

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.040

基于水热耦合的冬小麦-夏玉米产量响应与变化预测

任贺靖¹ 路凯超^{2,3} 蔡甲冰¹ 侯立柱²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083;
3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: 全球气候变化对未来粮食产量影响巨大。水分和温度是冬小麦-夏玉米生长过程中最重要的环境因子,显著影响其产量。利用华北平原保定灌溉试验站 2006—2015 年冬小麦-夏玉米灌溉试验数据对 AquaCrop 模型进行参数率定与校核,依据 Blank 型、Stewart 型、Jensen 型、Minhas 型 4 种经典的水分生产函数,构建冬小麦-夏玉米生育期内各阶段积温、耗水量和产量之间的水热生产函数;在此基础上,利用第六次国际耦合模式比较计划 CMIP6 中海-气耦合全球气候 MIROC6 模式数据来考虑未来气候变化情景,对低强迫排放情景 (SSP1 - RCP2.6 和 SSP4 - RCP3.4)、中等强迫排放情景 (SSP2 - RCP4.5)、中等至高强迫排放情景 (SSP3 - RCP7.0) 和高强迫排放情景 (SSP5 - RCP8.5) 等 5 种未来气候变化情景的逐日降雨量与气温数据进行降尺度分析,并结合构建的水热生产函数对冬小麦-夏玉米产量变化进行分析和预测。结果表明:经多年灌溉试验数据校核后的 AquaCrop 模型可以较好地模拟该地区冬小麦-夏玉米生长过程,夏玉米产量模拟值与实测值间的决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、标准化均方根误差 (NRMSE) 和一致性系数 (d) 分别为 0.91、0.58 t/hm²、0.06、0.97,冬小麦分别为 0.80、0.42 t/hm²、0.10、0.94。通过 AquaCrop 模型模拟的多年数据构建了 4 种水热生产函数,其中 Jensen 型生产函数效果最好;冬小麦在抽穗-灌浆期对水分最敏感,返青-拔节期积温对产量影响效应最明显,而夏玉米在拔节-抽穗期对水分最敏感,本阶段积温对产量的影响效应也最明显。在未来气候变化的 5 种排放情景下,冬小麦潜在产量呈波动趋势,但均高于当前时期的多年平均潜在产量,在 SSP3 - RCP7.0 情景更适合生长发育;夏玉米潜在产量整体呈上升趋势,在 SSP1 - RCP2.6 情景更适合生长发育。在未来 5 种气候情景下,仅考虑水热条件补充灌溉对冬小麦潜在产量的贡献率为 70% 左右;生育期降雨量对夏玉米潜在产量的贡献率为 94% 左右。研究结果可评估未来气候变化下粮食作物产量变化情况,为保障国家粮食安全战略提供理论依据和技术支撑。

关键词: 冬小麦-夏玉米; 积温; 产量; AquaCrop 模型; 水热耦合; CMIP6

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298 (2025)02-0429-15 **OSID:** 

Yield Responses and Predictions of Future Change for Winter Wheat – Summer Maize Based on Water-heat Coupling

REN Hejing¹ LU Kaichao^{2,3} CAI Jiabing¹ HOU Lizhu²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: Global climate change will have a huge impact on future food production. Water and temperature are the most important environmental factors in the growth of winter wheat and summer maize, which significantly affect their yield. Based on the irrigation experimental data of winter wheat and summer maize in Baoding Irrigation Experimental Station in North China Plain from 2006 to 2015, the AquaCrop model was calibrated and validated, offering crop growth process simulations following local conditions. Being similar in structure of the four typical water production functions (Blank model,

Stewart model, Jensen model, Minhas model), the water-heat production functions were set up between accumulated temperature, water consumption, and yield at each growth stage of winter wheat and summer maize. Using the data from the sixth version of the model for interdisciplinary research on climate (MIROC6) of the commentary on the coupled model intercomparison project (CMIP6), the daily rainfall and temperature data were downscaled to consider future climate change, including low carbon emission forcing scenario SSP1 - RCP2.6 and SSP4 - RCP3.4, medium carbon emission forcing scenario SSP2 - RCP4.5, medium to high forcing emission scenario SSP3 - RCP7.0 and high forcing scenario SSP5 - RCP8.5. On this basis, the yields and their changes for winter wheat and summer maize in 2024—2064 were obtained and analyzed by the presented water-heat production function. Results showed that the AquaCrop model made good performances to simulate the growth process of winter wheat - summer maize in this region after its calibration and verification by using ten years of irrigation test data. Among the four kinds of water-heat production functions constructed by the verified AquaCrop model simulation data, the Jensen type function had the highest output simulation accuracy. According to the water-heat production function, winter wheat was most sensitive to water during heading - filling stage, and accumulated temperature during greening - jointing stage had the most obvious effect on yield. Summer maize was most sensitive to water in jointing and heading period, and the accumulated temperature in this period had the most obvious effect on yield. Under the emission scenarios of SSP1 - 2.6, SSP2 - 4.5, SSP3 - 7.0, SSP4 - 3.4, and SSP5 - 8.5 in the five future climates, the potential yield of winter wheat tended to fluctuate, but it was higher than the current average potential yield. By the 2050s, the average potential yield of winter wheat would be 6.07 t/hm², 6.26 t/hm², 6.93 t/hm², 5.74 t/hm², and 5.95 t/hm², respectively. The overall potential yield of summer corn was on the rise, and by 2050s, the average annual potential yield of summer corn would reach 9.27 t/hm², 9.20 t/hm², 9.05 t/hm², 9.10 t/hm², and 9.24 t/hm², respectively. Overall, winter wheat and summer corn were more suitable for growth and development under SSP3 - 7.0 and SSP1 - 2.6 scenarios, respectively. Considering the hydrothermal conditions, the potential yield of winter wheat fluctuated down under the five climate scenarios, while the potential yield of summer maize showed an overall upward trend. Supplementary irrigation can bring about 70% of contribution rate to the potential yield of winter wheat. The contribution rate of rainfall during the growing period to the potential yield of summer maize was about 94%. The results can be used to evaluate the change of crop grain yield in this region under future climate change, and provide theoretical basis and technical support for the national strategy of ensuring food security.

Key words: winter wheat - summer maize; accumulated temperature; yield; AquaCrop model; water-heat coupling; CMIP6

0 引言

粮食安全是国家安全的重要基础,提升粮食生产能力是其基本保障。华北平原是我国重要的粮食主产地,冬小麦和夏玉米是其主要作物,灌溉用水量占农业用水总量的 97% 以上;78.82% 的农业用水来自地下水^[1],水的高效利用对农业可持续发展具有重要作用。在探究作物产量与耗水量的关系时,水分生产函数被广泛应用。根据变量和生育阶段不同,水分生产函数主要分为两类:第 1 类以作物全生育期总耗水量为变量,结合实测数据,利用一元或多元线性回归方法求解水分生产函数^[2-3];第 2 类以不同生育阶段的耗水量和作物水分敏感性为变量,用连加(如 Blank 模型、Stewart 模型、Singh 模型)或连乘(如 Jensen 模型、Minhas 模型)方式构建水分生产函数^[4-5]。除了水分这一重要因素外,作物生长受农田环境各种因素的影响,农业气候中热量资源、光照资源与作物生长发育亦有着密切关系^[6]。因

此许多研究利用水分和其他重要因子进行耦合,衍生出水氮生产函数^[7-9]、水肥生产函数^[10-11]、水盐生产函数^[12-13]等,探究其对产量的共同作用及影响。

积温作为热量资源的指标之一,显著影响冬小麦的生育期和生长发育^[14]。前人探究产量与积温之间的关系时,多用一元线性回归、相关分析、气候倾向率等方法表征积温对变化背景下作物物候期以及产量的变化规律^[15-16]。已有研究表明冬小麦产量指标与各生育阶段积温呈显著相关^[17-19],并且抽穗-灌浆阶段积温与产量的相关性最强^[20]。过去几十年气候变暖已使华北平原冬小麦返青-成熟各阶段提前,从而导致整个生育期缩短,并对产量产生影响^[21-22]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出,相比于 1850—1900 年,全球地表平均气温 2001—2010 年升高 0.99℃,2011—2020 年则上升约 1.09℃^[23]。气候变暖,同时伴随着极端

天气事件频发,粮食高位增产面临极大挑战^[24-25]。因此探究水热耦合关系及未来气候变化对作物产量的影响,对资源高效利用、保障国家粮食安全具有重要意义。

基于此,本文拟以华北平原冬小麦-夏玉米为研究对象,结合典型区多年灌溉试验资料和2022—2023年试验观测数据,利用联合国粮食及农业组织开发的作物-水生产力 AquaCrop 模型构建水热耦合生产函数;在此基础上,根据 IPCC6 框架下未来气候变化情景,探究冬小麦-夏玉米不同生育阶段积温与耗水量对产量的影响,并评估预测未来气候变化下该地区粮食作物产量变化情况,为国家保障粮食安全战略提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况

研究区位于华北平原,灌溉试验在河北省保定市望都县保定灌溉试验站(38°42'09"N,115°06'57"E,海拔51.0 m)进行。保定灌溉试验站土壤属轻壤质潮褐土,作物根区1 m土层的平均田间持水量为21%(质量含水率),容重为1.58 g/cm³,地下水埋深大于20 m。年平均气温11.8℃,年平均降雨量约为508.9 mm,多年平均蒸发量为1 709.56 mm,年平均日照时数为2 677.8 h^[26]。

1.1.2 2022—2023 年灌溉试验

2022—2023 年开展了夏玉米-冬小麦田间灌溉试验。试验区配置有小型自动气象站,观测数据包括日最高/最低气温、相对湿度、降雨量、2 m 处风速、太阳总辐射量等。夏玉米于2022年6月21日播种、10月7日收获,生育期内降雨量为403.1 mm,水分充足未进行补充灌溉;生育期最高温度为38.7℃,最低温度为2℃,平均参考作物腾发量(ET₀)为3.86 mm/d。冬小麦于2022年10月11日播种、2023年6月14日收获,生育期内最高温度为39.5℃,最低温度为-15.1℃,降雨量为128.9 mm,平均ET₀为1.96 mm/d。

冬小麦设置灌水量分别为225 mm(冬灌75 mm + 返青水75 mm + 灌浆水75 mm)、300 mm(冬灌75 mm + 返青水75 mm + 拔节水75 mm + 灌浆水75 mm)和375 mm(冬灌75 mm + 返青水75 mm + 拔节水75 mm + 抽穗水75 mm + 灌浆水75 mm)3种灌水处理,每个处理3个重复。施肥情况与周围农田设置一致,不做特殊处理。作物生育期观测指标如下:

