

网络出版时间:2025-01-14

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250113.1723.032

# 未来气候变化情景下旱地春小麦产量和生物量 对灌水量和播期的响应模拟

马晓艺, 刘强, 杨婷婷

(甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:**为探求未来气候变化背景下旱地小麦灌溉和播种时间的管理策略,利用农业生产系统模拟模型(APSIM),在陇中旱地春小麦2014—2022统计年鉴数据基础上,结合CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project 5)模式的未来气候变化情景(RCP4.5和RCP8.5)数据,设置不同灌水量(0、60、120、180、240和360 mm)和播种日期(3月1日、3月11日、3月19日、3月31日),模拟分析不同灌水量及播期下旱地春小麦的产量和生物量差异。结果表明,模型在参数校准和验证后,能够较精确地模拟研究区春小麦的产量和生物量。未来气候变化情景下,随着灌溉量的增大,春小麦的产量和生物量均呈先增后减趋势,灌水120 mm条件下产量和生物量均最高;在3月1日播期下春小麦产量和生物量均最高,3月31日播期下均最低;在灌溉量和播期的交互影响下,以灌水120 mm和3月1日播期处理的春小麦产量和生物量均最高。由此可见,在未来气候变化情景下通过适当增加灌溉量和提前播种,可有效提高旱地春小麦的产量和生物量。

**关键词:**旱地春小麦; APSIM模型; 未来气候变化; 灌溉量; 播期; 产量; 生物量

中图分类号: S512.1; S314

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)07-0974-10

## Simulation of Response of Spring Wheat Yield and Biomass to Irrigation Amount and Sowing Date in Dryland under Future Climate Change Scenario

MA Xiaoyi, LIU Qiang, YANG Tingting

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

**Abstract:** In order to explore the management strategy of irrigation and seeding time of dryland wheat under the background of future climate change, the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) was used to analyze the statistical yearbook data of spring wheat in dryland in Longzhong from 2014 to 2022. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) model for future climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) data, Different irrigation amounts (0, 60, 120, 180, 240 and 360 mm) and sowing dates (March 1, March 11, March 19, March 31) were set to simulate and analyze the difference of yield and biomass of spring wheat in dryland under different irrigation amounts and sowing dates. The results showed that the model could accurately simulate the yield and biomass of spring wheat in the study area after parameter calibration and verification. Under the future climate change scenario, the yield and biomass of spring wheat increased first and then decreased with the increase of irrigation amount, and the yield and biomass were the highest under the irrigation of 120 mm. The yield and biomass of spring wheat were the highest under the sowing date of March 1, and the lowest under the sowing date of March 31. Under the interaction of irrigation amount and sowing date, the yield and biomass of spring wheat treated with the irrigation water of 120 mm and the sowing date of March 1 were the highest overall. In conclusion, the yield and biomass of spring wheat in dryland can be ef-

收稿日期: 2024-06-14 修回日期: 2024-07-22

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); 甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA116)

第一作者 E-mail: 1421745938@qq.com (马晓艺)

通讯作者 E-mail: liuq@gsau.edu.cn (刘强)

fectively increased by increasing irrigation and sowing in advance under the future climate change scenario.

**Keywords:** Spring wheat in dryland; APSIM model; Future climate change; Irrigation amount; Sowing date; Yield; Biomass

全球气候变化给农业种植带来了严峻挑战,特别是在干旱和半干旱地区,旱地春小麦生产受到气候变化影响尤为显著,因为它们依赖于有限的降水和灌溉资源。甘肃省定西市地属陇中地区,自然降水较为有限,难以满足小麦的正常需求,灌溉成为提高该地区小麦产量的关键。根据 IPCC 的报告(AR6),全球升温已达到  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。基于耦合模型对 CMIP5 的每日数据集比较分析,预计 21 世纪将出现更为显著的极端气候现象<sup>[2]</sup>。随着全球气温的升高和降水模式的变化,人类将面临前所未有的严峻挑战,而“靠天吃饭”的农业成为受影响最为显著的行业之一<sup>[3]</sup>,传统的农业生产模式和管理策略可能不再适用,因此针对气候变化,制定出新的适应性管理措施变得至关重要。

APSIM 模型是一个综合性的作物生长模拟模型,能够有效预测作物生长和产量,已被广泛用于分析气候变化对作物生产的潜在影响。未来气候变化对于农业生产的影响是当前研究的热点之一<sup>[4-7]</sup>。孙昊蔚等<sup>[8]</sup>通过 APSIM 作物模型与降尺度气象数据集的耦合,得出在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,黄土高原未来的冬小麦种植范围内小麦产量高低和稳定性都将显著提高。灌溉是保障干旱地区粮食安全的关键农业技术,不同灌水量对小麦耗水特性、产量及水分利用效率的影响不同<sup>[9-12]</sup>。播期也影响于春小麦生长和产量<sup>[13-14]</sup>。

甘肃省是中国重要的春小麦产区之一,但因其降水期与小麦的灌浆期不同步,自然降水往往无法在小麦生长的关键阶段提供足够的水分。在未来气候极端变化的情景下,旱地春小麦生长条件发生变化,其管理策略可能需要相应地调整。近年来,国内学者就未来气候变化情景下种植策略对粮食作物的影响做了深入研究<sup>[15-19]</sup>,但有关灌溉量和播期耦合对未来气候变化下的陇中旱地春小麦生产的影响尚不明确。本研究在陇中旱地春小麦田间实测数据基础上,结合 CMIP5 模式的 RCP4.5 和 RCP8.5 未来气候变化情景数据,设置了不同灌溉量和播期,利用 APSIM 模型模拟了未来气候变化情景下旱地春小麦产量和生物

