

河套灌区畦灌灌水质量评价与优化

范雷雷¹ 史海滨¹ 李瑞平¹ 苗庆丰¹ 孙娜¹ 王艳明²

(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. 乌兰布和灌域管理局, 巴彦淖尔 015200)

摘要: 针对河套灌区农田规格不合理问题, 为探求变化环境下适宜的畦灌灌水技术要素, 在不同畦田宽度下进行田间灌水试验, 采用模型模拟与回归分析方法, 分析了畦灌水流运动状态及灌水质量变化情况。结果表明: 畦田宽度为 18~23 m 时灌水质量不佳, 灌水效率、灌水均匀度仅分别为 59.78%~77.40% 和 84.61%~87.02%, 尽管此时储水效率为 100%, 但其灌水效果仍然较差; 畦田宽度缩小到 10~15 m 时, 灌水效率为 70.20%~87.00%, 灌水均匀度为 86.77%~90.80%, 灌水质量最好; 当缩小畦田宽度到 5 m 时, 灌水质量反而降低。在此基础上, 结合田间实测资料, 通过模型模拟、均匀试验设计以及多元回归分析相结合的方法, 构建了包含灌水效率、灌水均匀度以及储水效率的单目标优化模型 (Single objective optimization model), 将单宽流量和灌水时间作为决策变量, 采用冒泡排序法 (Bubble sort method) 对模型进行求解, 得到畦灌适宜的单宽流量和灌水时间组合, 根据示范区实际入田流量, 初步确定最优畦田宽度为 10.7~14.2 m。研究结果为灌区节水改造设计、水资源高效利用和农业可持续发展提供了理论依据。

关键词: 河套灌区; 灌水质量; 畦灌; SIRMOD 模型; 单目标优化模型

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0315-07

Evaluation and Optimization of Border Irrigation Performance in Hetao Irrigation District

FAN Leilei¹ SHI Haibin¹ LI Ruiping¹ MIAO Qingfeng¹ SUN Na¹ WANG Yanming²

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. Ulan Buh Irrigation Area Administration, Bayannur 015200, China)

Abstract: Irrigation performance in fields is an important factor for the yield and water use efficiency of crops. For the unreasonable field size in Hetao Irrigation District, the flow and performance change of irrigation water in fields were analyzed by irrigation experiments in different widths of fields in order to find proper technical factors of irrigation water in fields by model simulation and regression analysis. Results showed that the irrigation performance was poor with irrigation uniformity of only 59.78%~77.40% and 84.61%~87.02% when the width of fields was 18~23 m. Although water storage efficiency was 100%, the irrigation performance was still poor. When the width of fields was reduced to be 10~15 m, the irrigation efficiency was 70.20%~87.00% and irrigation uniformity was 86.77%~90.80%, which showed best irrigation performance. When the width of fields was reduced to be 5 m, the irrigation performance was deteriorated. A single objective optimization model included irrigation efficiency and irrigation uniformity and storage efficiency combined with the field experiment data was constructed through the combination of model simulation, uniform experiment design and multiple regression analysis. Through using the single wide flow and irrigation time as decision variables and solving the model by bubble sort method, the optimal combination of technical components of border irrigation was obtained, and the appropriate width of the field was further determined based on the actual flow in the demonstration area. The results provided theoretical support for the water-saving transformation design, effective utilization of water resources and agricultural sustainable development in irrigated areas.

Key words: Hetao Irrigation District; irrigation performance; border irrigation; SIRMOD model; single objective optimization model

收稿日期: 2019-03-01 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205-01)和国家自然科学基金项目(51769021、51539005、51839006)

作者简介: 范雷雷(1993—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: 624775767@qq.com

通信作者: 李瑞平(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: nmglrp@163.com

0 引言

畦灌作为当前河套灌区最主要的灌水方式之一,其灌水质量的评价始终是农田灌溉领域研究和关注的热点问题之一。国内外学者针对畦灌灌水质量的诸多影响因素进行了大量研究,并从多个角度解释和分析了各因素对灌水质量的影响^[1-6]。影响灌水质量的因素有很多,包括自然性能因素(土壤质地、入渗性能、糙率、作物种类以及种植方法等)和灌水技术要素(畦田长度、畦田宽度、灌水流量、微地形以及关口时间等),自然性能因素不易改变,因此大多数研究主要集中在灌水技术要素上,以往研究大多基于畦田长度、田面坡度、单宽流量等,存在一定局限性^[7-9]。河套灌区作为我国最大的引黄灌区之一,近年来随着大型灌区续建配套、节水改造、水权转换等项目的实施^[10-12],灌区农业生产条件发生了较大变化,灌区农田渠沟灌溉排水系统布置已经完善,农田长度已基本固定。因此,对灌区灌水质量的研究开始集中在畦田宽度上,畦田宽度、单宽流量以及关口时间之间的关系密不可分,确定最优畦田宽度成为灌区急需解决的现实问题之一。

