

# 基于 AquaCrop 和 WinSRFR 组合的夏玉米沟灌方案优化

聂卫波, 马云鹏, 冯正江, 李 格

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 确定作物合理的灌溉制度和灌水技术要素组合是科学管理农业水资源的基础, 可有效缓解水资源短缺矛盾和保障区域粮食安全。基于此, 该研究利用在陕西省杨陵区(2022年)和武功县(2017年)进行的夏玉米田间试验, 分别对 AquaCrop 模型和 WinSRFR 软件进行校准和验证, 确定了研究区夏玉米典型水文年(丰水年、平水年和干旱年)的灌溉制度; 通过反演沟灌土壤入渗参数和田面糙率, 结合确定的灌溉制度, 优化了沟灌灌水技术要素组合(入沟流量和灌水时间), 并量化评价了优化灌溉制度和灌水技术要素组合对夏玉米的增产能力。结果表明, AquaCrop 模型能准确模拟研究区夏玉米生长过程, 其中产量模拟值与实测值的相对误差绝对值均值分别为 1.85% (校准) 和 7.47% (验证); 研究区夏玉米丰水年(灌浆期)和平水年(拔节期)需灌水 1 次, 干旱年(拔节期和灌浆期)需灌水 2 次, 单次灌水量均为 55 mm; 反演所得研究区沟灌土壤入渗参数  $k$  和  $\alpha$  取值范围分别为 55.416~98.437 mm/h<sup>a</sup> 和 0.351~0.858, 田面糙率  $n$  均值为 0.056; 合理的入沟流量和停水时间取值范围分别为 2.2~3.3 L/s 和 35~16 min, 可获得高灌水质量(综合灌水质量指标  $C_i \geq 85\%$ ); 以 2022 年夏玉米优化的灌溉制度和灌水技术要素优化组合为基础, 模拟所得夏玉米产量为 7.819 t/hm<sup>2</sup>, 与无灌溉(5.972 t/hm<sup>2</sup>)、现状条件(7.424 t/hm<sup>2</sup>)和仅对灌溉制度优化(7.659 t/hm<sup>2</sup>)情景相比较, 分别提高了 30.9%、5.3% 和 2.1%, 且所需灌水量较现状条件可减少 59 mm。研究结果可为研究区域夏玉米灌溉制度制定和沟灌方案设计提供理论基础和技术支撑。

**关键词:** 作物; 模型; 沟灌; 优化; 入沟流量; 停水时间; 灌水质量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403021

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0051-11

聂卫波, 马云鹏, 冯正江, 等. 基于 AquaCrop 和 WinSRFR 组合的夏玉米沟灌方案优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18):

51-61. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403021 <http://www.tcsae.org>

NIE Weibo, MA Yunpeng, FENG Zhengjiang, et al. Optimization of furrow irrigation programs of summer maize by using the AquaCrop model and WinSRFR software[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 51-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403021 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

玉米是全球种植面积最大和总产量最高的粮食作物之一<sup>[1]</sup>。陕西省关中平原地处半干旱半湿润地区, 是中国重要的夏玉米产区之一, 该区域夏季降水时空分布不均, 短期伏旱频发, 导致玉米减产; 为保障该区域夏玉米的正常生产, 常采用补充灌溉方式降低降水时空分布不均和干旱等对夏玉米生产带来的不利影响。沟灌是关中平原夏玉米最常见的灌水技术, 具有操作简便、投资低等优点, 但灌水质量不高是目前存在的主要问题<sup>[2]</sup>。因此, 制定研究区域夏玉米合理的灌溉制度和沟灌灌水技术要素组合, 对保障区域粮食安全和缓解水资源短缺矛盾具有重要意义。

作物灌溉制度的制定常采用田间试验或理论计算方法, 但田间试验法费时费力, 且所得结果的普适性较低, 难以大范围推广应用<sup>[3]</sup>。理论计算方法是基于水量平衡原理为基础计算作物灌溉制度, 常采用 Penman-Monteith

公式进行参考作物腾发量的计算, 再乘以作物系数  $K_c$  确定作物腾发量, 但  $K_c$  的准确确定较为困难。近年来, 随着作物模型的不断发展和完善, 其被广泛应用于不同情景下(如气候变化、不同灌水和施肥方案等)作物灌溉制度的制定。常见的作物模型主要有 WOFOST (world food studies)、DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer)、SWAP (soil, water, atmosphere and plant) 和 AquaCrop 模型等<sup>[4]</sup>, 但各模型的核心点有所差异。例如 DSSAT 模型主要通过太阳光能驱动光合作用形成产量<sup>[5]</sup>, WOFOST 模型和 SWAP 模型主要通过 CO<sub>2</sub> 浓度驱动光合作用形成作物产量<sup>[4]</sup>, 而 AquaCrop 模型主要通过土壤水分驱动模拟作物生长过程和产量形成<sup>[6]</sup>, 对于研究土壤水分与产量的关系更具优势; 此外, 相较于这些模型, AquaCrop 模型具有所需输入参数少、操作界面友好等优点, 被广泛应用于农业用水管理研究<sup>[7-8]</sup>。

众多学者对 AquaCrop 模型的适用性和模拟精度进行了评价和验证<sup>[9-10]</sup>。结果表明, 经校准后的 AquaCrop 模型可较为准确地模拟作物生长过程和产量, 并很好地回答了作物生长过程中“何时灌”和“灌多少”的问题, 即制定了合理的灌溉制度, 有效提升了农田土壤水分和作物生育过程的管理水平; 但以往均假设灌溉水进入田间后均匀分布(即田块不同位置所入渗的灌溉水量相

收稿日期: 2024-03-04 修订日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279043); 陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-243); 西安市科技计划项目(24NYGG0097)

作者简介: 聂卫波, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业水利工程。

Email: nwbo2000@163.com

同),这与田间实际存在明显差异,原因是田块尺度土壤入渗特性具有空间变异性,特别是采用地面灌溉方法时(如沟灌、畦灌)差异更为明显,其在一定程度上影响了作物模型的模拟结果。因此,通过选取合理的灌水技术要素组合提高田间灌溉的灌水质量(灌水均匀度、灌水效率和储水效率等),即解决“怎么灌”的问题,可提升灌溉水的利用效率。

沟灌是玉米、高粱、甘蔗等中耕作物最常见的灌水方式,选择合理的灌水流量和停水时间是提高地面灌溉灌水质量的重要保障<sup>[11]</sup>。目前,常采用数值模拟和田间试验相结合的方法优化灌水流量和停水时间。由于WinSRFR软件操作简单,且用户界面友好,大量学者采用该软件对地面灌溉灌水技术要素组合进行优化研究<sup>[11-14]</sup>。结果表明,WinSRFR软件可较为精确地模拟地面灌溉水流运动过程,且优化所得灌水技术要素组合可有效提高灌水质量<sup>[13]</sup>。虽然关于地面灌溉灌水技术要素组合的优化进行了大量研究,较好地解决了“怎么灌”的问题,提高了灌水质量,但以往研究对灌水技术要素组合进行优化时较少与作物需水规律相结合。

综上所述,目前缺乏对作物灌溉制度和灌水技术要素组合的同步优化研究,导致无法同时回答“何时灌、灌多少(灌溉制度优化)”和“怎么灌(灌水技术要素组合优化)”的问题;同时缺少优化灌溉制度和灌水技术要素组合对作物增产能力的量化评价。基于此,本文以在杨陵区(2022年)和武功县(2017年)典型农田的玉米地进行的灌水试验为基础,对AquaCrop模型进行校准和验证,确定研究区域夏玉米典型水文年条件下的灌溉制度;利用WinSRFR反演沟灌土壤入渗参数和田面糙率,结合确定的灌水定额,对不同土壤入渗能力和田面坡度条件下入沟流量和停水时间进行优化;采用AquaCrop模型量化评价优化灌溉制度和灌水技术要素组合对玉米产量的影响,以期为研究区域夏玉米灌溉制度制定和沟灌方案设计提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

关中平原位于陕西省中部(图1),包括西安、咸阳、宝鸡、渭南、铜川等29个区县,主要种植冬小麦、夏玉米等粮食作物,是陕西省粮食主产区。本研究田间试验位于杨陵区典型农田(34°17'39"N, 108°04'48"E),该地区年均气温12.9℃,降水量和水面蒸发量分别为635.1和1500mm,日照时数2095h,无霜期211d,且降水主要分布在6—9月份,约占全年降水量的70%以上<sup>[15-16]</sup>。杨陵区夏玉米生育期在6月中旬—10月上旬,该时段降水量较多,其灌溉制度制定受降水影响较大。因此,选取杨陵区典型农田(图1)和夏玉米作为本次研究区域和研究对象均具有典型代表性。