(1)株高、叶面积:每个小区选择3株长势均匀植株挂牌标记,利用长宽法测量冬小麦、夏玉米的叶

面积,每7~10 d 观测1次,采用折算法推求叶面积指数(Leaf area index, LAI)^[27]。冠层覆盖度(Canopy coverage, CC)表示作物叶片的发育程度,CC 由 LAI 与其之间关系式转换计算得到^[28],计算式为

CC = 1.005 (1 - exp(-0.6LAI))^{1.2} (1)

其中 $LAI = K\rho \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n (L_{ij}B_{ij})}{3}$ (2)

式中 K——折算系数
ρ——种植密度,株/m²
n——第 i 株作物叶片总数
L_{ij}、B_{ij}——第 i 株作物、第 j 个叶片长度和最大宽度,m

(2)地上部干物质量:每小区选夏玉米3株、冬小麦0.1 m²长势均匀植株,截取地上部分装入纸袋,测量湿质量并放入干燥箱105℃杀青1 h;在75~85℃下干燥48 h至恒定质量后称取其干质量。每10 d 测量1次。

(3)土壤含水率与土壤温度:试验田中安装3个自动土壤墒情仪,采集间隔为30 min,观测深度为10、20、40、60 cm。另外每15 d 取土,采用干燥法测定1次含水率,以补充和校核土壤含水率。

(4)测产:每个小区随机选取5个均匀长势、能够代表整体长势的1 m²地块植株,脱粒后风干称量并测定其穗数、穗粒数以及千粒质量(百粒质量)。

1.1.3 研究区多年灌溉试验数据

研究区多年灌溉数据来自于保定灌溉试验站2005—2015年共10年冬小麦-夏玉米轮作的灌水试验。图1为冬小麦-夏玉米2005—2015年生育期内多年平均最高气温、最低气温、平均温度以及降雨量,冬小麦生育期内平均气温为7.59℃左右,降雨量为124 mm左右;夏玉米平均气温基本为24.30℃,降雨量为369 mm左右。

观测数据包括种植密度、播种量、产量、叶面积指数、灌水量、灌水日期等。灌水试验期间施肥情况与周围农田设置一致,不做特殊处理。其中夏玉米生态指标从拔节期开始观测,冬小麦从返青期开始观测,每10 d 观测1次。在作物根区1 m 内每20 cm 间隔取土,采用干燥法测定土壤含水率。测产和考种时,夏玉米每小区随机抽取5株、冬小麦每小区随机抽取10株测量穗长、实粒数,总穗数、有效穗数、百粒质量(千粒质量)等数据,结合当年种植密度计算产量。

1.2 作物生长模型与变量计算

1.2.1 AquaCrop 模型及参数设置

AquaCrop 模型是联合国粮食及农业组织开发

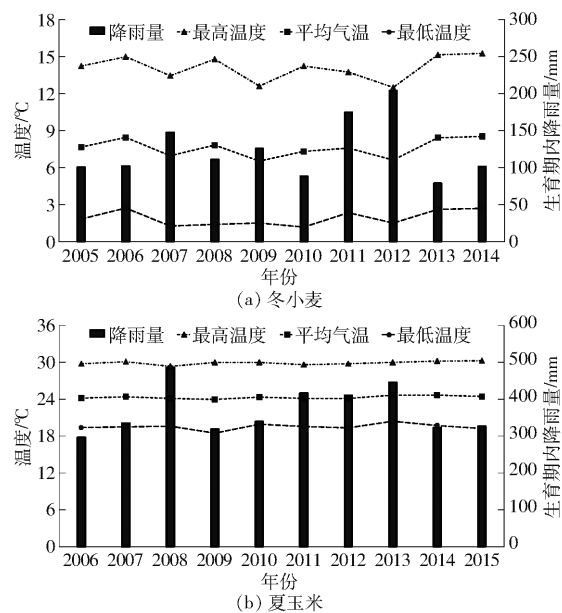


图1 2005—2015 年冬小麦-夏玉米生育期内
主要气象因子变化

Fig.1 Meteorological conditions during growth period of
winter wheat and summer maize from 2005 to 2015

的作物-水生产力模型,用于处理粮食安全以及评估环境和管理对作物生产的影响^[29],优势功能是进行水分驱动下作物产量和生物量的模拟。AquaCrop 模型可根据研究区自然条件及水资源状况,研究提高作物生产力、优化作物灌溉制度及制定合理田间管理措施。

以试验站冬小麦-夏玉米灌溉试验处理最多的 2005—2006 年为基准年对 AquaCrop 模型进行调参,利用 2006—2015 年试验站多年数据和 2022—2023 年灌溉试验数据对模型进行校验。模型中基底温度、上限温度等默认参数采用模型推荐值,归一化水分生产力、参考收获指数、水分胁迫参数等根据 AquaCrop 模型手册提供的取值范围采用“试错法”进行修正。模拟验证时播种日期、收获日期、灌水情况与当年实际情况一致;冬小麦播种量为 150 kg/hm²,行距为 0.15 m;夏玉米种植密度为 60 000 株/hm²,行距为 0.5 m。AquaCrop 模型部分参数取值如表 1 所示。

1.2.2 有效积温

作物每个生长阶段需要的最低热量固定,用有效积温代替时间因子在模拟作物生长和发育上更具有代表性^[30]。有效积温常用计算方法为日平均气温减去生物学下限温度差值的总和^[31],其中生物学下限温度 T_l 取值冬小麦为 0℃,夏玉米为 10℃;日平均气温 T_i 的最高临界温度冬小麦为 26℃,夏玉米为 30℃,当超出最高临界温度时按照临界温度计算。

1.2.3 作物水热生产函数

以上述常用的分阶段水分生产函数为基础,引

表 1 AquaCrop 模型中冬小麦-夏玉米特定参数取值
Tab.1 Calibrated parameters of winter wheat and
summer maize in AquaCrop model

参数	冬小麦	夏玉米
基底温度 $T_{base}/^{\circ}\text{C}$	0	8
上限温度 $T_{upper}/^{\circ}\text{C}$	26	30
初始冠层覆盖度 $CC_0/\%$	3.33	0.30
最大冠层覆盖度 $CC_x/\%$	96	91
冠层生长系数 $CGC/(\% \cdot \text{d}^{-1})$	4.0	14.7
基本冠层衰减系数 $CDC/(\% \cdot \text{d}^{-1})$	10.1	12.4
作物播种到出苗时间/d	7	7
参数播种到最大冠层覆盖度时间/d	200	63
播种到开始衰老时间/d	210	89
播种到开花时间/d	205	60
播种到最大根深时间/d	180	66
最小有效根深 Zr_{max}/m	0.3	0.3
最大有效根深 Zr_{min}/m	1.5	1.0
作物系数 K_c	1.10	1.05
归一化干物质水分生产力 $WP^*/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	18	22.7
参考收获指数 $HI_0/\%$	48	50
水分胁迫对冠层生长影响下限 $P_{exp,lower}$	0.20	0.13
水分胁迫对冠层生长影响上限 $P_{exp,upper}$	0.76	0.47
水分胁迫冠层扩张的水分胁迫形状因子 $P_{exp,shp}$	2.5	3.0
胁迫参数水分胁迫对气孔关闭影响上限 $P_{sto,upper}$	0.65	0.69
气孔关闭的水分胁迫形状因子 $P_{sto,shp}$	3	3
水分胁迫对冠层衰老影响上限 $P_{sen,upper}$	0.8	0.68
冠层衰老的水分胁迫形状因子 $P_{sen,shp}$	3	3

入作物生育期相应的积温因子,构建符合本地冬小麦-夏玉米适宜的水热生产函数。表 2 为 4 种典型水分生产函数及构建的水热生产函数。

1.2.4 净灌溉需水量

不考虑土壤水变化影响、地下水补给、水平径流供给等情况下,净灌溉需水量 (IR) 计算公式可简化为^[36]

$$\begin{cases} IR = ET_c - P_e \\ ET_c = ET_0 K_c \end{cases} \quad (3)$$

式中 ET_c ——标准条件下作物潜在腾发量,用单作物系数法确定,mm

P_e ——有效降雨量,mm

作物生长阶段时间和作物系数 K_c 取值见表 3,其中快速生长期和生长后期 K_c 由生长阶段时间线性插值得到^[37]。

1.2.5 未来气候变化数据

全球气候模式可用于研究历史气候变化的机制,并预测未来气候变化。国际耦合模式比较计划 (Commentary on the coupled model intercomparison project, CMIP) 于 1995 年由世界气候研究计划的耦合模拟工作组发起,至今已组织了 6 次模式比较计划 (CMIP1 ~ CMIP6)。通过对比 CMIP6 中 15 个全

表 2 分阶段水分生产函数和水热生产函数构建

Tab. 2 Construction of staged moisture production function and hydrothermal production function

模型	水分生产函数	水热生产函数
Blank ^[32]	$\frac{Y}{Y_m} = \sum \lambda \frac{ET_i}{ET_{mi}}$	$\frac{Y}{Y_m} = \sum \lambda \frac{ET_i}{ET_{mi}} \alpha \frac{AT_i}{AT_{i,max}}$
Jensen ^[33]	$\frac{Y}{Y_m} = \prod \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^\lambda$	$\frac{Y}{Y_m} = \prod \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^\lambda \left(\frac{AT_i}{AT_{i,max}} \right)^\alpha$
Stewart ^[34]	$1 - \frac{Y}{Y_m} = \sum \lambda \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)$	$1 - \frac{Y}{Y_m} = \sum \lambda \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right) \alpha \left(1 - \frac{AT_i}{AT_{i,max}} \right)$
Minhas ^[35]	$\frac{Y}{Y_m} = \prod \left[1 - \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^2 \right]^\lambda$	$\frac{Y}{Y_m} = \prod \left[1 - \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^2 \right]^\lambda \left[1 - \left(1 - \frac{AT_i}{AT_{i,max}} \right)^2 \right]^\alpha$

注:Y 为不同年份不同灌水处理下产量,t/hm²;Y_m为基准年潜在产量,t/hm²;ET_i为各生育阶段耗水量,mm;ET_{mi}为基准年在最大产量时的各生育阶段耗水量,mm;λ 为各生育阶段水分敏感指数;AT_i为各年各生育阶段积温,℃;AT_{i,max}为基准年各生育阶段积温,℃;α 为各生育阶段积温指数。根据研究区多年气象数据分析结果,冬小麦选择 2014—2015 年作为基准年,夏玉米选择 2014 年作为基准年。

