

河套灌区畦灌灌水方案优化与敏感性分析

范雷雷¹ 史海滨¹ 李瑞平¹ 苗庆丰¹ 裴文武² 华智敏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. 内蒙古河套灌区管理总局, 巴彦淖尔 015000;
3. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 呼和浩特 010020)

摘要: 针对河套灌区宽畦田、大畦块导致的灌水效率低的问题, 为探求变化环境下适宜的畦灌技术参数, 在河套灌区沈乌灌域典型试验基础上, 采用不同灌溉设计方案对典型砂土较大田块(长×宽为80 m×25 m)灌水质量进行评价, 并在 WinSRFR 模型模拟基础上分析不同参数对最佳方案灌水质量指标的敏感性变化情况。结果表明: 砂土畦田规格(80 m×25 m)较大时农田灌水效果较差, 在中等流量(入畦流量 $Q=20\text{ L/s}$ 、单宽流量 $q=0.80\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$)水平下, 减少尾部25%的田间面积(改水成数从1.0降低至0.75)可节省40%的灌水时间, 并可减少16%的灌溉水在水流推进过程中的渗漏损失。采用田块规格+灌水时间设计方案后灌水效果较典型田块得到显著改善, 垂直分割田块(80 m×12.5 m)在较大流量水平(Q 为26~30 L/s、 q 为2.08~2.40 L/(m·s))下灌水效率从67%~80%提升至97%~99%, 灌水均匀度从0.59~0.79提高至0.84~0.95, 储水效率从1.17降低至0.76, 并且可以节省当前灌水时间的20%以上, 中等流量($Q=20\text{ L/s}$ 、 $q=1.60\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$)下在获得更优灌水质量的同时可以节省40%的灌水时间, 节水效果显著。不同参数对灌水质量评价指标具有相同的变化规律, 计划需水水深对灌水质量影响明显, 极小单宽流量情况下灌水质量受田面坡度、畦田长度影响较小。建议灌区采用的砂土畦田规格为80 m×12.5 m, 并且可根据实际不同来水流量选择所需的最佳单宽流量和灌水时间组合。

关键词: 河套灌区; 畦灌; 灌水质量; 敏感性; WinSRFR 模型

中图分类号: S275.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0280-11 OSID: 

Optimization and Sensitivity Analysis of Border Irrigation Performance in Hetao Irrigation District

FAN Leilei¹ SHI Haibin¹ LI Ruiping¹ MIAO Qingfeng¹ PEI Wenwu² HUA Zhimin³

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. Inner Mongolia Hetao Irrigation District Administration, Bayannur 015000, China
3. Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Inner Mongolia, Huhhot 010020, China)

Abstract: Aiming at the problem of low irrigation efficiency caused by wide border fields and large blocks in the Hetao Irrigation District, in order to explore suitable technical parameters of border irrigation under changing conditions, based on the typical experiments of Shenwu Irrigation Area in Hetao Irrigation District, different irrigation design schemes were used to compare typical sandy soils. The irrigation quality of the field block (length×width was 80 m×25 m) was evaluated, and the sensitivity changes of different variable parameters to the optimal irrigation performance indicators were analyzed on the basis of the WinSRFR model simulation. The results showed that when the size of the sand border field (80 m×25 m) was large, the irrigation effect was poor, and at the medium flow rate (into the border flow $Q=20\text{ L/s}$, single-width flow $q=0.80\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$), reducing the field area of the tail by 25% (ie: changing the water percentage from 1.0 to 0.75) can save 40% of the irrigation time, and reduce 16% of the irrigation water leakage loss during the flow of water. After adopting the improved field size, irrigation time and irrigation design scheme, the irrigation effect was significantly improved compared with the

收稿日期: 2020-10-16 修回日期: 2020-11-27
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205)、国家自然科学基金项目(51769021、51539005、51839006)和内蒙古自治区科技计划项目(201602049)
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: 史海滨(1961—),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: shi_haibin@sohu.com

typical field. The vertically divided field (80 m × 12.5 m) was at a larger flow level (Q was 26 ~ 30 L/s, q was 2.08 ~ 2.40 L/(m·s)), irrigation efficiency was increased from 67% ~ 80% to 97% ~ 99%, irrigation uniformity was increased from 0.59 ~ 0.79 to 0.84 ~ 0.95, water storage efficiency was decreased from 1.17 to 0.76, and it can save more than 20% of the current irrigation time, and the medium flow rate ($Q = 20$ L/s, $q = 1.60$ L/(m·s)) can save 40% of the irrigation time while obtaining better irrigation performance, and the water saving effect was significant. Different variable parameters had the same changing law for the irrigation performance evaluation index. The planned water demand depth had a significant impact on the irrigation performance. The irrigation performance was less affected by the slope of the field and the length of the border in the case of a very small single-width flow. It was recommended that the sand border field size used in the irrigation area was 80 m × 12.5 m, and the best single-width flow rate and irrigation time combination can be selected according to the actual different incoming water flow rates. The research results can provide a theoretical basis for the sustainable development of border irrigation in the irrigation area.

Key words: Hetao Irrigation District; border irrigation; irrigation performance; sensitivity; WinSRFR model

0 引言

20 世纪 80 年代以来,随着全球性水危机的加剧,节水灌溉受到高度重视^[1-2]。2019 年中国水资源公报指出全国农业用水超 3 682 亿 m³,占全国总用水量的 61.2%,节水潜力巨大。节水优先考虑的是农业节水,同时农业节水也是农业现代化的重要抓手^[3],进一步说,农业节水也是山水林田湖草生命共同体健康发展的必要要求,农业节水及其生态环境效应应得到全社会的关注^[4]。

河套灌区是我国最大引黄灌区,同时也是北方重要的粮食基地之一^[5-6],随着灌区的快速发展和非农业用水的不断增长,水资源需求量不断上升^[7]。但黄河上游来水日趋减少,灌区年引水量逐年下降,水资源供需矛盾日益突出^[8]。灌区以畦灌为主要代表的田间灌水技术较发达国家有较大差距,灌溉水利用效率仅有 0.41,水资源浪费的同时严重制约了农业的可持续发展^[9-11]。随着灌区续建配套、节水改造、水权转换等一系列项目的实施^[12-14],灌区灌排渠道系统日益完善,畦田长度基本固定,但是宽畦田、大畦块仍是该地区畦田的主要特点,影响了灌水效率的进一步提高。由于灌区来水流量、来水时间及其持续时间的不确定性,对灌区农业生产带来诸多压力,这使得已有相关农业决策存在不足^[15-18],故需根据实际情况适当进行调整,以减轻不确定因素带来的不利影响。