本文在现有研究基础上,于2017—2018年间开展不同畦田宽度处理下的田间灌水试验,分析其水流运动状态及灌水质量变化情况,采用SIRMOD模型模拟^[13-14]、均匀试验设计和多元回归分析相结合的方法^[15-17],构建包含灌水效率、灌水均匀度以及储水效率在内的单目标优化模型,以单宽流量和灌水时间为变量,采用Java语言中冒泡排序法对其模型进行求解,寻求试验区域内最优畦灌灌水技术要素组合,进而确定灌区最优畦田宽度,为河套灌区农业水资源的合理利用与农业生态可持续发展提供理论依据。

1 试验区概况

试验在河套灌区巴彦淖尔市临河区双河镇进步村农业综合节水示范区进行,属中温带大陆性季风气候,昼夜温差大,热量丰富,光照充足,无霜期短,四季分明。该地区年平均降水量188 mm,与降水量相比,年平均蒸发量却高达2 032~3 179 mm,普遍为降水量的10~30倍,图1为示范区部分气象资料。

2 材料与方法

2.1 试验设计

根据示范区灌溉渠系布置现状,毛渠间距大多在90~100 m,双向灌水,因此畦田长度为45~50 m^[18]。

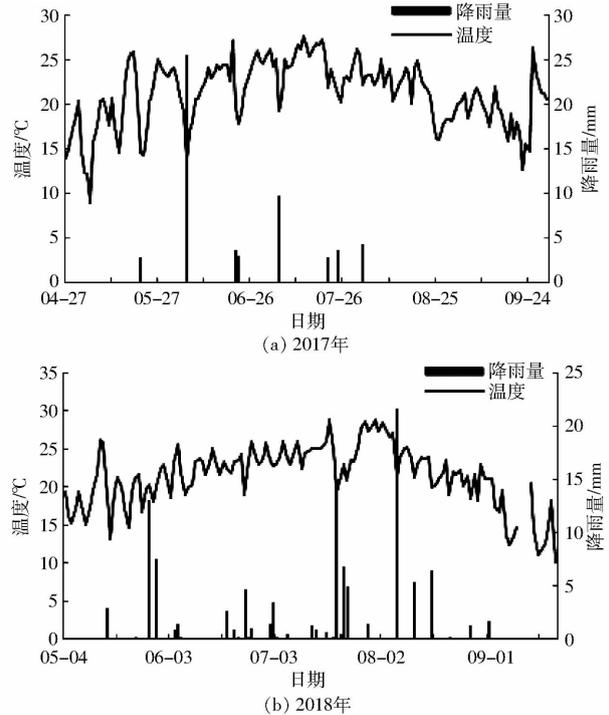


图1 玉米生育期内降雨量及温度变化

Fig.1 Changes of precipitation and temperature in growth period of maize

采用田间对比试验方法,结合渠系布置现状将畦田长度与畦田宽度按照2:1、2.5:1、3:1、4.5:1、9:1分为5种处理,具体布置畦田长度均为45 m,畦田宽度分别为23、18、15、10、5 m。根据白美健等^[9]研究成果可知,前3个处理为宽畦,后2个为条畦,为忽略由于畦田宽度增加导致的入畦水流扩散状况,提高入畦水流状态,使其水流分布相对均匀,本研究在宽畦处理灌水时采用条形入流灌溉的方法,即沿畦田宽度均布2~3个人水口,满足灌溉水在田块内的均匀分布。项目区种植作物为玉米,品种为钧凯918号,全生育期140 d左右,种植密度为6.75株/m²,出苗率均达到90%以上。播种时施足底肥,其中磷酸二铵和钾肥按照4:1混合施入,化肥施用量750 kg/hm²,并且在第一次灌水时追加磷酸二铵375 kg/hm²。播种前对试验田进行了激光平地,平整度由平地前的4.13 cm提高到了1.50 cm,平地效果显著。其他田间管理水平与当地水平相同。

按照网格试验设计,沿畦田长度方向(畦首、畦中、畦尾)设置5个取样点,每隔10 d采用干燥法测定土壤含水率,灌水以及降雨前后加测,玉米全生育期共灌水3次。结合郑和祥等^[5]试验设计,沿畦田长度方向每隔5.0 m设置1个观测点,沿畦田宽度方向在每1/3处设一系列观测点,以各观测点为中心记录测点水流推进与消退过程,其周围90%范围内的水流推进与消退完成,则认为该测点的水流推进与消退完成,观测水流推进与消退时间,结果取各个