表 3 冬小麦-夏玉米生长阶段和 K_c取值

Tab. 3 Days of growth stages and K_c values for winter wheat - summer maize

生长阶段	冬小麦		夏玉米	
	时间/d	K _c	时间/d	K _c
生长初期	182	0.40	15	0.35
快速生长期	23	0.40 ~ 1.10	30	0.35 ~ 1.40
生长中期	31	1.10	35	1.40
生长后期	20	0.15	26	0.65

球气候模式输出的 1980—2014 年多年平均气温数据与研究区保定站点实际观测多年平均气温数据,结果显示 CMIP6 中海-气耦合全球气候模式 MIROC6 (The sixth version of the model for interdisciplinary research on climate)与站点实际观测数据最接近,因此本文采用 MIROC6 模式数据来考虑未来气候变化情景。

MIROC6 模式输出的未来时间尺度为 2015—2064 年,历史数据时间尺度为 1980—2014 年,空间尺度为全球范围。选择 MIROC6 模式中包括低强迫情景 SSP1 - RCP2.6 和 SSP4 - RCP3.4 (SSP1 - 2.6 和 SSP4 - 3.4,2100 年辐射强迫稳定在约 2.6 W/m²和约 3.4 W/m²)、中等强迫情景 SSP2 - RCP4.5 (SSP2 - 4.5,2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m²)、中等至高强度排放情景 SSP3 - RCP7.0 (SSP3 - 7.0,2100 年辐射强迫稳定在约 7.0 W/m²)和高强迫情景 SSP5 - RCP8.5 (SSP5 - 8.5,2100 年辐射强迫稳定在约 8.5 W/m²)等 5 种未来气候情景的逐日降雨量与气温数据,分别表示可持续发展、常规发展、中度发展、局部发展和不平衡发展^[38]。通过 CMIP6 网站 (Earth System Grid Federation (ESGF) Federated Nodes; CMIP6 - DKRZ Data Search | CMIP6 - DKRZ | ESGF - CoG)下载未来 5 种气候情景模式下历史和未来逐日降雨量和气温数据。通过降尺度提取研究区保定站点 (38.85°N,115.52°E)数据,并利用本地

实际气象观测数据对 MIROC6 数据进行修正。

1.2.6 模型评价指标

采用决定系数 R²、均方根误差 (RMSE)、标准化均方根误差 (NRMSE) 和一致性指数 d 等统计指标来评价模型校准和验证精度。其中 R²和 d 越接近 1,RMSE 越小表明模拟值与实测值越接近,模型具有较好的一致性;NRMSE 越低,表示模型的预测性能越好,模拟结果越精确。

2 结果与分析

2.1 Aquacrop 模型参数率定与校核

利用保定灌溉试验站多年灌溉试验数据中的 2005—2006 年冬小麦和夏玉米 6 种灌溉处理试验数据对 AquaCrop 模型调参。其中冬小麦 6 种灌水处理包括处理 I (越冬水 50 mm + 拔节水 40 mm + 抽穗水 50 mm + 灌浆水 50 mm)、处理 II (越冬水 50 mm + 拔节水 50 mm + 抽穗水 40 mm + 灌浆水 50 mm)、处理 III (越冬水 40 mm + 拔节水 50 mm + 抽穗水 30 mm + 灌浆水 50 mm)、处理 IV (越冬水 40 mm + 拔节水 40 mm + 抽穗水 40 mm + 灌浆水 50 mm)、处理 V (越冬水 60 mm + 拔节水 60 mm + 抽穗水 30 mm + 灌浆水 50 mm) 和处理 VI (越冬水 50 mm + 拔节水 50 mm + 抽穗水 40 mm + 灌浆水 50 mm);夏玉米灌水处理为处理 I (苗期 30 mm + 拔节水 40 mm)、处理 II (苗期 60 mm + 拔节水 50 mm)、处理 III (苗期 50 mm + 拔节水 55 mm)、处理 IV (苗期 40 mm + 拔节水 30 mm)、处理 V (苗期 45 mm + 拔节水 60 mm) 和处理 VI (苗期 50 mm + 拔节水 40 mm)。将模型模拟的土壤含水率、冠层覆盖度与实测值进行对比,来检验模型参数的率定效果。图 2、3 分别为夏玉米和冬小麦土壤生育期不同灌溉处理的土壤含水率和冠层覆盖度模拟值与实测值。由图 2、3 可见,冬小麦和夏玉米的 6 种灌溉处理情况下,模型模拟值与实测值间 R²和 d 比较好;除了夏玉米个别处

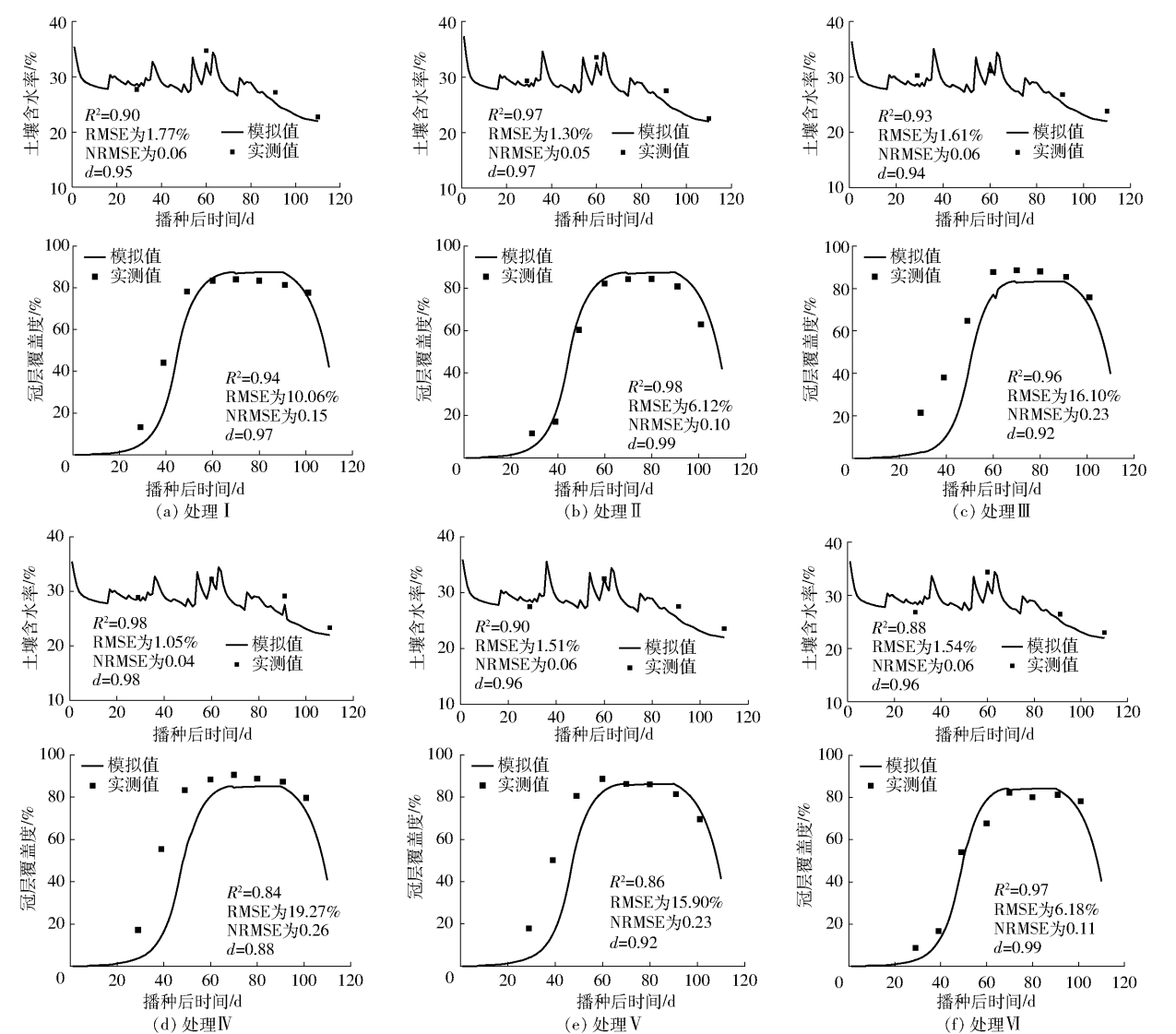


图2 2006年夏玉米生育期土壤含水率、冠层覆盖度模拟值与实测值变化曲线

Fig. 2 Comparisons between observed and simulated soil water contents and canopy covers for summer maize in 2006

理冠层覆盖度模拟效果 RMSE 稍大,其余数值都比较理想。

利用保定灌溉试验站多年灌溉试验的 2006—2015 年数据和 2022—2023 年 2 种作物产量实测数据对模型参数进行校核和验证,图 4 为利用率定后的 AquaCrop 模型模拟的冬小麦和夏玉米多年产量与实测值拟合关系。由图 4 可见,夏玉米和冬小麦产量拟合效果较好,表明利用多年试验数据率定的 AquaCrop 模型可以用来模拟当地冬小麦和夏玉米生长过程。

2.2 冬小麦-夏玉米水热生产函数构建

2.2.1 水分生产函数

首先根据试验观测数据将冬小麦和夏玉米的水分生产函数中敏感指数拟合出来,为水热生产函数的合理构建提供支撑。对 4 种类型水分生产函数经过数学变换、线性化处理后,转换成多元线性方程组,利用率定后的 AqauCrop 模型模拟 2006—2015

年冬小麦、夏玉米生长过程结果,再对方程组求解得到冬小麦夏玉米水分敏感指数,结果如表 4 所示。此时 R^2 是指 AquaCrop 模型模拟产量与拟合水分生产函数计算产量之间的决定系数。

由表 4 可看出,冬小麦累乘型函数相对于累加型函数拟合精度更好。4 种模型各生育期水分敏感指数均不相同,在累加型函数 Blank 和 Stewart 模型中,水分敏感指数最大的时期出现在抽穗-灌浆期,而在累乘型函数 Jensen 和 Minhas 模型中,水分敏感指数最大的时期出现在拔节-抽穗期。同样,夏玉米累乘型函数相对于累加型函数拟合精度更好,Blank、Stewart 和 Minhas 3 种水分生产函数中水分敏感指数最大的时期均出现在拔节-抽穗期,而 Jensen 函数在抽穗-灌浆期水分敏感指数最大。从拟合决定系数来看,冬小麦和夏玉米在 Minhas 型水分生产函数时 R^2 最大,模拟效果最好,Jensen 型次之。

