

精细水平畦灌灌水质量及效益评价

范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 苗庆丰, 孙娜, 王燕鑫

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

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畦田规格参数, 通过不同畦宽下的精细水平畦灌灌水试验, 分析了水流运动状态、灌水质量以及成本效益等变化情况。结果表明: (1) 畦宽对土壤入渗水深以及灌水质量均有较大影响, 畦宽为 23 m 时水流推进时间延长, 畦首入渗水深增大, 有效水利用效率 BWUF 和灌水均匀度 D_u 仅有 59.78%~77.40%, 84.61%~87.02%, 灌水效果不佳; 畦宽缩小到 10~15 m 时, BWUF 和 D_u 分别增加 11.96%~20.61% 和 2.49%~5.95%, 灌水质量有显著提高; 畦宽缩小到 5 m 时, 相对入畦单宽流量增大, 大量灌溉水聚集在畦尾, 使得畦尾入渗水深增加, 畦首入渗不足, 导致田面水流分布不均匀, 灌水质量降低。 (2) 通过分析各处理成本构成以及产量效益情况, 可以发现农业生产中花费最大的仍然是化肥、种子、地膜等其他费用, 占到总种植成本 T_c 的 70% 以上; 实施激光平地 and 缩宽等措施后田埂数量增加, 导致机械成本较当地对照处理增加 0.3~4.6 倍, 尽管水费略有减少, 但 T_c 仍增加 2.72%~9.98%。 (3) 在开展节水试验时, 其节水效果和经济效益通常是矛盾的, 节水效果好的方案往往经济效益较差, 而节水效果较差的方案其经济效益反而会有所提高, 建议在灌区推广节水新技术时按照 1 095~1 665 元/hm² 的补贴标准对农民发放节水补贴进而增加农民积极性。 (4) 通过分析经济、节水效益不同权重组合下的综合效益函数, 初步确定在进行方案优选时, 若优先考虑节水可适当缩小畦宽, 若优先考虑经济效益可适当放大畦宽, 均可使其综合效益达到最大。研究结果可为灌区农业高效可持续发展提供理论依据。

关键词: 精细水平畦灌; 水流运动; 灌水质量; 成本效益; 综合效益函数

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0138-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.020

Irrigation Performance and Benefit Evaluation of Fine Horizontal Field Irrigation in Hetao Irrigation District

FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, MIAO Qingfeng, SUN Na, WANG Yanxin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: Aiming at the low irrigation efficiency of farmland irrigation and drainage system layout in Hetao Irrigation District, this paper explored the suitable design scheme of border irrigation under changing environment. This paper analysed the state of water flow movement, irrigation performance, and cost-effectiveness by carrying out the fine horizontal irrigation field experiment under different widths. The results showed that: (1) Different widths have great influence on soil infiltration depth and irrigation performance. When the width of the border was large, the water flow advancement time was prolonged, and the water depth of the furrow head infiltration increased, resulting in poor overall irrigation effect. By 10~15 m, the effective water use efficiency and irrigation uniformity increased by 11.96%~20.61% and 2.49%~5.95%, respectively, and the irrigation performance was significantly improved. When the width was reduced to 5 m, the relative flow rate of the single inlet increased. Irrigation water accumulated in the furrow tail, which increases the depth of the infiltration of the furrow tail, and the infiltration of the furrow head was insufficient, which leads to a decrease in the performance of irrigation. (2) By analysing the composition of each treatment cost and the yield benefit, it could be found that the most expensive expenditure in agricultural production is still other costs such as fertilizer, seeds, and films, accounting for more than 70% of the total plant cost. After the increase in the number of ridges, the mechanical cost increased by 0.3~4.6 times compared with the local traditional level. Although the water fee decreased slightly, the total cost T_c increased by 2.72%~9.98%.

收稿日期: 2019-08-27

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

第一作者: 范雷雷(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。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新技术研究。E-mail: nmglrp@163.com

(3) When water-saving experiments were carried out, the water-saving benefits and economic benefits were usually contradictory. The water-saving and good-efficiency schemes tend to have poor economic benefits, while the schemes with poor water-saving benefits had improved economic benefits, it is recommended to increase the enthusiasm of farmers by granting water-saving subsidies to farmers in accordance with the subsidy standard of 1 095~1 665 yuan/hm² when promoting new water-saving technologies in irrigation districts. (4) In this paper, by analysing the comprehensive benefit function under the combination of different weights of economy and water saving benefits, it is preliminarily determined that when the optimization of each treatment scheme is made, if the water saving benefit is prioritized, the width should be appropriately narrowed, and if the economic benefit is prioritized, the width should be appropriately enlarged. The results should provide theoretical support for water saving reform design and sustainable development of agriculture.

