

基于 APSIM 模型小麦—玉米不同灌溉制度 作物产量和水分利用效率分析

薛佳欣^{1,2}, 张鑫^{1,2}, 张建恒¹, 张江伟^{1,2}, 王贵彦^{1,2,3}, 陈宗培¹

(1.河北农业大学农学院,河北保定 071000;2.国家华北作物改良与调控重点实验室,
河北保定 071000;3.河北省作物生长调控重点实验室,河北保定 071000)

摘要: 针对海河平原地下水位持续下降和维持小麦—玉米两熟较高产量之间的矛盾,对不同降水年型小麦—玉米不同灌溉制度下产量和水分利用效率(WUE)进行模拟分析,结果对平衡该区域地下水可持续利用与粮食生产提供重要科学决策依据。利用研究区域站点长时间序列气象数据,以小麦不同水分处理地上部生物量、叶面积和周年土壤水分动态田间试验数据为基础,对 APSIM 小麦玉米遗传参数和土壤水分等相关参数进行了校准和验证。利用校准和验证的 APSIM 模型,对不同降水年型小麦—玉米不同生长阶段水分亏缺指数(CWDI)进行了分析,并模拟了 8 种不同灌溉制度情景下小麦玉米产量、水分利用效率和灌溉水利用效率(IWUE)。结果表明:不同降水年型小麦各生育阶段 CWDI 均较高,说明无论干旱、平水和湿润年份小麦需水量远大于降水量,尤其是拔节—成熟期水分严重亏缺,属极旱;玉米抽雄前基本不受干旱胁迫影响,但抽雄后的灌浆阶段处于中旱或重旱,对水分需求迫切。兼顾产量和水分利用效率的灌溉制度,干旱、平水及湿润年份全年灌溉 3 次,灌水量为 225 mm(小麦播种 75 mm+拔节期 75 mm+开花期 75 mm)时可获得较高的周年产量和最大 WUE。不同降水年型周年产量和 WUE 在干旱年份分别为 17 357.6 kg/hm² 和 29.6 kg/(hm²·mm),平水年份分别为 18 827.9 kg/hm² 和 25.9 kg/(hm²·mm),湿润年份分别为 19 685.2 kg/hm² 和 25.8 kg/(hm²·mm)。此灌溉制度下,小麦、玉米可获得较高的产量和水分利用效率,为该区域水—粮权衡的重要灌溉策略和措施。

关键词: APSIM 模型; 降水年型; 小麦—玉米; 灌溉制度; 海河平原

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0106-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.015

Analysis of Crop Yield and Water Use Efficiency of Wheat-Maize Double Cropping System Under Different Irrigation Systems Based on APSIM Model

XUE Jiaxin^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, ZHANG Jianheng¹,

ZHANG Jiangwei^{1,2}, WANG Guiyan^{1,2,3}, CHEN Zongpei¹

(1.College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000;

2.State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding,

Hebei 071000; 3.Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: In view of the contradiction between the declining of groundwater table and the demand of high yield, to clarify the yield and water use efficiency (WUE) of wheat-maize double cropping system in the different precipitation years under different irrigation scenarios, the results would provide important scientific decision-making basis to balance the sustainable of groundwater utilization and grain production. Based on the field experiment data, the crop biomass, LAI and soil water content under different irrigation treatments, the genetic parameters and parameters related with the soil water were calibrated and validated by using long-term meteorological data in the APSIM wheat-maize cropping model. Using the calibrated and validated APSIM model, the water deficit index (CWDI) was analyzed in different precipitation years, the crop yield, water use efficiency (WUE), and the irrigation water use efficiency (IWUE) of 8 irrigation scenarios under the dry, medium, and rainy years were simulated. The results showed that CWDI was high in each growth

收稿日期: 2021-01-27

资助项目: 国家“十三五”粮食丰产增效科技创新专项(2018YFD0300504)

第一作者: 薛佳欣(1994—),女,硕士研究生,主要从事节水种植制度研究。E-mail: 1473605003@qq.com

通信作者: 王贵彦(1971—),女,教授,硕士生导师,主要从事集约持续农作制度研究。E-mail: wanggy@hebau.edu.cn

stage of wheat in different precipitation years, which indicated that water requirement of wheat in dry, medium, and rainy years was much higher than precipitation, especially from jointing to maturity stage. Maize was not affected by drought stress before tasseling, but was in medium or severe drought after tasseling. Considering both yield and water use efficiency in this region, when the total irrigation water was 225 mm (75 mm at wheat sowing + 75 mm at jointing + 75 mm at flowering), the total yield was high, and the WUE and IWUE was maximal. The average total yield and WUE were 17 357.6 kg/hm² and 29.6 kg/(hm² · mm) in dry years, were 18 827.9 kg/hm² and 25.9 kg/(hm² · mm) in the medium years, and were 19 685.2 kg/hm² and 25.8 kg/(hm² · mm) in rainy years. Under this irrigation scenario, the yields of wheat and maize were high, and the WUE were also at the high level. So, this irrigation scenario was an important irrigation strategy and practice for water-grain trade-off in this region.

