

文章编号: 1672-3317(2023)12-0036-08

# 交替灌溉对地下水浅埋区水盐分布和玉米生育指标的影响

郭淑豪<sup>1</sup>, 王军<sup>2</sup>, 佟长福<sup>2</sup>, 张月红<sup>1</sup>, 甄致新<sup>1</sup>, 何锐<sup>1,2</sup>, 李仙岳<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.水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

**摘要:**【目的】探究盐渍化耕地、地下水浅埋地区合理利用当地丰富咸水资源适宜的玉米灌溉方式。【方法】于2022年5—10月在鄂尔多斯市达拉特旗试验地开展玉米大田试验, 研究T1(全咸水)、T2(“咸咸淡”交替)、T3(“咸淡”交替)和CK(全淡水)4种灌溉处理对土壤水盐分布、作物生长及产量的影响。【结果】交替灌溉对土壤水分、盐分有较大的影响, 需水关键期T3处理根系吸水作用最明显, 其0~40 cm土层的土壤平均含水率比其他处理低0.75%~1.3%, 40~100 cm土层土壤含水率比其余处理高2.02%~3.71%; 灌浆期T2、T3处理低盐区面积占比分别为58.45%、63.98%。虽然交替灌溉导致作物减产10%~13%, 但较CK节约淡水资源33%~50%。T3处理的作物相对产量为90.26%, 水分利用效率比T1处理高23.2%, 比CK低7.2%。【结论】地下水在生育期的补给量占玉米生育期耗水量的21.74%~25.55%。“咸淡”交替灌溉可节约淡水资源, 有效降低土壤含盐量, 提高水分利用效率。

**关键词:** 交替灌溉; 浅埋地下水; 水盐分布; 水分利用效率

中图分类号: S275.6; S277.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023244

OSID: 

郭淑豪, 王军, 佟长福, 等. 交替灌溉对地下水浅埋区水盐分布和玉米生育指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 36-43.

GUO Shuhao, WANG Jun, TONG Changfu, et al. Influence of Alternating Freshwater and Saline Water Irrigation on Water-salt Distribution and Maize Yield in Shallow Groundwater Regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 36-43.

## 0 引言

【研究意义】西北地区淡水资源仅占全国的5.84%<sup>[1]</sup>, 黄河片区微咸水可利用量达30亿m<sup>3</sup>, 已开采量仅占1.7%<sup>[2]</sup>, 地下咸水可利用前景广阔。利用咸水灌溉势必在一定程度上增加土壤含盐量, 抑制作物生长发育。膜下滴灌可改变植物根系局部的水分分布, 使盐分向深层土壤运移<sup>[3-4]</sup>。厘清盐渍化灌区土壤水盐空间分布特征, 准确把握水盐时空动态变化规律, 对灌区农业发展和水资源优化配置具有重要作用<sup>[5]</sup>。提高盐碱地玉米的水分利用效率<sup>[6]</sup>, 协调咸水与淡水的高效利用可一定程度上改善区域农业水土匹配状况。【研究进展】国内外关于微咸水灌溉农田效应研究较多。杨树青等<sup>[7]</sup>研究发现, 黄河水(淡水)与咸水交替灌溉对土壤环境影响最小, 且作物相对产量在84%以上。陈素英等<sup>[8]</sup>在研究微咸水非充分灌溉中发现, 水分不是玉米生长的限制因子, 土壤盐分影响玉

米生长发育。刘战东等<sup>[9]</sup>研究发现, 膜下滴灌土壤水分垂直分布多在60 cm土层以上, 0~30 cm土层变化尤为明显。Malash等<sup>[10]</sup>对比了沟灌和滴灌条件下的不同咸水淡水混灌模式对马铃薯产量的影响得出, 滴灌条件下马铃薯产量高且根层土壤盐分低, 适宜的混灌模式为淡水60%、微咸水40%。Zhang等<sup>[11]</sup>研究发现, 咸淡水交替灌溉情况下0~40 cm土层的盐分积累明显, 且咸水灌溉频率越高, 土壤平均电导率越大, 盐分胁迫持续时间越长。王全九等<sup>[12]</sup>提出, 土壤盐分动态与累积特征、确定合理灌溉方式和灌溉制度是目前研究和生产着重开展的工作。【切入点】关于咸淡水交替灌溉下玉米农田土壤水入参与地下水补给作用机制不清。【拟解决的关键问题】为此, 设置盐碱地覆膜滴灌下不同咸水、淡水淋洗定额试验, 分析土壤水盐动态分布规律及其对玉米生长及产量影响, 为合理利用咸水灌溉提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

2022年5—10月在内蒙古自治区鄂尔多斯达拉特旗树林召镇试验地(40°29'32"N, 109°52'46"E)进行。该试验地海拔1 080 m, 多年平均气温6.58℃, 降水主要集中在7—9月, 年日照时间约3 100 h, 霜

收稿日期: 2023-06-01

修回日期: 2023-08-31

基金项目: “科技兴蒙”行动重点专项(2021EEDSCXSFQZD011); 内蒙古自然科学基金项目(2023MS05002)

作者简介: 郭淑豪(2000-), 男, 山东临沂人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉、水盐运移等方面的研究。E-mail: echo8088623@163.com

通信作者: 李仙岳(1980-), 男, 浙江温州人。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail: lixianyue80@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

