.003	0.002

参考表1的遗传参数范围,基于农业气象站点的水稻生育期和产量通过“试错法”调整水稻遗传参数,然后再对水稻遗传参数进行验证。最后用验证后的水稻遗传参数结合APSIM-ORYZA模型模拟西南地区24个气象站点历史时期和未来时

期水稻生育期和产量变化。使用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(RRMSE)对APSIM-ORYZA模型进行模拟精度评价^[22]。当 R^2 大于0.5时,模拟结果可接受, RMSE和RRMSE越接近于0表明模拟值与实测值

越接近,效果越好。

1.3.2 水稻水肥管理措施设置

通过在 APSIM – ORYZA 模型的 Manager folder、Automatic irrigation 和 Fertilise 模块设置水稻积水层、不同控制灌溉和有机无机肥配施方案,以系统分析未来气候变化下不同水肥管理措施对水稻产量的影响。灌溉方案设置包含常规淹水与返青期后旱作控制灌溉模式。常规淹水灌溉(分蘖末期 10 d 内不灌溉)^[23],其余时间维持 2 ~ 3 cm 田间水层;控制灌溉处理在返青期前同样保持 2 ~ 3 cm 水层,其余时期设置不同灌溉梯度:各处理灌溉上限统一设定为田间持水量,下限分别控制为土壤有效含水率的 50% (I1)、70% (I2) 和 90% (I3)。施肥管理方案包括常规施肥与有机肥替代 2 部分。常规施肥处理以纯氮总量 180 kg/hm² 为标准,按基肥与追肥 7: 3 分次施用;有机肥替代处理采用牛粪(含氮量 0.44%)等氮量替代化学氮肥,分别设置 20% (F1)、40% (F2)、60% (F3) 3 个替代梯度,所有替代有机肥均作为基肥一次性施用。对照组(CK)为常规淹水灌

溉和施肥处理。

选用牛粪作为有机肥源,主要基于其在西南地区的广泛可得性、成分稳定性及已有农艺试验数据的支持。牛粪含氮量约为 0.44%,碳氮比为 25 ~ 30,其分解与养分释放过程通过 APSIM – ORYZA 模型的 Organic Matter 和 Residue Pool 模块实现。模型中设置初始碳氮比为 28,分解速率系数为 0.05,温度敏感性 Q10 值为 2.0,并基于牛粪矿化特性将氮释放高峰设定为施入后 30 ~ 40 d,以匹配水稻分蘖–拔节期的养分需求^[24–25]。

2 结果与分析

2.1 APSIM – ORYZA 模型校准和验证

利用可获取的 24 个站点水稻生育期和产量实测数据对 APSIM – ORYZA 模型进行校准和验证,得到各个站点水稻遗传参数。校准和验证后确定的水稻遗传参数如表 2 所示。图 2 为 APSIM – ORYZA 模型对水稻生育期及产量观测值与模拟值的校准和验证结果。

表 2 西南地区 24 个站点水稻遗传参数
Tab.2 Rice genetic parameters at 24 stations in Southwest China (℃·d)⁻¹

区域	站点编号	站点名称	DVRJ	DVRI	DVRP	DVRR
四川	56187	四川温江	0.000 635	0.007 990	0.000 789	0.001 790
	56280	四川名山	0.000 625	0.000 825	0.000 984	0.001 798
	56288	四川双流	0.000 720	0.000 799	0.000 889	0.001 753
	56389	四川犍为	0.000 620	0.000 780	0.001 088	0.001 753
	56474	四川旌宁	0.000 620	0.000 780	0.001 088	0.001 753
	57318	四川营山	0.000 743	0.000 897	0.001 030	0.001 458
	57328	四川达川	0.000 743	0.000 897	0.001 030	0.001 458
	57411	四川高坪	0.000 625	0.000 825	0.000 984	0.001 798
	57503	四川东兴区	0.000 625	0.000 825	0.000 984	0.001 798
	57508	四川泸县	0.000 690	0.000 890	0.000 910	0.002 103
云南	57307	四川三台	0.000 625	0.000 825	0.000 984	0.001 798
	56977	云南江城	0.000 650	0.000 824	0.000 823	0.001 732
	56994	云南文山	0.000 620	0.000 879	0.000 920	0.001 718
	59205	云南富宁	0.000 620	0.000 879	0.000 920	0.001 718
	56856	云南景东	0.000 620	0.000 879	0.000 920	0.001 718
	56946	云南耿马	0.000 610	0.000 883	0.001 093	0.001 410
	56964	云南思茅	0.000 610	0.000 883	0.001 093	0.001 410
贵州	56966	云南元江	0.000 690	0.000 890	0.000 910	0.002 103
	57729	贵州余庆	0.000 620	0.000 879	0.000 920	0.001 718
	57736	贵州江口	0.000 610	0.000 810	0.000 867	0.001 310
重庆	57829	贵州丹寨	0.000 634	0.000 834	0.000 931	0.001 610
	57517	重庆江津	0.000 620	0.000 780	0.001 088	0.001 753
	57633	重庆酉阳	0.000 620	0.000 780	0.001 088	0.001 753
	57432	重庆万州	0.000 640	0.000 869	0.001 005	0.001 480

APSIM – ORYZA 模型对水稻生育期校正和验证的 R² 分别为 0.95 和 0.96, RMSE 分别为 3.3、2.8 d, RRMSE 分别为 2.4% 和 2.0%, 表明 APSIM – ORYZA 模型对水稻生育期模拟值和实测值基本一

致,该模型对水稻生育期模拟精度较高。APSIM – ORYZA 模型对水稻产量校正和验证 R² 分别为 0.85 和 0.86, RMSE 分别为 622.5、711.5 kg/hm², RRMSE 分别为 8.2% 和 9.3%, 虽然模型对水稻产量的模拟

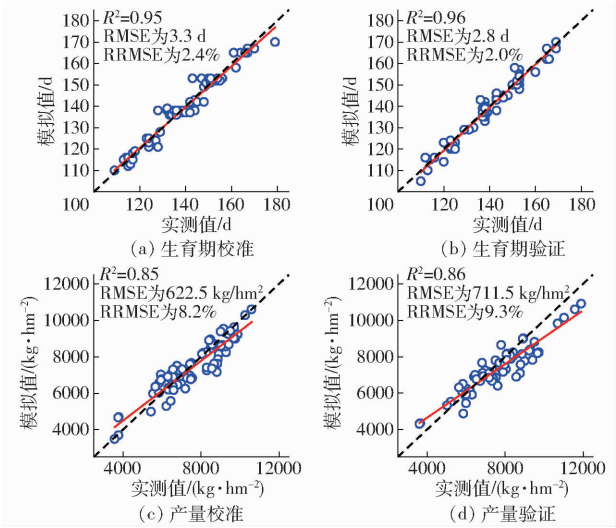


图2 水稻生育期和产量实测值与模拟值对比
Fig.2 Comparison of observed and simulated values
of rice growth date and rice yield

优度低于水稻生育期,但其相对均方根误差均小于10%,模拟效果较优。

2.2 未来气候变化下不同灌溉模式对西南地区水稻产量和土壤养分的影响

未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下不同控制灌溉梯度对西南地区水稻产量的影响模拟分析结果如图 3 所示。