量,评估了未来气候条件下旱地春小麦产量和生物量的变化,以期对未来气候变化条件下旱地春小麦的灌溉和播期调整提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究以甘肃农业大学旱农综合试验站即位于甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村(坐标  $35^{\circ}35'\text{N}$ ,  $104^{\circ}38'\text{E}$ )的春小麦作为研究对象,该地区具有显著的干旱半干旱气候特征,属于温带大陆性气候区,年均气温为  $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量约为  $385\text{ mm}$ ,海拔约为  $2\ 000\text{ m}$ ,属于典型的黄土丘陵雨养区,季节变化明显,昼夜温差较大。

#### 1.1.1 气象数据

本研究采用了甘肃省定西市气象站采集的 2009—2019 年气候观测数据,其包含日最高气温、日最低气温、降水量、蒸发量以及太阳辐射等关键气候指标。研究区年均最高温、年均最低温和年降水量变化趋势如图 1 所示。

未来气候预测数据来源于 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>。该数据集是基于 CMIP5 模式得到 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下 2020s—2040s 期间的试验站气候预测数据。图 2 为 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下试验站的未来气候预测数据,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下研究区的年均最高温、年均最低温和年降水量变化如图 2 所示。研究区基准期(2009—2019)年均最高温和最低温分别为  $14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量为  $466\text{ mm}$ 。在 2020s—2040s 期间,未来气候 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下研究区的最高温和最低温较基准期分别增加了  $0.9\sim 1.2$  和  $0.7\sim 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降水量增加了  $28\sim 46\text{ mm}$ 。将气象数据通过 APSIM.met 转化为 APSIM-Wheat 所需的气候数据文件。

#### 1.1.2 土壤数据

本研究采用的土壤数据来源于试验区田间实地测定结果。该试验区的土壤特性主要为黄绵土,涉及到的具体土壤参数包括土层深度、容重、风干含水量等,详细的土壤参数如表 1 所示。

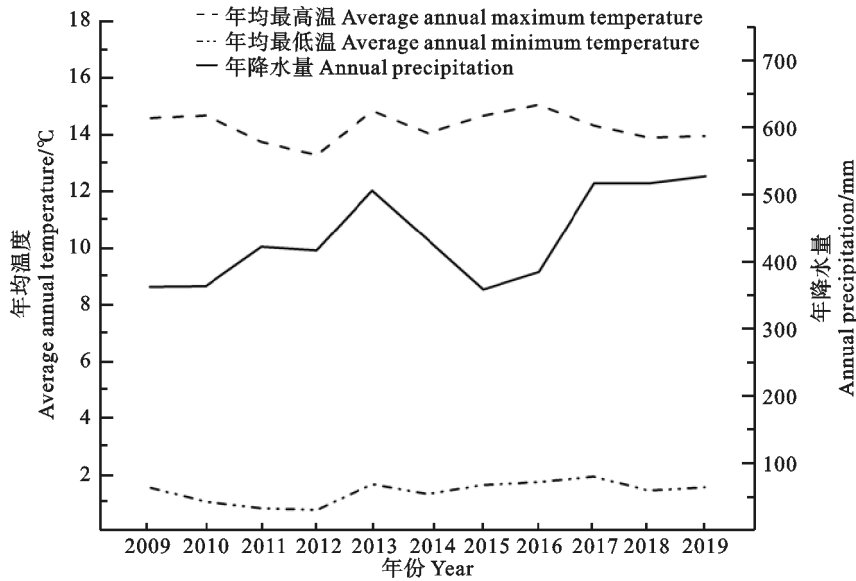


图 1 研究区 2009—2019 年年均最高温、年均最低温和年降水量变化

Fig. 1 Changes of average annual maximum and minimum temperature, and annual precipitation in the study area from 2009 to 2019

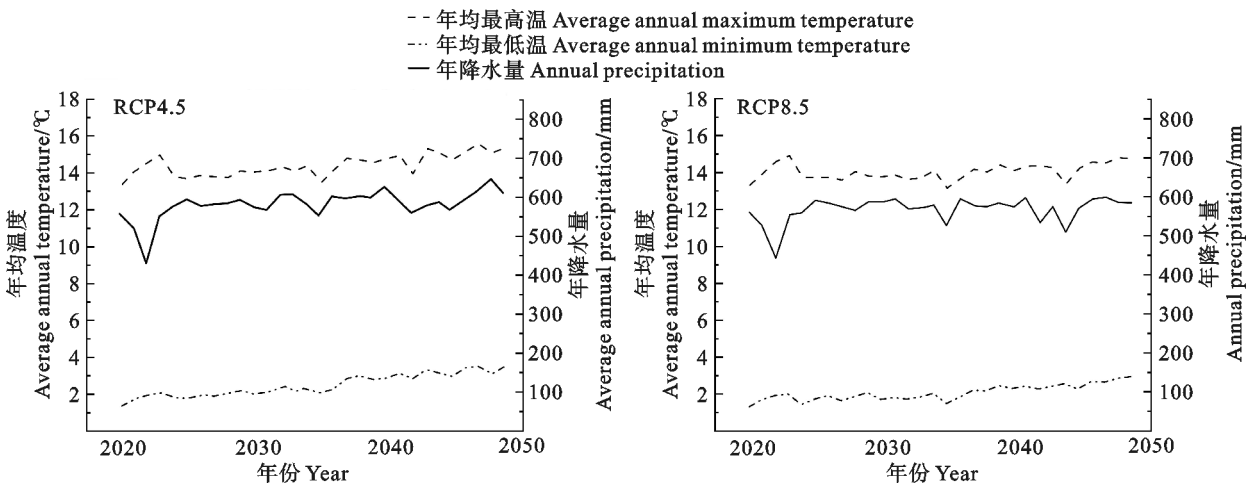


图 2 未来气候情景 RCP4.5 和 RCP8.5 下研究区的年均最高温、年均最低温和年降水量变化

Fig. 2 Changes of average annual maximum and minimum temperature, and annual precipitation in the study area under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5