Keywords: APSIM model; different precipitation years; wheat-maize; irrigation system; Haihe plain

海河平原由海河和黄河冲积物沉淀而成,是我国重要的粮食主产区和地下水超采主要分布区,小麦—玉米一年两熟为主要种植制度,冬小麦播种面积及产量分别占全国的 9.87% 和 10.87%,玉米播种面积和产量分别占全国的 9.05% 和 8.50%^[1],在华北平原粮食生产中占据重要地位。该区域多年平均降水量约 549 mm,主要分布在 6—8 月,而主要耗水作物小麦对水分敏感的主要生育期(3—5 月)降水不足全年的 20%,该时期降水量明显与小麦等夏粮作物需水量不匹配。为了维持较高作物产量,亏缺的水分只能依靠抽取地下水进行灌溉,灌溉用水需求远大于地下水承载能力,其中石家庄、沧州和衡水地区处于需求过大状态^[1]。随着多年来粮食生产灌溉用水需求不断增加,地下水位急速下降,河北省每年地下水量超采 60 亿 m³^[2],地下水位以平均 1 m/a 的速度下降^[3],地下水长期处于超采状态。根据对河北山前平原小麦玉米等不同种植制度产量及对地下水位影响的情景模拟,若维持目前地下水位不变,粮食产量将会降低 44%;当采用地膜等覆盖,产量将降低 21%~33%^[4]。同时随着全球气候变化,该区域降水量呈平均 2.92 mm/a 的速度减少^[5],将使得水资源缺乏状态进一步加剧。目前,针对该区域小麦—玉米两熟节水措施对产量、水分利用效率等研究^[6-7]较多,但基本都是基于较短时期的田间试验数据得到的结论,而且受降水和试验地点的影响较大。因此,如何长期顺应自然规律、以供定需和科学统筹地合理利用地下水进行灌溉,是实现该区域水分可持续高效利用和维持粮食高产稳产的重要措施。

APSIM 模型已在华北平原小麦—玉米种植制度有很好的适用性^[8-10]。本研究以河北省曲周县为例,利用校准和验证的小麦—玉米生长发育 APSIM 模型分析本区域不同降水年型、不同灌溉制度对小麦、玉米产量和水分利用效率的影响,为制定本区域不同降水年型小麦—玉米周年灌溉制度提供科学决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与模型参数校准

APSIM 模型以 1 天为步长,以土壤水分连续变化为依据进行模拟,包括作物模块、土壤模块、气象数据和管理模块。土壤模块涉及土壤类型、蒸发系数和水势梯度等参数;作物模块包括小麦、玉米品种参数,主要为各生育阶段积温、光周期、春化系数、潜在灌浆速率等;土壤参数包括土壤容重、各土层田间持水量和凋萎含水量等;气象数据包括每日降水、太阳辐射、最低温度和最高温度;管理参数中可以设定播种、灌溉和施肥等具体日期。

1.1.1 用于模型校准和验证的田间试验 试验位于河北省邯郸市曲周县(36°86′N,115°02′E),平均海拔 39.6 m,多年平均降水量 496 mm,主要集中在 7—9 月。夏玉米于 2018 年 6 月 15 日播种,10 月 1 日收获,品种为“郑单 958”,密度为 7.5 万株/hm²,播种后灌溉 75 mm。生育期共施纯 N 240 kg/hm²,P₂O₅ 189 kg/hm²,K₂O 90 kg/hm²,氮肥分底肥、大喇叭口期追肥,基追比为 1:4,磷、钾肥作为底肥一次性施入;小麦于 2018 年 10 月 15 日播种,2019 年 6 月 12 日收获,品种为“济麦 22”,基本苗 42 万株/hm²,共施纯 N 225 kg/hm²,基追比为 1:1,P₂O₅ 112.5 kg/hm²和 K₂O 112.5 kg/hm²做底肥一次性施入。试验共设置 2 个水分处理(越冬水 120 mm+拔节水 120 mm,越冬水 120 mm+拔节水 120 mm+开花水 120 mm)。第 2 季玉米于 2019 年 6 月 15 日播种,10 月 12 日收获,品种为“郑单 958”,密度为 6.75 万株/hm²,播种后灌水 90 mm。一次性施纯 N 112.5 kg/hm²,P₂O₅ 112.5 kg/hm²,K₂O 112.5 kg/hm²。

本区域试验地块地势平坦,土壤质地较均匀,通过剖面取样测定各土壤容重^[11]、田间持水量和凋萎含水量^[12](表 1)。

1.1.2 气象数据 模拟所用的河北省曲周县 1967—2019 年每日降水、日照时间、最高温度和最低温度数据来自中国气象科学数据共享服务网络,每日太阳辐射根

据 Wang 等^[13]计算方法基于日照时间计算得到。

1.1.3 作物参数 利用 APSIM 7.10, 根据 2018 年 10 月至 2019 年 10 月生长季小麦、玉米田间不同水分处理的试验数据, 即小麦玉米生育期、LAI、生物量和产量, 进行相关品种参数校准, 校准过程采用“试错法”^[14], 反复校准试验采用小麦、玉米品种春化系数、光周期系数、各阶段积温和潜在灌浆速率等参数。校准后的品种参数见表 2 和表 3。2018 年 10 月至 2019 年 10 月当地降水量为 426.2 mm, 属于平水年份, 小麦生长期间降水量为 112.6 mm, 主要分布在 4—5 月, 即拔节期—开花期; 玉米生长期间降水为 313.9 mm, 主要分布在 7 月初至 8 月初, 即拔节—抽雄期间。