### 1.2 试验设计

本文进行的夏玉米田间试验主要目的为:校准AquaCrop模型参数;根据水流运动过程数据反演土壤入

渗参数和田面糙率值。试验所选典型田块面积1136.9m<sup>2</sup>,玉米采用当地常用品种郑单958,播种和收获日期分别为2022年6月7日和9月29日,全生育期共115d。采用机播,株、行距分别为0.3和0.75m,播种密度约45000株/hm<sup>2</sup>。玉米生育期内,试验田块共施用40kg尿素(含N量≥46.0%,折合纯氮162kg/hm<sup>2</sup>),播种时施用20kg尿素,第1次灌溉时随水施用20kg尿素。2022年8月4日(播种后第59天)和8月22日(播种后第77天)进行灌溉,灌水方式采用沟灌,实际平均灌水量分别为68和49mm。根据所选试验田块夏玉米种植情况,共布设了12条尾部闭合的灌水沟,沟长均为100m。沟灌试验前,每条灌水沟选取3个断面(沟首、沟中和沟尾)测量沟断面尺寸,分别取均值作为各灌水沟断面尺寸代表值;沟底坡度采用水准仪测量,入沟流量采用三角堰测定。此外,沟灌过程中每隔1~2min测一次沟首水深。灌水沟每隔10m设置1个观测点,沟灌过程中记录水流推进过程数据,停水时间与当地农户灌水习惯一致,即水流推进至沟尾停水。沟灌试验特性参数具体见表1。

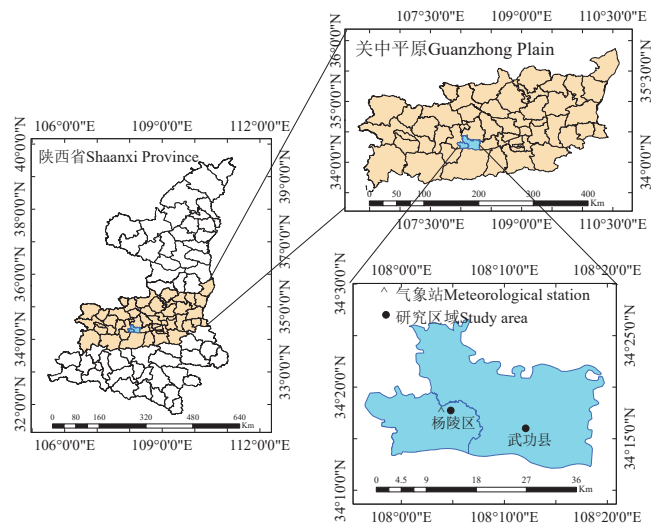


图1 研究区域所在位置

Fig.1 Location of the study area

表1 沟灌试验特性参数

Table 1 Characteristic parameters of furrow irrigation experiments

编号 No.	Fir		Sec		F/m	BW/m	FD/ m	TW/ m	S <sub>0</sub> / %
	q/(L·s <sup>-1</sup> )	t/min	q/(L·s <sup>-1</sup> )	t/min					
F1	4.4	20.4	2.5	22.4	0.75	0.37	0.23	0.46	2.0
F2	4.2	21.3	2.4	22.9	0.62	0.30	0.24	0.48	1.0
F3	3.8	22.6	2.2	21.9	0.73	0.37	0.22	0.48	1.6
F4	3.7	23.5	2.3	24.3	0.72	0.37	0.22	0.50	2.0
F5	3.6	18.7	2.5	30.9	0.75	0.35	0.24	0.48	1.6
F6	4.3	12.8	2.0	39.0	0.80	0.35	0.22	0.50	1.4
F7	4.1	18.5	2.2	25.1	0.73	0.30	0.24	0.55	2.6
F8	3.9	20.2	2.6	25.6	0.82	0.42	0.23	0.60	2.4
F9	4.1	21.6	2.5	26.4	0.76	0.36	0.22	0.55	2.0
F10	4.2	24.6	2.2	24.6	0.75	0.45	0.23	0.64	2.6
F11	3.9	27.3	2.3	30.5	0.80	0.30	0.22	0.50	3.2
F12	3.6	24.9	2.2	26.4	0.80	0.40	0.24	0.60	2.8
均值	4.0	21.4	2.3	26.7	0.75	0.36	0.23	0.53	2.1

注: q为流量; t为停水时间; F为沟间距; BW为沟底宽; FD为沟深; TW为沟顶宽; S<sub>0</sub>为沟底坡度; Fir和Sec分别代表第1和第2次灌溉。

Note: q is the discharge; t is the cutoff time; F is the furrow spacing; BW is the furrow bottom width; FD is the furrow depth; TW is the top width of furrow; S<sub>0</sub> is the bottom slope of furrow. Fir and Sec represent first and second irrigation.

本文选取陈超飞等<sup>[17]</sup>在武功县高新农业示范园(34°16'00"N, 108°12'40"E)进行的夏玉米田间试验资料(图 1), 以验证基于杨陵区夏玉米试验数据所校准 AquaCrop 模型参数的可靠性。武功县高新农业示范园所选典型田块与杨陵区所选典型农田相距约 10 km(图 1), 两者的气候特征、农田管理等基本一致。该试验区所选典型田块面积 159.6 m<sup>2</sup>, 夏玉米品种为郑单 958, 播种和收获日期分别为 2017 年 6 月 15 日和 10 月 8 日, 全生育期共 116 d。采用机播, 株、行距分别为 0.3 和 0.65 m, 播种密度约 51 300 株/hm<sup>2</sup>; 夏玉米生育期内共进行了 1 次灌溉, 时间为 2017 年 7 月 11 日(播种后第 27 天), 灌水方式采用畦灌, 实际灌水量为 60 mm, 施用纯氮 180 kg/hm<sup>2</sup>; 具体试验细节可参见文献[17]。

### 1.3 观测指标

#### 1.3.1 冠层覆盖度

进入拔节期后, 每隔 10~15 d 随机选取 10 株玉米测量叶片长和宽计算叶面积指数(leaf area index, LAI), 并根据 LAI 计算冠层覆盖度(canopy coverage, CC)模

拟作物蒸腾量, 具体计算方法可参见文献[7]。

#### 1.3.2 地上部干物质量和产量

进入拔节期后测量地上部干物质量(above ground biomass, B), 每次测量间隔 10~15 d, 每次随机选取 10 株玉米烘干至质量恒定, 取平均值后与播种密度相乘得到单位面积的 B。玉米成熟后随机选取 10 株玉米, 以 13% 玉米籽粒含水率为标准, 确定其产量<sup>[7]</sup>。

#### 1.3.3 土壤特性及土壤含水率

土壤含水率采用 TRIME-TDR 测定, 测量深度 80 cm, 每 20 cm 为一层; 各灌水沟布设 6 个测点(沿沟长方向 0、20、40、60、80 和 100 m), 其中灌水前、后 1 d 测定土壤含水率, 降雨后 1 d 加测土壤含水率, 其余时间每隔 3~5 d 测定一次; 所测土壤含水率数据主要用于校验 AquaCrop 模型和计算灌水质量评价指标。采用离心机测定土壤水分特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC), 其中田间持水率和凋萎含水率根据 SWCC 确定; 研究区域土壤特性参数见表 2。

表 2 试验田块土壤特性参数

研究区 Study area	土深 Soil depth/ cm	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/ %	粘粒 Clay/ %	饱和含水率 Saturated water content/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	田间持水率 Field capacity FC/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	凋萎含水率 Wilting point/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	容重 Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(mm·d <sup>-1</sup> )	土壤质地 Soil texture
杨陵 Yangling	0~20	25.38	58.74	15.88	0.421	0.351	0.240	1.56	125.2	粉砂壤土
	>20~40	22.27	61.00	16.73	0.355	0.318	0.230	1.60	137.4	粉砂壤土
	>40~60	19.61	61.75	18.64	0.354	0.308	0.180	1.67	101.6	粉砂壤土
	>60~80	19.79	61.80	18.41	0.354	0.296	0.240	1.56	182.2	粉砂壤土
武功 Wugong	0~20	32.11	41.56	26.33	0.435	0.306	0.162	1.32	159.5	壤土
	>20~40	30.75	41.68	27.57	0.439	0.317	0.173	1.58	42.5	壤土
	>40~60	30.36	41.23	28.41	0.440	0.319	0.173	1.62	34.4	黏壤土
	>60~80	30.95	40.00	29.05	0.440	0.322	0.179	1.61	35.5	黏壤土

### 1.4 夏玉米灌溉制度确定方法

本研究采用 AquaCrop 模型确定研究区域夏玉米的灌溉制度, 其模型介绍可参见文献[7]。

#### 1.4.1 AquaCrop 模型参数校准与验证

以 2022 年杨陵区典型农田夏玉米试验资料为基础, 采用“试错法”对作物参数进行校准。根据已有研究结果可知<sup>[18-20]</sup>, 参考收获指数(HI<sub>0</sub>)、标准化水分生产力(WP\*)、最大作物蒸腾系数(K<sub>cr,x</sub>)、冠层生长系数(CGC)、冠层衰减系数(CDC)和最大冠层覆盖度(CC<sub>x</sub>)参数对模型输出结果具有较高的敏感性, 故重点校准上述 6 个参数, 其余参数采用模型默认值; 采用 2017 年武功县典型农田试验数据验证所校准参数的可靠性。AquaCrop 模型所需输入参数包括气象、土壤、作物和田间管理等, 详细要求可参见文献[20]。其中, 气象数据采用位于陕西省杨陵区(图 1)气象站(34°17'44"N, 108°04'04"E), 2017 年和 2022 年试验点夏玉米生育期内逐日最高、最低温度和降雨量数据见图 2。

