

# 基于 APSIM 模型的未来气候变化对干旱区雨养春小麦 播期和种植密度的影响

郝冠宇, 刘 强, 王 钧

(甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730000)

✉ 2564859598@qq.com; liuq@gsau.edu.cn; julianwong82@163.com



**摘 要:**气候变化评估对智慧农业的影响至关重要。通过 2010—2017 年实测陇中地区小麦田间数据对 APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) 模型进行参数校正和验证, 结合 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) 模式的未来气候情景数据和验证后的 APSIM 模型对播期和种植密度变化下的小麦产量及生物量进行模拟。结果表明, APSIM 模型在调参验证后, 模拟精度较高; 在气候变化情景下, 增加种植密度处理春小麦产量和生物量较高, 提前播种处理春小麦产量和生物量较高; 增加种植密度且早播处理有利于产量形成。未来气候变化情景下, 播种密度为  $237 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、播种日期为 3 月 10 日时, 可提高 4% 的春小麦籽粒产量。模拟结果可为未来气候变化下的甘肃陇中旱区雨养小麦播期及种植密度管理提供借鉴。

**关键词:**气候变化; CMIP5; APSIM-wheat; 播种密度

**中图分类号:** TP391.7 **文献标志码:** A

## Impact of Future Climate Change on the Sowing Date and Planting Density of Rain-fed Spring Wheat in Arid Area Based on APSIM Model

HAO Guanyu, LIU Qiang, WANG Jun

(College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China)

✉ 2564859598@qq.com; liuq@gsau.edu.cn; julianwong82@163.com

**Abstract:** Assessing the impact of climate change on smart agriculture is crucial. In this paper, the parameters of APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) model are calibrated and verified by wheat field data from 2010 to 2017 in Longzhong region. The future climate scenario data of the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) model and the validated APSIM model are used to simulate wheat yield and biomass under changes in sowing date and planting density. The results show that the APSIM model has higher simulation accuracy after parameter adjustment and verification. In the context of climate change, increasing planting density results in higher spring wheat yield and biomass, and early sowing results in higher spring wheat yield and biomass. Increasing planting density and early sowing treatment are beneficial for generating yield. In the context of future climate change, the spring wheat grain yield is expected to increase by 4% when the sowing density is  $237 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the sowing date is March 10. The simulation results can provide reference for the management of sowing date and planting density of rain-fed wheat in the arid area of central Gansu under future climate change.

**Key words:** climate change; CMIP5; APSIM-wheat; sowing density

### 0 引言 (Introduction)

气候变化对许多地区维持和提高作物产量的努力构成挑

战<sup>[1-3]</sup>。西北陇中地区作为典型的雨养区, 研究未来气候变化对其农业生产的影响至关重要<sup>[4-5]</sup>。已有研究表明, 气候和降

水对干旱地区特别是西北陇中地区春小麦产量的影响显著<sup>[6-8]</sup>。目前,针对西北陇中地区春小麦生长的研究多以田间试验为主,可控性差,精度不够<sup>[9-10]</sup>。

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator)主要用于田间尺度的农田作物建模,能够实现气候对作物影响的模拟<sup>[11-13]</sup>。XIAO等<sup>[14]</sup>基于 APSIM 对未来气候中 CO<sub>2</sub> 对农作物产量的影响进行研究,但其未考虑干旱条件。聂志刚等<sup>[15]</sup>利用算法优化基于 APSIM 的旱地小麦模型,但模拟效果不佳。颜楚睿等<sup>[16]</sup>对西北地区的未来气候进行预估,但只考虑气候变化对高原地区农作物产量的影响。杨卫君等<sup>[17]</sup>针对播期和密度对干旱地区春小麦产量的影响进行研究,但未考虑未来气候变化的影响。

因此,明确播期调控和种植密度管理是否能减轻气候变化对春小麦产量带来的消极影响,对陇中地区的春小麦种植意义重大。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 研究区概况

本研究选择的大田试验地在甘肃省定西市安定区,为甘肃农业大学旱农综合试验站(35°64'N,104°64'E),海拔约为 2 000 m,常年日照充足。当地气候属中温带半干旱区,年均气温为 6.5 °C,年均太阳辐射为 593 kJ/m<sup>2</sup>,年均降水量约为 375.44 mm 且集中在每年的 6 月至 9 月,无灌溉条件。试验区土壤质地为黄绵土,0~200 cm 的土壤平均容重为 1.20 g/cm<sup>3</sup>,土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil

土层深度 /cm	容重 /g·cm <sup>-3</sup>	风干含水量 /mm·mm <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> /ppm	NH <sub>4</sub> /ppm	凋萎系数 /mm·mm <sup>-1</sup>	田间最大持水量 /mm·mm <sup>-1</sup>	饱和含水量 /mm·mm <sup>-1</sup>
0~5	1.29	0.013	19.10	6.30	0.09	0.27	0.46
6~10	1.23	0.013	15.20	5.20	0.09	0.27	0.49
11~30	1.36	0.046	23.10	5.10	0.09	0.27	0.45
31~50	1.20	0.071	16.60	4.90	0.09	0.27	0.50
51~80	1.14	0.087	16.80	4.60	0.10	0.26	0.52
81~110	1.14	0.103	18.20	4.80	0.12	0.27	0.52
111~140	1.25	0.107	16.40	4.80	0.13	0.27	0.48
141~170	1.12	0.115	13.70	5.80	0.18	0.27	0.53
171~200	1.11	0.127	15.40	4.10	0.22	0.27	0.53

### 1.2 试验设计

根据甘肃省春小麦当地实际播期和种植密度数据,设置 3 个种植密度梯度变化,分别为 140 kg·hm<sup>-2</sup>、237 kg·hm<sup>-2</sup>、284 kg·hm<sup>-2</sup>,用 D1、D2、D3 表示,对照处理(CK)为 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>。播种日期设置三个梯度,分别为 3 月 1 日、3 月 10 日、3 月 30 日,用 S1、S2、S3 表示,CK 对照为当年的 3 月 18 日播种。

#### (1)田间管理

供试的春小麦品种为“定西 35 号”,于当年的 3 月 15 日进行播种,8 月 5 日收获,播种量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>。按照当地农

户施肥习惯和前期研究结果,施氮量为 105 kg·hm<sup>-2</sup>,采用传统的耕作方式。0~5 cm 的土层初始土壤含水率为 18.2%,试验小区的面积为 20 m×4 m,按照完全随机区组设计进行田间布置。

#### (2)未来气候情景数据

未来气候预测数据集通过对耦合模式相互比较项目第 5 阶段(CMIP5)中的全球气候模式(GCM)进行运行,获得全球降尺度气候情景。本文选用的是 2020—2050 年 HadGEM3-GC31-LL 模型的逐日尺度下的气候数据。气候数据包括 Tmax、Tmin、pr、rsds。通过 APSIM. Met 将日尺度气候数据转化为 APSIM-Wheat 所需的气候数据文件。

#### (3)数据处理

选用 Excel 2010 对数据进行整理与汇总,使用 DPS 7.5 软件对模拟数据进行回归分析,使用 Origin 2018 软件作图。

## 1.3 APSIM 模型

#### (1)APSIM 模型简介

APSIM 是一系列作物模型的总称,它能够将各种不同的作物模型集成到一个公共平台上<sup>[6]</sup>。现阶段,APSIM 能够模拟小麦、玉米、棉花、油菜、紫花苜蓿、豆类作物和杂草等多种作物。该模型主要通过气象数据、土壤属性参数、作物属性参数和农田管理措施,模拟出不同气候、土壤、品种管理因素下的作物产量。使用 APSIM 模型可以很好地研究和预测作物在不同环境条件下的产量变化。这样的模拟方法不仅能够为研究人员提供准确的作物产量结果,还能够降低研究的复杂性和成本。

#### (2)气象数据

历史观测气候数据使用甘肃定西气象站(35°64'N,104°64'E)采集的 2007—2018 年气候数据,包括日最高温、日最低温、降水量、蒸发量、太阳辐射。研究区 2007—2018 年年均最高温、年均最低温和年降水量变化如图 1 所示。