田间灌溉设计和优化的研究,以往主要集中在固定供水流量的常规畦灌系统上^[19-21],而河套灌区引水流量不稳定。对此,本研究在典型畦灌试验基础上,利用 WinSRFR 模型模拟计算大、中、小入畦流量下不同畦田规格和灌水时间下的灌水效率、灌水均匀度和储水效率等指标。进而对不同方案畦田灌

溉性能进行评价优选,确定灌区适宜的田块布局和灌水设计方案,并在此基础上分析不同参数对最佳方案灌水质量的敏感性。以提高灌区黄河水分配效率,保证灌溉充足性,为灌区农业水资源高效利用发展提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县境内,地处河套灌区沈乌灌域中游,属典型的干旱温带大陆性季风气候;年均降雨量 142.1 mm,蒸发量超 2 300 mm,无霜期 130 d 左右。黄河水作为试验区灌溉的主要水源,水中泥沙含量大,pH 值约为 7.8,耕作层土壤盐分大多为氯化物-硫酸盐,典型试验区布设在沈乌灌域建设二分干渠管理所附近,土壤类型为砂土,平均容重为 1.586 g/cm³。

2 材料与方法

2.1 试验设计

本研究方案分析的目的是对实际农田现场布局和灌溉参数进行优化,以减少由于农渠来水流量变化造成的水资源浪费等问题。由内蒙古自治区水利厅 2018 年“内蒙古黄河干流水权盟市间转让河套灌区沈乌灌域试点现状评估报告”可知,沈乌灌域现状砂土 2 001 m²及以上畦田面积的地块占灌域砂土总灌溉面积的 57% 以上,结合灌域实际情况,本文选取当地典型砂土田块(80 m × 25 m)作为主要研究对象。并且在现有研究基础上,设计了 3 种灌溉方案:灌水时间设计方案;田块规格 + 灌水时间设计方案;田块规格 + 入畦流量设计方案。具体方案布置见图 1,其中 W 为畦田宽度,m; L 为畦田长度,m; Q 为入畦流量,L/s; T_w 为灌水时间,min。入畦流量是影响灌溉性能的主要因素之一,并且其大小在很

大程度上取决于毛渠流量和入田灌水闸门规格,根据灌区实际,灌溉期间入畦流量 Q 大多在 10 ~ 30 L/s 之间^[11],表 1 为模型模拟所需的 5 种不同入畦流量 (30 L/s (极大)、26 L/s (大)、20 L/s (中)、16 L/s (小)、10 L/s (极小)) 和对应的可能灌水时间 T_{co} 的参数组合。

表 2 为典型田块部分基本参数及灌水参数,玉米播种前对典型试验田进行了激光平地,沿畦长方向每隔 10 m 设置 2 ~ 4 个观测点用以观测水流推进

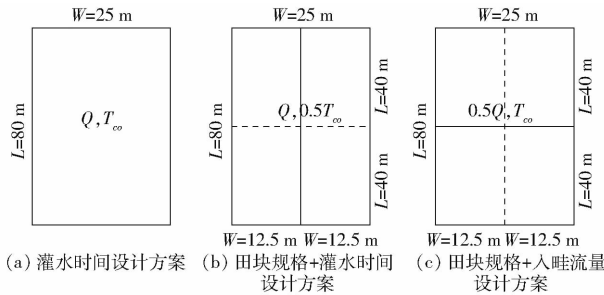


图 1 试验设计布置示意图
Fig. 1 Layout of experimental design

表 1 模型所需参数
Tab. 1 Parameters required for model

流量 水平	灌水时间设计方案				田块规格 + 灌水时间设计方案				田块规格 + 入畦流量设计方案			
	$S/$	$Q/$	$q/$	$T_{co}/$	$0.5S/$	$Q/$	$q/$	$0.5T_{co}/$	$0.5S/$	$0.5Q/$	$0.5q/$	$T_{co}/$
	(m × m)	(L · s ⁻¹)	(L · m ⁻¹ · s ⁻¹)	min	(m × m)	(L · s ⁻¹)	(L · m ⁻¹ · s ⁻¹)	min	(m × m)	(L · s ⁻¹)	(L · m ⁻¹ · s ⁻¹)	min
极大		30	1.20			30	1.20 (2.40)			15	0.60 (1.20)	
大		26	1.04	300、270、		26	1.04 (2.08)	150、135、		13	0.52 (1.04)	300、270、
中	80 × 25	20	0.80	240、210、	80 × 12.5	20	0.80 (1.60)	120、105、	80 × 12.5	10	0.40 (0.80)	240、210、
小		16	0.64	180、150、	40 × 25	16	0.64 (1.28)	90、75、	40 × 25	8	0.32 (0.64)	180、150、
极小		10	0.40	120		10	0.40 (0.80)	60		5	0.20 (0.40)	120

注: S 为畦田规格, q 为单宽流量。

表 2 典型田块基本参数及灌水参数
Tab. 2 Basic parameters and irrigation parameters of typical fields

土壤 质地	作物	$S/$ (m × m)	$S_0/ \%$	n	入渗参数		灌水 轮次	$D_{req}/$ mm	$Q/$ (L · s ⁻¹)	$q/$ (L · m ⁻¹ · s ⁻¹)	$T_{co}/$ min	灌水定额/ mm
					$k/$ (cm · min ^{-α})	$α$						
砂土	玉米	80 × 25	0.13	0.13	0.830 9	0.574 5	一水	114	27	1.08	210	170
							二水	106	22	0.88	300	198
							三水	110	24	0.96	250	180

注: S_0 为田面坡度; n 为田面糙率系数; k 为土壤入渗系数; $α$ 为土壤入渗指数; D_{req} 为计划需水水深, 模型模拟所需 D_{req} 为典型田块 3 次灌水需水水深均值, 即 $D_{req} = 110$ mm。

与消退。沿试验田畦长方向设置 5 个取样点, 每隔 10 d 测定土壤含水率, 灌水以及降雨前后加测。入畦水量通过梯形量水堰测得, 畦首处水深通过水尺测定, 灌水时间用秒表确定; 入渗参数的估算采用 Kostiaikov 方程进行描述^[22]。灌溉水量及其他田间管理措施与当地水平一致。

2.1.1 灌水时间设计方案

此方案设计主要是在当前典型畦田规格 (80 m × 25 m) 以及不同入畦流量 (30、26、20、16、10 L/s, 单宽流量 q 分别为 1.20、1.04、0.80、0.64、0.40 L/(m · s)) 下通过改变灌水时间 T_{co} (300、270、240、210、180、150、120 min) 分析灌水质量变化情况。