测点所测时间平均值;入畦水量通过梯形量水堰监测,畦首处水深通过水尺测定,灌水时间用秒表确

定。研究区土壤物理性质和畦田灌水基本参数如表1、2所示。

表1 试验田各土层土壤容重、饱和含水率以及田间持水率

Tab.1 Soil bulk density, saturated moisture content and field water capacity in each soil layer of experimental plots

土层深度/ cm	颗粒质量分数/%			土壤类型	土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	田间持水率/ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
	粘粒	粉粒	砂粒				
	(0~0.002 mm)	(0.002~0.05 mm)	(0.05~2 mm)				
0~20	7.46	84.40	8.14	粉土	1.451 9	0.298 0	0.223 5
20~40	87.18	12.76	0.06	黏土	1.392 0	0.348 6	0.261 4
40~60	14.65	81.43	3.92	粉质壤土	1.378 9	0.355 1	0.266 3
60~80	3.10	78.13	18.77	粉质壤土	1.426 0	0.377 9	0.283 5
80~100	2.36	57.81	39.83	粉质壤土	1.482 8	0.323 5	0.242 6
100~120	12.20	87.80	0	粉质壤土	1.420 0	0.335 7	0.251 8

表2 畦灌基本参数

Tab.2 Parameters of border irrigation

编号	畦田宽度/ m	灌水轮次	2017年			2018年		
			灌水日期	灌水定额/ mm	单宽流量 q / ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	灌水日期	灌水定额/ mm	单宽流量 q / ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
A	23	第1水	06-19	92	1.17	06-11	99	0.57
		第2水	07-03	84	1.01	07-08	77	0.52
		第3水	07-28	87	1.11	08-06	78	0.62
B	18	第1水	06-19	90	1.00	06-11	97	0.62
		第2水	07-03	73	1.04	07-08	74	0.61
		第3水	07-28	84	1.23	08-06	79	0.83
C	15	第1水	06-19	86	0.86	06-11	94	0.81
		第2水	07-03	72	0.66	07-08	75	0.87
		第3水	07-28	80	1.34	08-06	79	1.06
D	10	第1水	06-19	86	1.78	06-11	94	1.32
		第2水	07-03	70	1.80	07-08	73	1.26
		第3水	07-28	77	2.13	08-06	77	1.20
E	5	第1水	06-19	81	3.20	06-11	89	2.76
		第2水	07-03	64	2.43	07-08	73	2.57
		第3水	07-28	74	4.09	08-06	78	2.07

2.2 研究方法

2.2.1 灌水质量评价指标

本文采用灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 和储水效率 E_s 评价灌水质量^[19], 计算式为

$$E_a = \frac{Z_n}{Z_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_u = \frac{Z_i}{Z_u} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_s = \frac{Z_i}{Z_{reg}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 Z_n ——作物根系贮水层内平均增加水深, mm

Z_a ——试验田平均灌水水深, mm

Z_i ——灌溉水入渗量最小的 1/4 田块内的平均入渗水深, mm

Z_u ——平均入渗水深, mm

Z_{reg} ——计划需水水深, mm

2.2.2 土壤入渗参数估算

土壤入渗参数的准确确定是进行地面灌溉灌水质量评价和灌溉制度优化的重要前提, 国内外学者对土壤入渗参数进行了大量的探讨和研究并提出了很多计算方法, 但大多存在工作量大, 所需试验数据过多等缺点。鉴于此现状, 本研究采用 SIRMOLD 模拟模型, 在田间实测水流推进数据的基础上, 采用水量平衡方程, 实现对 Kostiakov-Lewis 公式中土壤入渗参数的逆向计算, 进而求得土壤入渗系数 k 和入渗指数 α , 结果如表3所示。

入渗参数的估算采用 Kostiakov-Lewis 方程进行描述

$$I = kt^\alpha + f_0 t \quad (4)$$

式中 I ——累计入渗量, cm

表3 畦田入渗参数
Tab.3 Field infiltration parameters

试验地点	作物	畦田长度/ m	田面坡度/ %	田面糙率	畦田编号	畦田宽度/ m	入渗参数	
							$k/(cm \cdot min^{-\alpha})$	α
临河酒庄	玉米	45	0.111 6	0.16	A	23	0.612 4	0.414 9
					B	18	0.637 1	0.606 6
					C	15	0.599 0	0.471 0
					D	10	0.553 2	0.366 3
					E	5	0.824 7	0.315 7

t ——入渗时间, min

f_0 ——稳定入渗率, cm/min , 为延续之前郑和祥等^[5]所做的相关河套灌区入渗参数的研究成果, 本次试验 f_0 取 0

2.2.3 单目标优化模型

单宽流量以及灌水时间对灌水质量影响明显, 已有研究大多是在其他条件不变的情况下进行的, 未考虑各要素间的交互影响, 局限性很大。结合河套灌区的实际情况, 畦田长度、田面坡度等田面参数通常已由农田实际情况确定, 渠道水量由配水部门协调分配, 并且灌区毛渠大多仍为土渠, 渠道持水能力一般, 近 2 年监测入田流量约为 30 ~ 40 L/s, 因此, 仅能对单宽流量 q 和灌水时间 t 进行优化, 进而提高灌水质量。故本文以单宽流量 q 和灌水时间 t 作为决策变量, 采用 SIRMOD 模型模拟与多元回归分析相结合的方法, 构建包含灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 以及储水效率 E_s 之间的单目标优化模型, 采用 Java 语言中的冒泡排序法对模型进行求解。