Keywords: fine horizontal irrigation; water flow movement; irrigation performance; cost-effectiveness; comprehensive benefit function

进入 80 年代以来,随着全球性水危机的加剧,节水灌溉事业受到党和国家的高度重视,中央 1 号文件多次指出要大力实施区域规模化高效节水灌溉行动,加快高标准农田建设,构建现代化灌区。河套灌区是我国最大引黄灌区之一,随着灌区的快速发展和非农业用水的不断增加,水资源需求量不断上升,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。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可持续发展^[1-2]。精细水平畦灌是以农田激光平地技术为基础的新型地面灌溉技术,具有灌水质量高、技术简单和劳动力需求低等优点^[3-6],其特点是通过改善地面平整精度,消除水流横向扩散,使得水流推进锋始终保持一致,灌溉水能均匀覆盖整个田面,较其他地面灌溉方法更容易淋洗土壤中的有害成分,肥料损失、盐分残留以及土壤环境得到控制和改善^[7-8],该技术对于土壤盐碱化严重的河套灌区尤为适用。

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^[9-11],灌区灌排渠道系统日益完善,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。由于畦田长度基本固定,只能通过改变畦田宽度调整农田规格。已有学者^[12]

初步确定最优畦宽大多为 10 m 以下,但由于畦宽较小,田埂数量增加,导致机械效率降低,并且在灌区现有农田配套设施下农渠引水流量平均为 30~40 L/s,畦宽较小时容易造成土壤冲刷,不利于农业生产。因此,在这种变化条件下,确定适宜畦田宽度对于提高灌区水资源利用效率、保证作物增产增收、推进灌区现代化建设具有重要现实意义。本研究通过开展激光平地条件下的精细水平畦灌灌水试验,分析不同畦田宽度对农田灌溉过程中水流运动规律、灌水质量、成本投入和效益产出等因素的影响,设计不同权重组合,从节水 and 经济效益 2 个方面对各处理方案进行综合评价,初步筛选出适宜河套灌区的畦宽设计方案,为灌区农业高效可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设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内进行,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仅 188 mm,与降水量相比,年平均蒸发量却高达 2 032~3 179 mm,约为降水量的 10~30 倍,图 1 为示范区 2017—2018 年生育期内降雨及温度变化情况。

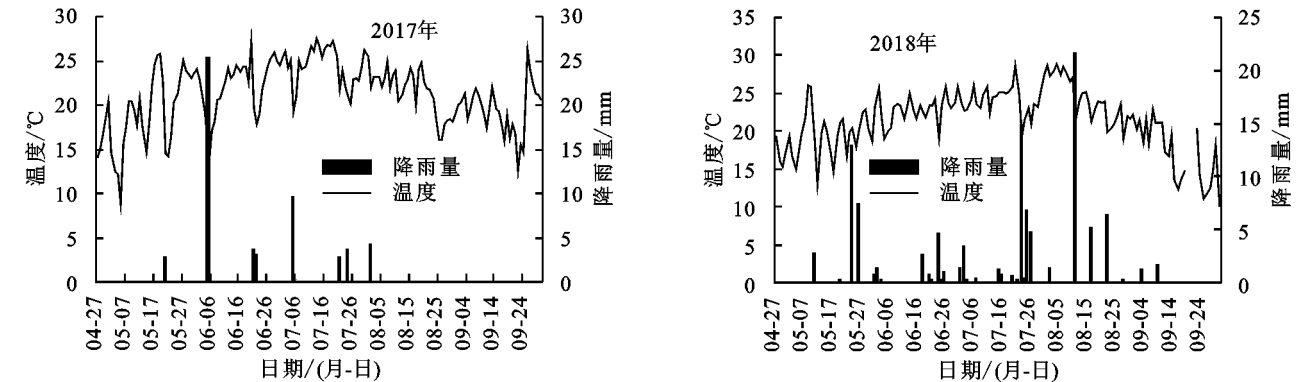


图 1 示范区降雨量及温度变化

1.2 试验设计

结合示范区现状规划,毛渠间距约为 100 m 且双向灌水,畦田长度 l 为 40~50 m^[13]。本文采用田间对比试验方法,设计 5 种不同畦长与畦宽比(2:1, 2.5:1, 3:1, 4.5:1, 9:1)的畦田规格处理,其中畦长 l 为 45 m,畦宽 b 分别为 23,18,15,10,5 m,并按照当地水平设置对照处理 CK(畦长 l 为 45 m,畦宽 b 为 35 m)。示范区主要作物为玉米“钧凯 918 号”,种植密度为 6.75 株/m²,各处理出苗率均达到 90% 以上。播种时底肥施用量 750 kg/hm²,第 1 次灌水追加磷酸二铵 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 下降到 1.50 cm,极大改善了整个畦田地面高低起伏的分布状况,完全可以满足精细水平畦灌对田面的要求,其他田间管理水平均与当地一致。

表 1 试验畦田规格及其参数

试验地点	作物	畦长/m	田面坡度/%	田面糙率	畦田编号	畦宽/m	入渗参数	
							$k/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-\alpha})$	α
临河酒庄	玉米	45	1.116	0.16	CK	35	0.5348	0.5162
					A	23	0.6124	0.4149
					B	18	0.6371	0.6066
					C	15	0.5990	0.4710
					D	10	0.5532	0.3663
					E	5	0.8247	0.3157

