

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

刘 强,高雪慧,王 钧

(甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为量化不同降水年型 CO₂ 浓度升高、增温对旱地春小麦 (*Triticum aestivum* L.) 产量的影响,本研究基于甘肃省陇中地区气象数据、土壤数据和管理数据驱动 APSIM 模型,设置不同 CO₂ 浓度和温度增量变化来模拟甘肃陇中未来气候情景,分析气候变化情景对春小麦产量稳定性和可持续性的影响,评估不同气候处理对应的产量风险。结果表明:APSIM 模型模拟的干旱年和湿润年小麦产量的归一化均方根误差 *NRMSE* 小于 13%,一致性指标 *D* 大于 0.85,平水年产量的归一化均方根误差 *NRMSE* 大于 20%,一致性指标 *D* 小于 0.8,表明 APSIM 模型对于干旱年和湿润年春小麦产量模拟的精确性高于平水年春小麦产量的模拟。CO₂ 浓度和温度对春小麦产量均具有显著影响,且温度对小麦产量的变化具有主导影响。在增温和 CO₂ 浓度共同升高条件下,降水效应表现为湿润年>平水年>干旱年,二者协同所导致的产量减产效应表现为平水年>干旱年>湿润年。对比不同降水年型产量的变异系数和可持续性指数发现,干旱年增温 2.5~3℃ 小麦产量风险最大;湿润年增温 2~2.5℃ 小麦产量风险最大;平水年增温 1℃ 小麦产量风险最大。

关键词:春小麦;产量;降水年型;CO₂ 浓度;温度;响应模拟

中图分类号:S512.1;S165 **文献标志码:**A

Response simulation of CO₂ concentration and temperature on spring wheat yield in dryland under different precipitation types

LIU Qiang, GAO XueHui, WANG Jun

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

Abstract: The purpose of this study was to quantify the effects of elevated CO₂ concentration and temperature increment on dryland spring wheat (*Triticum aestivum* L.) yields in different precipitation year patterns. Based on the APSIM model driven by meteorological data, soil data and management data in Longzhong, Gansu Province, different CO₂ concentration and temperature increment changes were set to simulate future climate scenarios in Longzhong, Gansu Province, analyze the impact of climate change scenarios on yield stability and sustainability of spring wheat, and assess the yield risk corresponding to different climate treatments. The results showed that the normalized root mean square error *NRMSE* of wheat yield in drought and wet years simulated by the APSIM model was less than 13% and the consistency index *D* was greater than 0.85, while the normalized root mean square error *NRMSE* of yield in flat water years was greater than 20% and the consistency index *D* was less than 0.8, indicating that the accuracy of the APSIM model for spring wheat yield simulations in drought and wet years was higher than that in normal water years. Both CO₂ concentration and temperature had significant effects on spring wheat yield, and temperature had a dominant effect on the variation of wheat yield. The effect of precipitation was wet year > normal year > drought year, and the effect of yield reduction due to the synergy of the two was normal year > drought year > wet year. Comparing the values of coefficient of variation and sustainability index under different pre-

收稿日期:2021-11-13

修回日期:2022-03-01

基金项目:甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-406);甘肃省高等学校创新基金支持项目(2021B-122);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-15);甘肃农业大学学科发展基金支持项目(GAU-XKFZJJ-2020-13)

作者简介:刘强(1974-),男,河北沧州人,教授,主要从事农业信息化研究。E-mail: liuq@gsau.edu.cn

通信作者:高雪慧(1996-),女,甘肃漳县人,硕士研究生,研究方向为农业信息化。E-mail: 2324005607@qq.com

cipitation year types found that the wheat yield risk was greatest under the treatment of 2.5~3℃ warming in drought year; the wheat yield risk was greatest under the treatment of 2~2.5℃ warming in wet year; and the wheat yield risk was greatest under the treatment of 1℃ warming in flat water year.

Keywords: spring wheat; yield; precipitation type; CO₂ concentration; temperature; response simulation

春小麦是甘肃省定西地区主要的粮食作物,其产量的稳定与可持续性对该地区发展有着重要影响。在农业系统中,作物产量随气候和土壤条件而变化,气候变化对农业生产影响评估中仍存在很大的不确定性,增温、大气 CO₂浓度升高和降水变化作为全球气候变化的主要表现,将直接或者间接影响作物的光合作用^[1-4]。因此,了解气候变化如何影响作物生产,对于确保当地粮食安全具有重要意义。

