

暗管排水条件下春灌定额对土壤水盐运移规律的影响

窦旭^{1,2} 史海滨^{1,2} 李瑞平^{1,2} 苗庆丰^{1,2} 田峰^{1,2} 于丹丹^{1,2}

(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. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探讨暗管排水条件下不同春灌定额对盐渍化灌区土壤水盐分布及作物产量的影响,以明沟排水常规春灌水平(2 250 m³/hm²)为对照组(CK),设置暗管排水条件下常规春灌灌水量的100%、90%、80%、70%(W1、W2、W3、W4)4个梯度,进行田间试验,研究不同春灌灌水量结合暗管排水技术对中度盐渍化土壤的淋洗效果,分析水盐分布规律、盐分离离子淋洗效果、对地下水埋深的控制作用和对油葵产量及其水分利用效率的影响,确定最佳淋洗定额。结果表明:由于淋洗水量较大、排水较少,CK处理根层土壤含水率较高,但与W1、W2处理无显著差异。W1、W2、W3处理灌后均具有较好的脱盐效果,根层土壤脱盐率比CK处理分别提高了18.47%、18.24%、7.75个百分点($P<0.05$),W1与W2处理间无显著差异,均显著高于W3处理($P<0.05$);W4处理由于灌水量较小,其土壤脱盐效果显著低于其他处理($P<0.05$)。W1和W2处理对土壤盐离子淋洗效果较好,随着灌溉淋洗水量的增加,土壤的离子组成朝良性方向发展。W2处理春灌后地下水埋深下降时间最佳,5月底地下水埋深降到0.8 m,刚好是油葵种植的最佳时间,W2能够较好地保持土壤墒情,且不影响作物正常耕作。W1处理油葵产量显著高于其他4个处理($P<0.05$),分别较CK、W2、W3、W4增产3.27%、3.54%、6.46%、17.98%。土壤水分利用效率最高的处理是W2,与W1无显著差异,显著高于CK、W3、W4($P<0.05$)。综上,仅从增产角度分析,W1处理显著高于其他4个处理($P<0.05$),是可供选择的模式;若受水资源限制,则可采用减少20%灌水量(W3处理),脱盐效率略低,较明沟排水低2.99个百分点,可以增加改良周期,缓解土壤盐渍化。从对土壤控盐、节水、稳产与水分利用效率多角度综合分析,在常规灌水量基础上减少10%并结合暗管排水技术(W2处理)是适宜的灌溉模式。

关键词: 盐渍化灌区; 春灌; 暗管排水; 脱盐率; 水盐运移

中图分类号: S287; S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)10-0318-11 OSID:



Effects of Spring Irrigation Quotas on Soil Water and Salt Transport under Condition of Subsurface Drainage

DOU Xu^{1,2} SHI Haibin^{1,2} LI Ruiping^{1,2} MIAO Qingfeng^{1,2} TIAN Feng^{1,2} YU Dandan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineer, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Inner Mongolia Engineering Research Center of High-efficiency Water Saving Technical Equipment and Soil and Water Environmental Effects, Huhhot 010018, China)

Abstract: Aiming to explore the effects of different spring irrigation quotas on soil water salt distribution and crop yield in salinization irrigation area under the condition of subsurface drainage. Taking the conventional spring irrigation level (2 250 m³/hm²) of open ditch drainage as the control group (CK), four gradients of 100%, 90%, 80%, and 70% (W1, W2, W3, W4) of conventional spring irrigation water volume were set under the condition of subsurface drainage, total five treatments. Leaching effect of different spring irrigation volumes combined with subsurface drainage on moderately salinized soil was studied. Water and salt distribution, salt leaching effect, control effect on groundwater depth, oil sunflower yield and water use efficiency were analyzed. The results showed that because of the larger irrigation volume and less drainage, the soil moisture content in the root layer of CK treatment was higher, but there was no significant difference in W1 and W2 treatments. W1, W2 and W3 treatments all

收稿日期: 2020-02-23 修回日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879132, 51769024)、内蒙古科技重大专项(zdx2018059)和内蒙古水利科技重大专项(n5k2018-M5)

作者简介: 窦旭(1994—),男,博士生,主要从事灌溉排水理论与新技术研究,E-mail: 1161927928@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: shi_haibin@sohu.com

had better desalination effects after irrigation. The soil desalination rates in the root layer were increased by 18.47, 18.24, 7.75 percentage points compared with that of CK treatment ($P < 0.05$). There was no significant difference between W1 and W2 treatments, and both were significantly higher than that of W3 treatments ($P < 0.05$). Due to the smaller irrigation volume in W4 treatment, the soil desalination effect was significantly lower than that of other treatments ($P < 0.05$). While leaching salt, W1 and W2 treatments had better leaching effect on soil salt isolates. At the same time, with the increase of irrigation leaching water, the ionic composition of the soil was developed in a benign. W2 treatment had the best time for the groundwater depth to drop after spring irrigation. The groundwater depth was dropped to 0.8m at the end of May, which was the best time for oil sunflower planting. W2 can better maintain soil moisture without affecting normal crop cultivation. The yield of oil sunflower in W1 treatment was significantly higher than that in the other four treatments ($P < 0.05$), which was increased by 3.27%, 3.54%, 6.46%, and 17.98% compared with CK, W2, W3 and W4, respectively. The treatment with the highest soil water use efficiency was W2, which was not significantly different from W1, and significantly higher than CK, W3 and W4 ($P < 0.05$). In view of the above, from the perspective of increasing production alone, W1 treatment was significantly higher than the other four treatments ($P < 0.05$), which was an alternative mode. If it was limited by water resources, it can be used to reduce the amount of irrigation by 20% (W3 treatment), the desalination efficiency was slightly lower, totally 2.99 percentage points lower than that of open ditch drainage, and the improvement cycle can be increased to relieve soil salinization. From a multi-angle comprehensive analysis of soil salt control, water saving, stable production, and water use efficiency, a 10% reduction based on conventional irrigation and a combination of underground drainage technology (W2) was an appropriate choice.

Key words: salinized irrigation area; spring irrigation; subsurface drainage; desalination rate; water and salt transport

0 引言

河套灌区作为我国重要的粮食产区,自 20 世纪 90 年代开始,通过节水灌溉技术的创新、实践和规模化应用,克服了资源禀赋的不足,充分发挥了自身的农业生产特色^[1-2]。河套灌区降水稀少、蒸发强烈、地下水矿化度高,水资源短缺和土壤盐渍化是制约该地区农业可持续发展的关键因素^[3]。节水控盐对治理盐渍化土壤具有较强的抗性,对于农业具有节水、增产的作用,暗管排水技术能较好地解决这一问题,该技术能够利用相对较少的灌溉水量淋洗出更多的盐分^[4-5]。河套灌区耕地中约有 68.65% 的土壤存在不同程度的土壤盐渍化^[6],因此如何进行水盐调控对灌区农业可持续发展至关重要。