表 2 实际灌水情况

编号	畦宽/ m	灌水 轮次	2017 年			2018 年		
			灌水日期 (月-日)	灌水定额/mm	单宽流量/ (L · m ⁻¹ · s ⁻¹)	灌水日期 (月-日)	灌水定额/mm	单宽流量/ (L · m ⁻¹ · s ⁻¹)
CK	35	第 1 水	06-19	127	0.87	06-11	130	0.45
		第 2 水	07-03	118	0.98	07-08	120	0.42
		第 3 水	07-28	115	1.06	08-06	110	0.49
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

1.3 研究方法

1.3.1 灌水质量评价指标 灌水质量是表征田间灌

玉米全生育期内共灌水 3 次,各处理灌水次数和日期均相同,灌水定额按照当地灌水习惯确定。沿试验田畦长方向设置 5 个取样点,每隔 10 天测定土壤含水率,灌水以及降雨前后加测。沿畦长方向每隔 5.0 m 设置 2~4 个观测点用以观测水流推进与消退,结果取同排测点所测时间平均值;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-Lewis 方程进行描述。

$$I=kt^{\alpha}+f_0t$$

(1)

式中: I 为累计入渗量(cm); t 为入渗时间(min); k 为土壤入渗系数(cm/min^α); α 为土壤入渗指数,无量纲; f_0 为稳定入渗率(cm/min),为延续郑和祥等^[14]的相关河套灌区入渗参数的研究成果,本次试验 f_0 取 0。各处理畦田规格参数及其实际灌水情况见表 1 和表 2。

水效果的量化指标,本研究选取 Gaiser 等^[15]提出的田间有效水利用效率 BWUF 和灌水均匀度 D_u 对畦

田灌水质量进行评价。

$$D_u=\frac{Z_{lq}}{Z_{avg}}\times100\% \tag{2}$$

$$BWUF=\begin{cases} \frac{Z_{lq}}{Z_{avg}}\times100\%, Z_{lq}<Z_{reg} \\ \frac{Z_{reg}}{Z_{avg}}\times100\%, Z_{lq}\geq Z_{reg} \end{cases} \tag{3}$$

式中: D_u 为灌水均匀度(%);BWUF 为有效水利用效率(%); Z_{lq} 为灌溉水入渗量最小的 1/4 田块内的平均入渗水深(mm); Z_{reg} 为净灌溉需水水深(mm); Z_{avg} 为平均灌水水深(mm)。

1.3.2 效益评价指标 每个灌溉方案的优劣选用 Goncalves 等^[16-17]提出的灌溉决策指标进行评价,其中主要包括由总灌溉用水量(IWU,mm)、有效水利用效率(BWUF,无量纲)和水分利用效率(IWP= Y_a/ET_c ,kg/(mm·hm²))构成的节水指标,以及由经济土地生产力(ELP= $Y_a\times Value$,元/hm²,表示单位面积产量效益)、总种植成本(T_c ,元/hm²,表示单位土地投资成本)和经济水分生产率(EWPR=ELP/ T_c ,无量纲,表示总产量效益与总灌溉成本的比值)构成的经济效益指标。各指标中: Y_a 为作物产量(kg/hm²);Value 为作物单价(元/kg); ET_c 为作物实际耗水量(mm),由水量平衡法计算确定。

1.3.3 综合评价方法 对灌溉设计方案进行优选是决策过程中必不可少的环节之一,评价一个方案优劣时不能仅考虑单一方面,而通常需要从环境、节水及经济效益等多个方面进行综合评价。对于农民来说,最重要的仍然是节水高产。因此,本文从不同灌溉方案的节水和经济效益方面进行分析,采用综合效益函数对其进行评价

$$U_{glob}=\sum_{j=1}^7\lambda_iU_j/\lambda_{EC(WS)} \tag{4}$$

$$U_j=\alpha_j\times x_j+\beta_j \tag{5}$$

式中: U_{glob} 为综合效益函数; λ_i 为各目标性能指标所占权重; λ_{EC} 、 λ_{WS} 分别为经济效益和节水指标效益函数所占的权重比,且 $\lambda_{EC}+\lambda_{WS}=1$,本研究在对方案进行综合评价时设计了 $\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 的 5 种权重组合(10%~90%,30%~70%,50%,70%~30%,90%~10%); U_j 为各目标性能指标的效益函数; x_j 为各性能指标属性值; α_j 、 β_j 为各性能指标系数,参考 Miao 等^[18]在河套灌区对于灌溉方案决策过程中各性能指标系数,确定各目标性能指标所占权重及系数见表 3。