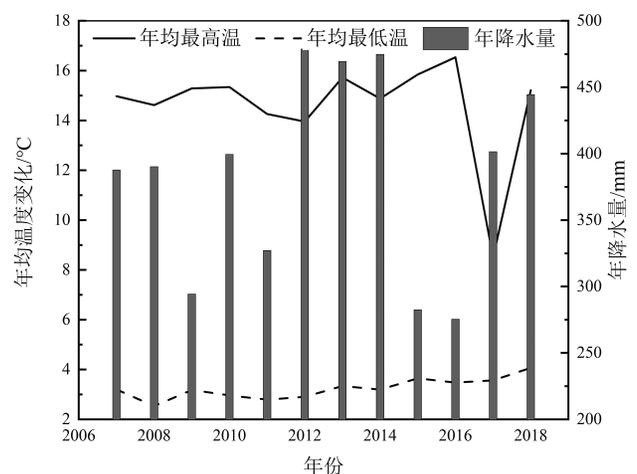


图 1 研究区 2007—2018 年年均最高温、年均最低温和年降水量变化

Fig. 1 Variation of annual mean maximum temperature, annual mean minimum temperature and annual total precipitation in the study area from 2007 to 2018

#### (3)土壤数据

通过操作模块 Sbuild 对土壤数据进行输入管理,模型在运

行时会自动调用该土壤数据。本试验的土壤数据来自定西试验田的田间试验实测数据,有效根系层为0~200 cm,分为0~20 cm、21~40 cm、41~60 cm、61~80 cm、81~100 cm共5层。土壤粒径采用 TopSizer 激光粒度分析仪测定;田间持水率采用田测法测定;凋萎系数采用高速离心法测定;土壤饱和含水率和土壤容重采用环刀法测定。其他输入参数如土壤名称、排水情况、反射率等从中国土壤数据库获得。

#### (4) 春小麦生理生态指标

本文采用“定西 35 号”小麦的生长发育参数如表 2 所示。

表 2 “定西 35 号”小麦生长发育参数

Tab.2 Growth and development parameters of wheat "Dingxi 35"

参数名称	参数值	单位
春化敏感因子 (Vernalization sensitivity)	1.0	
光周期敏感因子 (Photoperiod sensitivity)	2.0	
单位茎秆干物质的籽粒数 (Grain per gramstem)	25.0	Kernel · g <sup>-1</sup> · stem <sup>-1</sup>
潜在的籽粒灌浆速度 (Potential grain filling rate)	0.001	g · grain <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>
灌浆期到成熟期的积温 (Thermal time start filling to mature)	580	°C · d
最大灌浆速率 (Maximum grain filling rate)	2.30	mg · grain <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>
分蘖重 (Weight of tiller)	1.22	g · tiller <sup>-1</sup>
单株重 (Weight of single plant)	4	
株高 (Stem length)	1 000	mm
最大谷粒重 (Maximum grain size)	0.043	g

#### (5) 模型调参验证

APSIM 模型的校准和验证在模拟过程中非常重要,本文利用大田试验实测数据对模型的精准度进行验证。试验选用的评价指标主要有均方根误差(RMSE),如公式(1)所示;归一化均方根误差(NRMSE),如公式(2)所示;模型的有效性(M<sub>e</sub>),如公式(3)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_s - Y_o)^2} \quad (1)$$

$$NRMSE = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_s - Y_o)^2}}{Y_{mean}} \quad (2)$$

$$M_e = 1 - \frac{\sum (Y_s - Y_o)^2}{\sum (Y_s - Y_{mean})^2} \quad (3)$$

公式(1)至公式(3)中, Y<sub>mean</sub> 代表实测数据的平均值, Y<sub>s</sub> 代表模拟的产量值, Y<sub>o</sub> 代表实测的产量值。

## 2 结果和分析(Results and analysis)

### 2.1 APSIM 模型调参和验证

利用研究区实测数据,根据试错法对 APSIM-wheat 模型的土壤参数和品种参数进行率定,在此基础上利用试验区 2010—2017 年实测的春小麦产量值和模拟的产量值对 APSIM 模型进行精确度评价,结果显示,APSIM-wheat 模型对春小麦产量模拟结果的决定系数 R<sup>2</sup> 为 0.92、NRMSE 为 13%, M<sub>e</sub> 为 0.72。春小麦籽粒产量实测值和模拟值的线性拟合如图 2 所示。

