

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.026

潘春洋, 杨树青, 张万锋, 等. 河套灌区盐渍化土壤下玉米多水源灌溉模式研究. 土壤, 2020, 52(3): 603–610.

## 河套灌区盐渍化土壤下玉米多水源灌溉模式研究<sup>①</sup>

潘春洋<sup>1</sup>, 杨树青<sup>1\*</sup>, 张万锋<sup>1,2</sup>, 韩天凯<sup>1</sup>

(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 呼伦贝尔市住房保障管理中心, 内蒙古呼伦贝尔 021000)

**摘要:** 为合理有效利用河套灌区水资源, 本研究采用井水(地下水)、渠水(地表水)2种水源联合灌溉, 研究较适宜的多水源灌溉模式对玉米生长特性及土壤水盐动态的响应机制。试验设置8个多水源灌溉模式: 井井井(JJJ)、井井渠(JJQ)、井渠井(JQJ)、渠井井(QJJ)、井渠渠(JQQ)、渠渠井(QQJ)、渠渠渠(QJQ)、渠渠渠(QQQ)及空白对照处理。结果表明: 随着灌溉井水次数的增加, 对玉米株高和茎粗抑制作用明显, 抑制程度依次为拔节期>灌浆期>抽雄期; 生育期内各处理均呈现出不同程度的积盐现象, 耕层积盐程度大于深层; 井水灌溉次数增加, 土壤积盐程度明显, QJQ处理的土壤盐分变化量在玉米耕层均低于其他井灌参与的处理, 且与QQQ处理差异较小; 拔节期灌溉渠水能有效淋洗土壤盐分; 灌溉两次及以上井水比灌溉一次及不灌井水的水分利用效率减少25.77%~31.61%; QJQ处理水分利用效率高于井灌参与的其他处理; 收获指数和氮肥偏生产力均呈现出QQQ处理最高, 其次为QJQ处理, JJJ处理最低的现象, 且QQQ与QJQ处理无显著差异。综合土壤水盐动态和作物指标等因素的分析, QJQ处理为适合当地玉米的较优多水源联合灌溉方案。

**关键词:** 多水源; 灌溉模式; 玉米; 盐分积累; 水分利用效率

中图分类号: S274.1 文献标志码: A

### Effects of Irrigation Patterns of Multi Water Sources on Maize Growth and Water and Salt Accumulation in Saline Soil in Hetao Irrigation Area

PAN Chunyang<sup>1</sup>, YANG Shuqing<sup>1\*</sup>, ZHANG Wanfeng<sup>1,2</sup>, HAN Tiankai<sup>1</sup>

(1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2 The Management Center of Hulunbuir Housing Security, Hulunbuir, Inner Mongolia 021000, China)

**Abstract:** In order to find the optimal irrigation pattern and reasonably and effectively utilize the water resources of Hetao Irrigation Area, joint irrigation patterns with two kinds of water sources, well water (groundwater) and canal water (surface water) was adopted to study their effects and mechanism on the growth of corn and water and salt accumulation in soil. Nine different irrigation patterns were designed, which included: well-well-well(JJJ), well-well-canal(JJQ), well-canal-well(JQJ), canal-well-well(QJJ), well-canal-canal(JQQ), canal-canal-well(QQJ), canal-well-canal(QJQ), canal-canal-canal(QQQ), and CK (no irrigation and fertilization). The results showed that with increase of well irrigation time, the inhibition became more obvious to the plant height and stem diameter of corn, and the inhibition degree was in an order of the jointing stage > filling stage > heading stage. Salt accumulation happened under all treatments but with different degrees during the growth period of corn. Salt was accumulated more in the tilling layer than in the deep layer. Soil salt accumulation became more evident with the increase of well irrigation times. The change of soil salt content in the tillage layer was lower under QJQ treatment than under other well irrigation treatments, and was near to QQQ treatment. Canal irrigation at the jointing stage could effectively wash soil salt. Well irrigated twice or more decreased water use efficiency by 25.77%–31.61% than those of well irrigated one time and irrigation without well water. Water use efficiency of QJQ treatment was higher than those of other treatments with well irrigation. QQQ treatment had the highest harvest index and nitrogen fertilizer partial productivity, followed by QJQ treatment, while JJJ treatment was the lowest, and no significant difference was found in harvest index and nitrogen fertilizer partial productivity between QQQ and QJQ treatments. Comprehensive analysis the dynamics of water and salt in soil and crop index and so on, QJQ treatment is

①基金项目: “十三五”国家科技支撑项目(2016YFC0400205) 和国家自然科学基金项目(51469021)资助。

\* 通讯作者(nmndysq@126.com)

作者简介: 潘春洋(1993—), 女, 吉林农安人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail: 1299861034@qq.com

recommended as the optimal multi-water irrigation scheme for local maize in the study area.