2 结果与分析

2.1 灌水技术评价

从图 2 可以看出,激光平地条件下不同畦宽对土

壤入渗水深有较大影响。当畦宽为 18~35 m 时,畦首入渗水深大于畦尾入渗水深,并且畦宽越大,畦首入渗水深越大,原因是由于毛渠流量不变,畦宽较大时,相对入畦单宽流量较小,灌水时间延长,导致畦首入渗时间增加,入渗水深增加;当畦宽为 5~15 m 时,畦尾入渗水深大于畦首入渗水深深度,且畦宽越小,畦尾入渗水深越大,原因是由于当畦宽越小时,此时相对入畦单宽流量较大,灌溉水快速推进至畦尾,导致畦尾聚集大量灌溉水,畦尾入渗时间延长,故畦尾入渗水深增加。

表 3 各目标性能指标权重系数及属性系数

综合指标	性能指标	权重 λ	系数 α	系数 β
节水指标	IWU	0.20	-3.17×10^{-4}	1.95
	BWUF	0.15	1.82	-0.73
	IWP	0.15	-3.17×10^{-4}	1.95
经济指标	ELP	0.20	1.25×10^{-4}	-1.25
	T_c	0.20	-2.5×10^{-4}	1.00
	EWPR	0.10	0.25	1.00

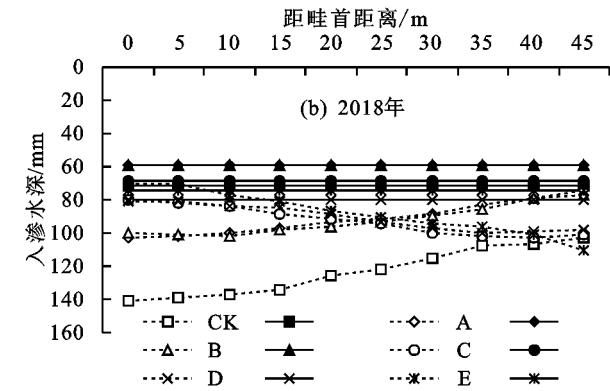
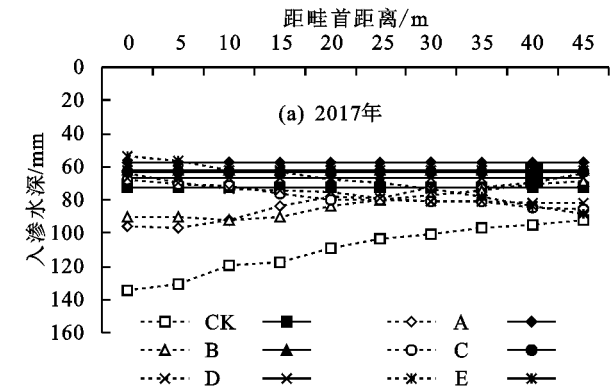
从图 3 可以看出,2017 年各处理(畦宽分别为 23, 18,15,10,5 m)的有效水利用效率 BWUF 为 62.70%~87.00%,灌水均匀度 D_u 为 76.45%~90.52%;2018 年各处理的有效水利用效率 BWUF 为 59.78%~80.34%,灌水均匀度 D_u 为 82.68%~90.80%,均高于当地对照水平 CK。结合 2 年试验结果可知,当畦宽为 23 m 时,BWUF 仅为 59.78%~77.40%, D_u 为 84.61%~87.02%,灌水效果较差,原因是由于畦宽较大,导致相对入畦单宽流量减小,水流推进减慢,推进过程中深层渗漏增加,此时灌水效率较低。随着畦宽的缩小,灌水质量明显提高,当畦宽缩小到 10~15 m 时,此时 BWUF 和 D_u 分别提高 11.96%~20.61%和 2.49%~5.95%,灌水效果最佳;而当畦宽继续缩小至 5 m 时,BWUF 和 D_u 均有一定程度降低,原因是由于随着畦宽的缩小,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,导致畦尾入渗水深变大,深层渗漏增加,而此时畦首入渗水深减少,故有效水利用效率 BWUF 和灌水均匀度 D_u 均有一定程度降低。

2.2 效益评价

2.2.1 节水效果 采用激光平地并且适当缩小畦宽后能基本实现农田的灌溉节水,图 4 为 2017 年和 2018 年各个试验处理生育期总灌溉水量 IWU 以及较当地水平 CK(3 600 m³/hm²)的节水量变化情况。从图 4 可以看出,实施激光平地 and 缩小畦宽措施后各处理生育期灌水量为 2 191~2 541 m³/hm²,节水量为 969~1 409 m³/hm²,灌水量较 CK 明显减少,节水效果显著,并且畦宽越大,IWU 越多,节水量越小;反之畦宽越小,IWU 越少,节水量越大,这是由于随