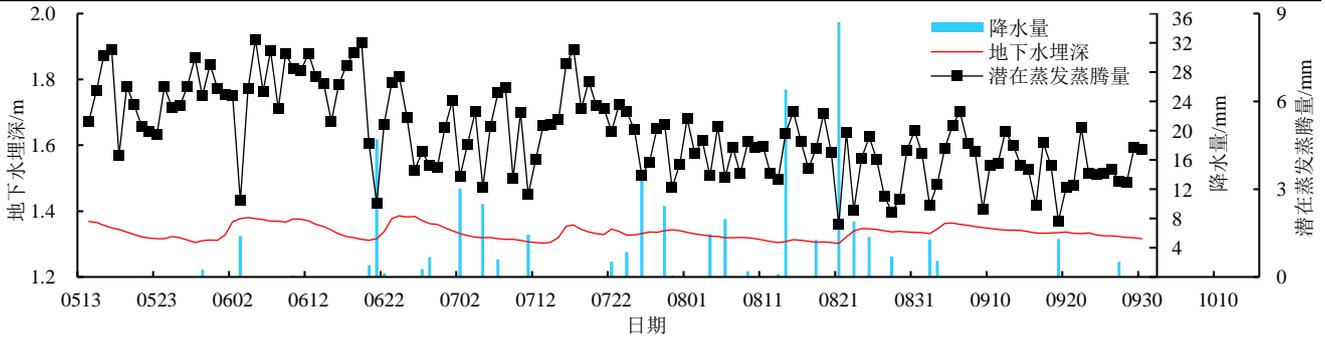
冻期为当年 10 月初至次年 4 月中旬，无霜期大约 135~150 d，2022 年玉米生育期有效降水量为 202.9 mm。试验地土壤有机质量为 8.86~12 g/kg，砂粒级、粉粒级、黏粒级量占比分别为 23.3%、34.4%、42.3%，质地为壤土，平均土壤体积质量为 1.432 g/cm<sup>3</sup>，表层

为重盐土，深层为中度盐土。试验地样本理化性质见表 1，咸水电导率为 4.6 dS/m，淡水电导率为 0.92 dS/m。该地区 5—9 月  $ET_0$  为 687.78 mm<sup>[13]</sup>，玉米生育期的降水量、地下水埋深、潜在蒸发蒸腾量的日变化如图 1 所示。

表 1 试验地样本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of samples from the test site

样本名称	pH 值	全盐量/(g·L <sup>-1</sup> )	八大离子量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )						
			CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>
咸水（地下水）	7.61±0.09	3.62±0.21	0	0.83±0.44	2.00±0.35	2.82±0.72	0.78±0.06	1.60±0.13	3.55±0.45
淡水（黄河水）	7.51±0.02	0.82±0.06	0	0.10±0.01	0.34±0.02	0.87±0.06	0.11±0.004	0.30±0.006	0.99±0.05
表层土壤（0~40 cm）	8.44±0.12	9.22±0.15	0	0.73±0.12	5.33±1.27	8.13±0.23	1.07±0.64	2.40±1.39	10.73±0.64
深层土壤（40~100 cm）	8.59±0.08	3.97±0.96	0	0.76±0.21	2.08±0.29	3.23±0.88	0.35±0.24	0.95±0.44	4.76±0.83

图 1 2022 年 5—9 月玉米生育期降水量、地下水埋深、潜在蒸发蒸腾量 ( $ET_0$ )Fig.1 Rainfall, groundwater level, potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) during the fertility period of maize from May to September of 2022

## 1.2 试验布置及管理

供试玉米品种为“稼农 3168”，采用膜下滴灌，1 膜 1 管（滴灌带）2 行种植方式，滴灌带铺设间距 100 cm，地膜宽 70 cm，玉米宽窄行种植，宽行 60 cm、窄行 40 cm，株距 26 cm，田间滴灌带为内镶贴片式滴灌带，管径 16 mm，流量 1.60 L/h，滴头间距 30 cm。不同试验小区垄间距 1 m，垄高 20 cm，垄宽 70 cm，小区总面积 720 m<sup>2</sup>，每个小区长 10 m，宽 6 m。设置全咸水 T1、“咸咸淡”交替 T2、“咸淡”交替 T3、全淡水 CK，每个处理设 3 个重复。本试验玉米的生育阶段划分为 5 个阶段，分别为苗期（0514—0602）、拔节期（0603—0630）、抽雄期（0701—0801）、灌浆期（0802—0831）和完熟期（0901—0930），玉米灌溉制度见表 2。

表 2 玉米灌溉制度

Table 2 Maize irrigation system

处理	灌溉定额/mm						合计/mm
	0605	0620	0705	0720	0804	0819	
T1	30*	30*	30*	30*	30*	30*	180
T2	30*	30*	30	30*	30*	30	180
T3	30*	30	30*	30	30*	30	180
CK	30	30	30	30	30	30	180

注 表中\*代表咸水灌溉。

## 1.3 测定指标

### 1.3.1 气象及地下水数据

采用 Campbell 自动气象站采集气象数据，采集

频率为 2 次/h。气象数据包括：温度、降水量、风速、相对湿度、大气压强、日照时间、太阳辐射和净辐射。

采用 HOBO 地下水位计采集地下水数据，采集频率为 6 次/d。地下水数据包括：温度、地下水埋深。

### 1.3.2 土壤墒情及基质势

用烘干法测定不同生育阶段及灌溉前后土壤含水率（除特殊标明外，文中所有含水率均为土壤质量含水率，以下简称土壤含水率），取土深度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。

土壤基质势：采用 1.4 m 及 1.2 m 的机械负压计，平行布置于膜上，分别读取 90、110 cm 的压力表读数，精度为 1 kPa，平均每 10 d 测量 1 次。

