

# 春汇/夏浇灌溉制度对盐碱土壤水盐运移及向日葵水分利用的影响

赵一波<sup>1</sup>, 杨威<sup>1</sup>, 屈忠义<sup>1,2\*</sup>, 王丽萍<sup>1</sup>, 高晓瑜<sup>1</sup>, 张如鑫<sup>1</sup>, 任恩良<sup>2</sup>  
(1.内蒙古农业大学, 呼和浩特 010000; 2.内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**【目的】确定河套灌区向日葵适宜的节水控盐春汇—夏浇灌溉制度, 提高灌区农业灌溉水资源利用效率。【方法】设置非生育期畦灌(春汇 S, 灌溉定额 135、95 mm)和作物生育期滴灌(夏浇 W, 灌溉定额 135、100、68 mm)田间小区试验, 研究了不同春汇/夏浇条件下的向日葵农田土壤水盐分布规律、盐分淋洗效果、作物生长特征及水分利用效率。【结果】S135W135 处理下的整个生育期内平均土壤含水率较高, 为 17.10%, 为饱和含水率的 75.53%; S95W135 处理下的土壤含水率变异系数最小, 为 22.40%。S135、S95 处理下的土壤脱盐率分别介于 50.50%~32.64%、38.87%~21.87%, 春汇后 S135 和 S95 处理下的 0~80 cm 土层的土壤盐分量无显著差异; S135W100、S95W135 处理下的灌溉水淋洗深度较高, 脱盐效果较好, 土壤脱盐率均显著高于除 S135W135 处理以外的其他处理, 0~80 cm 土层脱盐率为 40.77%和 33.37%, 较 S135W135 处理分别提高 68.39%、37.86%。S95W135、S135W100 处理下的地上部干物质量显著大于其他处理, 相比 S135W135 处理增加 10.55%和 9.94%。S135W100 处理的作物水分利用效率最高(21.59%), 较 S135W135 处理显著增加 13.03%。【结论】常规春汇水量减少 30%(95 mm)与夏浇滴灌(135 mm)是河套灌区向日葵农田适宜的灌溉制度。

**关键词:** 河套灌区; 节水灌溉; 水盐运移; 水分利用效率; 脱盐率

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023450

赵一波, 杨威, 屈忠义, 等. 春汇/夏浇灌溉制度对盐碱土壤水盐运移及向日葵水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 10-17.

ZHAO Yibo, YANG Wei, QU Zhongyi, et al. The effect of dual spring-summer irrigations on water and salt transport in saline-alkali soil and water use of sunflower in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 10-17.

## 0 引言

【研究意义】农业灌溉用水量占全球淡水资源消耗总量的 90%, 内蒙古河套灌区的灌溉面积达 57 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>, 其中 50%的灌溉土地受到土壤盐渍化影响。灌区地下微咸水资源丰富, 微咸水灌溉是解决淡水资源供需矛盾的有效手段。对有限的水资源进行合理分配以科学调控土壤水盐、提高水资源利用效率对灌区农业的可持续发展至关重要。【研究进展】以往研究主要集中于作物生育期淡水/微咸水交替灌溉<sup>[2]</sup>、井渠双灌的灌水量及方式研究等<sup>[3-4]</sup>。合理的咸淡水联合灌溉在稳产的前提下可有效节约淡水资源。河套灌区土壤易发生盐碱化, 仅依靠作物生育期进行灌溉难以控制土壤盐分, 在非生育期通过地面灌溉集中淋洗(春汇、秋浇)是灌区有效的水盐管理制度<sup>[5]</sup>。杨鹏

年等<sup>[6]</sup>对新疆不同盐渍化程度的农田开展春灌定额研究, 结果表明, 中、重度盐渍化土壤的适宜定额为 1 800~2 250  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ , 无法直接指导河套灌区的科学灌溉。李金刚等<sup>[7]</sup>在河套灌区盐碱地利用微咸水膜下滴灌的研究发现, 春汇灌溉 225 mm 黄河水后各土层盐分量会降低 21.46%。Liu 等<sup>[8]</sup>发现, 生育期使用微咸水进行膜下滴灌, 非生育期采用 150 mm 灌溉定额淋洗, 土壤盐分可以淋洗到 60 cm 以下土层。Phocaidies 等<sup>[9]</sup>、明广辉等<sup>[10]</sup>推荐在作物收获后对盐分进行集中淋洗。Pang 等<sup>[11]</sup>研究表明, 使用塑料薄膜覆盖土壤表面可以减少蒸发量和浅层土壤盐分量, 提高水资源利用效率。【切入点】河套灌区灌溉制度及节水控盐机理的研究集中在作物类型<sup>[12]</sup>、生育期滴灌<sup>[13]</sup>、秋浇<sup>[14]</sup>等方面, 生育期膜下滴灌协同春汇的灌水环节相互独立, 土壤盐分分布的机制及盐分平衡规律仍不清楚。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究聚焦于不同春汇/夏浇灌溉制度下的土壤水盐分布和盐分平衡, 以寻求作物高产、灌水利用效率提高的河套灌区科学合理的向日葵春汇/夏浇协同灌溉制度。

收稿日期: 2023-09-26 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201202, 2021YFC3201205); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0022)