暗管排水占地少、污染小、寿命长、无坍塌和长草问题,易于管理,节省劳力,土方工程量少,运行维护方便和便于机械化施工等,在国内外盐渍化土壤治理中应用越来越普遍^[7-9]。MORENO 等^[10]研究表明,暗管排水能较好地将土壤盐分排出土壤,同时可以提高作物产量;ABDEL-DAYEM 等^[11]研究表明,暗管排水能够显著降低土壤盐分,如果想获得最佳脱盐率,必须去除土壤盐结皮;JAFARI-TALUKOLAEI 等^[12]研究表明,暗管埋深、间距的不同对土壤排盐效果有显著差异,随着排水间距和深

度的增加,水稻和油菜的产量增加;SIYAL 等^[13]利用 HYDRUS-2D 和 HYDRUS-3D 模型对不同土壤质地、土壤排水深度和土壤深度的剖面盐分淋溶进行了模拟。近年来,国内也有许多学者对暗管排水进行了研究,LUO 等^[14]根据天气和土壤资料,研究了暗管排水条件下 DRAINMOD 模型输入不同蒸散发(ET)对作物产量和排水量的影响;王振华等^[15]研究表明,采用暗管排水技术配合滴灌淋洗,农田土壤盐分得到实质性改善,2 次灌水后,暗管排水阶段性改良效果明显;张金龙等^[16]对暗管排水条件下滨海盐土漫灌淋洗水盐时空变化特征进行了模拟研究。另外,相关学者还对土壤养分运移^[17-18]、土壤理化性质^[19-20]、控制地下水埋深和排水量^[21-22]、农作物生长和产量影响^[23-24]等进行了研究。河套灌区长期大规模使用暗管排水是否会导致一些新的农业环境问题,还有待进一步研究。

目前,灌区推广应用春季灌溉淋洗,春灌具有水分利用和淋洗效率高的特点,适于种植向日葵等播种时间较晚的作物,但春灌定额较大。本研究重点探讨河套灌区暗管排水条件下不同春灌灌水量对土壤水盐运移规律的影响,进一步分析土壤脱盐率、离子含量变化情况,以及对作物产量和水分利用效率等方面的影响,系统分析不同调控措施的应用,以寻求暗管排水条件下的最佳春灌定额,实现节水控盐的目标,保持控盐与保墒之间

的平衡,提高排盐效率和灌溉水利用效率,为灌区科学制定盐渍化土壤合理的春灌节水控盐灌溉制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年4—10月在乌拉特灌域进行,位于内蒙古河套灌区下游乌拉特灌域西山咀农场暗管排水综合试验区(东经108°38′16″,北纬40°45′28″,海拔1 018.88 m),试验区地处中温带大陆性气候区,气温多变,干燥多风,日照充足,光能丰富,降水少,蒸发强,无霜期较短。试验区多年平均气温6~8℃;多年平均降雨量196~215 mm、蒸发量为2 172.5 mm、无霜期130 d、风速2.5~3 m/s、日照时数3 230.9 h;最大冻土深度为1.2 m。属于典型的干旱地区。油葵生育季(5—9月)有效降雨量为141.45 mm(图1)。

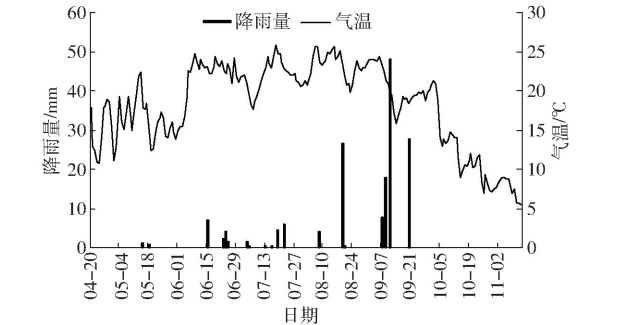


图1 2019年油葵生育期降雨量和气温
Fig.1 Rainfall and temperature during growth period of oil sunflower in 2019

1.2 试验设计

试验选择田间小区进行,设5个小区(包括对照),以明沟排水常规春灌水平(2 250 m³/hm²)作为对照组(CK),设置暗管排水条件下常规春灌灌水量的100%、90%、80%、70%(即W1,2 250 m³/hm²;W2,

2 025 m³/hm²;W3,1 800 m³/hm²;W4,1 575 m³/hm²),共5个处理。其中暗管排水试验区,每个小区布设2根暗管,暗管埋深100 cm,间距20 m,管径为80 mm,坡度为0.1%。暗管排水系统中,暗管南北布设,斗沟东西布设,暗管排水流入斗沟中,汇集到支沟后,最终汇集到试验区北侧十排干中。试验小区长40 m,宽30 m,每个试验小区间隔10 m,并在小区周围设有保护带,埋设1 m深聚氯乙烯塑料布隔离,防止相互干扰。对照选择当地常规明沟排水,当地常规排水沟深1.5 m,间距100 m。播种前对试验区进行了激光平地 and 盐碱地改良,试验区土壤中加入脱硫石膏(30 t/hm²)置换土壤吸附的有害钠离子;施加细沙(沙丘沙)(85.05 m³/hm²)改善土壤通透性,改变土壤性质;经过深松深翻40 cm彻底打破犁底层,每个小区布设1组负压计(60、100、140 cm)测定土水势,小区中心点布设1眼地下水位监测井观测地下水位动态。灌溉水为黄河水,矿化度约为0.67 g/L,灌溉水通过水泵抽取,灌水量用水表计量与控制,灌溉水离子组成如表1所示。初始土壤剖面(0~100 cm)平均质量含水率约为22.57%,电导率(EC)为1.27 dS/m,pH值为8.8左右,根据土壤盐渍化等级划分标准^[25],属于中度盐渍化土壤。试验区土壤基本物理性质如表2所示。暗管排水小区土壤采样点位布设在距暗管0、2.5、5、10 m处,对照区土壤采样点位布设在距排水沟0.4、12.5、25、50 m处。共20个采样点,每个点取3次重复。具体布设如图2(图中B为暗管间距、L为暗管长度)所示。

表1 灌溉水离子浓度

Tab.1 Irrigation water ions content							
灌溉水离子	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
浓度/ (mmol·L ⁻¹)	2.08	2.82	0.49	0.17	7.39	2.25	2.08

表2 试验区土壤基本理化性质

Tab.2 Soil physical quality in experimental area					
土层深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/(cm·s ⁻¹)	土壤类型
0~10	1.420~1.425	35.02~35.24	21.23~21.78	3.968×10 ⁻⁵	粉土
10~20	1.426~1.464	35.22~35.42	21.92~23.04	3.939×10 ⁻⁵	粉土
20~40	1.468~1.472	36.04~36.57	23.87~24.26	3.798×10 ⁻⁵	粉质壤土
40~60	1.470~1.476	34.63~35.19	24.00~24.65	1.238×10 ⁻⁵	粉土
60~80	1.483~1.488	34.08~34.74	22.92~23.47	2.073×10 ⁻⁵	粉土
80~100	1.485~1.490	34.82~35.33	23.94~24.18	5.176×10 ⁻⁵	粉土

2019年5月17日进行春灌,5月31日人工施底肥播种,供试作物为油料向日葵(简称油葵),品种为澳33,行距60 cm,株距20 cm,施肥量为尿素(含N质量分数46%)260 kg/hm²,磷酸二铵(含N

质量分数18%)290 kg/hm²,硫酸钾(含K₂O质量分数50%)150 kg/hm²,施肥后立即覆盖地膜进行人工点播,播种后穴口用细砂覆盖,种植密度4.95×10⁴株/hm²,9月25日收获,生育期不再进行灌溉和