目前,国内针对气候变化对小麦产量的影响研究已经很多^[5-6]。周景博等^[7]认为,未来气候变化对中国小麦产量的影响存在不确定性,以负面影响为主。逯玉兰等^[8]通过相关分析法研究得出旱地春小麦全生育期降水量和日均最高温与产量分别呈极显著和显著相关;张凯等^[9]研究发现,在半干旱区增加降水对春小麦的产量有正效应,而增温则不利于产量的提高。孙昊蔚等^[10]利用 APSIM 作物模型与降尺度气象数据集的耦合,模拟了未来黄土高原冬小麦的产量及其稳定性,并探究了气候变化对于黄土高原冬小麦适宜种植区域的影响。虽然相关研究成果为农业生产提供了有价值的理论基础,但是针对气候变化对中国黄土丘陵旱地春小麦生产影响的研究仍较薄弱。

评估气候变化对作物生产影响的一个方法是 APSIM 作物模型^[11], APSIM 已经包含了有用的子模块来模拟本研究中评估的作物,以及 CO₂和温度变化对作物产量的影响,可以用来评估农业生产系统面临的风险和可持续性。过去几十年来,已有不少学者基于 APSIM 模型对不同区域气候变化对作物生长和生产力的潜在影响做出了探讨^[12-14],模拟区域主要集中在西北、华北和东北地区,对指导当地小麦、玉米等作物具有一定的可行性。针对气候变化对于春小麦产量及产量形成的影响,学者们已经做了较详尽的分析,而陇中区域降水量及降水季分布不均,不同降水年型小麦产量波动大,导致 CO₂浓度升高和增温对旱地春小麦产量及其产量稳定性和可持续性的影响也不尽相同,因此本研究的目的是利用 CO₂浓度变化和温度的增量变化来模拟甘肃陇中不同降水年型旱地春小麦生产的潜在趋势,分析出未来情景下春小麦产量变异系数和可持续性指数值的变化,评估气候变化所带来的产量风

险,为后期探索调整和制定新的管理措施提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验站概述

选择在甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村进行田间试验(35°35'N,104°38'E)。试验地海拔约 2 000 m,属半干旱大陆性气候,光能资源充足,降雨量主要集中在 6—9 月,且 400 mm 降水保证率低于 50%,气候干燥,土壤类型以灰钙土为主,易蒸发,属于典型的黄土丘陵沟壑区。

1.2 模型简介

本研究采用 APSIM 7.10 进行模拟仿真,APSIM (Agricultural production systems simulator)是农业生产系统模拟器,能够模拟各种植物、动物、土壤、气候和管理交互系统,可以用来探讨粮食安全、气候变化适宜等方面的解决办法,同时解决长期资源管理问题^[15]。APSIM 模型需要提供气象数据、土壤参数(表 1)、品种参数(表 2)和管理措施。

表 1 土壤参数
Table 1 Soil parameters

土层深度 Soil depth /cm	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	风干含水量 Air drying moisture /(mm·mm ⁻¹)	田间最大持水量 Drained upper limit /(mm·mm ⁻¹)	饱和含水量 Saturated moisture /(mm·mm ⁻¹)
0~5	1.290	0.013	0.270	0.460
5~10	1.226	0.013	0.270	0.490
10~30	1.325	0.046	0.270	0.450
30~50	1.200	0.071	0.270	0.500
50~80	1.140	0.087	0.260	0.520
80~110	1.140	0.103	0.270	0.520
110~140	1.250	0.107	0.270	0.480
140~170	1.120	0.115	0.270	0.530
170~200	1.110	0.127	0.270	0.530

本文选用归一化均方根误差(NRMSE)和一致性指标(D)对 APSIM-Wheat 模型是否可以有效模拟旱地春小麦产量对不同降水年型下气候变化的响应进行验证。

$$NRMSE = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_o - Y_s)^2} \over Y_m \tag{1}$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_s)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_o - Y_m| + |Y_s - Y_m|)^2} \quad (2)$$

式中, n 代表试验年份, Y_o 代表产量实测值, Y_s 代表产量模拟值; Y_m 代表实测产量的平均值。

1.3 气候场景构建及试验设计

第一个数据集(以下简称基线情景)从试验点气象站自动测定,包括 1979 — 2018 年的逐日天气数据。气象数据包括研究区最低温($T_{\min}$)、最高温($T_{\max}$)、降水量(mm)、太阳辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)、蒸发量(mm)。

IPCC 指出,大气中 CO_2 浓度在 21 世纪末将达到 $730 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 且全球地表平均温度将升高 $1.0^\circ\text{C} \sim 3.7^\circ\text{C}$ [16]。使用 Lana 等 [17] 使用的增量法构建了综合天气情景(以下简称未来情景)。据此在模拟过程中,以每日平均温度为基点,每次变化增加 1°C ,即温度增量分别为 0°C , 1°C , 2°C , 3°C , 4°C , 5°C 。 CO_2 浓度从 300 ppm 增加到 700 ppm(每次增加 100 ppm,共 5 个水平)。然后将每个温度与 CO_2 的变化做因子组合,得出 25 个未来情景。