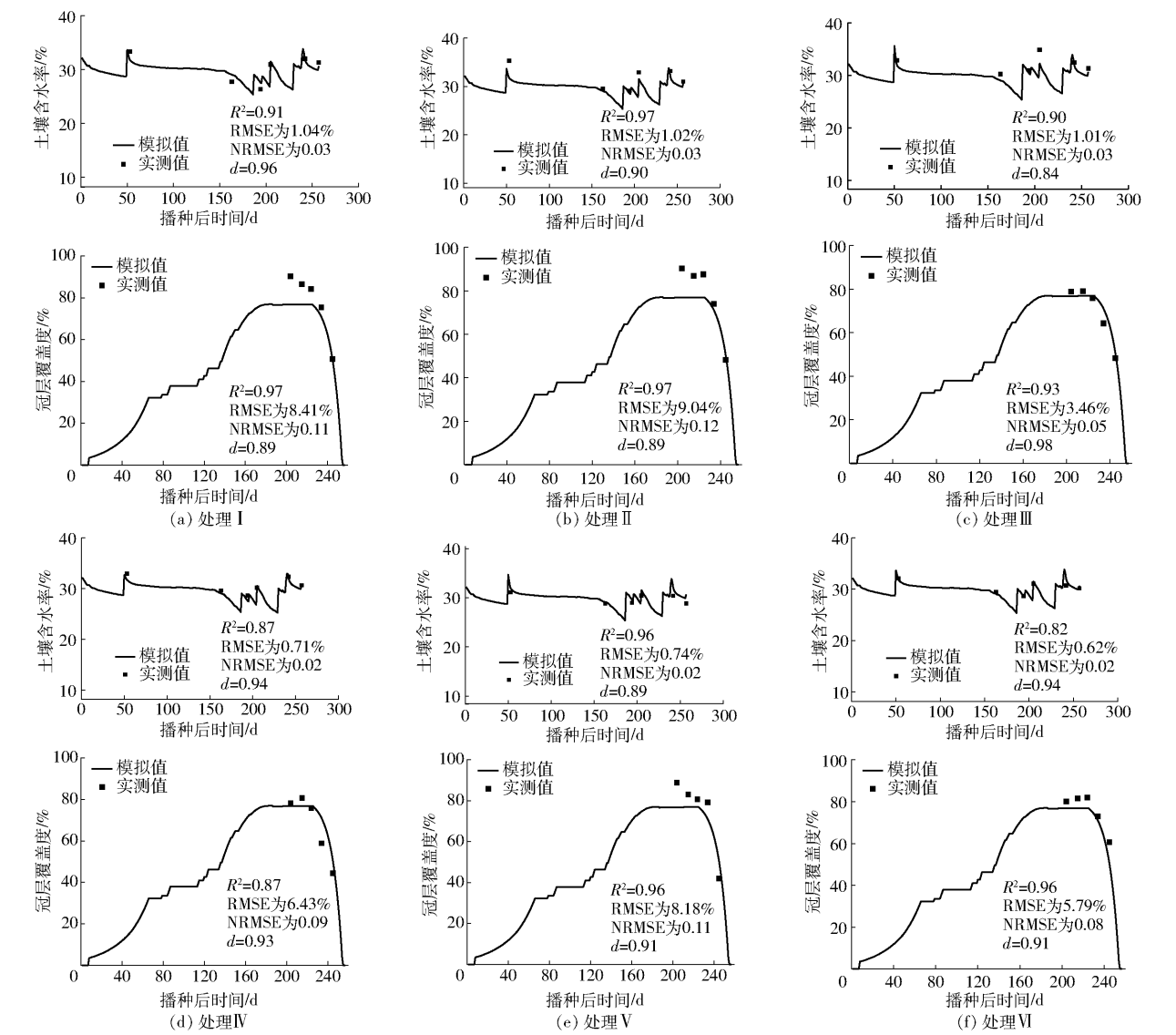


图3 2005—2006年冬小麦生育期土壤含水率、冠层覆盖度模拟值与实测值变化曲线

Fig.3 Comparisons between observed and simulated soil water contents and canopy covers for winter wheat in 2005—2006

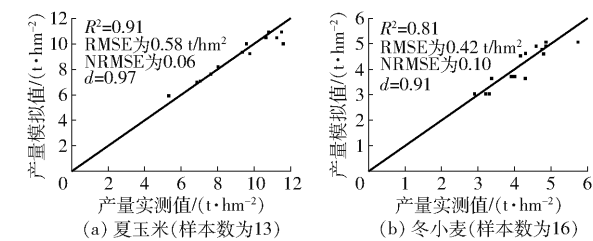


图4 AquaCrop模型模拟夏玉米和冬小麦产量与实测值拟合关系

Fig.4 Linear relationships between simulated and observed yields of summer maize and winter wheat based on simulations of AquaCrop model

2.2.2 水热生产函数构建和模拟效果

与水分生产函数计算方法相同,拟合得到的2006—2015年冬小麦-夏玉米不同水热生产函数的水分敏感指数和积温指数分别如表5和表6所示, R^2 为根据拟合参数得到的水热生产函数计算产量与AquaCrop模型模拟产量之间的决定系数。从表5

可知,冬小麦累乘型模型相较于累加型模型的模拟结果更好,且在引入积温因子后,构建得到的水热生产函数相较于水分生产函数,模拟精度得到提高;其中Jensen型函数 R^2 达到0.989, λ_i 由大到小依次为 λ_5 、 λ_4 、 λ_3 、 λ_2 、 λ_6 、 λ_1 。同样,夏玉米水热生产函数累乘型模型相较于累加型模型模拟结果更好,Jensen型函数和Minhas型函数 R^2 达到0.986和0.978。其中Jensen型函数中水分敏感指数最大的时期为拔节-抽穗期,其次为抽穗-灌浆期。

为检验构建的水热生产函数实际效果,将上述冬小麦和夏玉米拟合的水热生产函数产量计算值与2006—2015年实测值进行对比,如图5所示。由图5可知,冬小麦4种水热生产函数的计算产量与实测产量对比中,Jensen型函数 R^2 为0.84、RMSE为0.53 t/hm²、NRMSE为0.13、 d 为0.91,整体效果最好。夏玉米两种累乘型函数Jensen函数和

表 4 4 种类型水分生产函数中水分敏感指数模拟计算结果

Tab.4 Results of sensitive indexes in four kinds of water functions for winter wheat and summer maize

模型	冬小麦							夏玉米				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	R^2	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	R^2
Blank	-0.961	0.295	0.335	0.446	0.572	0.344	0.681	-0.014	0.745	0.665	-0.116	0.532
Stewart	-0.878	0.329	0.308	0.224	0.543	0.305	0.606	0.008	0.150	0.024	-0.021	0.577
Jensen	-0.489	0.150	0.278	0.452	0.376	0.093	0.729	0.005	0.120	0.150	0.002	0.596
Minhas	-0.604	0.287	0.571	1.169	0.642	0.094	0.748	0.031	0.401	0.213	0.016	0.733

注:冬小麦中 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 分别为苗期-越冬期、越冬-返青期、返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期、灌浆-成熟期水分敏感指数,夏玉米中 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 分别为播种-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期、灌浆-收获期的水分敏感指数。下同。

表 5 冬小麦水热生产函数构建结果

Tab.5 Results of constructing water and heat production function for winter wheat

模型	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	R^2
Blank	-0.139	0.801	1.283	-2.331	0.780	0.406	0.111	0.633	1.123	0.167	0.602	-0.352	0.831
Stewart	0.882	1.005	1.112	0.147	0.786	-0.769	-0.882	1.005	1.112	-0.189	-0.728	0.761	0.711
Jensen	0.003	0.074	0.265	0.366	0.369	0.005	0.234	0.121	0.523	-1.894	-1.385	-2.086	0.989
Minhas	-0.628	0.271	0.331	-0.422	0.666	-0.091	-0.737	0.529	1.743	2.029	-28.576	21.137	0.965

注: $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 分别为冬小麦苗期-越冬期、越冬-返青期、返青-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期、灌浆-成熟期积温敏感指数。

表 6 夏玉米水热生产函数构建结果

Tab.6 Results of constructing water and heat production function for summer maize

模型	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	α_1	α_2	α_3	α_4	R^2
Blank	0	0.416	0.507	2.240	0	1.794	1.369	-0.056	0.678
Stewart	1.376	2.417	1.005	-0.008	-0.853	0.709	1.039	0.874	0.842
Jensen	0.011	0.038	0.035	0.024	0.114	0.357	0.246	0.083	0.986
Minhas	0.144	0.194	-0.783	0.002	-8.447	5.803	2.243	1.346	0.978

注: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 分别为夏玉米播种-拔节期、拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期、灌浆-收获期积温敏感指数。

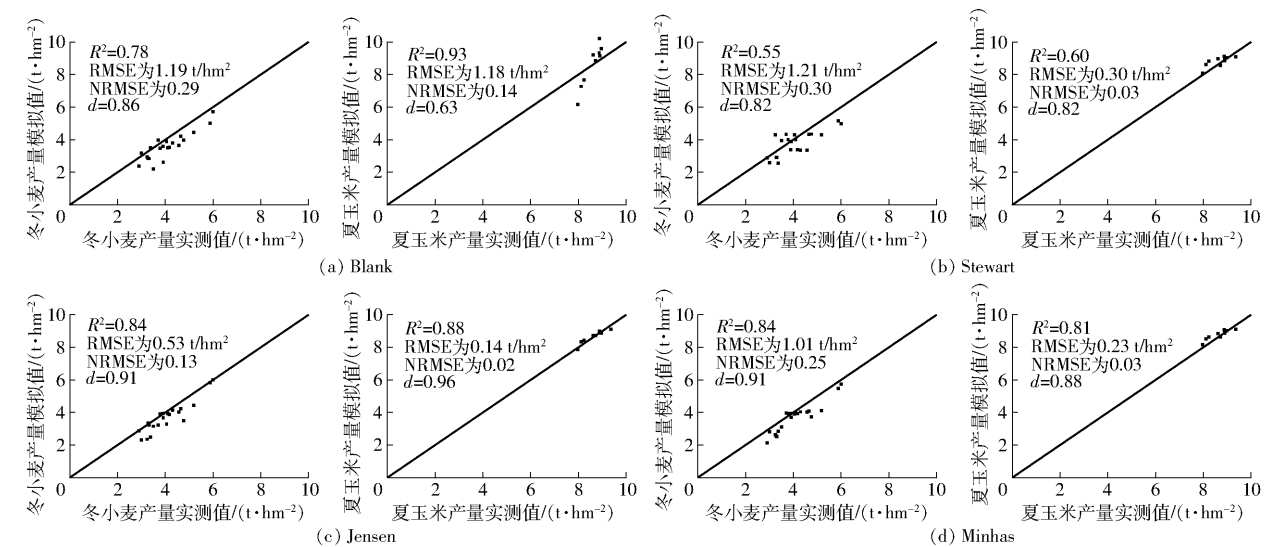


图 5 冬小麦-夏玉米水热生产函数计算产量与实测值对比

Fig.5 Comparisons of calculation results of winter wheat and summer maize water-heat production function