**Key words:** Multi-source; Irrigation pattern; Corn; Salt accumulation; Water use efficiency

随着经济发展和人口增长,我国对水资源的需求日益增加,面临水资源短缺的问题也愈发尖锐。河套灌区是国家重要的粮油生产基地,随着引黄灌溉水量的减少,地表水资源短缺已成为制约内蒙古河套灌区农业可持续发展的重要因素。而河套灌区分布着较为丰富的地下水资源<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,改变传统灌溉模式,开发当地地下水资源用于农业灌溉显得尤为重要。

近年来,学者们针对多地区、多作物等因素,开展了多水源合理开发利用<sup>[3-4]</sup>、合理的井渠灌溉用水比例<sup>[5-6]</sup>、较优的咸淡水轮灌模式<sup>[7-13]</sup>、井渠双灌下灌溉制度的优化<sup>[14]</sup>和微咸水及盐渍土对土壤水盐及作物的影响<sup>[15-17]</sup>等方面的研究,并取得了阶段性成果。因此,本研究在前人研究的基础上,以河套灌区典型粮食作物玉米为研究对象,探寻多水源灌溉模式对土壤水盐及作物的影响,探求一种适宜内蒙古河套灌区玉米种植的井(地下井水)渠(地表水)2种水源联合灌溉的优化模式,为节约地表水资源、保护生态平衡提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古河套灌区中游巴彦淖尔市临河区,隶属永济灌域,位于河套平原腹地,坐落在黄河“几”字弯上方,南与鄂尔多斯高原隔河相望,北依阴山,东与乌拉特草原紧密相连。临河深处内陆,属于中温带半干旱大陆性气候,多年年均降水量 130 mm 左右,平均气温 6.8 °C,昼夜温差大,日照时间长,多年日照均值 3 229 h。是我国日照时数较长的地区之一。光、热、水同期,无霜期 130 d 左右,试验田属轻度盐碱地,可用于种植玉米等粮经作物。

### 1.2 试验设计

试验选取河套灌区典型粮食作物玉米为供试材料,覆膜种植,5月初开始播种,9月末收割。采用井(地下水)渠(地表水)双灌的灌溉模式,播种前各处理采用渠灌,一水至三水采用多水源灌溉联合灌溉,设置灌溉模式分别为:井井井(JJJ)、井井渠(JJQ)、井渠井(JQJ)、渠井井(QJJ)、井渠渠(JQQ)、渠渠井(QQJ)、渠井渠(QJQ)、渠渠渠(QQQ),并设计一个不灌水、不施肥的空白对照处理(CK)。灌水定额采用河套灌区

多年的节水灌溉制度研究成果,设为 90 mm,灌溉方式畦灌。施用肥料采用尿素(46% N)和磷酸二铵(18% N, 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),其中氮肥施用量为 225 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为 235 kg/hm<sup>2</sup>。试验共设 9 个处理,3 次重复,共 27 个小区,小区面积为 6 m × 12 m = 72 m<sup>2</sup>,田间管理与当地农户管理一致。灌溉井(地下水)水矿化度为 2.0 ~ 2.5 g/L,灌溉渠水矿化度为 0.608 g/L。具体试验设计方案见表 1。

表 1 试验设计方案  
Table 1 Experimental design scheme

处理	播种前	一水(拔节期)	二水(抽穗期)	三水(灌浆期)
JJJ	渠灌	井灌	井灌	井灌
JJQ	渠灌	井灌	井灌	渠灌
JQJ	渠灌	井灌	渠灌	井灌
QJJ	渠灌	渠灌	井灌	井灌
JQQ	渠灌	井灌	渠灌	渠灌
QQJ	渠灌	渠灌	渠灌	井灌
QJQ	渠灌	渠灌	井灌	渠灌
QQQ	渠灌	渠灌	渠灌	渠灌
CK	-	-	-	-

### 1.3 测定项目及方法

**1.3.1 土壤含水量和电导率** 分别在玉米播种前和每次灌水前、后通过土钻在田间取土样,测定土壤含水量和电导率,取土深度为 100 cm,共分为 5 层,分别为(0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm),采用烘干法测定土壤含水量,使用电导率仪测定其土水质量比 1 : 5 浸提液电导率值,其中土壤浸提液电导率与土壤全盐量之间的关系为:

$$S=2.591 \times EC_{1:5} + 0.4682 (R^2 = 0.987) \quad (1)$$

式中:  $S$  为土壤含盐量(g/kg);  $EC_{1:5}$  为土壤浸提液的电导率(mS/cm)。

**1.3.2 作物耗水量及水分利用效率** 作物耗水量的计算采用如下公式:

$$ET = P + I + W_g - D - R - \Delta W \quad (2)$$

水分利用效率的计算采 WUE 公式:

$$WUE = Y / 10ET \quad (3)$$

式中:  $ET$  为作物耗水量(mm);  $\Delta W$  为试验初期到末期土壤储水量的变化量(mm);  $P$  为降雨量(mm);  $I$  为灌溉量(mm);  $W_g$  为地下水补给量(mm);  $D$  和  $R$  分别是渗漏水量和地表径流,由于该区地下水位较高,地下水补给量远大于渗漏水量,因此渗漏水量忽略不

计; 试验区地面平坦, 无明排,  $R$  可以忽略;  $WUE$  为水分利用效率( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $Y$  为玉米产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

**1.3.3 产量** 收获时, 对玉米进行考种, 测量玉米的穗长、穗粗、穗行数、行粒数等指标。穗粗、穗长用游标卡尺测定, 测 3 次, 取均值; 对收获的果实进行称量, 计算每颗玉米穗的穗粒数, 并从玉米穗粒中随机取 3 个重复, 每个重复 100 粒, 各自称量并取平均数计算百粒质量。收获指数是指穗籽粒质量和地上干物质质量之比<sup>[18]</sup>。