作者简介: 赵一波(1999-), 女, 博士研究生, 主要从事盐碱地改良与水资源高效利用研究。E-mail: 1352236820@qq.com

通信作者: 屈忠义(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水理论与农田水土环境效应研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—9 月在巴彦淖尔市五原县永联村进行，试验地位于内蒙古河套灌区中部（108°0'27" E，41°4'39" N），海拔高程 1 029.1 m。试验区属于中温带大陆性气候，干燥多风，蒸发强烈，冬春季土壤盐分表层聚集现象显著；多年平均降水量为 170 mm，集中在 6—8 月，向日葵生育期内地下水埋深为 1.6 m。试验区耕地为中重度盐碱土壤：0~40 cm 为黏性壤土，40~60 cm 为砂质黏壤土；平均体积质量为 1.64 g/cm<sup>3</sup>，田间持水率为 18.91%，初始土壤含盐量为 5.74 g/kg，pH 值为 8.54，有机质量为 10.36 g/kg，全氮量为 0.69 g/kg，速效磷量为 46.29 mg/kg，速效钾量为 571.5 mg/kg。本试验中，春汇灌溉使用黄河水，其多年平均矿化度为 0.55 g/L；夏浇滴灌水源为地下水，矿化度为 1.95 g/L。2022 年 4—9 月试验区总降水量为 151.2 mm，向日葵生育期（5—9 月）降水量和气温变化如图 1 所示。

1.2 试验设计

基于田间小区试验，小区面积为 128 m<sup>2</sup>（8 m×16

m），为防止各小区间的水盐交换，每个小区四周用水泥浇筑埋深 1.8 m 的隔断，水泥台高出地面 30 cm。试验设置春汇灌溉定额（S135: 135 mm、S95: 95 mm）、夏浇灌溉定额（W135: 135 mm、W100: 100 mm、W68: 68 mm）2 个因素，共计 6 个处理，每个处理设置 3 个重复，共计 18 个小区，选择春汇量 S135: 135 mm、夏浇 W135: 135 mm 作为对照，各处理春汇及夏浇灌溉时间及灌溉定额如表 1。

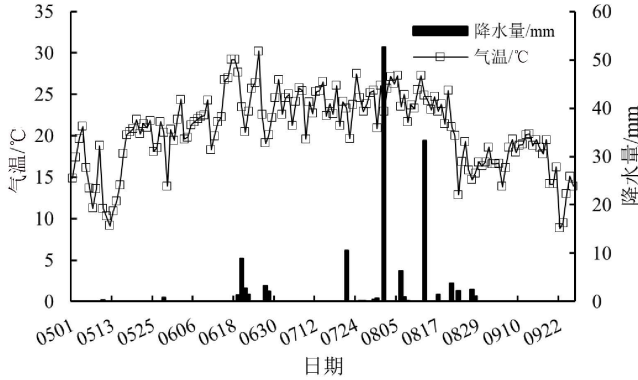


图 1 2022 年向日葵生育期降水量和气温变化

Fig.1 Changes of rainfall and temperature during the growth period of sunflower in 2022

表 1 2022 年向日葵春汇/夏浇灌溉时间与灌溉定额

| Tab.1 Irrigation time, irrigation quota and irrigation quota for spring/summer watering of sunflower |              |          |                |          |         |          |          |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------|----------------|----------|---------|----------|----------|---------|
| 处理                                                                                                   | 春汇灌溉时间及定额/mm |          | 夏浇滴灌时间及灌溉定额/mm |          |         |          |          |         |
|                                                                                                      | 5 月 12 日     | 幼苗期      |                | 现蕾期      |         | 开花期      | 灌浆期      | 灌溉定额/mm |
|                                                                                                      |              | 6 月 29 日 | 7 月 15 日       | 7 月 24 日 | 8 月 5 日 | 8 月 15 日 | 8 月 31 日 |         |
| S135W135                                                                                             |              | 22.5     | 22.5           | 22.5     | 22.5    | 22.5     | 22.5     | 135     |
| S135W100                                                                                             | 135          | 20       | 20             | 20       | 20      | 20       | 0        | 100     |
| S135W68                                                                                              |              | 17       | 17             | 17       | 17      | 0        | 0        | 68      |
| S95W135                                                                                              |              | 22.5     | 22.5           | 22.5     | 22.5    | 22.5     | 22.5     | 135     |
| S95W100                                                                                              | 95           | 20       | 20             | 20       | 20      | 20       | 0        | 100     |
| S95W68                                                                                               |              | 17       | 17             | 17       | 17      | 0        | 0        | 68      |

供试向日葵品种为 GF 361，于 6 月 1 日播种，按 1 膜 2 行的种植模式种植，播种后穴口覆盖细砂，其行距为 40 cm，株距 60 cm，膜距 90 cm。各处理的施肥制度为播种时统一施入底肥磷酸二铵 300 kg/hm<sup>2</sup>，硫酸钾复合肥料 120 kg/hm<sup>2</sup>，后期随滴灌追施尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>。其他的田间管理措施、病虫害防治同当地作物高产栽培管理。

1.3 数据采集及计算方法

1.3.1 土壤含水率及电导率

在春汇前后、播种后每隔 7 d 通过土钻取样一次（降水后、灌水前、后加测），取样深度为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm，每个处理设置 3 个重复。取回的土壤样品置于烘箱 105 ℃烘干 8 h，计算土壤质量含水率。风干土样研磨过 2 mm 筛，用电导仪测定土壤浸提液的电导率（土水比为 1：5）。

1.3.2 土壤脱盐率

土壤脱盐率为试验区 0~80 cm 土壤盐分的减小值

占初始值的百分比，根据土壤电导率转换含盐量计算<sup>[15]</sup>。

1.3.3 作物生长指标

在每个小区选取 3 株代表性向日葵，测量向日葵在各个生育期的叶面积，并计算叶面积指数(LAI)<sup>[16]</sup>。在每个处理中选取具有代表性的 3 株向日葵植株，在 105 ℃的通风烘箱中杀青 30 min，于 70 ℃下烘干至恒质量，测定单株干质量。