单目标优化模型为

$$\max Y(q, t) = aE_a(q, t) + bD_u(q, t) + cE_s(q, t) \quad (5)$$

其中 $a + b + c = 1$
式中 $Y(q, t)$ ——目标函数, 其值在 0 ~ 100% 之间
 a, b, c ——权重系数, 取 $a = b = c = 1/3$

待求灌水技术要素约束条件为

$$\begin{cases} q_{\min} \leq q \leq q_{\max} \\ t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中 q_{\min} ——最小单宽流量, $L/(m \cdot s)$

q_{\max} ——最大单宽流量, $L/(m \cdot s)$

t_{\min} ——最小灌水时间, min

t_{\max} ——最大灌水时间, min

考虑研究区畦灌的实际情况, 对单宽流量 q 和灌水时间 t 取值范围为

$$\begin{cases} 1 L/(m \cdot s) \leq q \leq 4 L/(m \cdot s) \\ 10 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min} \end{cases} \quad (7)$$

3 结果与分析

3.1 水流推进与消退

图 2 和图 3 分别为 2017、2018 年不同处理的水流推进和水流消退曲线。从图中可以看出, 各处理近 2 年灌溉情况基本相同且变化规律一致, 从水流推进来看, 从畦首到畦尾不同畦田宽度处理水流推进时间为 25 ~ 70 min, 水流消退时间变化范围在 150 ~ 550 min 之间, 并且当畦田宽度越小时, 水流推进越快, 反之水流推进越慢; 对于水流消退曲线, 各处理之间变化幅度较大, 当畦田宽度在 18 ~ 23 m 时, 畦首和畦尾消退时间差异不大, 畦首位置消退时间较畦尾略长; 当畦田宽度在 5 ~ 15 m 时, 畦首消退时间较短而畦尾消退时间较长, 这主要是由于当畦田宽度较大时, 灌水时间延长, 畦首始终聚集大量灌溉水, 导致消退减慢, 而当畦田宽度越小时灌溉水快速推进至畦尾并且大量聚集, 导致畦尾入渗时间增加, 而此时畦首水量不足, 入渗时间缩短, 灌水不均匀。

3.2 灌水质量评价

图 4 为不同畦田宽度处理下 2017、2018 年两年灌溉质量评价指标变化情况。从图中可以得出, 2017 年各处理(畦田宽度分别为 23、18、15、10、5 m)的灌水效率 E_a 在 62.70% ~ 87.00% 之间, 灌水均匀度 D_u 在 76.50% ~ 90.50% 之间, 储水效率 E_s 在 87.80% ~ 100% 之间; 2018 年各处理的灌水效率 E_a 在 59.78% ~ 79.90% 之间, 灌水均匀度 D_u 在 82.70% ~ 90.80% 之间, 储水效率 E_s 在 83.40% ~ 100% 之间。分析两年数据可以发现, 当畦田宽度为 18 ~ 23 m 时, 灌水效率 E_a 仅有 59.78% ~ 77.40%, 灌水均匀度 D_u 在 84.61% ~ 87.02% 之间, 尽管此时储水效率 E_s 为 100%, 但其灌水效果仍然较差, 原因是畦田宽度较大, 导致相对入畦单宽流量减小, 水流推进减慢, 推进过程中深层渗漏增加, 灌水效率降低。随着畦田宽度的缩小, 灌水效果越来越好, 当畦田宽度缩小到 10 ~ 15 m 时, 此时灌水效率和灌水均匀度分别为 70.20% ~ 87.00%、86.77% ~ 90.80%, 灌水效果最好; 而当畦田宽度继续缩小到