表 1 土壤属性特征

Table 1 Soil attribute characteristics

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	风干含水量 Air-dried moisture/ ( $mm \cdot mm^{-1}$ )	饱和含水量 Saturated moisture/ ( $mm \cdot mm^{-1}$ )	田间最大持水量 Maximum field capacity/( $mm \cdot mm^{-1}$ )	$NO_3^-$ / ( $\mu mol \cdot mol^{-1}$ )	$NH_4^+$ / ( $\mu mol \cdot mol^{-1}$ )	pH
0~5	1.290	0.013	0.463	0.274	19.100	6.300	8.320
5~10	1.226	0.013	0.467	0.274	15.200	5.200	8.370
10~30	1.325	0.046	0.450	0.270	23.100	5.100	8.330
30~50	1.200	0.071	0.497	0.269	16.600	4.900	8.300
50~80	1.140	0.087	0.520	0.261	16.800	4.600	8.320
80~110	1.140	0.103	0.520	0.269	18.200	4.800	8.370
110~140	1.250	0.107	0.480	0.260	16.400	4.800	8.420
140~170	1.120	0.115	0.529	0.257	13.700	5.800	8.430
170~200	1.110	0.127	0.531	0.261	15.400	4.100	8.400

## 1.2 模型简介和参数校准

### 1.2.1 模型简介

APSIM 模型是一个广泛应用于农业系统中生物物理过程模拟的综合模型,能够模拟包括农作物、牧草和树木在内的多种植物的土壤-植物-大气相互作用过程,在极端环境变化下对作物产量预测也显示出高度的敏感性,并且对干旱地区作物水分关系具有较强的分析能力<sup>[20-22]</sup>。该模型广泛应用于精细农业、水肥管理、气候变化、粮食安全、土壤碳周转、环境影响、农业可持续性、农业生态等领域<sup>[23]</sup>。在灌溉管理方面,APSIM 模

型可以设置不同的灌溉策略,以模拟作物在不同水分条件下的生长反应,如可以设定灌溉的时间、频率和量,以及与土壤水分平衡、植物蒸腾和作物产量相关的模拟参数等。简而言之,APSIM 模型可以帮助研究人员和农业工作者优化水资源使用,提高作物产量,同时减少环境影响<sup>[24-26]</sup>。

### 1.2.2 作物参数

本研究采用的春小麦品种为定西 35 号,涉及到的具体参数包括春化敏感因子、光周期敏感因子、单位茎秆干物质的籽粒数等,详细参数如表 2 所示。

表 2 研究区春小麦生长发育参数

Table 2 Growth and development parameters of spring wheat in the study area

参数名称 Parameter	参数值 Value	单位 Unit
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 Grains per stem and dry matter weight	25.0	Kernels · 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 from 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>
株高 Stem length	1000	mm
最大籽粒重 Maximum grain size	0.045	g

### 1.2.3 模型参数校准和验证

APSIM 模型的校准和验证至关重要。本研究采用试验区 2014—2022 年的大田试验实测数据和统计年鉴数据结合对模型的相关参数进行校准和验证,校准和验证效果采用决定系数( $R^2$ )、标准均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和模型有效性(Me)等指标来评价,以确保模型准确性和可靠性。由图 2 可知,模型对小麦产量模拟值和实测值偏差较小, $R^2$  为 0.92, RMSE 和 NRMSE 均较小,Me 为 0.88,说明模型可以较精确地模拟春小麦的产量和生物量。

## 1.3 试验设计

根据试验区的春小麦实际灌溉和播种日期数据,利用 APSIM-Wheat 模型动态模拟各灌溉条件下的春小麦产量及其构成因素,并对各灌溉条件响应进行模拟分析得到三个需水关键期为拔节期、抽穗期和灌浆期。模拟试验设置每个时期 0 mm(W1)、60 mm(W2)、120 mm(W3)、180 mm(W4)、240 mm(W5)和 300 mm(W6)6 个灌溉量梯度(对应的全生育期灌水量分别为 0、180、360、

540、720 和 900 mm),同时设置 3 月 1 日(D1)、3 月 11 日(D2)、3 月 19 日(D3)和 3 月 31 日(D4)4 个播种日期。

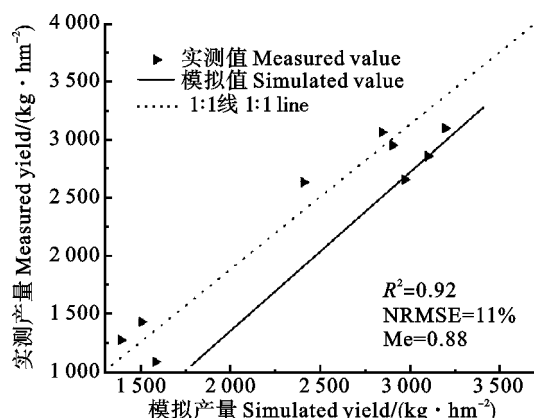


图 3 试验区春小麦产量实测值和模拟值的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting of measured and simulated spring wheat yield in the test area