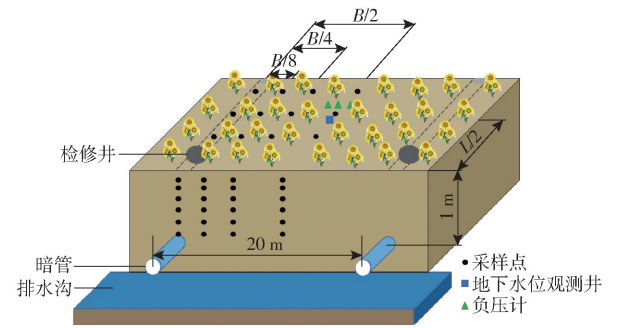


图 2 田间布置示意图
Fig. 2 Field layout diagram

施肥,其他田间管理措施与当地农户一致。

1.3 取样方法与数据测定

1.3.1 土壤盐分含量与含水率

采用土钻采集土壤 1 m 深度,共 6 层(0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm),带回实验室利用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定土水质量比为 1:5 的土壤浸提液电导率,采用干燥法测定土壤含水率。土壤盐分离子 $K^+ + Na^+$ 含量采用火焰光度计法测定, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量采用 EDTA 滴定法测定, Cl^- 含量采用硝酸银滴定法测定, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量采用双指示剂中和滴定法测定。

1.3.2 土壤脱盐率

脱盐率是指试验小区土壤盐分含量的减小值占初始值的百分比,它可以评价淋洗和暗管协同作用下土壤层的脱盐效果,在已有研究中得到广泛采用^[26-27]。土壤脱盐率计算公式为

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中 N ——脱盐率, %

S_1 ——春灌前土壤电导率, dS/m

S_2 ——春灌后土壤电导率, dS/m

1.3.3 油葵产量

油葵成熟时,在各小区非边行选取标准样株 20 株,单独收获考种测产。

1.3.4 土壤水分利用效率

土壤水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{2}$$

其中 $ET = P + I + G - L - D - \Delta W$ (3)

式中 Y ——作物籽粒产量, kg/hm²

ET ——油葵生育期的耗水量, mm

P ——降水量, mm

I ——灌水量, mm

G ——地下水补给量, mm

L ——深层渗漏量, mm

D ——侧向排水量, mm
 ΔW ——试验开始及结束时 0 ~ 100 cm 土层中土壤平均储水量的变化量, mm

根据田间负压计实测土壤水势数据确定土壤水分的流向,利用达西定律计算地下水补给量和深层渗漏量。

1.3.5 地下水埋深

各小区中心点田间布设地下水位观测井测定小区平均地下水埋深,生育期每隔 7 d 测定 1 次,灌溉前后每天测定 1 次,观测井为直径 110 mm 的 PVC 管,长 6 m,垂直埋入地下,埋入深度 5.7 m,埋入部分打孔及滤布包裹,人工利用铅锤测量地下水埋深。

1.4 数据分析

采用 Excel 整理数据和制图,利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,多重比较采用 LSD 法。用 Sufer 12 软件绘制土壤盐剖面分布图。

2 结果与分析

2.1 不同春灌定额对土壤水盐分布的影响

2.1.1 土壤水分

由于河套灌区春灌灌水量较大,灌溉后地下水位迅速升高,利用暗管可将土壤水分与盐分排出土体,所以暗管排水对土壤水分和盐分的运移规律以及分布有较大的影响。

图 3 为各处理春灌前后 7d 土壤含水率变化情况。由图可知,不同处理 0 ~ 100 cm 土壤含水率有明显差异。0 ~ 20 cm 表层土壤较疏松,其受外界干扰,如气温、蒸发等因素影响较大,土壤比较干燥,含水率较低。0 ~ 40 cm 土层为作物主要根系分布层,作物耗水也多以根层水分为主,各处理灌后 0 ~ 40 cm 土壤含水率随着灌水量的增加而增大,由小到大依次为 CK、W1、W2、W3、W4。如图 4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示,CK 处理土壤含水率较 W1、W2、W3、W4 分别高 0.27、0.42、0.77、1.23 个百分点,除与 W1、W2 不显著外,均显著高于其他处理($P < 0.05$),说明相同灌水量及减少 10% 的情况下,暗管排水比对照组含水率减少效果不显著。40 ~ 100 cm 土壤含水率受灌水量的影响较大,随着灌水量的增加,深层土壤含水率逐渐增大,其中 CK 和 W1 处理深层土壤含水率显著高于其他处理($P < 0.05$),CK 和 W1 处理之间不显著, W2 处理土壤含水率略高于 W3、W4 处理; W3、W4 由于灌水量较小,深层土壤受其灌水影响相对较小,土壤含水率较低。说明在当前春灌水平及减少 10% 后,暗管排水能保蓄较多水分在土壤根层(0 ~ 40 cm), W1、W2、CK 处理之间无显著差

异,这种保水效应可为作物前期生长提供充足水分,保证作物出苗率,促进作物生长发育。在 40 ~ 100 cm 土层,其含水率受不同灌水量的影响较大,处理间差异明显。

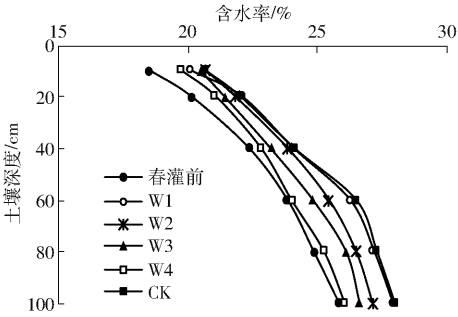


图3 各处理春灌前后 0 ~ 100 cm 土壤剖面含水率
Fig. 3 Water content of 0 ~ 100 cm soil profile before and after spring irrigation

2.1.2 土壤盐分

由于春季气温和地温开始逐渐上升,蒸发开始变得强烈,各处理春灌前土壤盐分均呈现表聚型,为了控制根层土壤盐分满足作物生长需要,利用春灌进行淋洗压盐。图 5 为不同处理土壤盐分割面图,

