

## 冬灌与暗管排水对次生盐渍土水盐运移及玉米生长的影响

焦炳忠\*, 武慧芳, 朱旭东, 施苏齐, 唐 瑞

(宁夏回族自治区水利科学研究院, 宁夏旱作节水高效农业工程技术研究中心,  
宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为了探讨冬灌、暗管排水及生育期灌水方式协同作用对次生盐渍化土水盐运移及作物生长影响规律, 在宁夏扬黄灌区红寺堡区移民区豹子滩村开展试验, 研究了不同冬灌模式 (0、1800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、暗管排水 (有、无) 和生育期灌溉方式 (畦灌、节灌) 3 种影响因素下次生盐渍化土壤盐分、水分、作物生长指标及地下水水位时空变化规律。结果表明: 不同处理方式下土壤水分时空变化差异显著, 冬灌处理浅层土壤含水率明显高于对应未冬灌处理; 此外, 布设暗管排水可以明显降低土壤含水率。各处理 0 ~ 100 cm 土层深度土壤盐分随时间动态变化规律差异显著, 冬灌可以有效淋洗土壤盐分至深层, 其中 T5 (冬灌、畦灌、暗管排水) 处理表层土壤 (0 ~ 40 cm) 脱盐最显著; 冻融初期各处理表层土壤 (0 ~ 40 cm) 在冻结及蒸发作用下出现返盐现象, 随冻结深度加深, 部分盐分析出并穿过冻结锋面向未冻结区运移, 深层 (40 ~ 100 cm) 土壤盐分有所增加, 解冻期在蒸发作用下盐分随水分向地表运移, 表层土壤盐分含量升高。此外, 冬灌结合暗管排水及生育期节水灌溉处理 (T7, 冬灌、节灌、暗管排水) 的玉米产量及生长指标均最佳, 平均产量 6556.05 kg/hm<sup>2</sup>、株高 210.17 cm、茎粗 31.31 mm、叶面积指数 4.49、干物质量 2634 kg/hm<sup>2</sup>。暗管排水可以有效控制地下水位, 其中 T3 (无冬灌、节灌、暗管排水)、T4 (无冬灌、节灌、无暗管排水) 地下水位埋深最低, T6 (冬灌、畦灌、无暗管排水) 在冬灌、生育期畦灌多重补给下, 土壤含水率较高, 且无暗管排水措施, 地下水位埋深最浅, 冬灌结束后达到峰值 1.04 m。因此, 根据研究结果建议, 在扬黄灌区次生盐渍地作物种植、管理、治理方面考虑合理增加排水工程, 采用高效节灌方式。

**关键词:** 次生盐渍土; 冬灌; 暗管; 高效节灌; 水盐运移; 玉米

宁夏扬黄灌区地处干旱半干旱地带, 降水稀少、蒸发强烈、风大沙多, 生态环境十分脆弱。灌区耕作历史悠久, 灌排系统基本配套完善, 但地势低平、排水不畅, 地下水位较高、导致土壤盐渍化问题日益凸显且不断恶化, 已经严重制约该地区生态系统稳定和农业可持续发展<sup>[1]</sup>。红寺堡灌区主要成土母质有冲积物、洪积冲积物, 沉积层次明显, 土壤质地以中壤土、重壤土为主; 红寺堡灌区在开发前没有盐渍化问题, 由于不合理的灌溉、复杂的地形、复杂的土壤结构、特别是不同部位多层粘重土壤的存在导致土壤盐渍化, 属灌溉型次生盐渍化。开发改良盐碱地对保障区域耕地面积, 提升耕地质量, 提高农业综合生产能力和保障粮食安全具有重要的意义<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-05-22

基金项目: 宁夏自然科学基金“宁夏引黄灌区节水减排控盐交互响应机制及耦合调控机理研究”项目 (2022AAC05066)。

作者简介: 焦炳忠 (1986-), 副研究员, 博士, 主要从事农业水土资源利用及盐碱地治理研究。E-mail: nxdxjbz168@126.com。同时为通讯作者。