着畦田宽度的缩小,相对入畦单宽流量增大,导致水流推进加快,灌水时间缩短,地表和深层渗漏损失减

少,灌溉水快速充满整个田块,进而减少了灌溉水量,相应提高各处理节水量。



注:图中不同线型空心标记表示各处理实际入渗水深;实心标记表示各处理计划需水水深。

图 2 2017 年和 2018 年各处理入渗水深变化

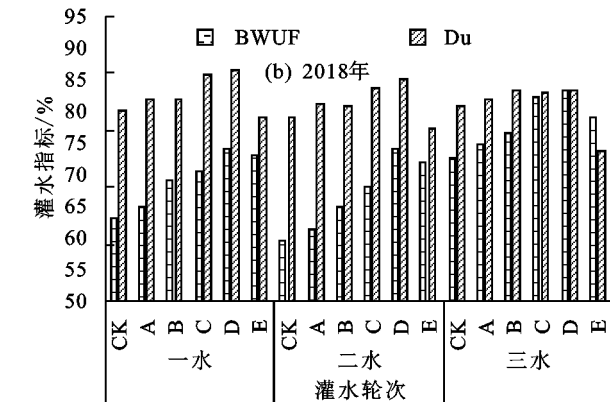
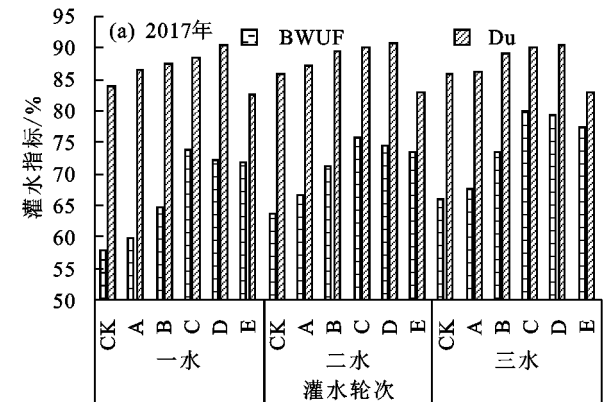


图 3 2017 年和 2018 年各处理灌水质量变化

2.2.2 经济效益 从表 4 可以看出,各处理总种植成本 T_c 为 7 722~8 493 元/hm²,其中 CK 处理传统平地成本(750 元/hm²)占 T_c 的 9.72%,激光平地成本(1 050 元/hm²)占 T_c 的 12.36%~13.60%,参考河灌总局提供的水费价格表可知,示范区水费 0.226 元/m³,畦宽缩小后各处理水费大约为 497~660 元/hm²,较 CK 减少 18.72%~38.79%,仅占 CK 处理总种植成本的 6.44%~8.55%,可知水费成本及节水收益较低,因此大规模推广节水技术难度较大。从表 4 还可以发现,目前灌区农业生产中花费最大的仍然是化肥、种子、地膜等其他费用,占 T_c 的 70% 以上,故适当对农民进行经济补贴是很有必要的。由于当地每户几乎都拥有私人拖拉机,大多数机械操作仅需花费部分燃油费,无额外机械租赁成本,故 CK 处理机械成本仅为 160 元/hm² 左右,约占 T_c 的 2.07%,实施激光平地 and 缩宽等措施后田埂数量增加,导致机械成本较 CK 增加 0.3~4.6 倍,尽管水费略有减少,但 T_c 增加 2.72%~9.98%。结合 2 年数据可以看出,各处理产量、经济土地生产力 ELP、纯效益及经济水分生产率 EWPR 均低于 CK 处理,且 2018 年各处理产量、ELP、纯效益以及 EWPR 均高于 2017 年各处理结果,原因是由于 2017 年示范区农田病虫

害管理不善,使得玉米遭受虫害造成减产,2018 年加强田间管理后产量较 2017 年有显著提高。2017—2018 年各处理产量及经济土地生产力 ELP 较当地分别减少 4.37%~12.05%,0.72%~3.98%,纯效益分别减少 7.66%~22.05%,1.70%~9.92%,EWPR 分别减少 6.67%~19.68%,2.39%~12.84%。对经济水分生产率 EWPR 来说,仅当畦宽缩小到 5~10 m 时,EWPR 较其他处理显著减小($P<0.05$),畦宽为 15~23,10~18 m 时,EWPR 变化不显著。

2.2.3 节水补贴 从表 5 可以看出,各处理经济土地生产力 ELP、总种植成本 T_c 及经济水分生产率 EWPR 指标值及其函数值均低于 CK 处理,节水指标值及其函数值均高于 CK 处理,这说明在开展节水试验时,其节水效果和经济效益通常是矛盾的,节水效果好的方案往往经济效益较差,而节水效果较差的方案其经济效益反而会有所提高,因此在灌区推广节水新技术时往往由于经济效益不高,导致农民积极性不足,推广难度较大,这说明若想在灌区对节水新技术进行推广需适当对农民进行节水补贴和奖励。

为确定适宜节水补贴方案,本研究拟在实测资料基础上,通过分析各处理不同节水补贴下的 EWPR 变化情况,确定适宜节水补贴标准。从图 5 可以看

出,对农民进行补贴前各处理 EWPR 均低于当地对照水平,这与上文研究结果一致;而当对农民进行适当补贴(最低补贴分别为 1 665,1 095 元/hm²)后,各处理 EWPR 较补贴前有明显提高,且均高于 CK 处理,这说明若按照 1 095~1 665 元/hm² 的补贴标准对农民发放节水补贴可以满足其由于节水灌溉措