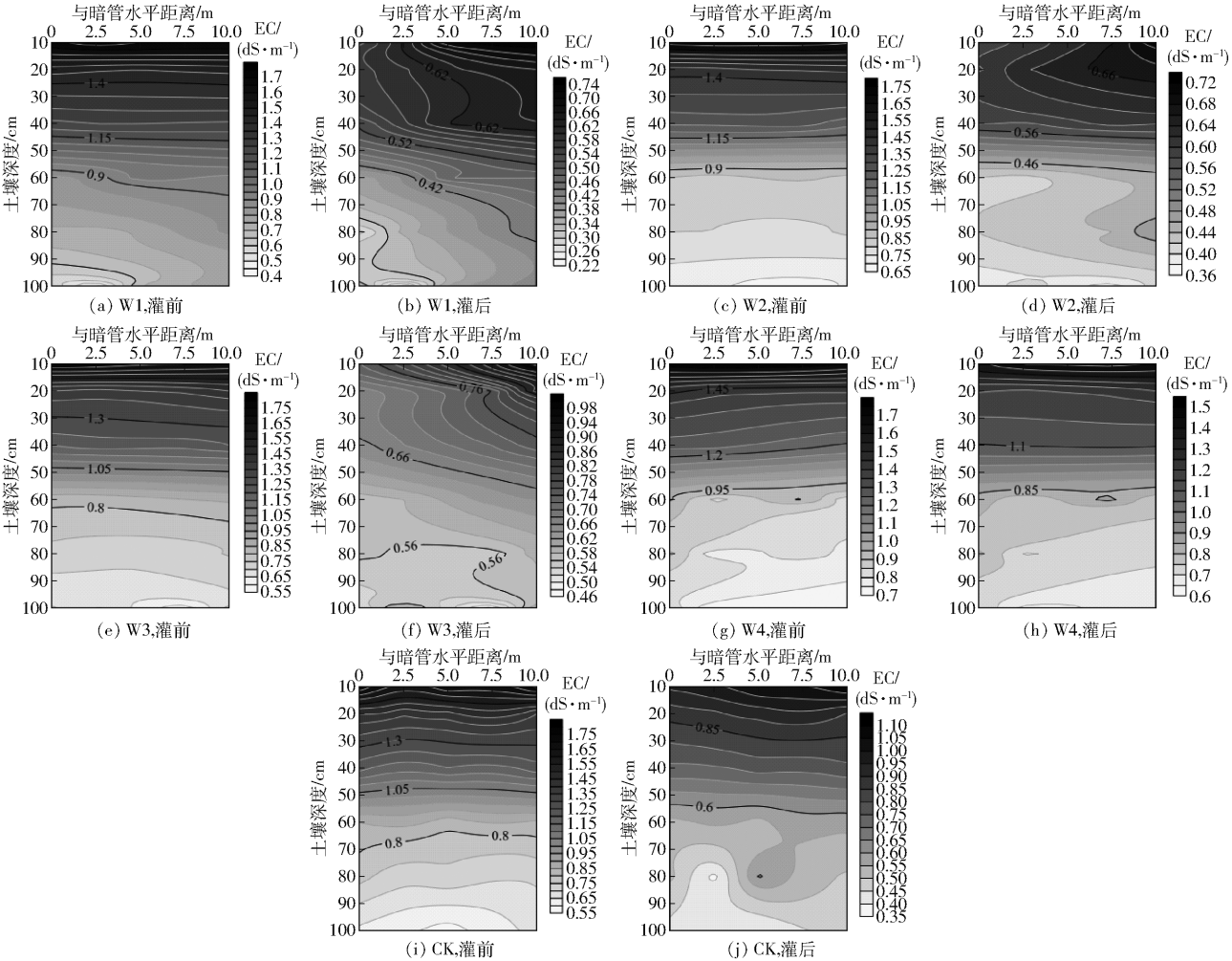


图5 不同处理土壤盐分割面分布

Fig. 5 Distribution of soil salinity profile of different treatments

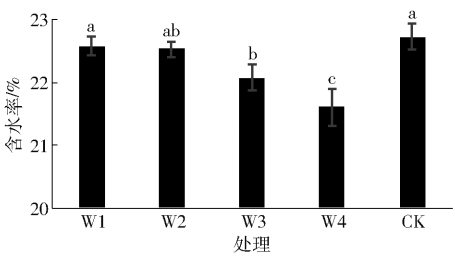


图4 各处理春灌后 0 ~ 40 cm 土壤含水率

Fig. 4 Soil water content of 0 ~ 40 cm after spring irrigation

盐分用电导率(EC)表征,可以反映春灌前后土壤盐分水平和垂直方向迁移特征和过程,暗管排水改变了土壤水分分布规律,其盐分也随之改变。春灌前土壤长期处于积盐状态,表层土壤盐分含量较高, EC 在 1.6 dS/m 以上。随着土壤深度的增加,土壤盐分含量降低,盐分呈表聚型。春灌后,不同灌水处理均具有较好的淋洗作用,土壤盐分含量(0 ~ 100 cm)出现了不同程度下降。春灌后土壤盐分随着灌溉水的驱动力,沿着暗管排出,0 ~ 100 cm 土壤盐分含量总体呈现下降趋势,其中 W1 处理下降趋势最大, EC 平均下降了 54. 09% ,土壤盐渍化程度降低。0 ~ 20 cm 土壤盐分含量下降明显,脱盐效果

最好,EC 平均下降了 44.35%,20~100 cm 土壤脱盐效果降低,EC 平均下降了 34.02%。春灌后各处理与暗管不同水平距离土壤盐分含量变化特征有明显差异,各处理距暗管(明沟)近的地方土壤脱盐率较大,距离暗管(明沟)越远土壤脱盐效果越差,W3 处理土壤盐分含量表现最为明显,因为 W3 处理灌水量为常规灌水量的 80%,灌水量较小,淋洗不充分导致与暗管远的距离和暗管上土壤盐分淋洗效果相差 7.57%,在空间上具有较大差异。W1 与 W2 处理灌水量相对较大,W1 的淋洗效果好于 W2,W1、W2 处理灌溉后 0~100 cm 土壤 EC 分别在 0.22~0.74 dS/m、0.36~0.72 dS/m,处理间无显著差异,W4 处理灌水量最小,其对土壤盐分淋洗效果整体较差,灌溉后 EC 在 0.63~1.47 dS/m,距暗管不同水平距离土壤盐分含量变化不大。

2.1.3 土壤脱盐率

脱盐率作为土壤淋洗盐分的重要指标,也用于评价灌溉和暗管协同作用下土壤的脱盐效果。表 3 为不同处理春灌后与暗管不同水平距离各层土壤脱盐效果,0~100 cm 土壤平均脱盐率由大到小依次为 W1、W2、CK、W3、W4。W1、W2 处理淋洗深度较深,脱盐效果较好,土壤脱盐率显著高于 CK 处理($P<0.05$),0~100 cm 土壤脱盐率高达 52.97% 和 49.94%,分别较 CK 高 18.33、15.30 个百分点。W1、W2 处理间土壤脱盐率无显著差异。W3 处理土壤脱盐率略低于 CK 处理但不显著,W4 处理脱盐率显著低于 CK ($P<0.05$)。脱盐率和与暗管(明沟)水平距离成反比关系,在暗管上部(0 m)处 W1、W2 处理土壤脱盐率高达 56.43%、52.37%,因为灌溉时地下水位开始上升,土壤盐分开始溶解于灌溉水中,水分向暗管(明沟)汇集排出土体,导致距离暗管(明沟)越近的地方土壤盐分淋洗效果越好。0~20 cm 土壤脱盐率最大,且随着土壤深度的增加土壤脱盐率逐渐减小。暗管排水处理在春灌灌水量 90% 及以上时,0~100 cm 土壤脱盐率优于明沟排水。

油葵根系主要分布在 0~40 cm 土层,土壤脱盐率由大到小依次为 W1、W2、W3、CK、W4(图 6),暗管排水可显著降低根层土壤盐分,W1、W2 处理 0~40 cm 土壤脱盐效率较好且无显著差异,二者显著大于 CK、W3、W4 处理($P<0.05$)。W3 处理显著高于 CK 和 W4 处理($P<0.05$),脱盐率为 45.49%;W4 处理脱盐效率最差,仅为 13.29%,过小的灌水量不足以把土壤盐分淋洗出根层土壤。W1、W2、W3 处理灌后均具有较好的脱盐效果,根层土壤脱盐率比 CK 处理分别提高了 18.47、18.24、7.75 个百分点。暗管排水处理在春灌灌水量 80% 及以上

