

河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析

邹宇锋^{1,2} 蔡焕杰^{1,2} 张体彬^{1,2} 王云霏² 徐家屯²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 地处干旱半干旱区的内蒙古河套灌区地表水资源短缺和土壤盐渍化并存。为寻求更加节水高效的灌溉方式,通过连续3年的田间试验,设置畦灌、沟灌和滴灌3种不同灌溉方式,并在沟灌和滴灌下设置高、中、低3个灌水水平,以传统畦灌为对照,分析了春玉米耗水特性、产量响应和经济效益。结果表明,畦灌下平均有10%的灌水通过深层渗漏而损失,而滴灌低水处理每个生长季有10.5~29.0 mm的地下水通过毛管上升进入根区而被作物吸收;滴灌条件下玉米籽粒产量-水分响应系数 K_y (0.684)小于沟灌(0.821 5),说明因作物耗水量的减少所引起的减产幅度更小,这更易于在潜在干旱胁迫下维持较高的作物产量;相对于传统畦灌,沟灌高水处理可以增加玉米籽粒产量和净收益,中水处理可以在保持产量和净收益持平的情况下,节约灌溉水31%;滴灌条件下,维持土壤水势-10 kPa和-30 kPa以上的高水和中水处理相对节水分别为19%和57%,且提高春玉米籽粒产量分别为21%和15%,提高净收益分别为28%和22%,水分利用效率较高。因此,综合考虑黄河引水情况、地下水状况和农民接受程度等因素,建议将沟灌中水处理或滴灌中水处理作为替代传统畦灌的最佳方案。

关键词: 春玉米; 河套灌区; 灌溉方式; 作物耗水; 经济效益; 水分生产函数

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)09-0237-12 OSID: 

Water Use Characteristics and Profit Analysis of Spring Maize Production with Different Irrigation Methods in Hetao Irrigation District

ZOU Yufeng^{1,2} CAI Huanjie^{1,2} ZHANG Tibin^{1,2} WANG Yunfei² XU Jiataun²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Located in the arid and semi-arid areas of Northwest China, the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia is facing both shortage of surface water resources and severe soil salinization, therefore the high-efficient water-saving irrigation methods are the inevitable choice for sustainable agricultural production. A three-year field experiment was conducted to study the effects of different irrigation methods on yield, water productivity and net return of spring maize in the Hetao Irrigation District. Three irrigation methods, i. e., border irrigation (BI), furrow irrigation (FI) and drip irrigation (DI), were compared. Taking the recommended traditional BI water level as the control, three water levels imposed for FI were recommended, namely level (450 mm, H), 0.8 × recommended level (360 mm, M) and 0.6 × recommended level (270 mm, L), respectively; while the three levels for DI were conducted based on different threshold values of soil water matric potential, i. e., -10 kPa (H), -30 kPa (M), and -50 kPa (L), respectively. Totally seven treatments were implemented by randomized block design with three replicates. The results showed that the grain and straw yields were significantly affected by treatments. Under BI condition, totally average 10% of irrigation water was lost through deep percolation over the studied three years; whereas, under DI conditions, about 10.5~29.0 mm water of groundwater was contributed into the root zone through capillary rise for crop water uptake. The response coefficient K_y of maize grain yield-soil water under DI (0.684) was smaller than that under FI (0.821 5), indicating

收稿日期: 2020-03-31 修回日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)和国家自然科学基金项目(51879223)

作者简介: 邹宇锋(1981—),男,博士生,主要从事节水农业技术与水资源高效利用研究,E-mail: zouyufeng@nwfau.edu.cn

通信作者: 蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究,E-mail: caihj@nwfau.edu.cn

that the reduction of crop yield caused by decrease of crop water consumption was smaller under DI than that under FI. That meant DI helped maintain a higher crop yield under potential drought stress than FI. Compared with traditional BI, FI-H (450 mm) could increase the grain yield and net return, FI-M (360 mm) could save 31% of irrigation water while keeping the grain yield and net yield as same as the control. Compared with BI, DI-H and DI-M treatments could save irrigation water by 19% and 57% respectively, but increase grain yield by 21% and 15%, and increase net yield by 28% and 22%, respectively, resulting in a higher water use efficiency. Therefore, considering the external environmental conditions, including water diverted from the Yellow River, groundwater status and local farmers' acceptance etc., water level with FI-M or DI-M could be used as an alternative to traditional BI for water-saving irrigation.

Key words: spring maize; Hetao Irrigation District; irrigation methods; crop water use; economic benefit; crop water production function

0 引言

内蒙古河套灌区位于黄河上中游内蒙古段北岸的冲积平原,灌区总土地面积 119 万 hm^2 ,设计灌溉面积 73 万 hm^2 ,是亚洲最大的一首制自流灌区和全国 3 个特大型灌区之一,也是我国重要的商品粮、油生产基地。河套灌区年均农业灌溉引水量约 45 亿 m^3 ,近年由于国家对黄河水资源的统一调度,灌区引水配额有减小趋势^[1]。灌区内农田灌溉方式长期以地面灌为主,水分利用效率低下,地下水位埋深较浅,土壤次生盐渍化日益严重^[2],势必需要更多的灌溉水进行盐分的淋洗。地表水资源的紧缺和土壤盐渍化严重限制河套灌区农业生产的可持续发展,已成为亟待解决的矛盾。因此,灌区只有寻求发展更加节水高效的灌溉方式,才有可能同步实现农业节水和盐渍化的治理。

畦灌是河套灌区农民普遍采用的一种灌溉方式,其管理粗放,虽然近些年随着激光平地等畦田改造工程的实施,灌溉效率略有提高,但总体水分利用率仍然较低^[3];沟灌是一种改进的精细地面灌溉技术,开沟培土耕作措施有利于水分入渗和作物根系生长,可减少灌水量和深层渗漏量,显著提高灌溉水利用效率^[4-5],尤其是在垄上覆膜的垄膜沟灌技术基础上发展的集雨补灌种植技术体系在黄土高原半干旱地区农业生产中得到了广泛应用^[6-7];膜下滴灌技术是近 20 年发展起来的相对先进的节水灌溉技术,该技术将覆膜栽培和滴灌灌溉结合,具有明显的节水节肥、抑蒸保墒的优势,在我国干旱半干旱地区农业生产中发挥了巨大作用。然而,由于河套灌区地表水资源相对其他旱区丰富,农民节水意识薄弱,例如垄膜沟灌、膜下滴灌等节水灌溉技术至今并未得到足够的关注和应用。

春玉米是河套灌区第二大粮食作物,近年的播种面积约 34 万 hm^2 ,约占粮食作物播种面积的 50%。目前,灌区内春玉米种植主要以畦灌为主,沟

灌和滴灌等节水灌溉技术在河套灌区春玉米的应用研究仅处于起步探索阶段,受限于配套技术、成本投入、农民认知等多方面因素,并未得到大面积的推广。李成等^[8]研究了垄膜沟灌种植模式下的土壤水热状况,并对比分析了不同施肥水平下的春玉米生长情况,为垄膜沟灌技术在河套灌区的应用提供了理论依据。膜下滴灌技术在河套灌区的研究较早关注的是经济效益较高的加工番茄^[9],之后孙贯芳等^[10]研究了不同膜下滴灌制度下的土壤水热盐运移规律,指出河套灌区膜下滴灌土壤盐分调控应为生育期滴灌灌溉和非生育期漫灌洗盐双重调控。此外,前人也建立了井渠结合膜下滴灌的土壤盐分运移模型,为下一步膜下滴灌推广应用以及相对应的秋浇制度提供了建议与参考^[11]。总体而言,关于河套灌区节水灌溉方式的研究大多关注单一灌溉方式下土壤水盐过程及作物生长响应,多种灌溉方式下作物耗水特性的响应差异和对比传统畦灌在经济效益方面的分析研究还较少。

