

河套灌区不同水肥处理对玉米生长影响的 AquaCrop 模型模拟

戴嘉璐¹, 李瑞平¹, 李聪聪¹, 鲁耀泽², 邹存菁³

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018; 2.巴彦淖尔市水利科学研究所,
内蒙古 巴彦淖尔 015000; 3.内蒙古河套灌区永济灌域管理局,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为探究内蒙古河套灌区玉米生长适宜的水肥管理方案,开展了不同灌水与施肥水平玉米田间试验。利用田间实测数据对 AquaCrop 模型进行了率定与验证,以此为基础,采用 AquaCrop 模型模拟分析了不同灌水和施肥条件下玉米产量和水分利用效率的变化规律。结果表明:(1)模型率定和验证过程中冠层覆盖度和生物量模拟值与实测值的 R^2 分别介于 0.74~0.99, 0.87~0.99; NRMSE 分别介于 4.55%~12.32%, 5.77%~27.07%; E_{NS} 分别介于 0.90~0.99, 0.85~0.99; 各处理产量模拟值与实测值间 R^2 分别为 0.99, 0.97; NRMSE 分别为 4.59%, 3.42%, E_{NS} 分别为 0.95, 0.97; 水分利用效率模拟值与实测值间 R^2 分别为 0.81, 0.86; NRMSE 分别为 6.75%, 13.85%, E_{NS} 分别为 0.96, 0.83。说明 AquaCrop 模型在河套灌区具有很好的适用性。(2)利用校验后的模型模拟了不同施肥水平下灌水量变化对玉米产量和水分利用效率的影响,当灌水量达 270 mm 后,继续增加灌水量,玉米产量和水分利用效率基本保持不变,甚至有所降低。(3)以稳产高效为目标,中肥条件下,灌水 270 mm 时玉米产量和水分利用效率均为各灌水量中的最优值。因此,推荐灌水 270 mm、施肥 375 kg/hm² 为研究区保障玉米稳产高效的最优灌溉施肥组合。

关键词:灌溉; 施肥; 玉米; AquaCrop 模型; 水肥利用效率

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0312-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.043

Simulation of Effects of Different Water and Fertilizer Treatments on Maize Growth with AquaCrop in Hetao Irrigated Area

DAI Jialu¹, LI Ruiping¹, LI Congcong¹, LU Yaoze², ZOU Cunjing³

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018; 2.Bayannur Water Conservancy Research Institute, Bayannur, Inner Mongolia 015000;

3.Yongji Irrigation Area Administration of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, Bayannur, Inner Mongolia 015000)

Abstract: In order to explore the water-fertilizer management strategy suitable for maize growth in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, this study conducted a field experiment with different irrigation and fertilization levels. After the calibration and validation by observed data, the AquaCrop model was used to simulate the variation pattern of corn yield and water use efficiency (WUE) under different irrigation and fertilization levels. The results indicated: (1) The R^2 values of simulated and measured canopy coverage and biomass were 0.74 ~ 0.99 and 0.87 ~ 0.99, respectively, during model calibration and validation. The NRMSE values ranged from 4.55% to 12.32% and 5.77% to 27.07%, respectively, while the E_{NS} ranged from 0.90 to 0.99 and 0.85 to 0.99 respectively. The R^2 values between the simulated and measured output values were 0.99 and 0.97, respectively, and NRMSE were 4.59% and 3.42%, and E_{NS} were 0.95 and 0.97, respectively. The R^2 between the simulated and measured WUE were 0.81 and 0.86, respectively, and NRMSE were 6.75% and 13.85%, and E_{NS} were 0.96 and 0.83, respectively, indicating that AquaCrop model had a good applicability in the Hetao Irrigation District. (2) The verified model was used to simulate the effects of irrigation changes on maize yield and WUE at different fertilization levels. The results showed that when irrigation rate reached 270 mm and continued to increase, the maize yield and WUE remained basically unchanged or

收稿日期:2020-11-18

资助项目:国家自然科学基金项目(51839006)

第一作者:戴嘉璐(1996—),女,硕士研究生,主要从事灌溉排水理论与新技术研究。E-mail:1529231858@qq.com

通信作者:李瑞平(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与农业水利遥感信息技术研究。E-mail:nmgrlrp@163.com

even decreased. (3) With stable yield and high efficiency as the target, under the medium fertilization, the optimal corn yield and WUE were given at 270 mm of irrigation. Therefore, we recommend 270 mm irrigation, 375 kg/hm² fertilizing as the best combination to ensure the stable-yield and high-efficiency in the studied area.