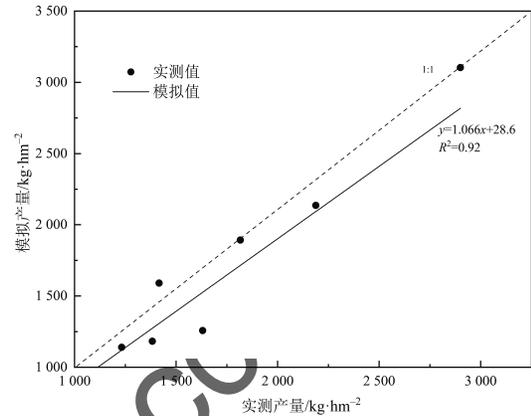
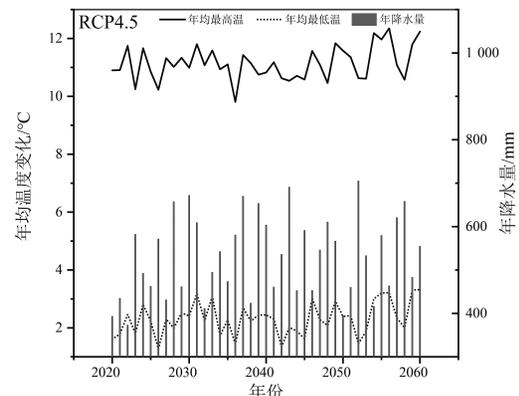


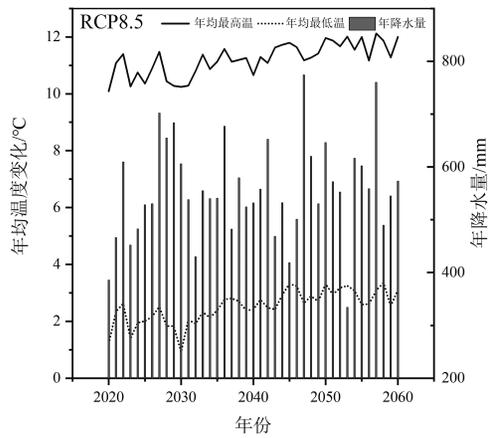
图 2 春小麦籽粒产量实测值和模拟值的线性拟合  
Fig. 2 Linear fitting of measured and simulated grain yield of spring wheat

### 2.2 未来气候变化情景下春小麦生长季内气象变化特征

本研究中,未来气候情景下研究区的年均最高温、年均最低温以及年均降水量变化对研究的结果有很大的影响。图 3(a)为未来气候情景 RCP4.5 浓度路径下研究区的年均最高温、年均最低温和年均降水量变化。图 3(b)为未来气候情景 RCP8.5 浓度路径下研究区的年均最高温、年均最低温和年均降水量变化。2007—2010 年试验站的最高温度和最低温度分别为 14.1 °C 和 1.69 °C。图 3 显示了未来气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 试验站 HadGEM3-GC31-LL 模式的降尺度数据集合相对于基线的预测变化。在 21 世纪 30 年代,未来气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下研究区的最高温和最低温较基准期分别增加了 0.8~1.1 °C 和 0.6~0.9 °C,降水量增加了 28~31 mm。在 21 世纪 50 年代,未来气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下研究区的最高温和最低温分别增加了 0.9~1.2 °C 和 0.7~1.1 °C,降水量增加了 29~44 mm。