#### 1.4.2 典型水文年划分及模型设定

参考已有研究成果<sup>[10]</sup>, 本文采用 Pearson III 型曲线对研究区 1970—2020 年夏玉米生育期内降水数据进行分析, 选取典型水文年份气象数据, 即丰水年(保证率 P =

25%), 平水年(P = 50%)和干旱年(P = 75%)。采用 AquaCrop 模型制定典型水文年夏玉米灌溉制度, 模拟设置如下:

- 1) 采用尾部闭合式沟灌系统, 无沟尾弃水量。
- 2) 灌溉触发以作物易获取的土壤含水率被完全消耗完时触发灌溉(具体参见文献[21])。
- 3) 计划灌水量设置为灌溉至田间持水量 FC, 即当灌溉触发时, 计划灌水量为当前土壤含水率与 FC 之差。
- 4) 玉米生育期设置为 6 月 15 日—10 月 5 日。
- 5) 土壤初始含水率被设置为 70% 的根系区域全部可被吸收的土壤水分。

### 1.5 沟灌入沟流量和停水时间优化方法

本研究采用 WinSRFR 软件进行沟灌入渗参数和田面糙率反演, 以及沟灌过程模拟与入沟流量和停水时间优化研究。

#### 1.5.1 入渗参数和田面糙率反演

以沟灌试验实测水流推进过程和沟首水深资料为基础, 采用 WinSRFR 软件中 EVALUE 法同步反演入渗参数和田面糙率<sup>[22-23]</sup>。ALAVI 等<sup>[13]</sup>研究表明 EVALUE 法反演地面灌溉过程中入渗参数和田面糙率相较两点法精度更高。原因为 EVALUE 法以水量平衡原理为基础, 通

过迭代计算地表储水形状因子和下渗水形状因子<sup>[22-23]</sup>, 动态调整水量平衡计算结果, 使其反演的入渗参数和田面糙率更加符合田间实际情况。Kostiakov 公式常被用于表征地面灌溉过程中的土壤入渗特征<sup>[12,24-25]</sup>, 形式如下:

$$Z = k\tau^\alpha \quad (1)$$

式中  $Z$  为单位面积累积入渗量, mm;  $\tau$  为入渗时间, h;  $k$  为一维垂直入渗系数, mm/h $^\alpha$ ;  $\alpha$  为土壤入渗指数。沟灌为二维入渗, EVALUE 法估算入渗参数过程中常假定沟间距 (furrow spacing,  $F$ ) 为湿周, 并结合式 (1) 来描述单位长度的累积入渗量, 该处理方法被国内外众多学者采用<sup>[12,24,26]</sup>, 可写成如下形式:

$$I = F \times k\tau^\alpha = K\tau^\alpha \quad (2)$$

式中  $I$  为单位长度的累积入渗量, mm $^2$ ;  $F$  为沟间距, mm;  $K$  为沟灌二维入渗系数, mm $^2$ /h $^\alpha$ ;  $K = F \times k$ 。EVALUE 法采用曼宁公式对田面糙率  $n$  进行反演<sup>[14]</sup>。

本文采用的沟灌灌水质量评价指标主要有灌水效率 ( $E_a$ )、灌水均匀度 ( $C_u$ ) 和储水效率 ( $E_s$ ), 其计算公式可参见文献 [26-27]。由于 3 个灌水评价指标之间相互矛盾, 故采用与文献 [28-29] 中类似的处理方法, 即使用  $E_a$ 、 $C_u$  和  $E_s$  的几何均值作为综合灌水质量指标  $C_i$  进行沟灌灌水质量评价, 计算公式如下:

$$C_i = \sqrt[3]{E_a \times C_u \times E_s} \quad (3)$$

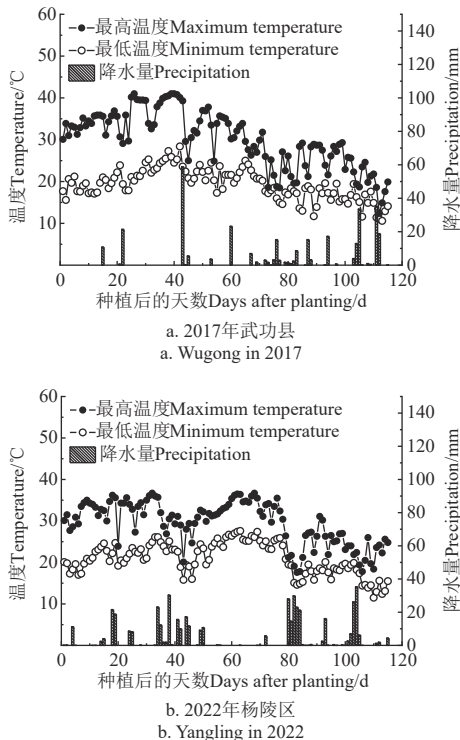


图2 2017年和2022年夏玉米逐日最高、低温度和降水量  
Fig.2 Daily maximum and minimum temperature and precipitation in summer maize growing seasons of 2017 and 2022

### 1.5.2 沟灌入沟流量和停水时间优化方法

以 AquaCrop 模型确定的典型水文年灌水量为基础, 采用 WinSRFR 软件对不同入渗能力和田面坡度组合下的沟灌过程进行模拟。由于 Kostiakov 方程入渗参数 ( $k$

和  $\alpha$ ) 对入沟流量和停水时间的优化结果影响较大, 故根据 2 次沟灌试验资料反演各灌水沟入渗参数, 基于式 (2) 确定入渗时间为 3 h 各沟的累积入渗量以表征入渗能力, 分别选取高、中、低入渗能力, 即分别对应累积入渗量最大、中等和最小的灌水沟作为研究区域典型代表沟; 由于试验田块沟底坡度  $S_0$  范围在 1.0‰~3.2‰ (表 1), 故本文采用 1.0‰、2.0‰和 3.5‰作为典型坡度代表值; 其中沟长、沟间距、灌水沟断面尺寸采用试验田块均值 (表 1); 同时, 已有研究表明, 田面糙率变化对沟灌水流推进过程和灌水质量指标影响较小<sup>[30]</sup>, 故本次采用 2 次沟灌试验所得田面糙率均值, 作为 WinSRFR 软件的输入参数以优化入沟流量和停水时间。

基于研究区域试验资料 (表 1), 入沟流量和停水时间取值范围分别为 1~5 L/s 和 10~60 min, 模拟过程中分别以 0.5 L/s 和 5 min 为步长取值, 共计 891 组模拟组合。根据模拟所得灌水质量指标, 采用式 (3) 计算综合灌水质量指标 ( $C_i$ ), 并采用与 NIE 等<sup>[31-32]</sup> 相类似的方法, 建立不同入渗能力和沟底坡度条件下综合指标  $C_i$  与  $q$  和  $t$  的函数关系, 形式如下:

$$C_i = aq^2 + bq + ct^2 + dt + eqt + f \quad (4)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  和  $f$  均为拟合参数。以式 (4) 为基础, 采用 Matlab 绘制不同入渗能力和沟底坡度  $S_0$  条件下灌水质量指标  $C_i$  随  $q$  和  $t$  变化的等值线图, 以  $C_i \geq 85\%$  为目标函数, 确定  $q$  和  $t$  的取值范围。

### 1.6 不同情景下夏玉米增产能力评价

采用 AquaCrop 模型对 2022 年杨陵区夏玉米的灌溉制度进行优化, 结合 WinSRFR 软件所得研究区域灌水技术要素优化组合 (入沟流量  $q$  和停水时间  $t$ ), 对试验田块夏玉米产量进行模拟, 并进行灌溉制度优化和灌水技术要素组合优化分别对夏玉米增产能力的比较分析。具体步骤如下:

1) 对无灌溉条件下玉米产量进行模拟; 该情景处理目的是将无灌溉处理与其他模拟情景进行对比。

2) 采用 AquaCrop 模型对现状条件下试验田块夏玉米产量进行模拟。由于 AquaCrop 模型不能沿沟长方向进行空间离散, 而实际沟灌过程中沿沟长方向不同位置的入渗水量有差异, 体现在灌水均匀度  $C_u < 100\%$ 。因此, 各灌水沟采用 AquaCrop 模型分别模拟 5 次, 每次灌水沟长度均采用 20 m, 输入的灌水量数据分别根据沿沟长方向 0~20、>20~40、>40~60、>60~80 和 >80~100 m 灌水前、后 1 d 实测土壤含水率 (0~80 cm) 计算得到, 其他所需输入参数 (灌水时间、灌水次数等) 均采用田间实测值; 最后对各灌水沟 5 次模拟所得夏玉米产量取均值, 作为现状条件下该灌水沟夏玉米产量。

3) 采用 AquaCrop 模型对杨陵区试验田块 2022 年夏玉米的灌溉制度进行优化, 并对产量进行模拟。AquaCrop 模型模拟过程和输入的灌水量数据与步骤 2) 相同, 而两者区别在于输入的灌水时间和灌水次数采用优化后灌溉制度。

