

网络出版时间:2025-12-15

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20251212.1312.010

未来气候条件下陇中旱地春小麦产量与叶面积指数响应的模拟分析

马蕊,刘强,李广

(甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃兰州 730070)

摘要:为适应未来气候变化及碳排放升高,优化陇中地区旱地春小麦的生产管理策略,基于甘肃定西2014—2017年田间试验数据,对根区水质模型 RZWQM2(root zone water quality model 2)进行率定并验证了其在该地区应用的有效性,并基于未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下的 2025—2060 年的逐日气候数据,通过设置 3 种播期和不同 CO₂ 浓度梯度(370、400、500 和 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),评估了未来气候变化对春小麦产量及叶面积指数(LAI)的影响。结果表明,该模型对该地区春小麦的产量及 LAI 实现高精度模拟, R^2 值分别达到 0.913、0.992。在 RCP4.5 适度升温的情景下, $\geq 500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的 CO₂ 浓度能显著提高春小麦产量,早播(3月7日)、常规播(3月19日)和晚播(3月31日)的平均产量增幅分别为 29.3%、28.9%和 24.7%;RCP8.5 情景下,高温、辐射下降与降水波动削弱了 CO₂ 肥效,春小麦增产幅度降至 20.9%~27.5%,且年际波动显著增大;播期效应显著,早播在两种情景下均能维持最高且稳定的产量与 LAI,而晚播小麦的产量受高温与干旱叠加影响,波动最大。因此,在未来较高 CO₂ 浓度下,通过适期早播与水肥协同可降低高温与水分胁迫风险,提高陇中旱地春小麦产量和 LAI。

关键词:RZWQM2;春小麦;气候情景;产量;LAI;播期调控

中图分类号:S512.1;S314

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)04-0511-09

Simulation Analysis of Rainfed Spring Wheat Yield and Leaf Area Index Responses to Future Climate Conditions in Longzhong Dryland

MA Rui, LIU Qiang, LI Guang

(College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To adapt to the future climate change and increased carbon emissions in the Longzhong region, this study proposes optimization strategies for the production management of rain-fed spring wheat. Based on field experimental data from Dingxi, Gansu, collected from 2014 to 2017, the Root Zone Water Quality Model 2(RZWQM2) was calibrated and validated for this region. Using this model, climate projections under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the period 2025–2060 in North-west China were analyzed. Different sowing dates and CO₂ concentration gradients(370, 400, 500 and 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) were applied to evaluate the impact of future climate change on spring wheat yield and LAI. The results show that, The model accurately simulated the leaf area index(LAI) and yield of spring wheat, with R^2 values reaching 0.913 and 0.992, respectively. Under the RCP4.5 scenario with moderate warming, when CO₂ concentration exceeds 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, significant yield increases were observed. The average yield increases for early sowing (March 7), conventional sowing

收稿日期:2025-07-18

修回日期:2025-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32360438);甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09);甘肃省重点研究发展计划项目(22YF7FA116)

第一作者 E-mail:3247365074@qq.com(马蕊)

通讯作者 E-mail:liuq@gsau.edu.cn(刘强)

(March 19), and late sowing(March 31) were 29.3%, 28.9%, and 24.7%, respectively. Under the RCP8.5 scenario, high temperatures, reduced radiation, and precipitation fluctuations weakened the CO₂ fertilization effect, resulting in a yield increase of only 20.9%–27.5%, with significant interannual variability. The sowing date effect was also prominent, with early sowing maintaining the highest and most stable yield and LAI in both climate scenarios, while late sowing, impacted by combined heat and drought stress, showed the highest yield fluctuation. In conclusion, under the future higher CO₂ concentrations, through coordinating reasonable early sowing and water and fertilizer management the risks of high temperature and water stress can be alleviated to increase the LAI and yield of spring wheat in Longzhong dryland.

Keywords: RZWQM2; Spring wheat; Climate scenarios; Yield; LAI; Sowing date regulation

全球气候变化与大气 CO₂ 浓度持续升高对甘肃陇中等地区生态脆弱的旱地农业生产构成了严峻挑战。作为该区域的核心粮食作物,春小麦的生产稳定性高度依赖气候条件,对未来气候变化尤为敏感^[1-2]。尽管 CO₂ 浓度升高可通过“施肥效应”在一定程度上促进作物光合作用,但其增产效益常被同期发生的升温、降水格局改变、辐射变化等不利因素所削弱甚至抵消,导致作物生育期缩短与产量波动加剧^[3-6]。因此,定量评估未来多重气候因素与管理措施的交互作用,对保障区域粮食安全至关重要。

作物生长模型是评估气候变化影响、优化农业管理策略的有效工具^[7-8]。其中,根区水质模型(RZWQM2)作为一个集成了作物-水-氮耦合过程的机制模型,在模拟 CO₂ 浓度、水分胁迫及田间管理对作物生长动态的复杂响应方面,相较于 APSIM 等模型表现出较高的准确性与一致性,尤其在模拟土壤水氮运移及多因子交互效应方面优势显著^[9-13]。这使其成为精准评估陇中旱地春小麦系统适应性的理想工具。