向日葵成熟后，每个处理选取具有代表性的 3 株向日葵收获，进行脱粒、自然风干，随机选取籽粒测定百粒质量，折算为实际产量。

1.3.4 作物耗水量及水分利用效率

将作物蒸散量(ET)作为实际耗水量，采用水量平衡法<sup>[17]</sup>计算。试验小区土地平坦，每个小区之间设有水泥隔断，且滴灌水量较小，故深层渗漏量、地表径流量、侧向排水量可忽略不计，仅考虑降水量、灌水量、地下水补给量<sup>[18]</sup>及各层土壤储水量的变化量。水分利用效率(WUE)为作物籽粒产量与向日葵生育

期耗水量之比。

#### 1.4 数据分析方法

采用 Excel 分析数据, 利用 SPSS 27 软件进行方差分析, 使用 LSD 法进行显著性检验 ( $P < 0.05$ )。采用 origin 2018 软件绘制土壤盐剖面分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 春汇/夏浇灌溉制度对土壤含水率的影响

春汇灌溉后 0~80 cm 土层的土壤均有较好的墒情, 土壤含水率在 18.69%~22.95%之间; 各处理下的不同土层土壤含水率变化特征有明显差异。图 2 为向日葵整个生育期各次滴灌前、后的土壤含水率变化情况, 幼苗期和现蕾期各处理滴灌频率一致, 土壤含水率与滴灌水量呈正相关; 开花期 W135、W100 处理

下的平均土壤含水率分别为 13.25%和 12.23%, W68 处理未进行滴灌, 土壤含水率线性下降 29.43%; 灌浆期 W135 处理下的土壤含水率为 12.72%, W100、W68 处理未进行滴灌, 土壤含水率为 8.09、7.93%。0~20 cm 土层在灌水后波动较大, S135W68 处理滴灌水量较小、水分严重亏缺, 含水率变异系数为 37.73; S95W135 处理下的变异系数为 24.20, 表明生育期适时适量滴灌可提升土壤水分保蓄效果。S135W135 和 S135W100 处理下的 20~40 cm 土层含水率显著高于其他处理, 分别介于 11.62%~24.42%和 6.18%~22.02%。

由表 2 可知, 向日葵根系主要分布在 0~40 cm 土层, S135W135 处理下的土壤含水率最高, 整个生育期平均土壤含水率为 17.10%, 占田间持水率的 90.43%。40~80 cm 土层含水率变化较小, 整体趋于平缓。

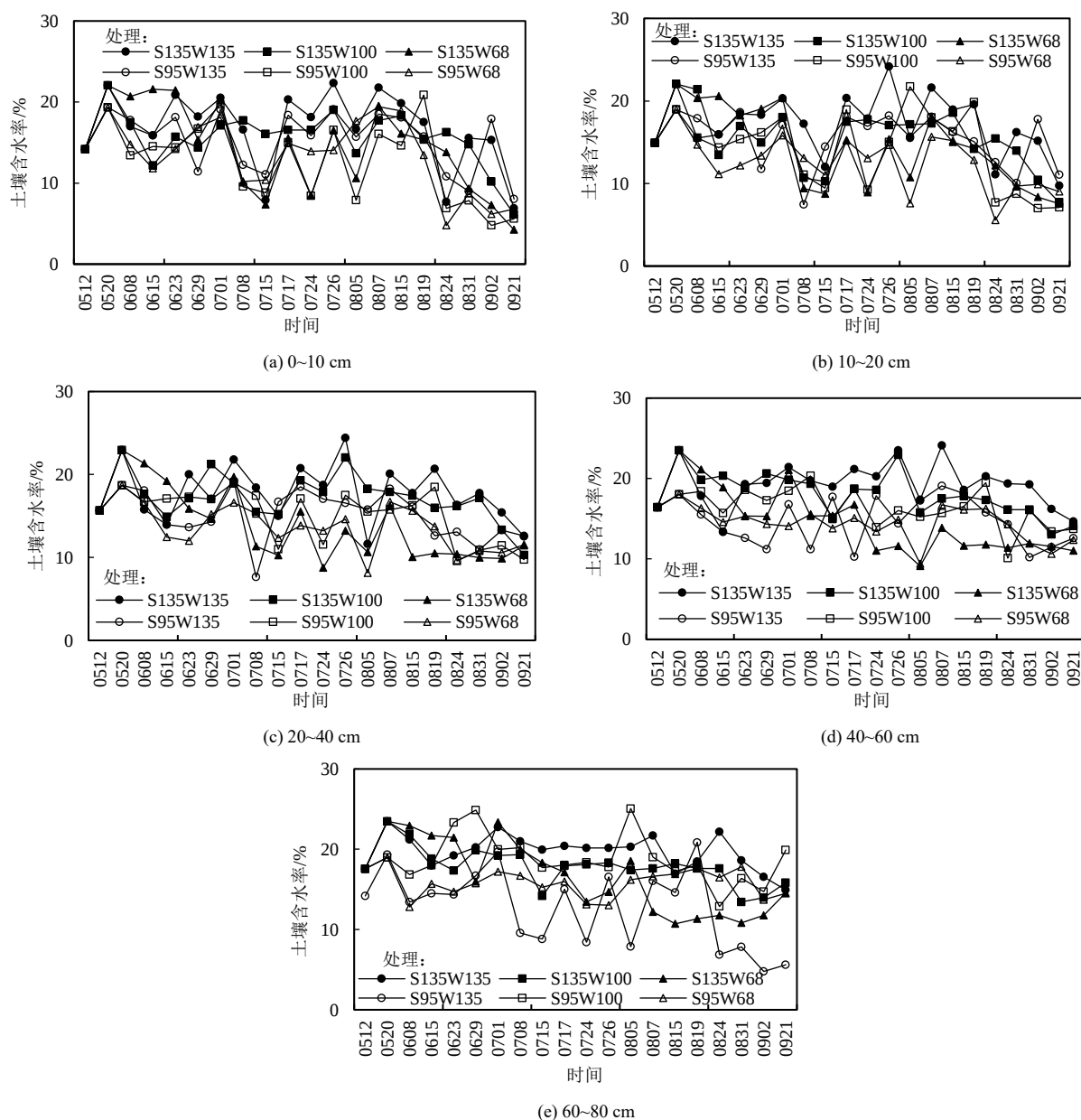


图 2 滴灌处理前后 0~80 cm 土层土壤含水率动态变化

Fig.2 Dynamic changes of 0-80 cm soil water content before and after drip irrigation