4) 以杨陵区试验田块 2022 年夏玉米优化的灌溉制度为基础, 结合 WinSRFR 软件所得入沟流量和停水时间, 采用 AquaCrop 模型对夏玉米产量进行模拟。AquaCrop 模型模拟过程与步骤 2) 相似, 输入的灌水量数据为 WinSRFR 软件采用灌水技术要素优化组合模拟所得不同位置处 (沿沟长方向 0~20、>20~40、>40~60、>60~80 和 >80~100 m) 的入渗水量, 其他所需输入的灌水时间、灌水次数等参数与步骤 3) 相同。

### 1.7 模型评价指标

本研究采用以下统计指标评价 AquaCrop 模型和 WinSRFR 软件的模拟精度, 即决定系数 ( $R^2$ ), 均方根误差 (root mean square error, RMSE), 纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, EF) 和相对误差绝对值均值 (mean absolute value of relative error, MAPRE), 具体的计算表达式可参见文献 [7] 和 [26]。

## 2 结果与分析

### 2.1 AquaCrop 模型校准与验证

以 2022 年杨陵区典型农田夏玉米生育期内 CC、B、根系区域土壤水量 (soil water volume in the root zone, SWC)、最终地上部干物质质量 (final above-ground dry biomass, FB)、收获指数 (harvest index, HI) 和产量 (yield, Y) 实测数据为基础, 采用“试错法”对 AquaCrop 模型参数进行校准。利用 2017 年武功县试验数据验证校准参数的可靠性, 结果见表 3。

表 3 AquaCrop 模型校准的夏玉米参数

Table 3 Summer maize parameters of calibrated values in AquaCrop model

参数 Parameters	校准值 Calibration value	来源 Source
最大有效根深 Maximum effective rooting depth ( $Z_r$ )/m	0.8	实测值
作物系数 Crop coefficient for transpiration ( $K_{ctr,c}$ )	1.00	校准值
参考收获指数 Reference harvest index ( $HI_0$ )/%	41	校准值
冠层生长系数 Canopy growth coefficient (CGC)/(°·°C <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	0.98	校准值
冠层衰减系数 Canopy decline coefficient (CDC)/(°·°C <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	0.60	校准值
归一化水分生产力 Normalized crop water productivity (WP <sup>*</sup> )/(t·hm <sup>-2</sup> )	0.315	校准值
最大冠层覆盖度 Maximum canopy cover (CC <sub>s</sub> )/%	90	校准值

校准过程的模拟结果表明, 杨陵区典型农田夏玉米生育期内 CC、B 和 SWC 模拟值与实测值间的  $R^2$ 、RMSE 和 EF 分别为 0.99、0.98、0.89, 3.9%、1.4 t/hm<sup>2</sup>、11.7 mm 和 0.97、0.94、0.56 (表 4), 说明 AquaCrop 模型的模拟精度高, 其中, SWC 的模拟精度低于 CC 和 B, 原因为农田尺度内不同位置处的土壤含水率具有变异性所导致; AquaCrop 模型模拟的夏玉米 FB、Y 和 HI 与实测值之间的 MAPRE 分别为 1.09%、1.85% 和 3.27%。由此说明, 经校准后的 AquaCrop 模型具有高的模拟精度。

利用 2017 年武功县高新农业示范园夏玉米田间试验

资料对 AquaCrop 模型参数校准结果进行验证, 需要说明的是模型所输入的土壤参数 (表 2) 和种植密度 (51 300 株/hm<sup>2</sup>) 采用该试验点实测值。验证过程的模拟结果表明, 夏玉米 CC、B 和 SWC 模拟值与实测值基本保持一致, 两者间的  $R^2$ 、RMSE 和 EF 分别为 0.98、0.99、0.86, 10.1%、1.2 t/hm<sup>2</sup>、13.6 mm 和 0.76、0.96、0.63 (表 4); 夏玉米 FB、Y 和 HI 模拟值与实测值之间的 MAPRE 分别为 8.87%、7.47% 和 1.44%。由此说明, 经参数校准后的 AquaCrop 模型模拟精度较好, 可用于研究区域夏玉米生长过程和产量的模拟。

表 4 AquaCrop 模型校准和验证结果

Table 4 Calibration and validation results of AquaCrop model

种植年份 Year of planting	变量 Variant	$R^2$	RMSE	EF
2022 (校准 Calibrate)	CC	0.99	3.9%	0.97
	B	0.98	1.4 t·hm <sup>-2</sup>	0.94
	SWC	0.89	11.7 mm	0.56
2017 (验证 Validate)	CC	0.98	10.1%	0.76
	B	0.99	1.2 t·hm <sup>-2</sup>	0.96
	SWC	0.86	13.6 mm	0.63

注:  $R^2$  为决定系数; RMSE 为均方根误差; EF 为纳什效率系数; CC 为冠层覆盖度; B 为地上部干物质质量; SWC 为根系区域土壤水量。

Note:  $R^2$  is the coefficient of determination; RMSE is the root mean square error; EF is the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient; CC is canopy cover; B is above-ground dry biomass; SWC is soil water volume in the root zone.

### 2.2 典型水文年夏玉米灌溉制度

采用 Pearson-III 型曲线对研究区域 1970—2020 年夏玉米生育期内的降雨量数据进行分析计算, 可得丰水年 ( $P = 25\%$ )、平水年 ( $P = 50\%$ ) 和干旱年 ( $P = 75\%$ ) 分别为 2005 年、2008 年和 2001 年, 降雨量分别为 480.1、360.8 和 252.4 mm。采用 AquaCrop 模型模拟确定了研究区域夏玉米不同水文年条件下的灌溉制度。结果表明, 丰水年 (2005 年) 条件下, 夏玉米生育期内需进行 1 次灌水, 灌水量为 53.4 mm, 灌水时间为播种后第 89 天 (灌浆期); 平水年 (2008 年) 夏玉米生育期内需灌水 1 次, 灌水量为 57.1 mm, 灌水时间为播种后第 54 天 (拔节期); 干旱年 (2001 年) 夏玉米生育期内需灌水 2 次, 灌水量分别为 53.4 和 53.3 mm, 灌水时间分别为播种后第 52 天 (拔节期) 和播种后第 70 天 (灌浆期)。进一步分析不同水文年单次灌水量, 并考虑田间灌溉实际情况, 故将单次灌水量均调整为 55 mm。

### 2.3 入渗参数和田面糙率

由表 5 可见, 各灌水沟所反演的入渗参数值存在差异, 原因为土壤特性的空间变异性是客观存在的, 引起了各灌水沟间入渗参数的差异; 反演所得田面糙率同样存在差异, 原因为不同的入沟流量和土壤特性空间变异性等诸多因素作用而引起的 (表 2)。此外, 同一灌水沟 2 次灌水试验反演所得入渗参数和田面糙率同样存在差异, 原因为玉米生长过程中根系不断发育, 以及降雨等, 使得灌水沟附近土壤结构 (如土壤孔隙、容重等)、含水率等发生变化, 导致入渗参数和田面糙率存在时间尺度也存在变异性。由此说明, 田块尺度土壤入渗特性和田面糙率在作物生育期内存在时空变异性, 这与 NIE 等<sup>[29]</sup> 和 XU 等<sup>[33]</sup> 的研究结论一致。

表5 入渗参数和田面糙率反演结果与误差分析  
Table 5 Infiltration parameters and Manning's roughness inversion results and error analysis

编号 No.	第1次灌溉 First irrigation									第2次灌溉 Second irrigation							
	$k/(mm \cdot h^{-\alpha})$	$\alpha$	$n$	MAPRE/%					$k/(mm \cdot h^{-\alpha})$	$\alpha$	$n$	MAPRE/%					
				$E_a$	$C_u$	$E_s$	$t_{adv}$	$h_0$				$E_a$	$C_u$	$E_s$	$t_{adv}$	$h_0$	
F1	95.561	0.716	0.051	5.28	4.78	5.04	7.54	6.53	90.561	0.822	0.052	5.13	4.15	5.04	7.18	8.04	
F2	84.686	0.351	0.027	4.13	3.94	0.00	5.70	6.36	95.686	0.581	0.033	2.00	3.41	5.95	7.53	7.26	
F3	80.173	0.623	0.047	5.21	3.29	4.80	8.14	11.41	75.173	0.623	0.050	4.82	8.82	3.79	4.74	5.49	
F4	94.243	0.751	0.051	6.12	1.98	1.01	6.28	7.40	98.437	0.824	0.062	8.11	3.38	3.94	4.67	10.64	
F5	59.232	0.736	0.049	5.94	3.67	5.52	5.92	12.61	55.416	0.617	0.084	2.49	5.74	2.60	7.07	10.54	
F6	77.416	0.639	0.024	4.81	3.14	4.82	3.93	15.60	85.232	0.616	0.061	5.86	4.77	3.13	6.81	7.91	
F7	85.396	0.659	0.053	5.22	6.19	3.81	6.38	11.34	87.396	0.744	0.071	5.93	5.36	2.29	6.01	9.82	
F8	81.426	0.808	0.068	3.91	4.81	4.10	6.34	11.17	95.426	0.858	0.074	3.95	7.62	1.22	6.30	8.09	
F9	76.912	0.688	0.060	5.65	6.72	5.32	9.91	3.29	73.117	0.688	0.054	4.98	1.50	4.12	9.42	6.29	
F10	67.371	0.486	0.072	4.90	5.86	4.91	4.51	6.91	63.572	0.446	0.079	4.82	4.58	4.46	5.68	11.84	
F11	96.182	0.658	0.045	4.65	3.14	6.04	4.44	7.64	96.551	0.663	0.045	4.00	6.41	2.94	8.74	9.83	
F12	66.443	0.532	0.078	5.11	4.04	2.91	6.17	8.91	75.421	0.602	0.058	6.27	4.69	6.65	7.96	6.30	
均值	80.420	0.637	0.052	5.08	4.30	4.02	6.27	9.12	82.465	0.695	0.060	4.86	5.04	3.84	6.84	8.51	

注:  $k$  为入渗系数;  $\alpha$  为入渗指数;  $n$  为田面糙率;  $E_a$  为灌水效率;  $C_u$  为灌水均匀度;  $E_s$  为储水效率;  $t_{adv}$  为水流推进时间;  $h_0$  为沟首水深; MAPRE 为相对误差绝对值均值。

Note:  $k$  is coefficient of infiltration;  $\alpha$  is infiltration index;  $n$  is manning roughness;  $E_a$  is application efficiency;  $C_u$  is distribution uniformity;  $E_s$  is storage efficiency;  $t_{adv}$  is advance time;  $h_0$  is water depth of the furrow upstream; MAPRE is the mean absolute value of relative error.