Keywords: irrigation; fertilization; maize; AquaCrop model; water and fertilizer use efficiency

内蒙古河套灌区地处我国干旱的西北平原,是我国重要的商品粮油生产基地。水、肥是限制该地区农业发展的 2 大关键因子,其中灌水量是一个最关键的要素^[1]。农业生产中,为盲目追求高产,氮肥、灌水过量投入,导致水肥利用效率不高,并由此引发一系列生态环境问题^[2-4]。因此,大力发展高效节水节肥技术,提高农田水肥利用效率,对保障灌区农业可持续发展与改善农田生态环境具有很重要的现实意义。

由于田间试验耗时费力,且易受到环境因素的影响,因此利用作物模型进行作物生长模拟成为专家学者的研究热点^[5]。作物生长模型克服了传统试验研究内容单一、试验周期长、时间和空间有限的不足^[6]。作物生长模型 WOFOST、CropSyst^[7] 和 DSSAT^[8] 已被用于玉米产量预测。然而,大多模型模拟时需要获取大量较难获得的参数。与其他模型相比,AquaCrop 模型具有界面简单直观、输入参数少、适用范围广和模拟精度高等优点。已有研究^[9-10] 表明,采用 AquaCrop 模型能较好地模拟不同水分处理下多种作物的产量形成机制。部分学者利用校验后的模型进行了气候变化响应^[11-12]、灌溉制度优化^[13-14]、经济效益评价^[15] 等方面的研究,但以往学者多以玉米高产高效为研究目标,本研究以玉米稳产高效为目标,为实现河套灌区农业生产可持续发展提供理论基础。

本文以 AquaCrop 为技术支撑,选择河套灌区玉米为研究对象,结合田间试验分析结果,模拟不同灌水和施肥水平下玉米产量及水分利用效率变化规律,寻求河套灌区保障玉米稳产高效的灌溉施肥制度,为实现河套灌区水资源的合理配置、保障河套灌区农业生产的可持续发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验时间为 2019 年 4 月至 2020 年 9 月,地点位于内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区曙光试验站(40°43′26″N,107°13′23″E),属于干旱半干旱气候。试验区多年平均降水量为 144.2 mm,年平均蒸发量为 2 434.7 mm,年平均日照时间为 3 180 h,土壤质地主要为沙壤土,耕层平均土壤容重为 1.45 g/cm³,盐分含量为 1.2 g/kg,有机质含量为 10.80 g/kg,全氮含量为 0.244 g/kg,全磷含量为 0.338 g/kg。玉米是该地区的主要粮食作物。

1.2 试验设计

试验设置灌水量和施肥量 2 个因素,每个因素 3 个水平。灌水水平分别比当地灌水(339 mm)减少 46.9%,33.6%,20.4%的低水(180 mm)、中水(225 mm)、高水(270 mm),施肥水平分别为比当地施肥(600 kg/hm²)减少 50.0%,37.5%,25.0%的低肥(300 kg/hm²)、中肥(375 kg/hm²)、高肥(450 kg/hm²),共 9 个处理,每个处理 3 次重复,将当地一般灌水量(339 mm)和施肥量(600 kg/hm²)设为对照 CK。各处理底肥施用 300 kg/hm² 磷酸二铵,含氮 18%,播种时由播种机带入;抽雄期追肥,追肥施用尿素,含氮 46.8%。具体试验设计见表 1。

每个试验小区面积 72 m²,为了避免边行效应,试验小区东西两侧各设 1 m 宽、南北两侧各设 2 m 宽的保护带,保护带高为 15 cm,以防止地面灌溉串水和小区间地下侧向渗漏。玉米供试品种为“金丰 628”,行距 40 cm,株距 30 cm。2 年田间试验具体播种日期分别为 2019 年 4 月 29 日和 2020 年 4 月 23 日,收获日期分别为 2019 年 9 月 25 日和 2020 年 9 月 12 日。灌水方式为地面灌溉,采用水泵、水表定量控制,2019 年灌水日期分别为 6 月 17 日、7 月 12 日、8 月 5 日,2020 年灌水日期分别为 6 月 14 日、7 月 6 日、8 月 3 日。各处理均采用相同的田间管理方法进行除草及病虫害防治。

表 1 灌溉与施肥处理

处理	灌水定额/mm			追肥量/ (kg·hm ⁻²)
	第 1 次灌水	第 2 次灌水	第 3 次灌水	
Y1	60	60	60	300
Y2	60	60	60	375
Y3	60	60	60	450
Y4	75	75	75	300
Y5	75	75	75	375
Y6	75	75	75	450
Y7	90	90	90	300
Y8	90	90	90	375
Y9	90	90	90	450
CK	113	113	113	600

1.3 AquaCrop 模型基本原理

由于作物对水分亏缺的响应较为复杂,因此定量分析水分亏缺对作物生长的影响十分困难。利用经验公式来描述作物产量和水分响应之间的关系仍是一种最常用的方法。其中,使用最广泛的是 FAO 第 33 号灌溉文件^[16]中评估作物产量和水分响应的转换公式:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_{ta}}{ET_x}\right)$$

(1)

式中: Y_x 为作物潜在产量 (kg/hm^2); Y_a 为作物实际产量 (kg/hm^2); K_y 为作物产量对水分响应的比例因子; ET_x 为作物潜在腾发量 (mm); ET_{ta} 为作物实际腾发量 (mm)。

AquaCrop 模型对公式 (1) 进行了优化和改进, 以便更准确地反映水分对作物生长和产量的影响。改进后的模型核心方程为:

$$Y = B \times HI$$

(2)

$$B = WP^* \times \sum T_r$$

(3)

式中: Y 为作物产量 (kg/hm^2); B 为地上部生物量 (kg/hm^2); HI 为作物收获指数 (%); WP^* 为标准化水分生产力 (g/m^2); T_r 为作物蒸腾量 (mm)。