#### 1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 及 SPSS 20.0 进行处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 多水源灌溉模式对玉米生长的影响

株高和茎粗是衡量玉米株型状况、植株倒伏及产量的重要指标, 株高是反映作物生长状态的有效指标, 茎粗则在很大程度上决定了玉米的抗倒伏能力。本研究对玉米的株高和茎粗测量贯穿玉米全生育期, 对各指标在生育期内的变化规律进行分析, 以评价各灌溉模式对其影响。

**2.1.1 多水源灌溉模式对玉米株高的影响** 由表 2 可知, 各处理株高在生育期内的变化趋势大体相近。株高在玉米整个生育期按由大到小排序为  $QQQ > QJQ > QQJ > JQQ > QJJ > JJQ > JQJ > JJJ > CK$ 。拔

节期、抽雄期、灌浆期、成熟期均为  $QQQ$  处理最高, 其次为  $QJQ$  处理, 且两处理无显著差异。玉米株高在各生育期  $CK$  处理最低, 其次为  $JJJ$  处理, 说明水分胁迫和盐分积累会抑制植株生长。拔节期灌溉井水后,  $JJJ$ 、 $JJQ$ 、 $JQJ$  和  $JQQ$  处理的株高分别较  $CK$  处理高 54.99%、74.35%、56.66% 和 75.63%; 灌溉渠水后,  $QJJ$ 、 $QQJ$ 、 $QJQ$  和  $QQQ$  处理分别较  $CK$  处理高 105.19%、102.02%、104.90% 和 108.12%, 拔节期  $QJQ$  处理的平均生长速率最快, 为 5.802 cm/d; 抽雄期  $QQQ$  处理株高平均增长速率最快, 为 4.915 cm/d, 其次为  $QJQ$  处理, 为 4.701 cm/d; 灌浆期至收获期, 灌水结束, 灌溉两次及以上井水的处理  $JJJ$ 、 $JJQ$ 、 $JQJ$  和  $QJJ$  处理较  $CK$  处理分别高 26.82%、40.78%、30.73% 和 49.72%; 灌溉一次井水及不灌溉井水的处理  $QQQ$ 、 $QJQ$ 、 $QQJ$  和  $JQQ$  处理较空白处理分别高 90.89%、88.83%、86.03% 和 74.30%。研究表明, 灌溉井水次数的增加, 对玉米株高的抑制作用明显, 且在拔节期灌溉井水, 对玉米株高有显著影响( $P < 0.05$ ), 主要是因为这一时期株高生长速率较快, 在抽雄期后玉米开始生殖生长, 株高变化幅度不大。综上, 在一水时灌溉渠水可以有效地促进植株生长, 为后期玉米的生长打下良好基础。

表 2 不同处理玉米株高和茎粗随时间动态变化  
Table 2 Dynamics of maize plant heights and stem diameters under different treatments

处理	苗期		拔节期		抽雄期		灌浆期		成熟期	
	株高(cm)	茎粗(cm)	株高(cm)	茎粗(cm)	株高(cm)	茎粗(cm)	株高(cm)	茎粗(cm)	株高(cm)	茎粗(cm)
JJJ	41.4 ab	1.310 b	134.45 c	1.695 e	167.0 e	1.896 d	211.0 e	1.926 e	227.0 d	2.011 f
JJQ	36.8 c	1.512 a	151.25 b	2.202 c	224.5 d	2.228 c	245.5 cd	2.321 d	252.3 cd	2.552 de
JQJ	32.4 d	1.300 b	135.90 c	1.987 d	218.0 d	2.212 c	223.0 de	2.323 d	234.0 d	2.410 e
QJJ	42.1 ab	1.532 a	178.00 a	2.445 b	251.5 c	2.512 b	253.0 c	2.602 c	268.4 c	2.760 cd
JQQ	43.8 a	1.501 a	152.36 b	2.429 b	271.0 c	2.576 b	292.1 b	2.692 bc	312.1 b	2.801 bc
QQJ	41.2 ab	1.423 ab	175.25 a	2.493 ab	298.0 b	2.69 ab	307.5 b	2.726 bc	319.0 ab	2.869 bc
QJQ	38.5 bc	1.452 a	177.75 a	2.655 a	319.0 ab	2.698 ab	331.0 a	2.880 ab	333.3 ab	3.005 ab
QQQ	42.7 a	1.412 ab	180.55 a	2.676 a	328.0 a	2.890 a	333.0 a	2.956 a	338.5 a	3.108 a
CK	29.4 d	1.320 b	86.75 d	1.432 e	137.5 f	1.700 d	172.0 f	1.812 e	179.5 e	1.804 f

注: 表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平, 下表同。

**2.1.2 多水源灌溉模式对玉米茎粗的影响** 由表 2 可以看出, 多水源灌溉模式对玉米茎粗和株高的影响有相似趋势, 在苗期各处理对茎粗的影响基本一致; 拔节期,  $JJJ$ 、 $JJQ$ 、 $JQJ$  和  $JQQ$  处理的茎粗分别较空白处理高 18.37%、53.77%、38.75% 和 69.62%;