## 1.4 数据处理

本研究的数据采用 Excel 进行整理,用 DPS 7.5 软件对模拟输出的数据进行回归分析,用

Origin 2022 软件对整理汇总后的数据作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 未来气候变化下灌溉量对春小麦的影响

在其他条件不变的情况下,调整灌溉定额,利用 APSIM-Wheat 模型模拟研究区 2020s—2040s 未来气候变化情景 RCP4.5 和 RCP8.5 下的春小

麦产量和生物量。总体来看,两种不同情景下,随着灌溉量的递增,2020s、2030s 和 2040s 的春小麦产量和生物量均先增加后减少,W3 下产量和生物量均最高,从 W4 开始产量和生物量都明显下降(图 4 和图 5),说明未来气候变化情景下适度增加灌溉量可提高旱地春小麦产量和生物量,但过度灌溉会产生负效应。

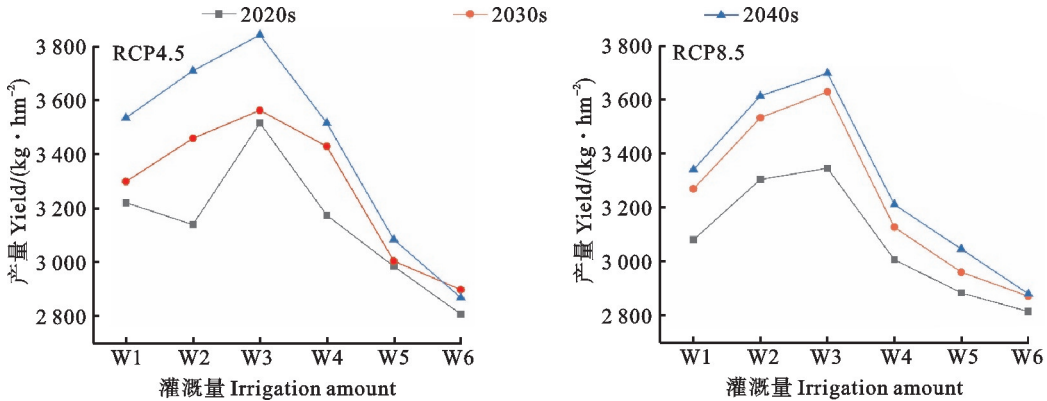


图 4 2020s—2040s 研究区 RCP4.5 和 RCP8.5 两种未来气候情景下春小麦产量随灌溉量增加的变化  
Fig. 4 Changes of spring wheat yield with irrigation amount increasing under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2020s to 2040s in the study area

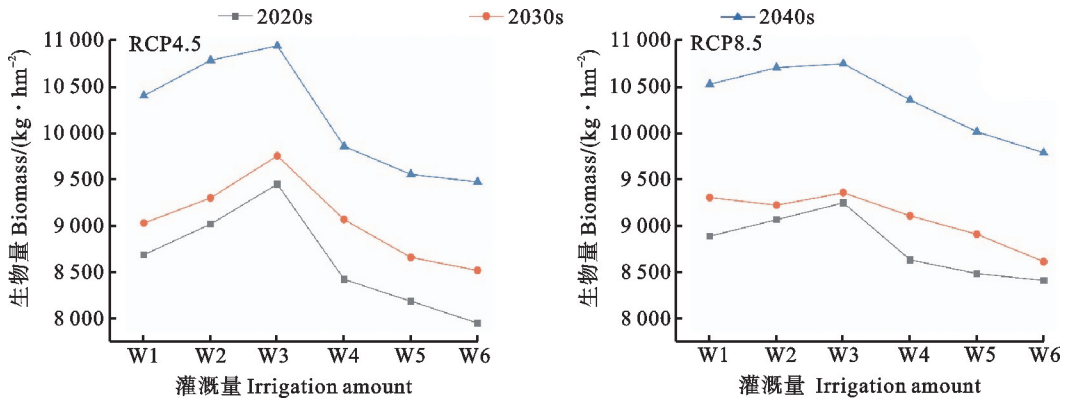


图 5 2020s—2040s 研究区 RCP4.5 和 RCP8.5 两种未来气候情景下春小麦生物量随灌溉量增加的变化  
Fig. 5 Changes of spring wheat biomass with irrigation amount increasing under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2020s to 2040s in the study area

### 2.2 未来气候变化下播期对春小麦的影响

同样,在其他条件不变的情况下,调整播种日期,利用 APSIM-Wheat 模型模拟研究区 2020s—2040s 未来气候变化情景 RCP4.5 和 RCP8.5 下的春小麦产量和生物量。在 D1 条件下产量总体上相对较高,这可能是因为未来气候条件下早播使得小麦在整个生长周期内能更高效地利用气候资源,从而实现高产(图 6)。在未来气候变化的两种情景下,D1 条件下生物量最高(图 7)。因

此,未来气候变化情景下,通过合理提前播种可促进旱地春小麦生长和高产。

### 2.3 未来气候变化下灌溉量和播期对春小麦的交互效应

在其他条件都不变的情况下,同时调整灌溉量和播期,利用 APSIM-Wheat 模型进行模拟研究区 2020s—2040s 未来气候变化情景 RCP4.5 和 RCP8.5 下不同灌溉量和播期处理的春小麦产量和生物量。RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,