时,根层土壤(0~40 cm)脱盐率优于明沟排水,且灌后土壤盐分能保证作物正常生长。

表 3 各处理不同土层土壤脱盐率
Tab.3 Soil desalination rate in different soil layers of each treatment %

处理	与暗管 水平距 离/m	土层深度/cm						平均 脱盐率
		0~	10~	20~	40~	60~	80~	
		10	20	40	60	80	100	
W1	0	67.26	61.25	57.79	55.53	63.71	40.88	56.43
	2.5	64.16	59.25	54.07	54.02	51.72	50.00	54.30
	5.0	57.52	56.28	50.26	50.77	50.00	47.89	51.16
	10.0	57.06	55.15	48.60	48.53	49.62	46.95	49.96
	平均值	61.50	57.98	52.68	52.21	53.76	46.43	52.97
W2	0	65.73	58.41	53.77	50.59	47.50	47.95	52.37
	2.5	65.28	55.74	54.30	50.41	46.43	41.98	50.72
	5.0	62.23	54.24	52.53	49.11	43.88	44.19	49.59
	10.0	57.92	54.18	50.35	46.12	40.66	42.12	47.06
	平均值	62.79	55.64	52.74	49.06	44.62	44.06	49.94
W3	0	57.84	52.17	45.83	30.36	23.64	18.75	34.72
	2.5	54.19	49.68	44.72	29.41	22.47	16.90	33.09
	5.0	46.19	46.31	40.54	25.71	21.98	16.28	30.15
	10.0	41.35	38.58	39.70	25.37	22.05	16.13	28.64
	平均值	49.89	46.69	42.70	27.71	22.53	17.01	31.65
W4	0	19.72	18.05	13.73	12.81	10.87	10.47	13.35
	2.5	16.97	16.43	13.13	9.64	9.21	10.00	11.74
	5.0	15.38	13.74	8.93	9.38	9.64	9.59	10.42
	10.0	15.10	11.47	7.14	7.69	9.58	9.09	9.36
	平均值	16.79	14.92	10.73	9.88	9.83	9.79	11.22
CK	0.4	44.89	40.00	39.47	37.19	33.33	31.40	36.77
	12.5	39.16	37.02	36.42	35.56	46.34	30.39	37.36
	25.0	38.29	35.80	35.67	35.04	17.89	30.49	31.23
	50.0	37.73	36.13	35.86	32.77	30.62	29.95	33.22
	平均值	40.02	37.24	36.85	35.14	32.05	30.56	34.64

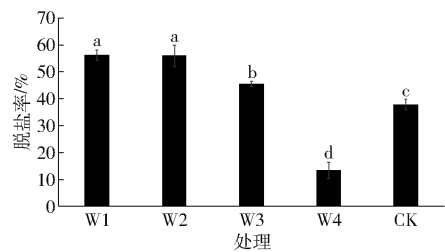


图 6 各处理 0~40 cm 土壤脱盐率
Fig.6 Soil desalination rate of 0~40 cm in each treatment

河套灌区降雨少,蒸发强烈,春灌水量较少时,40~100 cm 土壤盐分淋洗不彻底,随着气温升高,春灌后土壤反盐现象将会严重。而春灌灌水量较大时,造成水分利用效率不高,浪费严重,灌水量减少 10% 其脱盐效率与当地春灌定额土壤脱盐率无显著差异,因此在当地灌水量基础上减少 10% 是适宜灌溉方案。若受水资源限制,也可采用减少 20% 灌水量(W3 处理),虽然脱盐效率略低,但可以增加改良

周期来缓解土壤盐渍化。

通过回归分析得到土壤脱盐率在灌水量和与暗管水平距离作用下的线性回归模型

$$N = -83.16 + 0.064X_m - 0.546X_x \quad (4)$$

式中 X_m ——灌水量, m^3/hm^2

X_x ——与暗管水平距离, m

模型决定系数 R^2 为 0.924, 具有较好的拟合度。通过分析回归方程系数可知, 在本研究条件下, 适当增加灌水量可以提高土壤脱盐效率, 距离暗管越近土壤脱盐效率越高, 中间点位置土壤脱盐效果最差, W1 处理暗管上部脱盐率最大为 56.43%, W4 处理暗管中间点脱盐率最小, 仅为 9.36%。根据脱盐效果以及水资源情况选择适当的春灌灌水量以达到提高土壤脱盐率与节水的双重目的。

2.2 不同春灌定额对土壤盐分离子淋洗效果的影响

盐分主要通过离子与土壤、植物发生各种物理、化学反应影响土壤和植物的存在状态, 土壤盐分离

子组成不同导致土壤盐渍化类型不同, 同时影响着盐分运移规律以及土壤理化性质, 从而决定土壤脱盐的难易程度, 因此了解土壤盐分离子变化具有重要意义。图 7a 为不同处理春灌前后土壤盐分离子所占比例, CO_3^{2-} 含量很少, 在偏碱性土壤中易与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等结为沉淀, 春灌前土壤中未检测出来。各处理灌溉后除 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量表现为增加趋势外, 其余各离子均降低。如图 7b 所示, 暗管排水处理 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 其离子脱盐率均随着灌水量的增加而增大。其原因为灌区土壤盐分主要以化合物形式存在, 由于灌区强烈的蒸发, 土壤中水分减少, 易溶性盐类在土壤孔隙结晶。当灌水量较大时, 土壤孔隙中盐分溶于灌溉水中, 被淋洗出土壤, 脱盐率相对较大; HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 灌后均有所增加, 其原因可能是当土壤淋洗离子时, 以 Cl^- 为首的离子开始下降, 为使土壤中的正负电荷平衡, 碳酸盐类矿物开始解离, 产生一些 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 。

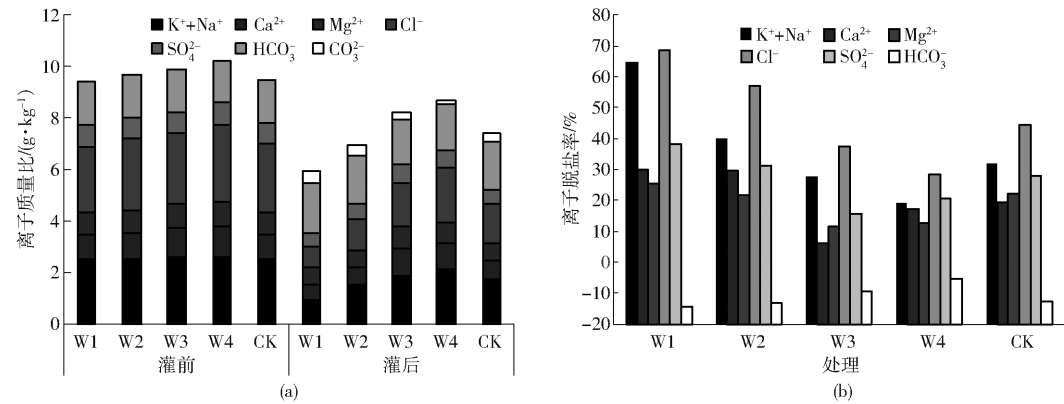


图 7 各处理春灌前后盐分离子含量及脱盐率

Fig. 7 Content and desalination rate of salt isolates before and after spring irrigation in each treatment