$QJJ$ 、 $QQJ$ 、 $QJQ$  和  $QQQ$  分别较空白处理高 70.74%、74.09%、85.40% 和 86.87%, 灌溉井水后抑制了玉米茎粗生长; 抽雄期  $QQQ$  和  $QQJ$  处理茎粗平均增长速率最快, 分别为 0.073 mm/d 和 0.065 mm/d; 灌浆期后茎粗变化减缓; 成熟期各处理差异显著( $P < 0.05$ ),

JJJ、JJQ、JQJ 和 QJJ 处理的茎粗分别较空白处理增加 11.47%、41.46%、33.59% 和 52.99%；JQQ、QQJ、QJQ 和 QQQ 分别较空白处理增加 55.27%、59.04%、66.57% 和 72.28%，灌溉一次井水的处理中，对玉米茎粗的影响程度由大到小分别为 JQQ、QQJ、QJQ 处理，说明不同生育期灌溉井水对玉米茎粗的抑制程度作用由大到小依次为拔节期、灌浆期、抽雄期，其主要原因是拔节期玉米较为敏感，且生长速度较快，盐分对玉米茎粗的影响较大。

2.2 多水源灌溉模式下土壤剖面含水量变化规律

由图 1 可知,不同处理土壤含水量变化规律不同,播种前,各处理土壤含水量均较高,一水前,由于蒸发剧烈且无降雨,土壤含水量明显降低;二水前,土壤含水量增加;三水前,正值八月初,土壤蒸发剧烈,各处理土壤含水量降低,至秋浇前土壤含水量达到生育期内最小值,秋浇后土壤含水量升高。从图中可以看出,0~20 cm 土层各处理土壤含水量变化范围是

80~380 g/kg,由于土壤表层水分蒸发强烈,因此生育期内土壤含水量较低。秋浇后期土壤表层开始结冰,含水量较高,20~60 cm 土层含水量的变化幅度在 100~410 g/kg,60~100 cm 深层土壤的变化幅度在 110~750 g/kg,由于 60~80 cm 土层为偏砂性土壤,且 80~100 cm 土层为粉砂壤土,减缓上层水继续入渗,土壤含水量较高。在 0~40 cm 土层中 JJJ、JJQ、JQJ、QJJ、JQQ 和 QQJ 处理不同时期变化幅度较大,QJQ、QQQ 和 CK 处理变化幅度较小。40~80 cm 土层中各个处理变化幅度均较大,80~100 cm 土层不同处理的变化幅度较小,其中 JJJ、JQJ、QJJ、JQQ、QJQ 和 CK 处理在 60~80 cm 土层均达到峰值。JJJ、JQJ、QJJ、JQQ、QJQ 和 CK 处理在 0~80 cm 土层均表现为增大趋势,而 80~100 cm 土层表现为减小小趋势;QQJ 和 QQQ 处理表现为持续增大趋势。并且在 100 cm 土层不同时期的土壤含水量基本趋于一致。CK 处理在各个土层土壤含水量均低于其他处理。