施实施后造成的经济损失,对于加快灌区高效节水灌溉技术的推广、实现水资源的高效利用具有重要现实意义。由于该节水补贴标准是根据最小畦宽处理补贴前后 EWPR 变化情况确定的,存在一定不足,建议在农业生产中应根据实际适宜畦宽对节水补贴进行适当调整。

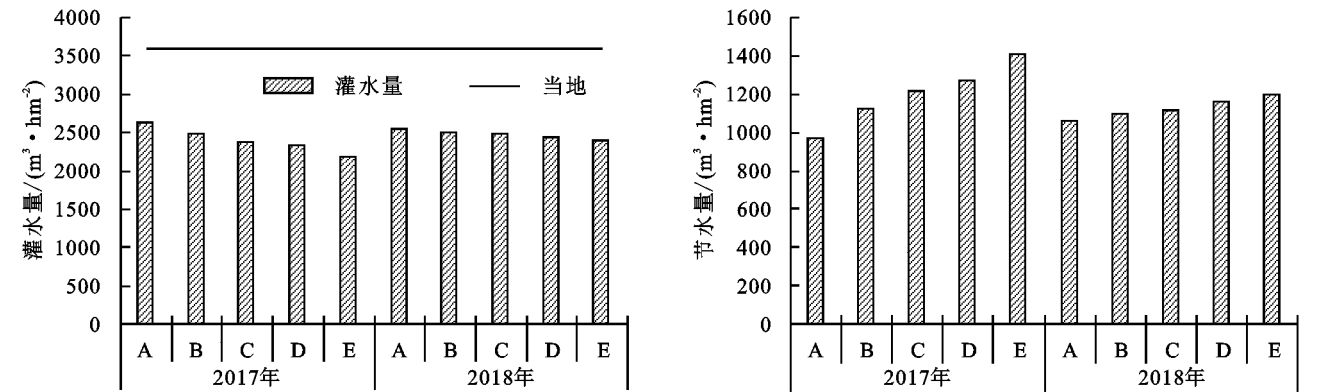


图 4 各处理生育期总灌水量及较当地节水情况

表 4 各处理种植成本、效益及经济水分生产率变化

年份	处理	总种植成本 T_c /(元·hm ⁻²)					产量 Y_a /(kg·hm ⁻²)	ELP/(元·hm ⁻²)	纯效益/(元·hm ⁻²)	EWPR
		平地	水费	其他	机械	合计				
2017	CK	750	812	6000	160	7722	12521	24291	16569	3.15a
	A	1050	660	6000	220	7930	11974	23230	15300	2.93b
	B	1050	542	6000	260	7852	11881	23049	15197	2.94b
	C	1050	522	6000	320	7892	11619	22541	14649	2.86c
	D	1050	512	6000	460	8022	11487	22285	14263	2.78d
	E	1050	497	6000	900	8447	11012	21363	12916	2.53e
2018	CK	750	812	6000	160	7722	13326	25852	18130	3.35a
	A	1050	574	6000	220	7844	13230	25666	17822	3.27b
	B	1050	565	6000	260	7875	13150	25511	17636	3.24bc
	C	1050	561	6000	320	7931	13135	25482	17551	3.21bc
	D	1050	552	6000	460	8062	13064	25344	17282	3.14c
	E	1050	543	6000	900	8493	12796	24824	16332	2.92d

注:表中数字后同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 综合效益评价

从上文分析可知,经济效益和节水效果是矛盾的,为了对方案优劣进行合理分析,本研究采用 λ_{EC} 和 λ_{WS} 的不同权重组合($\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 分别为 10%~90%,30%~70%,50%,70%~30%,90%~10%)对各处理方案进行排名和优选。从表 6 可以看出,当优先考虑节水效果时,即 $\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 为 10%~90%时,畦宽为 5~10 m 时方案综合效益 U_{glob} 最大,即当畦宽越小综合效益越大,此时 U_{glob} 达到 0.556 7~0.566 3;当 $\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 为 30%~70%时,畦宽为 10~15 m 时方案综合效益最大, U_{glob} 达到 0.409 4~0.427 0;当 $\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 为 50%~50%时,畦宽为 15~18 m 时方案综合效益最大, U_{glob} 达到 0.262 6~0.297 6;当优先考虑经济效益时,即 $\lambda_{EC}-\lambda_{WS}$ 分别为 70%~30%,90%~10%时,畦宽为 18 m 以上或按照当地水平设计畦宽时灌溉方案综合效益最大, U_{glob} 达到-0.020 8~0.168 3。综上所述,在对各处理方