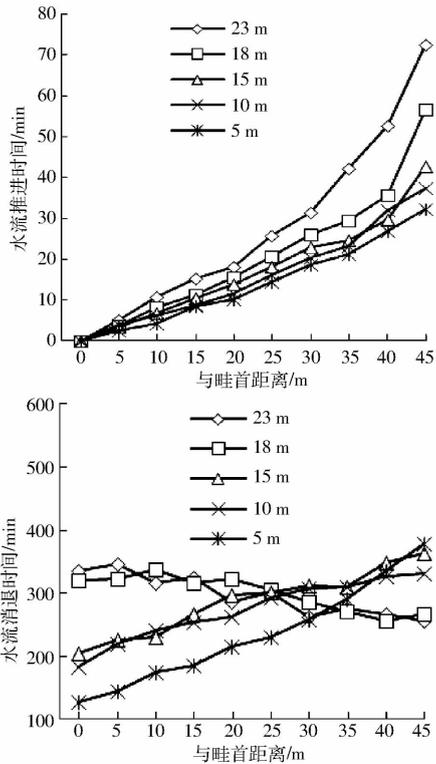


图 2 2017 年不同处理水流推进和回流消退曲线
Fig. 2 Water advance and recession curves in 2017

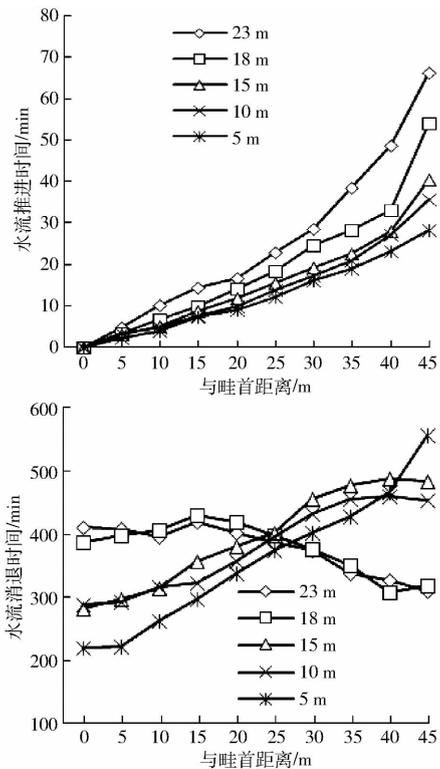


图 3 2018 年不同处理水流推进和回流消退曲线
Fig. 3 Water advance and recession curves in 2018

5 m 时,此时灌水效率、灌水均匀度以及储水效率均会有一定程度降低,原因是随着畦田宽度的缩小,相对入畦单宽流量增加,水流快速推进至畦尾,且大量灌溉水聚集在畦尾,造成畦尾入渗水深增加,深层渗漏严重,而此时畦首由于灌水量不足,入渗水深减少,故灌

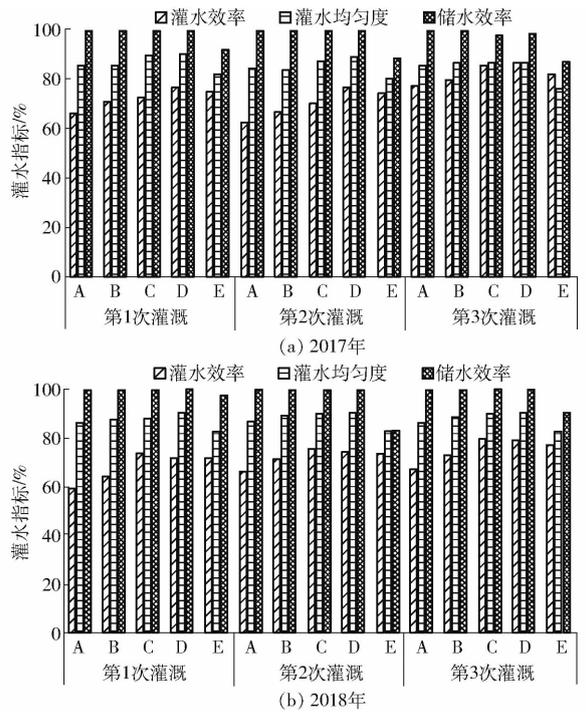


图 4 灌水质量评价指标变化

Fig. 4 Irrigation quality evaluation indexes

水效率、灌水均匀度、储水效率均有一定程度降低。

3.3 灌水质量模拟与回归分析

采用 SIRMOLD 模型对各灌水技术要素进行模拟,模型中所需参数采用示范区实际参数(畦田长度 45 m,坡度 0.111 6%,计划灌水深度 80 mm),入渗参数取示范区均值,其中 $k = 0.645 28 \text{ cm}/\text{min}^\alpha$, $\alpha = 0.434 9$,结合河套灌区实际情况以及已有研究成果,单宽流量 q 取值范围在 $1 \sim 4 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 之间,灌水时间 t 变化范围在 $10 \sim 60 \text{ min}$ 之间,将上述两因素均分设计,如表 4 所示。