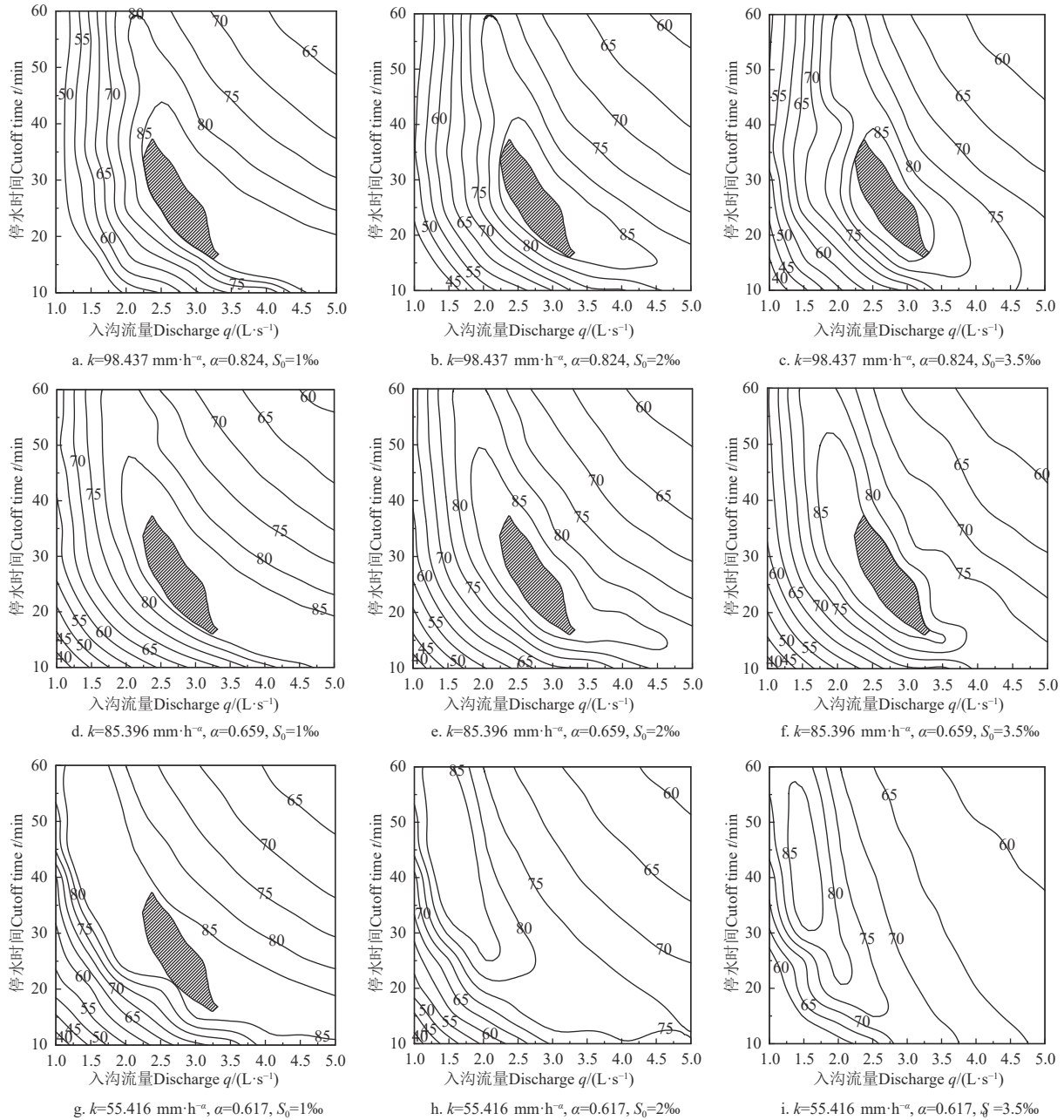
为验证各灌水沟反演所得入渗参数和田面糙率的可靠性, 将其分别带入 WinSRFR 软件 Simulation 模块模拟沟灌水流运动过程。结果表明, 2 次沟灌试验各灌水沟水流推进过程和沟首水深实测值与模拟值具有较好的一致性, 两者间的 MAPRE 分别为 6.27%、9.12% (第 1 次灌溉) 和 6.84%、8.51% (第 2 次灌溉) (表 5), 其中沟首水深模拟精度低于水流推进过程, 一方面原因为沟灌大田试验中水深数据由于观测方法的限制, 易引起较大的观测误差; 另一方面根据曼宁公式推求沟首水深数据, 很大程度上依赖于该模型估算的田面糙率值, 而实际灌水过程中影响糙率的因素很多, 故可能引起沟首水深数据较大的模拟误差。沟灌灌水质量指标  $E_a$ 、 $C_u$  和  $E_s$  模拟值与实测值之间具有较好的一致性, 所有灌水沟 2 次灌水试验两者间的 MAPRE 分别为 5.08%、4.30%、4.02% (第 1 次灌溉) 和 4.86%、5.04%、3.84% (第 2 次灌溉) (表 5), 产生误差的原因, 一方面为田间试验测量误差是不可避免的, 另一方面本文模拟沟灌过程时, 忽略了各灌水沟沿沟长方向的土壤入渗特性和田面糙率的变异性, 这与田间实际有所差异, 导致沟灌水流运动过程和灌水质量指标模拟值与实测值存在差异。综上, 虽然在模拟水流运动过程中所得灌水质量与实测值存在一定差异, 但 MAPRE 均在 10% 以内, 表明采用 WinSRFR 软件中 EVALUE 法同步反演沟灌土壤入渗参数和田面糙率是可行的, 且具有较高的反演精度。

#### 2.4 优化入沟流量和停水时间

根据上文研究结果可知, 研究区典型水文年玉米的灌水定额为 55 mm, 基于各灌水沟所反演的土壤入渗参数, 分别选取高 ( $k=98.437 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha=0.824$ )、中 ( $k=85.396 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha=0.659$ )、低 ( $k=55.416 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha=0.617$ ) 入渗能力的典型灌水沟, 分别为 F4、F7 和 F5 (表 5), 其中高入渗能力累积入渗量分别是中和低入渗能力的 1.4 倍和 2.2 倍; 田面糙率采用 2 次沟灌试验均值, 即  $n=0.056$ ; 根据模拟所得灌水质量指标  $E_a$ 、 $C_u$  和  $E_s$ , 采用式 (3) 计算得到  $C_i$ ; 以式 (4) 为基础, 对不同土壤入渗能力和沟底坡度条件下所得综合指标  $C_i$  与  $q$  和  $t$  进行拟合, 得到相应的拟合参数值; 采用 Matlab 软件绘制  $C_i$  随  $q$  和  $t$  变化的等值线图 (图 3)。

由图 3 可知, 研究区域不同土壤入渗能力和沟底坡度条件下,  $C_i \geq 85\%$  的入沟流量  $q$  和停水时间  $t$  组合范围存在差异 (图 3), 这给实际灌溉应用带来了困难。因此, 为简化该问题, 选取图 3 中  $C_i \geq 85\%$  的入沟流量  $q$  和停水时间  $t$  交集。结果表明, 除图 3h 和 3i 外, 其余部分存在交集 (图 3 中阴影部分), 即入沟流量  $q$  为 2.2~3.3 L/s, 停水时间  $t$  为 35~16 min, 其中  $q$  取小值时, 则  $t$  取大值, 反之亦然。采用相同的处理方法, 可得图 3h 和 3i 入沟流量  $q$  和停水时间  $t$  的交集分别为 1.3~1.7 L/s 和 56~32 min, 所得  $q$  取值小于图 3 阴影部分, 但  $t$  取值大于图 3 阴影部分, 原因为图 3h 和 3i 代表的低土壤入渗能力, 且较大的沟底坡度 (分别为 2‰和 3.5‰), 采用大流量易导致水流在沟尾聚集, 而沟首灌水不足。需要说明的是, 图 3g 虽然也是低入渗能力下所得结果, 采用较大流量虽然也会导致水流在沟尾聚集, 但由于沟底坡度小, 仅有 1‰, 类似于水平沟灌, 即沟首部和沟尾入渗水深差异不大, 即可获得较高的灌水质量。考虑沟灌田间实际情况, 以及所得沟灌入沟流量和停水时间优化组合的实用性, 推荐研究区域不同入渗能力和沟底坡度条件下合理的入沟流量  $q$  和停水时间  $t$  取值范围分别为 2.2~3.3 L/s 和 35~16 min。