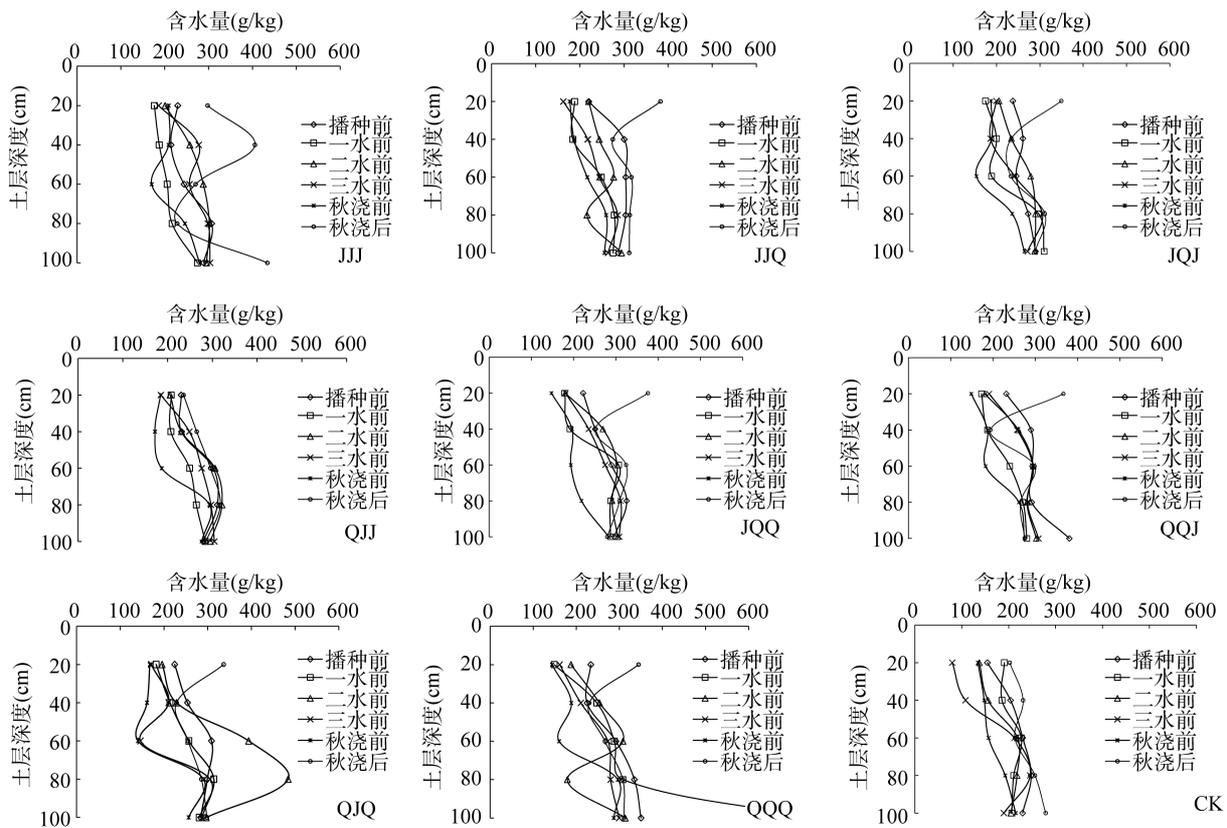


图 1 不同处理下不同时期土壤含水量的变化规律  
Fig. 1 Dynamics of soil moistures in profiles under different treatments

不同土层各个时期土壤平均含水量有所差异,0~20 cm 土层 JQJ 处理土壤平均含水量最大,其次为 JJQ 处理,QQQ 处理最低;20~40 cm 土层 JJJ 处理土壤平均含水量最大,其次为 JJQ 处理,QJQ 处理最低;

40~60 cm 土层 JJJ 处理土壤平均含水量最大,其次为 JJQ 处理,QJQ 处理最低;60~80 cm 土层 QJQ 处理土壤平均含水量最大,其次为 QJJ 处理,JJQ 处理最低;80~100 cm 土层 QQQ 处理土壤平均含水量

最大, 其次为 QQJ 处理, JJQ 处理最低。通过以上分析可知, 0 ~ 60 cm 土层灌溉两次及以上井水的处理在 0 ~ 60 cm 土层土壤平均含水量较大, 这是由于采用井水灌溉后, 盐离子进入土壤后会引引起细毛管比例的增加, 大孔隙减少, 导致土壤的导水能力下降, 降低了土壤水势, 又因盐离子引起土壤水分入渗受到抑制, 盐分聚集区积水能力强, 盐分变化越大的地方, 土壤含水量变化也越大, 同时这也跟土壤的物理性质有关。各井灌参与的处理土壤含水量变化差异不同于渠水灌溉, 有些土层灌水后土壤含水量变化大, 有些变化小, 这是由于长时期的地表蒸发提盐与井水淋洗的共同作用, 加之各盐离子的溶解性不同, 经不均匀淋洗分布不均匀, 致使水分聚集在高盐区。因此运用井水灌溉应考虑到盐离子对土壤结构产生的影响, 尽量控制对作物的水分利用效率的影响。

### 2.3 多水源灌溉模式对土壤耕层盐分累积的影响

为分析土壤耕层盐分积累情况, 仅考虑玉米生育期内土壤盐分变化, 计算不同土层内的土壤盐分, 方程为:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (4)$$

式中:  $\Delta S$  为生育期内土壤盐分的变化量(g/kg);  $S_2$  表示生育期末土壤盐分(g/kg);  $S_1$  表示初始土壤盐分

(g/kg)。  $\Delta S > 0$  说明生育期土壤积盐,  $\Delta S < 0$  说明生育期土壤脱盐。

各处理不同土层玉米生育期内的盐分变化如表 3 所示, 从表 3 可以看出, 在 0 ~ 20 cm 土层, 各处理生育末期均有积盐现象, 全部灌溉井水以及灌溉两次井水的处理土壤盐分变化幅度范围为 40.23% ~ 54.63%, 其中 QJJ 处理积盐程度低于 JQJ、JJQ 处理, JJJ 处理积盐程度达到最高; 全部灌溉渠水以及灌溉一次井水的处理土壤盐分变化幅度范围为 16.83% ~ 36.80%; 其中 QQQ 处理积盐程度最低为 16.83%, 略低于 QJQ 处理, 与 QQJ、JQQ 处理差异较大; 在 20 ~ 40 cm 土层, QQQ 处理积盐程度最低, 与 QJQ 处理差异较小, 且明显低于其他处理; 在 40 ~ 60 cm 土层, 全部灌溉井水以及灌溉两次井水的处理土壤积盐程度由低到高依次为: QJJ、JJQ、JQJ、JJJ; 分别为 34.02%、35.90%、39.38%、43.92%, QJJ 和 JJQ 处理差异相对较小; 全部灌溉渠水以及灌溉一次井水的处理土壤积盐程度由低到高依次为: QQQ、QJQ、JQQ、QQJ, 分别为 25.63%、27.96%、13.87%、9.68%, QQJ 和 JQQ 处理差异相对较小; 在 60 ~ 100 cm 土层, 各处理土壤盐分变化率均低于 20 ~ 60 cm 土层。