表 2 2022 年生育期 0~40 cm 土层的土壤含水率

| Tab.2 Soil moisture content of 0-40 cm soil layer during crop growth period in 2022 |            |            |            |            |            | %          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 处理                                                                                  | S135W135   | S135W100   | S135W68    | S95W135    | S95W100    | S95W68     |
| 范围                                                                                  | 9.41~23.63 | 8.05~20.80 | 6.84~21.16 | 7.70~18.96 | 7.11~20.54 | 6.16~17.32 |
| 平均值                                                                                 | 17.06      | 15.67      | 13.80      | 14.89      | 13.72      | 12.74      |
| 中位数                                                                                 | 17.62      | 16.47      | 13.53      | 16.00      | 15.26      | 13.09      |

2.2 春汇/夏浇灌溉制度对土壤盐分的影响

2.2.1 春汇/夏浇灌溉制度对土壤盐分的影响

图 3 为不同春汇/夏浇灌溉制度下土壤盐分剖面分布。春季气温回升，冻土层通融，土壤表层反盐，春汇前土壤盐分有明显的积聚现象，平均含盐量为 5.74 g/kg；试验区春汇较周边农田稍晚，被淋洗到地下水中的盐分随地下水位上升被带回深层土壤，因此土壤盐分随着土层深度的增加先降低后增加，在 40 cm 土层出现极小值。春汇后，0~40 cm 土层含盐量明显降低，S135、S95 处理下的含盐量分别达到 2.65

g/kg 和 3.72 g/kg；40~80 cm 土层淋洗效果减弱，S135、S95 处理下的含盐量分别为 4.12 g/kg 和 4.50 g/kg，各处理无显著差异。

夏浇后土壤含盐量均较春汇后出现了不同程度的增加。0~40 cm 土壤含盐量增加了 0.68 g/kg，40~80 cm 土壤含盐量增加了 0.35 g/kg，盐分呈向上迁移趋势。夏浇后，S95W135 处理平均含盐量显著小于其他处理，为 2.59~3.78 g/kg；0~80 cm 土层土壤盐分移动最为缓慢。

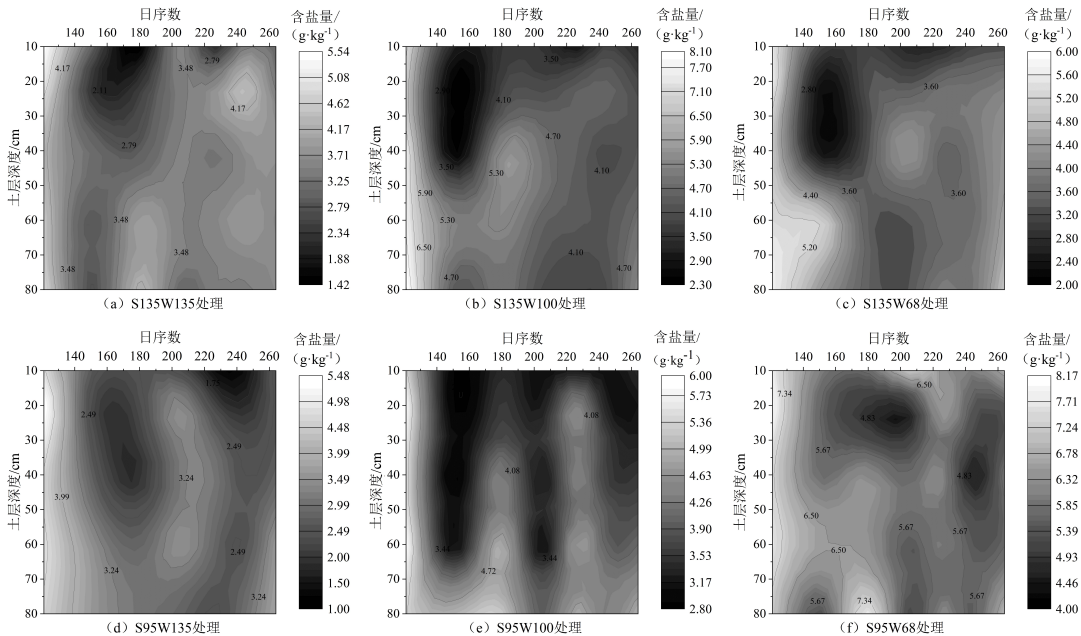


图 3 春汇和夏浇制度下土壤盐分剖面分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of soil salinity profiles under spring and summer watering systems