### 1.3.3 土壤电导率及含盐量

将土样自然风干、碾碎、过 2 mm 孔径筛混合均匀，制备土壤饱和浸提液（土水比为 1:5），用 DDS-307A 型电导率仪测定浸出液的电导率 ( $EC_{1:5}$ )，同时利用烘干残渣法测得水溶性盐质量  $SC$ ，电导率  $EC_{1:5}$  (dS/m) 和含盐量  $SC$  (g/kg) 拟合关系式为： $SC=5.1949 EC_{1:5}+0.0685$  ( $R^2=0.94871$ )。

### 1.3.4 作物生长发育及产量

使用 0.02 mm 精度的游标卡尺测定玉米的茎粗，0.1 cm 精度的卷尺测定玉米的株高及叶片长度和最大宽度，每 15 d 测定 1 次。完熟期选择每小区内侧第 4 行收获测产，根据质量均值法取有代表性的样穗，

测量穗长、穗粒数、百粒质量等指标,各试验处理的作物产量与CK产量相比为作物相对产量。

## 1.4 计算方法

### 1.4.1 地下水补给、深层渗漏及作物耗水量

由于黄河南岸地下水埋深较浅,地下水补给对大田玉米的生长发育存在不可忽略的影响,因此认定土体下边界通量即为土壤水与地下水交换量,其地下水通量采用Richards方程计算,计算式为:

$$K=-K(\theta)(\partial\Psi_h/\partial Z)\Delta t, \quad (1)$$

式中:  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率函数 (mm/d);  $\Psi_h$  为土水势 (kPa);  $\Delta t$  为时间步长 (d)。

非饱和土壤导水率由饱和导水率求解:

$$K(\theta)=K_s S_e^{0.5} [1-(1-S_e^{1/m})^m]^2, \quad (2)$$

$$S_e=(\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r), \quad (3)$$

式中:  $K_s$  为饱和土壤导水率 (mm/d);  $\theta$  为平均体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_r$  为残余含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为饱和含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $S_e$  为土壤水相对饱和度;  $m$  为土壤水力参数。

作物实际蒸发蒸腾量计算式为:

$$ET_c=\sum_{i=1}^n (P_i+I_i+K_i-\Delta W_i), \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为计算时段内的降水量 (mm);  $I_i$  为计算时段内的灌水量 (mm);  $K_i$  为计算时段内的 100 cm 土层边界地下水通量,补给为正,渗漏为负 (mm);  $\Delta W_i$  为计算时段内的土体含水量变化 (mm)。

### 1.4.2 脱盐率

土壤脱盐率 (SDE Soil Desalinization Efficiency) 是衡量灌溉淋洗效果的主要指标之一。其计算式为:

$$SDE=(1-SSF/SSI)\times 100\%, \quad (5)$$

式中:  $SSI$  为生育期初土壤含盐量 (g/kg);  $SSF$  为生育期末土壤含盐量 (g/kg)。

### 1.4.3 水分利用效率

水分利用效率 (WUE) 是用来描述作物生长量与水分利用状况之间关系的指标,为消耗单位水量的产

出。其计算式为:

$$WUE=Y_{\text{grain}}/10ET_c, \quad (6)$$

式中:  $Y_{\text{grain}}$  为玉米籽粒产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $ET_c$  为作物实际蒸发蒸腾量 (mm)。

### 1.4.4 土壤剖面含盐量分区

以滴灌带正下方地表为原点,滴灌带两侧 50 cm 为边界,土层厚度为 50 cm,建立  $xz$  截面,面积为 5 000  $\text{cm}^2$ 。土壤剖面含盐量分区划分标准为:土壤含盐量  $>5$  g/kg 为重盐区,介于 3~5 g/kg 为中盐区,  $<3$  g/kg 为低盐区<sup>[14]</sup>。

## 1.5 数据处理及分析

采用 Microsoft Office 2021 处理数据,利用 Origin 2021 pro、Surfer 23、Adobe illustrator 作图,运用 IBM SPSS Statistics 27 进行 LSD 显著性方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 咸水淡水交替灌溉模式对土壤水盐分布的影响

由于浅埋地下水的补给,各处理 40 cm 以下土层的土壤含水率均较高。咸水淡水交替灌溉模式对玉米的根系吸水影响不同,浅层土壤含水率变化较深层更为明显。随着土层深度的增加,土壤含水率也逐渐增加,水分主要积聚在作物根系以下。拔节期,CK 的 0~40 cm 土层土壤含水率较 T1、T2、T3 处理分别高 4.13%、8.96%、2.92%,CK 的 40~100 cm 土层土壤含水率介于 20.07%~21.36%;抽雄期,CK 的 0~40 cm 土层土壤含水率较 T1、T2、T3 处理分别降低 4.65%、3.09%、1.71%,CK 的 40~100 cm 土层土壤含水率介于 25.42%~27.33%;灌浆期,T1、T2、T3 处理 40~100 cm 土层土壤含水率分别较 CK 高 1.70%、1.03%、3.71%,0~40 cm 土层土壤含水率介于 22.41%~23.64%;完熟期,各处理 0~40 cm 土层土壤含水率介于 26.51%~27.52%,40~100 cm 土层土壤含水率介于 28.15%~30.14%。

