

基于 APSIM 模型的降水和温度变化对秸秆覆盖冬小麦产量的影响

蒲锦琳^{1,2}, 王 俊^{1,2*}, 王科锋³, 白红英^{1,2}, 杨彩迪¹,
冯江茹^{1,2}, 赵 洁^{1,2}, 陈金法^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;
3. 西北大学生命科学学院, 西安 710069)

摘 要: 为探究秸秆覆盖处理下降水和温度变化对冬小麦产量的影响, 基于秸秆覆盖长期定位试验观测数据和 1999—2022 年的逐日气候数据, 运用 APSIM (agricultural production systems simulator) 模型模拟分析了未来降水 (逐日降水 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、0) 和温度 (逐日温度 0 °C、+1 °C、+2 °C、+3 °C、+4 °C) 变化对冬小麦产量的影响, 并对小麦产量变异性及可持续性进行了分析。秸秆覆盖田间试验设计高量覆盖 (HSM, 9 000 kg/hm²)、低量覆盖 (LSM, 4 500 kg/hm²) 和不覆盖对照 (CK) 3 个处理。模拟结果表明: 1) APSIM 模型对 3 种秸秆覆盖处理冬小麦产量和生物量的模拟精度较高, 决定系数 R^2 在 0.75~0.92 之间, 归一化均方根误差在 11.07%~14.65% 之间, 模型一致性指标在 0.84~0.91 之间; 2) 降水和温度变化对冬小麦产量均有显著影响。当温度不变时, 降水增加会提高小麦产量, 处理间的增产效应为 HSM>LSM>CK; 而当降水不变时, 温度升高会导致产量下降, 减产效应为 LSM>HSM>CK; 降水和温度协同作用下同样会导致小麦减产, 处理间的减产效应为 CK>LSM>HSM。3) 与其他气候情景模拟结果相比, 降水减少 20% 和升温 2~3 °C 情景下冬小麦产量具有最大的变异系数和最小的可持续指数, 作物生产风险较高。4) 与 CK 和 LSM 相比, HSM 处理在不同的气候变化情景下平均具有最高的产量和可持续性指数以及最低的变异系数。因此, 未来气候变化背景下, 采用高量覆盖管理措施更有利于黄土高原地区冬小麦生产。

关键词: APSIM 模型; 冬小麦; 产量; 降水; 温度; 秸秆覆盖

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404221

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0101-09

蒲锦琳, 王俊, 王科锋, 等. 基于 APSIM 模型的降水和温度变化对秸秆覆盖冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 101-109. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404221 <http://www.tcsae.org>

PU Jinlin, WANG Jun, WANG Kefeng, et al. Response of winter wheat yield under straw mulching in dryland to precipitation and temperature using APSIM model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 101-109. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404221 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

降水和温度是作物生长的两个主要影响因素, 根据 IPCC 第六次评估报告, 温度持续上升以及降水分配不均, 严重影响了全球作物生产和粮食安全^[1,2]。因此, 探讨不同降水和温度变化对作物产量的影响对调整种植结构、保障粮食稳产、农田管理决策具有重要参考价值。

黄土高原是中国重要的农业生产区域。受区域地理环境特征的影响, 该地区作物生产对气候变化十分敏感^[3,4]。齐月等^[5]研究了近 57 年黄土高原地区的气候变化特征, 结果表明年均温度呈上升趋势, 降水量和太阳

辐射呈下降趋势; 而孙昊蔚等^[6]通过降尺度气象数据集 CMIP5 分析了 RCP4.5 情景下, 黄土高原地区年均最高温和最低温在 2020—2100 年将会升高 0.1~4.03 °C, 年均降水量将会增加-17.87~252.84 mm。目前, 国内不少学者针对气候变化对黄土高原地区农作物影响方面开展了系统研究。例如, 王学春等^[7]利用 EPIC 模型模拟了 1961—2010 年冬小麦产量对降水和温度变化的响应, 发现降水减少和日最高气温增加会导致冬小麦减产, 而增加日最低气温导致冬小麦生产增产。钟新科等^[8]的研究表明近 30 年内, 黄土高原部分地区玉米的生产潜力呈下降趋势。也有研究表明, 冬季气温偏高有利于黄土高原地区冬小麦的生长发育^[9]。

黄土高原农田每年最大蒸散量高于多年平均降水量^[10], 降水量少、年内分配极不均匀, 严重影响作物的生产^[11-12]。近年来, 为了克服水资源不足问题, 秸秆覆盖等水土保持措施在该地区得到了广泛应用^[13-14]。秸秆覆盖可以有效地蓄水保温, 提高作物水分利用效率^[15-16],

收稿日期: 2024-04-30 修订日期: 2024-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1900302); 陕西省农业科技创新驱动项目 (NYKJ-2022-XA-004)

作者简介: 蒲锦琳, 主要研究方向为作物生长模型应用。

Email: 202221214@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者: 王俊, 博士, 教授, 主要研究方向为旱作农田生态系统持续管理。Email: wangj@nwu.edu.cn

但在不同的降水年型以及不同管理措施下, 秸秆覆盖对作物籽粒产量的影响可能表现为增产^[17]、减产^[18] 或不变^[19] 的情况。HAN 等^[20] 收集了黄土高原 74 篇文献数据进行整合分析, 结果表明秸秆覆盖条件下小麦产量受温度和降水影响显著, 与地膜覆盖相比, 秸秆覆盖在生育期低降水量 ($>10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\leq 350\text{ mm}$) 和生育期高降水量 ($\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $>350\text{ mm}$) 下均无产量或水分利用效率的增加效应。因此, 秸秆覆盖对旱地作物潜在生产力的影响尚存在不确定性。