案进行优选时,若优先考虑节水则可适当缩小畦宽,若优先考虑经济效益时则需适当放大畦宽,进而使其综合效益达到最大。

3 讨论

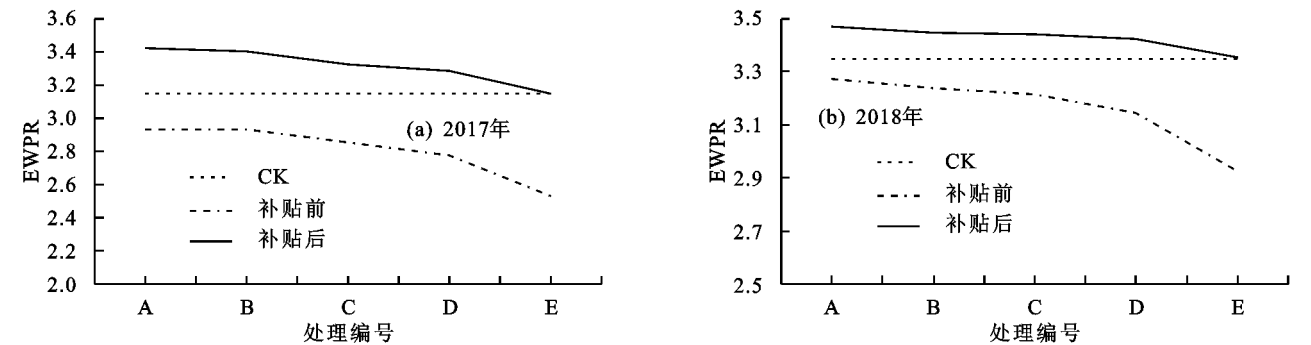
激光平地条件下,缩小畦田宽度后灌水质量明显改善,但由于农民在实际灌水中仍保持着大水漫灌的习惯,通常根据个人经验来控制关口时间,导致灌水定额常常远高于作物需水量,灌水效率仍旧不高。结合上述研究可以发现,适当减小入畦单宽流量、缩短灌水时间可以进一步提高灌水均匀度,可以对各处理试验设计做进一步的优化调整。分析不同畦宽条件下的节水以及成本效益发现,缩小畦田宽度后田埂数量增多,种植成本增加,导致灌区节水灌溉技术难以得到广泛推广,这与郑和祥等^[12]的研究结果一致。对此本文提出适当对农户按照一定标准发放节水补贴可以有效增加农民积极性,有利于灌区高效节水技

术的推广,但在确定补贴方案时仅提出补贴金额,对补贴来源没有进一步研究,结合灌区近年来开展的一系列水权转换项目,农业灌溉节约下来的水可以用来工业及其他生产,故节水补贴可以由政府和企业来共同承担,但由于缺少部分资料导致没有得到详细的补贴方案,这需要在后续研究中做进一步分析讨论。区域农业灌溉节水以及水资源利用效率是分析灌区农业可持续发展的重要组成部分之一^[19],但由于河套

灌区农田基本情况复杂,田块大小、土壤类型、种植结构等各不相同^[1],这使得区域农田灌溉问题难以得到有效解决,因此,在后续研究中需要考虑不同因素对田间水流运动及灌水质量的综合影响,进而确定区域农田灌溉规律。本文在对不同畦宽条件下的节水效果以及经济效益进行评价时,仅从农户角度做了分析,对于社会、生态环境等方面影响研究较少,需在下一步研究中进行补充和完善。

表 5 各效益目标性能指标值及其函数值

年份	处理	经济指标值			节水指标值			经济指标函数值			节水指标函数值		
		ELP	T_c	EWPR	IWU	BWUF	IWP	ELP	T_c	EWPR	IWU	BWUF	IWP
2017	CK	24291	7722	3.15	3600	66.84	20.52	1.7863	-2.8610	1.7864	0.8088	0.4882	1.9435
	A	23230	7930	2.93	2631	68.83	24.86	1.6537	-2.9650	1.7323	1.1159	0.5243	1.9421
	B	23049	7852	2.94	2471	72.48	25.75	1.6311	-2.9260	1.7339	1.1666	0.5907	1.9418
	C	22541	7892	2.86	2381	76.36	25.84	1.5676	-2.9460	1.7140	1.1952	0.6612	1.9418
	D	22285	8022	2.78	2331	80.23	25.79	1.5356	-3.0110	1.6945	1.2110	0.7316	1.9418
2018	E	21363	8447	2.53	2191	77.46	21.52	1.4204	-3.2236	1.6323	1.2554	0.6813	1.9432
	CK	25852	7722	3.35	3600	62.42	20.52	1.9815	-2.8610	1.8375	0.8088	0.4078	1.9435
	A	25466	7864	3.27	2641	64.67	26.20	1.9333	-2.9322	1.8180	1.1128	0.4487	1.9417
	B	25511	7875	3.24	2551	69.73	26.30	1.9389	-2.9377	1.8098	1.1413	0.5407	1.9417
	C	25482	7931	3.21	2481	76.57	26.38	1.9352	-2.9654	1.8033	1.1635	0.6650	1.9416
	D	25344	8062	3.14	2441	75.28	26.34	1.9180	-3.0308	1.7859	1.1762	0.6417	1.9417
	E	24824	8493	2.92	2401	74.29	26.06	1.8530	-3.2463	1.7308	1.1889	0.6236	1.9417