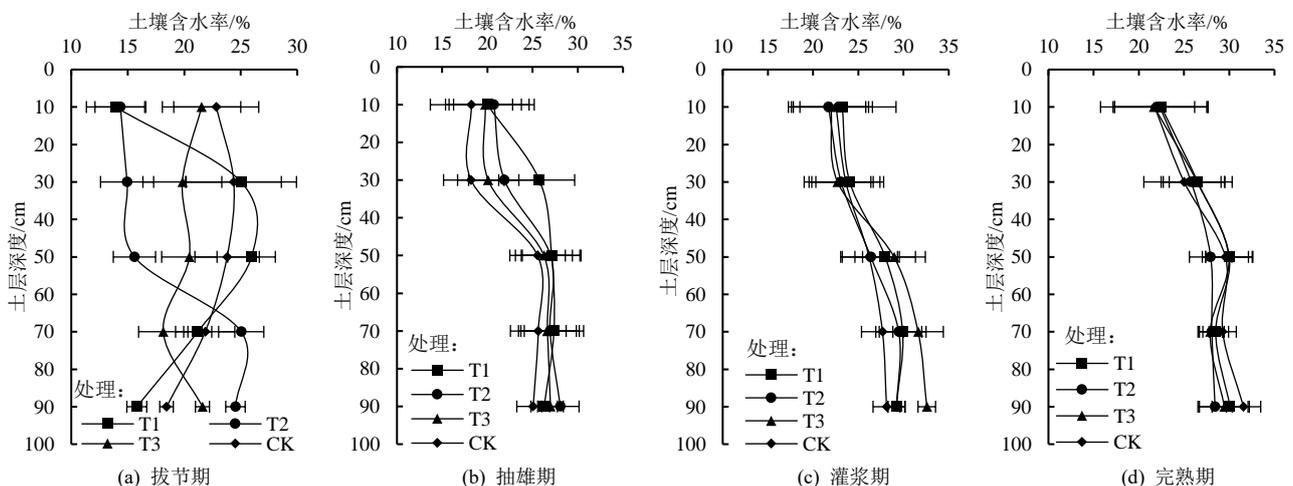


图2 不同生育期0~100 cm 土层土壤含水率

Fig.2 Distribution of soil moisture from 0 to 100 cm at different growth stages

地下微咸水含盐量较黄河水(淡水)高 2.8 g/kg, 各时期土壤含盐量差别较大。T1 处理在生育初期和生育末期土壤含盐量较高。T1、T2、T3 处理在抽雄期和灌浆期逐渐出现积盐现象, T1 处理生育期末不同土层土壤含盐量介于 2.65~4.01 g/kg。T3 处理灌浆期 0~100 cm 土层平均土壤含盐量较抽雄期降低 0.32 g/kg。拔节期, T2 处理各土层平均土壤含盐量较 T1 处理低 18.4%, T3 处理平均土壤含盐量较 T1 处理

高 11.2%; 抽雄期, T2、T3 处理平均土壤含盐量分别较 T1 处理高 24.1%、38.1%; 灌浆期, T2、T3 处理平均土壤含盐量分别较 T1 处理低 23.3%、16.1%; 完熟期, T2、T3 处理平均土壤含盐量分别较 T1 处理低 28.3%、34.9%。“咸淡”交替滴灌使作物根系附近含盐量降低, 促进了作物根系吸水, 交替灌溉影响地下水浅埋地区覆膜滴灌农田上层土壤盐分。

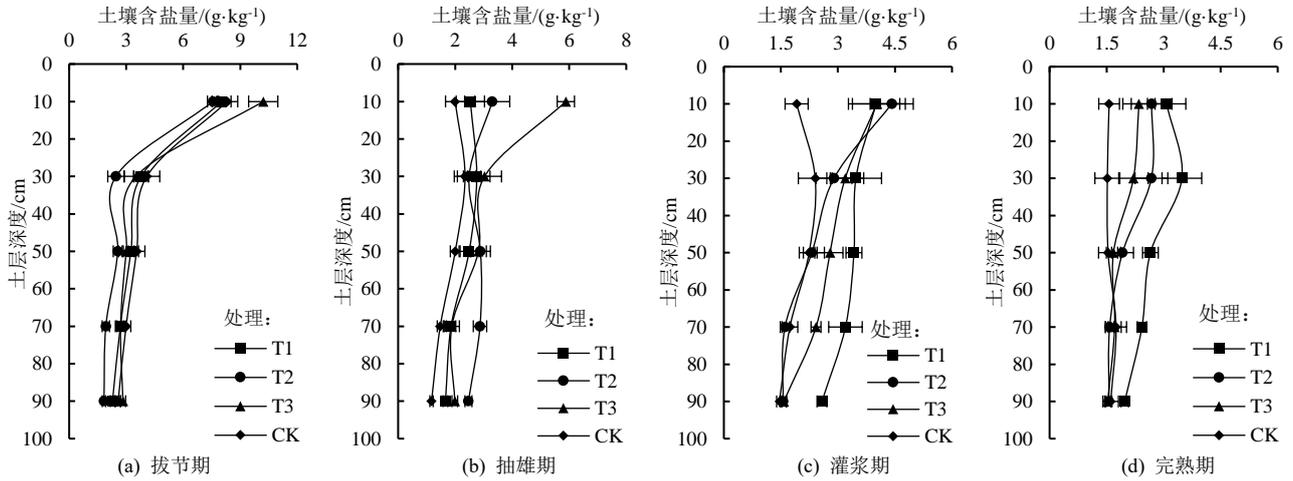


图3 不同生育期0~100 cm 土层土壤含盐量分布

Fig.3 Distribution of soil salinity from 0 to 100 cm at different growth stages

## 2.2 覆膜下咸淡水滴灌根层土壤盐分分布特征

由于作物根系吸水和覆膜积温效应的混合影响, 不同咸水淡水交替灌溉模式导致膜内和膜外根层土壤盐分分布差异显著。图4为灌水后剖面土壤含盐量二维分布规律。D1(0607)时段, 微咸水灌溉处理与淡水灌溉处理差异明显, CK在30~50 cm 土层出现低盐区, 但都集中在膜内。D2(0707)时段, 各处理重盐区面积减小, 同时出现低盐区, T1、T2、T3、CK的低盐区面积分别为 0.15、0.24、0.14、0.43 m<sup>2</sup>, 经过淡水淋洗的 T2 处理低盐区面积是 T1、T3 处理的