在 W2 和 W3 条件下,春小麦产量和生物量均相对较高,其中 W3D1 处理产量和生物量均最高;在其他灌水条件下产量相对较低,其中 W6D4 处

理产量和生物量均最低(图 8 和图 9)。这说明在未来气候条件下适当增加灌溉量和提前播种可提高春小麦产量和生物量。

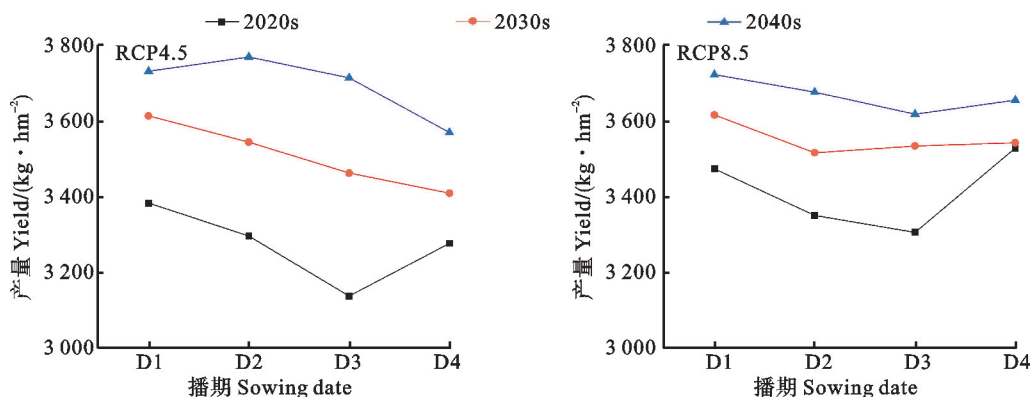


图 6 2020s—2040s 研究区 RCP4.5 和 RCP8.5 两种未来气候情景下春小麦产量随播期延迟的变化  
Fig. 6 Changes of spring wheat yield with sowing date delay under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2020s to 2040s in the study area

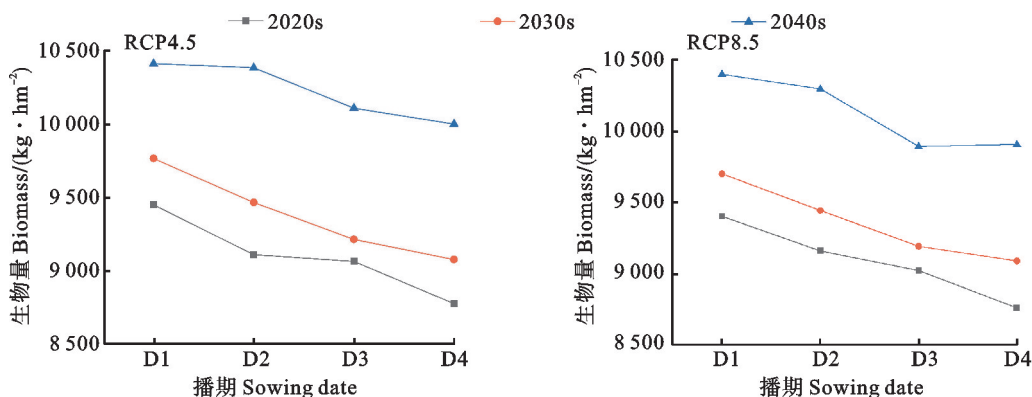


图 7 2020s—2040s 研究区 RCP4.5 和 RCP8.5 两种未来气候情景下春小麦生物量随播期延迟的变化  
Fig. 7 Changes of spring wheat biomass with sowing date delay under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2020s to 2040s in the study area

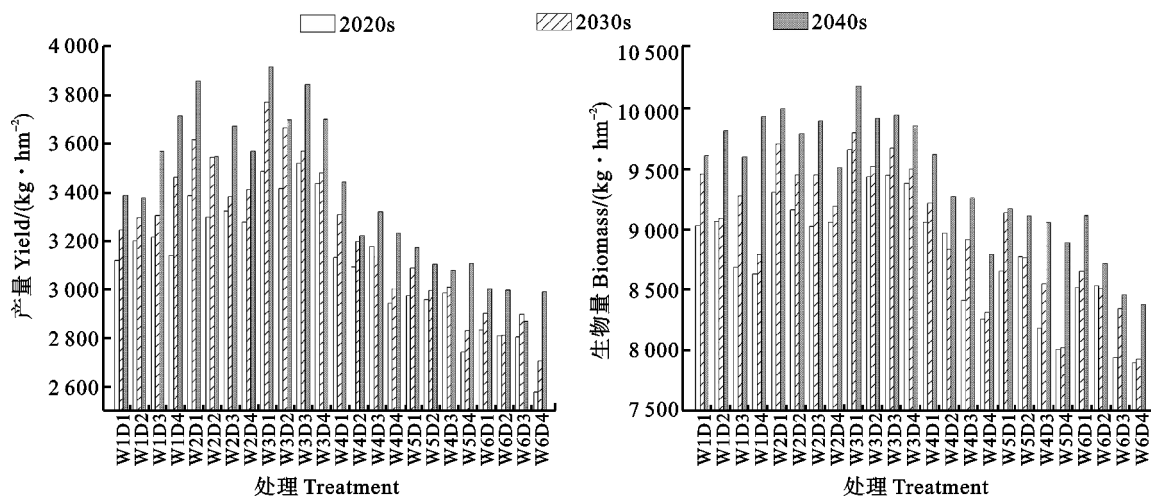


图 8 2020s—2040s 研究区 RCP4.5 未来气候情景下不同灌水量和播期交互下春小麦产量和生物量的变化  
Fig. 8 Changes of spring wheat yield and biomass with different irrigation amount and sowing date interactions under two future climate scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2020s to 2040s in the study area