注:2017 年补贴 1 665 元/hm²,2018 年补贴 1 095 元/hm²。

图 5 拟补贴前后各处理 EWPR 变化情况

表 6 不同权重组合下方案排名

年份	处理	10%~90%		30%~70%		50%		70%~30%		90%~10%	
		U_{glob}	排名	U_{glob}	排名	U_{glob}	排名	U_{glob}	排名	U_{glob}	排名
2017	CK	0.4702	6	0.3577	6	0.2451	5	0.1325	1	0.0200	1
	A	0.5249	5	0.3885	5	0.2521	4	0.1156	4	-0.0208	2
	B	0.5433	4	0.4036	3	0.2638	1	0.1241	2	-0.0257	3
	C	0.5561	3	0.4094	2	0.2626	2	0.1159	3	-0.0309	4
	D	0.5663	1	0.4126	1	0.2588	3	0.1050	5	-0.0487	5
2018	E	0.5605	2	0.3921	4	0.2237	6	0.0552	6	-0.1132	6
	CK	0.4638	6	0.3625	6	0.2611	5	0.1598	4	0.0585	1
	A	0.5219	5	0.4035	5	0.2851	4	0.1666	3	0.0482	2
	B	0.5387	4	0.4148	3	0.2909	2	0.1670	2	0.0432	3
	C	0.5563	3	0.427	1	0.2976	1	0.1683	1	0.039	4
	D	0.5585	1	0.4246	2	0.2907	3	0.1569	5	0.023	5
	E	0.5567	2	0.4095	4	0.2624	6	0.1152	6	-0.032	6

4 结论

(1)不同畦宽对土壤入渗水深以及灌水质量均有较大影响,畦宽为 23 m 时水流推进时间延长,畦首入渗水深增大,有效水利用效率 BWUF 和灌水均匀度 D_u 仅为 59.78%~77.40%,84.61%~87.02%,灌水效果不佳;畦宽缩小为 10~15 m 时,BWUF 和 D_u 分别增加 11.96%~20.61%和 2.49%~5.95%,灌水质量显著提高;畦宽缩小到 5 m 时,相对入畦单宽流量增大,灌溉水聚集在畦尾,使得畦尾入渗水深增加,畦首入渗不足,灌水均匀度下降。

(2)灌区农业生产中花费最大的是化肥、种子、地膜等其他费用,占到总种植成本 T_c 的 70%以上;实施激光平地 and 缩宽等措施后机械成本较 CK 增加 0.3~4.6 倍,尽管水费略有减少,但 T_c 仍增加 2.72%~9.98%。

(3)在开展节水试验时,节水效果和经济效益通常是矛盾的,节水效果好的方案往往经济效益较差,而节水效果较差的方案其经济效益反而会有所提高,建议在灌区推广节水新技术时按照 1 095~1 665 元/hm² 的补贴标准对农民发放节水补贴来增加农民积极性。

(4)通过分析经济、节水效益不同权重组合下的综合效益函数,初步确定在对各处理方案进行优选时,若优先考虑节水效益时可适当缩小畦宽,若优先考虑经济效益时需适当放大畦宽。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李益农,许迪,李福祥,等.农田土地激光平整技术应用及初步评价[J].农业工程学报,1999,15(2):79-84.
- [4] 李福祥,许迪.农田土地平整方法的组合应用及效果[J].农业工程学报,2000,16(2):50-53.
- [5] 徐睿智,魏占民,夏玉红,等.激光精细平地对畦田灌水质量的影响及节水效果分析[J].灌溉排水学报,2012,31(2):6-9.
- [6] 苗庆丰,史海滨.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.
- [7] 白岗栓,杜社妮,于健,等.激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J].农业工程学报,2013,29(8):125-134.
- [8] 李益农,许迪,李福祥,等.激光控制土地精平技术规模化应用效果评价[J].农业工程学报,2008,24(5):69-73.
- [9] 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.
- [10] 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].农业机械学报,2014,45(1):108-114.
- [11] 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].农业机械学报,2015,46(4):98-105.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 郑和祥,史海滨,朱敏,等.基于 SIRMOLD 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.
- [15] Gaiser T, Barros I D, Lange F M, et al. Water use efficiency of a maize/cowpea intercrop on a highly acidic tropical soil as affected by liming and fertilizer application[J].Plant and Soil,2004,263(1/2):165-171.
- [16] Goncalves J M, Muga A P, Rodrigues G C, et al. Web-based decision support system for irrigation design: Models integration for surface and set sprinkler systems[C]//Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, July 8-12,2012, CIGR-Eur-AgEng, 2012.
- [17] Gonçalves J M, Horst M G, Pereira L S, et al. SA-DREG, a DSS for Improving Surface Irrigation Systems[C]//Proceedings of the EFITA/WCCA 2005 Joint Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment and Computers in Agriculture and Natural Resources,2005:160-165.
- [18] 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.
- [19] 刘静,吴普特,王玉宝,等.基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价[J].农业工程学报,2014,30(9):110-118.