表 1 试验地点土壤物理特性

土层 深度/cm	容重/ (g · cm ⁻³)	田间持水量/ (cm ³ · cm ⁻³)	凋萎含水量/ (cm ³ · cm ⁻³)
0—10	1.42	0.36	0.12
10—20	1.45	0.36	0.13
20—40	1.48	0.39	0.13
40—60	1.48	0.43	0.15
60—80	1.50	0.44	0.14
80—100	1.46	0.40	0.14
100—120	1.49	0.45	0.14
120—140	1.50	0.45	0.14
140—160	1.50	0.45	0.14
160—180	1.52	0.41	0.15
180—200	1.52	0.40	0.15

表 2 小麦遗传参数

参数	说明	济麦 22
vern_sens	春化系数(范围 1~5)	2
photop_sens	光周期系数(范围 1~5)	3.5
startgf_to_mat	灌浆到成熟积温/(°C d)	580
grains_per_gram_stem	灌浆期单位单茎干重籽粒数/(kernels · g ⁻¹)	33
potential_grain_filling_rate	单日潜在灌浆速率/(g · kernel ⁻¹)	0.0025

表 3 玉米遗传参数

参数	说明	登海 605	郑单 958
tt_emerg_to_endjuv	出苗到营养期结束积温/(°C d)	290	280
est_days_endjuv_to_init	营养期到始花所需天数/d	20	20
photoperiod_crit1	临界光周期 1/h	12	12.5
photoperiod_crit2	临界光周期 2/h	24	24
photoperiod_slope	光周期斜率	22	22
tt_flower_to_maturity	开花到成熟积温/(°C d)	870	850
tt_flag_to_flower	旗叶到开花积温/(°C d)	110	100
tt_flower_to_start_grain	开花到灌浆积温/(°C d)	150	140
Grain_gth_rate	单日灌浆速率/(mg · kernel ⁻¹)	10.5	10.5
Head_grain_no_max	每植株最大籽粒数/kernel	620	630
RUE	光能利用率/(MJ · m ⁻²)	2.1	2.1

1.1.4 模型校准和验证 采用大田试验数据小麦、玉米叶面积指数(LAI)、生物量(地上生物量)、2 m 土壤有效水和生育期对相关参数进行校准和验证, 采用 1:1 系数(R^2)、标准均方根误差(RMSE)和归一化均方根误差(NRMSE)判断模型的适用性。

(1) 1:1 线的决定系数 该指标反映模型模拟值相对于实测值的真正偏差。

$$R^2 = r^2 = \left(\frac{\sum_1^n (M_i - M_a)(S_i - S_a)}{\sqrt{\sum_1^n (M_i - M_a)^2 \sum_1^n (S_i - S_a)^2}} \right)^2$$

(2) 均方根误差(RMSE)和归一化均方根误差(NRMSE): 反映模型模拟值和实测值的绝对误差量和误差百分比。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (M_i - S_i)^2}{n}}$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{M_a} \times 100\%$$

式中: M_i 和 S_i 分别表示实测值和模拟值; M_a 和 S_a 分别表示实测值和模拟值的平均值; n 为实测值的样本个数。

1.2 作物水分亏缺指数计算

作物水分亏缺指数(CWDI)是判断作物水分亏缺程度的指标之一, 作物需水量与实际供水量之差, 计算公式^[15]为:

$$\text{CWDI}_i = \begin{cases} \frac{ET_{ci} - P_i}{ET_{ci}} \times 100\% & ET_{ci} > P_i \\ 0 & ET_{ci} \leq P_i \end{cases}$$

式中: CWDI_i 为作物某生育期水分亏缺指数; P_i 为某阶段降水量(mm); ET_{ci} 为作物某生长阶段的耗水量(mm), 本研究由 APSIM 模型在设定充分灌溉条件下获得。

1.3 降水年型划分依据

为了便于分析小麦、玉米全生育期内降水对生长

发育的影响,以小麦播种和玉米收获周年为单位,采用国内常用的降水保证率分类标准将模拟的 52 年(1968—2019 年)按照小麦生育期(10 月中旬至翌年 6 月中旬)和玉米全生育期(6 月中旬至 10 月中旬)划分为不同的降水年型,25%降水保证率年型为湿润年份,50%降水保证率年型为平水年份,75%降水保证率年型为干旱年份。根据降水概率,干旱年份平均降水量为 297.2 mm,湿润年份平均降水量 721.8 mm,平水年份平均降水量为 474.7 mm。

1.4 水分利用效率和灌溉水利用效率计算

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

$$IWUE = \frac{Y - Y_0}{I}$$

式中:WUE 为水分利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$);Y 为模拟作物产量(kg/hm^2);ET 为作物全生育期模拟耗水量(mm);IWUE 为灌溉水利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$); Y_0 为作物全生育期未灌水模拟产量(kg/hm^2);I 为作物全生育期灌水量(mm)。

1.5 灌溉情景设置

根据本研究区域冬小麦节水高产栽培对底墒水的要求^[16]以及中国农业大学吴桥实验站^[17]、曲周实验站^[18]小麦节水的田间试验设计及研究结果,参考当地小麦—玉米生产灌溉制度,设置每次灌溉量 75 mm。具体灌溉情景见表 4。