然而,当前的研究多未能将未来气候情景、

CO₂ 浓度梯度与精细化播期调控进行系统性整合评估,尤其在揭示三者协同作用对春小麦产量及叶面积指数(LAI)动态影响的机制上仍存在空白。鉴于此,本研究率定并验证了 RZWQM2 模型在陇中旱地的适用性,并基于未来 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景,结合 CO₂ 浓度梯度与播期设置,量化模拟春小麦产量与 LAI 的响应特征,同时探究不同播期策略的适应性与稳定性差异,以期制定未来气候条件下陇中及相近生态区旱地春小麦的可持续生产管理策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

本试验于 2014–2017 年在甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村(104°38'E,35°35'N,海拔约 2 000 m)进行。该区属中温带干旱至半干旱气候区,年均气温约 6.4 ℃,年降水量约 380 mm,年日照时数超过 2 400 h,无霜期约 140 d。土壤为黄绵土,耕层土壤质地为壤土,有机质及养分含量中等。各层土壤理化性质见表 1。

表 1 0~40 cm 土壤属性特征
Table 1 Soil properties of 0–40 cm soil layers

土层深度 Soil depth/cm	物理参数 Physical parameter					土壤颗粒 Particle of soil/%		
	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	Ks/ (cm·h ⁻¹)	初始硝态氮量 Initial nitrate nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	初始铵态氮量 Initial ammonium nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	pH	砂粒 Sand	壤粒 Silt	粘粒 Clay
0~10	1.30	1.29	17.15	5.75	8.3	50.39	34.51	15.10
10~20	1.26	1.30	23.10	5.10	8.4	49.91	35.06	15.03
20~40	1.23	1.31	19.85	5.00	8.3	47.17	36.56	15.27

Ks: 土壤饱和导水率。
Ks: Saturated hydraulic conductivity.

1.2 试验设计与数据采集

田间试验采用随机区组设计,设置早播(ESW,3月7日)、常规播(NSW,3月19日)和晚播(LSW,3月31日)3种播期处理,每个处理3次重复,小区面积为 24 m^2 ($6\text{ m}\times 4\text{ m}$),小区间距 1 m 。供试春小麦品种为定西35号,人工条播,播量 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播深 7 cm ,行距 25 cm 。播前一次性施入纯氮 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 P_2O_5 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,整地方式为当地传统“二耕两耱”^[14]。在出苗至成熟的不同阶段观察记录春小麦物候期和LAI,出苗后调查基本苗数,成熟期收获测产,并同步测定各时期土壤容重、含水量、饱和导水率、氮素等理化性质,所有数据均按统一规范测定^[15],为模型的率定与验证提供支持。

1.3 气象数据与模拟情景设定

历史气象数据(2004—2017年)来自甘肃农业大学定西试验区自动气象站,并以NASA POWER全球气象数据库补充缺失值。该数据集包含最高气温、最低气温、降水量、蒸发量、太阳总辐射、风速、相对湿度等关键气候指标。其中,2004—2013年气象数据被用于RZWQM2模型的预热,通过模拟长达10年的历史天气条件,土壤碳氮库达到平衡状态,以该平衡状态作为模型的初始参数,为后续研究提供准确的起始条件。

未来气候预测数据(2025—2060年)来源于国家青藏高原科学数据中心。该数据基于Had-GEM2-ES全球气候模式并通过RegCM4.6区域模型降尺度处理,空间分辨率为 0.25° ,时间步长为日尺度,涵盖了RCP4.5和RCP8.5两种排放情景,并在输入模型前进行了偏差订正。与历史基准期(2014—2016年)相比,未来春小麦生长季普遍呈现升温 and 降水波动增强的趋势。在RCP4.5情景下,气温升高,热量资源增加,高温事件频次增多;降水总量增加且波动剧烈,伴随着间歇性干旱和强降水;太阳辐射相对平稳,但后期略有下降。在RCP8.5情景下,气候变化更为剧烈,气温升幅更大,高温事件的频次和强度显著增强;暴雨与干旱交替出现,水分供应稳定性下降;太阳辐射持续下滑,模拟末期明显低于历史水平,可能对作物灌浆和干物质积累产生抑制作用。

基于以上数据,本研究构建了未来气候情景下的模拟方案,结合了两种气候路径、4种 CO_2 浓度(370 、 400 、 500 和 $600\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)和3种播期(早播、常规播和晚播),用于评估春小麦产量

与LAI的响应。

1.4 模型简介与参数率定

1.4.1 RZWQM2模型概述

本研究采用美国农业部农业研究局(USDA-ARS)开发的根区水质模型第二代(RZWQM2)^[16]。该模型是一个一维、机制驱动型的农业系统模型,能够动态模拟土壤-作物-大气系统中水分、热量、氮素等物质的迁移转化过程^[17]。RZWQM2集成了作物生长、灌溉、施肥、耕作管理等多个模块,其中作物生育过程基于DSSAT4.0中的CERES-Wheat子模块,可模拟物候进程、生物量积累、产量形成等关键环节^[18-19]。土壤水文过程则采用Brooks-Corey方程、修正Green-Ampt方程及Richards方程进行计算。此外,此模型通过与PEST参数估计工具耦合,实现了自动率定,从而提升了模型在特定区域气候和土壤条件下的本地化适应性与模拟精度^[20-21]。