本研究在河套灌区连续开展 3 年的田间定位试验,以传统畦灌为对照,研究不同节水灌溉方式(垄膜沟灌、膜下滴灌)和不同灌溉水平下春玉米耗水特性和作物产量的响应关系,并对比分析不同处理下春玉米生产的经济效益,以期寻求最适宜的节水灌溉方式和制度,进一步完善河套灌区春玉米节水灌溉技术体系,为灌区农业节水灌溉技术发展与农田水资源管理决策提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2016—2018 年的春玉米生长季(5—9 月)在河套灌区曙光试验站(40°46'N, 107°24'E,海拔 1 039 m)进行。该试验站地处内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区八岱乡旭光村,属典型的温带大陆性干旱气候,多年平均降雨量为 135 mm,年均蒸发量 2 350 mm,全年日照充足,昼夜温差较大。

全年无霜期为 135 ~ 150 d,日照时数 3 200 h 左右。

试验地土壤属于黄河灌淤土,土壤分层明显。0 ~ 40 cm 深度土壤饱和浸提液电导率 (ECe) 平均值为 6.6 dS/m,pH 值平均值为 8.5 (表 1),属于轻度盐渍化水平^[12]。0 ~ 40 cm 深度土壤有机质质量比 7.3 g/kg,全氮质量比 105.36 mg/kg,速效磷质量比 55.82 mg/kg,速效钾质量比 120.49 mg/kg。试验站

设有气象站、水面蒸发皿和地下水监测井,分别对气象数据、水面蒸发量和地下水位进行监测。试验区地下水位主要受周边农田灌溉影响,周年波动较大,一般在 2 ~ 3.5 m 之间 (图 1),地下水电导率为 1.8 dS/m 左右,pH 值为 7.7 左右。试验田每年作物收获后 (约 11 月初) 采用引黄水漫灌 (俗称“秋浇”),灌水定额 150 ~ 180 mm。

表 1 河套灌区曙光试验站 2016 年播前土壤基本理化性质

土层深度/		质量分数/%			容重/	田间持水率/	含水率/	ECe/	pH 值
cm		砂粒	粉粒	黏粒	(g·cm ⁻³)	(cm ³ ·cm ⁻³)	(cm ³ ·cm ⁻³)	(dS·m ⁻¹)	
0 ~ 20		32.2	47.8	20.0	1.4	0.29	0.23	8.1	8.7
20 ~ 40		23.2	53.8	23.0	1.4	0.32	0.27	5.0	8.2
40 ~ 60		29.7	47.2	23.1	1.4	0.31	0.26	3.5	8.2
60 ~ 80		94.1	3.8	2.1	1.5	0.28	0.19	2.8	8.3
80 ~ 100		49.3	34.7	16.0	1.4	0.31	0.29	2.4	8.1

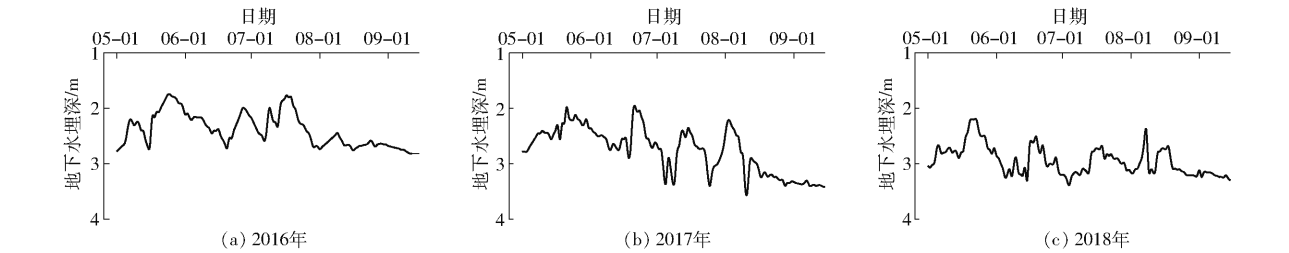


图 1 河套灌区曙光试验站 2016—2018 年春玉米生长季内地下水埋深

Fig. 1 Groundwater table during growing seasons of spring maize in Shuguang Experiment Station of Hetao Irrigation District in 2016—2018

1.2 田间试验

1.2.1 种植模式

供试作物为春玉米,品种为“西蒙 6 号”,采用“一膜两行”的宽窄行种植方式,地膜为厚度 8 μm 高压聚乙烯地膜,膜内为窄行距 30 cm,膜间为宽行距 70 cm (图 2)。其中沟灌处理的沟深 20 cm,垄肩宽 60 cm,垄上覆膜,膜下种植 2 行玉米 (图 2b);滴灌处理为膜下滴灌,选择贴片式滴灌带 (直径 16 mm),工作压力为 0.1 MPa,滴头流量 2.5 L/h,滴头间距 30 cm,与株距一致。所有处理均覆膜后点播,株距

30 cm,播种深度 5 cm,播种密度 66 667 株/hm²。3 年田间试验具体播种日期分别为 2016 年 4 月 27 日、2017 年 4 月 28 日和 2018 年 4 月 29 日,收获日期分别为 2016 年 9 月 9 日、2017 年 9 月 8 日和 2018 年 9 月 10 日。

1.2.2 试验设计

田间试验采用裂区试验设计,主处理为灌溉方式,包括畦灌、沟灌和滴灌;次处理为灌水水平,其中畦灌 (BI) 为对照处理,仅设置一个灌溉水平,依照当地黄河引水日期和传统灌溉习惯执行;沟灌和滴

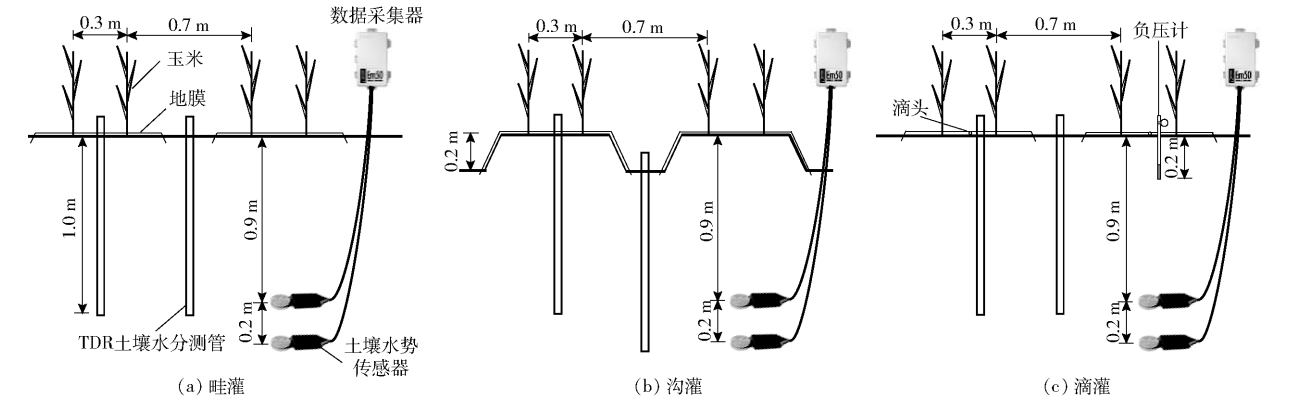


图 2 河套灌区春玉米不同灌溉方式种植模式示意图

Fig. 2 Cultivating patterns of spring maize under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