表 4 试验设计方案与灌水质量模拟结果

Tab. 4 Test design and irrigation quality simulation

编号	因素		灌水质量		
	单宽流量 $q/$ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	灌水时间 t/min	$E_a/\%$	$D_u/\%$	$E_s/\%$
1	1.0	60	99.6	80.4	89.6
2	1.2	48	99.0	79.0	89.1
3	1.4	56	79.4	84.2	100
4	1.6	44	90.2	81.4	97.4
5	1.8	28	99.2	77.1	83.6
6	2.0	34	92.1	81.2	96.7
7	2.2	50	60.6	87.2	100
8	2.4	42	61.7	86.6	100
9	2.6	31	73.3	84.4	100
10	2.8	27	79.4	84.8	100
11	3.0	25	88.1	82.8	99.1
12	3.2	38	52.1	88.3	100
13	3.4	23	78.4	83.9	100
14	3.6	20	91.1	82.6	98.4
15	3.8	22	70.2	86.4	100
16	4.0	21	66.7	85.2	100

为了分析单宽流量 q 与灌水时间 t 对灌水质量的影响,本研究通过 SAS 分析软件对表 4 中的灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 以及储水效率 E_s 进行多元回归分析,以单宽流量 q 和灌水时间 t 作为自变量建立多元回归模型,回归结果为

$$\begin{cases} E_a = 124.40 + 12.84q + 0.01t - 2.30q^2 - 0.82qt + 0.003t^2 \\ D_u = 33.80 + 17.58q + 0.91t - 1.83q^2 - 0.08qt - 0.005t^2 \\ E_s = -99.37 + 80.83q + 4.85t - 8.76q^2 - 0.86qt - 0.033t^2 \end{cases} \quad (8)$$

采用式(8)计算得到的灌水效率 E_a 、灌水均匀

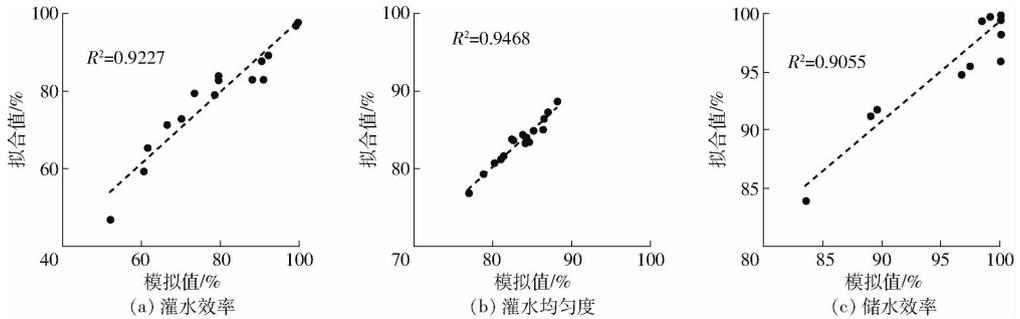


图5 灌水质量拟合值与模拟值关系

Fig. 5 Relationship diagram of irrigation quality fitting value and analog value

为确定获得最大灌水质量时的单宽流量以及灌水时间,采用 Java 语言中的冒泡排序法对方程组进行求解,得到最优的灌水技术要素组合为 $q = 2.81 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 、 $t = 21.21 \text{ min}$ 。

将所求参数代入式(8)、(9)中,可得 $E_a = 95.00\%$ 、 $D_u = 81.02\%$ 、 $E_s = 94.96\%$ 、 $Y(q, t) = 90.32\%$;同时将所求参数代入 SIRM0D 模型软件中

度 D_u 以及储水效率 E_s 与 SIRM0D 模型模拟值具有较高的一致性(图5),决定系数 R^2 分别为 0.9227、0.9468、0.9055,说明模型可靠。

理想灌水质量应该是灌水效率、灌水均匀度以及储水效率都达到最大值,将式(8)代入式(5),建立单目标优化模型

$$\begin{cases} \max Y(q, t) = 19.61 + 37.09q + 1.92t - \\ 4.30q^2 - 0.59qt - 0.01t^2 \\ 1 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s}) \leq q \leq 4 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s}) \\ 10 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min} \end{cases} \quad (9)$$

求得 $E_a = 92.4\%$ 、 $D_u = 81.3\%$ 、 $E_s = 97.4\%$ 。

由上文可知,示范区入田流量为 30~40 L/s,已知最优单宽流量 $q = 2.81 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$,故初步确定此时最优畦田宽度为 10.7~14.2 m,与实测分析结果近乎一致。同理,对于河套灌区更具广泛意义的典型灌水技术参数优化组合同样可以采用相同的方法确定,结果见表5。

表5 河套灌区典型灌水技术参数优化组合

Tab. 5 Optimized combination of typical irrigation technical parameters in Hetao Irrigation District

土壤性质*	畦田长度*/ m	入渗参数*		灌水技术要素优化组合		本文方法灌水质量计算值			
		$k/$ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-\alpha}$)	α	单宽流量 $q/$ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	灌水时间 t/min	$E_a/\%$	$D_u/\%$	$E_s/\%$	$Y(q, t)/\%$
高渗透土壤	70	0.51	0.411 3	5.48	29.92	99.89	100	97.46	99.12
中渗透土壤	50	0.45	0.507 7	2.98	17.94	94.99	79.03	94.98	89.67
低渗透土壤	50	0.42	0.485 7	2.95	14.09	94.98	71.83	94.99	87.27