AquaCrop 模型没有明确考虑养分的循环与平衡, 而是采用半定量的方法来描述养分胁迫对作物生

长的影响^[17], 公式为:

$$B_{\text{rel}} = \frac{B_{\text{stress}}}{B_{\text{ref}}} \times 100\%$$

(4)

式中: B_{stress} 为有肥料胁迫条件下得到的地上部生物量 (kg/hm^2); B_{ref} 为无肥料胁迫条件下得到的地上部生物量 (kg/hm^2); B_{rel} 的取值范围为 $0 \sim 100\%$, B_{stress} 和 B_{ref} 由本次试验数据确定。采用 5 个胁迫参数反映肥料胁迫的响应: 相对生物量、肥料胁迫下最大冠层覆盖度 (CC_{xstress})、冠层衰减程度、平均冠层减少、冠层扩张减少^[18]。

1.4 数据获取

1.4.1 田间试验数据 田间获取的试验数据为气象数据、土壤数据、地下水位数据和作物生长数据。

(1) 气象数据由试验区农田微气象站自动监测, 2 年试验中玉米生育期内气温、降雨量及参考作物腾发量^[19] 见图 1。

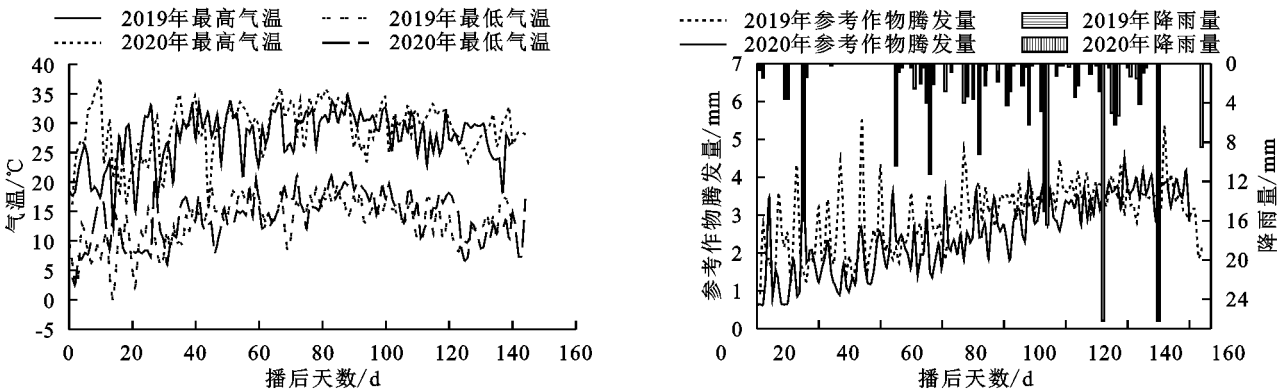


图 1 玉米生育期气象数据

(2) 土壤数据包括土层深度、土壤容重、田间持水率及饱和含水率等参数。各土层具体参数见表 2。

表 2 试验区土壤数据

土层深度/cm	颗粒分布/%			土壤体积质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水率/%	饱和含水率/%	凋萎含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤类型
	黏粒 ($<0.002 \mu\text{m}$)	粉粒 ($0.05 \sim 0.002 \mu\text{m}$)	砂粒 ($5 \sim 0.05 \mu\text{m}$)					
0—20	19.78	69.02	11.20	1.45	17.49	35.47	0.15	粉砂壤土
20—40	6.32	80.85	12.83	1.40	20.52	34.82	0.16	粉砂土
40—60	22.80	50.80	26.40	1.41	25.18	34.76	0.16	粉砂壤土
60—80	12.93	80.09	6.98	1.51	22.57	27.77	0.14	粉砂壤土
80—100	10.28	87.00	2.72	1.50	20.28	22.99	0.15	粉砂土

(3) 地下水位采用 HOBO ware 地下水位监测器自动监测。生育期内研究区平均地下水位 2.5 m。

(4) 土壤含水率采用烘干法和 FDR 结合测定。每 14 天测定 1 次, 播前、收获后、降雨后以及灌水前后加测 1 次。取样深度分别为 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm, 0—100 cm 土壤平均含水率采用加权平均法计算。另外, 前人^[20] 在此试验基地的研究表明, 玉米根系主要分布在 0—80 cm 土层内, 因此, 本研究将玉米根区深度定义为 0—100 cm, 该深度已包含绝大多数玉米根系, 以满足计算玉米水分

利用的需要。

采用水量平衡法计算玉米生育期耗水量 ET

$$ET = \Delta W + P + I + G - R - F$$

(5)

式中: ΔW 为 0—100 cm 土层土壤储水量之差 (mm); P 为生育期有效降雨量 (mm), 如果降雨量小于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍, 则视为无效降雨; I 为玉米生育期的灌水量 (mm); G 为生育期地下水对作物根系的补水量 (mm), 详细计算过程参考文献^[21]; R 为生育期地表径流量 (mm), 试验区地表平坦, 无地表径流产生; F 为生育期根区深层渗漏量 (mm),