表 2 ‘定西 35 号’小麦生长发育参数
Table 2 Growth and development parameters
of ‘Dingxi 35’ wheat

参数 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	
潜在籽粒灌浆速度 Potential grain filling rate	0.001	$\text{g} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
灌浆期到成熟期积温 Thermal time start filling to mature	580	$^\circ\text{C} \cdot \text{d}$
分蘖重 Weight of tiller	1.22	$\text{g} \cdot \text{tiller}^{-1}$
株高 Stem length	1000	mm
最大谷粒重 Max grain size	0.045	g

试验小区面积为 $20 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,土壤类型为黄绵土,土壤容重 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH 值为 8.36。试验春小麦品种选取‘定西 35 号’,3 月中旬播种(正常播),播种量为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,传统耕作方式,播种深度为 30 mm,无灌溉措施。

1.4 数据分析

1.4.1 无量纲化 采用模糊数学中的隶属函数进行无量纲化 [18],方法如下:

$$C = \frac{x_i - u(x_1 : x_n)}{\sigma(x_1 : x_n)} \quad (3)$$

式中, C 代表无量纲编码, x_i 为因素取值($i = 1, 2, \dots, n$), u 为样本均值; σ 代表标准差。

1.4.2 不同降水年型划分 本文采用小麦生育年+休闲期 [19] 的概念,算出试验年份(48 a)的春小麦全年降水量和全生育期降水量,根据公式(4) 计算得出干旱指数,由此来划分干旱年、平水年和湿润年。

$$R = (P - M) / \sigma \quad (4)$$

(干旱年: $R < -0.35$;平水年: $-0.35 < R < 0.35$;湿润年: $R > 0.35$)

式中, R 代表干旱指数, σ 是标准差, P 代表生育年降水量, M 为生育年平均降水。具体年型划分见表 4。

表 3 因素编码
Table 3 Factor coding

编号 No.	温度/ $^\circ\text{C}$ Temperatrue	编码 Code	CO_2 浓度 CO_2 concentration $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	编码 Code
1	0	-2	370	-1.62
2	1	-1	400	-1
3	2	0	500	0
4	3	1	600	1
5	4	2	700	2

表 4 试验年份不同降水年型划分
Table 4 Division of different precipitation year types in test years

年型 Model year	平均降水量/mm Average precipitation	年份 Year								合计/a Total
干旱年 Drought year	136.4	1971	1974	1975	1976	1982	1995	1997	2000	13
		2001	2008	2009	2011	2017				
平水年 Normal year	202.6	1970	1972	1973	1980	1981	1983	1985	1987	21
		1988	1989	1992	199	1996	2002	2004	2006	
		2007	2010	2014	2015	2016				
湿润年 Wet year	270.0	1977	1978	1979	1984	1986	1990	1991	1993	15
		1998	1999	2003	2005	2012	2013	2018		

1.4.3 产量风险评估方法

(1) 产量稳定性。产量稳定性采用统计学中的变异系数^[20](*CV*) 对不同降水年型下的产量进行分析,*CV* 的值越小表明系统的稳定性越高。

$$CV = \sigma / M \tag{5}$$

式中, σ 和 M 分别表示产量的标准差和平均值。

(2) 产量可持续性

产量可持续性采用可持续性指数(*SYI*) 对不同降水年型下的产量进行分析,*SYI* 的值越大可持续性越强。

$$SYI = (M - \sigma) / M_{\max} \tag{6}$$

式中, $M_{\max}$ 为试验年份中的最大值。

低变异系数值和高可持续性指数值所对应的产量风险最小,反之产量风险最大。

1.5 数据处理

本文利用 Excel 2010 对数据进行简单整理,SPSS 软件进行显著性分析,DPS 软件对其进行通径分析,软件 Origin 2018 和 Visio 2014 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型的调参验证

基于 APSIM 模型模拟旱地春小麦产量与田间实测值的关系(图 1)。本研究利用 2002—2009 年连续田间定位试验,将产量实测数据与模拟结果比对,小麦产量的模拟值和实测值相关性 $R^2 = 0.96$ 、归一化均方根误差 $NRMSE = 0.12$ 及 $D = 0.84$,表明 APSIM 模型模拟的产量与田间实测数据具有良好的一致性。

通过基于 2002—2009 年和 2016—2018 年不同降水年型下的试验区大田试验数据,对 APSIM 模型模拟结果进行验证。相关分析(表 5)可得出,APSIM-Wheat 模型对平水年和湿润年春小麦产量