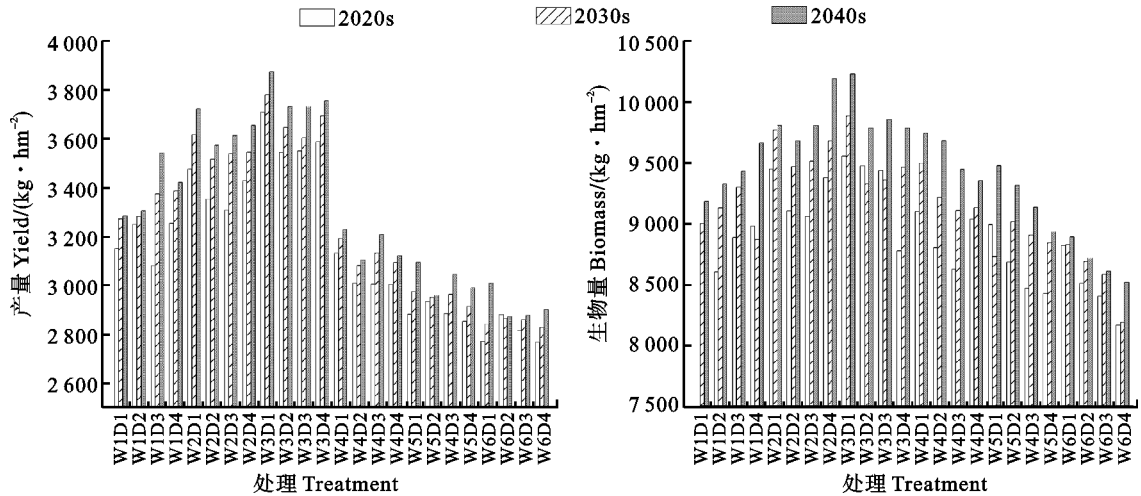


图 9 2020s—2040s 研究区 RCP8.5 未来气候情下不同灌溉量和播期交互下春小麦产量和生物量变化

Fig. 9 Changes of spring wheat yield and biomass with different irrigation amount and sowing date interactions under RCP8.5 climate scenario 2020s—2040s in the study area

2.4 回归分析

以灌溉量( $X_1$ )、播期( $X_2$ )为自变量,以春小麦的产量( $Y_{产量}$ )和生物量( $Y_{生物量}$ )为因变量,进行二次多项式逐步回归分析,结果(表 3)表明,在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下春小麦产量和生物量的二元回归方程的决定系数( $R^2$ )均在 0.85

以上,说明方程可以较好地反映春小麦产量和生物量与灌溉量、播期之间的关系。另外, $X_1$ 的一次和二次项系数的绝对值均小于  $X_2$  项,说明在未来气候变化情景的 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,灌溉量和播期对产量和生物量的影响均表现为灌溉量小于播期。

表 3 春小麦灌溉量和播期与产量和生物量的回归方程

Table 3 Interactive regression equation of irrigation quantity and sowing date with the yield and biomass of spring wheat

未来气候情景 Future climate scenario	方程 Equation	$R^2$
RCP4.5	$Y_{产量} = 3966.17 - 3.79X_1 - 68.25X_2 + 0.0007X_1^2 - 17.77X_2^2 + 0.39X_1X_2$	0.92*
	$Y_{生物量} = 10252.78 - 3.92X_1 + 110.44X_2 + 0.0067X_1^2 - 51.66X_2^2 - 1.34X_1X_2$	0.86*
RCP8.5	$Y_{产量} = 4223.69 - 5.80X_1 - 290.08X_2 + 0.0083X_1^2 + 94.39X_2^2 - 0.34X_1X_2$	0.88*
	$Y_{生物量} = 10514.19 - 3.17X_1 - 336.90X_2 + 0.0027X_1^2 + 35.82X_2^2 - 0.15X_1X_2$	0.85*

\* :  $P < 0.05$ .

3 讨论

本研究首先采用了 2014—2022 年陇中旱地春小麦的田间试验和统计年鉴数据,对 APSIM-Wheat 模型进行了较为精确的校准和验证。经过严格地对比分析,该模型在模拟陇中旱地春小麦的产量和生物量方面显示出良好的适应性。先前的研究结果也显示,APSIM-Wheat 模型能够较好地模拟春小麦在不同的种植策略下的产量及生长情况<sup>[27-29]</sup>。其次,基于 CMIP5 模式的未来情景数据,本研究深入分析了 2020s—2040s 相较于基准期的气候变化趋势,特别关注了年均最高温度、年均最低温度和年均降水量这三个关键气候

因子,结果显示,在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,试验区内的年均最高气温和年均最低气温均呈现出上升趋势,年均降水量也有所增加,这与杜懿等<sup>[30]</sup>得出的近 40 年来西北地区的气温、降水量和近地面空气比湿均呈现出较为显著的增加趋势的结果相吻合。由于降水稀缺和干旱胁迫,水分供应的不足影响陇中旱地春小麦生长发育,会降低产量。灌溉是增加春小麦产量的重要技术措施,而播期调整则有利于提升春小麦生长发育与降水季节分布吻合程度。未来气候变化情景下极端天气的频繁出现可能导致小麦生长受阻,直接影响产量,因此有必要分析未来春小麦生产中灌溉量、播种日期等方面的调整策略,以适应气候变