2.1.2 田块规格 + 灌水时间设计方案

该方案设计通过将现有畦田划分为两个相等尺寸的小畦田: 垂直分割 (80 m × 12.5 m) 或水平分割 (40 m × 25 m)。每个均分小畦田与典型大畦田均采用相同入畦流量, 灌水时间 T_{co} 在两个小畦田内均分设计, 即该灌溉方案灌水质量指标是在入畦流量 Q

为 30、26、20、16、10 L/s, 垂直分割 (80 m × 12.5 m) 田块单宽流量 q 分别为 2.40、2.08、1.60、1.28、0.80 L/(m · s), 水平分割 (40 m × 25 m) 田块单宽流量 q 分别为 1.20、1.04、0.80、0.64、0.40 L/(m · s) 和 $0.5T_{co}$ (150、135、120、105、90、75、60 min) 下获得的。

2.1.3 田块规格 + 入畦流量设计方案

此方案设计在典型田块中增加 1 个进水口, 保证入畦流量在两个垂直分割或者水平分割小畦田内均匀分配, 且每个小田块灌水时间均为 T_{co} , 即分析各个田块在 $0.5Q$ 为 15、13、10、8、5 L/s, 垂直分割 (80 m × 12.5 m) 田块单宽流量 q 分别为 1.20、1.04、0.80、0.64、0.40 L/(m · s), 水平分割 (40 m × 25 m) 田块单宽流量 q 分别为 0.60、0.52、0.40、0.32、0.20 L/(m · s) 和 T_{co} (300、270、240、210、180、150、120 min) 组合下的灌水质量变化情况。

2.2 研究方法

2.2.1 灌水质量评价指标

采用灌水效率 (AE)、灌水均匀度 (DU) 和储水

效率(AD)评价灌水质量^[23]。

2.2.2 WinSRFR 模型

采用零惯量(WinSRFR)模型对灌溉水水流运动进行模拟,基本方程表达式为

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_1 - S_f \tag{2}$$

式中 x ——水流推进距离,m
 h ——水深,m
 t ——关口时间,s
 Z ——累计入渗量,m
 τ ——净入渗时间,s
 y ——水流深度,m
 S_1 ——田面坡度,m/m
 S_f ——田面阻力坡降,m/m

当利用 WinSRFR 模型对试验灌水过程进行模

拟时,需要输入的参数有畦长、畦宽、畦尾开闭口情况、计划需水水深、土壤入渗参数(k 、 α)、田面糙率系数 n 、灌溉水量、入畦流量以及灌水时间等^[24-25],进而通过软件计算得出灌水质量模拟指标。

3 结果与分析

3.1 模型精度

图 2 为典型田块(80 m×25 m)分别通过田间实测以及 WinSRFR 模型模拟两种方法得到的 3 次灌水水流推进与消退曲线,从图中可以看出,两种方法得到的 3 次灌水水流推进时间的均方根误差(RMSE)分别为 8.11、13.89、7.73 min,水流消退时间的 RMSE 分别为 15.03、20.51、11.30 min;尽管这些误差对于其他畦田灌溉系统可能略有偏高,但是对于在本研究中的典型田块(砂土规格 2 000 m²左右,灌水时间 210~300 min)中误差是可以接受的。

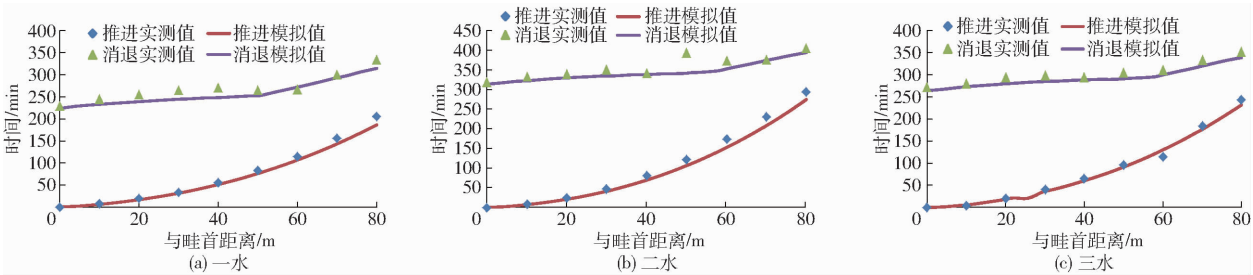


图 2 典型田块水流推进消退模拟与实测曲线

Fig. 2 Comparison of simulated and measured curves of water flow in typical fields

表 3 为典型田块 3 次灌水质量指标实测值与模拟值精度对比情况,从表中可以看出,两种方法得到的灌水效率(AE)、灌水均匀度(DU)和储水效率(AD)的相对误差不大于 4.84%、3.95%、5.00%,表明利用 WinSRFR 模型对灌水质量进行评价可行,结果可靠。并且在当地灌水条件下,由于畦田规格较大并且土壤入渗较快,使得水流推进过程中深层

渗漏损失增加,灌水时间延长,3 次灌水 AE 分别为 62%、52%、59%,DU 分别为 0.84、0.76、0.81,AD 分别为 1.26、1.40、1.34,灌水效果始终较差。

3.2 改进方案评价与优选

改进方案的优选是基于不同单宽流量水平下对不同灌溉设计方案灌水质量评价分析基础上进行的,尽管灌水质量评价时有多个指标,但参照 ARIF 等^[26]方法评价灌水质量,将最大权重分配给灌水均匀度,灌水均匀度不低于 0.7;其次尽可能控制储水效率,避免超量灌溉的发生,灌水效率和水流推进指标所占权重最低,这是由于它们受深层渗漏损失、表面粗糙度以及田面坡度影响较大,但由于土壤特性及灌区农田布置等现状因素影响使得灌水损失无法避免。

3.2.1 灌水时间设计方案

通过 WinSRFR 模型模拟典型田块(80 m×25 m)在现有单宽流量水平下通过改变灌水时间 T_w 可能获得的灌水质量指标,结果如表 4 所示。结果表明只有在较大单宽流量(Q 为 26~30 L/s、 q 为 1.04~1.20 L/(m·s))情况下,采用适当灌水时间(对应

表 3 典型田块灌水指标实测值与模拟值精度对比

Tab.3 Accuracy comparison between measured and simulated values of irrigation indicators in typical fields

参数		评价指标		
		AE/%	DU	AD
一水	实测值	62	0.84	1.26
	模拟值	67	0.87	1.29
	相对误差/%	4.84	3.57	2.38
二水	实测值	52	0.76	1.40
	模拟值	54	0.79	1.47
	相对误差/%	3.70	3.95	5.00
三水	实测值	59	0.81	1.34
	模拟值	61	0.79	1.30
	相对误差/%	3.39	-2.47	-2.99