注:*为河套灌区典型田面参数,选用 MIAO 等^[20-21]研究成果确定。

4 讨论

采用 SIRM0D 模型模拟、均匀试验设计以及多元回归分析相结合的方法,将单宽流量 q 以及灌水时间 t 作为决策变量,构建了包含灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 以及储水效率 E_s 在内的单目标优化模型,通过 Java 语言中的冒泡排序法求解示范区内最优灌水技术要素组合,参考 MIAO 等^[20-21]关于河套灌区典型田面参数,本研究进一步确定了高、中、低3种渗透土壤下单宽流量 q 与灌水时间 t 的最优组

合,但由于灌区渠灌系统复杂,入田流量各不相同,故不同土壤入渗速率下适宜畦田宽度需根据当地实际流量确定。此外在确定适宜灌溉技术要素时并未考虑农业机械、劳动成本等因素影响,结果仍需进一步研究。

5 结论

(1)通过开展田间试验了解了不同畦田宽度处理下的水流运动情况,分析了不同畦田宽度对灌水质量的影响。结果表明,畦田宽度较大时灌水质量

整体不佳;适当缩小畦田宽度到 10 ~ 15 m 时,能明显提高灌水质量;当继续缩小畦田宽度时,灌水质量反而会有所降低。

(2) 结合田间实测资料,采用 SIRMOD 模型模拟、均匀试验设计以及多元回归分析相结合的方法,构建了包含灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 以及储水效

率 E_s 在内的单目标优化模型,将单宽流量 q 以及灌水时间 t 作为决策变量,采用 Java 语言中冒泡排序法对模型进行求解,得到畦灌灌水技术要素的优化组合 $q = 2.81 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、 $t = 21.21 \text{ min}$,结合示范区实际入田流量,初步确定最优畦田宽度为 10.7 ~ 14.2 m。

参 考 文 献

- [1] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 基于土壤入渗参数空间变异性的畦灌灌水质量评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1):100-105.
NIE Weibo, FEI Liangjun, MA Xiaoyi. Evaluation of border irrigation performance based on spatial variability of infiltration parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):100-105. (in Chinese)
- [2] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 畦灌灌水技术要素组合优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1):83-88,107.
NIE Weibo, FEI Liangjun, MA Xiaoyi. Optimization for combination of irrigation technique element for border irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):83-88,107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.016. (in Chinese)
- [3] 陈琳, 费良军, 傅渝亮, 等. 地下水浅埋下层状土壤波涌畦灌间歇入渗模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):314-324.
CHEN Lin, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. Intermittent infiltration model of surge border irrigation in layered soil under groundwater[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):314-324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181237&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.037. (in Chinese)
- [4] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 土壤入渗特性和田面糙率的变异性对沟灌性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1):108-114.
NIE Weibo, FEI Liangjun, MA Xiaoyi. Effects of spatial variability of soil infiltration characteristics and manning roughness on furrow irrigation performance [J/OL]. Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):108-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.018. (in Chinese)
- [5] 郑和祥, 史海滨, 程满金, 等. 畦田灌水质量评价及水分利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6):1-6.
ZHENG Hexiang, SHI Haibin, CHENG Manjin, et al. Analysis of irrigation efficiency and water use efficiency of border irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6):1-6. (in Chinese)
- [6] 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 考虑灌溉参数空间变异的区域畦灌模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9):1-9.
DONG Qinge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Simulation and validation for regional border irrigation considering spatial variability of irrigation parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9):1-9. (in Chinese)
- [7] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4):98-105.
LIANG Jiancai, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of mulching on salinized soil freezing and thawing characteristics and autumn irrigation quality[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):98-105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.015. (in Chinese)
- [8] 张展羽, 冯根祥, 冯海燕, 等. 微咸水膜孔沟灌土壤水盐分布与灌水质量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11):112-116.
ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, MA Haiyan, et al. Analysis of soil water-salt distribution and irrigation performance under brackish water film hole furrow irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):112-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.020. (in Chinese)
- [9] 白美健, 许迪, 李益农. 模拟微地形空间变异对畦灌系统影响的田间验证[J]. 水利学报, 2008, 39(7):801-808.
BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Field verification on simulation of microtopography spatial variability effect on basin irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7):801-808. (in Chinese)
- [10] 白美健, 许迪, 李益农. 水平畦田微地形空间变异性对灌溉系统的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(10):1194-1199.
BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Influence of microtopography spatial variability on horizontal border irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10):1194-1199. (in Chinese)
- [11] 白美健, 许迪, 李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. 水利学报, 2010, 41(6):732-738.
BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Effects of spatial variability of infiltration on basin irrigation performance under different microtopography conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6):732-738. (in Chinese)
- [12] 聂卫波, 马孝义, 幸定武, 等. 基于水量平衡原理的畦灌水流推进简化解析模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1):82-85.
NIE Weibo, MA Xiaoyi, XING Dingwu, et al. Simplified analytic model of border irrigation water movement based on water balance principle[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1):82-85. (in Chinese)