灌方式下分别设置高(H)、中(M)和低(L)3个灌溉水平。沟灌处理参考玉米需水量和需水规律^[13],3个灌溉水平分别为推荐灌溉定额(450 mm)的1倍(450 mm,FI-H)、0.8倍(360 mm,FI-M)和0.6倍(270 mm,FI-L),分别在玉米的三叶期、拔节期、抽雄期和灌浆期灌水4次;而滴灌处理是通过控制土壤水势下限指导灌溉^[14],参考前人在河套灌区膜下滴灌春玉米生产的研究结果^[10,15],分别控制土壤基质势下限为-10(DI-H)、-30(DI-M)、-50 kPa(DI-L),每次灌水10 mm(参考玉米生育期内最大日蒸发量),直至灌浆后期灌溉停止。因此,田间试验共包含7个处理,每个处理重复3个小区,小区规格为宽4 m、长15 m,每小区包含8行玉米。小区四周均设有畦埂,且同一灌溉方式小区之间间隔2 m、不同灌溉方式小区之间间隔5 m,以减少灌溉水分侧渗影响。

1.2.3 施肥与田间管理

试验地底肥于每年春季播种之前耕翻时施入,分别采用尿素、磷酸二铵和硫酸钾按照纯氮150 kg/hm²、P₂O₅180 kg/hm²和K₂O45 kg/hm²施入量均匀撒施后翻耕。所有处理玉米生育期内追施纯氮150 kg/hm²,畦灌和沟灌均结合灌浆期灌水时均匀撒施;滴灌处理则是自拔节期后采用水肥一体化形式将总追肥量平均到每次灌水的尿素施用量随灌水施入。保证所有处理每年累积施肥量一致。其他田间管理,如除草、病虫害防治等同周边农田一致。

1.3 观测指标与计算方法

1.3.1 作物产量及地上部生物量

每年9月上旬春玉米成熟后,在每个小区剔除边行之外的6行玉米(每小区共8行)中S形选取5株长势均匀、无病虫害玉米植株,从地表处剪取收获整个植株(每处理共计15株),其中籽粒经晾晒风干后脱粒,称量,然后根据种植密度计算得出籽粒产量(Y_{grain});地上部除籽粒外的其他干物质经80℃干燥至质量恒定后称量,得除籽粒之外地上部生物量(Y_{straw}),然后计算收获指数(HI)

$$HI = \frac{Y_{\text{grain}}}{Y_{\text{grain}} + Y_{\text{straw}}} \tag{1}$$

1.3.2 作物水分利用

(1)土壤含水率

分别在膜内和膜间埋设TDR土壤水分测管(图2),生长季内每间隔10 d利用TDR便携式土壤水分测量仪(TRIME-PICO型,IMKO,德国)测量土壤体积含水率1次,测量深度为20、40、60、80、100 cm,然后通过空间加权平均法计算0~100 cm深度土壤平均含水率(cm³/cm³)和贮水量(mm)。

(2)土壤水势

用于指导滴灌灌溉的土壤水势通过埋设在滴头正下方20 cm深度处的负压计来监测,埋设位置见图2c。每天08:00和15:00读取数据,一旦达到所设定阈值,立即启动灌溉。另外,前人在该试验基地的研究表明,土壤剖面内夹砂层的存在限制了玉米根系的生长,玉米根系主要分布在0~80 cm深度内^[16-17],因此,本研究中将玉米根区深度定义为0~100 cm,该深度足以包含绝大多数玉米根系,以满足计算玉米水分利用的需要。为监测根区下层界面的水势梯度,在玉米窄行正下方埋设土壤水势传感器(MPS-6型,Decagon,美国),埋设深度分别为90、110 cm(图2),通过数据采集器(EM50型,Decagon,美国)每30 min自动采集土壤水势数据,以计算根区下层土壤水分通量。

(3)作物实际耗水量

作物实际耗水量(ET)采用水量平衡方程计算,即

$$ET = P + I + \Delta S + G - D - R \tag{2}$$

其中
$$\Delta S = h\theta_1 - h\theta_2 \tag{3}$$

- 式中
- P ——降雨量,mm

I ——灌水量,mm

ΔS ——生长季初末根区贮水量差值,mm

h ——根区深度,取100 cm

θ_1 ——生长季初期土壤体积含水率,cm³/cm³

θ_2 ——生长季末期土壤体积含水率,cm³/cm³

R ——地表径流,本研究地势平坦且小区之间设有隔离畦埂,此项忽略

G ——地下水毛管上升补给量,mm

D ——深层渗漏量,mm

本研究将 G 和 D 合并考虑为根区下层(100 cm深度处)水分通量 Q ,可以通过达西定律公式计算

$$Q = G - D = -K(\varphi) \left(\frac{d\varphi}{dx} + 1 \right) = -K(\varphi) \left(\frac{\varphi_{110} - \varphi_{90}}{x_{110} - x_{90}} + 1 \right) \tag{4}$$

其中
$$K(\varphi) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^m \tag{5}$$

- 式中
- $K(\varphi)$ ——非饱和导水率,mm/h

φ_{110} ——110 cm深度处土壤水势,cm

φ_{90} ——90 cm深度处土壤水势,cm

K_s ——100 cm深度处饱和导水率,mm/h

θ ——100 cm深度处实际含水率,cm³/cm³

θ_s ——100 cm深度处饱和含水率,取0.4 cm³/cm³

m ——经验系数

水分特征曲线采用高速离心法 (CR21 型, Hitachi, 日本) 测定; 饱和导水率 K_s 由定水头法测定, 100 cm 深度处 K_s 为 13.6 mm/h; 非饱和导水率由非饱和导水率自动测量系统测定; 土壤水势由水势传感器监测; 经验系数 m 取 2.1^[18-19]。

(4) 水分利用效率

水分利用效率 (WUE) 计算式为

$$WUE = \frac{Y_{\text{grain}}}{ET} \tag{6}$$

灌溉水利用效率 (WUEi) 计算式为

$$WUEi = \frac{Y_{\text{grain}}}{I} \tag{7}$$

(5) 作物水分生产函数

作物产量与耗水量之间的关系表达式为^[20]

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right) \tag{8}$$

式中 Y_a ——作物实际籽粒产量, kg/hm²
 Y_m ——作物最高产量, kg/hm²
 ET_a ——作物实际耗水量, mm
 ET_m ——作物最大耗水量, mm
 K_y ——作物产量-水分响应系数

本研究针对沟灌和滴灌处理, 分别选择连续 3 年中最大产量和最大耗水量为各自灌溉方式下的 Y_m 和 ET_m , 然后分别计算沟灌和滴灌处理下的 K_y 。

1.3.3 经济效益分析

农业生产的净收益表达式为

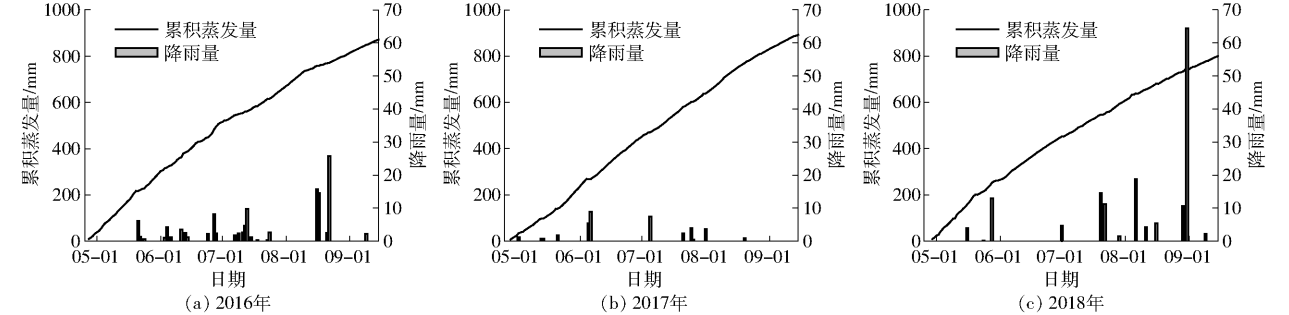


图3 河套灌区2016—2018年春玉米生长季内累积蒸发量和降雨量

Fig.3 Cumulative evaporation and rainfall during growing seasons of spring maize in 2016—2018 in Hetao Irrigation District