化。本研究在未来气候变化的 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,以不同灌溉量模拟发现,随着灌溉量的增大,旱地春小麦产量和生物量均呈先增后降趋势,均以 W3(三需水关键期灌水量均为 120 mm)最高,这与雷娟娟等<sup>[31]</sup>得出春小麦全生育期总的需水量为 315 mm 的结果基本相近。也有学者研究认为,随着灌溉量的增加,春小麦的株高、生物量显著提高,然而当灌溉量达到一定值时,春小麦的生物量却有所下降<sup>[32-33]</sup>。随播期的调整,小麦的产量变化较小,但整体来说,在 D1(3月1日)下,小麦的产量和生物量均最高,说明提前播种有利于小麦的生长和产量形成,应根据气候预测调整播种期,以确保小麦良好生长和增产,这与高雪慧等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。在探究不同灌溉量和播种时间对小麦产量的影响时,发现 W3D1 处理下春小麦产量和生物量均最高,即适度增加灌溉量结合提前播种可以提高春小麦产量和生物量。郭凌云等<sup>[35]</sup>的研究也得出,播期和灌溉量对小麦的产量和生长有明显的交互效应。国外的一些相关研究也表明,调整播期和灌溉量有助于提高小麦的生长参数,从而增加产量<sup>[36-38]</sup>。

本研究主要探讨了未来气候条件下灌溉量和播种时间对小麦产量和生物量的影响,但未充分考虑施肥量等其他潜在影响因素。同时,尽管分析了气候变化对小麦产量的潜在影响,但鉴于气候变化的复杂性及其影响因素的多样性,研究结果可能存在局限性。未来,我们将继续优化研究方法,进一步探索未来气候变化条件下旱地春小麦适应性生产的管理策略。

## 4 结论

APSIM-Wheat 模型经过精确校准与验证,在模拟春小麦产量和生物量方面表现优异,其  $R^2$  值为 0.92,显示出较高的模拟精度。模拟结果显示,相较于基准数据(2009—2019年),在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,研究区温度呈现出上升趋势,而且降水也有所增加。在未来气候变化情景的 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下,适度增加灌溉量和提前播种可以增加春小麦的产量和生物量。

### 参考文献:

- [1] ipcc Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021—The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [2] WANG X, JIANG D, LANG X. Future extreme climate changes linked to global warming intensity [J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(24): 1673.
- [3] 田祥东, 韩景红, 韩依水. 浅析气候变暖对农业的影响及应对措施[J]. *农业与技术*, 2014, 34(4): 1.  
TIAN X D, HAN J H, HAN Y S. Analysis on the influence of climate warming on agriculture and its countermeasures [J]. *Agriculture and Technology*, 2014, 34(4): 1.
- [4] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905.  
LIU Y S, LIU Y, GUO L Y. Impact of climate change on agricultural production and response strategies in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905.
- [5] 覃志豪, 唐华俊, 李文娟, 等. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(5): 1.  
QIN Z H, TANG H J, LI W J, et al. Progress and directions in studying the impacts of climate change on agriculture and grain production in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(5): 1.
- [6] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 应对气候变化对未来中国农业生产影响的问题和挑战[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1707.  
PAN G X, GAO M, HU G H, et al. Issues and challenges on mitigation of climate change impacts on China's future agriculture [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1707.
- [7] 许吟隆, 赵明月, 李阔, 等. 农业适应气候变化研究进展回顾与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1155.  
XU Y L, ZHAO M Y, LI K, et al. Review on the research progress of agricultural adaptation to climate change and perspectives [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(8): 1155.
- [8] 孙吴蔚, 马靖涵, 王力. 未来气候变化情景下基于 APSIM 模型的黄土高原冬小麦适宜种植区域模拟[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(6): 771.  
SUN H W, MA J H, WANG L. Simulation of suitable planting area of winter wheat under climate change in the Loess Plateau based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(6): 771.
- [9] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1965.  
WANG D M, YU Z W. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1965.
- [10] 聂志刚, 任新庄, 李广, 等. 旱地小麦产量及其构成因素灌溉效应的模拟分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 117.  
NIE Z G, REN X Z, LI G, et al. Simulation analysis of irrigation effect on yield and its constituent factors of dryland wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 117.
- [11] 王钧, 李广, 聂志刚, 等. 陇中黄土高原旱地春小麦产量对干旱胁迫响应的模拟研究[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2):