表 3 不同处理下的土壤含盐量  
Table 3 Soil salt contents under different treatments

土层深度(cm)	项目	JJJ	JJQ	JQJ	QJJ	JQQ	QQJ	QJQ	QQQ	CK
0 ~ 20	初始盐分(g/kg)	1.479	1.080	1.024	1.178	1.017	0.962	1.108	1.278	1.144
	生育期末盐分(g/kg)	2.287	1.551	1.493	1.652	1.392	1.332	1.350	1.493	1.476
	变化量(g/kg)	0.808	0.471	0.469	0.474	0.374	0.371	0.241	0.215	0.332
	变化率(%)	54.63	43.63	45.83	40.23	36.80	38.52	21.79	16.83	28.98
20 ~ 40	初始盐分(g/kg)	1.262	1.038	0.896	1.008	1.256	1.100	0.999	1.204	1.126
	生育期末盐分(g/kg)	2.113	1.514	1.461	1.286	1.511	1.353	1.148	1.356	1.455
	变化量(g/kg)	0.851	0.475	0.565	0.277	0.255	0.253	0.149	0.152	0.329
	变化率(%)	67.43	45.80	63.06	27.492	20.322	22.96	14.91	12.59	29.22
40 ~ 60	初始盐分(g/kg)	1.325	0.853	1.033	1.072	0.859	1.024	1.074	1.352	1.313
	生育期末盐分(g/kg)	1.906	1.143	1.440	1.457	1.080	1.310	1.223	1.483	1.531
	变化量(g/kg)	0.582	0.290	0.407	0.385	0.220	0.286	0.149	0.131	0.218
	变化率(%)	43.92	34.02	39.38	35.90	25.63	27.96	13.87	9.68	16.58
60 ~ 100	初始盐分(g/kg)	2.529	2.299	2.532	2.492	2.839	3.285	2.477	2.811	2.131
	生育期末盐分(g/kg)	3.342	3.034	3.084	3.088	3.289	3.501	2.798	3.090	2.351
	变化量(g/kg)	0.814	0.735	0.552	0.596	0.450	0.216	0.321	0.279	0.220
	变化率(%)	32.18	31.95	21.79	23.91	15.83	6.59	12.97	9.91	10.34

在生育期内, 多水源灌溉模式下均呈现出了不同程度的积盐现象, 其中全部井水灌溉的处理积盐最严重, CK 处理呈积盐现象。说明在当地选取多水源灌

溉模式, 对土壤盐分变化的影响较为明显。玉米根系主要分布在 0 ~ 40 cm 耕层, 就该土层整体分析, 各处理盐分累积量从小到大依次为: QQQ、QJQ、JQQ、

CK、QQJ、QJJ、JJQ、JQJ、JJJ 处理,变化范围为 14.77%~60.52%;0~100 cm 土层不同处理盐分累积量从小到大依次为:QQQ、QJQ、QQJ、CK、JQQ、QJJ、JQJ、JJQ、JJJ 处理,变化范围为 11.68%~46.32%。说明耕层积盐程度大于深层,主要因为为土壤水分蒸发会导致土壤盐分表聚,且井水灌溉会带入一定量盐分,井水灌溉次数增加,土壤盐分累积程度越高。分析可得井水参与灌溉的处理土壤积盐程度会大于不做处理的空白土壤。QJQ 处理的土壤盐分变化量在玉米耕层均低于其他井灌参与的处理,且与 QQQ 处理差异较小;在灌溉井水次数相同的情况下,拔节期灌溉井水的积盐程度比较严重;因此在条件允许的情况下,建议选用灌溉一次井水的水源灌溉模式,而且在拔节期最好灌溉渠水,这样既可以满足作物对水分的需求,又可以避免土壤发生积盐,使土地可持续利用,同时还可节约一次渠水资源,综上,在河套灌区采用 QJQ 处理灌溉玉米是合理的。

#### 2.4 多水源灌溉模式对玉米收获指标的影响

表 4 列出了多水源灌溉模式下玉米的穗部性状(平均穗长、平均穗粗、穗行数和行粒数)和收获指数。通过对玉米穗部性状进行分析可知,井水灌溉导致玉米减产情况在玉米穗部性状上有所体现,穗长、穗粗刻画玉米穗的大小,灌溉井水使玉米果穗变短变细,同 QQQ 处理的差异均达显著水平( $P<0.05$ )。其中灌溉一次井水或不灌井水与灌溉两次及以上井水差异显著( $P<0.05$ ),灌溉两次及以上处理对平均穗长、平均穗粗、穗行数、行粒数 4 个产量构成因素的影响程度由小到大分别为 QJJ、JJQ、JQJ 和 JJJ,灌溉一次井水及不灌井水处理的影响程度由小到大分别为 QQQ、QJQ、QQJ 和 JQQ,由此可以得出拔节期灌溉井水对玉米穗的外观形态影响最大,其次为灌浆期,抽雄期灌溉井水对玉米穗的外观形态影响最小;多水源灌溉方式对玉米平均穗长和行粒数影响显著( $P<0.05$ ),而穗粗和穗行数无显著差异。QQQ 处理收获指数最高,灌溉两次及以上井水处理的收获指数与 QQQ 处理差异显著( $P<0.05$ ),QJQ 处理收获指数略低于 QQQ 处理,分别高于 QQJ 和 JQQ 处理 4.41% 和 4.93%,且差异不显著。井水参与灌溉的各处理收获指数均比 QQQ 处理收获指数低,整体表现为灌溉井水次数增加,玉米收获指数减小。一水灌溉渠水,可对土壤盐分进行淋洗,三水灌溉渠水可保证玉米灌浆期根区含盐量相对较低,为玉米果实灌浆提供了基础,保证玉米灌浆期根区含盐量相对较低。