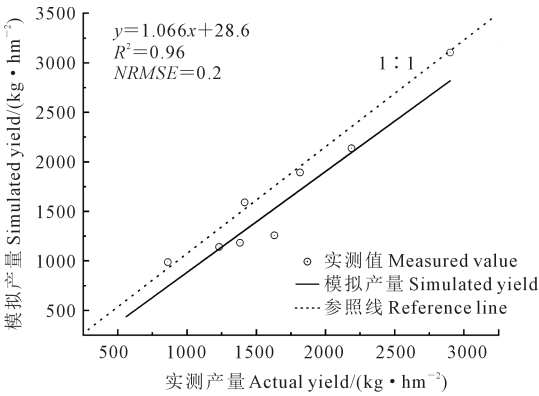


图 1 小麦产量模拟值和实测值的线性回归拟合

Fig.1 Linear regression fitting of simulated and measured wheat yield

的模拟值和实测值的归一化均方根误差(*NRMSE*) 在 6.5%~12.7%之内,一致性指标(*D*) 均大于 0.85,而干旱年产量的模拟值和实测值的归一化均方根误差(*NRMSE*) 为 20.3,一致性指标(*D*) 小于 0.8,表明 APSIM-Wheat 模型对于旱年和湿润年下春小麦产量的模拟精度高于平水年产量的模拟。

2.2 不同降水年型下 CO₂ 浓度和温度共同升高对春小麦产量的潜在变化

降水、气温和 CO₂ 浓度等气候因子对作物的影响并非是独立的,多因子间的交互作用对农作物的产量形成和生长发育有着重要的影响。对不同降水年型 CO₂ 浓度和温度共同升高变化下的春小麦产量进行分析,由图 2 可知,3 种降水年型春小麦产量均随着 CO₂ 浓度的升高而增加,随着温度的升高而减少,随着 CO₂ 浓度升高和增温共同升高而减少。在 CO₂ 浓度和温度共同升高的协同作用下,干旱年的模拟产量在 690.4~1 889.6 kg·hm⁻² 之间,平水年的模拟产量在 1 240.3~2 965.8 kg·hm⁻²,湿润年的模拟产量在 1 208.38~3 540.51 kg·hm⁻²,湿润年的春小麦年均产量是平水年的 1.06 倍,是干旱年的 1.61 倍。

2.3 降水量、CO₂ 浓度和温度对春小麦产量的相关性分析

利用软件 SPSS 25.0 对不同降水年型下 CO₂ 浓度和温度作用下的模拟数据进行单变量分析。在设置显著性水平为 0.05(置信区间 95%)的前提下,分析得出降水量、CO₂ 浓度和温度的 α 值均小于 0.05,表明三因素均对春小麦产量具有极显著影响。

2.4 不同降水年型下春小麦产量与 CO₂ 浓度和温度的回归分析

在试验设计范围内,选取 APSIM 模型模拟数据,在 DPS 数据处理系统中进行通径分析。其中:因变量 Y 为春小麦产量,自变量为 CO₂ 浓度(X_1) 和温度(X_2)。

表 5 模拟产量与实测产量相关性
Table 5 Correlation between simulated yield and measured yield

年型 Model year	模拟产量 平均值 Simulated yield /(kg·hm ⁻²)	实测产量 平均值 Actual yield /(kg·hm ⁻²)	<i>RMSE</i> /(kg·hm ⁻²)	<i>NRMSE</i> /%	<i>D</i>
干旱年 Drought year	1092.00	1001.0	14.31	12.7	0.86
平水年 Normal year	1428.25	1156.5	12.10	20.3	0.71
湿润年 Wet year	2110.35	2019.0	22.30	6.5	0.88

湿润年型下 CO_2 浓度和温度对春小麦产量的通径分析表明(图 3a), $X_1 \rightarrow Y, X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 0.7915 和 0.0348, $X_2 \rightarrow Y, X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 -0.5751 和 -0.0242, 表明湿润年型相同温度下 CO_2 浓度增加, 小麦产量增加, 相同 CO_2 浓度下温度增加, 小麦产量减少; $X_1 X_2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数是 -0.0970, 表明此年型两因素互作效应下小麦产量减少。

平水年型下(图 3b), $X_1 \rightarrow Y, X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 0.8952 和 0.0430, $X_2 \rightarrow Y, X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 -0.4937 和 -0.1443, 表明平水年型相同温度下 CO_2 浓度增加, 小麦产量增加, 相同 CO_2 浓度下温度增加, 小麦产量减少; $X_1 X_2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数是 -0.1888, 表明此年型两因素互作效应下小麦产量减少。

干旱年型下(图 3c), $X_1 \rightarrow Y, X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 0.6476 和 0.0193, $X_2 \rightarrow Y, X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别是 -1.1157 和 0.2985, 表明干旱年型

相同温度下 CO_2 浓度增加, 小麦产量增加, 相同 CO_2 浓度下温度增加, 小麦产量减少; $X_1 X_2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数是 -0.1686, 表明此年型两因素互作效应下小麦产量减少。