为验证所得灌水技术要素组合 (入沟流量  $q$  和停水时间  $t$ ) 取值范围的可靠性, 以  $q=2.6 \text{ L/s}$  和  $t=28 \text{ min}$  为例, 将其代入 WinSRFR 软件对表 1 中第 1 次沟灌灌水质量进行模拟, 其中各灌水沟断面尺寸采用实测值 (表 1), 入渗参数和田面糙率采用反演值 (表 5), 结果见表 6。结果表明, 对第 1 次沟灌优化后的灌水技术要素组合除 F5 外, 其余 11 条灌水沟的  $C_i > 85\%$ , 其中所得灌水质量指标  $E_a$ 、 $C_u$ 、 $E_s$  和  $C_i$  模拟值的变化范围分别为 78.0%~97.0%、75.3%~96.2%、91.0%~100.0% 和 83.5%~95.1%, 均值分别为 91.4%、87.5%、96.6% 和 91.7%, 较第 1 次沟灌灌水质量指标实测值分别提高了 26.1%、16.5%、2.3% 和 14.9%。需要说明的是, 采用优化结果所得 F5 的  $C_i$  为 83.5%, 小于 85%, 原因是 F5 属于低入渗能力 (表 5), 且沟底坡度为 1.6‰, 若要获得高的灌水质量, 需减小入沟流量, 并增加停水时间 (图 3h)。



注：图中等值线为综合灌水质量指标  $C_i$  值；阴影部分为  $C_i \geq 85\%$  条件下入沟流量和停水时间组合的交集。

Note: Contour line is the value of  $C_i$  in the figure; the shaded area represents the intersection of the discharge and cutoff time combinations under the condition of  $C_i \geq 85\%$ .

图 3 不同入沟流量和停水时间条件下的综合灌水质量指标等值线图

Fig 3 Comprehensive irrigation performance indicator contour line of different discharge and cutoff time

表 6 优化后的灌水质量模拟结果

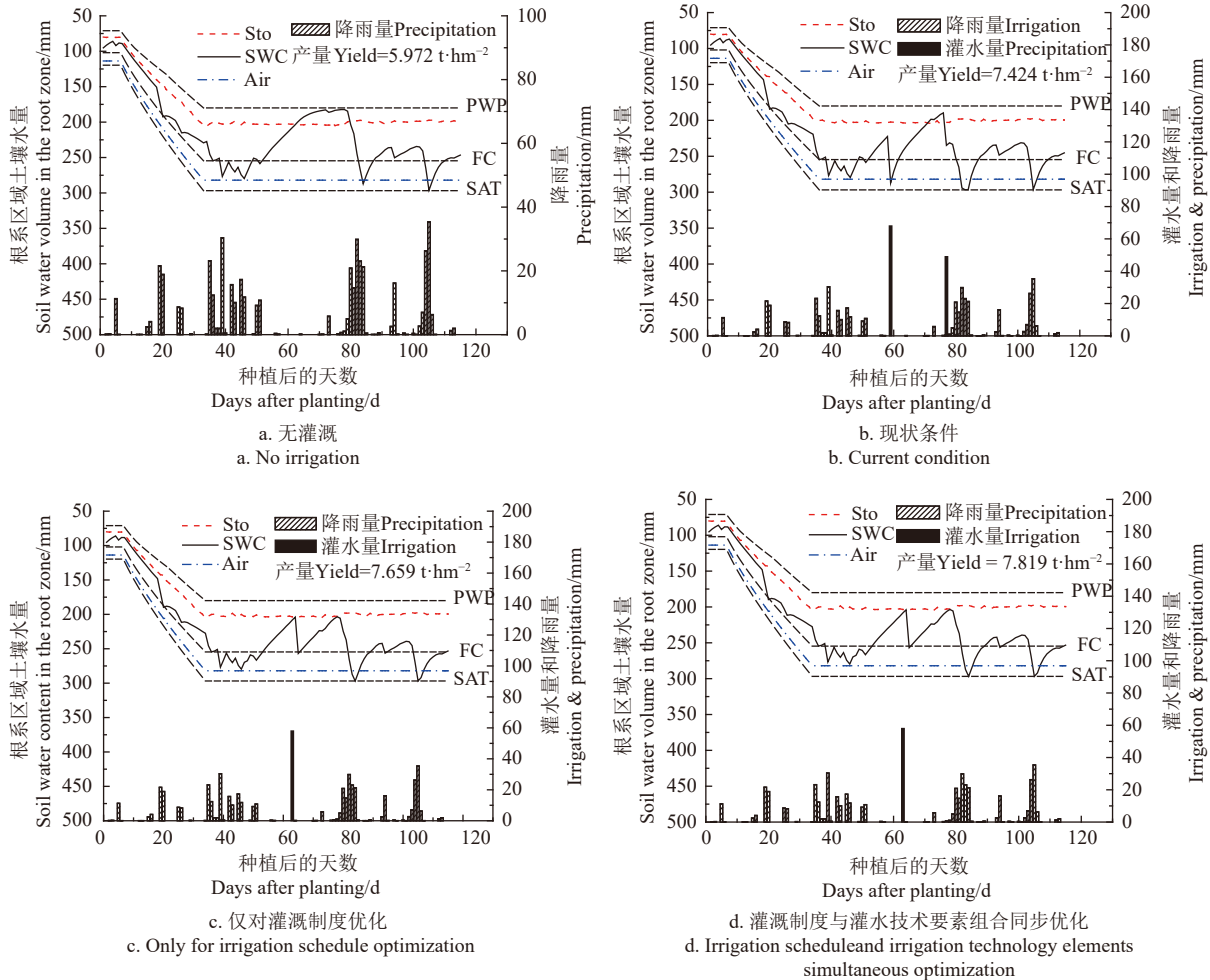
Table 6 Optimized irrigation performance simulation results

编号 No.	$E_d/\%$		$C_d/\%$		$E_f/\%$		$C_f/\%$	
	实测值 Measured	模拟值 Simulated	实测值 Measured	模拟值 Simulated	实测值 Measured	模拟值 Simulated	实测值 Measured	模拟值 Simulated
F1	73.9	93.0	80.8	93.3	95.2	99.0	82.8	95.1
F2	55.7	78.0	84.3	96.2	100.0	100.0	77.7	90.9
F3	74.9	92.0	81.4	91.2	95.4	100.0	83.5	94.3
F4	73.5	91.0	78.8	94.6	99.0	100.0	83.1	95.1
F5	77.4	85.0	68.2	75.3	94.2	91.0	79.2	83.5
F6	93.5	97.0	79.5	92.1	85.1	96.0	85.8	95.0
F7	82.3	92.0	67.8	89.4	94.4	100.0	80.8	93.7
F8	84.3	97.0	74.7	89.6	89.3	94.0	82.6	93.5
F9	67.2	93.0	77.4	86.5	94.0	97.0	78.8	92.1
F10	57.2	91.0	66.5	77.8	95.3	96.0	71.3	87.9
F11	60.2	94.0	76.5	83.9	94.3	93.0	75.7	90.2
F12	70.4	94.0	65.5	80.2	96.2	93.0	76.3	88.8
均值	72.5	91.4	75.1	87.5	94.4	96.6	79.8	91.7

## 2.5 不同情境下增产能力评价

采用 AquaCrop 模型对无灌溉条件下杨陵区典型田块 2022 年夏玉米产量进行模拟, 结果见图 4a。结果表明, 无灌溉条件下玉米产量为  $5.972 \text{ t/hm}^2$ , 较现状条件下减少了  $1.317 \text{ t/hm}^2$  (18.1%)。原因为 2022 年夏玉米生

育期内降水量 (448.8 mm) 分布不均引起了水分胁迫 (图 4a)。由此说明, 在半干旱半湿润地区, 灌溉虽然只作为作物需水量的补充, 但对夏玉米的产量影响较大。因此, 在半干旱半湿润地区, 补充灌溉对保证作物产量至关重要。



注: PWP 为凋萎含水率对应的土壤水量; SAT 为饱和含水率对应的土壤水量; Sto 为达到水分亏缺胁迫的土壤水量; Air 为达到厌氧胁迫的土壤水量。  
Note: PWP is soil water volume at permanent wilting point; SAT is soil water volume at saturated point; Sto is the soil water volume under water deficit stress. Air is the soil water volume under anaerobic stress.