短时间的田间观测难以反映长时间或区域尺度作物产量的变化规律, 尤其是难以反映未来不同的气候变化情境下作物生产响应过程。而随研究技术的发展, 作物模型如 APSIM 模型 (agricultural production systems simulator) 已被广泛用于模拟 CO_2 、降水、温度等气象因子变化对小麦生产的影响^[21,22]。例如任新庄等^[23] 用 APSIM 模型模拟不同温度和降水对陇中旱地春小麦产量的影响, 发现降水增加造成小麦产量增加, 温度升高造成小麦产量下降。但综合来看关于未来降水和温度变化对黄土高原冬小麦产量影响的报道较少, 尤其是秸秆覆盖条件下冬小麦产量如何响应气候变化也需要进一步探究。本文基于 APSIM 模型, 构建了不同降水和温度变化情景, 模拟了不同秸秆覆盖条件下冬小麦产量变化特征, 旨在深化对黄土高原作物生产与气候变化应对的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

冬小麦秸秆覆盖定位试验位于陕西省长武黄土高原农业生态试验站 ($107^{\circ}40'\text{E}$, $35^{\circ}12'\text{N}$)。该区海拔 1 220 m, 属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候, 年均降水量为 584.1 mm, 7—9 月降水全占年总降水量的 56%, 年均气温 $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年日照数 2 230 h, 年辐射总量为 484 kJ/cm^2 。土壤类型为黏壤质黑垆土, 土壤有机碳 (0~20 cm) 含量为 8.53 g/kg, 肥力中等。

1.2 田间试验

田间定位试验于 2014—2021 年开展, 包括 3 个处理: 全年无覆盖对照 (CK)、生育期高量秸秆覆盖 $9\text{ }000\text{ kg/hm}^2$ (HSM)、生育期低量覆盖 $4\text{ }500\text{ kg/hm}^2$ (LSM)。各处理重复 3 次, 共 9 个小区, 完全随机排列, 小区面积 66.7 m^2 ($10.26\text{ m}\times 6.5\text{ m}$)。试验冬小麦品种为长武 134, 播种时间为每年 9 月下旬, 播种密度为 157.5 kg/hm^2 , 次年 6 月收获, 种植方式为旱地垄作, 播种深度为 5 cm, 行距 20 cm, 无灌溉措施。播种前各小区分别施入尿素 (总氮 $\geq 46.6\%$) 135 kg/hm^2 和过磷酸钙 (总磷 (P_2O_5) $\geq 12\%$) 90 kg/hm^2 作为基肥。将当年收获后晒干的秸秆剪至 5~10 cm, 在播种前均匀覆盖于各小区, 并于下一年播种翻耕前清除。冬小麦收获后将小麦脱粒晒干, 计算产量。

1.3 APSIM 模型

1.3.1 模型简介

APSIM 模型是澳大利亚联邦科工组织 (CSIRO) 和

昆士兰州政府的农业农业生态研究组 (APSRU) 共同开发的农业生态系统模拟模型^[24-26]。该模型可以模拟多种耕作措施下作物生长发育过程、产量、不同生长阶段积温、降水量与产量的动态关系以及不同气候情景下的作物产量^[27-29], 可用于评估农业系统的生产潜力, 优化农业管理措施, 模拟气候变化对农业的影响, 以实现农业动态决策和应变管理措施。

APSIM 是一个以日为时间步长的模型, 它由作物 (如小麦、水稻)、土壤水分 (soil water)、土壤氮 (soil nitrogen)、地表残留物 (surface organic matter) 和管理 (manager) 等模块通过中心引擎结合在一起^[25], 用户可以自由选择作物、土壤、管理措施及其他子模块配置自己所需的作物模型^[30,31]。表面残留物的覆盖是通过 Surface OM 模块实现, 在该模块中残留物可以被去除 (如焚烧)、还田或就地分解^[25]。分解是采用一阶动力学模拟地表残留物分解后碳流向土壤的过程, 分解后的一部分碳以 CO_2 形式流失, 另一部分碳流入最顶层的土壤中的微生物量池和腐殖质池, 分解速率受潜在分解率和气温、土壤水分、残留物 C:N 比及地表残留量的影响^[32]。目前 APSIM 已被广泛用于残留物覆盖 (如秸秆、地膜、稻草等) 对作物产量和灌溉管理影响的研究^[32,33]。

模型需要输入的主要数据有气象参数、土壤参数、作物品种参数 (表 1) 和管理参数。气象参数由陕西省长武黄土高原农业生态试验站 (<http://cwa.cern.ac.cn/>) 获取, 主要包括逐日最高温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日最低温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日太阳辐射 (MJ/m^2) 和逐日降水量 (mm)。土壤参数来自研究区田间实测数据和同区域相关文献^[34-35] 的数据, 主要包括土壤有机碳、土壤 pH、凋萎系数、田间持水量等。管理参数是根据田间试验的实际管理措施设定, 主要包括作物播种时间、播种密度、施肥日期、施肥量等。

表 1 作物品种参数

Table 1 Parameters of crop varieties

参数 Parameter	参数值 Value
春化敏感因子 Vernalization sensitivity	2.0
光周期敏感因子 Photoperiod sensitivity	3.0
灌浆期到成熟期积温 Thermal time start filling to mature/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$	650
潜在灌浆速率 Potential grain filling rate/(g grain $^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.003 0
最大谷粒质量 Max grain size/g	0.041

1.3.2 模型调参验证

本文选用标准统计参数中的相关性决定系数 (R^2)、归一化均方根误差 (normalized root mean squared error, NRMSE) 和一致性指标 (D) 对模型的适用性进行评价。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_s - Y_{smean})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_{smean})^2}, \quad (1)$$

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

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_s - Y_o)}{\sum_{i=1}^n (|Y_s - Y_{mean}| + |Y_o - Y_{mean}|)}, \quad (3)$$

式中 n 为试验年份； Y_o 为实测值； Y_s 为模拟值； Y_{mean} 为实测值的平均值； Y_{smean} 为模拟值的平均值。 R^2 、 D 的值越接近 1，NRMSE 的值越接近 0，表明模拟值与实测值之间的误差越小，模拟的稳定性越好。