假定降雨或灌溉先补给根系层土壤水分至田间持水量,多余的水分即为深层渗漏损失量。具体计算方法为灌水(或降水)前 100 cm 土层内有效土壤含水率和灌水量(或降水)相加,再减去田间持水量。

玉米水分利用效率(WUE,kg/(hm²·mm))计算公式为:

$$WUE=Y/ET \tag{6}$$

式中:Y 为单位面积玉米产量(kg/hm²)。

肥料偏生产力(PFP,kg/kg)计算公式为:

$$PFP=Y/T \tag{7}$$

式中:T 为玉米生育期所施化肥总量(kg/hm²)。

(5)作物生长数据包括地上部生物量(AGB)、冠层覆盖度(CC)和产量。

地上部生物量:在玉米生长的关键生育期测定地上部生物量。每小区取 3 株能够代表作物平均长势的植株,剪去地下部分后于 105 ℃下杀青 0.5 h,75 ℃烘至恒重,测其干重,根据种植密度和种植面积折算为地上部生物量。

冠层覆盖度:由叶面积指数(LAI)计算获得。在玉米生长的关键生育期定株测量每个小区的叶片长度及宽度。LAI 计算公式为:

$$LAI=0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (L_{ij} \times B_{ij})}{m} \tag{8}$$

式中:ρ 为种植密度(株/hm²);n 为第 j 株玉米的总叶片数;m 为测定株数;L_{ij} 为叶片叶领到叶尖的长度(m);B_{ij} 为叶片最宽处宽度(m);0.75 为与叶形有关的叶面积回归系数。

CC 计算公式为:

$$CC=1.005(1-\exp(-0.6 \times LAI))^{1.2} \tag{9}$$

产量:玉米成熟后在每个小区选取能够代表平均长势的 5 株成熟玉米,果穗风干后经人工脱粒测定总质量及百粒重,最终折算成含水率为 14%的籽粒产量。

1.4.2 模型率定 AquaCrop 模型提供了玉米的相关生长参数,由于不同地区的经纬度、作物种植结构以及土壤质地等因素的差异,使玉米的生长参数略有差异。参考模型手册提供的参数范围以及丁宗江^[22]对 AquaCrop 模型在河套灌区进行的研究,利用实测气象数据、作物生长数据、土壤数据、灌溉制度、田间管理等资料建立模型基础数据库,参考 Vanuytrecht 等^[23]介绍的校准顺序:第 1 步,校准冠层覆盖度;第 2 步,校准地上部生物量;第 3 步,校准产量。其中选取 2019 年各处理的实测数据对模型进行率定,后利用 2020 年各处理的实测数据对模型进行验证,得到 AquaCrop 模拟河套灌区玉米生长的部分参数见表 3 和表 4。

表 3 AquaCrop 模型部分参数

模型参数	描述	取值	单位
HI ₀	参考收获指数	45	%
CGC	冠层增长系数	10.4	%/d
CDC	冠层衰减速度	8	%/d
CC _x	最大冠层覆盖度	95	%
WP [*]	标准水分生产力	32	g/m ²
P _{exp, upper}	水分胁迫对冠层生长影响上限	0.25	
P _{exp, lower}	水分胁迫对冠层生长影响下限	0.55	
HI 的存在周期		48	d
T _{base}	基底温度	8	℃
T _{upper}	上限温度	30	℃
K _{cb}	作物系数	1.1	
Z _x	最大有效根深	1	m
CC ₀	原始冠层覆盖率	0.28	%

表 4 肥料胁迫参数取值

施肥水平	模型参数	取值	单位
低肥	相对生物量	55	%
	CC _{xstress}	67	%
	冠层衰减程度	Small	
	平均冠层减少	0.03	%
	冠层扩张减少	13	%
	相对生物量	60	%
中肥	CC _{xstress}	77	%
	冠层衰减程度	Small	
	平均冠层减少	0.01	%
	冠层扩张减少	5	%
	相对生物量	87	%
	CC _{xstress}	81	%
高肥	冠层衰减程度	Small	
	平均冠层减少	0.01	%
	冠层扩张减少	3	%

注:CC_{xstress}表示肥料胁迫下最大冠层覆盖度。

对模型校验过程中的模拟值和实测值之间的吻合程度采用决定系数 R²,标准均方根误差 NRMSE、纳什效率系数 E_{NS} 统计指标来评价。其中 R² 和 E_{NS} 越接近于 1,表明模型模拟越准确;NRMSE<10%,表明模拟效果极好;10%<NRMSE<20%,表明模拟效果好;20%<NRMSE<30%,表明模拟效果合理;NRMSE>30%,表明模拟效果差。模型评价指标计算方程为:

$$R^2=\frac{(\sum_{i=1}^n (S_i-\bar{S})(O_i-\bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (S_i-\bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i-\bar{O})^2} \tag{10}$$

$$NRMSE=\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i-O_i)^2} \times 100/\bar{O} \tag{11}$$

$$E_{NS}=1-\frac{\sum_{i=1}^n (S_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i-\bar{O})^2} \tag{12}$$