1.4.2 模型率定与验证

本研究基于2014—2017年田间观测数据对RZWQM2模型进行率定与验证。其中,模型率定采用2014—2016年NSW和2016年的ESW和LSW处理的春小麦产量和NSW的LAI观测数据;模型验证则使用2017年的独立数据。尽管率定数据未能涵盖所有播期与年份的组合,但现有数据足以对模型性能进行可靠评估。模型初始参数参考研究区土壤调查与文献资料设定^[22-24],并通过试错法与PEST工具优化了土壤水分、水氮循环、作物生长等关键模块参数,最终获得了与供试品种定西35号生育特性相匹配的遗传参数,具体参数设置见表2,土壤氮素模块相关参数见表3。

为量化模型模拟精度,选用均方根误差(RMSE)、标准化均方根误差(NRMSE)、平均相对误差(MRE)和决定系数(R^2)对模拟结果进行评价:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{O_{\text{AVG}}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2]^{0.5}} \quad (4)$$

式中, P_i 和 O_i 分别表示第*i*个模拟值和实测

表 2 春小麦遗传特性参数率定结果

Table 2 Genetic characteristic parameter calibration results of spring wheat

参数 Parameter	描述 Description	取值范围 Value range	初始值 Initial value	率定值 Calibrated value
P1V/d	最适温度条件下通过春化阶段所需天数 Vernalization period	0~9	6.02	6.07
P1D/%	光周期参数 Photoperiod parameter	220~270	264.70	250.80
P5/(℃·d)	籽粒灌浆期积温 Accumulated temperature during grain filling	430~700	526.10	540.00
G1/(grains·g ⁻¹)	开花期单位株冠质量籽粒数 Grains per unit canopy mass at flowering	15~30	23.12	23.66
G2/mg	最佳条件下标准籽粒质量 Standard grain mass	20~60	52.76	55.02
G3/g	成熟期非胁迫单株茎穗干质量 Non-stressed stem and spike dry mass at maturity	1.0~3.0	2.96	1.94
PHINT/(℃·d)	完成一片叶生长所需积温 Accumulated temperature for the first leaf appearance	60~100	87.27	95.94

表 3 氮素转化参数率定结果

Table 3 Calibration results of nitrogen transformation parameters

参数 Parameter	优化范围 Optimization range	初始值 Initial value	优化结果 Optimized result
氨挥发常数 Ammonia volatilization constant	1 000~4 000	1 000	1 008.01
硝化系数 Nitrification coefficient	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	1.001 596×10 ⁻⁹
反硝化系数 Denitrification coefficient	10 ⁻¹⁴ ~10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	1.000 08×10 ⁻¹³
尿素水解系数 Urea hydrolysis coefficient	2.5×10 ⁻⁵ ~2.5×10 ⁻³	2.5×10 ⁻⁴	2.509 424×10 ⁻⁴

值, $\overline{P}$ 和 $\overline{O}$ 为对应变量的均值, N 为样本数。通过以上指标可综合衡量模型对春小麦产量、生育期与 LAI 等变量的模拟精度, 为后续情景模拟与适应性评估提供可靠依据。

2 结果与分析

2.1 RZWQM2 模型对春小麦产量和 LAI 的模拟效果

RZWQM2 模型对春小麦产量具有较高的模拟精度(表 4 和图 1)。在利用 2014—2016 年田间数据率定时, 模型对春小麦产量拟合性良好, 决定系数 R^2 为 0.899, RMSE 为 64.54 kg·hm⁻², NRMSE 和 MRE 分别为 3.90% 和 3.37%。利用 2017 年田间数据进行验证, 模型 R^2 为 0.913,

RMSE 为 82.96 kg·hm⁻², NRMSE 和 MRE 分别为 6.40% 和 6.42%, 说明率定后模型的误差略增, 但其对独立数据的预测能力稳定, 在预测未来情景时具备较强的泛化能力。

在率定过程中, LAI 的模拟结果呈典型“双峰”趋势, 与观测结果高度一致, R^2 为 0.963, RMSE 为 0.086, NRMSE 和 MSE 分别为 10.69% 和 5.20%(表 4 和图 1), 表明模型对春小麦 LAI 的拟合精度高。通过历史数据验证, 模型的 R^2 高达 0.992, RMSE、NRMSE 和 MSE 均下降, 显示出模型对 LAI 的预测能力较高和稳定。

综上, RZWQM2 在陇中旱地春小麦产量与 LAI 模拟中表现稳定、精度较高, 具备开展未来情景模拟与管理优化的应用潜力。

表 4 RZWQM2 对春小麦产量和 LAI 的模拟精度

Table 4 Simulation accuracy for yield and LAI of spring wheat through RZWQM2

变量 Variable	阶段 Phase	RMSE	NRMSE/%	MRE/%	R^2
产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	率定 Calibration	64.54	3.90	3.37	0.899
	验证 Validation	82.96	6.40	6.42	0.913
LAI	率定 Calibration	0.086	10.69	5.20	0.963
	验证 Validation	0.024	4.34	4.57	0.992