据上述分析可得, CO_2 浓度增加对春小麦产量的增产效应表现为平水年 (0.8952) > 湿润年 (0.7915) > 干旱年 (0.6476), 温度升高对春小麦产量的减产效应表现为干旱年 (-1.1157) > 湿润年 (-0.5751) > 平水年 (-0.4937), 温度对小麦产量的变化具有主导影响, 所以两因素协同作用表现为减产效应, 平水年 (-0.1888) > 干旱年 (-0.1686) > 湿润年 (-0.0970)。

2.5 不同降水年型下 CO_2 浓度升高和增温对春小麦产量的变异系数和可持续指数分析

通过在 APSIM 模型组件中对 CO_2 浓度升高和增温进行耦合模拟, 模拟得到未来情景春小麦在 3 种降水年型下的潜在产量, 然后分析气候变化下的产量变异系数(图 4)和可持续指数(图 5)。小麦的

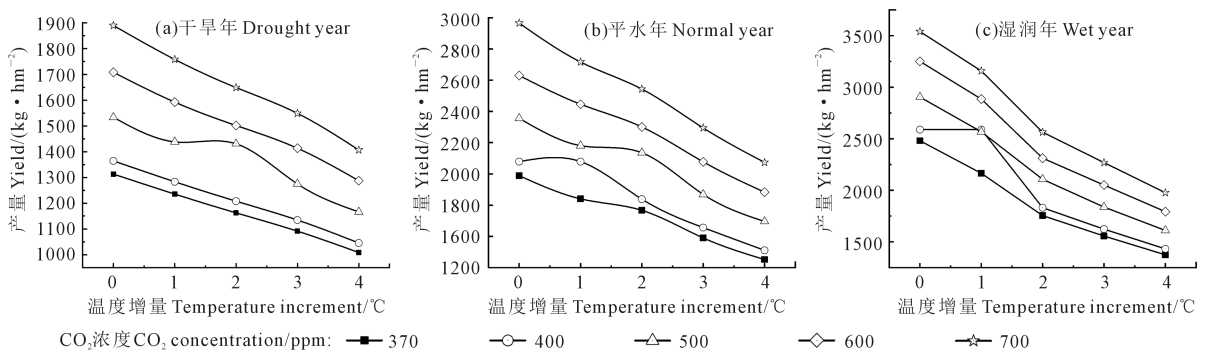
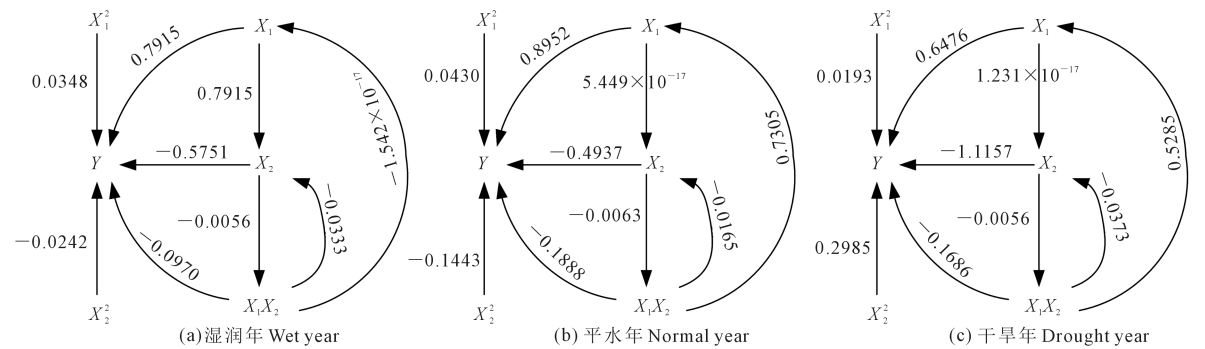


图 2 不同降水年型下 CO_2 和温度同时升高对春小麦产量的影响
Fig.2 Effects of simultaneous increase of CO_2 and temperature on spring wheat yield under different precipitation years



注: 因变量 Y 为春小麦产量, 自变量为 CO_2 浓度 (X_1) 和温度 (X_2)。
Note: The dependent variable Y is spring wheat yield, and the independent variable is CO_2 concentration (X_1) and temperature (X_2).

图 3 不同降水年型下 CO_2 浓度和温度对春小麦产量的通径分析

Fig.3 Path analysis of CO_2 concentration and temperature on spring wheat yield under different precipitation

产量变异系数值变化趋势为平水年>干旱年>湿润年。小麦的产量可持续指数值变化趋势为湿润年>平水年>干旱年,说明小麦产量的可持续性随着降水年型由干旱到湿润在逐渐增加。平水年产量变异系数和可持续性规律性较差,可能是因为 APSIM 模型对平水年敏感性模拟较差且作物生育期内降水的不均匀所致。