式中:S_i和 O_i分别为模拟值和实测值; $\bar{S}$ 和 $\bar{O}$ 分别为

模拟值和实测值的均值; n 为实测值的个数。

用 Excel 2007 软件进行数据处理,SPSS 23 软件进行最小显著差异法(LSD)显著性检验($P<0.05$),Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 模型率定

2.1.1 玉米冠层覆盖度和生物量的率定 本文采用 2019 年各处理的实测数据进行冠层覆盖度和生物量的率定,2020 年各处理的实测数据进行验证。结果(图 2、图 3、表 5)表明,模型率定过程中各处理冠层覆盖度评价指标范围分别为 $0.74<R^2<0.99$, $4.55\%<$

$NRMSE<9.07\%$, $0.96<E_{NS}<0.99$;生物量评价指标范围分别为 $0.87<R^2<0.99$, $5.77\%<NRMSE<27.07\%$, $0.96<E_{NS}<0.99$,表明模型模拟冠层覆盖度和生物量的精度都较高,均符合精度要求。为进一步验证模型参数率定结果的准确性,比较 2020 年各处理的冠层覆盖度及生物量评价指标。结果表明,冠层覆盖度和生物量验证过程中实测值均落在模拟值附近,且各评价指标的范围分别为 $0.92<R^2<0.99$, $5.79\%<NRMSE<12.32\%$, $0.90<E_{NS}<0.98$; $0.93<R^2<0.99$, $8.47\%<NRMSE<23.63\%$, $0.85<E_{NS}<0.99$,均符合精度要求,模拟精度较高。