T_{co} 分别不低于 210 min 和 150 min), 才能获得适宜的灌水均匀度(DU 大于等于 0.7), 此时灌溉水能填满整个田块, 但由于砂土入渗较大, 水流推进过程中渗漏损失偏大, 并且农民始终保持着“大水漫灌”的灌水习惯, 造成农田过度灌溉(AD 大于 1.0), 灌水效率 AE 普遍不高, 并且随着蓄水时间的延长, 畦尾聚集大量灌溉水, 渗漏损失增多, 灌水效率显著下降。该方案显示在中等和偏小单宽流量水平下, 改变灌水时间得到的灌水质量指标均较差, 并且可以看出, 在现有中等单宽流量 ($Q = 20\text{ L/s}$ 、 $q = 0.80\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$) 水平下减少尾部 25% 的畦田面积(改水成数从 1.0 减少至 0.75) 可节省 40% 的灌水时间, 使得水流推进过程中的渗漏损失较典型较大田块减少 16% 以上, 节水效果显著。

从表 4 可以看出, 在 $q = 1.04\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$ 、 $T_{co} = 210\text{ min}$ 和 $q = 1.20\text{ L/(m}\cdot\text{s)}$ 、 $T_{co} = 150\text{ min}$ 情况下可以获得最佳灌水方案, 该方案表明砂土较大田块灌溉时只有保持较大单宽流量情况下才能获得最佳灌水质量, 而在其他单宽流量水平下改变灌水时间难以获得较优的灌水效果。

3.2.2 田块规格 + 灌水时间设计方案

2 种畦田分割方式(垂直(80 m × 12.5 m) 和水平(40 m × 25 m)) 与不同灌水时间设计方案的畦田灌水质量指标结果在大、中、小不同入畦流量下具有相同的变化规律。由图 3 可以看出, 水平分割畦田灌水效果整体优于垂直分割畦田, 这是由于畦田长度的缩短, 使得田面水流分布更加均匀。并且只有在较大单宽流量水平下灌水均匀度较大, 这是由于在砂土土壤条件下, 增大单宽流量会减小畦首灌溉入渗水深, 使得入渗水深分布更加均匀, 灌水均匀度得到改善。

对比不同入畦流量水平下灌水指标可以发现, 较大流量(垂直和水平分割畦田 q 分别不低于 2.08、1.04 L/(m·s)) 水平下随着灌水时间的延长, 渗漏损失增加, 导致灌水效率逐渐降低, 当灌水时间大于 135 min 时, AE 不超过 50%, 渗漏损失超过总灌水量的 50% 以上, 但 DU 始终保持较高水平, 有利于土壤盐分淋洗及作物产量的形成。中等流量(垂直和水平分割畦田 q 分别为 1.60、0.80 L/(m·s)) 水平下, 当灌水时间大于 120 min 时, AE 不超过 70%, 渗漏损失占到总灌溉水的 30% 以上, 并且灌水时间低于 75 min 时, 灌溉水甚至不能充满整个田块。流量较小时(垂直和水平分割畦田 q 分别不超过 1.28、0.64 L/(m·s)), 缩短灌水时间会导致水流推进提前结束, 灌水深度达不到作物需水水深, 此时灌水效率随着灌水时间的缩短而增大, 灌水均匀度

表 4 典型田块灌水时间设计方案性能指标

Tab.4 Performance indicators of typical field irrigation time design schemes

变量			灌水质量			
$Q/$ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	$q/$ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$T_{co}/$ min	AE/ %	DU	AD	水流推进 指标系数
30	1.20	300	41	0.93	2.28	1.00
		270	45	0.93	2.05	1.00
		240	51	0.94	1.85	1.00
		210	58	0.99	1.69	1.00
		180	68	0.92	1.36	1.00
		150	80	0.74	0.91	1.00
		120	87	0.47	0.46	0.94
26	1.04	300	47	0.98	2.07	1.00
		270	52	0.97	1.85	1.00
		240	59	0.91	1.54	1.00
		210	67	0.79	1.17	1.00
		180	73	0.59	0.75	1.00
		150	80	0.38	0.40	0.91
		120	87	0.13	0.11	0.82
20	0.80	300	58	0.53	0.86	0.98
		270	61	0.43	0.63	0.93
		240	65	0.30	0.39	0.88
		210	69	0.15	0.17	0.83
		180	74	0.03	0.03	0.77
		150	81	0	0	0.71
		120	88	0	0	0.64
16	0.64	300	58	0.05	0.07	0.79
		270	61	0	0	0.75
		240	65	0	0	0.71
		210	69	0	0	0.67
		180	74	0	0	0.62
		150	80	0	0	0.57
		120	88	0	0	0.51
10	0.40	300	58	0	0	0.50
		270	62	0	0	0.47
		240	65	0	0	0.45
		210	69	0	0	0.42
		180	74	0	0	0.40
		150	81	0	0	0.36
		120	89	0	0	0.33

注:0 代表至少 1/4 田块地表没有灌溉水,下同。

和储水效率等灌水质量指标整体较差。对于大流量和极大流量水平,灌水时间为 60 min 时,两种畦田灌溉设计方案灌水质量最优;中等流量水平下,灌水时间为 90 min 时,灌水质量最优;对于小流量和极小流量,灌水时间不低于 135 min。

3.2.3 田块规格 + 入畦流量设计方案

垂直(80 m × 12.5 m) 和水平(40 m × 25 m) 分割田块在 0.5Q 和 T_{co} 灌溉设计方案的灌水质量模拟结果具有相同的变化规律并且各处理之间差异变化不显著,表 5 为不同田块规格和入畦流量设计方案情形下的灌水指标变化情况。对于每个小田块而言,尽管畦田规格缩小 1/2,但由于土壤入