- [15] 牛永红, 韩枫涛, 陈义胜. 高温蒸汽松木颗粒富氢气化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 247-252.
NIU Yonghong, HAN Fengtao, CHEN Yisheng. Experimental study of high-temperature steam gasification of pine particles for hydrogen-rich gas[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 247-252. (in Chinese)
- [16] 吕鹏梅, 熊祖鸿, 王铁军, 等. 生物质流化床气化制取富氢燃气的研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(6): 758-764.
LÜ Pengmei, XIONG Zuhong, WANG Tiejun, et al. Biomass gasification in a fluidized bed to produce hydrogen rich gas [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(6): 758-764. (in Chinese)
- [17] 涂军令. 木屑/木屑炭高温水蒸气气化制备合成气研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
TU Junling. Production of synthesis gas by high temperature steam gasification of sawdust/sawdust-derived char[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012. (in Chinese)
- [18] AYDIN E S, YUCEL O, SADIKOGLU H. Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(2): 1105-1115.
- [19] NIPATTUMMAKUL N, AHMED I I, KERDSUWAN S, et al. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(21): 11738-11745.
- [20] 李琳娜. 生物质高温水蒸气气化制备富氢燃气的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
LI Linna. Preparation of hydrogen rich gas high temperature steam gasification biomass research [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011. (in Chinese)
- [21] DEVI L, PTASINSKI K J, JANSSEN F J J G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes[J]. Biomass & Bioenergy, 2003, 24(2): 125-140.
- [22] 徐恒泳, 孙希贤, 范业梅, 等. 甲烷、二氧化碳转化制合成气的研究: I. 催化剂及其催化性能[J]. 石油化工, 1992(3): 147-153.
XU Hengyong, SUN Xixian, FAN Yemei, et al. Studies of reforming methane with carbon dioxide to produce synthesis gas: I. catalyst and its catalytic property[J]. Petrochemical Technology, 1992(3): 147-153. (in Chinese)

(上接第 321 页)

- [13] 郑和祥, 史海滨, 朱敏, 等. 基于 SIRMOD 模型的畦灌入渗参数估算及灌溉模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 29-34.
ZHENG Hexiang, SHI Haibin, ZHU Min, et al. Estimation of infiltration parameters for border irrigation based on SIRMOD method and modelling of border irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 29-34. (in Chinese)
- [14] AKBARI M, GHEYSARI M, MOSTAFAZADEH-FARD B, et al. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 46-57.
- [15] MIRZAEI A, ASHRAF S S A, NAZEMI A. Determine values the influence of water in irrigation furrows with using models SIRMOD and Hydrus2-D[J]. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 6(4): 287-296.
- [16] WU D, XUE J, BO X, et al. Simulation of irrigation uniformity and optimization of irrigation technical parameters based on the SIRMOD model under alternate furrow irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(4): 478-491.
- [17] 魏永霞, 汝晨, 吴昱, 等. 黑土区水稻光合物质生产特性对耗水过程的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 263-274.
WEI Yongxia, RU Chen, WU Yu, et al. Response of photosynthate production characteristics of rice to water consumption process in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 263-274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190129&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.029. (in Chinese)
- [18] 白寅祯, 魏占民, 张健, 等. 基于 WinSRFR 软件的河套灌区水平畦田规格的优化[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 823-828.
BAI Yinzhen, WEI Zhanmin, ZHANG Jian, et al. WinSRFR software-based optimization of horizontal border patch size in Hetao irrigation district[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 823-828. (in Chinese)
- [19] 缴锡云, 王维汉, 王志涛, 等. 基于田口方法的畦灌稳健设计[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 349-354.
JIAO Xiyun, WANG Weihang, WANG Zhitao, et al. Robust design of border irrigation based on the Taguchi method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3): 349-354. (in Chinese)
- [20] MIAO Q F, SHI H B, GONCALVES J M, et al. Field assessment of basin irrigation performance and water saving in Hetao, Yellow River basin: issues to support irrigation systems modernisation[J]. Biosystem Engineering, 2015, 136: 102-116.
- [21] MIAO Q, SHI H, GONCALVES J M, et al. Basin irrigation design with multi-criteria analysis focusing on water saving and economic returns: application to wheat in Hetao, Yellow River basin[J]. Water, 2018, 10(1): 67.