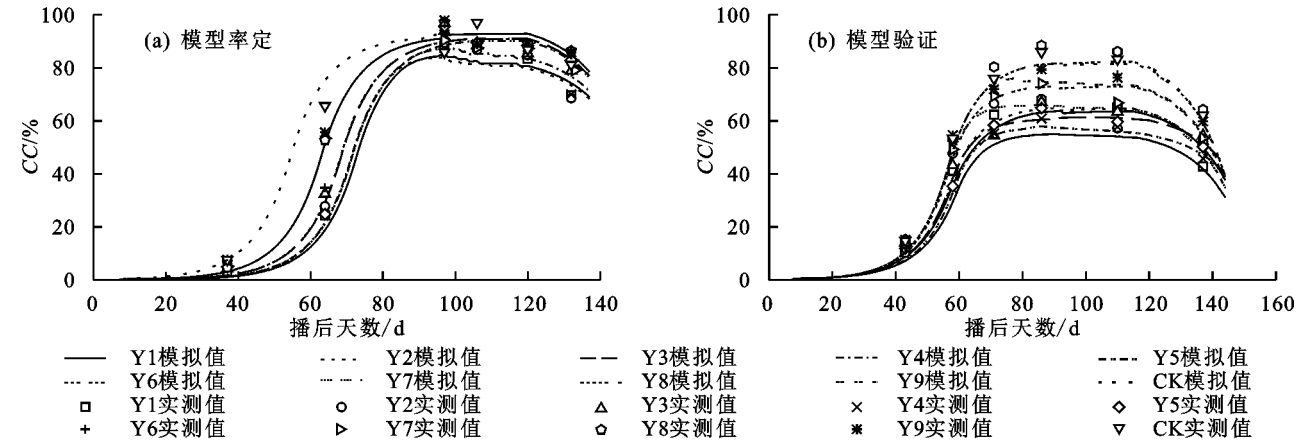


图 2 冠层覆盖度模拟值与实测值比较

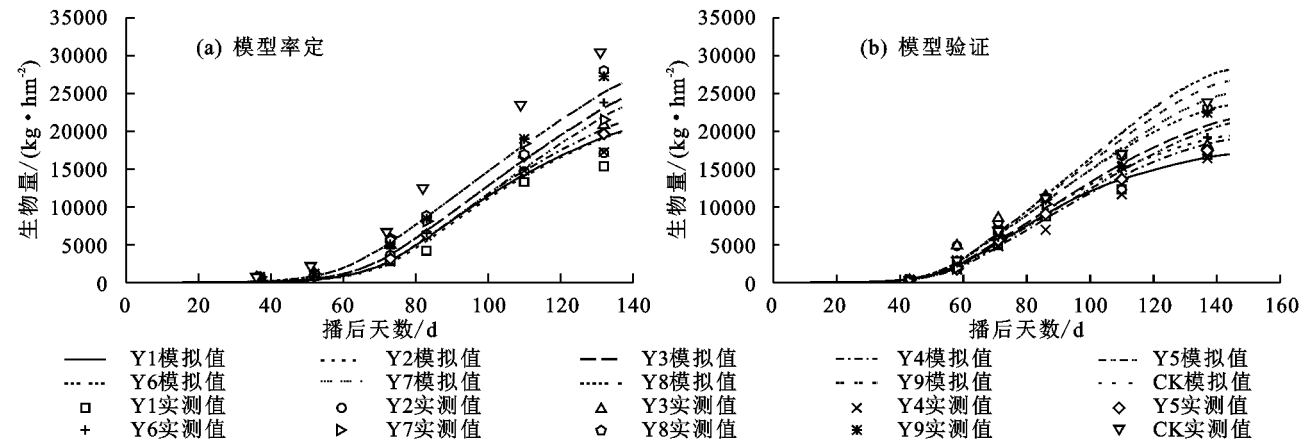


图 3 生物量模拟值与实测值比较

2.1.2 玉米产量和水分利用效率的校验 由表 6 可知,模型率定验证过程中,各处理产量模拟值与实测值间 R^2 分别为 0.99,0.97;NRMSE 分别为 4.59%,3.42%, E_{NS} 分别为 0.95,0.97;水分利用效率模拟值与实测值间 R^2 分别为 0.81,0.86;NRMSE 分别为 6.75%,13.85%, E_{NS} 分别为 0.96,0.83。由此可知,模型对产量和水分利用效率的模拟精度也较高。可利用经校验后的模型进行玉米产量的模拟预测,为河套灌区寻求玉米稳产高效的灌溉制度提供理论依据。

2.2 水肥耦合对玉米产量和水肥利用效率的影响

由表 7 可知,相同灌水水平下(低水和中水),玉米产量随施肥量的增加而增加,而当灌水量为高水水平

时,玉米产量随施肥量增加先增加后减小且各处理间差异不显著($P>0.05$,2020 年 Y7 处理除外)。总体看来,灌水量相同且为高水水平时,各处理与 CK 无显著性差异($P>0.05$),但显著高于其他处理($P<0.05$)。2 年试验中,Y8 处理在产量方面具有明显的优势,该处理在灌水量减少 69 mm、施肥量减少 150 kg/hm² 的情况下,仍与最高产量 CK(2019 年 13 781.90 kg/hm², 2020 年 13 978.15kg/hm²)无显著差异。

2 年试验中,水分利用效率的最大值均为 Y8 处理,虽与 CK 无显著差异($P>0.05$),但显著高于其他处理($P<0.05$)。灌水量大于或小于 Y8 处理(高水)时水分

利用效率均有所降低,2019 年 Y8 处理的水分利用效率较低水、中水和 CK 分别提高 15.20%,15.09%,18.17%;2020 年 Y8 处理的水分利用效率较低水、中水和 CK 分别提高 37.38%,32.59%,6.78%。表明过量增加灌水量不利于玉米水分利用效率的提高,反而造成水资源浪费。

肥料偏生产力是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标。相同灌水水平下,肥料偏生产力与施肥量成反比(2019 年低水和中水水平除外)。总体来看,当灌水量达高水水平时,各处理的肥料偏生产力显著高于其他处理($P<0.05$)。其中 2019 年产量最高处理(Y8)相对应的肥料偏生产力为 35.25 kg/kg,虽略低于 Y7 处理但与 Y7 处理、Y9 处理及 CK 无显著性差异($P>0.05$);2020 年产量最高处理(Y8)相对应的肥料偏生产力为 35.45 kg/kg,与 Y7 处理无显著差异,但显著高于 Y9 处理和 CK。2019 年 Y8 处理的肥料偏生产力较 Y9 处理和 CK 分别提高 18.35%和 34.84%($P<0.05$);2020 年 Y8 处理的肥料偏生产力较 Y9 处理和 CK 分别提高 17.46%和 34.27%($P<0.05$)。综合考虑产量、水分利用效率和肥料偏生产力,并将目标产量维持在平均产量区间,高水中肥处理(灌水 270 mm,施肥 375

kg/hm²)为较适宜的灌溉施肥组合。

表 5 模型率定验证评价指标

模型校验	处理	冠层覆盖度			生物量		
		R^2	NRMSE/%	E_{NS}	R^2	NRMSE/%	E_{NS}
率定	Y1	0.99	7.06	0.98	0.98	27.07	0.96
	Y2	0.99	9.07	0.97	0.99	13.89	0.99
	Y3	0.95	5.72	0.99	0.88	15.16	0.99
	Y4	0.98	7.26	0.98	0.88	18.31	0.98
	Y5	0.97	5.71	0.99	0.87	15.34	0.99
	Y6	0.95	6.42	0.98	0.89	5.77	0.99
	Y7	0.87	5.84	0.98	0.99	22.62	0.98
	Y8	0.87	4.55	0.99	0.99	19.62	0.99
	Y9	0.87	5.88	0.98	0.99	14.36	0.99
	CK	0.74	8.11	0.96	0.98	11.14	0.99
验证	Y1	0.95	10.03	0.94	0.99	8.47	0.99
	Y2	0.92	12.32	0.90	0.93	22.58	0.87
	Y3	0.97	8.84	0.94	0.93	23.63	0.85
	Y4	0.99	10.87	0.92	0.99	19.96	0.94
	Y5	0.99	9.26	0.94	0.99	15.28	0.96
	Y6	0.99	9.43	0.94	0.99	22.84	0.91
	Y7	0.99	8.61	0.95	0.97	21.48	0.93
	Y8	0.99	8.32	0.95	0.99	21.15	0.93
	Y9	0.99	7.20	0.96	0.99	20.67	0.93
	CK	0.99	5.79	0.98	0.99	17.22	0.95