2.2.2 不同灌溉制度对土壤脱盐率的影响

脱盐率可直观表述土壤脱盐效果，评价灌溉脱盐的有效性。表 3 为不同春汇/夏浇灌溉制度下的向日葵全生育周期不同土层脱盐率。春汇后，0~80 cm 土层土壤脱盐率与灌水量呈正相关，135、95 mm 灌溉定额下土壤脱盐率分别为 50.50%~32.64%、38.87%~21.87%。各处理全年平均脱盐率受春汇、夏浇的共同影响，由大到小依次为 S135W100、S95W135、S95W100、S135W135、S135W68、S95W68 处理；春汇将盐分淋洗至深层土壤后使用微咸水滴灌，生育期各次灌溉后土壤积盐率如表 3 所示。滴灌水量为 100 mm 时积盐率最小，土壤反盐抑制效果最好；S95W68 处理下的春汇淋洗不充分，滴灌对较高盐分

的淋洗作用不明显，土壤含盐量居高不下，使滴灌积盐率趋近于 0。土层深度与土壤脱盐率呈负相关，0~20 cm 土壤脱盐率最高，为 39.71%；20~40 cm 土壤脱盐率为 27.71%；40~80 cm 土壤脱盐率为 21.35%。S135W100、S95W135 处理下的淋洗深度较深，脱盐效果较好，0~80 cm 土层的土壤脱盐率分别介于 48.84%~34.68%、49.51%~18.24%。

2.3 不同春汇/夏浇灌溉制度对向日葵生长及水分利用效率的影响

2.3.1 向日葵叶面积指数

叶片是作物进行光合作用的主要场所，是决定作物干物质累积和产量的关键因素之一，作物群体的叶面积大小通常使用 LAI 表示。图 4 为向日葵各生育期

不同灌水制度下的  $LAI$ ，各处理向日葵  $LAI$  迅速增长后稳定下降，呈单峰曲线变化。营养生长阶段向日葵叶片生长较快，现蕾期 S135W100、S135W68、S95W135、S95W100、S95W68 处理下的  $LAI$  增长率分别为 297.60%、276.67%、157.99%、197.90%、213.52%、225.55%；开花后期  $LAI$  达到最大，

S135W100、S95W135 处理分别为 10.19、9.78，较 S135W135 处理显著增加 7.94、3.54%。开花末期，向日葵由营养生长转为生殖生长阶段，叶片生长速率逐渐转为负值， $LAI$  趋于稳定并开始缓慢下降。灌浆期结束时 S135W100、S95W135 处理下的  $LAI$  显著高于其他处理。

表 3 春汇/夏浇灌溉制度下 0~80 cm 土层的土壤脱盐率

Tab.3 Soil desalting rate in 0-80 cm soil layer under spring sink/summer irrigation system

| 处理       | 土层/cm | 春汇脱盐率/% | 生育期各次夏浇脱盐率/% |        |        |        |        | 全年脱盐率/% |
|----------|-------|---------|--------------|--------|--------|--------|--------|---------|
|          |       |         | 幼苗期          | 现蕾期    | 开花期    | 灌浆期    | 平均值    |         |
| S135W135 | 0~20  | 51.29   | -48.33       | 18.44  | -36.16 | 17.75  | -12.07 | 39.50   |
|          | 20~40 | 24.72   | -23.12       | 8.41   | -12.24 | -2.56  | -7.38  | 12.28   |
|          | 40~60 | 38.49   | 12.44        | -4.07  | -5.50  | 5.25   | 2.03   | 20.82   |
|          | 60~80 | 42.90   | 26.50        | -10.26 | 1.57   | -6.90  | 2.73   | 24.24   |
|          | 平均值   | 39.35   | -8.13        | 3.13   | -13.08 | 3.38   | -3.67  | 24.21ab |
| S135W100 | 0~20  | 54.10   | -7.31        | 1.42   | -15.75 | 14.95  | -1.67  | 48.84   |
|          | 20~40 | 69.70   | -32.32       | 7.00   | 12.24  | -8.94  | -5.50  | 43.12   |
|          | 40~60 | 31.76   | 16.20        | 3.11   | 3.89   | -14.24 | 2.24   | 36.42   |
|          | 60~80 | 46.42   | 18.95        | 3.73   | -2.39  | -33.12 | -3.21  | 34.68   |
|          | 平均值   | 50.50   | -1.12        | 3.82   | -0.50  | -10.33 | -2.04  | 40.77a  |
| S135W68  | 0~20  | 51.35   | -25.72       | 6.49   | -5.99  | -4.80  | -7.50  | 35.81   |
|          | 20~40 | 53.95   | -31.66       | 21.24  | -9.68  | -14.11 | -8.55  | 13.56   |
|          | 40~60 | 2.42    | 2.58         | -9.99  | 1.02   | -25.32 | -7.93  | 14.71   |
|          | 60~80 | 22.85   | 4.14         | -19.40 | 4.63   | -29.80 | -10.11 | 13.01   |
|          | 平均值   | 32.64   | -12.66       | -0.41  | -2.50  | -18.51 | -8.52  | 19.27b  |
| S95W135  | 0~20  | 52.81   | -22.27       | 40.25  | 11.09  | -66.18 | -9.27  | 49.51   |
|          | 20~40 | 41.64   | -73.15       | 1.71   | 20.28  | -12.44 | -15.90 | 40.13   |
|          | 40~60 | 28.20   | -25.15       | 19.67  | 14.33  | -48.90 | -10.01 | 25.60   |
|          | 60~80 | 22.69   | 8.82         | 13.37  | -19.22 | -30.78 | -6.95  | 18.24   |
|          | 平均值   | 36.34   | -27.93       | 18.75  | 6.62   | -39.57 | -10.53 | 33.37ab |
| S95W100  | 0~20  | 49.58   | 11.52        | -26.37 | 18.90  | -3.00  | 0.26   | 41.69   |
|          | 20~40 | 49.06   | 32.54        | -47.99 | 20.06  | 1.23   | 1.46   | 35.80   |
|          | 40~60 | 49.63   | 41.53        | -65.27 | 18.76  | -6.16  | -2.78  | 28.80   |
|          | 60~80 | 7.23    | 25.15        | -24.92 | 11.73  | -13.98 | -0.50  | 8.37    |
|          | 平均值   | 38.87   | 27.68        | -41.14 | 17.36  | -5.48  | -0.39  | 28.66ab |
| S95W68   | 0~20  | 25.88   | -10.90       | -11.42 | 12.02  | -5.09  | -3.85  | 22.93   |
|          | 20~40 | 21.70   | 10.88        | -9.24  | 27.31  | -29.08 | -0.03  | 21.38   |
|          | 40~60 | 14.49   | 14.64        | -11.35 | 9.00   | -2.52  | 2.44   | 26.47   |
|          | 60~80 | 25.39   | 32.57        | -18.72 | 11.19  | -24.93 | 0.03   | 4.88    |
|          | 平均值   | 21.87   | 11.80        | -12.68 | 14.88  | -15.41 | -0.35  | 18.91b  |