Minhas 函数的计算产量与实测产量之间的 R^2 、RMSE、NRMSE 和 d 分别为 0.88、0.14 t/hm²、0.02、0.96 和 0.81、0.23 t/hm²、0.03、0.88。

综合以上水分生产函数与水热生产函数的拟合情况和检验情况可知,Jensen 型水热生产函数更适用于反映该地区冬小麦-夏玉米水热耦合关系。冬

小麦返青-拔节期积温指数 α_3 最大,说明该时期内的积温显著影响冬小麦产量;而拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期和灌浆-成熟期的气温指数均为负数,以此推测冬小麦生育后期温度过高会对冬小麦产量有负面效应。夏玉米在拔节-抽穗期的积温指数 α_2 最大,说明该时期的积温对产量的影响最明显。

2.3 未来气候变化情景与产量预测

2.3.1 MIROC6 数据降尺度与修正

以 CMIP6 模式中对未来气候因子的预测为背景,利用上述构建和率定的水热生产函数预估未来粮食产量变化情况。因 MIROC6 模式数据属于全球尺度,在站点应用时应降尺度并用实测数据进行修正和校核。利用研究区历史气象观测资料与模式提供的历史数据(Historical,1980—2014 年)进行逐日温度修正,采用过原点线性关系式 $y = ax$ 来拟合每日数据;进而利用此逐日修正关系式对 MIROC6 模式提供的 2015—2023 年现状年 5 种气候情景数据进行温度修正,并与研究区站点实际观测数据进行对比。修正前后各项评价指标如表 7 所示。由表 7 可知,该修正方法可明显提高各气候情景与实际情况的一致性, R^2 和 d 不同程度增大、RMSE 明显变小,数据精度得到提高。

表 7 MIROC6 模式气温数据降尺度修正与研究区
实测数据对比

Tab.7 Comparisons of air temperature between MIROC6
modes and local observations before and after liner
corrections

时间段	排放情景	项目	R^2	RMSE/ ℃	d
1980— 2014 年	Historical	原始关系	0.918	3.180	0.980
		降尺度修正	0.924	2.969	0.982
	SSP1-2.6	原始关系	0.838	5.022	0.953
		降尺度修正	0.849	4.618	0.957
2015— 2023 年	SSP2-4.5	原始关系	0.844	4.679	0.957
		降尺度修正	0.856	4.371	0.961
	SSP3-7.0	原始关系	0.853	4.493	0.960
		降尺度修正	0.864	4.214	0.964
	SSP4-3.4	原始关系	0.842	4.652	0.957
		降尺度修正	0.854	4.387	0.960
	SSP5-8.5	原始关系	0.855	4.416	0.961
		降尺度修正	0.865	4.175	0.964

在此基础上,以上述修正关系式对 MIROC6 模式未来研究时段的数据进行降尺度修正。以 1980—2014 年历史数据为基准,对未来研究时段 2020s(2021—2030 年)、2030s(2030—2040 年)、2040s(2040—2050 年)、2050s(2050—2060 年)的数据进行对比。基准时段冬小麦生育期多年平均降雨量、平均气温与积温分别为 128.60 mm、7.78℃ 和 2 236.60℃,夏玉米生育期多年平均降雨量、平均气温与积温分别为 365.28 mm、25.09℃ 和 1 588.68℃。表 8 为冬小麦-夏玉米生育期内气候因子未来 4 个时间段相较于基准时段的变化量。

由表 8 可知,冬小麦生育期内多年平均降雨量在未来不同时段年际波动较大,SSP2-4.5 情景下

表 8 未来时段不同情景下冬小麦-夏玉米生育期内气候
因子相较于基准时段的变化量

Tab.8 Changes of climate factors in MIROC6 modes
during growth seasons of winter wheat and summer
maize compared with baseline periods

作物	排放情景	未来时 间段	降雨量变 化量/mm	平均气温 变化量/℃	有效积温 变化量/℃
冬小麦	SSP1-2.6	2020s	3.54	0.39	128.16
		2030s	11.58	0.77	210.89
		2040s	9.09	0.86	201.67
		2050s	6.69	1.44	314.58
	SSP2-4.5	2020s	5.34	0.32	68.37
		2030s	9.04	0.93	226.89
		2040s	35.66	0.98	217.51
		2050s	-6.39	1.41	302.92
	SSP3-7.0	2020s	9.48	-0.18	-29.45
		2030s	-12.77	1.21	267.33
		2040s	-9.55	1.12	208.84
		2050s	6.69	1.92	363.43
	SSP4-3.4	2020s	1.73	-0.03	-29.45
		2030s	8.42	0.44	267.33
		2040s	-5.25	0.78	208.84
		2050s	-29.21	0.98	363.43
	SSP5-8.5	2020s	8.30	0.56	121.40
		2030s	16.50	0.74	143.17
		2040s	19.70	0.92	233.12
		2050s	-4.65	2.12	428.58
夏玉米	SSP1-2.6	2020s	32.73	1.10	99.19
		2030s	27.71	1.96	176.75
		2040s	97.01	1.91	167.32
		2050s	117.77	2.07	178.19
	SSP2-4.5	2020s	66.29	0.98	85.61
		2030s	32.44	1.89	160.66
		2040s	26.10	1.72	153.89
		2050s	63.04	1.93	176.60
	SSP3-7.0	2020s	65.97	0.94	83.12
		2030s	69.87	1.02	96.32
		2040s	59.76	1.66	146.46
		2050s	101.58	1.58	137.80
	SSP4-3.4	2020s	176.48	0.11	83.12
		2030s	34.55	1.10	96.32
		2040s	76.45	0.99	146.46
		2050s	90.91	1.81	137.80
	SSP5-8.5	2020s	46.33	0.85	77.53
		2030s	51.39	1.07	88.20
		2040s	56.31	1.64	140.14
		2050s	167.46	2.13	184.30

2040s 多年平均降雨量增长量最大达到 35.66 mm; SSP4-3.4 情景下 2050s 多年平均降雨量减少最多,减小量达到 29.21 mm。夏玉米生育期内多年平均降雨量在未来 5 种排放情景下均增加,其中 SSP4-3.4 情景下 2020s 年平均降雨量增长量最大,为

176.48 mm;在 SSP2-4.5 情景下 2040s 多年平均降雨量增长量最小,为 26.10 mm。

未来时段多年平均气温基本上随着时间推移逐渐上升。与基准时间段相比,冬小麦在 SSP5-8.5 情景下 2050s 升温最高,达 2.12℃,在 SSP3-7.0 情景下 2020s 温度减少 0.18℃。夏玉米生育期各情景模式下都处于升温状态,其中在 SSP5-8.5 情景下 2050s 最大升温 2.13℃,最小升温幅度为 SSP4-3.4 情景下 2020s 的 0.11℃。

在未来变化情景下冬小麦-夏玉米生育期内有效积温变化不同。其中冬小麦在 SSP3-7.0 和 SSP4-3.4 的 2020s 有效积温下降幅度均为 29.45℃,在 SSP5-8.5 最大增加 428.58℃。夏玉米生育期内有效积温在 5 种情景下基本呈逐渐升高趋势,在 SSP5-8.5 情景下 2050s 增长最多,为 184.30℃,积温将达到 1 772.97℃。

2.3.2 未来变化情景下冬小麦-夏玉米潜在产量变化预测

(1)不同排放情景对潜在产量的影响

依据修正后的气象数据计算未来不同情景模式下冬小麦和夏玉米 2024—2064 年各生育阶段内的积温与作物潜在腾发量 (ET_c);基于上述构建的 Jensen 型水热生产函数,计算各年冬小麦和夏玉米的潜在产量 Y_m ,统计结果如图 6 所示(箱型图中矩

形的上边缘和下边缘分别表示 75% 和 25% 分位值,虚线表示平均值,上下短线分别表示最大值和最小值。黑色实线表示基准年的均值。下同)。已知基准时段冬小麦多年平均潜在产量为 4.49 t/hm²,夏玉米为 8.70 t/hm²。

由图 6a 可知,冬小麦未来 2024—2064 年多年平均潜在产量由大到小依次为 SSP3-7.0、SSP4-3.4、SSP2-4.5、SSP5-8.5、SSP1-2.6,相较于基准时段的多年平均产量分别提升 48.14%、40.79%、37.22%、36.33%、31.66%。5 种情景可得到的最大潜在产量由大到小依次为 SSP4-3.4、SSP3-7.0、SSP2-4.5、SSP1-2.6、SSP5-8.5,分别为 12.38、11.34、10.48、9.75、9.55 t/hm²。整体来看,未来在 5 种排放情景下冬小麦多年平均产量相较于基准年均会得到提升;其中 SSP3-7.0 或 SSP4-3.4 情景下冬小麦整体平均产量和最大产量相对较大,但 SSP4-3.4 变幅大、稳定性差,因此 SSP3-7.0 情景更适合冬小麦的生长发育。

由图 6b 可知,夏玉米未来 2024—2064 年多年平均潜在产量由大到小依次为 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5、SSP3-7.0、SSP4-3.4,相较于基准时段多年平均产量分别增加 6.21%、5.06%、4.48%、2.99%、1.03%。5 种情景可得到的最大潜在产量由大到小依次为 SSP5-8.5、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP4-3.4,分别为 10.25、10.10、9.80、9.72、9.65 t/hm²。总体上未来在 5 种排放情景下夏玉米多年平均产量均会得到提升,其中在 SSP1-2.6 情景下夏玉米潜在产量多年平均值最大,更适合夏玉米的生长发育。

图 7 为不同排放情景下冬小麦和夏玉米未来 4 个不同时段 (2020s、2030s、2040s 和 2050s) 平均潜在产量。由图 7 可知,除了 SSP4-3.4 情景在 2020s 升高后持续下降外,冬小麦未来多年平均潜在产量变化呈上升、下降再上升的波动走势;但总体来看,冬小麦在未来 5 种情景下,变化趋势不统一,尽管有升有降,但均会高于基准时段的年平均潜在产量,至 2050s 冬小麦多年平均潜在产量分别为 6.07、6.26、6.93、5.74、5.95 t/hm²。夏玉米与冬小麦变化趋势不同,利用 Jensen 型水热生产函数模拟的潜在产量在未来 4 个时段持续上升,至 2050s 年夏玉米多年平均潜在产量将分别达到 9.27、9.20、9.05、9.10、9.24 t/hm²。但其时段内年际间变化幅度较小,相对基准时段的变化幅度也小。由此可见在考虑水热综合变化下,未来不同排放情景对冬小麦的产量影响较大,年际差异和变化数值大;夏玉米生育期雨热同季,因而年际间差异较小。