按照当地黄河引水和灌溉习惯, 春玉米生长季内共灌溉3次, 每季总灌溉定额为525 mm; 沟灌处理春玉米生长季内共灌水4次, 高、中、低3个水平处理的灌溉定额分别为450、360、270 mm; 而滴灌条件下通过控制根区土壤不同的基质势下限来实现不同的灌溉水平, 处理间灌水次数和累积灌水量显著差异, 3个春玉米生长季高、中、低水平的灌溉量分别在340~440 mm、140~300 mm和70~130 mm之间, 其中同等灌溉水平下降雨较少的2017年灌水量明显多于其他年份。各处理具体灌

$$P_n = Y_{\text{grain}} P_{\text{grain}} - C_t \tag{9}$$

式中 P_n ——净收益, 元/hm²
 P_{grain} ——籽粒价格, 元/t
 C_t ——总成本, 元/hm²

总支出中分为固定支出和可变支出^[21]。针对本研究实例, 固定支出主要包含农业生产资料和田间管理费用, 包括种子、农药、化肥、秋季翻耕等; 可变支出主要为因灌溉管理不同的支出, 包括灌溉系统和材料的折旧、灌溉用水、用电、用工等。上述参数的计算均参照生产季度当时的市场价格, 包括玉米价格、用工价格、水价等。所有灌溉成本的计算前提是田间供水系统 (如水井、水泵、主输水管道等) 已配备, 可以保证随时的灌水需要。

2 结果与分析

2.1 降雨蒸发及灌溉情况

2016—2018年春玉米生长季累积降雨量分别为123、37、135.1 mm (图3)。分析1990—2010年的气象数据, 发现该区域玉米生长期 (5—9月) 平均降雨量为92 mm, 因此2017年属于典型的干旱年, 而2016、2018年则属于湿润年。2016、2018年8月中下旬 (春玉米灌浆期) 均有一次较大降雨, 分别为26、66 mm。3个生长季内累积水面蒸发量分别为904.9、948.8、850.2 mm (图3), 蒸降比分别为7.4、25.6和6.3。

本研究以当地普遍应用的畦灌为对照处理,

水次数和灌溉量见表2。

2.2 春玉米产量与生物量

不同灌溉方式、灌溉水平及二者交互作用均显著影响玉米籽粒产量 ($P < 0.05$) (表3)。在同一灌溉方式下, 玉米籽粒产量随灌水量的增多而显著增加; 不同灌溉方式之间比较发现, 控制土壤基质势下限-10 kPa的滴灌高水处理 (DI-H) 籽粒产量显著高于其他处理, 3年平均值达到16.0 t/hm²; 而最小产量同样出自滴灌处理, 为控制下限-50 kPa的滴灌低水处理, 3年平均籽粒产量仅为10.6 t/hm²。沟

表 2 河套灌区春玉米不同灌溉方式下灌水次数和灌溉量

Tab.2 Irrigation times and volume for spring maize cropping under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

灌溉方式	灌水水平	2016 年		2017 年		2018 年	
		灌水次数	灌溉量/mm	灌水次数	灌溉量/mm	灌水次数	灌溉量/mm
畦灌	BI	3	525	3	525	3	525
沟灌	FI-H	4	450	4	450	4	450
	FI-M	4	360	4	360	4	360
	FI-L	4	270	4	270	4	270
滴灌	DI-H	26	340	33	490	38	440
	DI-M	14	140	26	300	24	240
	DI-L	7	70	13	130	10	100

灌高、中、低 3 个灌水处理 3 年平均籽粒产量分别为 14.4、13.3、11.4 t/hm²,而作为对照的畦灌处理,3 年平均籽粒产量为 13.2 t/hm²。年际之间比较发

现,畦灌和沟灌处理在降雨较少的 2017 年各处理籽粒产量均低于其他 2 年,而滴灌下产量并没有明显降低,这说明滴灌灌溉方式更加有利于在干旱年保持较高的作物产量。

玉米地上部秸秆是当地牲畜主要粗饲料的原料之一。灌溉方式和灌水显著影响地上部生物量,但二者的交互作用在除 2017 年之外的其他 2 个生长季内未达到显著水平。和籽粒产量响应一致,在同一灌溉方式下,地上部生物量随灌水量的增多显著增加(表 3);所有处理中,3 个生长季平均最大地上部生物量出自沟灌的灌水较多的两个处理,其中沟灌高水(FI-H)处理(13.6 t/hm²)和中水(FI-M)处理(13.5 t/hm²)二者之间差异不显著,而滴灌处理下土壤水势下限为-50 kPa 的低水处理(DI-L)地上部生物量最低。

收获指数反映地上部干物质向籽粒的转运效

表 3 河套灌区不同灌溉方式下春玉米籽粒产量、地上部生物量及收获指数

Tab.3 Grain yield, aboveground biomass and harvest index of spring maize under different irrigation methods in Hetao Irrigation District										
灌溉方式	灌水水平	籽粒产量/(t·hm ⁻²)			地上部生物量/(t·hm ⁻²)			收获指数		
		2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年
畦灌	BI	13.3 ^c	12.9 ^{cd}	13.5 ^b	10.8 ^c	11.5 ^b	13.2 ^b	0.55 ^a	0.53 ^b	0.51 ^b
沟灌	FI-H	14.7 ^a	14.1 ^{bc}	14.3 ^b	13.0 ^{ab}	12.9 ^a	15.1 ^a	0.53 ^{ab}	0.52 ^b	0.49 ^b
	FI-M	13.7 ^{bc}	12.1 ^d	14.1 ^b	13.4 ^a	12.7 ^a	14.3 ^a	0.51 ^b	0.49 ^c	0.50 ^b
	FI-L	11.8 ^d	10.9 ^{de}	11.5 ^c	12.0 ^b	9.8 ^c	11.9 ^c	0.50 ^b	0.53 ^b	0.49 ^b
滴灌	DI-H	14.9 ^a	16.2 ^a	16.9 ^a	14.0 ^a	11.6 ^b	13.2 ^b	0.52 ^{ab}	0.58 ^a	0.56 ^a
	DI-M	14.1 ^b	15.6 ^{ab}	16.0 ^{ab}	12.3 ^b	11.0 ^b	13.6 ^{ab}	0.53 ^{ab}	0.59 ^a	0.54 ^a
	DI-L	12.0 ^d	9.4 ^e	10.3 ^d	10.2 ^c	9.0 ^c	9.8 ^d	0.54 ^a	0.51 ^b	0.51 ^b
灌溉方式		**	**	**	**	**	**	*	*	**
灌水水平		**	**	**	*	**	**	**	**	**
灌水方式×灌水水平		*	**	*		**			*	

注:同一列中不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$);**表示在 $P<0.01$ 水平上显著;*表示在 $P<0.05$ 水平上显著。下同。

率。灌溉方式和灌溉水平显著影响收获指数,但其在不同处理间的响应规律与籽粒和地上部生物量不同,例如,沟灌高水和中水处理虽然取得了最高的地上部生物量,但收获指数较小,并没有获得最高的籽粒产量,表明该处理下干物质转运效率较低。收获指数最高的处理为滴灌高水(DI-H)和滴灌中水DI-M(表 3),这说明保持根区较高基质势处理有利于干物质向籽粒中的转运,从而提高作物籽粒产量和收获指数^[22]。