表 4 不同处理对玉米收获指标的影响

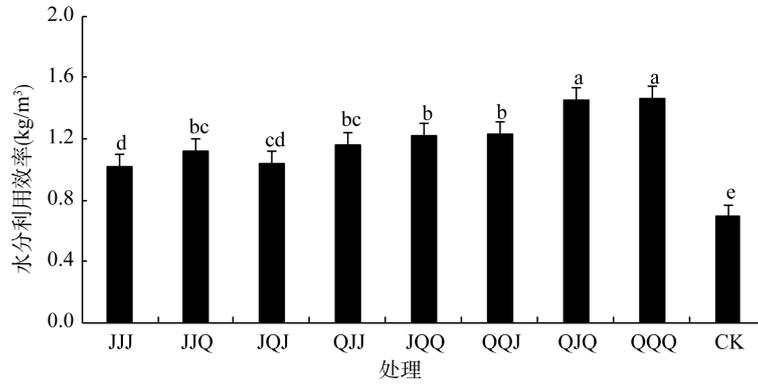
Table 4 Maize harvest indexes under different treatments

处理	穗长(cm)	穗粗(cm)	穗行数	行粒数	收获指数
JJJ	15.07 e	4.02 a	14.43 a	26.00 c	0.174 d
JJQ	16.55 cde	4.10 a	15.80 a	27.43 bc	0.194 bc
JQJ	15.64 de	4.03 a	15.00 a	29.30 b	0.190 cd
QJJ	16.71 cd	4.12 a	15.12 a	32.00 ab	0.196 bc
JQQ	17.35 bc	4.14 a	15.50 a	32.06 ab	0.203 abc
QQJ	17.48 bc	4.26 a	15.88 a	32.35 a	0.204 abc
QJQ	18.74 ab	4.32 a	15.89 a	34.05 a	0.213 ab
QQQ	19.05 a	4.33 a	16.20 a	34.79 a	0.216 a
CK	14.91 f	3.99 a	14.32 a	23.3 d	0.169 e

#### 2.5 多水源灌溉模式对水分利用效率及肥料偏生产力的影响

图 2 为多水源灌溉模式下农田水分利用效率计算结果,水分利用效率反映作物对水分的吸收和利用过程,多水源灌溉模式下,QQQ 处理水分利用效率最高,其次为 QJQ 处理,两处理间无显著差异( $P>0.05$ );随着灌溉井水次数的增加,水分利用效率呈降低趋势,灌溉两次及以上井水相对于灌溉一次及不灌井水的水分利用效率减少 25.77%~31.61%;其中灌溉两次及以上井水的处理中 QJJ 处理水分利用效率最大,分别比 JJQ、JQJ 和 JJJ 处理高 3.35%、11.11% 和 13.40%,灌溉一次井水的处理中 QJQ 处理水分利用效率最高,分别比 QQJ 和 JQQ 处理高 18.28% 和 19.07%,QQQ、QJQ、QQJ、JQQ、QJJ、JJQ、JQJ 和 JJJ 处理分别比空白处理高 111.15%、110.64%、78.08%、76.90%、67.36%、61.93%、50.62% 和 47.59%。产生这种趋势的主要原因是随着灌溉井水的次数增加,土壤中的盐分增多,造成根区土壤盐分积累,玉米吸收水分受到一定的抑制,对玉米水分利用效率影响较大。

由图 3 可以看出,多水源灌溉模式对氮肥的吸收利用有一定影响,各个处理下的氮肥偏生产力差异显著( $P<0.05$ );整体变化规律与水分利用效率相似,灌溉两次及以上井水处理的氮肥偏生产力变化范围为 25~30 kg/kg;其中 QJJ 处理氮肥偏生产力最大,分别比 JJQ、JQJ 和 JJJ 处理高 4.20%、13.14% 和 20.12%。灌溉一次及不灌井水处理的氮肥偏生产力变化范围为:32~40 kg/kg,其中 QQQ 处理氮肥偏生产力最高,分别比 QJQ、QQJ 和 JQQ 处理高 0.57%、21.00% 和 21.47%。产生这种趋势的主要原因是多水源灌溉模式对土壤盐分积累及玉米生长影响不同,因此对氮肥的吸收利用产生影响,其中 QJQ 处理与全渠水(QQQ)处理无显著差异,为适宜当地的灌水模式。



(图中小写字母不同表示处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平, 下同)