采用“试错法”调试 APSIM 模型的小麦品种参数，主要包括小麦各生育期内所需积温、灌浆速率等参数（表 1），每次按照 1% 的间隔调整参数，直至模拟结果与实测结果高度吻合。

1.4 气候情景模拟设计

IPCC 对 21 世纪末气候预测指出西北地区降水变化在 10%~20% 范围内^[36]。此外，有研究分析在 RCP4.5 情景下，到 21 世纪末黄土高原的最高温度和最低温度较历史水平增加 0.1~4.03℃^[6]，为进一步了解气候变化趋势对黄土高原小麦生产的影响，本研究以陕西省长武黄土高原农业生态试验站 1999—2022 年的逐日气象数据作为基准数据，设计降水与温度两因子模拟试验，其中降水变化在±20% 范围内，以 10% 为间隔设置 5 个梯度；温度变化范围为增温 0~4℃，以增温 1℃ 为间隔设置 5 个梯度，共 25 个情景变化（表 2）。在 3 种秸秆覆盖量处理下分别进行不同梯度降水和温度的单独变化以及共同变化对冬小麦产量影响的模拟试验。由于降水和温度的量纲与量级不同，故对变量进行无量纲化编码处理。

表 2 降水和温度的模拟试验设计及编码
Table 2 Simulation design and code of precipitation and temperature

编号 No.	降水变化比例 Change of precipitation/%	编码 Code	温度 Temperature/℃	编码 Code
1	-20	0	0	0
2	-10	0.25	1	0.25
3	0	0.50	2	0.50
4	10	0.75	3	0.75
5	20	1.00	4	1.00

1.5 数据处理与分析

1.5.1 产量的变异系数和可持续性指数

1) 产量变异系数。采用统计学中的变异系数 (coefficient of variation, CV) 对不同秸秆覆盖量条件下小麦产量的稳定性进行分析，CV 值越小，表明系统的稳定性越高。

$$CV = \sigma / M \quad (4)$$

式中 σ 和 M 分别表示产量的标准差和平均值，kg/hm²。

2) 产量可持续性指数。采用可持续性指数 (sustainable yield index, SYI) 对不同秸秆覆盖量条件下小麦产量进行分析，SYI 的值越大可持续性越强。

$$SYI = (M - \sigma) / M_{max} \quad (5)$$

式中 M_{max} 为试验年份中的最大值，kg/hm²。

1.5.2 数据处理

用 Excle 2021 对数据进行简单整理，SPSS 22 软件对数据进行回归分析，DPS 软件进行通径分析，Origin

2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型的调参验证

根据试验区 2014—2018 年以及 2020—2021 年实测数据和模拟数据进行模型有效性检验，由图 1 可知，小麦产量和地上生物量的实测值和模拟值呈线性正相关，决定系数 (R^2) 均大于 0.75，归一化均方根误差 (NRMSE) 范围为 11.07%~14.65%，一致性指标 (D) 范围为 0.84~0.91，表明 APSIM 模型拟合性良好，可以用于模拟长武旱地冬小麦产量。

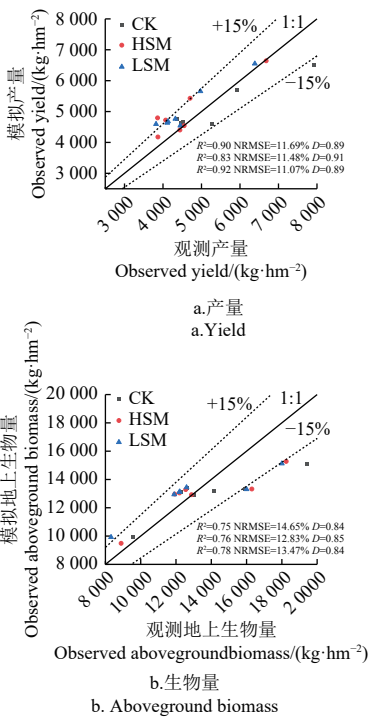


图 1 小麦产量和地上生物量模拟值和实测值的线性回归拟合
Fig.1 Linear regression fitting of simulated and measured wheat yield and aboveground biomass

2.2 秸秆覆盖处理下降水和温度变化对冬小麦产量的影响

在作物品种、土壤属性、管理等因素不变的情况下，运用校正后的 APSIM 模型模拟不同秸秆覆盖处理下降水和温度变化对冬小麦的产量的影响。结果表明（图 2），在 3 种秸秆覆盖量处理中，当降水保持不变时，冬小麦产量随温度的升高而减少；当温度保持不变时，冬小麦产量随降水量的增加而增加，在降水减少 20% 时，小麦产量随温度升高的趋势趋于平缓。在降水和温度的共同作用下，CK 的模拟产量在 2 206~4 827.89 kg/hm²，HSM 的模拟产量在 2 305.20~4 769.21 kg/hm²，LSM 的模拟产量在 2 271.15~4 778.6 kg/hm²，各处理的平均产量为 HSM>LSM>CK。

2.3 秸秆覆盖处理下冬小麦产量与降水和温度的回归分析

以降水 (X_1) 和温度 (X_2) 为自变量，冬小麦产量 (Y) 为因变量，用 DPS 处理系统进行通径分析，结果

如下(图3)。CK处理中, $X_1 \rightarrow Y$ 、 $X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别为1.4179和-0.3118, $X_2 \rightarrow Y$ 、 $X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别是-0.3441和0.2984, 表明相同温度条件下降水增加, 小麦产量增加, 相同降水条件下温度增加, 小麦产量减少; $X_1X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为0.8967,

$X_1X_2 \rightarrow X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为-0.2176, 表明由降水对产量的正效应远远大于温度对产量的负效应, $X_1X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为-0.2391, 表明降水和温度的交互作用下小麦产量减少, 说明降水增多只能补偿温度升高带来的部分减产。