1.6 倍。D3(0722)时段, T2 处理共经过 3 次咸水、1 次淡水滴灌, 土壤盐分在膜内向深层土壤迁移, 无重盐区和低盐区; T3 处理经过咸、淡水各 2 次滴灌后, 虽导致表层积盐, 但重盐区面积占比仅有 13.06%, 并在 0~20 cm 土层内由膜内向膜外扩散, 且低盐区面积占比为 53.13%。D4(0821)时段, 各处理均没有重盐区, T1 处理处于中盐区, CK 处于低盐区, T2、T3 处理的低盐区面积占比分别为 58.45%、63.98%, 说明交替灌溉对根区土壤盐分的淋洗效果明显。

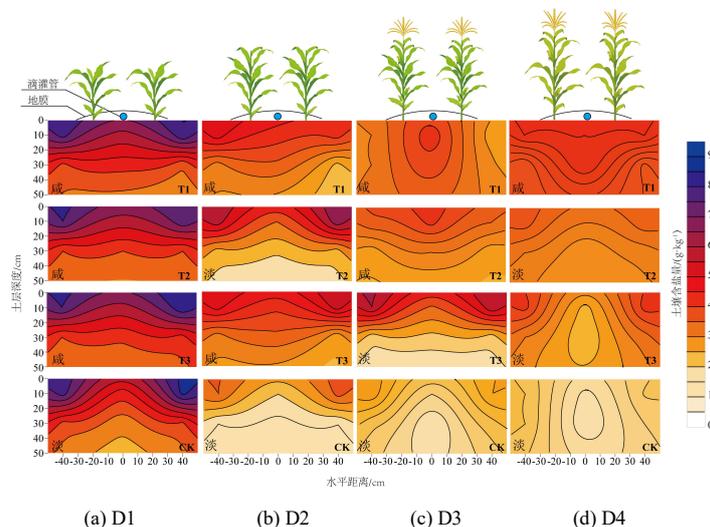


图4 不同时段咸水、淡水滴灌后膜内外土壤盐分分布

Fig.4 Distribution of soil salinity inside and outside the membrane after saline and freshwater drip irrigation at different time periods

随着淡水淋洗定额的增加,土壤表层盐分逐渐被淋洗至土壤深层,随着土层深度的增加盐分逐渐向膜外迁移。T1 处理存在明显的盐分限制, T2、T3 处理 20~40 cm 土层土壤盐分逐渐被淋洗并向膜外扩散。

### 2.3 脱盐率和积盐率

由图 5 可知,播种前各处理 0~20 cm 土层土壤含盐量是 20~40、40~100 cm 土层的 2.12~3.59 倍。各处理 0~20 cm 土层脱盐率均较高, T1、T2、T3 处理的脱盐率较 CK 分别低 18.87%、15.94%、9.4%; T1、T2 处理 20~40 cm 土层脱盐率为负值,咸水的灌溉导致此区域土壤盐分较播前增加 10.03%和 8.89%, CK、T3 处理 20~40 cm 土层脱盐率分别为 59.89%和 37.28%; T1、T2 处理 40~100 cm 土层脱盐率较 CK 分别低 26.31%、20.63%。随着淡水淋洗定额占比的增加,生育期末各处理各土层土壤平均含盐量明显降低,说明咸水淡水交替灌溉模式是影响作物根区土壤脱盐率的重要因素。

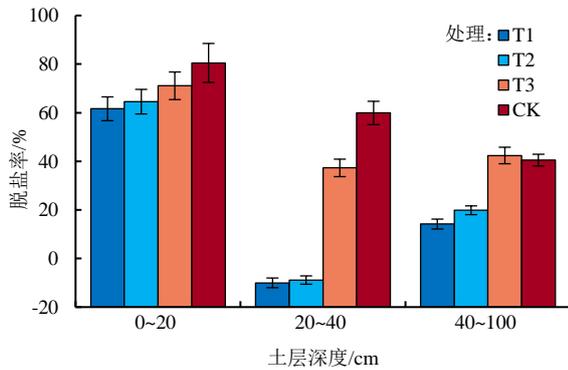


图 5 各处理不同土层脱盐率

Fig.5 Desalination rate of different soil layers for each treatment

### 2.4 作物生长生育指标

玉米生长指标与产量随淡水淋洗定额占比的改变而显著变化(表 3)。T1、T2、T3 处理株高较 CK 分别降低 23.51%、18.28%、14.93%; T1、T2、T3 处

理茎粗较 CK 分别提高 31.18%、48.24%、15.88%; T1、T2、T3 处理叶面积指数差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但均与 CK 差异显著; T1、T2、T3 处理平均单株总粒质量与 CK 相比分别降低 16.72%、12.40%、9.74%, 但均与 CK 差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 3 完熟期玉米生长指标