494.  
WANG J, LI G, NIE Z G, *et al.* Simulation study of response of spring wheat yield to drought stress in the Loess Plateau of central Gansu [J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 494.
- [12] 薛佳欣, 张鑫, 张建恒, 等. 基于 APSIM 模型小麦-玉米不同灌溉制度作物产量和水分利用效率分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 106.  
XUE J X, ZHANG X, ZHANG J H, *et al.* Analysis of crop yield and water use efficiency of wheat-maize double cropping system under different irrigation systems based on APSIM model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 106.
- [13] 聂志刚, 李广, 王钧, 等. 利用 APSIM 模型分析不同播期和耕作方式对旱地小麦籽粒干物质积累的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 913.  
NIE Z G, LI G, WANG J, *et al.* Evaluating the effects of different sowing dates and tillage methods on dry-land wheat grain dry matter accumulation based on the APSIM model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 913.
- [14] 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.  
GAO X H, LIU Q, WANG J. Simulation of response of spring wheat yield to sowing date, nitrogen application and precipitation in dryland of longzhong based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(3): 371.
- [15] 秦晓晨, 周广胜, 居辉, 等. 未来气候情景下黄淮海平原不同灌溉制度的产量补偿效应模拟[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 220.  
QIN X C, ZHOU G S, JU H, *et al.* Simulation of different irrigation strategy on wheat yield in Huang-Huai-Hai Plain under the RCP8.5 scenario [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 220.
- [16] 唐建昭, 肖登攀, 柏会子. 未来气候情景下农牧交错带不同灌溉水平马铃薯产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 103.  
TANG J Z, XIAO D P, BAI H Z. Yield and water use efficiency of potato at different irrigation levels in agro-pastoral ecotone under future climate change [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2): 103.
- [17] 徐昆, 朱秀芳, 刘莹, 等. 气候变化下干旱对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 149.  
XU K, ZHU X F, LIU Y, *et al.* Effects of drought on maize yield under climate change in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 149.
- [18] 吴熠婷, 江琪, 孟远, 等. 气候变化条件下陕西省不同气候区灌溉对冬小麦减产风险影响评估[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(10): 213.  
WU Y T, JIANG Q, MENG Y, *et al.* Assessment of impact of irrigation in different climatic regions of Shaanxi Province on risk of winter wheat yield reduction under climate change [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(10): 213.
- [19] 王灵猛, 周泽羽, 刘健, 等. 气候变化下新疆棉花调亏灌溉的节水效果评估[J]. 节水灌溉, 2021(6): 17.  
WANG L M, ZHOU Z Y, LIU J, *et al.* Evaluation of water-saving effect of cotton regulated deficit irrigation under climate change in Xinjiang [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(6): 17.
- [20] ASSENG S, JAMIESON P D, KIMBALL B, *et al.* Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Field Crops Research*, 2004, 85(2-3): 85.
- [21] 王琳, 郑有飞, 于强, 等. APSIM 模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2480.  
WANG L, ZHENG Y F, YU Q, *et al.* Applicability of Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2480.
- [22] 周丽涛, 孙爽, 郭尔静, 等. 干旱条件下 APSIM 模型修正及华北冬小麦产量模拟效果[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 92.  
ZHOU L T, SUN S, GUO E J, *et al.* APSIM modified model under drought conditions to simulate winter wheat yield in North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(6): 92.
- [23] 陈超飞. 基于 AquaCrop 模型的关中地区冬小麦-夏玉米灌溉施氮制度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
CHEN C F. Study on irrigation and nitrogen application system of winter wheat and summer maize in Guanzhong area based on AquaCrop model [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [24] 茹晓雅, 李广, 闫丽娟, 等. 基于 APSIM 模型模拟水氮调控对旱地春小麦产量的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(9): 2342.  
RU X Y, LI G, YAN L J, *et al.* Effect of precipitation and nitrogen application on spring wheat yield in dryland based on APSIM model [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(9): 2342.
- [25] 李彬, 李广, 陈国鹏, 等. 基于 APSIM 模型模拟水氮调控对旱地春小麦 (*Triticum aestivum*) 叶面积的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(4): 1371.  
LI B, LI G, CHEN G P, *et al.* Simulating the effects of water and nitrogen regulation on leaf area of *Triticum aestivum* in dryland based on APSIM model [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(4): 1371.
- [26] LI Y, WU B, GAO Y, *et al.* Combination of organic and inorganic fertilizers to counteract climate change effects on cultivation of oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) using the APSIM model in arid and semiarid environments [J]. *Agronomy*, 2023, 13(12): 2995.
- [27] 李广, 黄高宝, BELLOTTI W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵

- 沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2655.
- LI G, HUANG G B, BELLOTTI W, *et al.* Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5):2655.
- [28] 巩敬锦, 刘志娟, 祝光欣, 等. 基于 APSIM 模型的 2015—2100 年气候变化对中国玉米生产力影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8):167.
- GONG J J, LIU Z J, ZHU G X, *et al.* Effects of climate change on maize productivity in China during 2015 to 2100 based on APSIM model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8):167.
- [29] WANG J, DONG X, QIU R, *et al.* Optimization of sowing date and irrigation schedule of maize in different cropping systems by APSIM for realizing grain mechanical harvesting in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 276:108068.
- [30] 杜懿, 王大刚, 祝金鑫. 基于 CMIP5 的中国西北地区暖湿化演变研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5):61.
- DU Y, WANG D G, ZHU J X. Study on warming and humidification evolution in Northwest China based on CMIP5 [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(5):61.
- [31] 雷娟娟, 闫丽娟, 李广, 等. 基于 APSIM 模型小麦生育期需水量的模拟分析[J]. 草业科学, 2016, 33(5):871.
- LEI J J, YAN L J, LI G, *et al.* Simulation on water requirement of wheat during growth period by APSIM [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5):871.
- [32] 马国飞, 张磊, 袁海燕, 等. 灌溉量对春小麦地上部分生物量积累及分配规律的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(3):273.
- MA G F, ZHANG L, YUAN H Y, *et al.* Effect of irrigation quota on the biomass accumulation and distribution of spring wheat [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011, 42(3):273.
- [33] 席元章, 李广, 陈国鹏, 等. 水分调控对春小麦生长过程的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(2):73.
- XI Y Z, LI G, CHEN G P, *et al.* Impact of water regulation on growth process of spring wheat [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(2):73.
- [34] 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.
- 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):738.
- [35] 郭凌云. 限量灌溉条件下不同播期对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2010, 42(8):44.
- GUO L Y. Effects of different sowing dates on yield and water use efficiency of winter wheat under limited irrigation [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2010, 42(8):44.
- [36] VENKATARAVANA NAYAKA G V, PRABHAKARA REDDY G, KUMAR R M, *et al.* Influence of different irrigation regimes and systems of cultivation on physiological growth parameters of rice cultivars [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(7):1068.
- [37] GAJBHIYE M, BHAN M, AGRAWAL K K, *et al.* Influence of irrigation scheduling on physiological growth parameters and yield of wheat under different sowing dates [J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2023, 35(22):18.
- [38] PRAJAPAT A L, SAXENA R, SHARMA M, *et al.* Growing degree days requirement and yield of wheat cultivars as influenced by irrigation scheduling and time of sowing [J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2022:28.