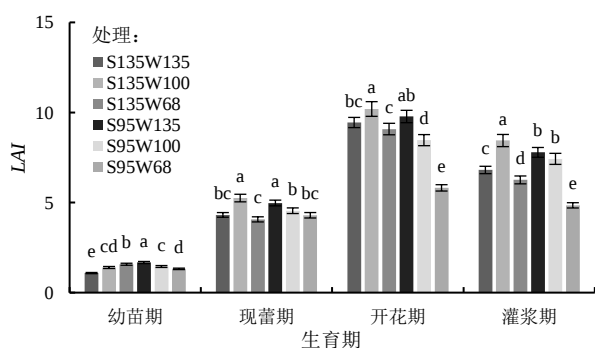
图 4 春汇/夏浇灌溉制度下向日葵  $LAI$  响应差异

Fig.4 Response difference of sunflower leaf area index under spring/summer irrigation system

### 2.3.2 向日葵产量和水分利用效率

表 4 为不同春汇/夏浇灌水制度下的向日葵产量

与水分利用效率。S95W135、S135W100 处理下的向日葵地上部干物质质量、产量显著大于其他处理，地上部干物质质量相较于 S135W135 处理增大了 10.55%和 9.94%；S95W135 处理向日葵产量分别较 S135W135、S135W100、S135W68、S95W100、S95W68 处理增加 16.12%、2.25%、33.47%、25.18%、56.53%；S95W68 处理下的产量仅为 4 251.30 kg/hm<sup>2</sup>。

S135W100 处理下的水分利用效率最高，为 21.59 kg/ (mm·hm<sup>2</sup>)，水分利用效率由大到小依次为 S135W100、S95W135、S95W100、S135W135、S135W68、S95W68 处理，其中 S135W100、S95W135 处理相对较高，分别相比 S135W135 处理增加了 11.96%和 7.86%。

表4 向日葵产量、耗水量与水分利用效率

Tab.4 Yield, water consumption and water use

| efficiency of sunflower |            |                                        |                               |            |                                                     |
|-------------------------|------------|----------------------------------------|-------------------------------|------------|-----------------------------------------------------|
| 处理                      | 百粒<br>质量/g | 地上部<br>干物质量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 产量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 耗水量/<br>mm | 水分利用效率/<br>(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) |
| S135W135                | 18.86a     | 1 335.80b                              | 5 731.14b                     | 300.08b    | 19.10b                                              |
| S135W100                | 19.47a     | 1 468.64a                              | 6 508.35a                     | 301.49b    | 21.59a                                              |
| S135W68                 | 17.37b     | 1 103.46d                              | 4 986.02d                     | 295.81b    | 16.86c                                              |
| S95W135                 | 19.89a     | 1 476.72a                              | 6 654.77a                     | 327.27a    | 20.33a                                              |
| S95W100                 | 19.09a     | 1 241.44c                              | 5 316.25c                     | 253.26c    | 20.99a                                              |
| S95W68                  | 17.13b     | 642.36e                                | 4 251.30e                     | 212.65d    | 10.52d                                              |

### 3 讨论

盐分淋滤效率可以评价灌溉制度的优劣<sup>[19]</sup>。春汇灌溉定额越大,盐分向下迁移的效果越好,根层(0~40 cm)土壤脱盐率大于深层(40~80 cm);春汇后土壤盐分随水分蒸发小幅度上升,但相较于春汇前仍处于脱盐状态。夏浇滴灌水量较小,淋洗效果有限,导致土壤盐分量增加<sup>[20]</sup>,结合春汇对盐分的淋洗作用,土壤仍处于脱盐状态。研究表明,滴灌定额较大且矿化度较低(0.4 g/L)时不会出现土壤次生盐渍化<sup>[21]</sup>;同时灌溉水量和次数的增加,土壤离子组成朝着良性方向发展<sup>[5]</sup>。农田本身是质地不同的层状土壤,盐分的运移因阻滞作用滞留在黏土夹层中<sup>[22]</sup>。研究表明,135、100 mm 滴灌定额可使土壤盐分维持在较低水平。

土壤水盐运移与灌溉水量及灌水次数直接相关。膜下滴灌淋洗深度有限,0~40 cm 土层盐分变化幅度大,深层土壤盐分变化缓慢;表层土壤在生育后期产生盐分累积。灌水量较大、灌水次数多的处理下的土壤含水率基本高于灌水量较小、灌水次数较少的处理,水分携带盐分在土壤蒸发和灌溉的共同作用下运移,灌水量较大、灌水次数较多的处理土壤盐分在较稳定水平。在向日葵生育前期,灌溉次数相同,灌水量越大,土壤盐分下移距离和范围越广,盐分积累也越慢<sup>[23]</sup>。灌溉结束后,S95W135 处理下的土壤含水率较高,抑制土壤返盐效果显著。