2.3 春玉米水分利用

研究区域的地下水埋深一般在 2~3.5 m 之间,且季节性波动较大(图 2),该浅层地下水势必会通过毛管上升对根区土壤水分进行补给^[23]。本研究通过观测根区下层土壤水势梯度,计算水分通量 Q ,进而分析生育期内毛管上升补给量和深层渗漏量。

就整个生育期而言, Q 为正,表明深层渗漏量大于毛管上升补给量, Q 为负,则表示深层土壤水分通量以地下水毛管上升补给根区为主。不同灌溉方式之间的 Q 值比较发现,畦灌以深层渗漏为主,平均有 10% 的灌水通过深层渗漏损失,而灌水较少的沟灌和滴灌处理则以地下水的毛管上升为主,例如滴灌低水处理每个生长季有 10.5~29.0 mm 的地下水通过毛管上升补给到根区供作物吸收(表 4)。

对于湿润年 2016 年和 2018 年,畦灌和沟灌、滴灌下的高水处理下玉米收获后的根区贮水量较播前增加(ΔS 为负);在干旱的 2017 年,除滴灌高水之外的所有处理 ΔS 均为正,表示玉米收获后的根区土壤水分较播前降低。畦灌条件下作物实际耗水量 ET 在 3 年平均为 537 mm,沟灌高、中、低水 3 个处理 ET 的平均值分别为 462、423、358 mm,而滴灌

表 4 河套灌区不同灌溉方式下春玉米水分利用情况

Tab.4 Water use of spring maize under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

年份	灌溉方式	灌水水平	I/mm	P/mm	Q/mm	$\Delta S/mm$	ET/mm	$\frac{Q}{I}/\%$
2016	畦灌	BI	525	123	53.0	-42.0	553.0	10.1
		FI-H	450	123	33.0	-11.0	529.0	7.3
	沟灌	FI-M	360	123	22.4	3.0	463.6	6.2
		FI-L	270	123	-6.2	18.0	417.2	-2.3
		DI-H	340	123	17.0	-6.0	440.0	5.0
	滴灌	DI-M	140	123	-3.0	66.0	332.0	-2.1
		DI-L	70	123	-29.0	96.0	318.0	-41.4
	畦灌	BI	525	37	45.0	9.0	526.0	8.6
		FI-H	450	37	12.0	18.0	493.0	2.7
	沟灌	FI-M	360	37	3.3	43.0	436.7	0.9
2017		FI-L	270	37	5.0	60.0	362.0	1.9
		DI-H	490	37	4.0	-12.0	511.0	0.8
	滴灌	DI-M	300	37	11.8	36.0	361.2	3.9
		DI-L	130	37	-21.9	108.0	296.9	-16.8
	畦灌	BI	525	135	59.0	-68.0	533.0	11.2
		FI-H	450	135	56.0	-8.0	521.0	12.4
2018	沟灌	FI-M	360	135	42.0	-14.0	439.0	11.7
		FI-L	270	135	-1.7	19.0	425.7	-0.6
		DI-H	440	135	11.2	-26.0	537.8	2.5
	滴灌	DI-M	240	135	0	45.6	420.6	0
		DI-L	100	135	-10.5	60.0	305.5	-10.5

表 5 河套灌区春玉米不同灌溉方式水分利用效率与灌溉水利用效率

Tab.5 Water use efficiency and irrigation water use efficiency of spring maize under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

灌溉方式	灌水水平	WUE				WUEi			
		2016 年	2017 年	2018 年	平均	2016 年	2017 年	2018 年	平均
畦灌	BI	2.41	2.45	2.53	2.46	2.53	2.46	2.57	2.52
	FI-H	2.78	2.86	2.74	2.79	3.27	3.13	3.18	3.19
沟灌	FI-M	2.96	2.77	3.21	2.98	3.81	3.36	3.92	3.69
	FI-L	2.83	3.01	2.70	2.85	4.37	4.04	4.26	4.22
	DI-H	3.39	3.17	3.14	3.23	4.38	3.31	3.84	3.84
滴灌	DI-M	4.25	4.32	3.80	4.12	10.07	5.20	6.67	7.31
	DI-L	3.77	3.17	3.37	3.44	17.14	7.23	10.30	11.56
灌溉方式		**	**	**	**	**	**	**	**
灌水水平		**	**	*	*	**	**	**	**
灌溉方式×灌水水平		*	*	*		**	**	**	**

春玉米籽粒产量还有继续增加的可能。另外,从图 4a 也可看出,同等 ET 情况下滴灌春玉米籽粒产量普遍高于沟灌处理。

相对产量减少与相应的相对耗水量减少之间的关系是被广泛应用的水分生产函数,其中产量-水分响应系数 K_y 反映作物对于土壤水分胁迫的敏感程度^[23]。本研究中,沟灌和滴灌 K_y 分别为 0.821 5 和 0.684,说明滴灌条件下,作物耗水量的减少所引起

3 个灌水水平的平均 ET 分别为 496、371、307 mm,即在沟灌和滴灌条件下,随着灌水量的增加,作物耗水量逐渐增加(表 4)。

不同灌溉方式和灌溉水平显著影响水分利用效率(WUE)及灌溉水利用效率(WUEi)($P < 0.05$) (表 5)。灌溉方式之间差异显著,其中畦灌 3 年平均 WUE 为 2.46 kg/m³,而沟灌 WUE 为 2.79 ~ 2.98 kg/m³,滴灌 WUE 最高,在 3.23 ~ 4.12 kg/m³ 之间。对于同一种灌溉方式(沟灌或滴灌)而言,3 年 WUE 平均值均表现为中水处理最高。另外,WUEi 由大到小依次为滴灌、沟灌、畦灌,且在同一灌溉方式内随着灌水量的减少显著增加($P < 0.05$) (表 5)。

一般而言,随着耗水量的增加,作物产量先增加,在到达最大值(在现有外界环境条件下作物潜在产量得到最大发挥)之后,随着耗水量等增加,作物产量开始降低。对于滴灌而言,符合抛物线的变化规律(图 4a),即在耗水量 460 mm 左右时,春玉米籽粒产量可以达到最高值(16 t/hm² 左右);但是对于沟灌来说,现有数据拟合曲线则基本符合直线趋势,未找到产量的最高值,也就是说本研究中的沟灌处理中的耗水量可能还未达到最大值,如果继续增加灌水、降雨(或增加土壤储水、地下水补给等),

的减产幅度更小,也就是说滴灌更易于在潜在干旱胁迫下保持较高的作物产量。

2.4 经济效益分析

农民收入与农产品价格密切相关。2016—2017 年度内蒙古产区玉米价格为 1 631 元/t,2017—2018 年度国内玉米价格回升,达到 1 761 元/t,2018—2019 年度价格为 1 810 元/t^[24-25]。因此按照此价格计算,在本研究的 2016—2018 年,随着国内玉米

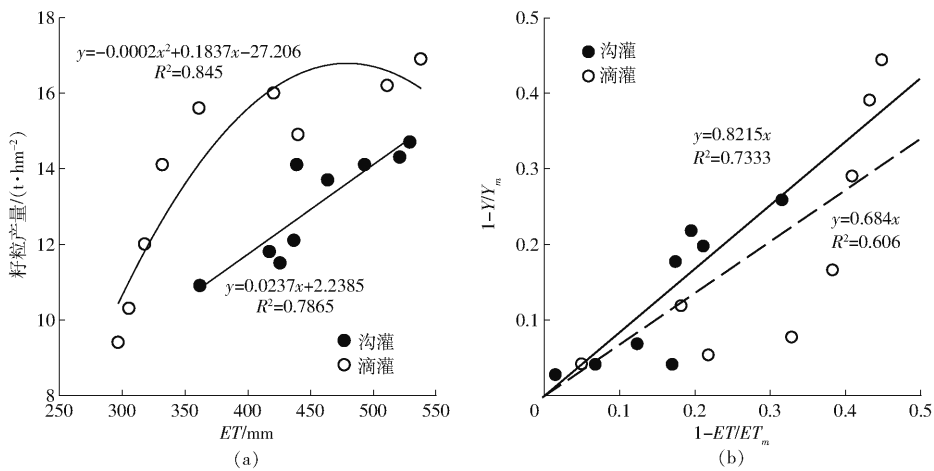


图4 河套灌区不同灌溉方式下籽粒产量与作物耗水量之间的关系及产量-水分响应系数

Fig.4 Relationships between grain yield and ET and coefficient of yield response to water under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