表 6 各处理玉米产量和水分利用效率模型校验

模型校验	处理	产量/(kg·hm ⁻²)		R^2	NRMSE/%	E_{NS}	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)		R^2	NRMSE/%	E_{NS}
		实测值	模拟值				实测值	模拟值			
率定	Y1	7599.44	7539.00	0.99	4.59	0.95	24.73	26.80	0.81	6.75	0.96
	Y2	7914.41	8337.00				25.37	29.40			
	Y3	9797.13	9564.00				30.39	30.63			
	Y4	8993.53	8761.00				24.61	25.53			
	Y5	9351.70	9591.00				25.30	27.57			
	Y6	11238.78	10813.00				30.68	30.57			
	Y7	12853.28	11895.00				30.83	31.58			
	Y8	13218.99	12586.00				31.64	33.41			
	Y9	12949.70	12359.00				30.49	32.81			
	CK	13781.85	13288.05				25.89	25.93			
验证	Y1	7667.42	7801.00	0.97	3.42	0.97	18.82	15.80	0.86	13.85	0.83
	Y2	8831.14	8956.00				23.93	20.80			
	Y3	9480.39	9729.00				23.84	26.60			
	Y4	9091.88	8695.00				22.45	25.50			
	Y5	9691.02	9487.00				24.41	27.50			
	Y6	10994.13	10786.00				24.81	25.90			
	Y7	12086.97	11584.00				26.40	30.60			
	Y8	13292.66	13851.00				28.59	32.90			
	Y9	13165.34	12531.00				27.03	31.90			
	CK	13978.15	14235.00				26.65	29.90			

2.3 基于 AquaCrop 模型灌水量与产量和水分利用效率效应分析

利用本地化参数,通过 AquaCrop 模型模拟低肥、中肥和高肥水平下灌水量变化对玉米产量和水分

利用效率的影响。由图 4 可知,玉米产量和水分利用效率均随灌水量增加先急剧增加,随后减缓。当灌水量达 270 mm 后,继续增加灌水量不会使产量和水分利用效率再有所增加,二者基本保持不变甚至有降低

趋势。从图 4 可以看出,低肥水平下,玉米产量和水分利用效率均明显低于中肥和高肥处理,且在低肥水平下各灌水处理产量达不到当地平均水平(12 226.65~13 307.85 kg/hm²)。由于中肥处理下玉米水分利用效率略高于高肥处理,考虑到稳产高效的双重目标,中肥时灌水 270 mm 为较适宜的灌溉施肥组合。

3 讨论

(1)应用 AquaCrop 模型能较好地模拟不同灌溉施肥制度下玉米冠层覆盖度、生物量和产量情况,其中模拟值与实测值的决定系数 R^2 、纳什效率系数 E_{NS} 、标准均方根误差 NRMSE 均在可接受范围内,与国内外研究^[12-14]结果基本吻合。可利用经校验后的模型进行玉米产量的模拟预测。

(2)通过分析田间试验结果,得到玉米产量和水分利用效率随灌水和施肥量的增加呈先增后减的趋势,此结果与张富仓等^[24]和尚文彬等^[25]研究结果类似。本研究发现,灌水为高水水平时,玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力随施肥量的增加呈先增长后降低的趋势。灌水量大于或小于 Y8 处理(高水)时水分利用效率均有所降低,2019 年 Y8 处理的水分利用效率较低水、中水和 CK 分别提高 15.20%,15.09%,18.17%;2020 年 Y8 处理的水分利用效率较低水、中水和 CK 分别提高 37.38%,32.59%,6.78%。2 年试验中,虽然在高水低肥处理(Y7)下可以获得较高的肥料偏生产力,但考虑在目标产量区间内并非逆

减趋势,灌水 270 mm,施肥 375 kg/hm² 为较适宜的灌溉施肥制度。

表 7 水肥耦合对玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力的影响

年份	处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	肥料偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
2019	Y1	7 599.44e	24.73e	25.33b
	Y2	7 914.41de	25.37d	21.11e
	Y3	9 797.13bc	30.39d	21.77cd
	Y4	8 993.53cde	24.61f	29.98b
	Y5	9 351.70bc	25.30d	24.94cd
	Y6	11 238.78b	30.68c	24.98c
	Y7	12 853.28a	30.83b	42.84a
	Y8	13 218.99a	31.64a	35.25a
	Y9	12 949.70a	30.49a	28.78a
2020	CK	13 781.90a	25.89a	22.97a
	Y1	7667.42e	18.82e	25.56c
	Y2	8831.14e	23.93c	23.55d
	Y3	9480.39cd	23.84cd	21.07e
	Y4	9091.88d	22.45d	30.31b
	Y5	9691.02cd	24.41b	25.84bc
	Y6	10994.13c	24.81b	24.43d
	Y7	12086.97b	26.40b	40.29a
	Y8	13292.66a	28.59a	35.45a
	Y9	13165.34a	27.03a	29.26b
	CK	13978.15a	26.65ab	23.30e