处理	株高/cm	茎粗/mm	叶面积指数/ (cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-2</sup> )	单株总籽粒 质量/g	百粒质量/g
T1	205±9.25c	22.3±1.11b	3.11±0.14b	200.41±10.01b	41.30±1.55a
T2	219±9.95bc	25.2±1.06a	3.12±0.11b	210.80±10.54b	39.52±1.58ab
T3	228±10.22b	19.7±0.86c	2.99±0.15b	217.20±8.86b	37.93±1.51b
CK	268±11.45a	17.0±0.85d	3.46±0.17a	240.65±10.03a	42.15±1.67a

注 同列中不同小写字母表示各处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.5 浅埋地下水补给及水分利用效率

从表 4 可以看出, CK 水分利用效率较高, T1、T2、T3 处理总地下水补给量差异不显著, 但均与 CK 差异显著。籽粒产量与淡水淋洗定额占比正相关, T1、T2、T3 处理作物相对产量分别为 72.20%、87.60%、90.26%; T3 处理水分利用效率与 CK、T2 处理差异不显著, CK、T1、T2 处理之间差异显著。由图 6 可知, CK 生育期耗水量及地下水补给量最大, 灌浆期地下水补给量最高。T1 处理在拔节期耗水量最低, 说明咸水灌溉一定程度抑制了玉米前期的营养生长, 拔节期 T1、T2 处理 2 次灌水均为咸水, 其地下水补给量相对较低; T3 处理在拔节期灌溉了 1 次咸水和 1 次淡水, 该阶段地下水补给量明显高于其他处理。各处理最大地下水补给量均出现在抽雄期至灌浆期, 此时根系完全下扎至深处, 对深层土壤水势影响最大。与 T1、T2 处理相比, T3 处理灌浆期玉米耗水量最高, 籽粒质量也相对较高, 地下水补给量在各生育阶段的变化幅度最低, 说明在用咸水灌溉中, “咸淡” 交替的灌溉方式对系统内水分的交换影响最小。

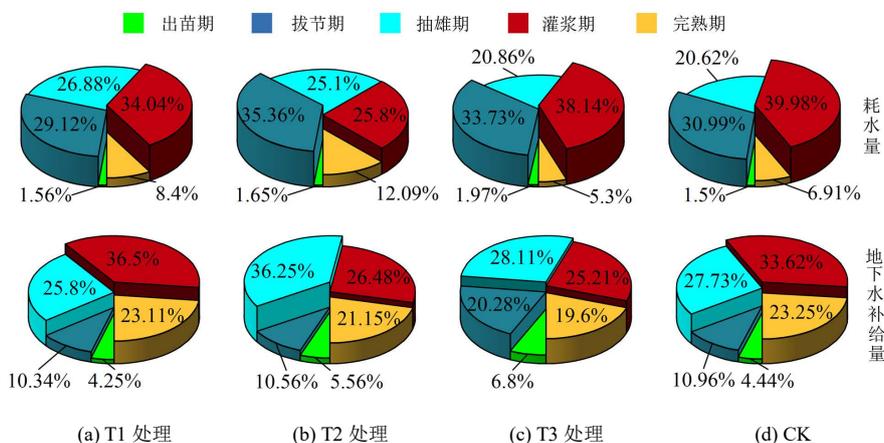


图 6 不同生育阶段的作物耗水及地下水补给占比

Fig.6 Crop water consumption and groundwater recharge shares at different fertility stages

表 4 作物耗水及水分利用效率

Table 4 Crop water consumption and water use efficiency

处理	灌水量 $I/\text{mm}$		地下水补给量 $K/\text{mm}$	蒸腾蒸发量 $ET_c/\text{mm}$	籽粒产量 $Y_{\text{grain}}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$WUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	咸水	淡水				
T1	180	0	112.71±1.13b	441.11±4.41b	9 121.57±273.65c	2.07±0.06c
T2	120	60	111.05±1.11b	441.22±4.41b	11 067.25±332.02b	2.51±0.08b
T3	90	90	111.24±1.11b	447.60±4.38b	11 403.13±342.11b	2.55±0.08ab
CK	0	180	121.46±1.32a	460.03±4.62a	12 634.06±379.02a	2.75±0.08a

注 同列中不同小写字母表示各处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

土壤水盐分布是灌溉、降水及浅埋地下水补给作用下的多因素控制的结果，与无膜和地下滴灌相比，膜下滴灌可保证表层土壤保持湿润，并且土壤盐分较低<sup>[15]</sup>。马文军等<sup>[16]</sup>对比研究长期微咸水灌溉对土壤水盐动态以及作物产量的影响，电导率为 5.4 dS/m 的微咸水用于田间灌溉是可行的，并不会导致土壤次生盐渍化，本研究地下水电导率为 4.6 dS/m 的微咸水，对表层重盐、深层中盐的农田灌溉起到了一定的淋洗效果，这与前人<sup>[11-12,17]</sup>研究结果相同。杨培岭等<sup>[18]</sup>研究咸淡水交替灌溉，发现土壤纵向电导率在拔节期和抽穗期表现出先下降后上升的规律，在灌浆期则表现出上升、下降、再上升的规律，这与本研究结果不一致，原因可能为地下水埋深较浅，土壤水交换频繁导致 40~100 cm 土层盐分分布较为均匀，且试验地蒸发较大，表层盐分较深层高。Zhang 等<sup>[11]</sup>利用田间试验和 HYDRUS (2D/3D) 模型数值模拟的方法研究不同咸淡交替灌溉策略发现，生育期末 0~40 cm 土层的盐分积累有明显差异。Hassanli 等<sup>[19]</sup>研究发现，使用咸水和淡水 1:1 比例的灌溉用水在生育期结束时没有发生盐分积累，20 cm 土层土壤含盐量往往高于 40、60 cm 土层深度。这与本研究结果一致，咸淡交替灌溉土壤盐分随着土层深度的增加而逐渐降低，且由膜内向膜外扩散。王全九等<sup>[20]</sup>研究表明，应加强微咸水灌溉下土壤水盐运移长期变化过程的模拟，实现土壤水盐运移模型的尺度转化和长期预测；同时林栋等<sup>[21]</sup>通过划分模拟单元，建立基于 SHAW 模型的灌区尺度分布式模型，发现土壤含盐量具有明显的空间变异性，表层的随机性和变异性高于深层，这与本文所得到的盐分动态分布差异一致，0~20 cm 土层的土壤脱盐率整体较高，产生这一结果的原因是拔节期和抽雄期内微咸水滴灌导致表层土壤盐分逐渐上升，抽雄期和灌浆期内的淡水淋洗使大量盐分由表层土壤向深层土壤迁移。