表 4 小麦—玉米不同灌溉情景 单位:mm

情景	小麦			玉米			总计
	播种	拔节	开花	播种	拔节	抽雄	
S0	0	0	0	0	0	0	0
S1	75	0	0	0	0	0	75
S2	75	0	0	75	0	0	150
S3	75	75	0	75	0	0	225
S4	75	75	75	0	0	0	225
S5	75	75	75	75	0	0	300
S6	75	75	75	75	75	0	375
S7	75	75	75	75	75	75	450

2 结果与分析

2.1 小麦、玉米生长及周年土壤有效水动态模型参数校准与验证

选择 2018—2019 年玉米(播种后灌水 75 mm)+小麦(越冬水 120 mm+拔节水 120 mm+开花水 120 mm)水分处理试验数据对小麦玉米 LAI、生物量和土壤有效水等进行校准。由图 1 可知,模型对小麦玉米 LAI、生物量和土壤有效水含量的模拟值和实测值偏差较小,而且各统计指标(表 5)也表明,玉米和小麦生长过程 LAI、生物量和土壤有效含水量的模拟值与实测值 R^2 (1:1)拟合较好, RMSE 和 NRMSE 说明模拟值和实测值之间的绝对误差较小。因此,模型能够较好地模拟海河平原小麦—玉米生长发育过程和土壤有效水动态变化。

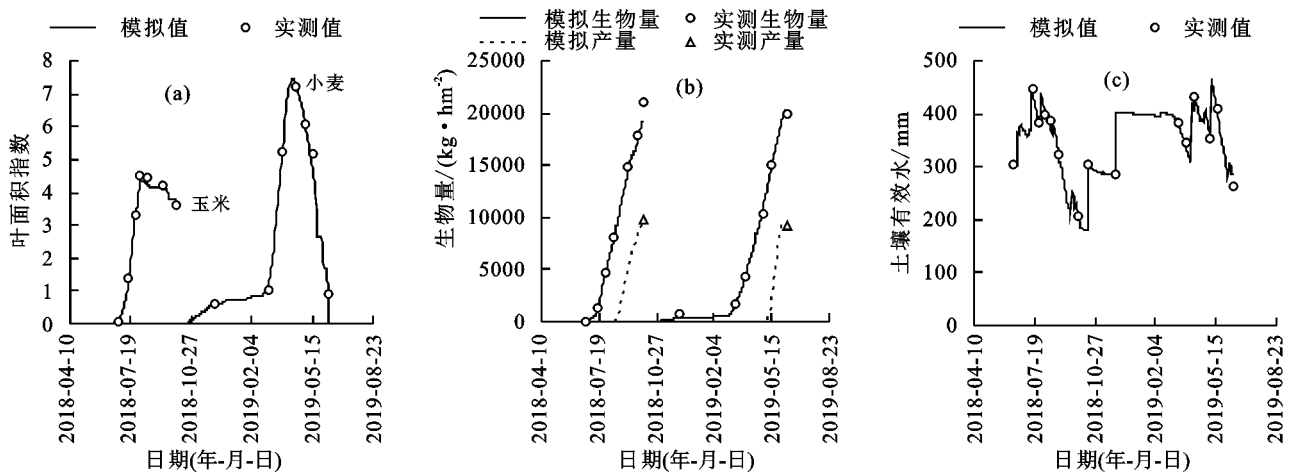


图 1 小麦玉米叶面积指数、生物量、土壤有效水模拟值和实测值

表 5 模型对小麦玉米叶面积指数、生物量和土壤有效水校准后的统计分析

作物	品种	指标	R^2	RMSE	NRMSE	n
		LAI	0.96	0.142	0.057	7
玉米	郑单 958	生物量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	0.95	2212.11	0.224	6
		土壤有效水/mm	0.90	28.71	0.124	14
		LAI	0.95	0.35	0.103	7
小麦	济麦 22	生物量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	0.91	575.78	0.069	6
		土壤有效水/mm	0.90	28.71	0.124	14

利用校准后的模型,采用 2018—2019 年小麦水分处理(越冬水 120 mm+拔节水 120 mm)和 2019 年玉米(播种后 90 mm)田间试验数据对校准后的 APSIM 小麦玉米生长发长模型进行验证(表 6)可知,小麦、玉米生育期的 R^2 能够解释超过 90% 的 LAI、生物量和土壤有效水含量的变异, RMSE 也说明模型对该区域小麦、玉米生长期期间的 LAI、生物量和不同灌溉处理的周年土壤有效水动态变化具有较好的模拟效果。

表 6 APSIM 模型对小麦玉米生育期、LAI、生物量、土壤有效水验证结果的统计指标

作物	品种	项目	R ²	RMSE 值	RMSE 值	n
		LAI	0.95	0.35	0.103	7
小麦	济麦 22	生物量/(kg·hm ⁻²)	0.95	575.78	0.069	6
		LAI	0.96	0.14	0.057	7
玉米	郑单 958	生物量/(kg·hm ⁻²)	0.94	2212.11	0.224	6
		土壤有效水/mm	0.90	28.71	0.124	14