(a) RCP4.5 浓度路径

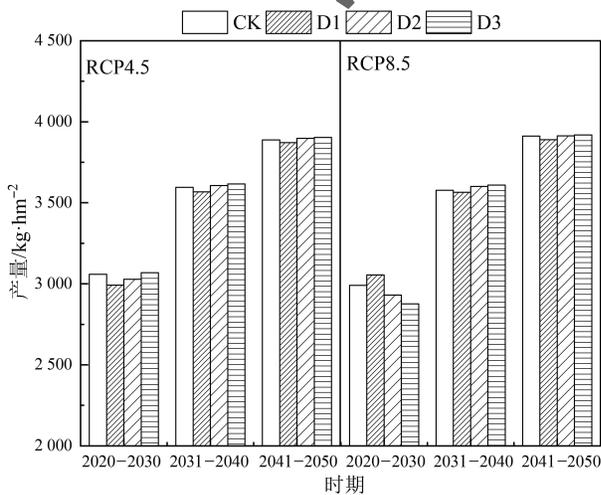


(b)RCP8.5 浓度路径

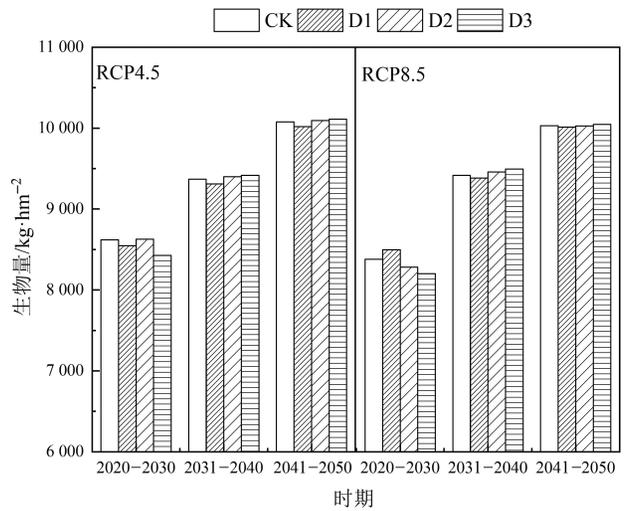
图 3 未来气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下研究区的年均最高温、年均最低温和年均总降水量变化  
 Fig. 3 Variations of annual average maximum temperature, annual average minimum temperature and annual average precipitation in the study area under two different density paths of RCP4.5 and RCP8.5 in the future climate scenarios

### 2.3 未来气候变化情景下种植密度对春小麦产量和生物量的影响

基于 APSIM-wheat 模型模拟研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同种植密度的春小麦产量和生物量变化,如图 4 所示。图 4(a)为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同种植密度对春小麦产量的影响。图 4(b)为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同种植密度对春小麦生物量的影响。研究得出:在未来气候情景下,随着种植密度从 D1 增加到 D3,春小麦产量和生物量逐渐增加,但增长速率越来越慢,D3 处理下春小麦产量和生物量最高,表明高密植并不能缓解气候变化带来的消极影响。在同一时期内,RCP4.5 浓度路径下春小麦产量和生物量均高于 RCP8.5 浓度路径下春小麦产量和生物量。



(a)产量

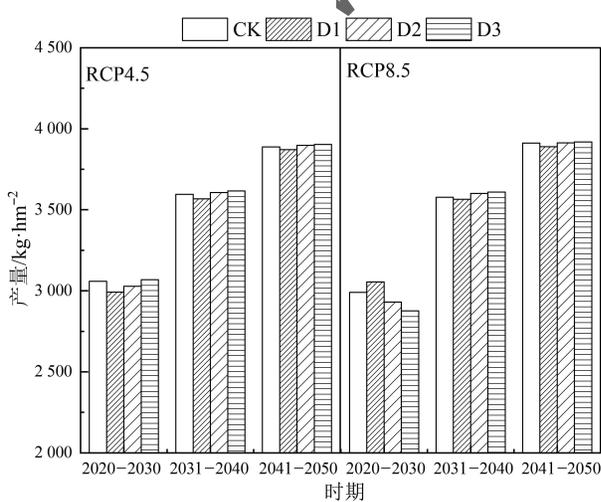


(b)生物量

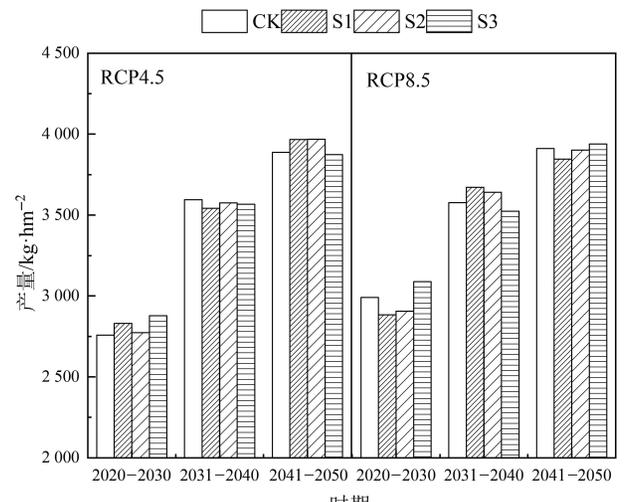
图 4 研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同种植密度的春小麦产量和生物量变化  
 Fig. 4 Spring wheat yield and biomass of different planting densities under two different density pathways of RCP4.5 and RCP8.5 in the climate scenarios of the study area from 2020 to 2050