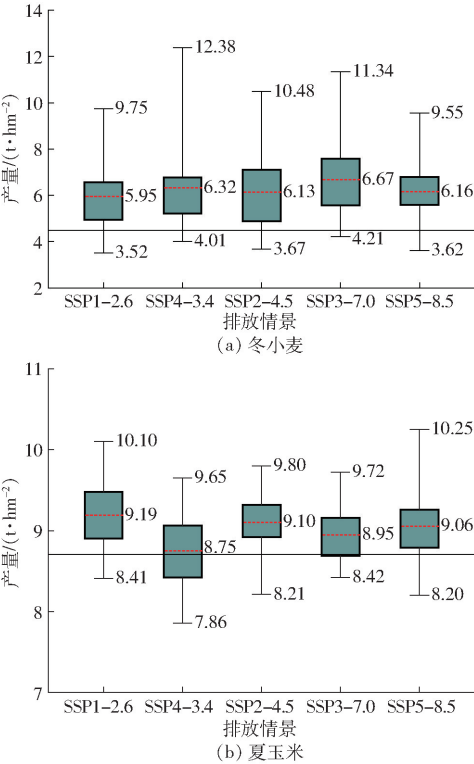


图 6 未来 2024—2064 年 5 种排放情景下冬小麦和夏玉米潜在产量

Fig. 6 Potential yields of winter wheat and summer maize in five emission scenarios during 2024—2064

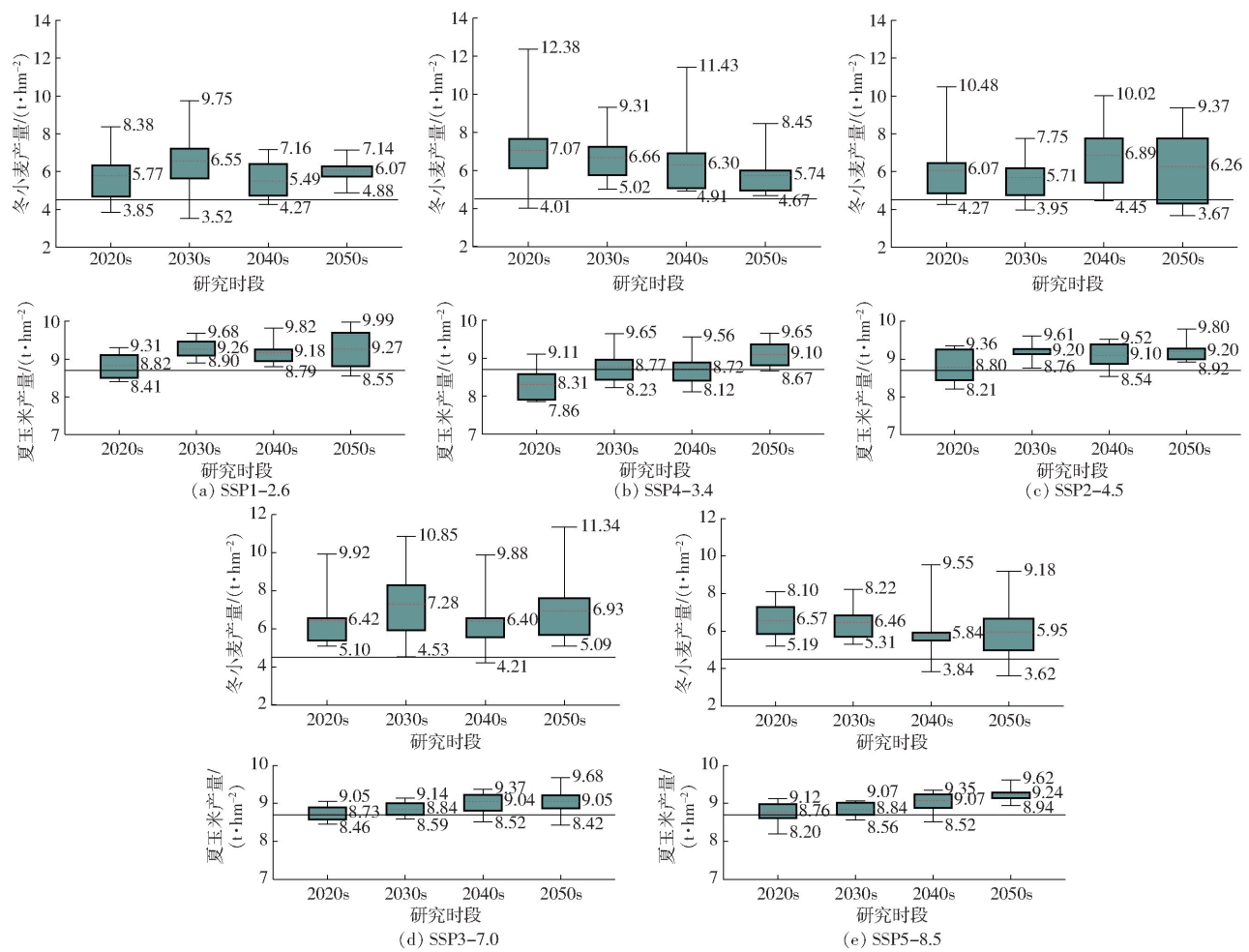


图7 5种排放情景下冬小麦和夏玉米2024—2064年各时段潜在产量

Fig.7 Potential yields of winter wheat and summer maize during 2020s, 2030s, 2040s, and 2050s under five emission scenarios

(2)不同排放情景下冬小麦-夏玉米产量的灌溉贡献

为了探讨灌溉对冬小麦生产的贡献情况,借助率定好的 Jensen 型水热生产函数计算冬小麦在净灌溉需水量情况下的产量。即若某一生育期内 ET_c 小于该生育期内降雨量,则式中代入 ET_c ;若某一生育期内 ET_c 大于该生育期内降雨量,则需补充灌水(补充灌水量为 ET_c 与降雨量差值),式中代入补充灌水量得到净灌溉需水量下产量 Y_a 。图8为冬小麦在不同情景下 Y_a 与潜在产量 Y_m 叠加对比。在5种情景下 Y_a 多年平均值由大到小依次为 SSP3-7.0 (4.88 t/hm²)、SSP4-3.4 (4.58 t/hm²)、SSP1-2.6 (4.37 t/hm²)、SSP5-8.5 (4.32 t/hm²)、SSP2-4.5 (4.12 t/hm²) ,对于 Y_m 的贡献率范围分别为 43.64%~86.41%、37.65%~87.86%、52.47%~90.83%、44.11%~88.73%、23.78%~85.08% ,其中 SSP1-2.6 平均贡献率最大。总体来看,冬小麦通过灌水可获得潜在产量 70% 左右的产量。

华北平原夏玉米生育期雨热同季,因此本文计算了未来变化气候情景下仅接收降雨时夏玉米的雨

养产量 Y_0 ,即水热生产函数中生育期内 P_e 代替 ET_c 进行计算。图9为夏玉米雨养产量与潜在产量叠加对比。5种情景下 Y_0 多年平均值由大到小依次为 SSP1-2.6 (8.57 t/hm²)、SSP2-4.5 (8.49 t/hm²)、SSP5-8.5 (8.45 t/hm²)、SSP3-7.0 (8.41 t/hm²)、SSP4-3.4 (8.26 t/hm²) ,雨养产量 Y_0 对潜在产量 Y_m 的贡献率范围分别为 85.38%~99.76%、86.00%~97.84%、87.32%~99.00%、87.08%~99.10%、87.56%~100.00% ,SSP4-3.4 平均贡献率最大;未来不同气候情景下华北地区夏玉米在雨养条件下的产量可以达到潜在产量的 94% 左右。

3 讨论

为保障未来气候变化下粮食安全,探究作物水热耦合关系对产量的影响具有重要意义。本文基于华北平原地区保定灌溉试验站多年灌溉试验数据,利用 AquaCrop 作物生长模型模拟结果来构建水热生产函数,其特定参数和敏感系数在其他地区是否适用,还需进一步验证。

本文从作物生长过程中水热变化定量分析了未

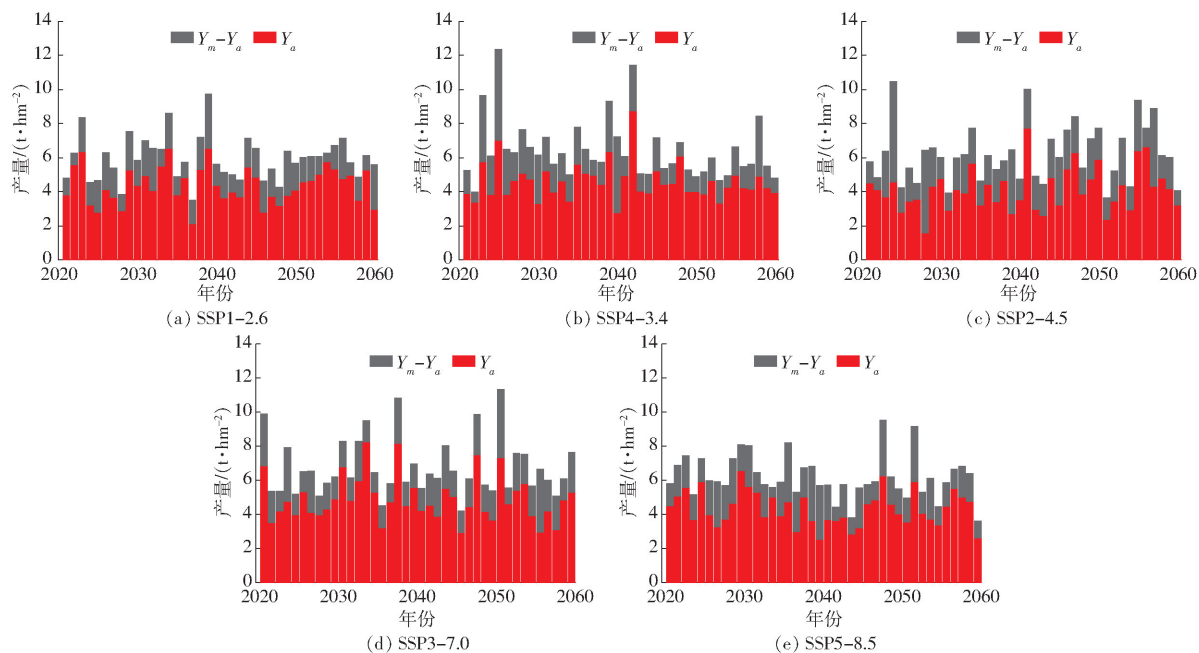


图8 5种排放情景下未来时段冬小麦净灌溉需水量条件下的产量与潜在产量

Fig. 8 Comparisons of potential yield and yield based on net irrigation demand for winter wheat under five emission scenarios