结果表明,随着控制灌溉下限升高(从 I1 到 I3),水稻产量呈先减少后增加的变化趋势。相较于 CK 处理,SSP2-4.5 情景下,I1 处理减产幅度最大(76~148 kg/hm²),其中贵州省 2050s 出现区域最大减产量(148 kg/hm²);I2 和 I3 处理分别减产12~70 kg/hm²和 2~64 kg/hm²。在 SSP5-8.5 情景下,I1 处理减产为 68~153 kg/hm²,四川省 2080s 出现最大减产量(153 kg/hm²);I2 处理减产 5~58 kg/hm²;I3 处理减产幅度降低至 0~54 kg/hm²,其中云南省 2080s 水稻产量在 I3 处理下与常规灌溉持平。在 3 种灌溉处理(I1、I2、I3)下,西南地区水稻产量相较于历史基准期均出现下降,其中 I1 处理减产幅度最大,I2 与 I3 处理产量降幅基本接近(图 3),减产趋势随时间推移和气候情境增加逐渐加剧。在 SSP2-4.5 情景下,常规灌溉的 2050s 水稻产量下降 5.3%,3 种灌溉措施(I1、I2、I3)对应降幅分别为 6.9%、5.8%、5.7%;至 2080s,CK 处理减产率上升至 8.7%,I1~I3 处理分别上升至 10.1%、9.1%、8.9%。SSP5-8.5 情景下,2050s CK 处理减产率为 8.1%,I1~I3 处理分别达 9.6%、8.6%、8.5%;到 21 世纪 80 年代,各处理减产幅度进一步上升至 16.1%(CK)、17.6%(I1)、16.5%(I2、I3)。对比不同灌溉模式的影响发现,I1、I2、I3 处理较 CK

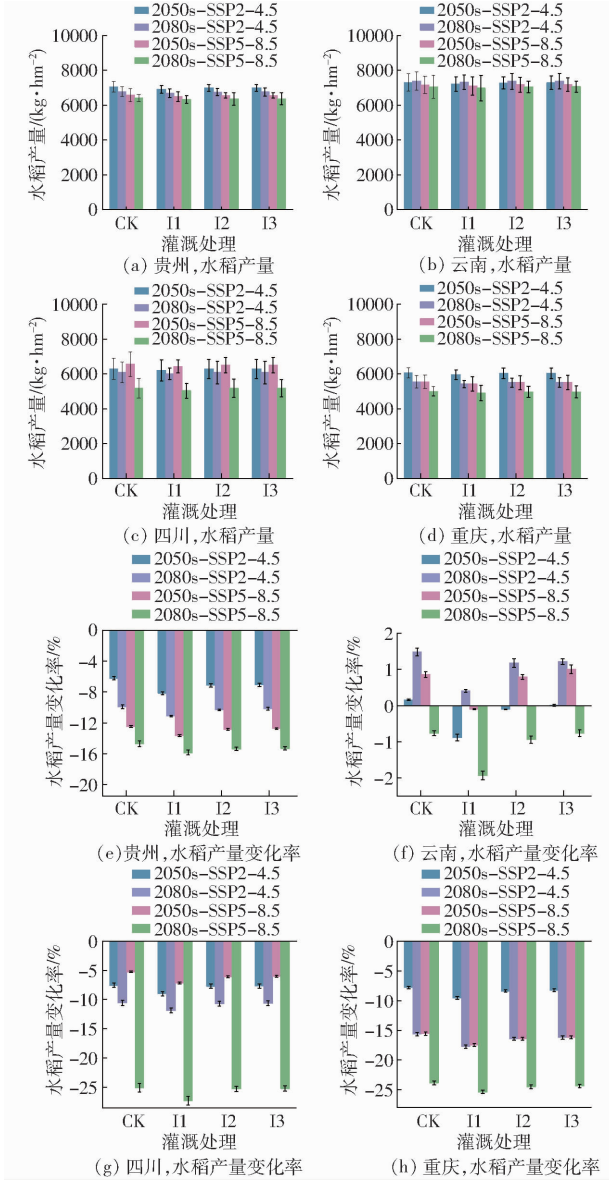


图3 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下不同灌溉措施对西南地区水稻产量的影响
Fig.3 Effects of irrigation practices on rice yield in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios

平均导致水稻减产 1.5%、1.1% 和 1.0%。

未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景中,CK、I1、I2 和 I3 灌溉处理下的土壤有机碳含量几乎一致,表明不同灌溉模式对西南地区水稻土壤有机碳储量没有影响(图 4)。大多研究表明^[25],灌溉会引起土壤盐分和磷素的积累,在干旱或半干旱地区,灌溉有利于土壤有机碳储存,但在湿润地区,灌溉不会影响土壤有机碳变化。西南地区气候温暖湿润,水资源丰富,本研究同样发现灌溉对西南地区土壤有机碳储存没有影响。

2.3 未来气候变化下不同有机无机肥配施对西南地区水稻产量和土壤养分的影响

设置其他田间管理保持不变,基于 APSIM -

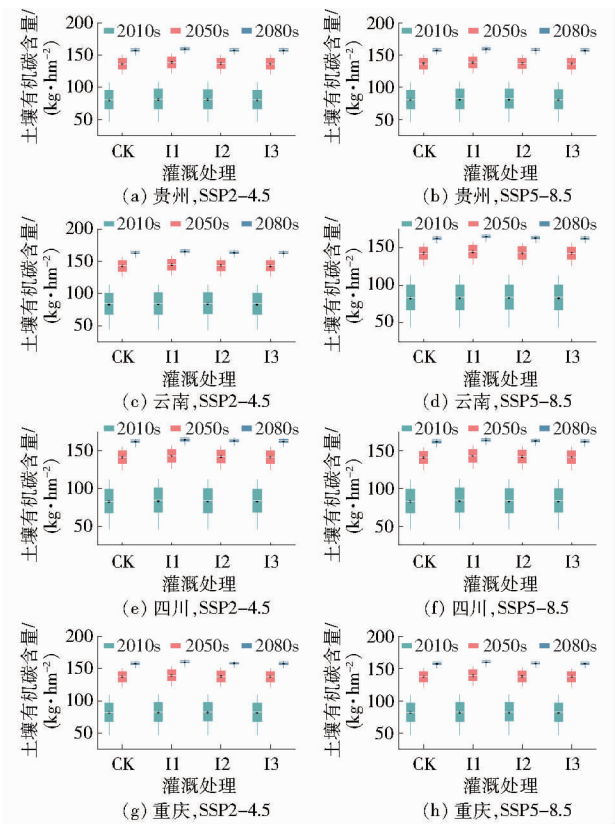


图 4 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区水稻土壤有机碳对不同灌溉模式的响应

Fig.4 Responses of soil organic carbon to different degrees of controlled irrigation in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

ORYZA 模拟研究未来气候变化下不同有机无机肥配施对西南地区水稻产量和土壤养分的影响。结果表明,在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下,水稻产量随着有机肥替代比例增加呈先增加后减少趋势(图 5)。相较于 CK,西南地区水稻产量在 F1 和 F2 处理下增加,在 F3 处理下呈下降趋势。SSP2-4.5 情景下,西南地区水稻产量 F1 和 F2 处理平均增加 91、27 kg/hm²、F3 处理减少 232 kg/hm²。其中,重庆市 F3 处理减产幅度最大,为 425 kg/hm²。SSP5-8.5 情景下,F1 和 F2 处理水稻产量分别增加 97、43 kg/hm²,而 F3 处理减少 155 kg/hm²。其中,云南省水稻产量在 F1 处理出现最大增幅,为 147 kg/hm²。