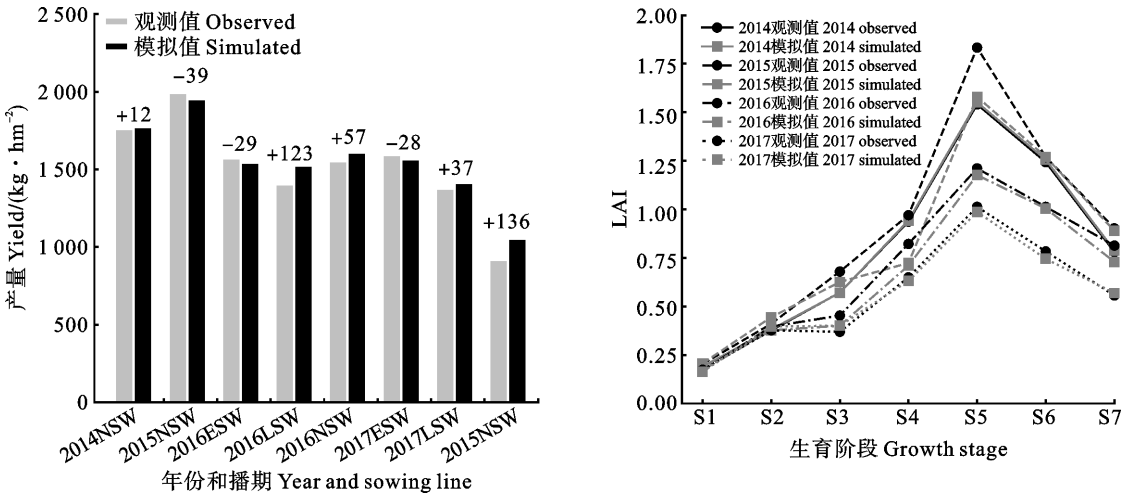


图 1 RZWQM2 模型对春小麦产量和 LAI 模拟效果

Fig. 1 Simulated results of RZWQM2 for yield and LAI of spring wheat

S1~S7 分别表示出苗—分蘖、分蘖—拔节、拔节—孕穗、孕穗—抽穗、抽穗—开花、开花—灌浆、灌浆—成熟。

S1—S7 represent the growth stages of emergence—tillering, tillering—jointing, jointing—booting, booting—heading, heading—flowering, flowering—filling, and filling—maturity, respectively.

2.2 春小麦产量和 LAI 对气候情景、CO₂ 浓度及播期的响应特征

2.2.1 产量的响应特征

春小麦产量对气候情景、播期和 CO₂ 浓度变化均表现出明显的敏感性,且 3 个因素间对产量具有明显交互效应(图 2)。在 RCP4.5 情景下,适度升温 and CO₂ 浓度升高显著促进春小麦产量提升,ESW、NSW、LSW 下春小麦分别增产 29.3%、28.9% 和 24.7%。其中,ESW 下春小麦均稳定增产;LSW 下高浓度 CO₂ (600 μmol·mol⁻¹) 的增产幅度较大,但低浓度的增产效果不明显,且波动性最大。在 RCP8.5 情景下,高温、辐射下降、降水不稳等多重胁迫削弱了 CO₂ 增产效应,产量年际波动加剧。ESW、NSW 和 LSW 下分别增产 27.5%、25.8% 和 20.9%,增产幅度整体低于 RCP4.5 情景,2050 年后增产趋势减缓甚至下降,LSW 的增幅在 600 μmol·mol⁻¹CO₂ 浓度下仍为 20.9%,且产量极差和标准差均最高。

综上,ESW 在两种气候情景下均表现出最高且最稳定的产量增幅,春小麦对 CO₂ 浓度响应均衡;NSW 次之,春小麦稳产性较好;LSW 虽对高浓度 CO₂ 有一定响应,但受环境胁迫影响大、产量波动剧烈,春小麦种植风险最高。

2.2.2 最大叶面积指数的响应特征

最大叶面积指数(LAI-max)对未来气候情景、CO₂ 浓度变化及播期反应显著(图 3)。在 RCP4.5 情景中,3 种播期的 LAI-max 整体较稳定,CO₂

浓度升高普遍促进其上升,在 ≥500 μmol·mol⁻¹ 时最显著,ESW 和 NSW 下对 CO₂ 浓度升高响应最明显。其中,ESW 峰值最高,年际波动最小。在 RCP8.5 下,LAI-max 呈“早冲高、早衰退”特征。2025—2045 年高 CO₂ 浓度的 LAI-max 初期略增,2050 年后明显下降。播期间的 LAI-max 差异显著,LSW 下峰值最低,出现最早,持续时间最短;ESW 下在多数年份维持相对较高且稳定的 LAI-max。

总体来看,CO₂ 浓度升高在两气候情景均能提前并延长 LAI 高值期,但增益在 RCP 8.5 中明显减弱。LAI-max 趋势与产量变化高度一致。RCP 4.5 中稳定而较高的 LAI-max 有助于春小麦增产,而 RCP 8.5 尤其 LSW 的峰值降低与波动增强,则不利于春小麦高产和稳产。