2.2 不同降水年型小麦、玉米需水量分析

根据小麦、玉米生长期间的日降水量和多年平均降水量,分别计算不同降水年型小麦、玉米不同生育阶段降水量和需水量及作物水分亏缺指数(表 7)。

由表 7 可以看出,小麦生长期干旱年份、平水年份和湿润年份平均降水量分别仅占其需水量的 24.8%,24.4%和 29.3%,远不能满足小麦正常生长发育对水分的需求,因此灌溉是维持该区域小麦较高产量的重要保障。玉米虽然生长在雨季,但干旱年份的降水仅能满足玉米正常需水量的 40.5%,尤其是

表 7 不同降水年型小麦、玉米不同生育时期降水量、需水量和作物水分亏缺指数

作物	生长期	干旱年份			平水年份			湿润年份		
		降水量/ mm	需水量/ mm	CWDI/ %	降水量/ mm	需水量/ mm	CWDI/ %	降水量/ mm	需水量/ mm	CWDI/ %
小麦	播种—拔节	43.6	91.5	52.4	53.7	130.3	58.8	70.3	126.0	44.2
	拔节—开花	24.1	165.3	85.4	43.4	218.0	80.1	35.9	204.4	82.4
	开花—成熟	28.0	128.7	78.2	33.9	189.6	82.1	38.9	164.5	76.4
玉米	播种—拔节	56.2	9.8	0	55.6	8.1	0	91.1	11.3	0
	拔节—抽雄	91.8	218.2	57.9	212.1	206.3	0	353.8	173.7	0
	抽雄—成熟	48.3	256.7	81.2	76.0	227.7	66.6	123.6	158.1	21.8

2.3 不同降水年型小麦玉米产量、水分利用效率和灌溉水利用效率

海河平原小麦生长期,多年平均降水量为 129.4 mm,干旱年份仅 82.5 mm。不同降水年型不同灌溉情景的模拟结果(表 8)表明,干旱年份,小麦产量、水分利用效率和灌溉水利用效率随灌水量的增加均表现为增加趋势,S7 情景产量和耗水量都达到最大值,而且 WUE 和 IWUE 都最高,分别为 25.1,34.9 kg/(hm²·mm),说明干旱年份的灌溉是小麦维持较高产量的关键,灌水越多,产量、WUE 和 IWUE 越高;玉米产量也随着灌水量的增加而增加,S7 情景下达到最大值,但 WUE 变化趋势不同,S4 情景下 WUE 最大,为 39.0 kg/(hm²·mm),此后随灌水量的增加逐渐降低,但 IWUE 在 S5 情景最高;小麦玉米周年产量随着灌水量的增加而增加,S7 情景下最大,但 WUE 和 IWUE 随着灌水量增加,S4 情景下最高,灌水量再增加时逐渐降低,当全年灌水量为 225 mm,且仅在小麦需水关键时期进行灌溉时,WUE 和 IWUE 均达最大值,分别为 29.6,29.2 kg/(hm²·mm),产量为 17 357.6 kg/hm²。

播种期,大多数年份需要在播种后进行灌溉才能保证出苗,而且干旱年份对水分最敏感的时期,如拔节期(CWDI=57.9%)和抽雄期(CWDI=81.2%)必须灌溉才能保证其正常的生长发育;平水年份和湿润年份仅需要保证玉米的正常出苗,后期不需要进行灌溉,依靠自然降水基本能满足玉米生长发育对水分的需求。另外,从各生育阶段的水分亏缺指数来看,干旱年份和平水年份小麦不同生育阶段 CWDI 值均大于 50%,其中平水年份拔节—成熟阶段 CWDI 高达 82.1%,说明如果这个阶段没有灌溉,小麦生长将受到严重的干旱胁迫。湿润年份,小麦拔节前降水基本能满足生长发育需求,但拔节到开花期间水分亏缺指数较高,达到 82.4%,而且开花—成熟期水分亏缺指数也较高。3 种不同降水年型玉米灌浆期均存在不同程度的干旱胁迫,平水年份和湿润年份可消耗贮存在土壤中的水分,而干旱年份则必须进行灌溉才能降低减产的风险。

模拟的 52 年中 37 年为平水年份,平均降水量为 474.7 mm。平水年份中,小麦产量、WUE、IWUE 均随着灌水量的增加而增加,S7 情景下即灌水量为 450 mm 时,各指标达到最大,分别为 9 833.7 kg/hm²,24.3 kg/(hm²·mm)和 32.2 kg/(hm²·mm);玉米产量随着灌水量的增加而增加,但 WUE 随灌溉量的增加呈先增加后下降趋势,在最需要灌溉的播种期灌水 75 mm(S3)情景下最大,为 34.1 kg/(hm²·mm),此时 IWUE 为 14.5 kg/(hm²·mm);小麦—玉米周年产量随灌溉量的增加而增加,S7 情景最大,但 WUE 和 IWUE 均随着灌溉量的增加呈先增加后降低趋势,在灌溉量为 225 mm(S4)时达到最大,产量、WUE 和 IWUE 分别为 18 827.9 kg/hm²,25.9 kg/(hm²·mm)和 28.7 kg/(hm²·mm)。

湿润年份在模拟年份中仅 9 年,平均降水量为 721.8 mm。小麦产量、水分利用效率和灌溉水利用效率均随着灌水量先增加后趋于稳定,同样当灌水量最多时,即 S7 情景为最高,分别为 9 553.4 kg/hm²,25.7 kg/(hm²·mm)和 30.5 kg/(hm²·mm);玉米产量随着灌水量的增加变化较小,S7 情景最大,但 WUE 随着灌水量的增加而增加,S3 情景下 WUE 最