图 4 显示了不同年型 CO₂浓度升高和增温处理下小麦产量的变异系数。单因素作用下,干旱年和湿润年型产量变异系数值随着温度增加先升后降,均在增温 2.5℃ 处理下产量变异系数值达到最大,表明在增温 2.5℃ 时干旱年和湿润年型小麦产量稳定性最弱;平水年型产量变异系数值在增温 0~1℃ 规律性较差,在增温 1~4℃ 随着温度增加先降后升,在增温 1℃ 和 4℃ 处理下产量变异系数值达到最大,表明在增温 1℃ 和 4℃ 时平水年型小麦产量稳定性最弱。

图 5 显示了不同年型 CO₂浓度升高和增温处理下小麦产量的可持续性指数。单因素作用下,当温度不变时,干旱年产量可持续指数值随着温度增加先降后升,均在增温 3℃ 处理下产量可持续性指数值达到最小,表明在增温 3℃ 时干旱年型小麦产量可持续性最弱;湿润年产量可持续指数值随着温度

增加先升后降然后趋于稳定,在增温 2℃ 处理下产量可持续性指数值达到最小,表明在增温 2℃ 时湿润年型小麦产量可持续性最弱;平水年型产量可持续性指数值规律性较差,在增温 0~1℃ 处理下产量可持续性指数值达到最小,表明在增温 0~1℃ 时湿润年型小麦产量可持续性最弱。

3 种降水年型下产量变异系数和可持续性指数值随着 CO₂浓度升高变化较小,表明 CO₂浓度升高并不会影响小麦产量变异系数和可持续性指数。

3 讨 论

3.1 模型调参和验证

APSIM 作为目前主流的作物模型,在黄土高原地区模拟过的作物有小麦、苜蓿、玉米和豌豆等,前人在之前的试验中已对 APSIM 模型在试验区进行参数率定^[21]。也有不少学者基于 APSIM 模型对气候变化和不同降水年型下的旱地小麦产量的形成进行了模拟^[22-24]。本试验在对 APSIM 模型重新进行了参数率定和模型验证的基础上,模拟得出 APSIM 模型对试验区不同降水年型春小麦产量有较好的适用性,但是平水年的模拟精度低于干旱年和湿润年型。