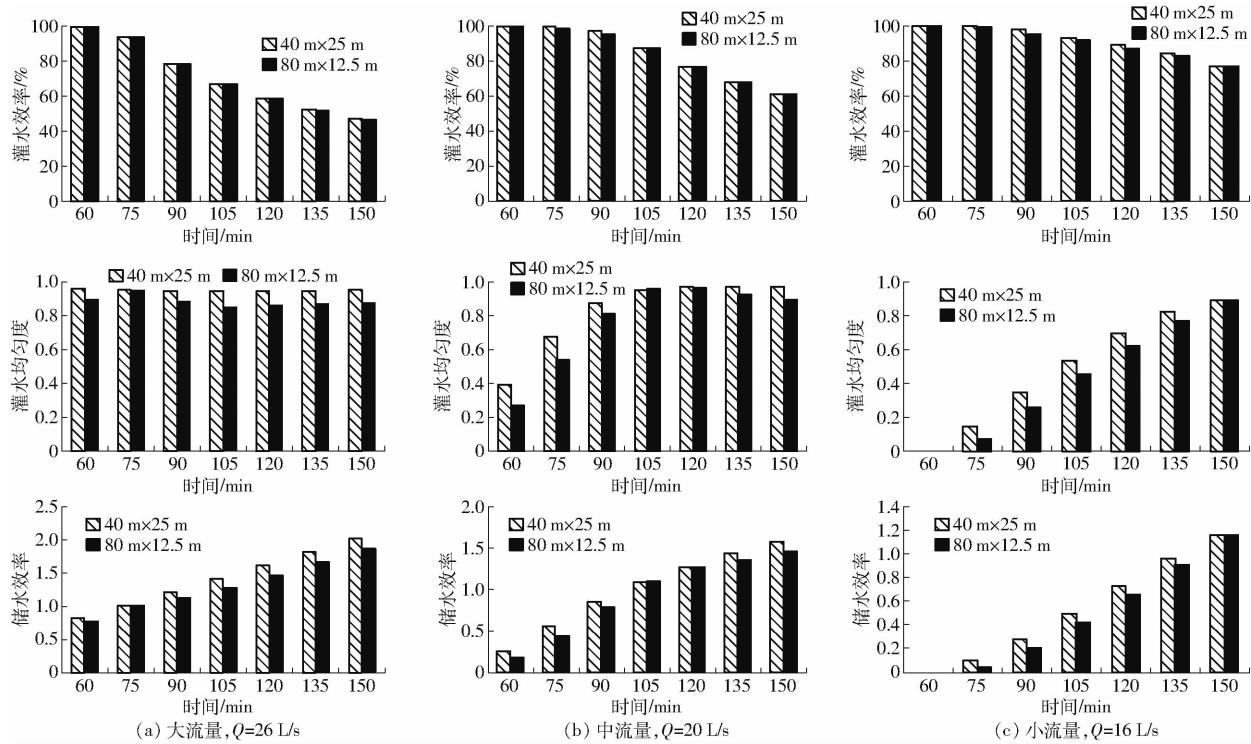


图 3 2 种畦田分割方案在不同流量水平下灌水质量指标变化情况

Fig. 3 Variations of irrigation quality indicators for two border field segmentation schemes under different border flow levels

渗较快,流量较小时,造成水流推进较慢, q 低于 $0.40\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$,灌溉水在有限时间内均不能充满整个田块,并且造成渗漏损失较大,为获得最佳灌水性能指标,需适当提高入畦单宽流量。并且从表中可以看出,极大流量 ($0.5Q = 15\text{ L/s}$,垂直和水平分割田块 q 分别为 1.20 、 $0.60\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 水平下灌水时间为 150 min ,以及大流量 ($0.5Q = 13\text{ L/s}$,垂直和水平分割田块 q 分别为 1.04 、 $0.52\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 水平下灌水时间为 210 min 时,灌水质量达到最优,此时灌水均匀度大于 0.7 ,有效避免农田过度灌溉,节水效果显著。

3.2.4 最佳方案优选

表 6 为 3 种设计方案在不同流量水平下获得最佳灌水效果时的单宽流量和灌水时间的灌水组合推荐值及其对应的灌水质量指标结果,从表中可以看出,田块规格 + 灌水时间设计方案能产生更高的灌水质量指标值,结合毛渠来水流量实际大小,根据田块规格选择适宜的灌水时间可以获得最佳灌水性能。图 4 对比了在 3 种灌溉设计方案下入畦流量 Q 和灌水时间 T_w 最佳组合对应的灌水质量指标变化情况。显然,与其他灌溉设计方案相比,灌水效率、灌水均匀度以及储水效率在田块规格 + 灌水时间设计方案中得到了显著改善。结合实际情况可知,水平分割田块时为保证同时进行灌溉需要开挖一条新的灌水渠道,但是新型毛渠的常年维修会造成农民种植成本的增加,并且渠道输水过程中的渗漏损失

不可忽略不计,因此,综合考虑灌区现状灌溉水平暂时不考虑水平分割畦田的灌溉设计方案,只分析垂直分割畦田相关内容。

与典型较大田块 ($80\text{ m}\times 25\text{ m}$) 灌水时间设计方案未能实现所有灌水质量指标的可接受组合不同,垂直分割田块 ($80\text{ m}\times 12.5\text{ m}$) 的 3 个灌水质量指标在较大单宽流量水平 (Q 为 $26\sim 30\text{ L/s}$ 、 q 为 $2.08\sim 2.40\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 下具有良好表现,灌水效率从 $67\%\sim 80\%$ 提升至 $97\%\sim 99\%$,灌水均匀度从 $0.59\sim 0.79$ 提高至 $0.84\sim 0.95$,储水效率从 1.17 降低至 0.76 ,并且至少可以节省当前灌水时间的 20% 以上,中等单宽流量 ($Q = 20\text{ L/s}$ 、 $q = 1.60\text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 情况下在获得更优灌水质量的同时可以节省 40% 的灌水时间,节水效果显著。

3.3 敏感性分析

为确定不同流量水平下改变设计参数对最佳畦田布置方案 ($80\text{ m}\times 12.5\text{ m}$) 灌水指标的敏感性变化情况,明确不同变量因素对灌水质量的影响规律,通过 WinSRFR 模型模拟分析了计划需水水深、田面坡度以及畦田长度等变量因素对灌水质量指标的影响。不同变量参数如下:计划需水水深为 60 、 70 、 80 、 90 、 100 、 110 、 120 、 130 mm ,田面坡度为 0.05% 、 0.10% 、 0.15% 、 0.20% 、 0.25% 、 0.30% 、 0.35% 、 0.40% 、 0.45% 、 0.50% ,畦田长度为 50 、 70 、 90 、 110 、 130 、 150 m 。大、中、小单宽流量水平下不同参数对灌水质量的敏感性分析如图 5 所示。