F1、F2 和 F3 3 种有机肥替代处理下,水稻产量相较于历史时期均出现不同程度下降。F1 处理下降幅度最小,F3 处理下降趋势最大(图 6)。相较于历史时期,SSP2-4.5 情景中 CK、F1、F2、F3 处理西南地区水稻产量分别减少 5.3%~8.7%、4.0%~7.4%、4.8%~8.5% 和 4.9%~11.8%;SSP5-8.5 情景分别减少 8.1%~16.1%、6.8%~14.7%、7.4%~15.6% 和 10.4%~18.2%。相较于 CK 处

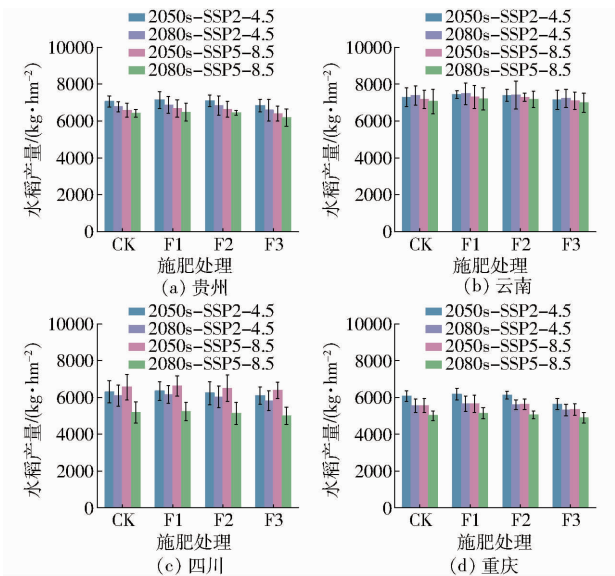


图 5 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景不同有机无机肥配施处理下西南地区水稻产量

Fig.5 Rice yields in Southwest China under different organic-inorganic fertilizer combination treatments in future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

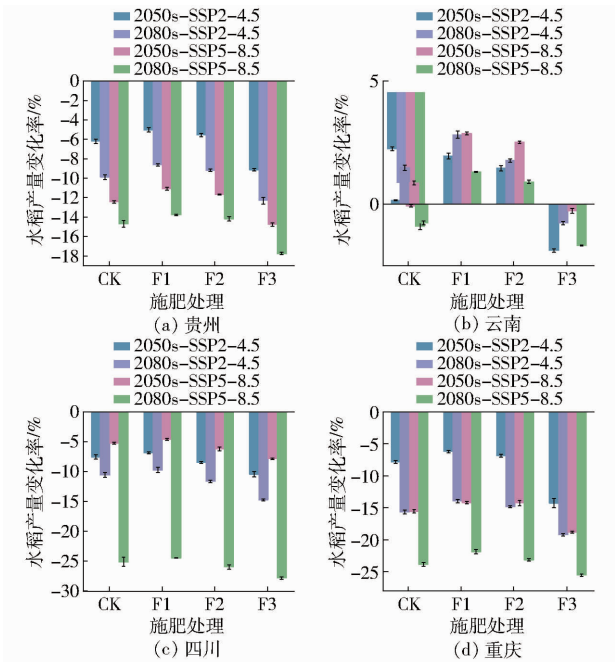


图 6 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区水稻产量变化对不同有机无机肥配施量的响应

Fig.6 Responses of rice yield change to different organic-inorganic fertilizer rates in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

理,F1 和 F2 处理水稻产量平均提升 1.3% 和 0.4%,F3 处理水稻产量减少 2%。

由图 7 可知,有机肥替代化肥有利于西南地区水稻土壤有机碳储存,其增幅随替代比例增加而增加。在 SSP2-4.5 气候情景下,F1、F2 和 F3 处理 2050s 水稻土壤有机碳分别为 209、347、346 kg/hm²,

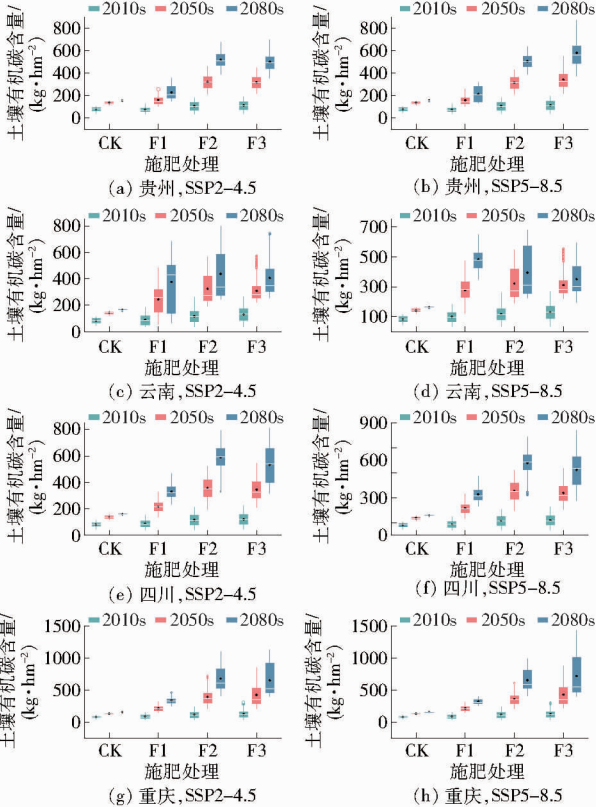


图 7 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区土壤有机碳对不同有机无机肥配施量的响应

Fig. 7 Responses of soil organic carbon to different organic-inorganic fertilizer rates in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

较 CK 处理分别增加 71、209、208 kg/hm², 2080s 分别为 318、554、523 kg/hm², 较 CK 处理分别增加 159、395、364 kg/hm², 且重庆市 2080s F3 处理土壤有机碳储量最高, 为 675 kg/hm²。在 SSP5-8.5 气候情景下, F1、F2 和 F3 处理 2050s 西南地区水稻土壤有机碳含量分别为 213、336、355 kg/hm², 较 CK 处理分别增加 80、203、222 kg/hm², 2080s 分别为 323、533、541 kg/hm², 较 CK 处理分别增加 167、376、385 kg/hm², 同样地, 重庆市 2080s F3 处理土壤有机碳含量最高, 为 715 kg/hm²。对比分析发现, 有机肥替代比例 40% 在 SSP2-4.5 情景下普遍呈现最佳效益, 而在高温温室气体排放情景 SSP5-8.5 中, 有机肥替代比例 60% 对贵州和重庆区域的碳积累促进作用更为显著。

未来气候变化影响下, 有机肥替代措施可以有效提升西南地区水稻土壤总氮含量, 且随着有机肥替代比例增加而增加 (图 8)。SSP2-4.5 情景下, 相较于 CK, 2050s 和 2080s 中 F1、F2、F3 处理贵州省水稻土壤总氮分别增加 82 ~ 376 kg/hm²、147 ~ 653 kg/hm² 和 188 ~ 751 kg/hm², 云南省分别增加 109 ~ 497 kg/hm²、179 ~ 666 kg/hm² 和 219 ~