### 2.4 未来气候变化情景下播期对雨养春小麦产量和生物量的影响

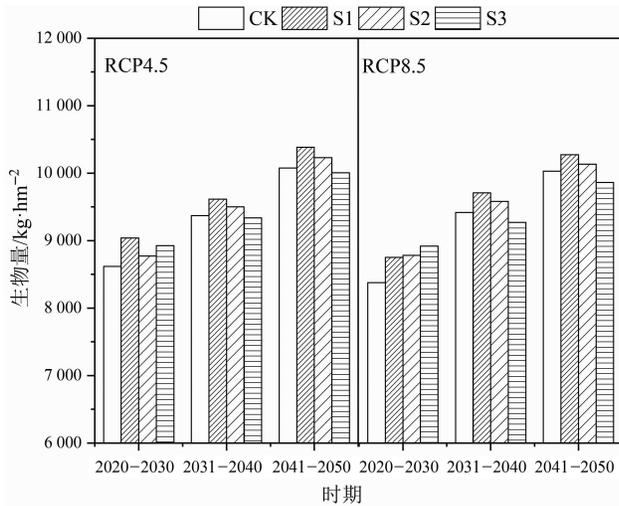
基于 APSIM-wheat 模型模拟研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种不同浓度路径下不同播期的春小麦产量和生物量变化,如图 5 所示。图 5(a)为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同播期变化对小麦产量的影响,图 5(b)为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同播期变化对小麦生物量的影响。研究得出:随着播种日期从 S1 变化到 S3,春小麦产量和生物量逐渐降低,S1 处理下的春小麦产量和生物量较高,表明提前播种能够缓解气候给春小麦生产带来的消极影响;在同一时期内,RCP8.5 浓度路径下的春小麦产量高于 RCP4.5 浓度路径下的春小麦产量,RCP8.5 浓度路径下的春小麦生物量低于 RCP4.5 浓度路径下的春小麦生物量。



(a)产量



(a)产量

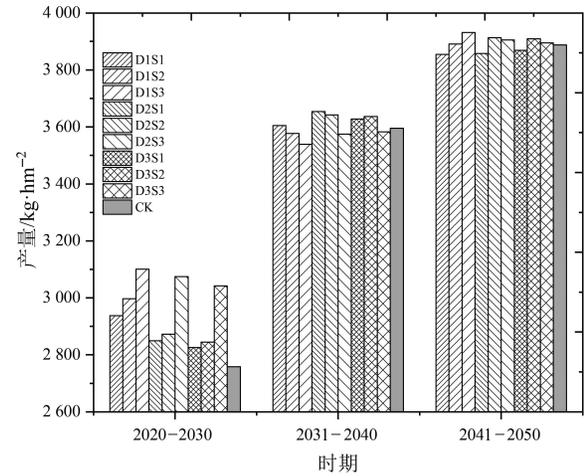


(b) 生物量

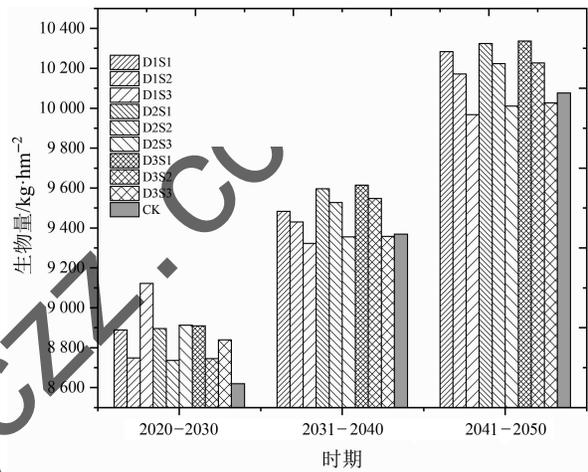
图5 研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下不同播期的春小麦产量和生物量变化  
Fig. 5 Spring wheat yield and biomass of different sowing dates under two different density pathways of RCP4.5 and RCP8.5 in the climate scenarios of the study area from 2020 to 2050

### 2.5 未来气候变化情景下最佳播期和种植密度方案

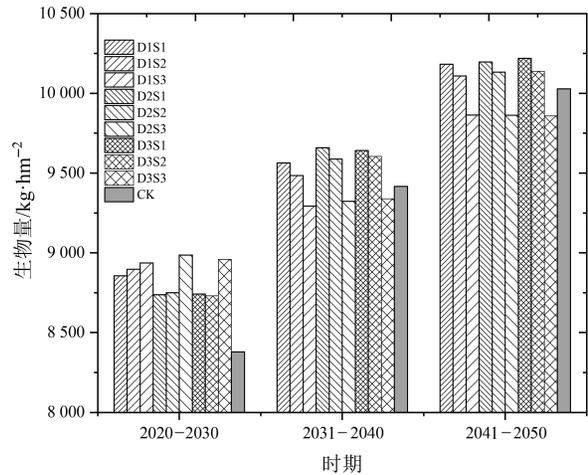
基于 APSIM-wheat 模型模拟研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种不同浓度路径下播期和种植密度耦合对春小麦产量和生物量的影响,如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)分别为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 浓度路径下和 RCP8.5 浓度路径下播期和种植密度耦合变化下的小麦产量,图 6(c)和图 6(d)分别为研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 浓度路径下和 RCP8.5 浓度路径下播期和种植密度耦合变化下的小麦生物量。在 RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径下,D2S2 处理下的小麦产量均高于其他处理,较 CK 处理增加 4%;D3S1 处理下的生物量均高于其他处理,较 CK 处理增加 3.5%。