价格的回升,农民玉米生产收入逐年增加(表6)。3年平均收入以滴灌高水处理最高,滴灌条件下的低水处理因大幅减产,收入最低(表6)。

表6 河套灌区不同灌溉方式下玉米生产收入

Tab.6 Income of spring maize production under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

参数	灌溉方式	灌水水平	2016年	2017年	2018年	平均值
	畦灌	BI	13.3	12.9	13.5	13.2
籽粒产量/ (t·hm ⁻²)	FI-H	FI-H	14.7	14.1	14.3	14.4
		FI-M	13.7	12.1	14.1	13.3
	FI-L	FI-L	11.8	10.9	11.5	11.4
		DI-H	14.9	16.2	16.9	16.0
	DI-M	DI-M	14.1	15.6	16.0	15.2
		DI-L	12.0	9.4	10.3	10.6
玉米籽粒单价/ (元·t ⁻¹)			1 631	1 761	1 810	
	畦灌	BI	21 692	22 717	24 435	22 948
收入/(元·hm ⁻²)	FI-H	FI-H	23 976	24 830	25 883	24 896
		FI-M	22 345	21 308	25 521	23 058
	FI-L	FI-L	19 246	19 195	20 815	19 752
		DI-H	24 302	28 528	30 589	27 806
	DI-M	DI-M	22 997	27 472	28 960	26 476
		DI-L	19 572	16 553	18 643	18 256

不同灌溉方式下的成本支出明细见表7。不同灌溉处理中的相同费用主要有种子、化肥、农药等农资材料以及播种、收获用工费用等;沟灌由于播前增加了起垄耕作,增加了部分用工(或机械)费用,而畦灌和沟灌种植均需要进行追肥操作,产生了追肥用工费用,而滴灌采用水肥一体化技术,无此费用(表7)。不同处理之间生产支出的差异更多体现在灌溉管理方面,其中畦灌和沟灌的灌溉系统主要为田间输水管道(以聚乙烯水带为例)和水表等材料

费,按照控制面积1 hm²计算,合计300元,所有灌溉管材使用年限按照5年计算,所以畦灌和沟灌处理灌溉系统折旧费为每公顷每年60元;滴灌灌溉系统主要包括滴灌带及其配套管材,其中滴灌带一般选择每年更换一次的可回收薄壁滴灌带,价格为0.15元/m,滴灌带田间布设间距为1 m,所以每公顷滴灌带价格为1 500元;每套滴灌系统其他配套管材约2 000元,包含输水管道100元(按照φ60 mm PVC管200 m计算),每套滴灌系统需注肥器1 500元,其他如水表、压力表、阀门、过滤器、变径、三通等连接管件耗材400元。除滴灌带外的其他配套管材按照使用寿命为5年,每套系统按照控制1 hm²计算,每年折旧费用为400元/hm²,因此滴灌灌溉设备折旧费共计1 900元/hm²。灌溉水费(0.11元/m³)、电费(0.5元/(kW·h)),按照当地主管部门统一定价计算^[26]。在田间渠系和管道已配套的前提下,畦灌和沟灌的灌溉管理用工按照每公顷灌水一次需要1个人工计算(人工费用150元/d),所以畦灌灌水3次,需450元,沟灌灌水4次,需600元,而滴灌采用水肥一体化技术,灌水施肥操作相对轻松,每次灌溉按照工作1 h(10元用工费)计算,3个滴灌水平的灌溉次数平均为32、21、10次,即用工费320、210、100元(表7)。综上,相对于畦灌,沟灌种植由于增加了播前耕作而增加了总支出,而滴灌主要是增加灌溉系统成本而增加了总支出(表7)。就净收益而言,沟灌下高水处理净收益较畦灌增加13%,相对节水14%,而中水沟灌净收益与畦灌持平,但相对节水31%。而滴灌中高水和中水处理均高于畦灌,分别增加净收益28%和22%,且二者相对于畦灌分别节水19%和57%(表7)。

表 7 河套灌区不同灌溉方式下玉米生产每年支出明细及经济效益分析

Tab.7 Annual expense of maize production and its economic analysis under different irrigation methods in Hetao Irrigation District

项目		畦灌	沟灌			滴灌		
			FI-H	FI-M	FI-L	DI-H	DI-M	DI-L
农业生产资料与田间管理(固定支出)/ (元·hm ⁻²)	种子	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
	肥料	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
	秋浇	525	525	525	525	525	525	525
	播前耕作	450	600	600	600	450	450	450
	播种和收获用工(或机械)	900	900	900	900	900	900	900
	除草剂和植保措施	300	300	300	300	300	300	300
	地膜和培土	1 200	1 500	1 500	1 500	1 200	1 200	1 200
	追肥用工	600	600	600	600			
灌溉管理(可变支出)/ (元·hm ⁻²)	灌溉水费	578	440	330	220	466	250	110
	灌溉用电费	158	120	90	60	508	273	120
	灌溉设备折旧	60	60	60	60	1 900	1 900	1 900
	灌溉用工	450	600	600	600	320	210	100
总支出/(元·hm ⁻²)		10 221	10 645	10 505	10 365	11 569	11 008	10 605
总收入/(元·hm ⁻²)		22 948	24 896	23 058	19 752	27 806	26 476	18 256
净收益/(元·hm ⁻²)		12 727	14 251	12 553	9 387	16 237	15 468	7 651
相对于畦灌节水率/%			14	31	49	19	57	81

3 讨论

3.1 不同灌溉方式下的作物水分利用特征

按照当地黄河引水灌溉传统,本研究试验地每年秋季作物收获后均进行一次漫灌,一方面淋洗盐分,另一方面为次年春播提供必要墒情。所以春季春玉米播种时的土壤墒情一般较好(表 1),可以满足作物出苗和早期幼苗生长,生长季内的第一次灌溉一般都在播种后的 1 个月左右(6 叶期至拔节期之间)进行。

畦灌中畦田的面积和平整程度,以及沟灌中垄沟规格和长度等,显著影响灌水时水流推进速度和水分均匀度,进而影响作物水分利用和生长发育^[4]。本研究中,在试验前进行了土地的平整,且小区面积仅为 4 m×15 m,取样位置尽量选择小区中部,所以可以忽略畦灌和沟灌下水流推进造成的土壤水分的差异。不同灌溉方式之间比较发现,传统畦灌一般有 10% 左右的灌水通过深层渗漏损失,水分利用率较低,与前人研究结果基本一致^[27];沟灌是精细地面灌溉方式,本研究中沟灌中水和高水处理在没有显著降低,甚至提高籽粒产量的同时,显著减少灌溉水量,提高了水分利用高效率(表 5),这是因为沟灌的灌水定额相对较小,并且灌入沟中的水分在土壤中还有着比较明显的侧向入渗,因而减少甚至杜绝了深层渗漏的发生^[28]。前人在干旱半干旱地区对红花籽的研究结果表明,垄沟灌溉技术节约了 30% 的灌溉水量,作物产量仅减少 13%,此