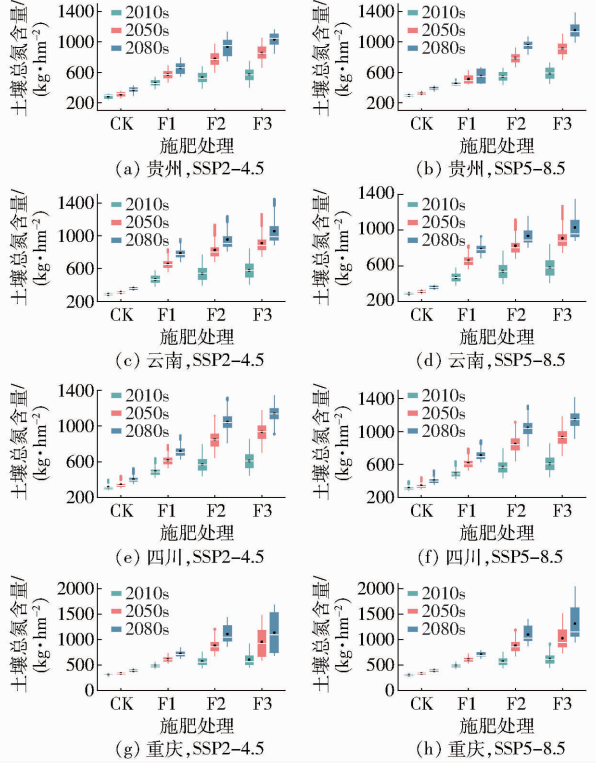


图 8 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区土壤总氮对不同施肥模式的响应

Fig. 8 Response of soil total nitrogen to fertilization regimes in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

765 kg/hm², 四川省分别增加为 90 ~ 400 kg/hm²、163 ~ 735 kg/hm² 和 204 ~ 824 kg/hm², 重庆市分别增加 98 ~ 417 kg/hm²、184 ~ 810 kg/hm² 和 209 ~ 834 kg/hm²。其中, 四川省在 2080s F3 处理土壤总氮含量最高, 为 1 138 kg/hm², 重庆市则实现最大增幅, 累积增加 834 kg/hm²。SSP5-8.5 情景下, 西南地区水稻土壤总氮含量会进一步增加, 2050s 和 2080s 中 F1、F2、F3 处理贵州省水稻土壤总氮分别增加 65 ~ 253 kg/hm²、163 ~ 661 kg/hm² 和 204 ~ 851 kg/hm², 云南省分别增加 114 ~ 506 kg/hm²、180 ~ 653 kg/hm² 和 220 ~ 751 kg/hm², 四川省分别增加 90 ~ 400 kg/hm²、163 ~ 735 kg/hm² 和 204 ~ 841 kg/hm², 重庆市分别增加 98 ~ 405 kg/hm²、184 ~ 810 kg/hm² 和 233 ~ 981 kg/hm²。值得注意的是, 重庆市在 2080s F3 处理土壤总氮含量最高, 为 1 300 kg/hm², 较 CK 处理增幅达 981 kg/hm²。通过对比 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区水稻土壤总氮含量变化, 发现云南省和四川省增幅范围相近, 而贵州省和重庆市在 SSP5-8.5 情景下土壤总氮含量表现出更强的远期累积效应, 尤其在 F3 处理下, 在 2080s 增幅较 SSP2-4.5 情景分别增加 13.3% 和 17.6%。

2.4 未来气候变化下不同水肥耦合模式对西南地区水稻产量和土壤养分的影响

模拟结果表明,西南地区水稻产量在 F1I3 处理最高,较 CK 处理增产 35 ~ 186 kg/hm² (表 3)。SSP2-4.5 情景下,2050s 和 2080s 中 F1I3 处理水稻产量分别增加 35 ~ 175 kg/hm² 和 48 ~ 180 kg/hm²,其中

2080s 云南省水稻产量增幅最大,为 7 469 kg/hm²,相较于 CK 处理增加 180 kg/hm²;SSP5-8.5 情景下,F1I3 处理在 2050s 相较于 CK 处理增加 45 ~ 186 kg/hm²,2080s 增加 38 ~ 185 kg/hm²,云南省在 2050s 水稻产量增幅最高,为 186 kg/hm²。相比之下,F3I3 处理水稻产量最低,较 CK 处理减产 140 ~