3 讨论

RZWQM2 模型在模拟土壤水分-氮素耦合过程方面具有优势^[25-28],并用于未来气候-作物响应评估。为探究未来气候变化与碳排放升高背景下陇中旱地春小麦的管理策略,本研究基于田间实测数据来率定并验证 RZWQM2 模型。结果表明,该模型能以较高精度模拟春小麦产量(R²=0.913, RMSE=82.96 kg·hm⁻²)与 LAI(R²=0.992, RMSE=0.024)。在 RCP4.5 情景下,适度增温叠加 500~600 μmol·mol⁻¹ CO₂ 显著增强 CO₂ 施肥效应,3 种播期下增产 24.7%~29.3%,

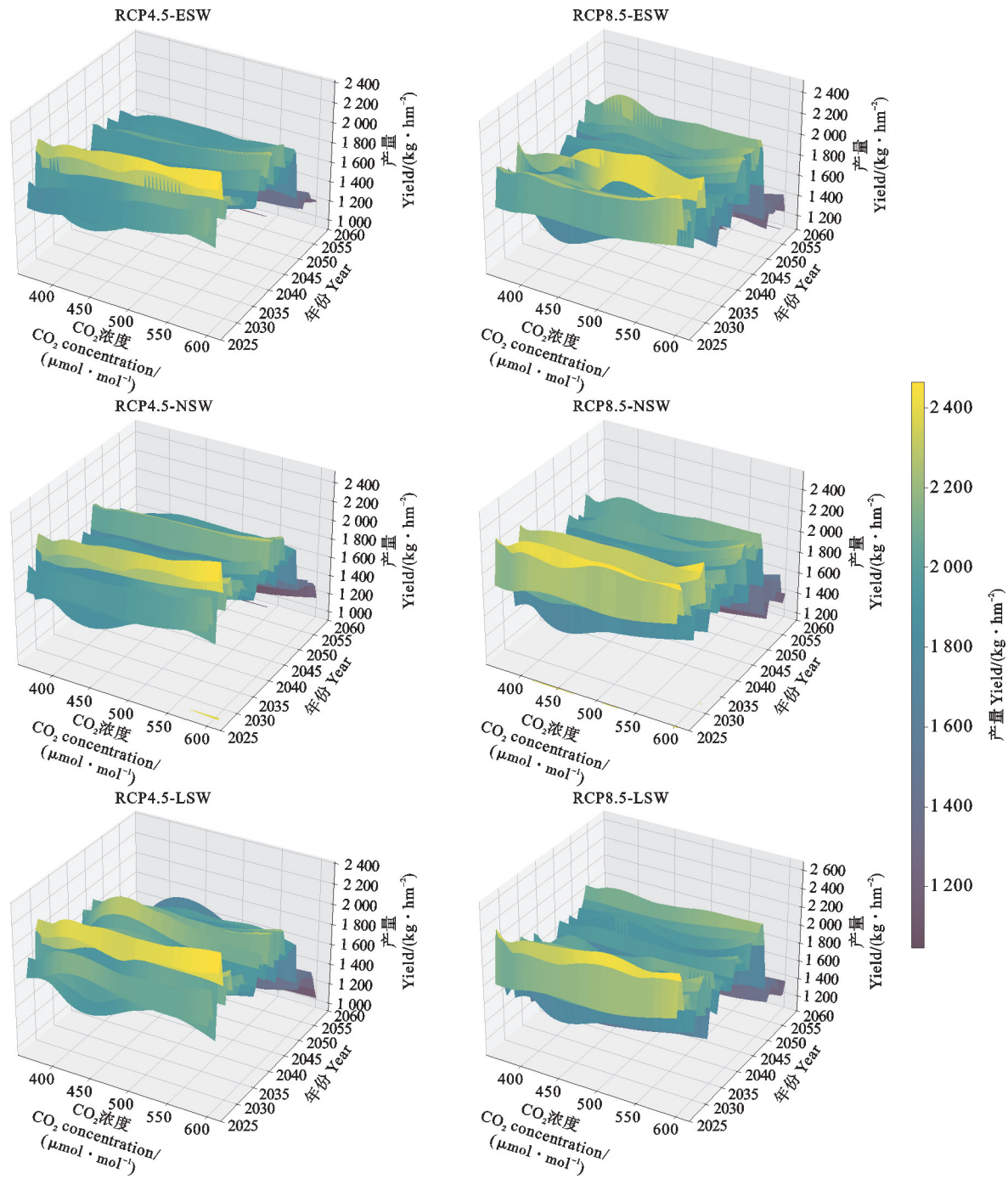


图 2 不同 RCP 情景和 CO₂ 浓度下春小麦产量的三维热力图

Fig. 2 3D heatmap of simulated spring wheat yield under different RCP scenarios and CO₂ concentrations

主要得益于 CO₂ 施肥效应增强光合作用,促进 LAI 增长与灌浆期干物质积累,这与高雪慧等^[26]基于 APSIM 的模拟结果一致,证实 CO₂ 升高在温和气候背景下具有积极的增产潜力。RCP8.5 情景下高温频发、降水波动、辐射下降等显著削弱 CO₂ 增产效应,3 种播期下增产幅度降至 20.9%~27.5%,且年际波动性明显加大,LSW 下表现最明显。高温和低辐射使 LAI 峰值提前且下降,缩