图 2 不同处理水分利用效率

Fig. 2 Water use efficiency under different treatments

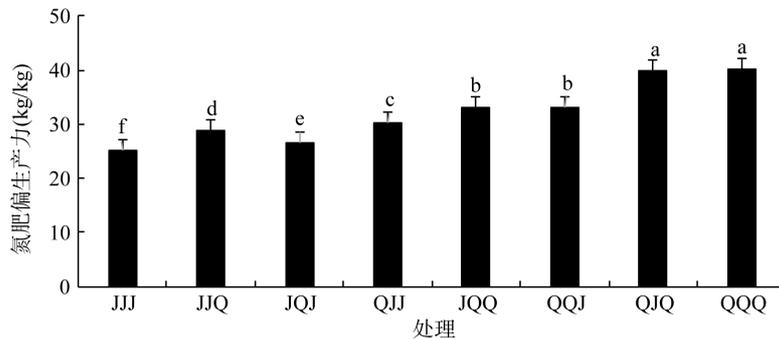


图 3 不同处理氮肥偏生产力

Fig. 3 Partial productivity of nitrogen fertilizer under different treatments

### 3 结论

1)通过对玉米生长指标的分析可知:随着灌溉井水次数的增加,对玉米株高的抑制作用明显,且在拔节期灌溉井水,对玉米株高有显著影响( $P < 0.05$ )。不同生育期灌溉井水对玉米茎粗的抑制程度由小到大依次为拔节期、灌浆期、抽雄期。在一水时灌溉渠水可有效促进植株生长,为后期玉米的生长打下良好基础。

2)在生育期内,多水源灌溉模式下均呈现出了不同程度的积盐现象,其中全部井水灌溉的处理积盐最严重。耕层积盐程度大于深层,与前人研究结果<sup>[13]</sup>一致;井水灌溉次数增加,土壤积盐程度明显;渠井渠(QJQ)处理的土壤盐分变化量在玉米耕层均低于其他井灌参与的处理,且与渠渠渠(QQQ)处理差异较小。建议采用 QJQ 处理灌溉模式,在一水时灌溉渠水,既可以满足作物对水分的需求,又可以避免土壤发生积盐,这与前人对咸淡水轮灌枸杞的研究所得结论<sup>[19]</sup>一致。

3)在灌水量一致的情况下,增加井水灌溉次数,易导致玉米穗部变细变短,产量下降,水分利用效率显著降低。井灌参与的处理中,灌溉两次及以上井水

相对于灌溉一次及不灌井水的玉米水分利用效率减少 25.77%~31.61%;QJQ 处理水分利用效率高于井灌参与的其他处理;通过分析收获指数和氮肥偏肥料生产力,均呈现出 QQQ 处理最高,其次为 QJQ 处理,井井井(JJJ)处理最低的现象,且 QQQ 与 QJQ 处理无显著差异( $P < 0.05$ )。综上所述,在参考玉米生理及收获指标、土壤脱盐率、水分利用效率和氮肥偏生产力等因素的基础上,河套灌区选用 QJQ 灌溉模式,既有利于土地的可持续利用,还可节约一次地表水资源,该模式为适合当地的较好灌溉模式。

### 参考文献:

- [1] 郑九华. 咸水灌溉[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 17-18.
- [2] 田东生, 任树梅, 杨培岭, 等. 咸淡水交替沟灌对土壤盐分及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(S2): 292-298.
- [3] Bruas N, 鲁静. 地表地下水系统动态管理[J]. 水文地质工程地质译丛, 1993(2): 1-7.
- [4] Khare D, Jat M K, Ediwahyunan. Assessment of conjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(3-4): 764-777.

- [5] Awan U K, Anwar A, Ahmad W, et al. A methodology to estimate equity of canal water and groundwater use at different spatial and temporal scales: a geo-informatics approach[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5): 409.
- [6] Dai F G, Cai H J, Liu X M, et al. Analysis of suitable irrigation water ratio of well to channel based on groundwater model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(25): 45-51.
- [7] 闵勇, 朱成立, 舒慕晨, 等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(3): 9-17.
- [8] 郑君玉, 朱成立, 翟亚明. 微咸水-淡水交替灌溉对玉米生长指标及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(4): 37-41.
- [9] 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 咸淡水轮灌土壤水盐运移特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 50-53.
- [10] 米迎宾, 屈明, 杨劲松, 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 83-86.
- [11] 朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 220-228, 201.
- [12] 刘小媛, 高佩玲, 杨大明, 等. 咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1404-1413.
- [13] 王瑞萍, 白巧燕, 王鹏, 等. 咸淡水轮灌模式及施肥量对玉米生长和土壤盐分的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(1): 69-73.
- [14] 田德龙, 郭克贞, 鹿海员, 等. 河套灌区井渠双灌条件下主要作物灌溉制度优化[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1): 48-52.
- [15] 马洁, 朱珠, 姚宝林, 等. 阿拉尔灌区微咸水滴灌对土壤水盐分布影响的试验研究[J]. *节水灌溉*, 2010(5): 40-42, 45.
- [16] 孙林, 罗毅, 杨传杰, 等. 不同灌溉量膜下微咸水滴灌土壤盐分分布与积累特征[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 428-436.
- [17] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1101-1107.
- [18] 余卫东, 冯利平, 胡程达, 等. 苗期涝渍对黄淮地区夏玉米生长和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2161-2166.
- [19] 苏瑞东, 杨树青, 唐秀楠, 等. 盐渍化土壤条件下枸杞咸淡水轮灌模式试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(6): 77-82.