表 3 未来气候变化下不同水肥耦合模式对西南地区水稻产量的影响

Tab.3 Effects of different water-fertilizer coupling models on rice yield in Southwest China under future climate change									
区域	处理	2050s-SSP2-4.5		2080s-SSP2-4.5		2050s-SSP5-8.5		2080s-SSP5-8.5	
		产量/ (kg·hm ⁻²)	减产幅度/ %	产量/ (kg·hm ⁻²)	减产幅度/ %	产量/ (kg·hm ⁻²)	减产幅度/ %	产量/ (kg·hm ⁻²)	减产幅度/ %
四川	CK	6 301 ± 601	-7.569 ± 0.23	6 095 ± 587	-10.585 ± 0.20	6 567 ± 689	-5.271 ± 0.11	5 189 ± 571	-24.925 ± 0.30
	F1I1	6 278 ± 557	-7.907 ± 0.27	6 056 ± 401	-11.163 ± 0.12	6 545 ± 467	-5.583 ± 0.02	5 163 ± 255	-25.304 ± 0.25
	F1I2	6 313 ± 529	-7.393 ± 0.26	6 108 ± 566	-10.400 ± 0.11	6 584 ± 491	-5.020 ± 0.18	5 204 ± 428	-24.711 ± 0.24
	F1I3	6 337 ± 531	-7.481 ± 0.28	6 144 ± 564	-10.459 ± 0.10	6 612 ± 498	-5.049 ± 0.06	5 228 ± 418	-24.508 ± 0.33
	F2I1	6 150 ± 216	-9.784 ± 0.31	5 931 ± 294	-12.997 ± 0.28	6 423 ± 309	-7.343 ± 0.39	5 042 ± 460	-27.054 ± 0.39
	F2I2	6 173 ± 359	-9.447 ± 0.39	5 962 ± 471	-12.542 ± 0.18	6 465 ± 503	-6.737 ± 0.18	5 076 ± 377	-26.563 ± 0.18
	F2I3	6 195 ± 348	-9.447 ± 0.25	6 013 ± 367	-12.542 ± 0.18	6 484 ± 514	-6.751 ± 0.21	5 116 ± 527	-26.563 ± 0.11
	F3I1	5 938 ± 390	-12.894 ± 0.26	5 788 ± 393	-15.095 ± 0.17	6 311 ± 417	-8.958 ± 0.14	4 905 ± 470	-29.036 ± 0.49
	F3I2	5 962 ± 385	-12.542 ± 0.25	5 794 ± 408	-15.007 ± 0.16	6 334 ± 425	-8.627 ± 0.21	4 936 ± 458	-28.588 ± 0.16
	F3I3	5 983 ± 234	-12.572 ± 0.11	5 811 ± 266	-15.153 ± 0.10	6 355 ± 224	-8.627 ± 0.06	4 958 ± 459	-28.660 ± 0.18
云南	CK	7 294 ± 501	0.163 ± 0.05	7 390 ± 517	1.478 ± 0.02	7 171 ± 489	0.858 ± 0.01	7 056 ± 671	-0.759 ± 0.01
	F1I1	7 382 ± 561	1.373 ± 0.05	7 481 ± 506	2.733 ± 0.03	7 258 ± 557	2.082 ± 0.01	7 142 ± 670	0.450 ± 0.01
	F1I2	7 418 ± 533	1.868 ± 0.14	7 538 ± 521	3.516 ± 0.17	7 321 ± 574	2.968 ± 0.02	7 185 ± 467	1.055 ± 0.03
	F1I3	7 469 ± 550	1.744 ± 0.05	7 569 ± 509	3.392 ± 0.01	7 358 ± 529	2.925 ± 0.02	7 241 ± 459	0.914 ± 0.02
	F2I1	7 343 ± 416	0.838 ± 0.01	7 423 ± 294	1.936 ± 0.01	7 187 ± 506	1.083 ± 0.03	7 084 ± 226	-0.366 ± 0.01
	F2I2	7 365 ± 388	1.140 ± 0.01	7 437 ± 432	2.129 ± 0.01	7 213 ± 312	1.449 ± 0.12	7 122 ± 330	0.169 ± 0.01
	F2I3	7 390 ± 405	1.071 ± 0.12	7 456 ± 425	2.115 ± 0.12	7 242 ± 501	1.435 ± 0.05	7 135 ± 337	0.141 ± 0.02
	F3I1	7 063 ± 259	-3.007 ± 0.01	7 205 ± 366	-1.057 ± 0.03	6 953 ± 454	-2.208 ± 0.01	6 876 ± 435	-3.291 ± 0.01
	F3I2	7 126 ± 411	-2.142 ± 0.13	7 212 ± 373	-0.961 ± 0.04	6 994 ± 386	-1.632 ± 0.05	6 898 ± 431	-2.982 ± 0.02
	F3I3	7 126 ± 372	-2.170 ± 0.02	7 213 ± 256	-1.016 ± 0.03	7 003 ± 390	-1.632 ± 0.03	6 910 ± 256	-3.038 ± 0.01
贵州	CK	7 054 ± 305	-6.188 ± 0.12	6 776 ± 276	-9.882 ± 0.15	6 578 ± 378	-12.422 ± 0.18	6 408 ± 208	-14.688 ± 0.17
	F1I1	7 105 ± 345	-5.506 ± 0.16	6 825 ± 359	-9.23 ± 0.13	6 642 ± 381	-11.570 ± 0.06	6 462 ± 349	-13.966 ± 0.32
	F1I2	7 138 ± 326	-5.067 ± 0.26	6 862 ± 338	-8.738 ± 0.22	6 675 ± 313	-11.130 ± 0.36	6 501 ± 418	-13.447 ± 0.12
	F1I3	7 145 ± 328	-5.107 ± 0.06	6 873 ± 344	-8.791 ± 0.13	6 688 ± 317	-11.144 ± 0.16	6 513 ± 414	-13.500 ± 0.27
	F2I1	7 065 ± 161	-6.038 ± 0.05	6 789 ± 260	-9.709 ± 0.21	6 583 ± 217	-12.355 ± 0.25	6 392 ± 115	-14.898 ± 0.12
	F2I2	7 089 ± 461	-5.719 ± 0.05	6 813 ± 553	-9.390 ± 0.10	6 602 ± 562	-12.102 ± 0.12	6 414 ± 356	-14.605 ± 0.11
	F2I3	7 093 ± 466	-5.799 ± 0.17	6 834 ± 422	-9.416 ± 0.22	6 624 ± 409	-11.942 ± 0.22	6 437 ± 287	-14.685 ± 0.14
	F3I1	6 795 ± 444	-9.629 ± 0.01	6 513 ± 624	-13.379 ± 0.11	6 384 ± 418	-15.005 ± 0.05	6 163 ± 503	-17.947 ± 0.34
	F3I2	6 835 ± 445	-9.097 ± 0.15	6 545 ± 623	-12.954 ± 0.18	6 429 ± 425	-14.406 ± 0.11	6 174 ± 494	-17.801 ± 0.14
	F3I3	6 844 ± 166	-9.177 ± 0.02	6 559 ± 297	-13.007 ± 0.11	6 435 ± 202	-14.406 ± 0.21	6 189 ± 239	-17.867 ± 0.14
重庆	CK	6 069 ± 286	-7.797 ± 0.23	5 552 ± 355	-15.648 ± 0.16	5 558 ± 388	-15.553 ± 0.18	5 014 ± 258	-23.829 ± 0.35
	F1I1	6 158 ± 288	-6.442 ± 0.11	5 607 ± 307	-14.813 ± 0.24	5 617 ± 439	-14.661 ± 0.15	5 085 ± 369	-22.744 ± 0.20
	F1I2	6 169 ± 312	-6.275 ± 0.21	5 632 ± 332	-14.433 ± 0.24	5 643 ± 428	-14.266 ± 0.14	5 116 ± 309	-22.273 ± 0.28
	F1I3	6 177 ± 307	-6.305 ± 0.21	5 644 ± 348	-14.448 ± 0.13	5 652 ± 435	-14.281 ± 0.15	5 131 ± 321	-22.349 ± 0.20
	F2I1	6 103 ± 288	-7.277 ± 0.22	5 593 ± 257	-15.026 ± 0.11	5 581 ± 349	-15.208 ± 0.13	5 027 ± 323	-23.625 ± 0.38
	F2I2	6 121 ± 312	-7.004 ± 0.11	5 614 ± 283	-14.707 ± 0.21	5 599 ± 337	-14.935 ± 0.11	5 044 ± 306	-23.367 ± 0.27
	F2I3	6 129 ± 307	-7.034 ± 0.11	5 632 ± 298	-14.737 ± 0.12	5 607 ± 345	-14.965 ± 0.12	5 060 ± 169	-23.428 ± 0.17
	F3I1	5 586 ± 276	-15.132 ± 0.25	5 243 ± 453	-20.343 ± 0.10	5 246 ± 358	-20.298 ± 0.11	4 874 ± 366	-25.950 ± 0.38
	F3I2	5 602 ± 300	-14.889 ± 0.24	5 262 ± 488	-20.055 ± 0.38	5 277 ± 346	-19.827 ± 0.18	4 892 ± 306	-25.676 ± 0.14
	F3I3	5 617 ± 296	-14.889 ± 0.13	5 287 ± 377	-20.085 ± 0.09	5 293 ± 354	-19.888 ± 0.08	4 900 ± 318	-25.752 ± 0.16

503 kg/hm²。研究发现,在不同水肥耦合效应中,有机肥替代对产量的影响大于灌溉处理,当施肥模式固定时,不同灌溉处理间产量差异为 8 ~ 88 kg/hm²,而当灌溉模式固定时,不同施肥处理间产量差异达 268 ~ 572 kg/hm²(表 3)。