差异未达到显著水平^[29]。

而滴灌通过对根区土壤进行长时间、低流量的局部供给,基本上不会产生地表径流和深层渗漏,同时地表覆膜减少了裸地蒸发,更利于提高水分利用效率(表 5)。另外,前人研究还表明,玉米花后干物质积累量占总生物量的 73% 以上,是玉米籽粒产量形成的主要产物来源,也就是说玉米籽粒产量很大程度决定于玉米生育后期的光合生产能力^[30-31],而滴灌条件下“少量多次”的灌溉方式,更有利于维持中后期根区土壤适宜的水肥状况,从而促进作物籽粒灌浆和最终产量的形成^[32]。另外,本研究滴灌处理中,维持最低土壤水势的滴灌处理(DI-L)得到了最低的籽粒产量和地上部生物量。LEACH^[33]研究指出,随着土壤水势的降低,土壤-植物系统之间水分运输阻力逐渐增强,从而抑制作物光合与生长。另外,节水灌溉条件下减少一定量的 ET 并不会显著降低作物产量^[34-36]。本研究也表明,相对于传统畦灌,沟灌和滴灌处理作物实际耗水 ET 均显著降低(表 4),但部分高水、中水处理的籽粒产量反而增加(表 3),提高了水分利用效率。

水分生产函数中的产量-水分响应系数 K_y 反映作物对于土壤水分胁迫的敏感程度。本研究中,沟灌和滴灌 K_y 分别为 0.821 5 和 0.684,远小于 FAO 66(1.25)^[23]和前人的研究(1.26^[37]、1.47^[38]、1.5^[39])。该差异应主要归因于气候条件、作物品种、管理措施、土壤条件、灌溉方法,以及水分胁迫发生的具体生育时期^[40]。另外,还可能与本研究中所

选择的最大产量和最大耗水量有关(受限于本研究条件下周围环境和田间管理水平等多因素,二者可能并未达到真正的最大值);另外,按照 FAO 66 中的标准^[23],玉米($K_y = 1.25$)属于水分胁迫敏感型作物,但是也有学者认为,包括玉米在内的禾谷类作物属于中度耐旱作物,其耐旱性能较马铃薯等其他作物强^[41]。这其中的分歧肯定与作物品种特性和生长环境有关,随着生物育种技术的进步,更加耐旱品种的出现,改变了原有的阈值水平。相对而言,本研究中更应关注滴灌 K_y 小于沟灌,说明滴灌更适宜于在潜在干旱胁迫下保持较高的作物产量。考虑到 K_y 显著受到水分胁迫发生的具体生育时期的影响^[40],曾有研究指出在玉米水分敏感时期(如抽穗开花期)发生水分胁迫将会比其他时期产生较大的 K_y (大于3),其次为灌浆期和营养生长期^[42-43]。在相同的、较小灌水量条件下,相对于沟灌,“小流量、高频率、长时间”的灌溉特点使得膜下滴灌可以维持更多的水分在根区范围内,使得更多的水分被植物利用,相比沟灌水分的无效消耗更少,从而可以维持相对更高的作物产量。

3.2 不同节水灌溉方式下的经济效益分析

和传统畦灌相比,沟灌高水处理显著增加了籽粒产量和净收益,而中水处理籽粒产量和净收益均与畦灌持平,但相对节水 31%(表 7)。农业生产的收益不应仅局限于作物籽粒产量,节约的水分可以用来扩大种植面积,进而增加农业生产总收益,也就是说节水灌溉条件下的减产可以通过节约用水增加的灌溉面积来补偿^[35,44]。此外,还应该将调整灌溉方式之后水资源的重新配置带来的生态和社会效益考虑在内^[45]。

滴灌高水和中水处理在相对畦灌节水 19% 和 57% 的情况下,可以增加春玉米生产净收益 22% ~ 28%(表 7);另外,本研究旨在研究水分管理效应,因此应尽量消除其他因素对玉米生长的影响,所以保持了所有处理的施肥量一致,均为当地高产田推荐水平。但实际滴灌生产中应该考虑到滴灌水肥一体化技术在节水节肥方面的优势,有研究表明,滴灌在保证不减产的情况下,可以普遍节约肥料 30% ~ 50%。因此,实际生产过程中滴灌下的经济净收益理应更高。当然,还需要说明的是,本研究中是利用地下水进行的滴灌灌溉,如果采用引黄水滴灌的话,就涉及到黄河水由于高含沙无法直接使用的问题,

势必增加灌溉前期水处理成本;另外,地下水的利用一方面可以降低地下水位,减轻土壤盐渍化,另一方面地下水的过度开采又将打破原有的农业生态水文平衡,进而影响整个农业生产活动甚至生态环境。前人就河套灌区地下水的利用^[46]以及地下水适宜开采区域及其与引黄秋浇的结合问题^[11],进行了一些研究,提出可以在地下水矿化度小于 2 g/L 的地区开采地下水进行灌溉,并结合采用黄河水进行 2 年 1 次的秋浇压盐;而本研究结果可以为具体作物(玉米)包括沟灌和滴灌在内的节水灌溉技术的推广提供参考和技术补充,当然,针对需要综合考虑生产、经济甚至生态效益的节水灌溉适宜面积问题,还需要进行长时间、大尺度的系统研究。

河套灌区当地普遍应用的地表水畦灌(漫灌)水分利用效率较低,而采用节水灌溉之后,农户层面的经济结果是能够增加农民收入(表 7),而更高层面的结果(非农业)是减少农业水资源的利用量,可以有更多的水资源用于其他行业甚至黄河流域其他区域。不仅仅是决策者,农民也应该被告知采用节水灌溉之后所带来的直接和间接效益,以便更主动地选择节水灌溉,这样农田尺度和区域尺度的整体农业生产和社会效益才能得到提高^[21,47]。鉴于此,建议针对当地黄河引水条件、地下水资源条件(埋深、矿化度等)、农民接受程度等实际情况,选择适宜的节水灌溉方式。

4 结论

(1)畦灌条件下平均有 10% 的灌水通过深层渗漏而损失,而滴灌低水处理每个生长季有 10.5 ~ 29 mm 的地下水通过毛管上升补给根区而被作物吸收。

(2)相对于传统畦灌,沟灌高水处理可以增加玉米籽粒产量和净收益,中水处理可以在保持产量和净收益持平的情况下,节约灌溉水 31%;滴灌条件下的高水和中水处理在相对畦灌节水 19% 和 57% 的情况下,显著提高春玉米籽粒产量和净收益,拥有较高的水分利用效率。

(3)引水资源相对充足时,可以选择沟灌中水处理(360 mm),甚至高水处理(450 mm),可以获得与畦灌相当甚至略高的产量和经济效益;而在灌溉水资源相对亏缺且经济条件和农民接受度较高的地区,建议选择土壤基质势下限为 -30 kPa 的滴灌处理。

参 考 文 献

[1] 屈忠义, 杨晓, 黄永江. 内蒙古河套灌区节水工程改造效果分析评估[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 70-76.
QU Zhongyi, YANG Xiao, HUANG Yongjiang. Analysis and assessment of water-saving project of Hetao Irrigation District in