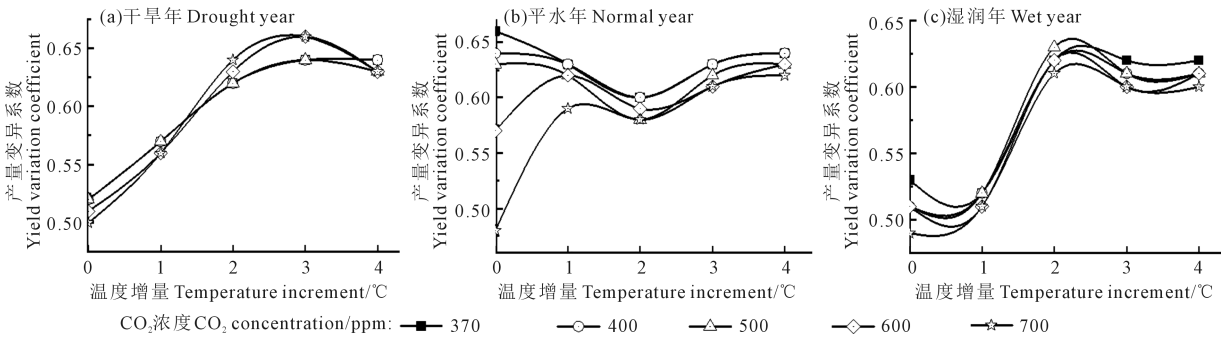


图 4 不同降水年型下产量的变异系数

Fig.4 Variation coefficient of yield under different precipitation years

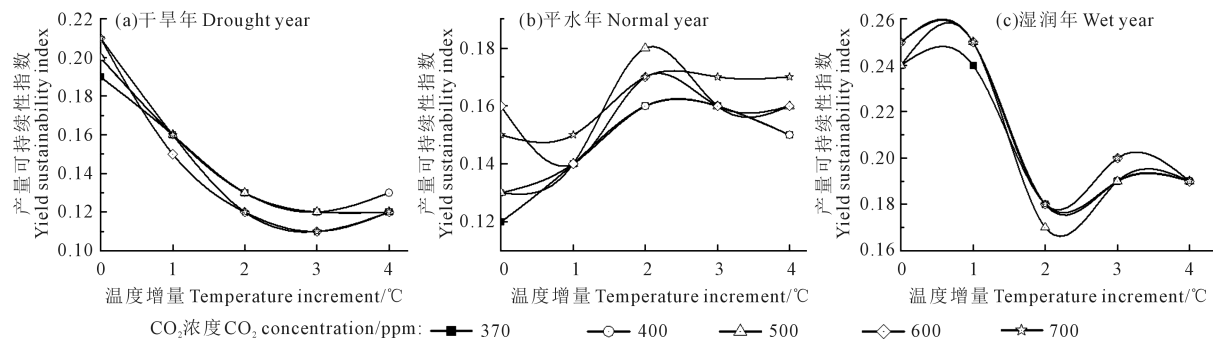


图 5 不同降水年型下产量的可持续指数

Fig.5 Sustainability index of yield under different precipitation years

3.2 未来气候情景构建

本文采用合成气候情景的方法模拟甘肃陇中未来气候情景。在这项研究中使用的数据是气候变量的大小变化(气温升高和CO₂浓度变化),没有考虑潜在可变性的气候变化(如降水的时空分布)。然而气温升高和相关CO₂浓度的因子组合,以及降水量的增加和减少,可以作为评估温度和CO₂对作物发育和生长影响的重要工具。

3.3 不同降水年型下未来气候情景春小麦产量变化的潜在趋势和风险评估

通过对未来情景的潜在产量进行回归分析得出,3种降水年型下温度和CO₂均影响小麦产量,但变化趋势表现不同,增温与春小麦产量呈负相关,CO₂浓度升高与春小麦产量呈正相关,在温度和CO₂两因素共同影响下,降水效应表现为湿润年>平水年>干旱年。本研究表明气候变暖使陇中雨养区春小麦产量下降,但是Zhao等^[25]在内蒙古地区的研究表明,内蒙古西部和中部地区气温升高会降低春小麦产量,而内蒙古东部地区由于气温升高使小麦产量增加。赵鸿等^[26]研究表明小麦产量对气候变量(平均气温、累计降水量、CO₂浓度)的敏感性具有空间异质性,不同区域增温效应不同可能和降水的区域性差异有关,但是小麦产量更容易受到气候变暖的负面影响。本研究得出CO₂浓度升高对旱地春小麦产量具有促进作用,与其他学者研究一致^[27-29],但也因试验环境和品种的不同而表现出产量及其构成的差异。

小麦产量对各气候变量的敏感性不同,不同气候变量对产量变化的贡献也存在差异。本研究得出温度对小麦产量的变化具有主导影响,温度对春小麦产量负效应大于CO₂浓度对春小麦产量的正效应,与李广等^[30]的研究结果一致。

对比产量的变异系数和可持续指数值发现,小麦的产量变异系数值变化趋势为平水年>干旱年>湿润年,产量可持续指数值变化趋势为湿润年>平水年>干旱年,平水年产量变异系数和可持续性指数值规律性较差,可能是因为APSIM模型对平水年敏感性模拟较差且作物生育期内降水的不均匀所致,这与茹晓雅等^[24]和尹嘉德等^[31]研究结果基本一致。不同年型在增温处理下产量变异系数和可持续指数变化规律相同,但在增温变化范围内所对应的稳定性强度和可持续性有所不同。结合产量的变异系数值和可持续性指数值可得,干旱年在增温2.5~3℃处理下小麦产量风险最大;湿润年在增温2~2.5℃处理下小麦产量风险最大;平水年在增

温1℃处理下小麦产量风险最大。

4 结 论

1) APSIM 模型可以较好地模拟陇中旱地春小麦产量,干旱年和湿润年春小麦产量的模拟精确性高于对平水年春小麦产量的模拟。

2) CO₂浓度和温度均对陇中旱地春小麦产量具有显著影响,其中温度对陇中旱地春小麦小麦产量的变化具有主导影响。与CO₂浓度相比,温度升高对旱地春小麦产量的变异性 and 可持续性影响较大。

3) APSIM 模型和数学统计方法分析表明,不同降水年型下CO₂浓度和温度对陇中旱地小麦的产量效应不同,CO₂浓度升高有促进作用,温度升高对春小麦产量有抑制作用。CO₂浓度升高的增产效应为平水年>湿润年>干旱年;温度升高的减产效应为干旱年>湿润年>平水年;CO₂浓度和温度同时升高协同作用下的减产效应表现为平水年>干旱年>湿润年。

4) 结合陇中旱地春小麦产量的变异系数值和可持续性指数值可得,干旱年增温2.5~3℃小麦产量风险最大;湿润年增温2~2.5℃小麦产量风险最大;平水年增温1℃小麦产量风险最大。

参 考 文 献:

[1] ADDY J W G, ELLIS R H, MACDONALD A J, et al. The impact of weather and increased atmospheric CO₂ from 1892 to 2016 on simulated yields of UK wheat[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2021, 18(179): 20210250.

[2] MOREL J, KUMAR U, AHMED M, et al. Quantification of the impact of temperature, CO₂, and rainfall changes on Swedish annual crops production using the APSIM model[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5: 178.

[3] 庞艳梅, 陈超, 徐富贤, 等. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1661-1672.

PANG Y M, CHEN C, XU F X, et al. Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020, 28(11): 1661-1672.