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

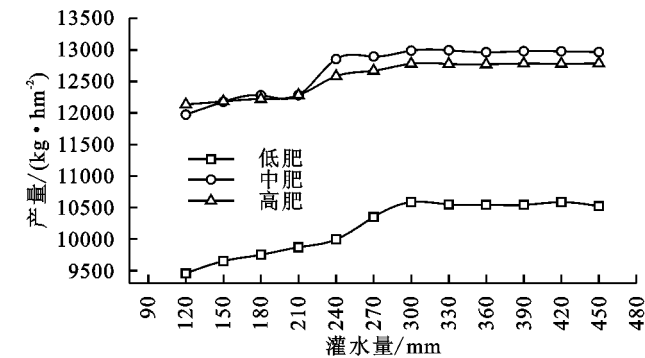


图 4 不同灌水量对玉米产量和水分利用效率的影响

(3)在确保玉米稳产条件下,以水分利用效率较大为原则,利用 AquaCrop 模型模拟不同施肥水平下灌水量变化对玉米产量和水分利用效率的影响。结果表明,随灌水量的增加,玉米产量和水分利用效率均呈先增后减趋势。以稳产高效为双重目标,中肥时灌水 270 mm 为较适宜的灌溉施肥组合,且模拟结果与田间试验分析结果一致。

4 结论

(1)AquaCrop 模型可以较好地模拟河套灌区玉米冠层覆盖度、生物量和产量情况,模型校验评价指标均满足精度要求。

(2)玉米水分利用效率和肥料偏生产力均随灌水、施肥量的增加呈先增后减的趋势,2019 年和 2020 年,灌水 270 mm 与施肥 375 kg/hm² 组合的 Y8 处理水分利用效率较 CK 分别提高 18.17%,6.78%;肥料偏生产力提高 34.84%,34.27%。灌水量不足 270 mm,施肥量超过 375 kg/hm² 时产量、水分利用效率和肥料偏生产力均有所下降。

(3)利用本地化的模型参数对不同灌水和施肥水平下玉米生长进行模拟,并分析产量和水分利用效率变化规律。根据模拟结果,当灌水 270 mm 时,可获得玉米产量和水分利用效率的较优值,此结果与田间

试验分析结果一致,即保障河套灌区玉米稳产高效的灌溉施肥制度为灌水 270 mm,施肥 375 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 魏子涵,魏占民,李春强,等.不同灌溉方式对玉米植株生长参数及产量的影响[J].水土保持研究,2017,24(3):183-187.
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving management in intensive chinese agricultural systems [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2009,106(9):3041-3046.
- [3] Gu B J, Ju X T, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China [J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112:8792-8797.
- [4] Meng Q F, Yue S C, Hou P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: A review [J].Pedosphere,2016,26(2):137-147.
- [5] 王文佳,冯浩,宋献方.基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):1-10,37.
- [6] 倪玲,冯浩,任小川,等.AquaCrop 作物模型在黄土塬区夏玉米生产中的适用性评价[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):40-45.
- [7] Saab M T A, Todorovic M, Albrizio R. Comparing AquaCp and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? [J]. Agricultural Water Management,2015,147:21-33.
- [8] 李祯.河套灌区春玉米—土壤系统对不同水氮运筹模式的响应及 DSSAT-CERES-Maize 模型的适用性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [9] 杜文勇,何雄奎,Shamaila Z,等.冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J].农业机械学报,2011,42(4):174-178,183.
- [10] Ran H, Kang S Z, Li F S, et al. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China [J].Agricultural Water Management,2018,203:438-450.
- [11] Dimitrios V, Andreas K, Garifalia E, et al. Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis [J].Agricultural Water Management,2015,147(1)116-128.
- [12] 周英霞,王全九,张继红,等.基于 AquaCrop 模型的气候变化对陕西省冬小麦产量影响模拟分析[J].水土保持研究,2018,25(6):357-364.
- [13] 陈超飞,柳双环,郭大辛,等.基于 AquaCrop 模型的夏玉米生长模拟及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):72-82.
- [14] Nirman S, Dirk R, Shrawan K S. Strategies to improve coreal production in the Terai region (Nepal) during dry season: Simulations with Aquacrop[J].Procedia Environmental Scieases,2013,19:767-775.
- [15] Margarita G V, Elias F. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level [J].European Journal of Agronomy,2012,36(1):21-31.
- [16] Raes D, Geerts S, Kiipkorir E, et al. Simulation of yield decline as result of water stress with a robust soil water balance model[J]. Agricultural Water Management,2006,81(3):335-357.
- [17] Van Gaalen H, Tsegay A, Delbecque N, et al. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure [J].Journal of Agricultural Science,2015,153(7):1218-1233.
- [18] 陈超飞,柳双环,郭大辛,等.基于 AquaCrop 模型的夏玉米生长模拟及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):72-82.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper NO.56. FAO, Rome; Food and Agricultural Organization of the United Nations,1988.
- [20] Zhou L F, Feng H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment [J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2020,100:540-550.
- [21] Sepaskhah A R, Kanooni A, Ghasemi M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use [J].Agricultural Water Management,2003,58(1):67-79.
- [22] 丁宗江.干旱沙区可降解膜覆盖下滴灌农田水氮互作效应及灌溉制度优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [23] Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model [J]. Environmental Modelling and Software, 2014,62:351-360.
- [24] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):111-120.
- [25] 尚文彬,张忠学,郑恩楠,等.水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(1):49-55.