相较于历史基准期,未来不同气候情景下不同水肥耦合模式中西南地区(除云南省外)水稻产量主要呈减产趋势。其中,F3I1 处理减产幅度最小(表 3)。在 SSP2-4.5 情景下,贵州省、四川省和重庆市在 F3I1 处理分别减产 6.8%、8.8%、10.3%,但相较于 CK 处理增加 1.3%、0.6% 和 1.5%,而云南省增产 3.3%,相较于 CK 处理增加 2.5%。在 SSP5-8.5 情景下,贵州省、四川省和重庆市在 F3I1 处理减产幅度增加,分别减产 12.1%、14.6% 和 18.2%,相较于 CK 增加 1.5%、0.7% 和 1.51%,而云南省增产 1.4%,相较于 CK 处理产量增加 1.2%。

不同水肥耦合模式可以提升西南地区水稻土壤有机碳含量(图 9)。SSP2-4.5 情景下,2050s 土壤有机碳含量为 224 ~ 343 kg/hm²,相较于 CK 处理增加 69 ~ 184 kg/hm²;2080s 土壤有机碳含量为 337 ~ 563 kg/hm²,相较于 CK 处理增加 178 ~ 404 kg/hm²。且均在 F2 处理土壤有机碳含量最高。SSP5-8.5

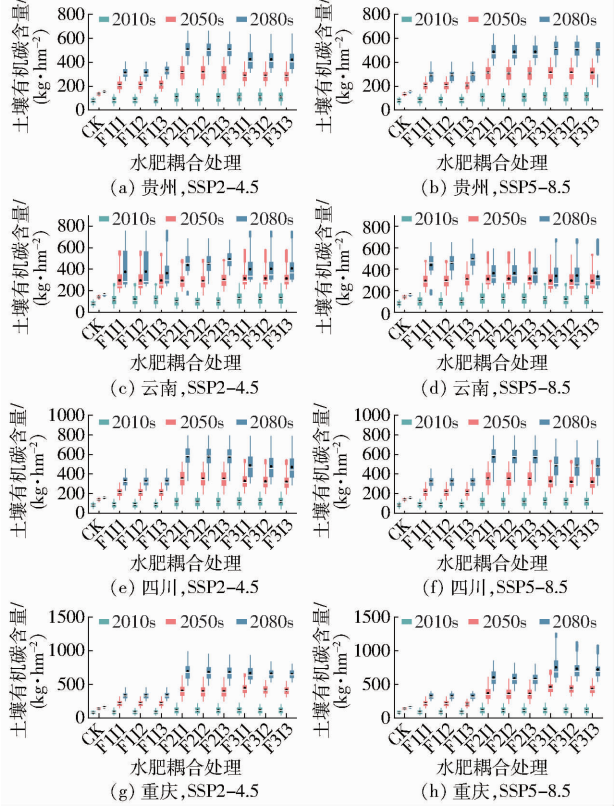


图 9 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区土壤有机碳对不同水肥耦合模式的响应

Fig.9 Responses of soil organic carbon to different water and fertilizer treatments in Southwest China under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

情景下,2050s 西南地区水稻土壤有机碳含量为 234 ~ 347 kg/hm²,相较于 CK 处理增加 73 ~ 188 kg/hm²;2080s 土壤有机碳含量为 342 ~ 522 kg/hm²,相较于 CK 处理增加 183 ~ 363 kg/hm²。SSP5-8.5 情景下,四川省水稻土壤有机碳含量与 SSP2-4.5 情景下变化趋势一致,而贵州省在 F2I1、F3I3 处理土壤有机碳含量随着有机肥替代比例增加趋于平缓,云南省在 F3I1 处理土壤有机碳含量最大,随后随着有机肥替代比例增加而减少。

由图 10 可知,不同水肥耦合模式下西南地区水稻土壤总氮含量增加,且施肥模式对土壤总氮的影响大于灌溉。同一施肥处理下,不同灌溉水平土壤总氮含量为 3 ~ 35 kg/hm²,而同一灌溉处理下,不同施肥水平土壤总氮含量为 286 ~ 600 kg/hm²。SSP2-4.5 情景下,相较于 CK 处理,不同水肥耦合模式中 2050s 水稻土壤总氮含量增加 456 ~ 769 kg/hm²,2080s 增加 564 ~ 967 kg/hm²;在 SSP5-8.5 情景下,使 2050s 土壤总氮含量增加 441 ~ 806 kg/hm²,2080s 增加 531 ~ 1 015 kg/hm²。相较于 SSP2-4.5 情景,SSP5-8.5 情景下土壤总氮含量增幅较大,且随着时间推移土壤总氮含量增加。

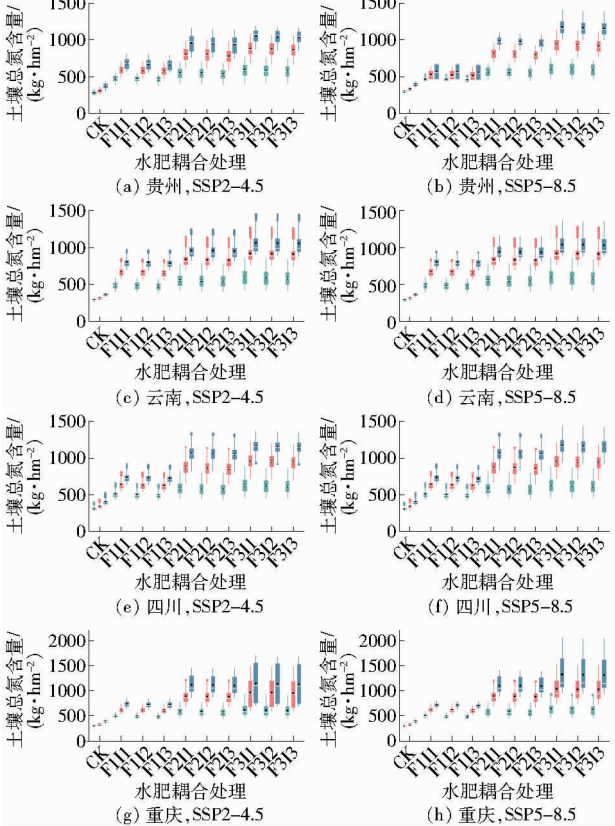


图 10 未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下西南地区水稻土壤总氮对不同水肥耦合模式的响应

Fig.10 Response of soil total nitrogen in rice fields of Southwest China to different water-fertilizer coupling models under future SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

3 讨论

水稻产量的形成是多种环境因子协同作用下的动态平衡过程。本研究结果表明,有机肥替代20%化肥有利于水稻生产。有机肥含有丰富养分,但其分解需一定温度条件,未来西南地区温度升高可以加快分解速率,与化肥配施可调控土壤与化肥养分的释放强度和速率使作物在各生育阶段得到均衡稳定持续的养分供给,且有机肥可以增强土壤团聚体稳定性和优化孔隙结构,提升土壤持水能力,有效缓解未来气候下西南地区水稻生育期内的干旱胁迫,在一定程度上促进水稻生长,提高产量^[26-27]。其次,有机物料分解过程释放的腐殖酸等活性物质可调节根际微生物群落结构,诱导丛枝菌根真菌丰度提升,通过菌丝网络扩展提高水稻对水分和养分的利用效率^[28]。但过量替代(>40%)引发负面效应,表现为高量有机肥无法在水稻生长前期保证充足养分供应,水稻植株发育较慢,分蘖能力下降,且有机氮矿化滞后可能抑制作物生长,进而导致产量下降^[29]。