高,为 38.8 kg/(hm² · mm);周年产量随灌水量的增加逐渐增加,WUE 和 IWUE 则在灌水量为 225 mm (S4) 达到最大值,分别为 25.8 kg/(hm² · mm) 和 26.3 kg/(hm² · mm),产量 19 685.2 kg/hm²。

表 8 不同降水年型和不同灌溉情景下小麦、玉米模拟产量、水分利用效率及灌溉水利用效率

种植模式	处理	干旱年份			平水年份			湿润年份		
		产量	水分利用效率	灌溉水利用效率	产量	水分利用效率	灌溉水利用效率	产量	水分利用效率	灌溉水利用效率
小麦	S0	2196.9	14.0	—	2586.5	15.1	—	2692.6	15.6	—
	S1	4396.5	18.3	29.3	4844.2	18.5	30.1	4590.2	19.2	25.3
	S2	4499.6	19.0	30.7	4604.2	18.4	26.9	4121.7	18.4	19.1
	S3	6497.1	21.2	28.7	6590.3	16.1	26.7	6168.9	13.8	23.2
	S4	8520.9	23.7	28.1	8400.5	22.9	25.8	8380.7	24.1	25.3
	S5	8498.4	24.0	28.0	8642.4	23.3	26.9	8403.1	24.4	25.4
	S6	9286.5	24.7	31.5	9328.5	24.0	30.0	9116.9	25.2	28.6
玉米	S7	10048.5	25.1	34.9	9833.7	24.3	32.2	9553.4	25.7	30.5
	S0	8589.3	42.7	—	9789.6	30.3	—	11067.5	28.2	—
	S1	9092.6	46.7	—	10122.3	32.1	—	11229.4	28.7	—
	S2	8585.9	28.9	0	10701.4	26.5	12.2	11373.0	25.2	4.1
	S3	8932.4	29.2	4.6	10875.5	34.1	14.5	11395.1	38.8	4.4
	S4	8836.8	39.0	—	10427.5	29.0	—	11304.5	27.4	—
	S5	9749.5	28.2	15.5	11327.0	26.6	20.5	11338.6	25.1	3.6
小麦—玉米	S6	12020.5	28.8	22.9	11851.3	25.7	13.7	11408.1	25.6	2.3
	S7	12808.7	27.5	18.8	11968.5	25.4	9.7	11490.7	26.1	1.9
	S0	10786.2	30.1	—	12376.1	25.0	—	13760.2	24.3	—
	S1	13489.1	31.1	36.0	14966.5	26.0	34.5	15819.5	25.1	27.5
	S2	13085.5	24.5	15.3	15305.7	23.4	19.5	15494.7	23.0	11.6
	S3	15429.6	25.2	20.6	17465.8	24.0	22.6	17564.1	23.7	16.9
	S4	17357.7	29.6	29.2	18827.9	25.9	28.7	19685.2	25.8	26.3
小麦—玉米	S5	18247.9	26.1	24.9	19969.4	25.1	25.3	19741.8	24.8	19.9
	S6	21307.0	26.9	28.1	21179.8	24.9	23.5	20525.0	25.4	18.0
	S7	22857.2	26.4	26.8	21802.3	24.9	20.9	21044.2	25.9	16.2

注:产量单位为 kg/hm²,水分利用效率和灌溉水利用效率单位为 kg/(hm² · mm)。

当增加灌溉量后,产量随之增加,但不同灌水时期的增产效应不同,由于受资源型缺水限制,限水灌溉条件下 S3 和 S4 灌水情景中,S3 情景为小麦播种和拔节期灌溉 2 次(150 mm),玉米播种期灌溉 1 次(75 mm),S4 为小麦生长期期间灌溉 3 次(播种、拔节期和开花期各灌溉 75 mm),玉米生长期期间不灌水。无论何种降水年型,小麦产量均表现为 S4 情景高于 S3 灌溉情景,增产幅度为 27.5%~35.9%,增产效果显著,而且 WUE 也显著提高;但玉米产量表现为 S3 高于 S4 灌溉情景,S4 减产幅度较小(表 8),而且除干旱年份外,平水和湿润年份的 WUE 均高于 S4 情景;从周年产量看,S4 比 S3 情景增产 9%,而且 WUE 和 IWUE 也高于 S3 情景。而当进一步增加灌水量,达到生产中农户的灌水习惯(S5 和 S6)时,周年产量 S5 相对 S4 情景有小幅增产,但 WUE 和 IWUE 均显著降低;S6 相对 S4 增产效果较显著,尤其是干旱年份

增产 22.8%,但 3 种降水年型下的 WUE 和 IWUE 都进一步降低。

图 2 为模拟 52 年中累计灌水量、耗水量和渗漏量。从图 2 可以看出,渗漏量随灌水量的增加逐渐增加,S6 累积渗漏为 1 884.5 mm,S7 为 4 268.1 mm。因此,根据灌水量、耗水量和渗漏量选择合适的灌水量是本区域水分可持续利用的基础和前提。