表 5 田块规格 + 入畦流量设计方案灌水质量指标对比

Tab. 5 Comparison of irrigation performance indicators for field specifications and border flow design scheme											
$Q/$ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	$T_{\text{co}}/$ min	畦田规格为 80 m × 12.5 m					畦田规格为 40 m × 25 m				
		$q/$ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	AE/%	DU	AD	水流推进 指标系数	$q/$ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	AE/%	DU	AD	水流推进 指标系数
15	300	1.20	41	0.93	2.28	1.00	0.60	41	0.98	2.41	1.00
	270		45	0.93	2.05	1.00		45	0.98	2.16	1.00
	240		51	0.94	1.85	1.00		51	0.97	1.90	1.00
	210		58	0.99	1.69	1.00		58	0.95	1.62	1.00
	180		68	0.92	1.36	1.00		68	0.90	1.33	1.00
	150		80	0.74	0.91	1.00		80	0.79	0.97	1.00
	120		87	0.47	0.46	0.94		89	0.53	0.52	0.97
13	300	1.04	47	0.98	2.07	1.00	0.52	47	0.94	2.00	1.00
	270		52	0.97	1.85	1.00		52	0.92	1.76	1.00
	240		59	0.91	1.54	1.00		59	0.88	1.50	1.00
	210		67	0.79	1.17	1.00		67	0.81	1.20	1.00
	180		73	0.59	0.75	1.00		75	0.65	0.83	1.00
	150		80	0.38	0.40	0.91		81	0.44	0.47	0.94
	120		87	0.13	0.11	0.82		89	0.19	0.16	0.85
10	300	0.80	58	0.53	0.86	0.98	0.40	59	0.58	0.94	1.00
	270		61	0.43	0.63	0.93		62	0.44	0.65	0.95
	240		65	0.30	0.39	0.88		66	0.33	0.43	0.90
	210		69	0.15	0.17	0.83		70	0.19	0.21	0.85
	180		74	0.03	0.03	0.77		75	0.05	0.05	0.79
	150		81	0	0	0.71		82	0	0	0.73
	120		88	0	0	0.64		89	0	0	0.66
8	300	0.64	58	0.05	0.07	0.79	0.32	59	0.07	0.09	0.80
	270		61	0	0	0.75		62	0.01	0.02	0.76
	240		65	0	0	0.71		65	0	0	0.72
	210		69	0	0	0.67		70	0	0	0.68
	180		74	0	0	0.62		75	0	0	0.64
	150		80	0	0	0.57		81	0	0	0.59
	120		88	0	0	0.51		90	0	0	0.53
5	300	0.40	58	0	0	0.50	0.20	59	0	0	0.50
	270		62	0	0	0.47		62	0	0	0.48
	240		65	0	0	0.45		66	0	0	0.46
	210		69	0	0	0.42		70	0	0	0.43
	180		74	0	0	0.40		75	0	0	0.40
	150		81	0	0	0.36		82	0	0	0.37
	120		89	0	0	0.33		90	0	0	0.34

从图 5 可以看出,不同参数对灌水质量评价指标具有相同的变化规律。计划需水水深 D_{req} 对灌水质量具有明显的变化规律,大、中型单宽流量期间, $D_{\text{req}} < 80\text{ mm}$ 时过度灌溉,而 $D_{\text{req}} > 90\text{ mm}$ 时灌溉不足。小流量时期, $D_{\text{req}} < 100\text{ mm}$ 时发生过度灌溉,而 $D_{\text{req}} > 110\text{ mm}$ 时灌溉不足。由于 D_{req} 不是定义 DU 的主要参数,因此可以观察到 DU 并未随 D_{req} 的变化而变化。大、中、小单宽流量期间,随着田面坡度的增大,灌水效率、灌水均匀度和储水效率均呈现先增加后减少的变化趋势,田面坡度分别超过 0.15%、

0.25%、0.35% 时,灌溉水快速推进至畦尾,造成畦尾灌溉水聚集,而畦首入渗水深减少,灌水效率、灌水均匀度和储水效率均开始降低,但变化不显著。畦田长度对灌水均匀度及储水效率影响明显,均随畦田长度的增加而减少,灌水效率受畦田长度影响不大,并且当单宽流量较小时,水流推进减慢,造成渗漏损失增加,灌水效率较大、中型单宽流量时期显著降低。当畦田长度不变时,灌水均匀度随着单宽流量的减小而减小,储水效率随着单宽流量的减小而增大。

表 6 不同设计方案最佳灌水组合推荐值

Tab. 6 The best irrigation combination of different design schemes

方案	变量				灌水质量			
	$S/(m \times m)$	$Q/(L \cdot s^{-1})$	$q/(L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	T_{co}/min	AE/%	DU	AD	水流推进指标系数
灌水时间设计	80×25	30	1.20	150	80	0.74	0.91	1.00
		26	1.04	210	67	0.79	1.17	1.00
		20	0.80	300	58	0.53	0.86	0.98
		16	0.64	300	58	0.05	0.07	0.79
		10	0.40	300	58	0	0	0.50
田块规格 + 灌水 时间设计	80×12.5	30	2.40	60	97	0.94	0.92	1.00
		26	2.08	60	99	0.90	0.76	1.00
		20	1.60	90	95	0.81	0.79	1.00
		16	1.28	135	83	0.77	0.91	1.00
		10	0.80	150	81	0	0	0.71
	40×25	30	1.20	60	99	0.93	0.91	1.00
		26	1.04	60	99	0.96	0.81	1.00
		20	0.80	90	97	0.87	0.85	1.00
		16	0.64	135	84	0.82	0.96	1.00
		10	0.40	150	82	0	0	0.73
田块规格 + 入畦 流量设计	80×12.5	15	1.20	150	80	0.74	0.91	1.00
		13	1.04	210	67	0.79	1.17	1.00
		10	0.80	300	58	0.53	0.86	0.98
		8	0.64	300	58	0.05	0.07	0.79
		5	0.40	300	58	0	0	0.50
	40×25	15	0.60	150	80	0.79	0.97	1.00
		13	0.52	210	67	0.81	1.20	1.00
		10	0.40	300	59	0.58	0.94	1.00
		8	0.32	300	59	0.07	0.09	0.80
		5	0.20	300	59	0	0	0.50