氮是水稻生长的重要养分,通常是许多集约化谷物单作系统中最缺乏的,未来西南地区降水增加,若水稻在营养生长期遭遇强降水,则会加剧土壤氮素淋失,限制氮素吸收,氮素有效性可以促进分蘖发生,因此养分摄取受限可能使有效分蘖数减少,最终导致水稻减产^[4]。有机肥替代化肥可降低土壤氮淋溶和氨挥发,有助于补充有机物矿化及降雨供应中的天然氮库,增加土壤氮固存能力,若长期施用有机肥和化肥可显著提高土壤总氮含量^[30]。

土壤有机碳是地球陆地生态系统最重要和活跃的碳库,同时又是土壤肥力和基础地力的重要物质基础,对于提高作物产量、减缓温室气体排放具有重要作用^[31]。增施有机肥可提高土壤碳含量,但其对不同气候情景响应不同,替代比例40%在SSP2-4.5情景普遍呈现最佳效益,而在温室气体排放情景(SSP5-8.5),替代比例60%对碳积累促进作用更为显著。其差异性主要来源于未来不同气候情景下的气候变化特征不同,导致影响水稻生长的温度、光照、降水等主要气候要素存在差异,影响有机质分解速率,最终影响水稻土壤养分、生长和产量^[32]。SSP2-4.5中等排放气候情景下,温升幅度适中(1.5~2.0℃),替代比例40%既可提供充足的有机氮矿化供应,又避免了高比例替代下前期氮释放滞后导致的营养竞争^[33]。而在SSP5-8.5高等排放气候情景下,高温高CO₂环境中(2.5~

4.0℃),升温显著加速了有机肥分解(Q10为2.0),替代比例60%可提供更持续的养分供应,此外,较高的CO₂浓度有利于提升水稻光合能力和氮素利用效率,缓解了高有机肥可能带来的前期氮供应不足问题^[34]。未来气候变化通过调控有机肥的分解-供应动态,间接影响水稻的养分吸收和产量形成,应根据长期气候趋势动态优化作物有机肥替代策略。也有学者研究表明,在温度升高条件下,土壤中微生物活性较高,无论降水量如何变化,都会降低土壤有机碳储存能力。而有机肥使用能有效减少因环境温度骤升导致的土壤有机碳损失。这是因为有机肥降低了土壤有机碳的稳定性,减少了因温度上升而活跃的微生物数量,同时丰富了微生物多样性^[35]。

控制灌溉会对水稻产量产生负面影响。然而,这种影响通常较小,尤其在适度控制灌溉情况下,其对水稻生产的负面影响可被有效缓解。在气候变化背景下水热格局演变对西南稻区灌溉制度提出新挑战,相较于传统淹灌模式,非充分灌溉模式通过周期性干湿交替驱动土壤三相结构重组。具体而言,脱水阶段土壤基质势梯度引发孔隙水再分布与气相置换,复水过程中团聚体对自由水的吸持作用产生膨胀应力^[36],促使土壤团聚体崩解-重构动态下有机无机复合体暴露,进而激活根际微域养分释放。该过程通过质流-扩散耦合运输机制提升根土界面养分通量密度,形成根区养分富集效应,促进作物根部吸收土壤养分。控制灌溉可在降水丰沛时期减少灌溉量,可在维持作物生理需水阈值的同时,建立不利于病原菌滋生的根区水分环境,实现作物抗逆性与养分利用协同提升。因此,仅调控灌溉方式对水稻生长和产量的影响有限,而结合一定的有机无机氮配施措施可进一步有效改善水稻土壤养分、生长和产量构成。

合理的水肥协同管理能够显著提高作物对养分的吸收效率,确保水稻在气候变化胁迫下仍能获得充足养分供应。通过调整灌溉制度和施肥策略,可减少氮素流失,提高氮肥利用率^[10]。研究发现,间歇灌溉和减量缓释肥结合能有效抑制非生产性分蘖,优化养分分配,从而促进水稻健康生长^[36]。水肥协同管理通过改善土壤理化性质以及微生物群落结构和多样性,增强土壤保持水分和养分的能力,进而提升土壤养分有效性和健康水平^[28]。气候变化可能导致西南地区极端降雨事件增多或干旱加剧,良好的土壤结构能帮助水稻根系更好地适应这些变化。此外,水肥协同管理通过优化灌溉和施肥策略,最大限度减少水资源消耗,同时保持或提高水稻产量,已成为应对水资源短缺和气候变化影响的关键

策略。研究表明,与连续淹水灌溉相比,交替干湿灌溉能有效节水,同时维持或提高水稻产量^[14]。因此,适度的水肥协同管理通过提高养分利用率、优化土壤结构和提升水分利用效率,构建了一个更具韧性的水稻生产系统,使其能有效应对气候变化挑战,保障粮食生产安全。

4 结 论

- (1)控制灌溉处理(I1、I2、I3)下水稻产量总体由大到小依次为 I3、I2、I1,但均低于 CK 处理,其中 I1 处理减产最多(68 ~ 153 kg/hm²)。且在 SSP5 - 8.5 情景下的 2080s,I3 处理与常规灌溉持平。
- (2)有机肥替代化肥措施对西南地区水稻生产及土壤改良具有正向影响。模型模拟结果表明,在 SSP2 - 4.5 情景下 F1 处理可使水稻增产 91 kg/hm²,F3

处理则导致水稻减产 232 kg/hm²。在 SSP5 - 8.5 情景下 F1 处理可使水稻增产 97 kg/hm²,F3 处理则导致水稻减产 155 kg/hm²。对比历史基准期,仅云南省在 F1、F2 处理产量增加 1.3% ~ 2.9%。土壤有机碳积累呈非线性响应趋势。替代比例 40% 在 SSP2 - 4.5 气候情景最佳,土壤有机碳含量增加 260 kg/hm²,而 SSP5 - 8.5 情景替代比例 60% 最佳,土壤有机碳增加 303 kg/hm²。土壤全氮含量与有机肥替代比例呈正相关,各处理由大到小依次为 F3、F2、F1,F3 处理总氮含量在 SSP2 - 4.5 和 SSP5 - 8.5 情景下,分别增加 772 kg/hm²和 863 kg/hm²。

(3)水肥协同管理对水稻产量与土壤养分具有积极影响。F1I3 处理水稻增产最多,为 35 ~ 186 kg/hm²。水肥耦合分别使土壤有机碳和全氮含量增加 69 ~ 563 kg/hm²和 286 ~ 1 015 kg/hm²。

参 考 文 献

[1] VERSCHUUREN J. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)[M]//Research handbook on climate change mitigation law. Edward Elgar Publishing, 2022: 433 - 456.

[2] 周曙东,周文魁,朱红根,等. 气候变化对农业的影响及应对措施[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2010, 10(1): 34 - 39.
ZHOU Shudong, ZHOU Wenkui, ZHU Honggen, et al. Impact of climate change on agriculture and its countermeasures[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2010, 10(1): 34 - 39. (in Chinese)

[3] HASAN S A. Price hike of staple food, nutritional impact and consumption adjustment: evidence from the 2005 - 2010 rice price increase in rural Bangladesh[J]. Applied Economics, 2019, 51(8): 743 - 761.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2022.

[5] 陈承娟,覃春丽,黎平,等. 不同气候条件下水稻种植的适应性策略[J]. 河北农机, 2024(23): 91 - 93.