当土壤条件和追肥制度一定时，土壤水盐分布状况主要取决于淡水淋洗的差异<sup>[22-23]</sup>。淡水淋洗会直接影响作物根区的盐分分布，对玉米根系吸水 and 生长发

育影响较大<sup>[24]</sup>。淡水淋洗定额增加会影响土壤水盐分布，但过多的淋洗定额对玉米经济产量增长效益不明显<sup>[25-26]</sup>。张帆等<sup>[27]</sup>通过改变咸淡水的灌水定额得出，夏玉米生育后期咸淡水交替灌溉既能降低土壤盐碱化风险，又能实现高产。朱成立等<sup>[28]</sup>研究交替灌溉对土壤盐分分布和夏玉米产量发现“咸淡淡”处理不会抑制玉米的生长，能保证一定的产量。杨树青等<sup>[7]</sup>研究发现，咸水淡水交替灌溉的作物相对产量在 84% 以上。本研究表明，全咸水处理导致作物减产 27.8%， “咸淡”处理作物相对产量达到 90.26%，这与杨树青等<sup>[7]</sup>研究结果相符。土壤盐分随淡水淋洗定额的增加而降低，淡水淋洗量对玉米灌浆质量有较大影响。

咸水淡水交替膜下滴灌模式必定会引起土壤水分、盐分的动态变化，其一是由于黄河中游南岸地区地下水埋深较浅，土壤含水率较高，表层蒸发较大，加重土壤盐渍化<sup>[29]</sup>；由于灌溉水源不同，随着根系吸水不同而造成土壤水势的变化，同时发生地下水与土壤水的交换；其二是滴灌会集中影响作物根区土壤水分、盐分在垂直方向的变化，0~20、20~40、40~100 cm 土层之间土壤盐分分布差异明显。所以研究土壤水分、盐分的动态变化规律、系统剖面的水量平衡，制订咸水淡水交替灌溉模式及适宜咸水用水比例，对提高作物水分利用效率和生育期土壤整体水平脱盐率至关重要<sup>[30-31]</sup>。本研究是一个生育期的大田实验，较难体现出咸水灌溉作物的逆境胁迫与响应以及根层土壤盐分迁移和脱盐效果的影响，可利用模型模拟出最合适的交替灌溉方式。

### 4 结论

1) 需水关键期“咸水淡水”交替灌溉处理根系吸水作用最明显，0~40 cm 土层土壤含水率比其他处理低 0.75%~1.3%，40~100 cm 土层土壤含水率比其他处理高 2.02%~3.71%。