土壤中的盐分离子逐渐溶解于灌溉水中, 由于各盐分离子的初始含量、溶解度、迁移能力等不同, 其离子含量变化程度也有所不同, 土壤各离子脱盐率由大到小大致表现为 Cl^- 、 $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 。对暗管排出水分中的离子进行测定, 在排水初期的很短时间有 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 排出, 而且其含量随着时间推移越来越少, 排水 1 d 后几乎检测不到 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 。当灌水量较大时, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 排出相对很少, 而其他离子排出较多, 水解出较多 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 离子。明沟排水离子脱盐率略好于 W4 处理, 与 W3 处理差异不显著。本试验区 Cl^- 、 $K^+ + Na^+$ 离子含量较多, 春灌后盐分离子向均匀方向发展, 因此在治理土壤盐渍化的同时需要减少 Cl^- 、 $K^+ + Na^+$ 离子的存在, 不应让其向单一方向发展, 而 Cl^- 、 $K^+ + Na^+$ 易溶于水且和土壤亲和性较弱, 因此在后续研究中需要增加灌水次数, 在土壤脱盐过程中使盐分离子向平衡方向发展。

2.3 不同处理暗管排水对地下水埋深的影响

图 8 为不同处理对地下水埋深的影响, 由于春灌灌水量较大, 5 月 17 日灌溉之后, 各试验小区地下水埋深变化基本一致, 并且可以明显划分为稳定期、上升期和下降期。4 月初, 由于冻结层土壤消融逐渐补给地下水, 水位略有上升。灌溉后各处理地下水埋深明显上升, 处理间差异明显, 随着灌水量的增加, 地下水埋深上升程度越高。5 月 21 日达到最

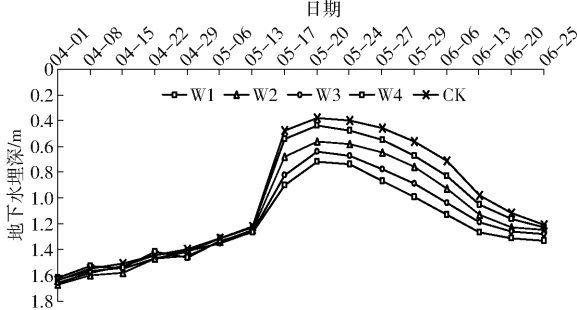


图 8 各处理地下水埋深变化曲线

Fig. 8 Change of buried depth in each treatment

大值后开始逐渐下降。CK 处理地下水埋深上升最快,且下降最慢,暗管排水处理在灌溉之后灌水量越大地下水埋深越浅。CK 和 W1 处理在 5 月底地下水埋深在 0.6 m 以上,地下水埋深相对较高,影响作物正常种植。W2 处理下降时间最佳,在 5 月底,地下水埋深下降到 0.8 m,刚好是葵花种植的最佳时间。

地下水埋深下降不同,土壤盐分累积及水分有效性也不同,图 9 为土壤储水量与盐分积累变化情况,随着作物生长吸收水分,蒸腾作用也越来越强烈,土壤储水量开始逐渐降低,其中 CK 处理由于灌水量相对较大,土壤中储水量也相对较大,较其他处理高 0.6% ~ 19.49%,但其盐分淋洗不充分,导致

作物在中后期返盐情况相对较严重,土壤 EC 在 1.45 dS/m 左右,对作物生长发育有一定影响,导致作物减产。暗管排水处理随着灌水量的减少土壤储水量逐渐降低,W1 和 W2 处理能够维持土壤中较好的水分状况,略低于 CK 处理,但能够维持作物生长所需要的水分,后期差异性更小,较 W3、W4 处理高 1.16% ~ 11.61%;同时盐分在中后期有小幅上升,但不影响作物正常生长发育,控盐效果较好,生育后期 EC 在 0.79 ~ 0.89 dS/m 之间,处理间无显著差异。W3 和 W4 处理灌水量较少,土壤储水量相对较低,随着作物生长发育完全,土壤储水量较 W1、W2 处理显著减少,到生育后期差异逐渐变小,并且返盐较严重,W4 在生育后期 EC 高达 1.75 dS/m。

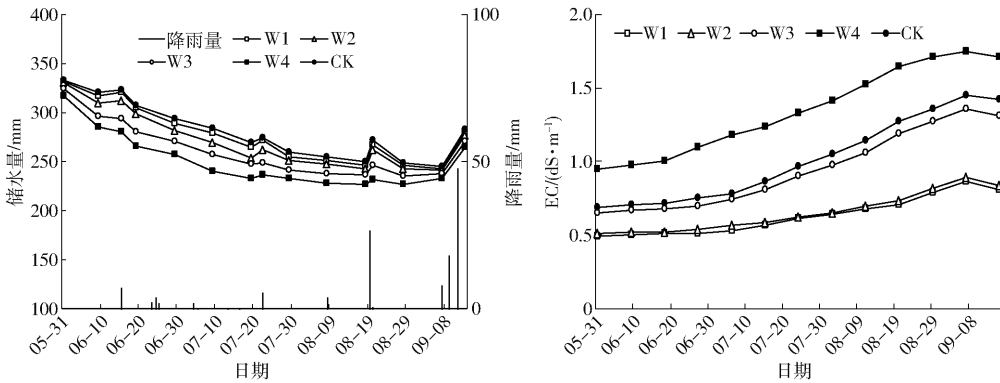


图 9 土壤储水量和盐分积累变化曲线
Fig.9 Changes in soil water storage and salt accumulation

2.4 不同处理对油葵产量及水分利用效率的影响
表 4 为不同处理油葵作物产量与水分利用效率,不同处理油葵籽粒产量有明显差异,其产量由大到小依次为 W1、CK、W2、W3、W4。W1 处理油葵产量显著高于其他处理 ($P < 0.05$),分别较 CK、W2、W3、W4 增产 3.27%、3.54%、6.46%、17.98%,CK 处理与 W2 处理产量无显著变化,常规灌溉量下暗管排水对油葵增产效果显著。从水分利用效率来看,其水分利用效率最高的是 W2 处理,由大到小依次为 W2、W1、CK、W3、W4,其中 W1、W2 相对较高,差异没有达到显著水平,二者显著大于其他处理 ($P < 0.05$)。W4 处理水分利用效率最低。

表 4 各处理油葵产量及水分利用效率
Tab.4 Oil sunflower yield and water use efficiency in each treatment