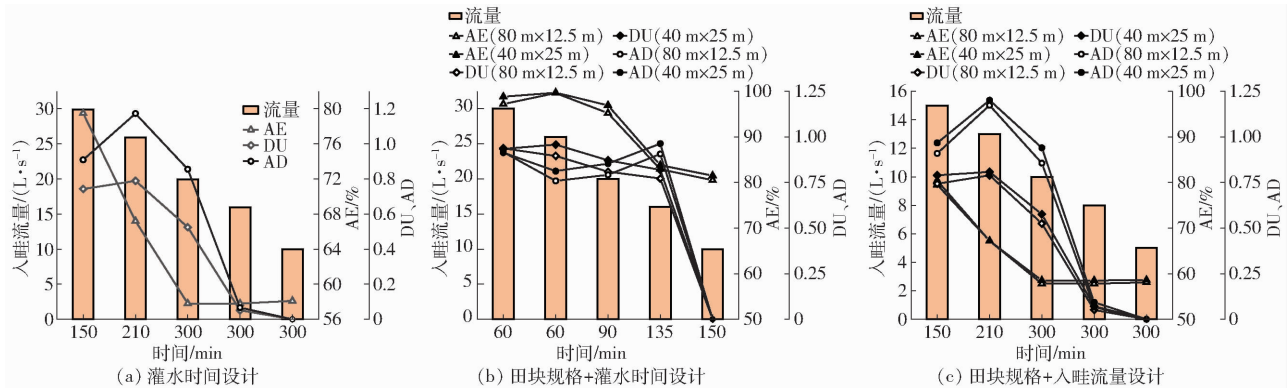


图 4 3 种设计方案最优灌水性能指标变化情况

Fig. 4 Changes in optimal irrigation performance indicators of three design schemes

4 讨论

本研究发现,单纯提高灌水效率并不能改善灌溉的充分性和均匀性,这与 XU 等^[27]研究结果一致。通过一系列模型模拟结果可以看出,在灌区现有灌溉方案中,畦灌灌溉水渗漏损失超过总灌水量的 40%,水资源浪费严重,这一方面与农民灌水习惯有关,农民节水意识较差;另一方面现有畦灌灌水方案未考虑灌区常见畦田规格、来水流量以及灌水

时间等因素对灌水质量的综合影响,造成部分方案节水性能较差。并且史海滨等^[28]提出由于灌溉水大量补给地下水,造成地下水水位上升,随着土壤蒸发及作物蒸腾影响,盐随水走,造成地表盐分聚集,造成灌区土壤盐渍化加剧,对此必须对灌区现状灌水方案进行调整,以缓解由于过度灌溉带来的土壤盐渍化及水资源浪费等问题。

本研究发现,田块规格和灌水时间是影响灌水质量的主要因素,这与 GILLIES 等^[29]结果略有差

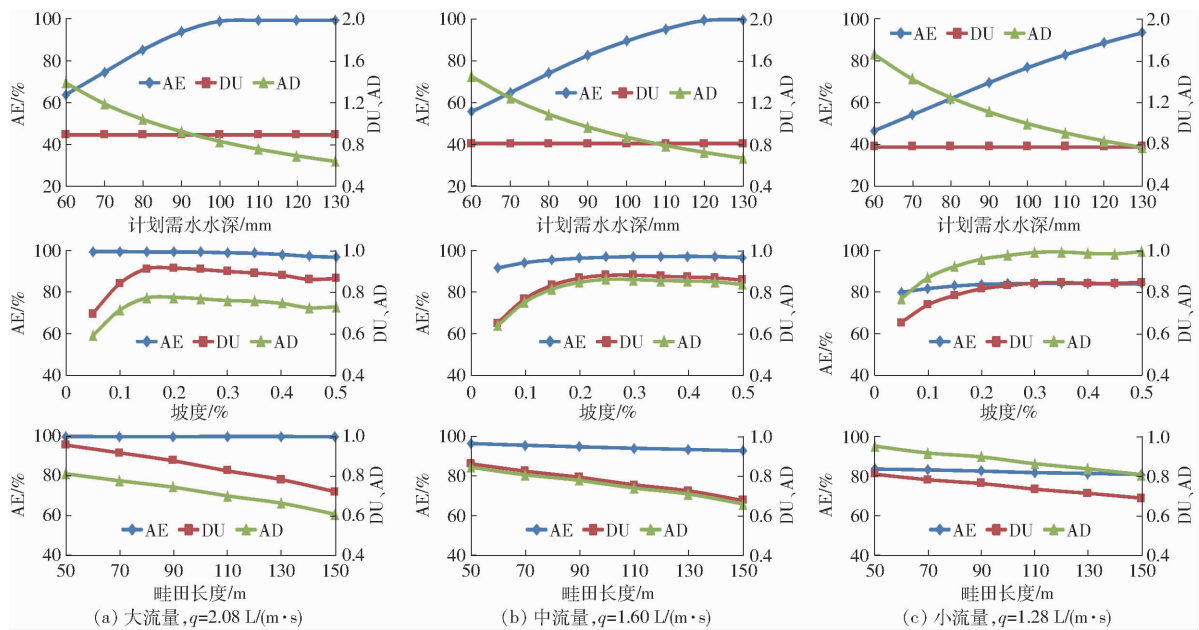


图5 灌水性能指标敏感性因素分析

Fig.5 Sensitive factors analysis of irrigation performance indicators

异,其建议将较大入畦流量作为改善畦灌灌溉质量的一种主要改进手段。本研究发现,当田面坡度超过一定值后,不同单宽流量水平下灌水质量评价指标基本不受田面坡度影响,这与 GONZALEZ 等^[30]研究成果略有不同,其提出在极小单宽流量条件下灌水均匀度基本不受田面坡度影响。

结合上文可知,畦灌灌水质量受诸多因素影响,同时各因素之间又具有明显的变异性^[31],各个技术要素和参数变化直接影响了灌水质量的形成,但完全消除这些影响是不现实的。因此,进行灌水质量评价及其敏感性分析是提高农田灌溉管理水平、改善灌溉质量的重要依据^[32]。本文对灌水质量评价指标进行敏感性分析时,只分析了计划需水水深、田面坡度、畦田长度等因素对灌水质量的影响,其他影响因素(糙率、单宽流量、田面精度等)需要进一步研究。研究发现计划需水水深会影响灌水质量形成,本文仅考虑了砂土土壤情况下常见玉米作物灌溉时灌水质量变化及相关灌水设计方案优劣情况,存在一定局限性。河套灌区土壤类型复杂,种植作物多样,由于种植方式或其他因素的变化而导致的 D_{req} 的任何变化都需要建立新的灌溉设计方案,这与 ISHAK 等^[33]研究结果一致。

本研究提出的最佳灌水方案可以认为是针对不同流量水平下的后适应措施,具体措施包括:缩宽缩块、增加进水口等。根据毛渠实际来水流量,通过缩小畦田规格、增加单宽流量等方式提高灌水质量,减少灌溉过程中的渗漏损失,最终达到缩短灌水时间、降低农民劳动成本的目的。研究结果对于改善农民