3 讨论

本文基于小麦—玉米周年不同水分处理试验结果,对该区域小麦—玉米两熟的生育期、LAI、生物量、产量和周年土壤有效水含量等相关参数进行了校准和验证。结果表明,校准和验证后的 APSIM 小麦—玉米模型可以用来模拟小麦、玉米生长发育和周年土壤水分的动态变化,而且在海河流域具有较好的适用性,可以为该区域制定小麦—玉米两熟种植制度灌溉方案提供科学依据,与李艳等^[19]、Chen 等^[20]

APSIM 模拟小麦和玉米研究结果一致。

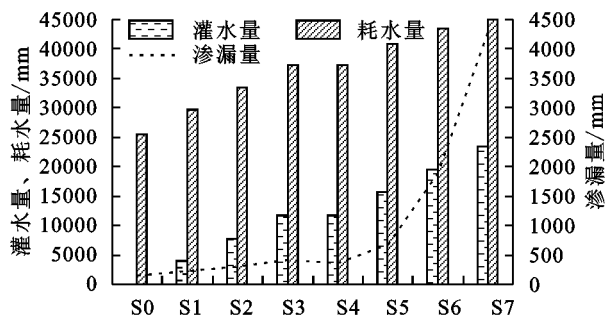


图 2 本区域 52 年累计灌水量、耗水量和渗漏量模拟结果

作物水分亏缺指数(CWDI)可以较好地反映作物、土壤和气候等多种因素对作物的影响,能够真实反映作物水分亏缺状况^[21-23]。小麦和玉米季 CWDI 表现为干旱年份最大,平水年份次之,湿润年份最低。CWDI 表明,小麦拔节一开花期是水分亏缺程度最高时期,这个时期灌水可以取得较高的产量,与本区域小麦田间灌溉试验^[6-7]结果一致。玉米生长季主要是抽雄后水分亏缺指数较高,与商蒙非等^[24]研究结果一致。

对本区域 52 年不同降水年型 8 种灌溉情景的模拟结果(表 8)表明,小麦播种、拔节期和开花期灌溉是提高小麦产量的重要措施,S4 相对 S2 和 S3 产量、水分利用效率和灌溉水利用效率均相应提高,而且在开花期灌溉提高产量的幅度更大,说明开花期灌溉后能为灌浆期提供较充分的土壤水分,促进籽粒灌浆,从而提高产量,与 Xu 等^[25]连续 4 年的小麦不同灌溉次数田间试验结果一致。玉米季由于降水较充分,在降水较少的播种一出苗期灌溉 1 次后,后期利用降水能够满足玉米生长发育需求,而且生长前期较多的降水可以贮存在土壤中供灌浆期间利用^[26]。然而,针对本研究区域的水资源供应和降水及小麦、玉米生产的重要性,综合考虑小麦—玉米种植制度周年水分需求与供应对维持周年较高产量和统筹考虑水分可持续利用具有重要意义。从周年产量和水分利用效率看,S4 灌溉情景维持了较高的产量,而且水分利用效率和灌溉水利用效率均最高,小麦季利用关键时期补充灌溉以弥补降水不足,从而取得较高产量和水分利用效率,玉米季充分利用降水和贮存的土壤水实现较高产量和水分利用效率。因此,各地区应根据不同水资源量及降水年型选择合适的灌水时期^[27]。另外,基于本区域资源性缺水现状,除较优的周年灌溉措施外,减蒸覆盖^[28-29]、调整种植制度^[30-32]和轮作^[33]等措施也是集约利用水分和实现“水—粮权衡”的有效措施。

作物生长发育模型是综合考虑气象、土壤、作物及田间管理措施的重要研究手段,但不能把所有影响作物生产的因素考虑周全,与现实的生产环境还具有一定差距。本研究所用模型仅考虑水分对作物生长

发育的影响,未考虑养分和病虫害等对作物生产的影响,需要在未来的研究中加以完善。

4 结论

经过校准和验证的 APSIM 小麦—玉米模型在海河平原具有很好的适用性,能够较好地模拟小麦玉米生育期、LAI、生物量及土壤有效水的动态变化。无论干旱、平水和湿润年份,小麦季需水量和降水量极不匹配,降水量远不能满足小麦生长需水量;玉米季抽雄前降水基本能满足生长发育对水分的需求,但抽雄后的灌浆阶段降水远低于需水量,前期的土壤贮水可缓解干旱胁迫。不同灌溉情景模拟结果表明,从周年产量和水分利用效率综合考虑,无论干旱、平水和湿润年份,灌水量为 225 mm(S4,小麦播种 75 mm+拔节期 75 mm+开花期 75 mm,玉米生长期不灌溉)时,可获得较高的周年产量、最高周年水分利用效率和灌溉水分利用效率,干旱年份可获得产量 17 357.6 kg/hm²,WUE 29.6 kg/(hm²·mm)和 IWUE 29.2 kg/(hm²·mm);平水年份产量 18 827.9 kg/hm²,WUE 25.9 kg/(hm²·mm)和 IWUE 28.7 kg/(hm²·mm);湿润年份产量 19 685.2 kg/hm²,WUE 25.8 kg/(hm²·mm)和 IWUE 26.3 kg/(hm²·mm)。而且在该灌溉情景(S4)下,小麦季产量、WUE 也较高,干旱年份小麦产量 8 520.9 kg/hm²,WUE 23.7 kg/(hm²·mm);平水年份小麦产量 8 400.5 kg/hm²,WUE 22.9 kg/(hm²·mm);湿润年份小麦产量 8 380.7 kg/hm²,WUE 24.1 kg/(hm²·mm)。S4 灌溉情景下不同降水年型的玉米产量和 WUE 分别为干旱年份玉米产量 8 836.8 kg/hm²,WUE 39.0 kg/(hm²·mm);平水年份玉米产量 10 427.5 kg/hm²,WUE 29.0 kg/(hm²·mm);湿润年份玉米产量 11 304.5 kg/hm²,WUE 27.4 kg/(hm²·mm)。综上,S4 灌溉情景能够体现粮食产量和水分利用效率的平衡。