S135W100 处理可以显著提高向日葵叶面积指数,向日葵苗期受低盐胁迫,作物自身调节促使根系发育较好<sup>[24-25]</sup>,生长期微咸水滴灌反而可产生一定的促进作用<sup>[26]</sup>;当灌溉定额到达一定水平后,增加灌溉水量对叶面积指数影响不大甚至有负向影响<sup>[27]</sup>。S135W100、S95W135 处理下的叶片凋萎速率低于其他处理,有利于作物干物质累积、增加籽粒产量。生育期滴灌频繁、水量过大会延长作物成熟进程,从而影响产量<sup>[28]</sup>;滴灌至充分供水有利于向日葵苗期同化物向叶片的分配转移,对作物地上部生物量累积、产量补偿显著<sup>[29]</sup>。

### 4 结论

1) S135W100、S95W135 处理下的淋洗深度较深,脱盐效果较好,0~80 cm 土层土壤脱盐率为31.60%和29.28%,分别较S135W135 处理提高了30.53、20.96%。

2) 春灌和夏浇协同改善了土壤水盐环境,轻度缺水灌溉不会使向日葵产量明显下降,且会提高水分利用效率。

3) 综合考虑水分高效利用、节水控盐及作物稳产,春汇灌水定额95 mm,夏浇滴灌定额135 mm,向日葵全生育期灌水6次的灌溉制度是河套灌区适宜的向日葵灌溉制度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献:

- [1] GUO K, LIU X J. Reclamation effect of freezing saline water irrigation on heavy saline-alkali soil in the Hetao irrigation district of North China[J]. Catena, 2021, 204: 105 420.
- [2] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363-370.
- [3] 丁艳宏, 屈忠义, 李昌见, 等. 不同灌溉水源及方式对玉米生长特性及水肥利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 1-7. DING Yanhong, QU Zhongyi, LI Changjian, et al. Effects of different water sources and irrigation methods on growth and water-fertilizer use efficiency of maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 1-7.
- [4] 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. TIAN Delong, GUO Kezhen, LU Haiyuan, et al. Optimizal irrigation systems of the main crops under well-canal irrigation mode in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(1): 48-52.
- [5] 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.
- [6] 杨鹏年, 孙珍珍, 汪昌树, 等. 绿洲灌区春灌效应及定额研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 29-33, 61. YANG Pengnian, SUN Zhenzhen, WANG Changshu, et al. A study of the effect and quota of spring irrigation on Oasis irrigation areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 29-33, 61.
- [7] 李金刚, 屈忠义, 黄永平, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 217-223. LI Jingang, QU Zhongyi, HUANG Yongping, et al. Effects of control lower limit of saline water mulched drip irrigation on water salt movement and corn yield in saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 217-223.
- [8] LIU Meixian, YANG Jingsong, LI Xiaoming, et al. Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in Northwest China[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 675-688.

- [9] PHOCAIDES A. Water quality for irrigation[M]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007.
- [10] 明广辉, 田富强, 胡宏昌. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 90-97.  
MING Guanghui, TIAN Fuqiang, HU Hongchang. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 90-97.
- [11] PANG H C, LI Y Y, YANG J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1 971-1 977.
- [12] 孔东. 含盐土壤节水灌溉下作物-水-盐响应关系及模型研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.  
KONG Dong. Study on crop response to soil water-salt and its modelling for saline soil under water-saving irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004.
- [13] 杜斌, 屈忠义, 于健, 等. 内蒙古河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 16-20.  
DU Bin, QU Zhongyi, YU Jian, et al. Experimental study on crop coefficient under mulched drip irrigation in Hetao irrigation district of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 16-20.
- [14] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.  
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 31-36.
- [15] ZHANG H Y, LU C, PANG H C, et al. Straw layer burial to alleviate salt stress in silty loam soils: Impacts of straw forms[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(1): 265-276.
- [16] 陈建忠. 向日葵叶面积调整系数[J]. 中国油料, 1984, 6(1): 70-73.
- [17] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区控制排水对油葵生长与养分利用的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 313-323.  
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of controlled drainage on oil sunflower growth and nutrient utilization in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 313-323.
- [18] 李法虎, 傅建平, 孙雪峰. 作物对地下水利用量的试验研究[J]. 地下水, 1992, 14(4): 197-202.
- [19] 赵宇龙, 李明思, 陈绍民, 等. 滴灌条件下层状土壤滞盐作用的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 29-34.  
ZHAO Yulong, LI Mingsi, CHEN Shaomin, et al. Retardation effect of layered soil to salt transfer under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 29-34.
- [20] LIU Yannan, ZHU Yan, MAO Wei, et al. Development and application of a water and salt balance model for well-canal conjunctive irrigation in semiarid areas with shallow water tables[J]. Agriculture, 2022, 12(3): 399.
- [21] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 149-159.  
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 149-159.
- [22] 周宏飞, 马金玲. 塔里木灌区棉田的水盐动态和水盐平衡问题探讨[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(6): 10-14.  
ZHOU Hongfei, MA Jinling. Studies on water-salt dynamics and balance of cotton crops land in Tarim irrigation region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(6): 10-14.
- [23] 张金珠. 新疆膜下滴灌棉花土壤水盐运移特征及耗水规律试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.  
ZHANG Jinzhu. Study on water water-salt transport characteristics and consumption of cotton under drip irrigation with film mulch in North Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010.
- [24] 丁端锋, 蔡焕杰, 王健, 等. 玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 64-67.  
DING Duanfeng, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. A study on compensative growth of maize under regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 64-67.
- [25] 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 Quanjie, 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.
- [26] 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.  
ZHENG Junyu, ZHU Chengli, ZHAI Yaming. Impact of alternating irrigation using saline and fresh water on maize growth and its yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 37-41.
- [27] 贾咏霖, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 44-51.  
JIA Yonglin, QU Zhongyi, DING Yanhong, et al. The effects of soil amendment with straw biochar on water and salt dynamics as well as water use efficiency of corn under different irrigations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 44-51.
- [28] 李媛媛, 杨恒山, 张瑞富, 等. 灌溉定额对浅埋滴灌春玉米生长与产量的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 345-348.  
LI Yuanyuan, YANG Hengshan, ZHANG Ruifu, et al. Effects of irrigation quota on growth and yield of spring maize under shallow subsurface drip irrigation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 345-348.
- [29] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同灌溉定额对向日葵生物量累积动态及产量构成要素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 20-25.  
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xianyu, et al. Dynamic of biomass, yield and their components of sunflowers under different irrigation modes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 20-25.