短高效光合期,抑制了干物质积累,进而影响产量,这与杨阳等^[29]和 Wang 等^[30]基于 CMIP6 情景对西北地区作物响应的预估相符。

播期优化是未来气候条件下春小麦栽培最直接的适应措施。ESW 在两个气候情景下均保持最高且最稳定的 LAI 和产量,可将灌浆期与极端高温错峰,显著降低不利影响^[31-32]。相比之下,LSW 在两个气候情景下均因春小麦生育阶段与

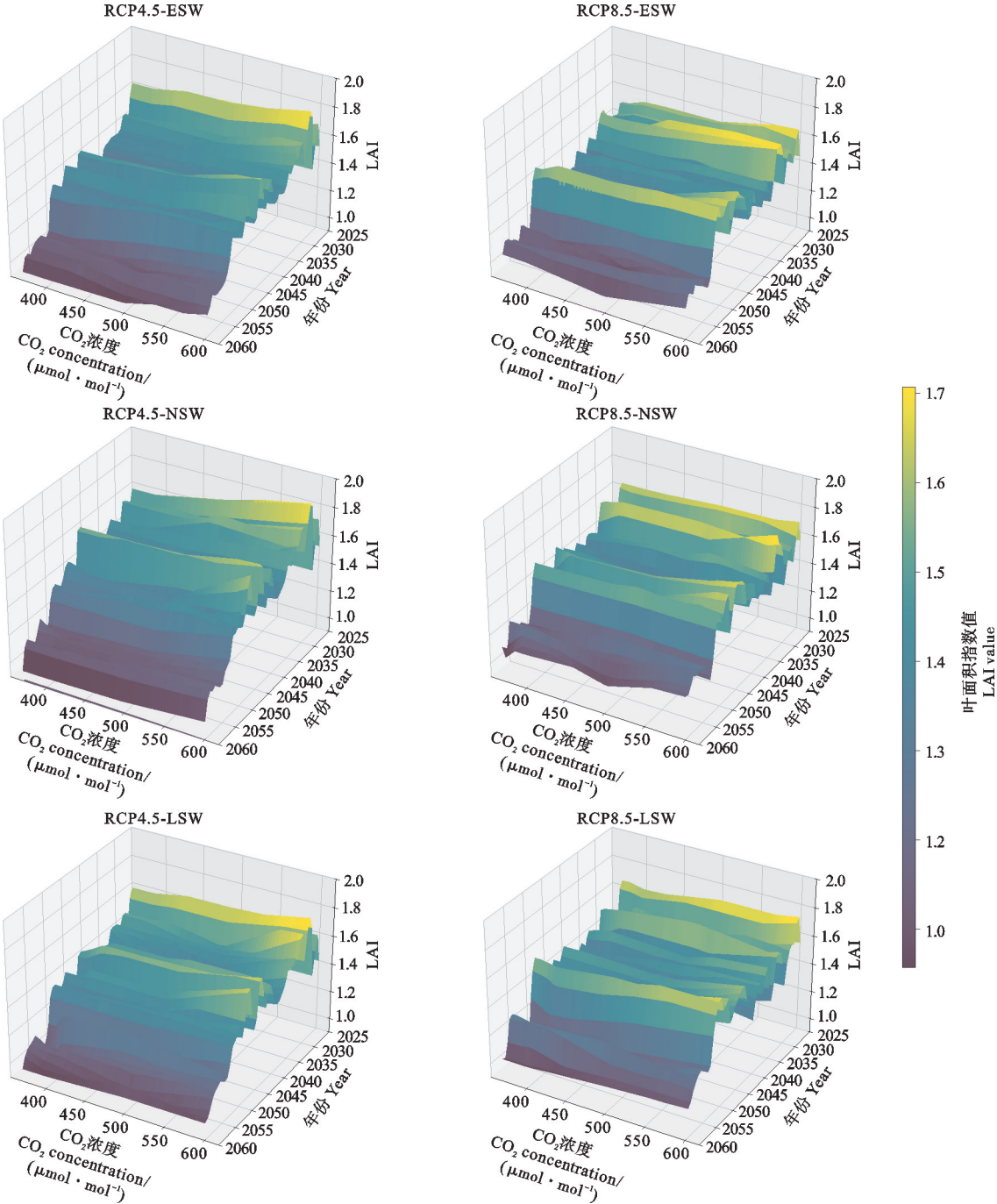


图 3 不同 RCP 情景和 CO₂ 浓度下春小麦 LAI 变化趋势

Fig. 3 Trends in spring wheat LAI under different RCP scenarios and CO₂ concentrations

高温干旱重叠而导致产量波动最大,这一现象已被 Rezaie 等^[33] 的模拟研究所证实。尽管本研究的田间试验并未设置水肥协同处理,但模型模拟结果揭示了关键机制:未来生产的首要瓶颈是水分胁迫,拔节—孕穗和灌浆阶段的水分可利用性被确定为核心限制因子。在 RCP8.5 情景下降水不稳、干旱频发,LSW 正遇需水高峰,CO₂ 增产潜力难以发挥。这表明,在播期调控之外,亟需结合