图 4 不同情景下根系区域土壤水量变化与产量模拟结果

Fig.4 Simulation results of soil water volume in the root zone and yield under different conditions

采用 AquaCrop 模型对现状条件下试验田块 2022 年夏玉米产量进行模拟, 结果见图 4b。结果表明, 现状条件下夏玉米产量为  $7.424 \text{ t/hm}^2$ , 仅占潜在最大产量的 81.6% (图 4b)。原因为试验点夏玉米第 2 次灌溉 2 d 后出现了集中降雨, 且降雨量为 110 mm, 过高的土壤水分影响了玉米生长和产量形成; 另一方面, 现状条件下所采用的沟灌入沟流量和停水时间, 产生了较低  $C_u$  (表 6), 这不仅导致灌水沟之间的产量差异, 同时也导致单条灌水沟上的产量存在差异。

为量化分析优化灌溉制度对玉米产量的影响, 采用 AquaCrop 模型对使用优化灌溉制度下的杨陵区试验田块 2022 年夏玉米产量进行了模拟, 结果见图 4c。2022 年夏玉米优化后灌溉制度仅需要灌水 1 次, 灌水时间为玉米播种后第 63 天, 较实际灌水时间推迟了 4 d, 灌水

量为 58 mm, 较现状条件下少灌水 1 次, 共节水 59 mm; 2022 年研究区夏玉米生育期内降雨量 448.8 mm, 与丰水年降雨量接近 (480.1 mm), 优化所得灌溉制度与其基本一致, 说明本文确定的研究区域典型水文年灌溉制度是可靠的。优化后的灌溉制度模拟所得玉米产量为  $7.659 \text{ t/hm}^2$ , 较现状条件下提高了  $0.236 \text{ t/hm}^2$ , 增幅为 3.2%, 且节约灌溉用水 59 mm。由此说明, 制定合理的灌溉制度, 即正确回答作物生育期内“何时灌”和“灌多少”的问题, 不仅有助于提高作物产量, 也可节约灌溉用水。

以 2022 年夏玉米优化的灌溉制度与沟灌入沟流量和停水时间优化组合为基础, 采用 AquaCrop 模型进行产量模拟, 结果见图 4d。结果表明, AquaCrop 模型模拟所得玉米产量为  $7.819 \text{ t/hm}^2$ , 较无灌溉、现状条件和仅

对灌溉制度优化情景的夏玉米产量分别提高了 1.847、0.395 和 0.160 t/hm<sup>2</sup>, 增幅分别为 30.9%、5.3% 和 2.1%。由此说明, 通过对沟灌灌水技术要素优化, 即合理解决“怎么灌”的问题, 可单独提高研究区域夏玉米产量 2.1%; 若同时对灌溉制度和灌水技术要素优化, 可提高研究区域夏玉米产量 5.3%。

### 3 讨论

采用 AquaCrop 模型模拟得出了研究区域典型水文年夏玉米灌溉制度。结果表明, 研究区域夏玉米灌溉制度为丰水年和平水年均需要 1 次灌溉, 干旱年需 2 次灌溉, 单次灌水量均为 55 mm; 这与在关中平原进行夏玉米灌溉制度已有研究结果基本一致<sup>[3,17]</sup>。需要说明的是, 作物灌溉制度的确定与所选典型水文年降雨量分布有着密切联系, 即便不同年份条件下作物生育期内降雨量差异较小, 但降雨出现在不同时间对作物生长过程影响不同。因此, 作物灌溉制度的确定与所选典型水文年降雨量分布关系密切。本文仅对研究区域夏玉米充分灌溉条件下的灌溉制度进行了确定, 未涉及非充分灌溉条件下灌溉制度研究, 且未考虑养分胁迫和病虫害等对夏玉米生长过程和产量的影响, 上述问题仍需进一步研究。

本文研究过程中采用 Kostiaikov 公式表征沟灌过程中的土壤入渗特性, 并利用水流推进过程和沟首水深资料同步反演沟灌土壤入渗参数和田面糙率值, 较好地消除了仅利用水流推进过程数据反演过程中参数之间的交互影响。本文反演所得沟灌过程中入渗参数  $k$  和  $a$  的变化范围分别为 55.416 mm/h <sup>$\alpha$</sup> ~98.437 mm/h <sup>$\alpha$</sup>  和 0.351~0.858, 田面糙率均值为 0.056。这与 NIE 等<sup>[29]</sup> 反演所得关中平原地区夏玉米沟灌过程中土壤入渗参数  $k$  和  $a$  的范围 74.47 mm/h <sup>$\alpha$</sup> ~156.45 mm/h <sup>$\alpha$</sup>  和 0.207~0.861, 以及田面糙率均值 0.075 的结论基本一致。由此说明, 本文反演所得研究区域沟灌入渗参数的田面糙率是可靠的。

由于缺乏具体的土壤入渗能力判别标准, 导致按入渗能力确定的合理灌水技术要素组合范围, 在实际沟灌过程中应用困难, 即无法准确判断该灌水沟入渗能力是高还是低。因此, 从满足实际应用的角度出发, 本文推荐研究区域沟灌过程中入沟流量和停水时间的取值范围分别为 2.2~3.3 L/s 和 35~16 min, 虽然灌水沟 F5 的  $C_i$  为 83.5%, 不满足  $C_i \geq 85\%$  的要求, 但较现状条件 ( $C_i = 79.8\%$ ) 提高了 4.6%, 进一步说明本文所提灌水技术要素组合优化结果具有较强的普适性和实用性。

夏玉米灌溉制度优化后的产量模拟结果较 2022 年有所提升 (图 4), 原因是现状第 2 次灌水 2 d 后出现集中降雨, 土壤水分过量, 导致作物处于厌氧胁迫 (图 4b), 影响了玉米的最终产量, 这与 NIE 等<sup>[42]</sup> 的研究结论一致。本文研究结果表明, 通过优化夏玉米灌溉制度和灌水技术要素组合, 较现状可分别提升产量 3.2% 和 2.1% (图 4)。此外, 优化灌溉制度的节水效益明显, 这与 ALAVI 等<sup>[13]</sup> 的研究结果一致。由此说明, 通过对灌溉制度和灌水技术要素组合的优化, 即正确回答夏玉米生育期内“何时

灌”“灌多少”和“怎么灌”的问题, 不仅有助于提高作物产量, 也可节约灌溉用水量。

由于未来年份水文年型预测具有不确定性, 故基于历史气象资料所得典型水文年灌溉制度可为相关部门在灌区规划、水资源管理等方面提供参考, 但在实际应用过程中, 还需结合当地实际情况加以调整; 此外, 本文结果基于典型田块参数 (如沟长、沟断面尺寸等) 研究所得, 对于其他区域或不同田块长度等的适用性还有待进一步验证, 但所提方法可为类似研究提供参考。

### 4 结论

1) 采用参数校准后的 AquaCrop 模型模拟分析, 提出了研究区域夏玉米典型水文年的灌溉制度, 即丰水年 (灌浆期) 和平水年 (拔节期) 需 1 次灌溉, 干旱年 (拔节期和灌浆期) 需 2 次灌溉, 灌水定额均为 55 mm。

2) 结合 AquaCrop 模型确定的灌溉制度, 采用数值模拟方法, 提出了研究区域不同入渗能力 (高、中、低入渗能力) 和沟底坡度 (1.0‰, 2.0‰和 3.5‰) 条件下, 满足综合灌水质量指标  $C_i \geq 85.0\%$  的入沟流量和停水时间, 取值范围分别为 2.2~3.3 L/s 和 35~16 min。

3) 以研究区域典型农田 2022 年夏玉米优化的灌溉制度和灌水技术要素优化组合为基础, 采用 AquaCrop 模型模拟所得产量为 7.819 t/hm<sup>2</sup>, 其较无灌溉、现状条件和仅对灌溉制度优化的夏玉米产量分别提高了 1.847、0.395 和 0.160 t/hm<sup>2</sup>, 增幅分别为 30.9%、5.3% 和 2.1%, 所需灌溉用水较现状条件可减少 59 mm。由此说明, 同时对灌溉制度和灌水要素组合优化可有效提升作物产量, 并节约灌溉用水。同时说明, 在半干旱半湿润地区, 灌溉虽然只作为作物需水量的补充, 但对作物产量影响较大。

#### [参 考 文 献]

- [1] WU Z, HUA W, LUO L, et al. Technical efficiency of maize production and its influencing factors in the world's largest groundwater drop funnel area, China[J]. *Agriculture*, 2022, 12(5): 00649.
- [2] MAZAREI R, MOHAMMADI A S, EBRAHIMIAN H, et al. Temporal variability of infiltration and roughness coefficients and furrow irrigation performance under different inflow rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106465.
- [3] SHEN H, XU F, ZHAO R, et al. Optimization of sowing date, irrigation, and nitrogen management of summer maize using the DSSAT-CERES-Maize model in the Guanzhong Plain, China[J]. *Transactions of the ASABE*, 2020, 63(4): 789-797.
- [4] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 144-156.  
HUANG Jianxi, HUANG Hai, MA Hongyuan, et al. Review on data assimilation of remote sensing and crop growth models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(21): 144-156. (in Chinese with English abstract)
- [5] CUADRA S V, KIMBALL B A, BOOTE K J, et al. Energy balance in the DSSAT-CSM-CROPGRO model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108241.