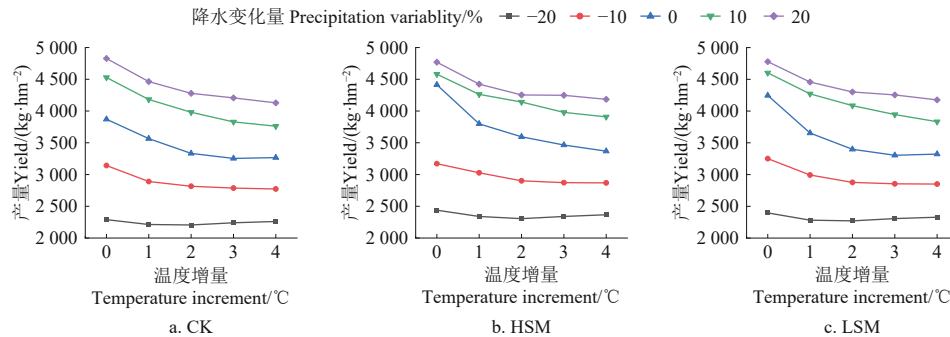


图2 秸秆覆盖处理下降水和温度增加对冬小麦产量的影响

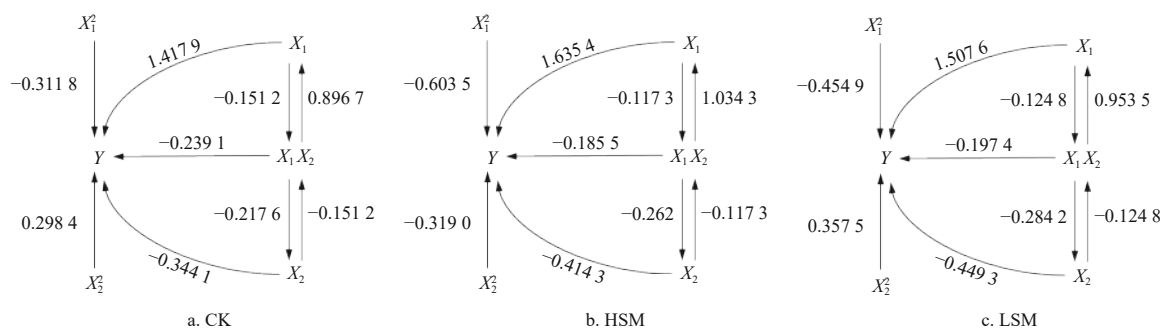
Fig.2 Effects of increased precipitation and temperature on winter wheat yield under straw mulching

HSM处理中, $X_1 \rightarrow Y$ 、 $X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别为1.6354和-0.6035, $X_2 \rightarrow Y$ 、 $X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别是-0.4143和0.3190, 表明相同温度条件下降水增加, 小麦产量增加, 相同降水条件下温度增加, 小麦产量减少; $X_1X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为1.0343, $X_1X_2 \rightarrow X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为-0.262, 表明由降水对产量的正效应远远大于温度对产量的负效应, $X_1X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为-0.1855, 表明降水和温度的交互作用下小麦产量减少, 说明降水增多只能补偿温度升高带来的部分减产。

LSM处理中, $X_1 \rightarrow Y$ 、 $X_1^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别为1.5076和-0.4549, $X_2 \rightarrow Y$ 、 $X_2^2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数分别是-0.4493和0.3575, 表明相同温度条件下降水增加, 小麦产量增加, 相同降水条件下温度增加, 小麦产量减少; $X_1X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为0.9593, $X_1X_2 \rightarrow$

$X_2 \rightarrow Y$ 的间接途径系数为-0.2842, 表明由降水对产量的正效应远远大于温度对产量的负效应, $X_1X_2 \rightarrow Y$ 的直接途径系数为-0.1974, 表明降水和温度的交互作用下小麦产量减少, 说明降水增多只能补偿温度升高带来的部分减产。

据上述分析可得, 降水的增加对冬小麦产量的增产效应表现为HSM处理(1.6354) > LSM处理(1.5076) > CK处理(1.4179), 温度升高对冬小麦产量的减产效应表现为LSM处理(-0.4493) > HSM处理(-0.4143) > CK处理(-0.3441), 说明降水对小麦产量的变化起主导作用。两因素共同作用表现为减产效应, CK处理(-0.2391) > LSM处理(-0.1974) > HSM处理(-0.1855), 说明随秸秆覆盖量的增加, 降水和温度对小麦产量的减产效应影响越小。



注: 因变量Y为冬小麦产量, 自变量为降水(X_1)和温度(X_2)。

Note: The dependent variable Y is winter wheat yield, and the independent variable is precipitation (X_1) and temperature (X_2).

图3 秸秆覆盖处理下降水和温度对冬小麦产量的通径分析

Fig.3 Path analysis of precipitation and temperature on winter wheat yield under straw mulching

2.4 秸秆覆盖处理下冬小麦产量的变异系数和可持续指数分析

运用 APSIM 模型对降水和温度变化进行耦合模拟, 模拟得到冬小麦在3种秸秆覆盖量处理下的产量, 分析气候变化对小麦产量变异系数和可持续指数的影响。由表3可知小麦产量的平均变异系数值为CK>LSM>HSM,

表明产量的稳定性随覆盖量的增加而增加, 小麦产量的平均可持续性指数值为HSM>LSM>CK, 说明随覆盖量的增加, 小麦产量的可持续性增强。

图4显示了秸秆覆盖处理下小麦产量的变异系数。总体来看, 随温度增加和降水的减少, 小麦产量的变异系数在3种覆盖量处理中呈上升趋势; 单因素作用下,

3 种处理的变异系数值随降水量的增加而减小，均在降水量增加 20% 时变异系数值最小，稳定性最好，降水量减少 20% 时变异系数值最大，稳定性最差，说明降水的增加使小麦产量趋于稳定；3 种秸秆覆盖处理的变异系数值随温度的增加而增加，其中，在降水减少 0~20% 时，小麦产量的变异系数增加的趋势较大，降水增加 10%~20% 时，小麦产量的变异系数增加的趋势较为缓慢，说明降水增加 0~20% 时，温度增加对小麦产量的