其他管理措施以缓解水分胁迫。

综合本研究模拟结果与现有研究进展,“适期早播+水肥协同”策略是应对未来高温与水分胁迫的关键路径。已有多项研究证实,在干旱半干旱地区,合理的水肥协同管理能够有效提高水分利用效率,缓解作物因水肥不匹配导致的胁迫,进而稳定或提高产量^[34-35]。特别是在未来降水波动加剧的背景下,优化施氮量并结合降水预报,能显

著提高氮素利用效率^[16]。因此,在未来陇中旱地,合理提前播期并调控水肥,是保障春小麦生产可持续性的重要策略。

本研究虽利用 RZWQM2 模型量化了未来气候变化、CO₂ 浓度与播期对陇中旱地春小麦产量和 LAI 的综合影响并提出适应策略,但仍存在局限性:模型参数通用性受限于本地化数据,未来需增补多年份和管理措施试验数据进行调优以提高普适性;本研究主要关注 CO₂ 与播期,对其他农业管理措施与气候变化的交互作用探讨不足,未来可整合这些因素以构建更全面的适应方案;模型对极端气候事件的精细化响应能力有待提高,未来可耦合更高分辨率气候模型或集成更精细生物物理模块;此外,本研究侧重生理生态响应,未来研究应结合经济效益评估和区域推广可行性分析,以提供更具实践指导意义的决策支持。

4 结论

本研究利用田间实测数据对 RZWQM2 模型进行率定与验证,证实了该模型在陇中旱地春小麦产量与叶面积指数(LAI)模拟中的高精度与良好适应性, R^2 值分别达到 0.913 和 0.991。在 RCP4.5 情景下,适度升温与高 CO₂ 浓度能显著提高春小麦产量,增幅 24.7%~29.3%;而在 RCP8.5 情景下,极端高温、辐射下降与降水波动则削弱了 CO₂ 增产效应,增幅降至 20.9%~27.5%,且产量年际波动较大。早播在两种情景下均能维持最高且最稳定的 LAI 与产量,而晚播则因与高温干旱叠加而产量波动最大。因此,为有效应对未来气候不确定性,本研究推荐实施“适期早播+水肥协同”策略,通过错峰高温期并优化水肥措施缓解水热不匹配与高温胁迫风险,以稳定并提升产量,增强陇中地区春小麦生产的可持续性。

参考文献:

[1] LEGG S. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis [J]. *Interaction*, 2021, 49(4): 44.
[2] 居辉,袁佳双,张馨月,等. IPCC AR6 粮食系统的影响与适应的新认知和新趋势 [J]. *大气科学学报*, 2022, 45(4): 481.
JU H, YUAN J S, ZHANG X Y, *et al.* New perceptions and trends in impacts and adaptations of food systems in IPCC AR6 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(4): 481.
[3] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980 [J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616.

[4] CALVIN K, DASGUPTA D, KRINNER G, *et al.* IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
[5] CHANG Z J, HAO L H, LI F, *et al.* Mechanisms behind the declining CO₂ fertilization effects on plant growth and grain yield in soybean (*Glycine max*) [J]. *Plant Physiology*, 2025, 198(4): k1af279.
[6] LI F, GUO D G, GAO X D, *et al.* Water deficit modulates the CO₂ fertilization effect on plant gas exchange and leaf-level water use efficiency: A meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 775477.
[7] BOOTE K J, JONES J W, HOOGENBOOM G. Simulation of crop growth: CROPGRO model [M]// *Agricultural Systems modeling and Simulation*. Boca Raton: CRC Press, 2018: 651.
[8] 朱艳,汤亮,刘蕾蕾,等.作物生长模型(CropGrow)研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3235.
ZHU Y, TANG L, LIU L L, *et al.* Research progress on the crop growth model CropGrow [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16): 3235.
[9] DING J L, HU W, WU J C, *et al.* Simulating the effects of conventional versus conservation tillage on soil water, nitrogen dynamics, and yield of winter wheat with RZWQM2 [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105956.
[10] CHEN X P, DONG H B, FENG S Y, *et al.* RZWQM2 simulated irrigation strategies to mitigate climate change impacts on cotton production in hyper-arid areas [J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2529.
[11] GEORGE N A, DE JESUS PEDRO CUAMBA H, LUNDY M E, *et al.* Evaluating the Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) wheat module for California [J]. *Crop & Pasture Science*, 2024, 75(3): CP23046.
[12] SINGH S, NEGM L, JEONG H, *et al.* Comparison of simulated nitrogen management strategies using DRAINMODSSAT and RZWQM2 [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 266: 107597.
[13] VERBURG K, PASLEY H R, BIGGS J S, *et al.* Review of APSIM's soil nitrogen modelling capability for agricultural systems analyses [J]. *Agricultural Systems*, 2025, 224: 104213.
[14] 罗珠珠,蔡立群,李玲玲,等.长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3): 173.
LUO Z Z, CAI L Q, LI L L, *et al.* Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 173.
[15] 聂志刚. 气候变化下耕作措施对旱地春小麦产量形成的调控 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
NIE Z G. Regulation of tillage measure on yield formation of