处理	产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	作物需水量/ mm	水分利用效率/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)
W1	3 542.62 ^a	229.55 ^b	16.06 ^a
W2	3 421.56 ^b	210.47 ^c	16.26 ^a
W3	3 327.56 ^c	201.56 ^d	13.53 ^b
W4	3 002.67 ^d	198.48 ^d	13.03 ^c
CK	3 430.53 ^b	255.48 ^a	13.70 ^b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同处理对土壤水盐运移规律及其分布的影响
灌溉淋洗配套排水设施是改良盐渍化土壤的重要方法,暗管排水技术现已广泛应用于盐渍化土壤的改良。暗管排水可以改变土壤水盐的运动规律^[16,28],提高脱盐率,降低作物苗期土壤含盐量,0 ~ 40 cm 作为作物主要根层土壤,其盐分含量是制约作物生长的重要因素^[29]。本试验中,CK 处理作为河套灌区常规灌水模式,由于灌水量较大,0 ~ 40 cm 土壤含水率较高,墒情较好,显著高于 W3、W4 处理 ($P < 0.05$),与 W1、W2 处理无显著差异。暗管排水处理可有效降低土壤盐分,其中 0 ~ 40 cm 土壤暗管排水处理常规灌水量(W1)和减少 10% 灌水量处理(W2)土壤脱盐率效果较好,二者无显著差异,同时能较好保证作物苗期生长条件,CK 处理土壤脱盐率仅显著高于 W4 处理 ($P < 0.05$),且显著低于 W1、W2、W3 处理 ($P < 0.05$)。同时研究还发现,暗管排水处理,土壤水分会向暗管汇集,携带土壤中的盐分将其排出土壤,这也导致距离暗管近的土壤盐分降低幅度较大,两暗管中间点的位置土

壤脱盐率最差,这与钱颖志等^[27]研究结果一致。

单一盐类比多种盐类并存对土壤的危害更大^[30],因此,灌溉淋洗的同时如何平衡土壤盐分离离子应高度重视。盐分组成及离子浓度的失衡会对土壤和植物造成多种危害,土壤中 Na^+ 含量过多会导致土壤颗粒和团聚体分散,使土壤孔隙减少,渗透性降低,并引起植物 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的缺乏和其他营养失调; Cl^- 含量过多会抑制植物的生长发育,使植物代谢紊乱甚至发生中毒^[31-32]。本试验中,土壤盐分离离子 Cl^- 、 K^+ + Na^+ 含量相对较多,严重影响作物生长和发育,利用暗管排水灌溉有效地减少土壤中的 Cl^- 、 K^+ + Na^+ ,脱盐效果较好。同时随着灌溉淋洗水量的增加,土壤的离子组成朝良性方向发展。因此,在后续试验中还应该增加灌水次数,合理平衡土壤盐分离离子,为作物生长提供适宜的条件。

3.2 不同处理对地下水埋深的影响

暗管排水技术能够有效地控制地下水埋深,但大多数用在南方或者滨海地区除涝降渍兼顾盐分控制^[9],而北方地区用于降低土壤盐分,改良盐渍化土壤^[33-34]。河套灌区春灌水量较大,灌溉后地表经常积水,导致水位下降较慢,影响作物正常生长,错过作物最佳种植日期。本试验区位于河套灌区下游的乌拉特灌域,春灌灌水时间较晚,同时土质相对较黏,土壤渗透性小,地下水下降速率慢,CK 处理在灌后地下水埋深上升最快且下降最慢,灌后 25 d 地下水埋深才降到 0.8 m。在当地灌水量基础上减少 10% 同时结合暗管排水技术(W2)下降时间最佳,且 W2 处理能很好地保持土壤水分,且盐分积累相对较小,可以使作物较好地生长,能较好地平衡洗盐与保墒之间的关系。

3.3 不同处理对油葵产量及水分利用效率的影响

节水的同时低盐分胁迫和较好的土壤墒情是作物高产的重要基础,这也正是本文的研究目的所在,

W1 处理在降低土壤盐分的同时其土壤水分在作物生育期相对较充足,油葵产量显著高于 CK 处理($P < 0.05$),从增产的角度分析,常规灌水量同时结合暗管排水技术(W1)最有利。在常规灌水量基础上减少 10% (W2)同样可以有效降低土壤盐分,根层土壤(0 ~ 40 cm)脱盐率和灌后含水率与 W1 处理均无显著差异,但在作物生长后期土壤水分相对缺少,影响油葵生长发育,导致产量相对于 W1 处理减少。从水分利用效率来看,W2 处理最高,与 W1 处理无显著差异,同时显著高于 W3、W4、CK ($P < 0.05$)。从控盐、保墒、节水、稳产等多角度分析,在常规灌水量基础上减少 10% 结合暗管排水处理(W2)是最佳选择。这对于河套灌区提高水分利用效率以及缓解灌区水资源短缺至关重要。本研究采用大水春灌来淋洗土壤盐分,对于暗管排水技术多次灌水淋洗土壤盐分效果还有待进一步研究和完善。

4 结束语

在中度盐渍化土壤和河套灌区普遍采用的暗管排水工程条件下,与常规处理(CK)相比,常规灌水结合暗管排水处理(W1)和在常规灌水量基础上减少 10% 结合暗管排水处理(W2)均可显著提高根层土壤脱盐率($P < 0.05$),能较好地保持土壤水分。为提高作物出苗率,且在作物生长初期保证作物所需要的生长条件,从增产角度分析,W1 处理显著高于其他 4 个处理($P < 0.05$),是可供选择的方法,W2 与 CK 处理对作物产量无显著差异。若受水资源限制,则也可采用减少 20% 灌水量(W3),脱盐率略低,较明沟排水低 2.99 个百分点,可以增加改良周期,缓解土壤盐渍化。从对土壤控盐、保墒、节水、稳产、水分利用效率多角度综合分析,在常规灌水量基础上减少 10%、结合暗管排水技术(W2)是适宜的灌溉模式。

参 考 文 献

- [1] 李彬,史海滨,妥德宝,等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布——以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究,2015,32(4):663-673.
LI Bin,SHI Haibin,TUO Debao,et al. Soil salinity profile characteristics and its spatial distribution before and after water saving-taking the middle reach in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia as an example[J]. Arid Zone Research,2015,32(4):663-673. (in Chinese)
- [2] 李彬,史海滨,张建国,等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报,2014,30(21):99-110.
LI Bin,SHI Haibin,ZHANG Jianguo,et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(21):99-110. (in Chinese)
- [3] 徐昭,史海滨,李仙岳,等. 水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):281-291.
XU Zhao,SHI Haibin,LI Xianyu,et al. Effect of limited irrigation and nitrogen rate on radiation utilization efficiency and yield of maize in salinization farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):281-291. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181234&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:

- 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.034. (in Chinese)
- [4] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012,20(12):1664-1672.
YU Shuhui,LIU Jintong,LI Zhixiang,et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2012,20(12):1664-1672. (in Chinese)
- [5] 刘玉国,杨海昌,王开勇,等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. 农业工程学报,2014,30(16):84-90.
LIU Yuguo,YANG Haichang,WANG Kaiyong,et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(16):84-90. (in Chinese)
- [6] 卢闯,逢焕成,张宏媛,等. 春灌结合秸秆隔层促进土壤脱盐增加微生物多样性[J]. 农业工程学报,2017,33(18):87-94.
LU Chuang,PANG Huancheng,ZHANG Hongyuan,et al. Spring irrigation combined with straw interlayer promoting soil desalination and increasing microflora diversity[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(18):87-94. (in Chinese)
- [7] 方锐. 南方地区农田暗管排水工程建设模式与标准[D]. 扬州:扬州大学,2013.
FANG Rui. Project construction model and standard of subsurface pipe drainage in Southern China[D]. Yangzhou: Yangzhou University,2013. (in Chinese)
- [8] 张亦冰,高宗昌. 盐碱地治理中排水暗管间距和外包滤料应用分析[J]. 中国水土保持,2018(9):27-29,66.
ZHANG Yibing,GAO Zongchang. Analysis on spacing of drainage pipe and application of external filter material in saline-alkali soil treatment[J]. Soil and Water Conservation in China,2018(9):27-29,66. (in Chinese)
- [9] 陈诚,罗纨,贾忠华,等. 江苏沿海滩涂农田高降渍保证率暗管排水系统布局[J]. 农业工程学报,2017,33(12):130-137.
CHEN Cheng,LUO Wan,JIA Zhonghua,et al. Subsurface drainage system layout to meet high assurance rate of waterlogging control in coastal mud-flat farmlands in Jiangsu[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(12):130-137. (in Chinese)
- [10] MORENO F,CABRERA F,ANDREW L,et al. Water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils of Southwest Spain[J]. Agricultural Water Management,1995,27(1):25-44.
- [11] ABDEL-DAYEM S,RYCROFT D W,RAMADAN F,et al. Reclamation of saline clay soils in the Tina Plain, Egypt[J]. Icid Journal,2000,49(1):17-28.
- [12] JAFARI-TALUKOLAE M,SHAHNAZARI A,AHMADI M Z,et al. Drain discharge and salt load in response to subsurface drain depth and spacing in paddy fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2015,114(11):04015017.
- [13] SIYAL A A,SKAGGS T H. Reclamation of saline soils by partialponding: simulations for different soils[J]. Vadose Zone Journal,2010,9(2):486-495.
- [14] LUO Wan,JING Weihua,JIA Zhonghua,et al. The effect of PET calculations in DRAINMOD on drainage and crop yields predictions in a subhumid vertisol soil district[J]. Science in China Series E: Technological Sciences,2009,52(11):3315-3319.
- [15] 王振华,衡通,李文昊,等. 滴灌条件下排水暗管间距对土壤盐分淋洗的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):253-261.
WANG Zhenhua,HENG Tong,LI Wenhao,et al. Effects of drainage pipe spacing on soil salinity leaching under drip irrigation condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering,2017,48(8):253-261. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170829&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.029. (in Chinese)
- [16] 张金龙,刘明,钱红,等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. 农业工程学报,2018,34(6):98-103.
ZHANG Jinlong,LIU Ming,QIAN Hong,et al. Spatial-temporal variation characteristics of water-salt movement in coastal saline soil improved by flooding and subsurface drainage[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(6):98-103. (in Chinese)
- [17] GOLMOHAMMADI G,RUDRA R P,PRASHER S O,et al. Modeling the impacts of tillage practices on water table depth, drain outflow and nitrogen losses using DRAINMOD[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2016,124:73-83.
- [18] 高学睿,董斌,秦大庸,等. 用 DrainMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J]. 农业工程学报,2011,27(6):52-58.
GAO Xuerui,DONG Bin,QIN Dayong,et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(6):52-58. (in Chinese)
- [19] 王秋菊,刘峰,常本超,等. 三江平原低湿地水田土壤理化特性及暗管排水效果[J]. 农业工程学报,2017,33(14):138-143.
WANG Qiuju,LIU Feng,CHANG Benchao,et al. Soil physiochemical properties and subsurface pipe drainage effect of paddy field in low wetland of Sanjiang plain[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(14):138-143. (in Chinese)
- [20] 何继涛. 吴忠市暗管排水措施对土壤理化性状的影响[J]. 宁夏农林科技,2015,56(12):43-44.
HE Jitao. Effects of subsurface pipe drainage on soil physical and chemical characteristics in Wuzhong Municipality[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology,2015,56(12):43-44. (in Chinese)
- [21] 王少丽,王兴奎,S. O. Prasher,等. 应用 DRAINMOD 农田排水模型对地下水位和排水量的模拟[J]. 农业工程学报,2006,22(2):54-59.
WANG Shaoli,WANG Xingkui,S. O. Prasher,et al. Field application of DRAINMOD model to the simulation of water table, surface runoff and subsurface drainage[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(2):54-59. (in Chinese)
- [22] 张展羽,张月珍,张洁,等. 基于 DRAINMOD-S 模型的滨海盐碱地农田暗管排水模拟[J]. 水科学进展,2012,23(6):

782–788.

ZHANG Zhanyu, ZHANG Yuezheng, ZHANG Jie, et al. Simulating subsurface pipe drainage in saline-alkali farmland along coastlines using the DRAINMOD–S model[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 782–788. (in Chinese)

- [23] 李法虎, KEREN R, BENHUR M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 64–69.

LI Fahu, KEREN R, BENHUR M. Analysis of spatial variability of soil characteristics and crop yield under subsurface drainage [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(6): 64–69. (in Chinese)

- [24] 石佳. 惠农暗管排水对油菜和玉米田间土壤脱盐及产量影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.

SHI Jia. Study of pipe drainage on soil desalination and yield of oil sunflower and corn in Huinong district [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016. (in Chinese)

- [25] 李瑞平. 冻融土壤水热盐运移规律及其 SHAW 模型模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.

LI Ruiping. Study on soil water-heat-salt transfer during freezing-thawing and its simulation by SHAW Model [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese)

- [26] QADIR M, GHAFOR A, MURTAZA G. Amelioration strategies for saline soils: a review [J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(4): 357–386.

- [27] 钱颖志, 朱焱, 伍靖伟, 等. 考虑排盐和控盐的干旱区暗管布局参数研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 74–83.

QIAN Yingzhi, ZHU Yan, WU Jingwei, et al. Subsurface drains layout in arid areas with purposes of salt control and discharge [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(13): 74–83. (in Chinese)

- [28] WANG Shaoli, WANG Xiugui, LARRY C B, et al. Current status and prospects of agricultural drainage in china [J]. *Irrigation and Drainage*, 2007, 56(Supp.): 47–58.

- [29] ZHAO Yonggan, LI Yuyi, WANG Jing, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155: 363–370.

- [30] 黄雅茹, 马迎宾, 郝玉光, 等. 绿洲春季不同来源灌溉水土壤盐分离分子分布特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1856–1863.

HUANG Yaru, MA Yingbin, HAO Yuguang, et al. Distribution characteristics of soil salt ions of different sources of irrigation water in oasis spring [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9): 1856–1863. (in Chinese)

- [31] 郭全恩. 土壤盐分离离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

GUO Quanen. The response mechanism of soil salt ion transfer and diversity rule to environment factors and risk analysis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)

- [32] 刘正祥. 沙枣对氯化钠和硫酸钠胁迫差异性响应的生理机制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.

LIU Zhengxiang. Physiological mechanism of differential responses of *elaegnus angustifolia* to NaCl and NaSO₄ stress [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013. (in Chinese)

- [33] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 I: 模型与参数验证[J]. *水利学报*, 2016, 47(4): 537–544.

LI Xianwei, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China I: calibration to models and parameters [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(4): 537–544. (in Chinese)

- [34] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 II: 模型应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(5): 616–625.

LI Xianwei, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China II: application of the calibrated models and parameters [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(5): 616–625. (in Chinese)