[6] HAWKESFORD M J, GRIFFITHS S. Exploiting genetic variation in nitrogen use efficiency for cereal crop improvement[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2019, 49: 35 - 42.

[7] 上官龙生,王婷,梁晨,等. 碳源投入对西南地区土壤有机碳与作物产量的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(3): 605 - 617.
SHANGGUAN Longsheng, WANG Ting, LIANG Chen, et al. Effect of different carbon sources on soil organic carbon and crop yield in southwestern China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(3): 605 - 617. (in Chinese)

[8] 高娅娅. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 新农业, 2021(23): 12 - 13.

[9] 薛菁菁. 化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 河北农业, 2021(10): 67 - 68.

[10] 李茉,薛敏,沙炎,等. 基于 Meta 分析的黑龙江省水稻水土肥资源协同优化调配[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 302 - 311.
LI Mo, XUE Min, SHA Yan, et al. Synergistic and optimal allocation of water, land and fertilizer resources of rice in Heilongjiang Province based on Meta-analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 302 - 311. (in Chinese)

[11] 王月丽,祝海竣,文帅,等. 水肥耦合对水稻产量形成和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(12): 80 - 85.
WANG Yueli, ZHU Haijun, WEN Shuai, et al. Influences of water and fertilizer coupling on rice yield formation and nitrogen fertilizer utilization efficiency[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(12): 80 - 85. (in Chinese)

[12] 杨谦,李京咏,戴林秀,等. 灌溉方式对水稻产量、品质与抗倒性影响的研究进展[J]. 中国稻米, 2023, 29(5): 13 - 16.
YANG Qian, LI Jingyong, DAI Linxiu, et al. Research progress on the effects of irrigation methods on rice yield, quality and lodging resistance[J]. China Rice, 2023, 29(5): 13 - 16. (in Chinese)

[13] 马锐,江敏,薛昌颖,等. 基于适应性调整的豫南地区水稻生产对未来气候变化的响应[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(4): 417 - 430.
MA Rui, JIANG Min, XUE Changying, et al. Response of rice to future climate change based on adaptive adjustment in southern Henan Province[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 30(4): 417 - 430. (in Chinese)

[14] 崔宁博,尹飞虎,龚道枝,等. 西南水稻主产区用水现状与绿色高效灌排技术[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 132 - 141.
CUI Ningbo, YIN Feihu, GONG Daozhi, et al. Water utilization status and suggestions for the development of green and efficient irrigation and drainage technology in the main rice-producing areas of southwest China[J]. Strategic Study of CAE,

2024, 26(2): 132–141. (in Chinese)

[15] 汤广民. 水稻旱作的需水规律与土壤水分调控[J]. 中国农村水利水电, 2001(9): 18–20, 23.
TANG Guangmin. Rules of water demand for rice with dry-farming and soil moisture regulation and control[J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(9): 18–20, 23. (in Chinese)

[16] 孙龙泉, 张德明, 蔡玉珍, 等. 水稻浅湿灌溉的生育表现与节水效应[J]. 杂交水稻, 1990(6): 10–13.

[17] 刘琼峰, 刘锋, 谷雨, 等. 湖南典型水稻土施用有机肥比例对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(1): 165–173.
LIU Qiongfeng, LIU Feng, GU Yu, et al. Effects of organic fertilizer ratio on rice yield and nitrogen uptake and utilization in typical paddy soil in Hunan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(1): 165–173. (in Chinese)

[18] 孙娟, 李浩, 谢丽红, 等. 不同有机肥用量对小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 四川农业科技, 2018(2): 50–52.

[19] LIU J, LIU Z, ZHU A X, et al. Global sensitivity analysis of the APSIM-Oryza rice growth model under different environmental conditions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 953–968.

[20] 薛雨婷, 李谢辉, 贾何佳. 基于 CMIP6 模式的西南地区旱灾风险未来预估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 247–255.
XUE Yuting, LI Xiehui, JIA Hejia. Future projection of drought risk in southwestern China based on CMIP6 model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 247–255. (in Chinese)

[21] 李娜. 气候变化对棉花生长和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
LI Na. Effects of climate change on cotton growth and yield[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[22] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445–456.
ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445–456. (in Chinese)

[23] ASSENG S, KEATING B A, FILLERY I R P, et al. Performance of the APSIM-wheat model in western Australia[J]. Field Crops Research, 1998, 57(2): 163–179.

[24] AZEEZ J O, VAN A W. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5645–5651.

[25] SUN W, HE Z, MA D, et al. Response of soil carbon and nitrogen stocks to irrigation—a global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2024, 957: 177641.

[26] 杨康, 吴坤燕, 孙瑞, 等. 有机肥部分替代化肥对华北小麦-玉米农田氮素损失及氮平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(3): 484–497.
YANG Kang, WU Kunyan, SUN Rui, et al. Effect of partial replacement of mineral fertilizer by manure on nitrogen losses and balance from wheat–maize farmland in North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(3): 484–497. (in Chinese)

[27] 毛伟, 李文西, 赵雨涵, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻产量及土壤理化性质的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(8): 32–36.
MAO Wei, LI Wenxi, ZHAO Yuhan, et al. Effects of organic fertilizer substitute for chemical fertilizer on rice yield and soil physicochemical properties[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(8): 32–36. (in Chinese)

[28] NING L, XU X, ZHANG Y, et al. Effects of chicken manure substitution for mineral nitrogen fertilizer on crop yield and soil fertility in a reduced nitrogen input regime of North-Central China[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1050179.

[29] OMARA P, AULA L, RAUN W R. Nitrogen uptake efficiency and total soil nitrogen accumulation in long-term beef manure and inorganic fertilizer application[J]. International Journal of Agronomy, 2019, 2019(1): 1–6.

[30] 辜祖超. 永春县有机肥替代部分化肥施用对水稻生产及土壤质量的影响[J]. 上海农业科技, 2025(1): 168–170.

[31] FISSOER C, GIARDINA C P, KOLKA R K, et al. Reduced substrate supply limits the temperature response of soil organic carbon decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67: 306–311.

[32] YI Q, CURTRIGHT A J, HORWATH W R, et al. Response of soil nitrogen mineralization to warming temperatures depends on soil management history[J]. Geoderma, 2023, 440: 116716.

[33] RUIZ-VERA U M, DE SOUZA A P, LONG S P, et al. The role of sink strength and nitrogen availability in the down-regulation of photosynthetic capacity in field-grown *Nicotiana tabacum* L. at elevated CO₂ concentration[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 998.

[34] 单雅茹, 田嘉禾, 樊修稳, 等. 中国大陆土壤有机碳组分的空间分布及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2025, 36(3): 847–858.
SHAN Yaru, TIAN Jiahe, FAN Xiuwen, et al. Spatial distribution of soil organic carbon components in mainland of China and their response to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 847–858. (in Chinese)

[35] LIU X, MA Y, MANEVSKI K, et al. Biochar and alternate wetting-drying cycles improving rhizosphere soil nutrients availability and tobacco growth by altering root growth strategy in Ferralsol and Anthrosol[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150513.

[36] DING H. Effects of water-fertilizer synergy management on sustainable rice production: growth, yield, and environmental impacts[J]. Frontiers in Science and Engineering, 2025, 5(4): 99–104.