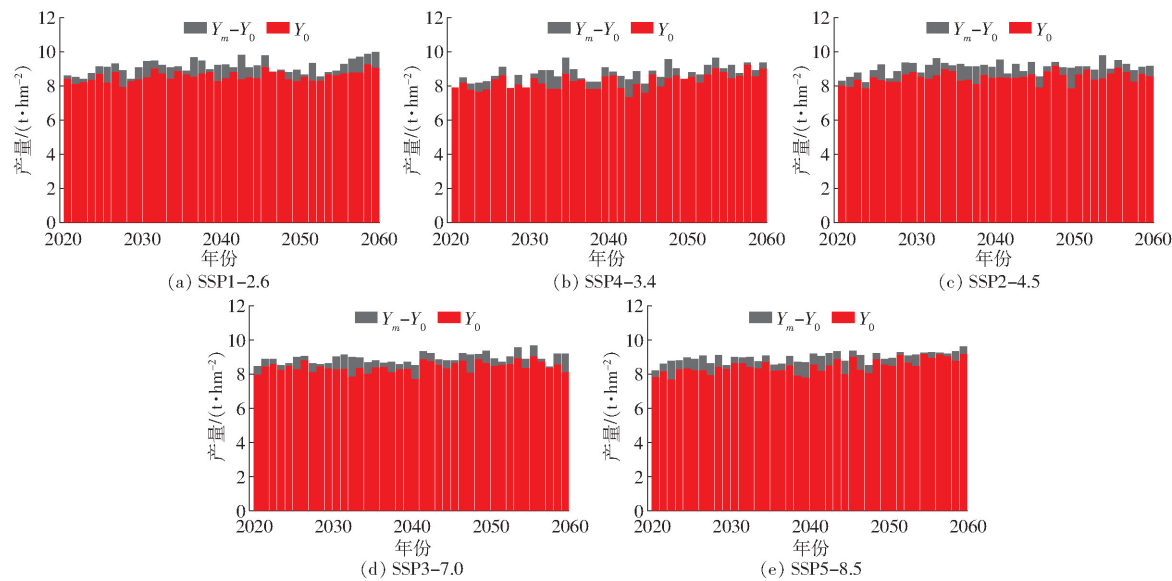


图9 5种排放情景下未来时段夏玉米雨养条件下的产量与潜在产量

Fig. 9 Comparisons of potential yield and rain fed yield of summer maize under five emission scenarios

来至2064年在气候变化情景下华北地区冬小麦-夏玉米潜在产量的变化。由于作物生长受环境多因素影响的复杂性,本研究尚存在一定的不确定性。一方面,尽管气候系统的数据来自于最新的CMIP6且基于历史数据进行了修正,但由于气候系统的多变性和随机性,导致气候变化的预估还存在一定的不确定性,因此定量分析冬小麦-夏玉米未来潜在产量还存在一定的误差。另一方面,气候变化会对作物的物候期产生影响,未来作物各个生育阶段时间和周期可能会发生变化,本文仅探讨了在当前农业条件保持不变情况下水热耦合下的产量,因而应对未来气候变化下作物物候期改变所引起产量变化的角

度进一步做相应研究。

探讨了未来气候因子的变化情况,结果显示不同气候情景下,气温都会持续升高,积温增加,但降水的变化无明显趋势,年际波动较大。由水热生产函数各阶段积温敏感指数可以看出,温度升高在冬小麦生育后期会降低作物产能,这与FENG等^[39]的研究结果相似,即灌浆期干旱对小麦产量影响最大。未来随着气温和积温的升高,冬小麦潜在产量整体呈下降趋势,这与周丽涛等^[40]和沙慧敏等^[41]的研究结果一致。本文通过水热生产函数计算得知,夏玉米各生长阶段一定程度上会提高产能,夏玉米潜在产量整体呈上升趋势,但有研究考虑到作物生长

过程中高温热害频率增加^[42],预测我国玉米产量均以减产为主^[43-44]。因此,在未来气候变化下产量变化研究中,应结合本地实际情况综合考虑多因素的综合影响,以达到准确预测。

但 AquaCrop 模型在模拟时也会存在一些不足,在特低水分情况下模拟值与实测值相对误差较大,表示其灌溉定额在远低于合适灌溉定额时,模拟效果误差较大^[45]。此外夏玉米生育后期降雨量较多、日照时数较少,玉米衰老得到了延缓,这也表明了模型对于玉米衰老期的水分胁迫响应强烈^[46]。在模拟极端农业气候事件如干旱、高温、大雨、冰雹和风暴、洪水和霜冻等,像 AquaCrop 这类作物生长模型尚未有完善的极端天气影响农业生产的机理解释,作物生长模型中对生长与物质循环过程描述也并不全面。因此其对特定极端天气作物模拟精度较低,需结合其他试验或机理模型进行相应改进^[47]。

与其他模型相比,AquaCrop 模型缺少作物养分平衡模块及水分、养分互作模块。因此,AquaCrop 模型不能很好地模拟水盐胁迫、温度胁迫等对作物生长发育的影响。研究表明,在温度、水分及盐分严重胁迫的前提下,AquaCrop 模型模拟精度不能令人满意^[48]。因此在未来的研究中,AquaCrop 模型开发应逐步加入上述相关模块,对模型输入参数进行不断校正和验证,尤其是在交叉胁迫存在的条件下更要注意参数校验。

4 结论

(1) AquaCrop 模型可以较好地模拟华北地区不同灌水情况下冬小麦-夏玉米生长过程。利用率定后 AquaCrop 模型模拟的多年产量与实测值间的 R^2 、

RMSE、NRMSE 和 d ,夏玉米分别为 0.91、0.58 t/hm²、0.06、0.97,冬小麦分别为 0.80、0.42 t/hm²、0.10、0.94,产量拟合效果较好。

(2) 冬小麦 Jensen 型水热生产函数的计算产量与实测产量的 R^2 、RMSE、NRMSE、 d 分别为 0.84、0.53 t/hm²、0.13、0.91。夏玉米 Jensen 型水热生产函数的计算产量与实测产量的 R^2 、RMSE、NRMSE、 d 分别为 0.88、0.14 t/hm²、0.02、0.96。由水热生产函数可知,冬小麦在抽穗-灌浆期对水分最敏感,返青-拔节期积温对产量的影响效应最明显,且生育后期若积温过高,会对产量有负向效果;夏玉米在拔节-抽穗期对水分最敏感,同样该时期积温对产量的影响效应最明显。

(3) 在未来 5 种气候排放情景 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP4-3.4、SSP5-8.5) 下,冬小麦潜在产量多呈波动趋势,但均高于当前时期的多年平均潜在产量,至 2050s 冬小麦多年平均潜在产量分别为 6.07、6.26、6.93、5.74、5.95 t/hm²。夏玉米潜在产量整体呈上升趋势,至 2050s 年夏玉米多年平均潜在产量将分别达到 9.27、9.20、9.05、9.10、9.24 t/hm²。总体来看,冬小麦和夏玉米分别在 SSP3-7.0 和 SSP1-2.6 情景下更适合生长发育。

(4) 在未来 5 种气候排放情景 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP4-3.4、SSP5-8.5) 下,基于冬小麦净灌溉需水量条件下得到的产量 Y_a 可知,灌水可以为冬小麦潜在产量带来 70% 左右的贡献率。通过雨养条件下得到的夏玉米产量 Y_0 可知,仅通过降雨可为夏玉米潜在产量带来 94% 左右的贡献率。

参 考 文 献

- [1] 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北平原农灌用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报,2013,29(1):1-10.
ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] FOSTER T, BROZOVIĆ N. Simulating crop-water production functions using crop growth models to support water policy assessments[J]. Ecological Economics, 2018, 152(1): 9-21.
- [3] ARAYA A, PRASAD P V V, GOWDA P H, et al. Yield and water productivity of winter wheat under various irrigation capacities[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2019, 55(1): 24-37.
- [4] 司昌亮,尚学灵,王旭立,等. 半干旱区玉米膜下滴灌适宜水分生产函数模型研究[J]. 节水灌溉, 2020(1): 39-44, 48.
SI Changliang, SHANG Xueling, WANG Xuli, et al. Study on water product function for maize under drip irrigation under film in the semi-arid region[J]. Water Saving Irrigation, 2020(1): 39-44, 48. (in Chinese)
- [5] 王丽红,刘路广,谭君位,等. 基于 ORYZA 2000 模型的鄂北地区水稻水分生产函数构建[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 74-78.
WANG Lihong, LIU Luguang, TAN Junwei, et al. Water production function of paddy rice in North Hubei Province based on ORYZA 2000 model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 74-78. (in Chinese)
- [6] 王媛媛. 近 50 年陇东地区农业气候资源的时空变化特征及其对主要农作物的影响分析[D]. 西安: 西北师范大学, 2013.
WANG Yuanyuan. Analysis on the spatio-temporal change of agro-climatic resources and its impact on major crops in Eastern