## The effect of dual spring-summer irrigations on water and salt transport in saline- alkali soil and water use of sunflower in Hetao Irrigation District

ZHAO Yibo<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, QU Zhongyi<sup>1,2\*</sup>, WANG Liping<sup>1</sup>, GAO Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHANG Ruxin<sup>1</sup>, REN Enliang<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010000, China;

2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract: 【Objective】** A pre-planting border irrigation in spring coupled with a drip irrigation in summer during crops growth season is an irrigation technique to reduce soil salinity and safeguard crops growth in the salt-affected

soils in the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia. This paper investigates the impact of different combinations of irrigation amounts in the dual irrigations on changes in soil water and salt, as well as the growth of sunflower.

【Method】The field experiment compared two spring (S) irrigation amounts: 95 mm and 135 mm, and three summer (W) irrigation amounts: 68, 100 mm and 135 mm. In each treatment, we measured the spatiotemporal changes in soil water and salt, as well as crop growth characteristics. 【Result】① The soil water content in the S135W135 treatment was the highest among all treatments during the experimental period, with the average soil water content and saturation being 17.10% and 75.53%, respectively. The coefficient of variation of soil water content in the S95W135 treatment was 22.40%, the lowest among all treatments. ② Depending on the summer irrigation amount, the desalination rate of the 0-80 cm soil layer under S135 and S95 varied from 32.64% to 50.50% and 21.8% to 38.87%, respectively. Although the spring irrigation amounts did not significantly affect immediate post-irrigation salt content, the S135W100 and S95W135 combinations showed deeper leaching depths and higher desalination rates (40.77% and 33.37%, respectively) than other treatments. ③ Aboveground dry matter production was significantly higher in the S95W135 and S135W100 combinations than in other combinations, surpassing the S135W135 combination by 10.55% and 9.94%, respectively. The S135W100 combination achieved the highest water use efficiency at 21.59%, an increase of 13.03% compared to S135W135. 【Conclusion】Reducing spring irrigation by 30% to 95 mm combined with a summer drip irrigation of 135 mm is the most efficient irrigation scheme for sunflower cultivation in the salt-affected soils in the Hetao Irrigation District.

**Key words:** Hetao Irrigation District; water-saving irrigation; water and salt transport; water use efficiency; desalinization rate

责任编辑: 韩 洋

(上接第 9 页)

## Effect of tillage and preceding crops on yield, water and fertilizer use efficiency of winter wheat

SHAO Yun<sup>1</sup>, WANG Pengfei<sup>1,2</sup>, AN Jiahui<sup>1,2</sup>, MENG Ye<sup>2</sup>, CHEN Haiqing<sup>2</sup>,

LIU Xuchen<sup>2</sup>, LIU Zhandong<sup>2</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, MA Shoutian<sup>2\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China;

2. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** 【Objective】Winter wheat in Northern China is often rotated with other crops which are expected to have a legacy effect. This paper aims to study the effect of different tillage and preceding crops on soil nutrients, yield and water use efficiency of the winter wheat. 【Method】The field experiment consisted of a rotary tillage (RT) and a no-tillage (NT). The preceding crops for each tillage were corn (MW) or soybean (SW). During the experiment, we measured the changes in soil nutrients, soil water content, water and fertilizer use efficiency, and yield of the wheat.

【Result】For the same preceding crop, non-tillage increased soil water content compared to rotary tillage; under the same tillage, soil water content with maize as the preceding crop was higher than that with soybean as the preceding crop. In all treatments, soil nutrients decreased with soil depth. In the 0-50 cm soil layer, NTSW increased soil organic carbon, soil total nitrogen and nitrate nitrogen by 4.14%-13.54%, 35.51%-54.44% and 55.75%-112%, respectively, compared to the RTMW. RTMW had the highest available phosphorus and potassium in the 10-50 cm soil layer. The RTSW had the highest ammonium nitrogen in the 0-50 cm soil layer, 13.39%-20.64% more than that in the RTMW. The winter wheat in NTSW had the highest spike numbers, spikelet numbers, thousand-grain weight; and its grain yield was 16.62% higher than that of RTMW. The NTSW had the highest water use efficiency, 8.67% more than that of RTMW. The NTSW had the highest nitrogen, phosphorus and potassium use efficiency.

【Conclusion】The NTSW facilitated nutrient accumulation in the winter wheat field. It had the highest water and fertilizer use efficiency and increased grain yields the most as a result.

**Keywords:** rotary tillage; no-tillage; preceding crop; soil nutrient; water and fertilizer use efficiency; crop yield

责任编辑: 白芳芳