参考文献:

- [1] 张光辉,严明疆,田言亮,等.中国主要粮食基地地下水保障能力与评价理论方法[M].北京:科学出版社,2018:257.
- [2] 王贵玲,陈浩,蔺文静,等.河北省京津以南平原区未来 30 年地下水供需预测[J].干旱区资源与环境,2006,20(6):63-68.
- [3] Fang Q X, Ma L, Green T R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1102-1116.
- [4] van Oort P A J, Wang G Y, Vos J, et al. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 131-140.

- [5] Liu S X, Mo X G, Lin Z H, et al. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8):1195-1209.
- [6] Xu C L, Tao H B, Tian B J, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196:268-275.
- [7] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 不同灌溉模式对小麦产量、耗水量及水分利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(增刊):17-24.
- [8] Li K N, Yang X G, Liu Z J, et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 59:1-12.
- [9] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, et al. Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2016, 194:94-102.
- [10] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production: A case study in the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70:48-56.
- [11] Grossman R B, Reinsch T G. Bulk density and linear extensibility [M]// Dane J H, Topp G C. *Methods of soil analysis, Part. 4. Physical methods*. SSSA. Madison, Wisconsin, 2002:201-254.
- [12] Dane J H, Hopmans J W. Water retention and storage [M]// Dane J H, Topp G C. *Methods of soil analysis, Part. 4. Physical methods*. SSSA. Madison, Wisconsin, 2002:671-796.
- [13] Wang E, Yu Q. Climate, agricultural production and hydrological balance in the North China Plain[J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(14):1959-1970.
- [14] 陈超. 华北平原作物水分生产力—农田水平衡、气候波动/变化的系统分析[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [15] 董朝阳, 杨晓光, 杨婕, 等. 中国北方地区春玉米干旱的时间演变特征和空间分布规律[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(2):4234-4245.
- [16] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(1):8-23.
- [17] Zhang Y P, Zhang Y H, Wang Z M, et al. Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3):187-195.
- [18] 张娟. 河北曲周农田冬小麦和夏玉米水分利用效率研究[D]. 北京:中国农业大学, 2006.
- [19] 李艳, 薛昌颖, 刘园, 等. APSIM 模型对北京和禹城冬小麦生长模拟的适应性研究[J]. *气象*, 2008, 34(特刊):271-279.
- [20] Chen C, Baethgen W, Wang E L, et al. Characterizing spatial and temporal variability of crop yield caused by climate and irrigation in the North Chian Plain[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 106(3):365-381.
- [21] 徐建文, 居辉, 梅旭荣, 等. 近 30 年黄淮海平原干旱对冬小麦产量的潜在影响模拟[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6):150-158.
- [22] 王连喜, 王田, 李琪, 等. 基于作物水分亏缺指数的河南省冬小麦干旱时空特征分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(12):83-88.
- [23] Shi J C, Wu X, Wang X Y, et al. Determining threshold values for root-soil water weighted plant water deficit index based smart irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230:e105979.
- [24] 商蒙非, 杨萌, 冯宇鹏, 等. 近 35 年吴桥县夏玉米水分亏缺变化趋势分析[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(9):1-10.
- [25] Xu X X, Zhang Y H, Li J P, et al. Optimizing single irrigation scheme to improve water use efficiency by manipulating winter wheat sink-source relationships in Northern China Plain[J]. *PLoS One*, 2018, 13(3):1-19.
- [26] 张建恒, 王笑颖, 周大迈, 等. 海河平原小麦—玉米节水灌溉制度优化模拟[J]. *河北农业大学学报*, 2018, 4(6):24-30.
- [27] 李佩. 应用农业水文模型评估华北平原在限水灌溉方案下的作物水分生产力及深层地下水压采量:以河北省黑龙港地区为例[D]. 北京:中国农业大学, 2019.
- [28] 杜雄, 张永升, 王磊, 等. 不同种植制度与土下微膜覆盖的小麦玉米水分利用效果[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):226-234.
- [29] 郑媛媛, 王贵彦, 张建恒. 海河平原秸秆覆盖和春季灌水对小麦玉米产量和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2):27-36.
- [30] 赵彦茜, 肖登攀, 齐永青, 等. 华北平原不同降水年型和作物种植模式下的产量和耗水模拟[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20):108-116.
- [31] 郑媛媛, 陈宗培, 王贵彦. 海河平原小麦—玉米不同种植制度节水特性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5):9-15.
- [32] Zhao Z G, Qin X, Wang Z M, et al. Performance of different cropping systems across precipitation gradient in North China Plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259:162-172.
- [33] Yang X L, Chen Y Q, Steven P, et al. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522:428-438.