[4] 李彦生, 金剑, 刘晓冰. 作物对大气CO₂浓度升高生理响应研究进展[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1819-1830.

LI Y S, JIN J, LIU X B. Physiological response of crop to elevated atmospheric carbon dioxide concentration: a review[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(12): 1819-1830.

[5] 徐延红, 李树岩. 气候变化对河南省小麦和玉米气候资源利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 218-225.

XU Y H, LI S Y. Impact of climate change on climatic resources utilization efficiency of wheat and maize in Henan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 218-225.

[6] 刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 等. 气候变化背景下1981~2010中国小

- 麦物候变化时空分异[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(7): 888-898.
- LIU Y J, CHEN Q M, GE Q S, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(7): 888-898.
- [7] 周景博, 刘亮. 未来气候变化对中国小麦产量影响的差异性研究——基于 Meta 回归分析的定量综述[J]. 中国农业气象, 2018, 39(3): 141-151.
- ZHOU J B, LIU L. Study on the differences of the impact of future climate change on wheat yield in China—quantitative review based on meta regression analysis[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(3): 141-151.
- [8] 逯玉兰, 李广, 闫丽娟, 等. 1971-2017 年陇中地区气候变化及其对旱地春小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 234-242.
- LU Y L, LI G, YAN L J, et al. Climate changes in middle of Gansu Province from 1971 to 2017 and its impact on yield of dryland spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(2): 234-242.
- [9] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 161-170.
- ZHANG K, WANG R Y, FENG Q, et al. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 161-170.
- [10] 孙昊蔚, 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): 771-782.
- 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): 771-782.
- [11] KLEINEN T, GROMOV S, STEIL B, et al. Atmospheric methane underestimated in future climate projections[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(9): 094006.
- [12] 古丽娜扎尔·艾力, 陶海宁, 王自奎, 等. 基于 APSIM 模型的黄土旱塬区苜蓿——小麦轮作系统深层土壤水分及水分利用效率研究[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 22-33.
- ALI G, TAO H N, WANG Z K, et al. Evaluating the deep-horizon soil water content and water use efficiency in the alfalfa-wheat rotation system on the dryland of Loess Plateau using APSIM[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(7): 22-33.
- [13] 黄秋婉, 刘志娟, 杨晓光, 等. 东北三省西部春玉米适应气候变化的高产高效灌溉方案分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4470-4484.
- HUANG Q W, LIU Z J, YANG X G, et al. Analysis of suitable irrigation schemes with high-production and high-efficiency for spring maize to adapt to climate change in the west of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4470-4484.
- [14] 张镇涛, 杨晓光, 高继卿, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米适宜播期分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(17): 3258-3274.
- ZHANG Z T, YANG X G, GAO J Q, et al. Analysis of suitable sowing date for summer maize in North China plain under climate change[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17): 3258-3274.
- [15] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 750-758.
- LIN Z H, MO X G, XIANG Y Q. Research advances on crop growth models[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 750-758.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013-the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [17] LANA M A, EULENSTEIN F, SCHLINDWEIN S L, et al. Yield stability and lower susceptibility to abiotic stresses of improved open-pollinated and hybrid maize cultivars[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(4): 30.
- [18] 李广, 黄高宝. 基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 342-347.
- LI G, HUANG G B. Determination of the effect of precipitation distribution on yield of wheat and pea in dryland using APSIM[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2010, 18(2): 342-347.
- [19] 李晓州, 郝明德, 赵晶, 等. 不同降水年型下长期施肥的小麦产量效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3237-3244.
- LI X Z, HAO M D, ZHAO J, et al. Effect of long-term fertilization on wheat yield under different precipitation patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3237-3244.
- [20] 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): 103-112.
- 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): 103-112.
- [21] 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): 2655-2663.
- 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): 2655-2663.
- [22] 聂志刚, 冯仰强, 董莉霞, 等. 不同降水年型下温度升高对旱地春小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2021, 29(7): 1151-1158.
- NIE Z G, FENG Y Q, DONG L X, et al. Effect of temperature increase on dryland spring wheat yield in different precipitation years[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2021, 29(7): 1151-1158.
- [23] 康华靖, 楼珏, 王复标, 等. 小麦水分利用效率对 CO₂ 浓度响应的模型研究[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(9): 1171-1179.
- KANG H J, LOU J, WANG F B, et al. Study on response model of water use efficiency in wheat to CO₂ concentration[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(9): 1171-1179.
- [24] 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.
- RU X Y, LI G, CHEN G P, et al. Regulation effects of water and nitrogen on wheat yield and biomass in different precipitation years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(11): 1725-1734.
- [25] ZHAO J F, PU F Y, LI Y P, et al. Assessing the combined effects of climatic factors on spring wheat phenophase and grain yield in Inner Mongolia, China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0185690.