- [6] 杨广, 雷杰, 孔春贤, 等. 膜下滴灌水源矿化度对棉花生长的影响及 AquaCrop 模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 83-92  
YANG Guang, LEI Jie, KONG Chunxian, et al. Effects of water salinity on cotton growth in mulched drip irrigation and its simulation by Aquacrop model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(21): 83-92. (in Chinese with English abstract)
- [7] RAN H, KANG S, LI F, 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.
- [8] GUO D X, CHEN C F, GUO P Y, et al. Evaluation of AquaCrop model for Foxtail Millet (*Setaria italica*) growth and water use with plastic film mulching and no mulching under different weather conditions[J]. *Water*, 2018, 10(7): 836.
- [9] 吴晨, 李发文, 冯平, 等. 设施农业雨水集蓄利用与番茄灌溉方案优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 153-162.  
WU Chen, LI Fawen, FENG Ping, et al. Rainwater harvesting and tomato irrigation schemes optimization for facilities agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 153-162. (in Chinese with English abstract)
- [10] GUO D, OLESEN J E, MANEVSKI K, et al. Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106575.
- [11] SEIFI A, GOLESTANI Kermani S, MOSAVI A, et al. Uncertainty assessment of WinSRFR furrow irrigation simulation model using the GLUE framework under variability in geometry cross section, infiltration, and roughness parameters[J]. *Water*, 2023, 15(6): 1250.
- [12] 聂卫波, 张强, 冯正江, 等. 沟灌管理参数优化策略比较与最优灌水时间估算[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 89-99.  
NIE Weibo, ZHANG Qiang, FENG Zhengjiang, et al. Comparison of strategies for optimizing management parameters and estimation of optimal cutoff time for furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 89-99. (in Chinese with English abstract)
- [13] ALAVI S A, NASERI A A, RITZEMA H, et al. A combined model approach to optimize surface irrigation practice: SWAP and WinSRFR[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107741.
- [14] MEHRI A, MOHAMMADI A S, EBRAHIMIAN H, et al. Evaluation and optimization of surge and alternate furrow irrigation performance in maize fields using the WinSRFR software[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 276: 108052.
- [15] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近 50 年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171.  
GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe river basin in nearly 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese with English abstract)
- [16] ZHANG C, LIU J, SHANG J, et al. Capability of crop water content for revealing variability of winter wheat grain yield and soil moisture under limited irrigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 677-687.
- [17] 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.  
CHEN Chaofei, LIU Shuanghuan, GUO Daxin et al. Growth simulation and optimization of irrigation scheme for summer maize using AquaCrop model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 72-82. (in Chinese with English abstract)
- [18] ROSA S L K, DE SOUZA J L M, TSUKAHARA R Y, et al. Sensitivity analysis of the AquaCrop model for wheat crop in Campos Gerais region, Paraná[J]. *Revista Ceres*, 2023, 70: 32-41.
- [19] LI Z, FENG B, WANG W, et al. Spatial and temporal sensitivity of water footprint assessment in crop production to modelling inputs and parameters[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107805.
- [20] 宋喜山, 曹红霞, 何子建, 等. Aquacrop 模型在北疆棉花生育期灌溉洗盐制度优化中的适用性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 111-122.  
SONG Xishan, CAO Hongxia, HE Zijian, et al. Applicability of the Aquacrop model in optimization of irrigation and salt leaching schedule during the reproductive period of cotton in Northern Xinjiang of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(20): 111-122. (in Chinese with English abstract)
- [21] RAES D, GEERTS S, KIPKORIR E, et al. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(3): 335-357.
- [22] BAUTISTA E, SCHLEGEL J L. Estimation of infiltration and hydraulic resistance in furrow irrigation, with infiltration dependent on flow depth[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(6): 1873-1884.
- [23] BAUTISTA E, SCHLEGEL J L. A flexible system for estimation of infiltration and hydraulic resistance parameters in surface irrigation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(4): 1223-1234.
- [24] BAUTISTA E, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1146-1154.
- [25] SALAHOU M K, JIAO X, LÜ H, et al. An improved approach to estimating the infiltration characteristics in surface irrigation systems[J]. *PloS One*, 2020, 15(6): e0234480.
- [26] NIE W B, LI Y B, ZHANG F, et al. A method for determining the discharge of closed-end furrow irrigation based on the representative value of Manning's roughness and field mean

- infiltration parameters estimated using the PTF at regional scale[J]. *Water*, 2018, 10(12): 1825.
- [27] MAZAREI R, MOHAMMADI A S, NASERI A A, et al. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105899.
- [28] 王维汉, 缴锡云, 彭世彰, 等. 基于稳健设计理论的畦灌质量敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 37-42.  
WANG Weihang, JIAO Xiyun, PENG Shizhang, et al. Sensitivity analysis of border irrigation performance using robust design theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(11): 37-42. (in Chinese with English abstract)
- [29] NIE W B, LI Y B, ZHANG F, et al. Optimal discharge for closed-end border irrigation under soil infiltration variability[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 58-65.
- [30] SALAHOU M K, JIAO X, LÜ H. Border irrigation performance with distance-based cut-off[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 27-37.
- [31] NIE W, FEI L, MA X. Impact of infiltration parameters and Manning roughness on the advance trajectory and irrigation performance for closed-end furrows[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2014, 12(4): 1180.
- [32] NIE W B, DONG S X, LI Y B, et al. Optimization of the border size on the irrigation district scale – Example of the Hetao irrigation district[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106768.
- [33] XU J, CAI H, SADDIQUE Q, et al. Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 214: 64-77.

## Optimization of furrow irrigation programs of summer maize by using the AquaCrop model and WinSRFR software

NIE Weibo , MA Yunpeng , FENG Zhengjiang , LI Ge

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Determining a reasonable irrigation schedule for crops and a combination of irrigation technology elements is the basis for scientific management of agricultural water resources, which can effectively alleviate the contradiction of water scarcity and guarantee regional food security. In this study, the AquaCrop model was calibrated and validated based on the summer maize field experiments in Yangling (2022) and Wugong (2017), Shaanxi Province to optimize the irrigation schedule, and the irrigation schedule of summer maize under typical hydrological years (wet year, normal year and dry year) and the required irrigation depth were determined in the study area; the WinSRFR software was calibrated and validated using the Yangling (2022) irrigation experiment; and the soil infiltration parameters of F4, F7, and F5 were selected to be representative of high ( $k = 98.437 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha = 0.824$ ), moderate ( $k = 85.396 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha = 0.659$ ), and low ( $k = 55.416 \text{ mm/h}^\alpha$ ,  $\alpha = 0.617$ ) infiltration capacities, and 1.0‰, 2.0‰ and 3.5‰ were used as representative values of typical bottom slopes in the study area, respectively to optimize values furrow irrigation technology elements (discharge and cutoff time) under different soil infiltration capacities and bottom slope by using WinSRFR. Finally, evaluation the yield increasing ability of the optimized irrigation schedule and the irrigation technology elements for summer maize by using AquaCrop model, respectively. The results indicated that the AquaCrop model can accurately simulated the maize growth. The calibration results of the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (EF) between simulated and measured values of canopy cover (CC), aboveground biomass (B) and soil water content (SWC) were 0.99, 0.98, 0.89; 3.9%, 1.4 t/hm<sup>2</sup>, 11.7 mm; and 0.97, 0.94, 0.56, respectively; the verification results were 0.98, 0.99, 0.86; 10.1%, 1.2 t/hm<sup>2</sup>, 13.6 mm, and 0.76, 0.96, 0.63, respectively; The calibration and verification results of the mean absolute value of the relative error between the simulated and measured values of yield was 1.85% and 7.47%, respectively; Summer maize in the study area must be irrigated once during wet year (during the grain-filling stage) and normal year (during the jointing stage) and twice during dry year (during the jointing and grain-filling stages), with the water quantity used in each irrigation event being 55 mm; the optimised  $k$  and  $\alpha$  values were 55.416 to 98.437 mm/h <sup>$\alpha$</sup>  and 0.35 to 0.858, respectively, and the mean  $n$  value was 0.056; the optimal discharge and cutoff times were 2.2 to 3.3 L/s and 35 to 16 min, respectively, these values are suitable for meeting the requirement of the comprehensive irrigation performance indicator ( $C_i$ ) being  $\geq 85\%$ . Based on the irrigation schedules of optimization and the combination of irrigation technology elements of optimization for summer maize in 2022, the yield of maize simulated by AquaCrop model is 7.819 t/hm<sup>2</sup>; compared with rain fed (5.972 t/hm<sup>2</sup>), current condition (7.424 t/hm<sup>2</sup>) and irrigation schedule of optimization (7.659 t/hm<sup>2</sup>), summer maize yield increased by 1.847, 0.395 and 0.160 t/hm<sup>2</sup>, respectively; and the percentage of summer maize yield increase by 30.9%, 5.3% and 2.1%, respectively, and saved irrigation water 59 mm. Therefore, the optimization of irrigation system and irrigation factor combination can effectively improve crop yield and save irrigation water; and it can be concluded that although irrigation is only used as a supplement to crop water requirements in semiarid and semi-humid, it is important because it has substantive implications on maize yield. The research results can provide theoretical basis for furrow irrigation scheme design of the research region and technology support.

**Keywords:** crop; model; furrow irrigation; optimization; discharge; cutoff time; irrigation performance