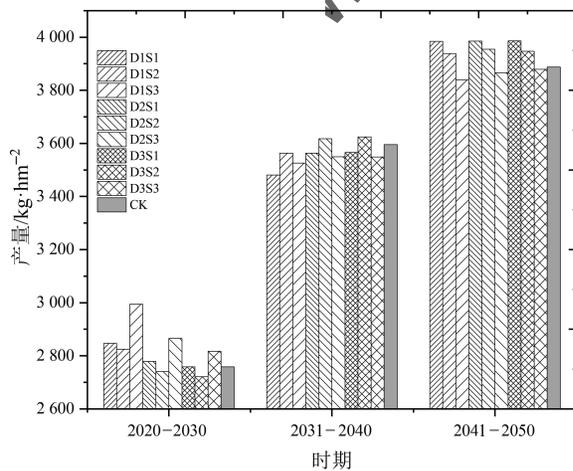
(b) RCP8.5 浓度路径下的产量



(c) RCP4.5 浓度路径下的生物量



(d) RCP8.5 浓度路径下的生物量



(a) RCP4.5 浓度路径下的产量

图6 研究区 2020—2050 年气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 两种浓度路径下播期和种植密度耦合对春小麦产量和生物量的影响

Fig. 6 The coupling effects of sowing date and planting density on spring wheat yield and biomass under two different density pathways of RCP4.5 and RCP8.5 in the climate scenarios of the study area from 2020 to 2050

### 3 讨论(Discussion)

本研究在陇中旱区开展了长达 8 年的春小麦种植试验,利用生物量和产量数据对 APSIM 作物模型进行了校正和验证。结果表明,APSIM 作物模型对春小麦的产量、生物量的预测值与实测值接近,NRMSE 和  $R^2$  模拟效果较好,表明 APSIM 作物模型可以应用于该地区播期和种植密度研究。APSIM-wheat 模型的物候校准是模型准确预测的关键步骤,茹晓雅等<sup>[5]</sup>的研究表明,APSIM-wheat 模型可以较好地模拟陇中干旱区不同管理措施下雨养春小麦的生长。本研究基于 CMIP5 模式的未来气候情景数据,得出研究区温度可能升高 0.6~1.2 °C,降水量可能增加 28~44 mm,这与高雪慧等<sup>[13]</sup>研究得出的甘肃陇中地区年均最高气温升温达 0.9 °C,年均最低气温升高达 1.1 °C,年均降水量较基线期增加 31 mm 的结果一致。

在未来气候变化情景下,随着种植密度的增加,小麦的产量和生物量先增后减,密植并不会显著增高春小麦的产量和生物量。播期从早播到晚播,小麦产量变化趋势不显著,早播处理下生物量明显增加。王绍坤<sup>[18]</sup>的研究表明,“淮麦 33”随着播期的延迟,产量先增加后降低;随着种植密度的增加,产量先增加后降低。刘强等<sup>[19]</sup>的研究表明,未来气候变化情景下,产量增长率表现为早播>正常播>晚播,这与本研究得出的结果一致。徐芳等<sup>[12]</sup>评估了播期和种植密度对关中玉米气候生产力的影响,研究得出通过适当推迟播期和提高种植密度可以有效提高关中地区的玉米生产潜力,增加玉米产量。这与本研究得出的增加种植密度可抵消未来气候变化影响的结果一致。

本研究的局限性在于只使用了一个作物模型(APSIM-wheat)模拟未来的天气数据,未采用其他作物模型进行对比。因此,未来的研究应该考虑多基因型和作物/气候模型,特别是采用 CMIP6 最新数据模拟未来气候变化对小麦生长的影响。