- dryland spring wheat under climate change [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
- [16] DING D Y, YANG Z J, WU L H, *et al.* Optimizing nitrogen-fertilizer management by using RZWQM2 with consideration of precipitation can enhance nitrogen utilization on the Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 299: 108890.
- [17] MA L, AHUJA L R, NOLAN B T, *et al.* Root zone water quality model (RZWQM2): Model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1425.
- [18] AHUJA L, ROJAS K, HANSON J D. Root zone water quality model: Modelling management effects on water quality and crop production [M]. Colorado: Water Resources Publication, 2000.
- [19] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, *et al.* The DSSAT cropping system model [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3-4): 235.
- [20] DOHERTY J. PEST model-independent parameter estimation user manual [J]. *Watermark Numerical Computing*, Brisbane, Australia, 2004, 3338: 3349.
- [21] MA H J, MALONE R W, JIANG T C, *et al.* Estimating crop genetic parameters for DSSAT with modified PEST software [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 115: 126017.
- [22] 王海燕. 陇中黄土丘陵区不同耕作措施对春小麦土壤水分利用效率的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- WANG H Y. Effect of different tillage measures on soil water use efficiency of spring wheat in Longzhong Loess Hilly Area [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [23] 高美荣, 张耀南, 康建芳. 基于全国第二次土壤普查的甘肃土种志数据集 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2022, 7(4): 180.
- GAO M R, ZHANG Y N, KANG J F. A dataset of Gansu soil species based on the Second National Soil Survey [J]. *China Scientific Data*, 2022, 7(4): 180.
- [24] 张康. 陇中旱作春小麦产量形成参数敏感性分析研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- ZHANG K. Sensitivity analysis of spring wheat yield formation parameters in dry farming in Longzhong [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [25] CHENG H M, YU Q L, ABDALHI M A M, *et al.* RZWQM2 simulated drip fertigation management to improve water and nitrogen use efficiency of maize in a solar greenhouse [J]. *Agriculture*, 2022, 12(5): 672.
- [26] 高雪慧, 刘强, 王钧. 基于 APSIM 模型的旱地春小麦产量对大气 CO₂ 浓度和氮肥水平的响应 [J]. 作物研究, 2021, 35(5): 544.
- GAO X H, LIU Q, WANG J. Response of spring wheat yield in dryland to CO₂ concentration and nitrogen fertilizer level based on APSIM model [J]. *Crop Research*, 2021, 35(5): 544.
- [27] 王志刚, 刘强, 王谨, 等. 未来气象条件下旱地春小麦产量及生物量对施氮量和播期变化的响应模拟 [J]. 作物杂志, 2025(4): 276.
- WANG Z G, LIU Q, WANG J, *et al.* Simulation analysis of response of spring wheat yield and biomass to nitrogen application and sowing date in dryland under future meteorological conditions [J]. *Crops*, 2025(4): 276.
- [28] 刘强, 高雪慧, 王钧. 不同降水年型下大气 CO₂ 浓度和温度对旱地春小麦产量的响应模拟 [J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 230.
- LIU Q, GAO X H, WANG J. Response simulation of CO₂ concentration and temperature on spring wheat yield in dryland under different precipitation types [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 230.
- [29] 杨阳, 申双和, 王润元, 等. 干旱胁迫对半干旱雨养区春小麦生长发育及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 82.
- YANG Y, SHEN S H, WANG R Y, *et al.* Effects of drought stress on growth and yield of spring wheat in semi-arid rain-fed region [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 82.
- [30] WANG Q, ZHAI P M. CMIP6 projections of the “warming-wetting” trend in northwest China and related extreme events based on observational constraints [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2022, 36(2): 239.
- [31] LIU F S, CHEN Y, BAI N N, *et al.* Divergent climate feedbacks on winter wheat growing and dormancy periods as affected by sowing date in the North China Plain [J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(7): 2275.
- [32] 高雪慧, 刘强, 王钧. 基于 APSIM 模型播期对未来气候变化情景下旱地春小麦产量和生育期影响的模拟分析 [J]. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 739.
- GAO X H, LIU Q, WANG J. Simulation of sowing dates influencing on yield and growth period of spring wheat in dryland under future climate change scenarios based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(6): 739.
- [33] REZAIE B, HOSSEINPANAHI F, SIOSEMARDEH A, *et al.* Shifting the sowing date of winter wheat as a strategy for adaptation to climate change in a Mediterranean-type environment [J]. *International Journal of Plant Production*, 2022, 16(4): 595.
- [34] ZHANG X D, LI Z M, SIDDIQUE K H M, *et al.* Increasing maize production and preventing water deficits in semi-arid areas: A study matching fertilization with regional precipitation under mulch planting [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106347.
- [35] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米水肥利用和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 449.
- WANG H L, ZHANG X C, YU X F, *et al.* Effects of optimal nitrogen fertilizer management on water and fertilizer utilization efficiency and yield under the double-ridge-furrow sowing with the whole plastic film mulching in maize in a semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 449.