稳定性影响较小。

表 3 小麦产量的平均变异系数及平均可持续性指数
Table 3 Average coefficient of variation and average sustainable index of wheat yield

处理 Treatments	CV	SYI
CK	0.389	0.362
HSM	0.366	0.384
LSM	0.377	0.375

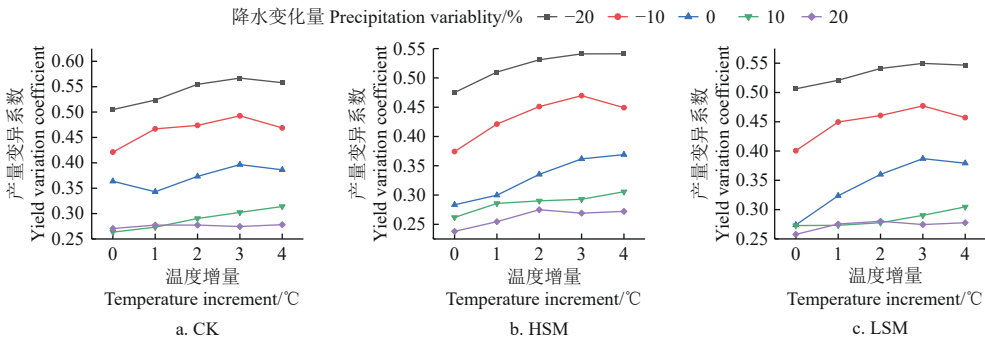


图 4 秸秆覆盖处理下冬小麦产量的变异系数
Fig.4 Coefficient of variation of winter wheat yield under straw mulching

图 5 显示了秸秆覆盖处理下小麦产量的可持续性数。SYI 值越大，表示系统的可持续性越高。单因素作用下，3 种秸秆覆盖处理的可持续性数值随降水量的增加而升高，均在降水量增加 20% 时可持续性数值最大，降水量减少 20% 时可持续性数值最小，说明降水的增加有利于小麦持续增产；3 种秸秆覆盖处理的可持续性数值在增温 3 °C 时最低，表明在增温 3 °C 时 3 种秸秆覆盖处理的小麦持续增产效果较低。在降水减少 0~20% 时，随温

度的增加小麦产量的可持续性数值呈先降后升趋势；降水增加 10%~20% 时，小麦产量的可持续性数值降低的趋势较平缓，说明降水增加 10%~20% 时，温度增加对小麦的持续增产效果影响较小与温度变化相比，降水的增加对 SYI 值的影响更大，表明降水量的增加对试验区小麦产量的持续增产效率高于温度变化，也说明充足的水分对小麦的持续增产有积极作用。

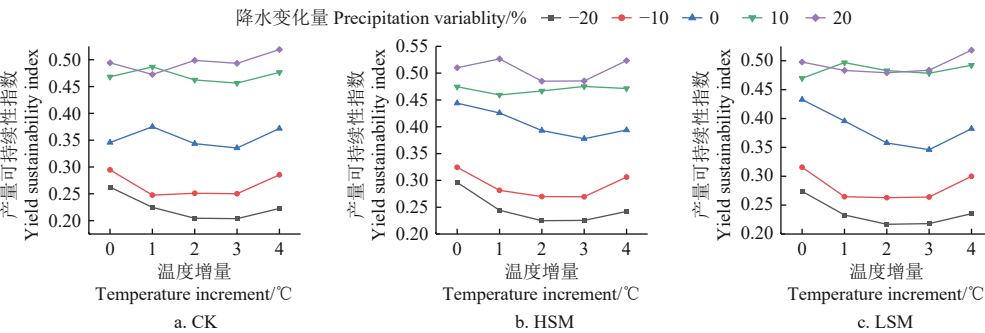


图 5 秸秆覆盖处理下冬小麦产量的可持续指数
Fig.5 Sustainable index of winter wheat yield under straw mulching

3 讨论

为了分析降水和温度变化对冬小麦产量的影响，本文利用研究区冬小麦农田 2014—2018、2020—2021 年不同秸秆覆盖量的试验数据对 APSIM 模型进行校准和验证。在模型模拟研究中，为保证模拟结果的可信度，通常要求模拟值和实测值的 NRMSE 值应低于 30%^[37-38]。本文中，3 种不同秸秆覆盖处理的小麦产量和生物量模拟值与实测值的 NRMSE 值均低于 15%，D 值均高于 0.8，表明 APSIM 模型在黄土高原地区有较好的适用性。

模拟结果表明，3 种不同秸秆覆盖处理下，降水和温度均影响小麦产量，但变化趋势表现不同，降水量增加与冬小麦产量呈正相关，温度升高与冬小麦产量呈负相关，在降水和温度两因素共同作用下，产量表现为 HSM>LSM>CK。研究区域的土壤水分主要来自降水，增加降水量有利于改善土壤水分状况。任新庄等^[23,37]研究也表明，随降水量增加小麦产量增加，这与本研究结果一致。赵刚等^[39,40]通过研究 40 年不同降水情况下小麦产量的变化趋势，表明全年降水量增加通过提升耗水

对于小麦、玉米和大麦,全球产量对升温有明显负面反应。房世波等^[42]通过大田试验研究结果表明在春季增温导致小麦产量降低。这些统计和试验研究结果与本研究结果吻合。宗毓铮等^[43]通过封闭式人工气候室控制小麦生长期间的大气温度,结果表明,温度升高,小麦叶片叶绿素含量降低,产量的形成受到限制;对于降水和温度的负交互效应,张凯等^[40]研究认为春小麦的产量随降水的增加而增加,随温度的升高而降低,即使在降水量增加的情况下,温度升高对产量仍产生不利影响。这与本研究结果一致,原因可能是温度增高导致蒸散量增加,从而增加作物对水分的需求,尽管降水量增加,但它可能不足以弥补蒸散量的增加。此外,降水量可能无法均匀分布,高温条件下局部水分胁迫仍然可能发生,影响作物产量。