用水习惯、提高水资源利用效率具有重要意义。

5 结论

(1)在现状研究基础上研究了3种灌溉设计方案,即灌水时间设计方案、田块规格+灌水时间设计方案以及田块规格+入畦流量设计方案。与其他灌溉设计方案相比,第2种灌溉设计方案灌水效果更佳。垂直分割田块(80 m×12.5 m)在较大单宽流量(Q 为26~30 L/s、 q 为2.08~2.40 L/(m·s))情况下可以节省当前灌水时间的20%以上,在中等流量(Q =20 L/s、 q =1.60 L/(m·s))情况下在获得更优灌水质量的同时可以节省40%的灌水时间,节水效果显著。

(2)砂土畦田规格(80 m×25 m)较大时,中等单宽流量(Q =20 L/s、 q =0.80 L/(m·s))水平下,减少尾部25%的田块面积(改水成数从1.0降低至0.75)可节省40%的灌水时间,并可减少16%的灌溉水在水流推进过程中的渗漏损失,节水效果显著。单宽流量较小(Q 为10~16 L/s、 q 为0.40~0.64 L/(m·s))时,减小田块规格能显著减少畦首灌溉入渗水深,但灌水性能指标整体不佳,不建议采用。

(3)通过对灌域砂土典型田块不同灌溉设计方案畦田灌水质量结果对比分析得出,缩小田块规格后灌水质量得到显著改善,考虑到当前农业耕作水平和现状灌溉技术等限制因素影响,建议灌区采用的砂土畦田规格为80 m×12.5 m,并且根据实际来水流量选择畦灌所需的最佳单宽流量和灌水时间组合。

参 考 文 献

- [1] 范雷雷,史海滨,李瑞平,等.精细水平畦灌灌水质量及效益评价[J].水土保持学报,2020,34(2):138-145.
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Irrigation performance and benefit evaluation of fine horizontal field irrigation in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2):138-145. (in Chinese)
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国生态环境状况和生态文明建设[J].生态学报,2016,36(19):6328-6335.
ZHAO Qiguo, HUANG Guoqin, MA Yanqin. The ecological environment conditions and construction of an ecological civilization in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6328-6335. (in Chinese)
- [3] 张义强,白巧燕,王会永.河套灌区地下水适宜埋深、节水阈值、水盐平衡探讨[J].灌溉排水学报,2019,38(增刊2):83-86.
ZHANG Yiqiang, BAI Qiaoyan, WANG Huiyong. Discussion on suitable depth of groundwater level, water-saving threshold and water-salt balance in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Supp. 2):83-86. (in Chinese)
- [4] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J].中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.
CHENG Jinhua, YOU Zhe. Scientific connotation and practical paths about the principle of ‘taking mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community’[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(2):1-6. (in Chinese)
- [5] LEI Tingwu, ISSAC Shainberg, YUAN Pujin, et al. Strategic considerations of efficient irrigation and salinity control on Hetao Plain in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1):48-52.
- [6] 刘钦普,濮励杰.中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性分析[J].农业工程学报,2019,35(23):142-150.
LIU Qipu, PU Lijie. Spatiotemporal variation of fertilizer utilization and its eco-economic rationality in major grain production areas of China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23):142-150. (in Chinese)
- [7] 范雷雷,史海滨,李瑞平,等.河套灌区畦灌灌水质量评价与优化[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):315-321,337.
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Evaluation and optimization of border irrigation performance in Hetao Irrigation District[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):315-321,337. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190636&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.036. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 付雯琪,翟家齐,赵勇,等.河套灌区种植结构变化对农田系统水量平衡的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):1-8.
FU Wenqi, ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, et al. Effects of the planting structure adjustment on water budget of field system in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1):1-8. (in Chinese)
- [10] 倪东宁,李瑞平,史海滨,等.套种模式下不同灌水方式对玉米根系区土壤水盐运移及产量的影响[J].土壤,2015,47(4):797-804.
NI Dongning, LI Ruiping, SHI Haibin, et al. Effects of different irrigation methods on transport of root zone soil water-salt and yield of maize under interplanting mode[J]. Soil, 2015, 47(4):797-804. (in Chinese)
- [11] 黄权中,徐旭,吕玲娇,等.基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(1):102-109.
HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):102-109. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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 of 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)
- [14] 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)
- [15] 苗庆丰.内蒙古河套灌区地面灌溉技术评价及优化决策研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
MIAO Qingfeng. Study on assessment and optimized decision-making of surface irrigation technology for Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [16] 郑和祥.河套灌区畦田节水改造关键技术和灌溉决策研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
ZHENG Hexiang. Research on the critical technology of border water-saving reform and irrigation decision-making in Hetao Irrigation District[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [17] FADUL E, MASIH I, DE FRAITURE C, et al. Adaptation strategies to cope with low, high and untimely floods: lessons from

- the gash spate irrigation system, Sudan[J]. *Agricultural Water Management*, 2019,217(12): 212 – 225.
- [18] EBRAHIMIAN H, LIAGHAT A. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems[J]. *Soil and Water Research*, 2018, 6(2): 91 – 101.
- [19] 白美健, 李益农, 涂书芳, 等. 畦灌关口时间优化改善灌水质量分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2):105 – 110. BAI Meijian, LI Yinong, TU Shufang, et al. Analysis on cutoff time optimization of border irrigation to improve irrigated water quality[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2):105 – 110. (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 – 89.
- [22] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration[J]. *Transactions of 6th Congress of International Soil Science Society*, 1932, 1: 7 – 21.
- [23] 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 Weiham, 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)
- [24] BAUTISTA E, CLEMMENS A J, STRELKOFF T, et al. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—example application[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1162 – 1169.
- [25] BAUTISTA E, CLEMMENS A J, STRELKOFF T, et al. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1146 – 1154.
- [26] ARIF A A, WAQAS A, MUHAMMAD T B, et al. The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(5):379 – 396.
- [27] 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(9):64 – 77.
- [28] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. *灌溉排水学报*, 2020,39(8):1 – 17. SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2020,39(8):1 – 17. (in Chinese)
- [29] GILLIES M, SMITH R J. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33(5): 339 – 355.
- [30] GONZALEZ C R, CERVERA L, MORETFERNANDEZ D, et al. Basin irrigation design with longitudinal slope[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(10): 1516 – 1522.
- [31] 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)
- [32] 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 Weiham, JIAO Xiyun, PENG Shizhang, et al. Sensitivity analysis of border irrigation performance using robust design theory[J]. *Transactions of the CSAE*,2010,26(11):37 – 42. (in Chinese)
- [33] ISHAK W, FAIZAL W, SAHER F N, et al. Harnessing floodwater of hill torrents for improved spate irrigation system using geo-informatics approach[J]. *Research Journal of Recent Sciences*, 2014,3:14 – 22.