### 4 结论(Conclusion)

本文通过对 APSIM-wheat 模型的校准和验证表明,模型对于春小麦产量和生物量的模拟结果较为准确, $R^2$  为 0.92, NRMSE 为 13%, $M_e$  为 0.72,模拟精度相对较高。分析未来气候变化数据发现,与基线数据(2007—2018 年)相比,RCP4.5 和 RCP8.5 的温度升高范围为 0.6~1.2 °C,降水量在 2020—2050 年增加了 28~44 mm。得出以下结论:在未来气候变化情景下,D3(增加密度)处理春小麦产量和生物量较高,S1(提前播种)处理春小麦产量和生物量较高,高密植并不能缓解气候变化带来的消极影响,提前播种能够缓解气候给春小麦生产带来的消极影响。

未来气候变化情景下,在播期和种植密度耦合处理下,D2S2 处理下的产量最高,D3S1 处理下的生物量最高。结论可为西北干旱区未来小麦生产制定最佳播期和种植密度策略提供理论参考。

### 参考文献(References)

- [1] MINOLI S, JÄGERMEYER J, ASSENG S, et al. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change[J]. *Nature communications*, 2022, 13(1): 7079.
- [2] BOONWICHAI S, SHRESTHA S, BABEL M S, et al. Evaluation of climate change impacts and adaptation strategies on rainfed rice production in Songkhram River Basin, Thailand [J]. *Science of the total environment*, 2019, 652: 189-201.
- [3] SADDIQUE Q, LIU D L, WANG B, et al. Modelling future climate change impacts on winter wheat yield and water use: a

case study in Guanzhong Plain, northwestern China[J]. *European journal of agronomy*, 2020, 119: 126113.

- [4] 高雪慧, 刘强, 王钧. 基于 APSIM 模型的陇中旱地春小麦产量对播期、施氮和降水量变化的响应模拟[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(3): 371-379.
- [5] 茹晓雅, 李广, 陈国鹏, 等. 不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(11): 1725-1734.
- [6] HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, et al. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation[J]. *Environmental modelling & software*, 2014, 62: 327-350.
- [7] 张泽民, 吕昌河. 青藏高原不同积温条件下春小麦光温生产潜力及其对气候变化的响应[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(11): 2135-2149.
- [8] FAYAZ A, KUMAR Y R, AHMAD LONE B, et al. Crop simulation models: a tool for future agricultural research and climate change[J]. *Asian journal of agricultural extension, economics & sociology*, 2021, 39(6): 146-154.
- [9] 雷俊, 张健, 赵福年, 等. 春小麦开花期光合参数对土壤水分和温度变化的响应[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1151-1159.
- [10] 杜昊霖, 王鹤龄, 张凯, 等. 干旱胁迫下春小麦需水关键期叶水势的变化及其影响因素研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 230-237.
- [11] 齐月, 王鹤龄, 张凯, 等. 气候变化对黄土高原半干旱区春小麦生长和产量的影响——以定西市为例[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1313-1321.
- [12] 徐芳, 何建强, 朱晓华, 等. 利用 APSIM 模型评估播期和种植密度对关中玉米气候生产力的影响[J]. *陕西气象*, 2022, 32(1): 59-65.
- [13] 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): 738-745.
- [14] XIAO D P, BAI H Z, LIU D L. Impact of future climate change on wheat production: a simulated case for China's wheat system[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1277.
- [15] 聂志刚, 李广, 雒翠萍, 等. 利用混合蛙跳算法优化基于 APSIM 的旱地小麦产量形成模型参数[J]. *作物学报*, 2018, 44(8): 1229-1236.
- [16] 颜楚睿, 刘浏, 黄冠华. 多模式多情景下西北内陆干旱区未来气候变化预估[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(11): 1193-1199.
- [17] 杨卫君, 贾永红, 石书兵, 等. 播期和密度对春小麦品种新春 26 号生长及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(7): 913-918.
- [18] 王绍坤. 不同播期与密度对小麦生长发育及产量的影响[J]. *乡村科技*, 2023, 14(4): 77-80.
- [19] 刘强, 高雪慧, 王钧. 不同降水年型下大气 CO<sub>2</sub> 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): 230-237, 265.

### 作者简介:

郝冠宇(2000-),男,硕士生。研究领域:作物模拟模型。  
 刘强(1974-),男,硕士,教授。研究领域:农业信息化。  
 王钧(1982-),男,博士,副教授。研究领域:农业信息化。