对比 3 种不同秸秆覆盖处理产量的变异系数和可持续性指数发现,不同秸秆覆盖量处理在温度和降水变化下产量变异系数和可持续性指数变化规律相同,小麦产量的平均变异系数值为 $CK > LSM > HSM$,小麦产量的平均可持续性指数值为 $HSM > LSM > CK$,说明随着秸秆覆盖量的增加,小麦的稳产性和可持续性增强,这与吴婕等^[44]的结果基本一致。结合不同降水和温度变化下 3 种不同覆盖处理的平均产量表明 HSM 处理的增产性和可持续性更高, YAN 等^[45]通过的大田试验研究结果表明,相对于其他覆盖量, $9\,000\text{ kg/hm}^2$ 的秸秆覆盖更能促进小麦的高产和高水分利用效率。因此,在面对未来气候变化的挑战,高量覆盖是更有利于小麦的生产。这与颜学斌^[46]等研究的结果基本一致。

需要指出的是,本文利用 APSIM 模型进行了作物产量和生物量模拟,尽管模拟精度较高,但模拟结果仍存在一定的不确定性。首先, APSIM 模型本身没有充分考虑极端天气和病虫害对作物生产的影响;另一方面,作物和土壤的实测数据获取过程可能存在一定的测量误差,进而会导致模型作物和土壤参数调试和验证产生偏差^[47];此外,本文中气候情景的设置主要是基于气候要素的整体变化,并未考虑 CO_2 浓度、太阳辐射等其他因素的影响,而气象数据的平均变化也可能受季节或年际变化产生一定的误差^[48],但由于本研究是基于长时间序列的模拟,可在一定程度上降低结果的不确定性。在今后的研究中,应深入研究气候变化中各气象因子的变化对小麦生产的综合影响,并针对小麦的不同生育期进行具体分析,以便于向农业生产提供更精准的风险评估。

4 结 论

1) APSIM 模型可以较好地模拟不同秸秆覆盖处理下冬小麦的产量,小麦的产量和生物量的归一化均方根误差在 $11.07\% \sim 14.65\%$ 之间,模型的一致性指标均高于 0.8。

2) 降水和温度均对旱地冬小麦产量有显著影响,其中降水对冬小麦产量的变化有主导影响。3 种不同秸秆覆盖当温度不变降水增加时,小麦产量上升;当降水不

变温度升高时,小麦产量下降;降水和温度协同作用下同样会导致小麦减产。

3) 不同秸秆覆盖处理均在降水减少 20% 和增温 $2 \sim 3\text{ }^\circ\text{C}$ 情景下,小麦的生产风险较高。

4) 在降水和温度变化情景下,高量覆盖处理的稳产性和可持续性优于其他处理。因此,未来气候变化背景下,高量覆盖管理措施对黄土高原地区冬小麦的生产更

[参 考 文 献]

- [1] 段居琦,袁佳双,徐新武,等.对 IPCC AR6 报告中有关农业系统结论的解读[J].气候变化研究进展,2022,18(4): 422-432.
DUAN Juqi, YUAN Jiashuang, XU Xinwu, et al. Interpretation of the IPCC AR6 report on agricultural systems[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 422-432. (in Chinese with English abstract)
- [2] ZAREA M J. Conservation tillage and sustainable agriculture in semi-arid dryland farming[J]. Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture, 2010, 5: 195-238.
- [3] LIU S. Regional climate simulation ensembles within CORDEX-EA framework over the Loess Plateau: Evaluation and future projections[J]. Atmosphere, 2023, 14(9): 1435.
- [4] ZHENG H, MIAO C, KONG D, et al. Changes in maximum daily runoff depth and suspended sediment yield on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124611.
- [5] 齐月,张强,胡淑娟,等.黄土高原地区气候变化及其对冬小麦生产潜力的影响[J].生态环境学报,2022,31(8): 1521-1529.
QI Yue, ZHANG Qiang, HU Shujuan, et al. Climate change and its impact on winter wheat potential productivity of Loess Plateau in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8): 1521-1529. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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 Haowei, MA Jinghan, WANG Li. 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. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王学春,李军,王红妮,等.黄土高原冬小麦田土壤水分与小麦产量对降水和气温变化响应的模拟研究[J].自然资源学报,2017,32(8): 1398-1410.
WANG Xuechun, LI Jun, WANG Hongni, et al. Simulation of the response of soil water in winter wheat field and winter wheat yield to rainfall and temperature change on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1398-1410. (in Chinese with English abstract)
- [8] 钟新科,刘洛,徐新良,等.近 30 年中国玉米气候生产潜力时空变化特征[J].农业工程学报,2012,28(15): 94-101.
ZHONG Xinke, LIU Luo, XU Xinliang, et al. Characteristics of spatial-temporal variation of maize climate productivity during last 30 years in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 94-101. (in Chinese with English abstract)
- [9] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等.黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J].生态学报,2012,32(16): 5154-5163.

- YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al. Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5154-5163. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张雷明, 上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 59-63.
- ZHANG Leiming, SHANGGUAN Zhouping. Relationship between the soil moisture and the vegetation productivity in the Loess Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19(4): 59-63. (in Chinese with English abstract)
- [11] ZHENG H, SUN Y, BAO H, et al. Drought effects on evapotranspiration and energy exchange over a rain-fed maize cropland in the Chinese Loess Plateau [J]. *Agric Water Manage*, 2024, 293:180711.
- [12] 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 Guang, HUANG Gaobao. 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. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张少宏, 付鑫, MUHAMMAD I, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 236-241, 248.
- ZHANG Shaohong, FU Xin, MUHAMMAD IHSAN, et al. Effects of straw and plastic film mulching on nitrogen composition of soil aggregates in dryland wheat field on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(01): 236-241, 248. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨超, 付鑫, 刘文清, 等. 补施氮肥对秸秆覆盖条件下旱作冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1012-1020.
- YANG Chao, FU Xin, LIU Wenqing, et al. Effects of nitrogen topdressing on photosynthesis and yield formation of winter wheat under straw mulching[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1012-1020. (in Chinese with English abstract)
- [15] 梁昊枫, 党科, 范子晗, 等. 不同生态区覆盖方式对玉米氮转运、产量与水氮利用效率的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 176-187.
- LIANG Haofeng, DANG Ke, FAN Zihan, et al. Effects of mulch measures on nitrogen transport, yield and water and nitrogen use efficiency of maize in different ecological zones[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 176-187. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48-53.
- HAN Bin, LI Zengjia, WANG Yun, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(2): 48-53. (in Chinese with English abstract)
- [17] 蔡太义, 贾志宽, 孟蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 43-48.
- CAI Taiyi, JIA Zhikuan, MENG Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(3): 43-48. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈素英, 牛君仿, 张喜英, 等. 秸秆覆盖温度效应对冬小麦农艺和生理性状的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(5): 820-830.
- CHEN Suying, NIU Junfang, ZHANG Xiying, et al. Temperature effects of straw mulching on the agronomic and physiological characteristics of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 820-830. (in Chinese with English abstract)
- [19] ZHANG S, SADRAS V, CHEN X, et al. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management[J]. *Field Crops Research*, 2014, 163: 55-63.
- [20] HAN X Y, FENG Y, ZHAO J, et al. Hydrothermal conditions impact yield, yield gap and water use efficiency of dryland wheat under different mulching practice in the Loess Plateau[J]. *Agric Water Manage*, 2022, 264: 107422.
- [21] 史鑫蕊, 韩百书, 王紫芊, 等. 基于 APSIM 模型模拟分析气候变化对不同熟性北方冬小麦生长和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(19): 3772-3787.
- SHI Xinrui, HAN Baishu, WANG Ziqian, et al. Investigation on the Effects of climate change on the growth and yield of different maturity winter wheat varieties in Northern China based on the APSIM model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(19): 3772-3787. (in Chinese with English abstract)
- [22] XIAO D P, LIU D L, WANG B, et al. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios[J]. *Agric Water Manage*, 2020, 238: 106238.
- [23] 任新庄, 闫丽娟, 李广, 等. 陇中旱地春小麦产量对降水与温度变化的响应模拟 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 125-129, 155.
- REN Xin Zhuang, YAN Lijuan, LI Guang, et al. Simulation of the effects of precipitation and temperature change on spring wheat yield in dryland of Central Gansu[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 125-129, 155. (in Chinese with English abstract)
- [24] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 148-157.
- HE Liang, ZHAO Gang, JIN Ning, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(14): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [25] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3-4): 267-288.
- [26] 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): 92-102.
- ZHOU Litao, SUN Shuang, GUO Erjing, 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(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(6): 92-102. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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): 230-237, 265.

- LIU Qiang, GAO Xuehui, WANG Jun. 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): 230-237, 265. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO₂ 浓度升高的响应[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 1088-1095.
- LI Guang, LI Yue, HUANG Gaobao, et al. Response of dryland spring wheat yield to elevated CO₂ concentration and temperature by APSIM model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 1088-1095. (in Chinese with English abstract)
- [29] 姚群英, 刘强, 巩敬锦. 不同降水年型下光温变化对旱地春小麦产量的影响[J]. *作物研究*, 2023, 37(4): 328-334, 342.
- YAO Qunying, LIU Qiang, GONG Jingjin. Effects of changes of light and temperature on spring wheat yield in dryland under different precipitation years[J]. *Crop Research*, 2023, 37(4): 328-334, 342. (in Chinese with English abstract)
- [30] 蒙继华, 王亚楠, 林圳鑫, 等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 1-15, 27.
- MENG Jihua, WANG Yanan, LIN Zhenxin, et al. Progress and perspective of crop growth models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 1-15, 27. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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): 167-178.
- GONG Jingjin, LIU Zhijuan, ZHU Guangxin, 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(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(8): 167-178. (in Chinese with English abstract)
- [32] TADIELLO T, GABBRIELLI M, BOTTA M, et al. A new module to simulate surface crop residue decomposition: Description and sensitivity analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2023, 480: 110327.
- [33] XIAO D, LIU D L, FENG P, et al. Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain[J]. *Agric Water Manage*, 2021, 246: 106685.
- [34] 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, (1): 59-65.
- XU Fang, HE Jianqiang, ZHU Xiaohua, et al. Evaluation of impact of sowing date and planting density on climatic productivity of maize in Guanzhong region by APSIM model[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2022, (1): 59-65. (in Chinese with English abstract)
- [35] 毛鑫, 杨建利, 朱晓华, 等. 陕西关中冬油菜生长发育不同模型模拟精度研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 306-314.
- MAO Xin, YANG Jianli, ZHU Xiaohua, et al. Simulation accuracy of growth and development of winter apace (*Brassica napus* L.) in Guanzhong Plain with different crop models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 306-314. (in Chinese with English abstract)
- [36] IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis[M]// STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [37] 杨轩, 王自奎, 曹铨, 等. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 106-114.
- YANG Xuan, WANG Zikui, CAO Quan, et al. Effects of precipitation and air temperature changes on yield of several crops in Eastern Gansu of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 106-114. (in Chinese with English abstract)
- [38] 韩雪, 刘强, 王钧, 等. 基于 APSIM 模型的气候变化条件下播期对旱地春小麦产量影响研究[J]. *作物研究*, 2022, 36(6): 499-506.
- HAN Xue, LIU Qiang, WANG Jun, et al. Effects of sowing date on dryland spring wheat yield under climate change based on APSIM model[J]. *Crop Research*, 2022, 36(6): 499-506. (in Chinese with English abstract)
- [39] 赵刚, 王淑英, 李尚中, 等. 黄土旱塬区近 40 年降水对冬小麦耗水和产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(3): 164-173.
- ZHAO Gang, WANG Shuying, LI Shangzhong, et al. Effects of precipitation on yield and water consumption of winter wheat in Loess Plateau in recent 40 years[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(3): 164-173. (in Chinese with English abstract)
- [40] 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(S1): 161-170.
- ZHANG Kai, WANG Runyuan, FENG Qi, 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(Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(S1): 161-170. (in Chinese with English abstract)
- [41] LOBELL D B, FIELD C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1): 014002.
- [42] 房世波, 谭凯炎, 任三学, 等. 气候变暖对冬小麦生长和产量影响的大田实验研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(7): 1069-1075.
- FANG Shibo, TAN Kaiyan, REN Sanxue, et al. Fields experiments in North China show no decrease in winter wheat yields with night temperature increased by 2.0-2.5 °C[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2012, 42(7): 1069-1075. (in Chinese with English abstract)
- [43] 宗毓铮, 张函青, 李萍, 等. 大气 CO₂ 与温度升高对北方冬小麦旗叶光合特性、碳氮代谢及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(23): 4984-4995.
- ZONG Yuzheng, ZHANG Hanqing, LI Ping, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on photosynthetic characteristics, carbon and nitrogen metabolism in flag leaves and yield of winter wheat in North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(23): 4984-4995. (in Chinese with English abstract)
- [44] 吴婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(2): 192-195.
- WU Jie, ZHU Zhonglin, ZHENG Jianguo, et al. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical

- properties and crop yields[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(2): 192-195. (in Chinese with English abstract)
- [45] YAN Q Y, DONG F, LOU G, et al. Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dryland farming[J]. *J Integr Agric*, 2018, 17(11): 2558-2569.
- [46] 颜学斌, 王俊, 王科峰, 等. 基于 DNDC 模型模拟的冬小麦田土壤有机碳和作物产量对地表覆盖的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 42-49.
- YAN Xuebin, WANG Jun, WANG Kefeng, et al. Responses of soil organic carbon and crop yield to surface mulching with straw and plastic film in winter wheat field using DNDC model[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 42-49. (in Chinese with English abstract)
- [47] 赵俊芳, 蒲菲, 闫伟兄, 等. 基于 APSIM 模型识别气象因子对内蒙春小麦潜在产量的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 757-765.
- ZHAO Junfang, PU Feiyu, YAN Weixiong, et al. Identifying the effects of meteorological variables on spring wheat potential yield in Inner Mongolia based on APSIM model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 757-765. (in Chinese with English abstract)
- [48] 朱敏, 牛帅帅, 侯青青, 等. 山西晋中盆地紫花苜蓿生产对水分和气温的响应[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 207-218.
- ZHU Min, NIU Shuaishuai, HOU Qingqing, et al. The response of Alfalfa production in Jinzhong Basin, Shanxi Province to water and air temperature[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 207-218. (in Chinese with English abstract)

Response of winter wheat yield under straw mulching in dryland to precipitation and temperature using APSIM model

PU Jinlin^{1,2}, WANG Jun^{1,2*}, WANG Kefeng³, BAI Hongying^{1,2}, YANG Caidi¹,
FENG Jiangru^{1,2}, ZHAO Jie^{1,2}, CHEN Jinfa^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Xi'an 710127, China; 3. The College of Life Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Wheat production is controlled by precipitation and temperature as well as management practices. However, how wheat yield responds to straw mulching under different climate change scenarios are not well known. Crop models can effectively analyze the impact of different climate conditions and field management practices on crop growth and yield. In this study, based on the observation data from a long-term field experiment that conducted in the Loess Plateau and the on-site daily climatic records from 1999 to 2022, we explored the response of winter wheat to straw mulching under different climate scenarios using the APSIM (agricultural production systems simulator) model. Three treatments as wheat straw mulching at high rate of 9 000 kg/hm² (HSM), low rate of 4 500 kg/hm² (LSM), and no mulching control (CK) were included in the field experiment. Data from field observations of crop growth and soil properties were used to calibrate and validate the APSIM model, ensuring accurate simulation of the conditions. Five levels of precipitation changes (Daily precipitation $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, and 0%) and five levels of temperature changes (Daily temperature $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$) were interacted to established a set of climate change scenarios in APSIM model. The variation coefficient and sustainability index of winter wheat yield were also calculated with the modeling data. The simulation results showed that the APSIM model is powerful simulating the grain yield and aboveground biomass accurately with the determination coefficients varied between 0.75-0.92, the normalized root mean square errors varied between 11.07%-14.65%, and the consistency index D varied between 0.84-0.91, respectively. Both precipitation and temperature changes had significant effects on winter wheat yield, and precipitation was more dominant influence than air temperature. When the temperature was constant, winter wheat yield increased with increasing precipitation, with the yield enhancement effect ranked as HSM>LSM>CK among treatments. However, when the precipitation was constant, winter wheat yield decreased with increasing temperature, with the reduction effect ranked as LSM>HSM>CK. Wheat yield also decreased under the interacted scenarios of precipitation and temperature, with the yield reduction effect ranked as CK>LSM>HSM among treatments. Across all climate change scenarios, winter wheat yield was greater in HSM than in LSM and CK. The sustainability index of winter wheat yield was also higher and the variation coefficient of winter wheat yield was lower in HSM than in LSM and CK. Compared with those under other climate change scenarios, wheat yield had a larger variation coefficient and lower sustainability index under the scenario of 20% decrease in precipitation and 2-3 $^{\circ}\text{C}$ increase in temperature, indicating a high risk in wheat production. In conclusion, winter wheat production in the Loess Plateau region can be improved by adopting high straw mulching in the context of future climate change. The results of the study provide a theoretical basis for future production and management of winter wheat on the Loess Plateau. In future modeling study, more climate change factors should be included to reduce the uncertainties and provide more comprehensive predictions for wheat production.

Keywords: APSIM model; Winter wheat; Yield; Precipitation; Temperature; Straw mulching