- Gansu nearly 50 years[D]. Xi'an: Northwest Normal University, 2013. (in Chinese)
- [7] 汪顺生, 杨成宇, 黄一丹, 等. 基于 Jensen 模型与 SSA-BP 模型的宽垄沟灌冬小麦水氮生产函数研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 207-215.
WANG Shunsheng, YANG Chengyu, HUANG Yidan, et al. Study on water and nitrogen production function of winter wheat under wide-furrow irrigation based on Jensen model and SSA-BP model[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(9): 207-215. (in Chinese)
- [8] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 280-284.
ZHOU Zhiwei, SHANG Songhao, LEI Zhidong. Jensen model and ANN model for water-fertilizer production function of winter wheat[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 280-284. (in Chinese)
- [9] 李文玲, 孙西欢, 张建华, 等. 水氮耦合对膜下滴灌设施番茄水氮生产函数影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 47-54.
LI Wenling, SUN Xihuan, ZHANG Jianhua, et al. The effect of water-nitrogen coupling on water-nitrogen production functions of greenhouse tomato under mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 47-54. (in Chinese)
- [10] 邓庆玲, 崔宁博, 陈飞, 等. 滴灌脐橙产量和品质的水肥生产函数研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 80-88.
DENG Qingling, CUI Ningbo, CHEN Fei, et al. Study on water fertilizer production function for yield and quality of navel orange under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(5): 80-88. (in Chinese)
- [11] 何沁雪. 夏玉米水肥生产函数的建立及分析[J]. 农业与技术, 2019, 39(23): 29-31.
- [12] 王军涛, 程献国, 李强坤. 基于春玉米微咸水灌溉的水盐生产函数研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 78-80, 95.
WANG Juntao, CHENG Xianguo, LI Qiangkun. Study on water-salt production function based on saline water irrigation for spring corn[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 78-80, 95. (in Chinese)
- [13] 袁成福. 水盐胁迫条件下制种玉米水盐生产函数参数的推求[J]. 节水灌溉, 2019(12): 42-47.
YUAN Chengfu. Calculation of the water salt production function parameters of seed maize under water salt stress[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 42-47. (in Chinese)
- [14] 刘海军, 张昊, 王一帆, 等. 不同覆盖材料和灌溉量对机采棉产量形成及有效积温生产效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(9): 2091-2100.
LIU Haijun, ZHANG Hao, WANG Yifan, et al. Effects of different mulching materials and irrigation on yield formation and effective accumulated temperature production efficiency of machine-picked cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(9): 2091-2100. (in Chinese)
- [15] 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 Yujie, CHEN Qiaomin, GE Quansheng, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(7): 888-898. (in Chinese)
- [16] 李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等. 气候变化背景下东北三省主要作物典型物候期变化趋势分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4180-4189.
LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al. Trend analysis of typical phenophases of major crops under climate change in the three provinces of Northeast China[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2011, 44(20): 4180-4189. (in Chinese)
- [17] 高静, 邬定荣, 王培娟, 等. 华北平原冬小麦主要发育阶段日数对温度变化的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 431-436.
GAO Jing, WU Dingrong, WANG Peijuan, et al. Relative sensitivity of main growth durations to temperature for winter wheat in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(4): 431-436. (in Chinese)
- [18] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 553-562.
PEI Xuexia, DANG Jianyou, ZHANG Dingyi, et al. Impact of sowing date on yield and water use efficiency of wheat in different precipitation years in dryland of South Shanxi[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 553-562. (in Chinese)
- [19] 董明辉, 陈培峰, 江贻, 等. 江苏太湖地区不同生育类型粳稻品种产量对不同播期气候因子的响应[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 952-963.
DONG Minghui, CHEN Peifeng, JIANG Yi, et al. Response of yield of different growth types of japonica rice varieties to climate factors at different sowing dates in Taihu region of Jiangsu Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(5): 952-963. (in Chinese)
- [20] 于琳, 纪武鹏, 王平, 等. 气象因子对黑龙江省东部地区玉米生长发育及产量的影响[J]. 现代化农业, 2020(2): 2-5.
- [21] 肖登攀, 陶福禄. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1539-1545.
XIAO Dengpan, TAO Fulu. Impact of climate change in 1981-2009 on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1539-1545. (in Chinese)
- [22] TAO F L, ZHANG Z, XIAO D P, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981-2009[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 189-190: 91-104.

[23] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2021.

[24] CHAN F K S, ZHU G Y, WANG J, et al. Food security in climatic extremes: challenges and opportunities for China[J]. Cell Reports Sustainability, 2024, 1(2):100013.

[25] PERKINS K S, BARRIOPEDRO D, JHA R, et al. Extreme terrestrial heat in 2023 [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2024, 5(4):244–246.

[26] 张志宇, 鄧志红, 吴鑫森. 冬小麦-夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16):102–111.
ZHANG Zhiyu, QIE Zhihong, WU Xinmiao. Multi-objective optimization model of irrigation schedule for winter wheat – summer maize rotation system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 102–111. (in Chinese)

[27] 肖春安, 蔡甲冰, 常宏芳, 等. 考虑作物生长状态的农田表面温度数据精量甄别与区分[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22):89–101.
XIAO Chun'an, CAI Jiabing, CHANG Hongfang, et al. Precision data screening and partition of field surface temperature based on the crop growth status[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(22): 89–101. (in Chinese)

[28] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11):238–246.
PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 238–246. (in Chinese)

[29] 朱成立, 徐雨琳, 黄明逸, 等. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦咸淡轮灌制度模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 330–342.
ZHU Chengli, XU Yulin, HUANG Mingyi, et al. Simulation and evaluation of cycle irrigation with brackish and fresh water for winter wheat based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 330–342. (in Chinese)

[30] 蔡甲冰, 常宏芳, 陈鹤, 等. 基于不同有效积温的玉米干物质累积量模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 263–271.
CAI Jiabing, CHANG Hongfang, CHEN He, et al. Simulation of maize dry matter accumulation in normalized logistic model with different effective accumulated temperatures in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):263–271. (in Chinese)

[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 CSAE, 2023, 39(8):167–178. (in Chinese)

[32] 王修贵, 张祖莲, 赵长友, 等. 作物产量对水分亏缺敏感性指标的初步研究[J]. 灌溉排水学报, 1998, 7(2):25–30.
WANG Xiugui, ZHANG Zulian, ZHAO Changyou, et al. A preliminary study on the sensitivity index of crop yield to water deficit[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1998, 7(2):25–30. (in Chinese)

[33] 郭群善, 雷志栋, 杨诗秀. 冬小麦水分生产函数 Jensen 模型敏感指数的研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(1):20–25.
GUO Qunshan, LEI Zhidong, YANG Shixiu. Study on the sensitivity index of Jensen model of water production function of winter wheat[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(1):20–25. (in Chinese)

[34] 罗遵兰, 冯绍元, 左海萍. 山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(1):16–19, 27.
LUO Zunlan, FENG Shaoyuan, ZUO Haiping. The study of water product function of winter wheat in Shanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(1):16–19, 27. (in Chinese)

[35] MINHAS B S. Towards the structure of production function of wheat yields with dated in-puts of irrigation water[J]. Water Resources Research, 1974, 3(10):333–343.

[36] 介飞龙, 费良军, 李山, 等. 基于根系层水分状态的旱区净灌溉需水量模型构建和应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13):105–113.
JIE Feilong, FEI Liangjun, LI Shan, et al. Constructing and applying the net irrigation water requirement model for arid areas using water state of root zone[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13):105–113. (in Chinese)

[37] 蔡甲冰, 汪玉莹, 刘玉春. 基于蒸渗仪的冬小麦-夏玉米 ET 估算模型特征参数研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 285–295.
CAI Jiabing, WANG Yuying, LIU Yuchun. Feature parameters of evapotranspiration estimation model for winter wheat and summer maize based on lysimeter monitoring system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):285–295. (in Chinese)

[38] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519–525.
ZHANG Lixia, CHEN Xiaolong, XIN Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519–525. (in Chinese)

[39] FENG P Y. WANG B, LIU D L, et al. Incorporating machine learning with biophysical model can improve the evaluation of climate extremes impacts on wheat yield in south-eastern Australia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275:100–113.

业科学,2020, 53(23): 4866 – 4878.

ZHANG Qiru, XIE Yinghe, LI Tingliang, et al. Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020, 53(23): 4866 – 4878. (in Chinese)

[44] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768 – 1781.

PEI Xuexia, DANG Jianyou, ZHANG Dingyi, et al. Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(10): 1768 – 1781. (in Chinese)

[45] 吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

LÜ Fenglian. Study on agronomic and environmental effects of combined application organic and chemical fertilizers under winter wheat and summer maize cropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[46] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 142 – 152.

LI Juan, ZHAO Bingqiang, LI Xiuying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 142 – 152. (in Chinese)

(上接第 443 页)

[40] 周丽涛,孙爽,郭尔静,等. 干旱条件下 APSIM 模型修正及模拟华北冬小麦产量效果[J]. 农业工程学报,2023,39(6): 92 – 102.

ZHOU Litao, SUN Shuang, GUO Erjing, et al. Modification of APSIM model under drought conditions and simulation of winter wheat yield in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6):92 – 102. (in Chinese)

[41] 沙慧敏,李琪,孙锡鹏,等. 灌浆期升温 and 干旱胁迫对江苏冬小麦产量和干物质分配的影响[J]. 气象与减灾研究,2021, 44(3):201 – 208.

SHA Huimin, LI Qi, SUN Xipeng, et al. Effects of warming at seed filling stage and drought stress on the production and dry matter partitioning of winter wheat in Jiangsu Province[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,2021,44(3):201 – 208. (in Chinese)

[42] TANG R S, ZHENG J C, JIN Z Q, et al. Possible correlation between high temperature-induced floret sterility and endogenous levels of IAA, GAs and ABA in rice[J]. Plant Growth Regulation, 2008, 54(1):37 – 43.

[43] 韩智博,张宝庆,田杰,等. 基于 CCSM4 气候模式的未来气候变化对黑河绿洲玉米产量影响预测[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10):108 – 115.

HAN Zhibo, ZHANG Baoqing, TIAN Jie, et al. Prediction of future climate change impacts on maize yield in Heihe Oasis based on CCSM4 climate model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(10):108 – 115. (in Chinese)

[44] 温鹏飞,高晨凯,郭锦英,等. RCP 情景下基于 AquaCrop 模型的河南省夏玉米减产风险评估[J]. 玉米科学,2023, 31(1):88 – 97.

WEN Pengfei, GAO Chenkai, GUO Jinying, et al. Yield reduction risk assessment of summer maize base on AquaCrop model under RCP scenarios in Henan Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2023,31(1):88 – 97. (in Chinese)

[45] ZHANG T, ZUO Q, MA N, et al. Optimizing relative root-zone water depletion thresholds to maximize yield and water productivity of winter wheat using AquaCrop[J]. Agricultural Water Management, 2023, 286:108391.

[46] 任聪哲,范文波,乔长录,等. 基于 AquaCrop 模型的塔额盆地夏玉米节水潜力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2):140 – 149,209.

REN Congzhe, FAN Wenbo, QIAO Changlu, et al. Analysis of water-saving potential of summer maize in Ta’e Basin based on AquaCrop model[J] Agricultural Research in the Arid Areas, 2024,42(2):140 – 149,209. (in Chinese)

[47] 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 Ya’nan, 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)

[48] 孙仕军,张琳琳,陈志君,等. AquaCrop 作物模型应用研究进展[J]. 中国农业科学,2017,50(17):3286 – 3299.

SUN Shijun, ZHANG Linlin, CHEN Zhijun, et al. Advances in AquaCrop model research and application[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2017,50(17):3286 – 3299. (in Chinese)