2) 全咸水灌溉处理出现盐分积累，增加淡水淋洗定额可有效降低根区土壤含盐量，灌浆期 T2、T3 处理的低盐区面积占比分别为 58.45%、63.98%。

3) 每增加咸水定额 30 mm，产量降低 5%~9%，水分利用效率降低 0.08~0.11 kg/m<sup>3</sup>。交替灌溉可节

约 33%~50%的淡水资源, 作物相对产量保持在 87.60%~90.26%。

4) 地下水补给量占作物蒸散量的 21.74%~25.55%, 咸水处理的地下水补给量较淡水处理减少 8.06%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 陈敏, 黄政, 陈卫杰. 我国西北地区水资源利用及保护问题研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 98-101.  
CHEN Min, HUANG Zheng, CHEN Weijie. Research on water resources utilization and protection in Northwest China[J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(1): 98-101.
- [2] 刘友兆, 付光辉. 中国微咸水资源化若干问题研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 57-60.  
LIU Youzhao, FU Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(2): 57-60.
- [3] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125-130.  
YANG Zhen, WANG Baoshan. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125-130.
- [4] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.  
YANG Jinsong, YAO Rongjiang, WANG Xiangping, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.
- [5] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与化肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1-12.  
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao irrigation district of Inner Mongolia: Prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 1-12.
- [6] DINAR A, TIEU A, HUYNH H. Water scarcity impacts on global food production[J]. Global Food Security, 2019, 23: 212-226.
- [7] 杨树青, 叶志刚, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区咸淡水交替灌溉模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 8-17.  
YANG Shuqing, YE Zhigang, SHI Haibin, et al. Simulation and prediction of rotational irrigation with salty and fresh water in the Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 8-17.
- [8] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 579-585.  
CHEN Suying, ZHANG Xiying, SHAO Liwei, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579-585.
- [9] 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 60-64.  
LIU Zhandong, XIAO Junfu, LIU Zugui, et al. Effects of different irrigation treatment on morphological indexes, water consumption and yield of maize under mulch drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 60-64.
- [10] MALASH N, FLOWERS T J, RAGAB R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 25-38.
- [11] ZHANG Y H, LI X Y, ŠIMŮNEK J, et al. Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: The experimental and simulation approaches[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105-355.
- [12] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.  
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Publications No.56, 1998.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] SELIM T, BOUKSILA F, BERNDTSSON R, et al. Soil water and salinity distribution under different treatments of drip irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4): 1 144-1 156.
- [16] 马文程, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73-80.  
MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 73-80.
- [17] CHEN W P, HOU Z N, WU L S, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 2 001-2 008.
- [18] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281.  
YANG Peiling, WANG Yu, REN Shumei, et al. Soil moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273-281.
- [19] HASSANLI M, EBRAHIMIAN H. Cyclic use of saline and non-saline water to increase water use efficiency and soil sustainability on drip irrigated maize in a semi-arid region[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2016, 14(4): 204.
- [20] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54-57.  
WANG Quanjiu, WANG Wenyan, LYU Dianqing, et al. Water and salt transport features for salt effected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 54-57.
- [21] 林栋, 黄茜, 许尊秋, 等. 基于 SHAW 模型的南疆典型灌区适宜盐分淋洗定额空间分布[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 70-80.  
LIN Dong, HUANG Xi, XU Zunqiu, et al. Spatial distribution characteristics of the suitable salt leaching quota in typical irrigation areas of Southern Xinjiang based on SHAW model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 70-80.
- [22] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 144-152.
- [23] 齐智娟. 河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
QI Zhijuan. Soil water, heat and salt transport and simulation under mulched drip irrigation for corn of saline soil in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [24] CUCCI G, LACOLLA G, BOARI F, et al. Effect of water salinity and irrigation regime on maize (*Zea mays* L.) cultivated on clay loam soil and irrigated by furrow in Southern Italy[J]. Agricultural Water

- Management, 2019, 222: 118-124.
- [25] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 60-68.  
CUI Bingjian, GAO Feng, HU Chao, et al. The use of brackish and reclaimed waste water in agriculture: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 60-68.
- [26] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70-75.  
MA Zhongsheng, TAN Junli, WEI Tong. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70-75.
- [27] 张帆, 朱成立, 黄明逸, 等. 咸淡水交替灌溉下灌水定额对土壤盐分及夏玉米生理生长指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 61-69.  
ZHANG Fan, ZHU Chengli, HUANG Mingyi, et al. The effects of alternate saline and fresh water irrigation on soil salinity and physiological traits of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 61-69.
- [28] 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.  
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 220-228, 201.
- [29] 田建柯, 张富仓, 强生才, 等. 灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 815-822.  
TIAN Jianke, ZHANG Fucang, QIANG Shengcai, et al. Effects of irrigation level and frequency on growth and water use efficiency of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 815-822.
- [30] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 126-135.  
TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 126-135.
- [31] ARAGÜÉS R, MEDINA E T, ZRIBI W, et al. Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios[J]. Irrigation Science, 2015, 33(1): 67-79.

## Influence of Alternating Freshwater and Saline Water Irrigation on Water-salt Distribution and Maize Yield in Shallow Groundwater Regions

GUO Shuhao<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, TONG Changfu<sup>2</sup>, ZHANG Yuehong<sup>1</sup>, ZHEN Zhixin<sup>1</sup>, HE Rui<sup>1,2</sup>, LI Xianyue<sup>1\*</sup>

(1. Inner Mongolia Agricultural University Water Conservancy and Civil Engineering College, Hohhot 010018, China;

2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** 【Objective】 Many arid and semiarid regions in North and Northwest of China are poor in freshwater but have saline groundwater. Efficient utilization of these saline waters is crucial for agricultural sustainability. This study seeks to experimentally identify the optimal alternation of freshwater and saline water for irrigating arable crops in areas with shallow groundwater. 【Method】 The experiment was conducted at a maize field from May to October in 2022 at an experimental site in Darat Banner, Erdos. It compared four irrigations: irrigating with saline water only (T1), irrigating with saline water twice followed by a freshwater irrigation (T2), irrigating with saline water once followed by one freshwater irrigation (T3), irrigating with freshwater only (CK). In each treatment, we measured water and salt distribution in the soil, as well as grain yield of the maize. 【Result】 Alternate irrigation significantly influenced soil moisture and salinity. T3 considerably increased root water uptake during the critical growth stage of the crop, manifested by the 0.75% to 1.3% reduction in water content in the 0~40 cm soil layer, and 2.02% to 3.71% increase in water content in the 40~100 cm soil layer. During the irrigation period, there were 58.45% and 63.98% of soils salinized in T2 and T3, respectively. Compared to CK, alternate irrigation reduced crop yield by 10% to 13%, but saved 33% to 50% of freshwater. Grain yield and water use efficiency of T3 were 90.26% and 23.2% higher than that of T1, respectively, despite its 7.2% reduction in grain yield compared to CK. Groundwater recharge during the reproductive period accounted for 21.74% to 25.55% of the water consumed by the maize. 【Conclusion】 Considering the effect of alternate irrigation on distribution of water and salt in soil, as well as the growth and water consumption of the maize, the most suitable irrigation method for maize in the saline soil is alternating saline water and freshwater(T3).

**Key words:** alternating irrigation; shallow groundwater; water-salt distribution; water use efficiency

责任编辑：白芳芳