- Inner Mongolia [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 70–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150412&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.012. (in Chinese)
- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7059–7063.
YANG Jinsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, et al. Research on ecological management and ecological industry development model of saline-alkali land in the Hetao Plain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7059–7063. (in Chinese)
- [3] 苗庆丰, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区畦-沟分灌水分利用效率及节水效果试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 135–139.
MIAO Qingfeng, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Irrigation performance and water use efficiency in border-furrow combined irrigation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10): 135–139. (in Chinese)
- [4] 许迪, 李益农. 精细地面灌溉技术体系及其研究的进展[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 529–537.
XU Di, LI Yinong. Review on advancements of study on precision surface irrigation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 529–537. (in Chinese)
- [5] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 一种沟灌累积入渗量简化计算方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 801–810.
NIE Weibo, FEI Liangjun, MA Xiaoyi. Simplified calculating method for cumulative infiltration of furrow irrigation [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 801–810. (in Chinese)
- [6] 莫非, 周宏, 王建永, 等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1–17.
MO Fei, ZHOU Hong, WANG Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 1–17. (in Chinese)
- [7] 李玉玲, 张鹏, 张艳, 等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084–1096.
LI Yuling, ZHANG Peng, ZHANG Yan, et al. Effects of rainfall harvesting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature, and yield of spring maize in semi-arid areas [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1084–1096. (in Chinese)
- [8] 李成, 冯浩, 董勤各. 灌溉施肥对河套灌区垄膜沟灌春玉米土壤水热运移的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 44–51.
LI Cheng, FENG Hao, DONG Qinge. Effects of irrigation and fertilization on water and temperature variation of spring maize under plastic-mulching ridge-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 44–51. (in Chinese)
- [9] 叶志勇, 郭克贞, 赵淑银, 等. 河套灌区加工型番茄膜下滴灌技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 110–112.
YE Zhiyong, GUO Kezhen, ZHAO Shuyin, et al. Mulched drip irrigation of processed tomato in Hetao Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 110–112. (in Chinese)
- [10] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144–152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 144–152. (in Chinese)
- [11] 毛威, 杨金忠, 朱焱, 等. 河套灌区井渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 93–101.
MAO Wei, YANG Jinzhong, ZHU Yan, et al. Soil salinity process of Hetao Irrigation District after application of well-canal conjunctive irrigation and mulched drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 93–101. (in Chinese)
- [12] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [13] 肖俊夫, 刘战东, 陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 21–25.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, CHEN Yumin. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 21–25. (in Chinese)
- [14] 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66–72.
KANG Yuehu, WANG Fengxin, LIU Shiping, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66–72. (in Chinese)
- [15] 姬祥祥, 徐芳, 刘美含, 等. 土壤水基质势膜下滴灌春玉米生长和耗水特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 230–239.
JI Xiangxiang, XU Fang, LIU Meihan, et al. Investigation on growth and water use of spring maize under mulched drip irrigation based on soil matric potential [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 230–239. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181127&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.027. (in Chinese)
- [16] ZHOU L, FENG H, ZHAO Y, et al. Drip irrigation lateral spacing and mulching affects the wetting pattern, shoot-root regulation, and yield of maize in a sand-layered soil [J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 114–123.
- [17] ZHOU L, FENG H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 540–550.
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R] // FAO Irrigation and Drainage Paper 56UN – FAO, Rome, Italy, 1998.
- [19] ZHANG H, LIU H, WANG S, et al. Variations in growth, water consumption and economic benefit of transplanted cotton after winter wheat harvest subjected to different irrigation methods [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 14972.
- [20] DOORENBOS J, KASSAM A H. Yield response to water[R] // FAO Irrigation and Drainage Paper 33UN – FAO, Rome,

Italy, 1979.

- [21] MATOVIC G, BRODIC Z, DJURICIN S, et al. Profitability assessment of potato production applying different irrigation methods [J]. *Irrigation and Drainage*, 2016, 65(4): 502–513.
- [22] 董宝娣, 刘会灵, 王亚凯, 等. 作物高效用水生理生态调控机制研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10): 1465–1475. DONG Baodi, LIU Huiling, WANG Yakai, et al. Physio-ecological regulating mechanisms for highly efficient water use of crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1465–1475. (in Chinese)
- [23] STEDUTO P, HSIAO T C, FERERES E, et al. Crop yield response to water[R]//FAO Irrigation and Drainage Paper 66UN – FAO, Rome, Italy, 2012.
- [24] 中国农业信息网[EB/OL]. <http://www.agri.cn/>.
- [25] 魏斌. “十三五”以来中国玉米市场形势分析与展望[J]. *农业展望*, 2019(1): 8–15. WEI Bin. Analysis and prospect of maize market situation in China since the 13th five-year plan [J]. *Agricultural Outlook*, 2019(1): 8–15. (in Chinese)
- [26] 李建国. 全区水利工作纪事(2015年7月2日—8月25日)[J]. *内蒙古水利*, 2016(5): 79–80.
- [27] 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)
- [28] 汪顺生, 费良军, 高传昌, 等. 不同沟灌方式下夏玉米棵间蒸发试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 66–71. WANG Shunsheng, FEI Liangjun, GAO Chuangchang, et al. Soil evaporation of summer maize under different furrow irrigations [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 66–71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120914&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.014. (in Chinese)
- [29] SHAHROKHNIYA M H, SEPASKHAH A R. Effects of irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization on yield, water and nitrogen efficiencies of safflower [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 18–30.
- [30] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(3): 95–98. HUANG Zhihong, WANG Siyuan, BAO Yan, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize [J]. *Journal of Maize Science*, 2007, 15(3): 95–98. (in Chinese)
- [31] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 69–77. YANG Hengshan, XUE Xinwei, ZHANG Ruifu, et al. Effects of irrigation methods on yield and water use efficiency of maize in the West Liaohe Plain [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(21): 69–77. (in Chinese)
- [32] JHA S K, RAMATSHABA T S, WANG G, et al. Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 292–302.
- [33] LEACH J E. Photosynthesis and growth of spring barley: some effects of drought [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1980, 94(3): 623–635.
- [34] KANG S, SHI W, ZHANG J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation [J]. *Field Crops Research*, 2000, 67(3): 207–214.
- [35] LIANG Z S, ZHANG F S, ZHANG J H. The relations of stomatal conductance, water consumption, growth rate to leaf water potential during soil drying and rewatering cycle of wheat [J]. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 2002, 43(3): 187–192.
- [36] DU T, KANG S, ZHANG J, et al. Deficit irrigation and sustainable water resource strategies in agriculture for China's food security [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2253–2269.
- [37] RETTA A, HANKS R J. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation [J]. *Irrigation Science*, 1980, 1: 135–147.
- [38] HOWELL T A, SCHNEIDER A D, EVETT S R. Subsurface and surface micro irrigation of maize—Southern High Plains [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40: 635–641.
- [39] POPOVA Z, ENEVA S, PEREIRA L S. Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(1): 139–149.
- [40] EL-HENDAWY S E, SCHMIDHALTER U. Optimal coupling combinations between irrigation frequency and rate for drip-irrigated maize grown on sandy soil [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(3): 439–448.
- [41] University of Würzburg. Why cereal crops are so drought-tolerant[N/OL]. *ScienceDaily*, 27 April 2018. <http://www.sciencedaily.com/releases/2018/04/180427113245.htm>.
- [42] ZHANG X, PEI D, LI Z, et al. Management of supplemental irrigation of winter wheat for maximum profit[R]. UN – FAO, Rome, 2002.
- [43] IGBADUN H E, TARIMO A K P R, SALIM B A, et al. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1–3): 1–10.
- [44] ALI M H, HOQUE M R, HASSAN A A, et al. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(3): 151–161.
- [45] PEREIRA L S, OWEIS T, ZAIRI A. Irrigation management under water scarcity [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 57(3): 175–206.
- [46] 杨路华, 沈荣开, 曹秀玲. 内蒙古河套灌区地下水合理利用的方案分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 56–59. YANG Luhua, SHEN Rongkai, CAO Xiuling. Scheme of groundwater use in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(5): 56–59. (in Chinese)
- [47] SINHA I, BUTTAR G S, BRAR A S. Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Indian Punjab [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 185: 58–64.