目前针对盐碱地改良治理的研究较为广泛, 在自然排水不畅地区, 建设排水工程是改良盐碱地的主要措施之一<sup>[4]</sup>。适宜的地下排水通道深度可很好地将土壤中积累的盐分带走, 并且占地较少、利用时间较长, 施工机械化程度较高。次生盐渍化区域排水措施是土壤盐分下降的主要方式, 利用细砂滤料和细碎石一定比例混合可以有效降低土壤体积含水率, 提高土壤脱盐率, 同时缓解晒田期土壤水分流失, 抑制土壤返盐<sup>[5]</sup>。暗管排水管道埋深与布置间距对土壤脱盐的影响明显大于管径, 布置间距和埋深对土壤脱盐率均有显著影响, 暗管管径对土壤脱盐率差异较小<sup>[6]</sup>。对于水资源及其短缺的干旱半干旱地区, 长期畦灌引起的次生盐渍化, 主要是低洼地区排水不畅, 灌水时间间隔较长, 盐分向耕作层集聚。高效节灌措施可对次生盐渍化区域作物增产及根区土壤脱盐效果较好<sup>[7-9]</sup>。有研究表明, 全膜双垄沟种植影响土壤水盐动态变化, 可有效降低土壤 0 ~ 40 cm 土层电导率和 pH 值<sup>[10]</sup>。但不合理的灌溉制度也会导致土壤次生盐渍化问题较为突出<sup>[11]</sup>。膜

下滴灌结合暗管排水模式对盐渍化土可以提高作物产量, 促进水盐运移<sup>[12]</sup>, 随着暗管间距增加, 淋洗效果逐渐降低。有学者<sup>[13]</sup>研究了不同灌水方式下冬灌定额对土壤水分、温度及盐分的影响, 表明滴灌方式下土壤水分入渗均匀且洗盐效果最明显。此外, 冻融作用是季节性冻融地区土壤盐碱化的成因之一, 通过冬灌淋洗可以有效改良土壤盐渍化问题<sup>[14]</sup>。钱颖志等<sup>[15]</sup>对干旱地区暗管配合淋洗的排盐进行研究, 发现冬灌淋洗定额 3600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、暗管埋深 1.4 m、间距 8 m 时, 脱盐率可达到 36%。因此, 适宜的冬灌定额 3600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时, 保墒压盐作用较显著<sup>[16]</sup>, 地下水埋深和灌水量对次生盐渍地玉米生长变化幅度较大<sup>[17]</sup>。

关于次生盐渍地节水、减排、控盐单因素及协同作用对作物生理生长、土壤水盐变化等的影响, 许多学者已开展大量的试验研究, 但针对移民搬迁、扬水灌溉区发生的次生盐渍化导致部分低洼区域盐分逐渐上升、地下水埋深不断上移等研究相对较少。本研究以此研究问题为切入点, 在宁夏红寺堡移民搬迁区探索不同冬灌模式、暗管排水和生育期灌溉方式下次生盐渍化土壤水分、盐分、作物生长指标及地下水位变化规律, 为研究高效节水、减排控盐和暗管排水等综合技术下的水盐迁移机理以及水盐驱动模型模拟提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于宁夏扬黄灌区红寺堡区豹子滩村国家重点研发项目核心试验区, 属典型的干旱大陆性气候, 多年平均蒸发量 1370 mm, 年平均降水量 251.0 mm, 多年平均日照 3024 h, 年平均气温 8.6℃, 多年平均风速 3.7 m/s, 最大冻土深度 1.37 m。试验地土壤为粉砂质土壤, 饱和含水率 42.54%, 田间持水率 31.56%, 孔隙率 42.21%, 土壤 pH 值 8.2, 非生育期地下水埋深 2.1 m, 地下水矿化度 2.2 g/L。2022 年 9 月至 2023 年 11 月在该试验地选取次生盐渍化耕地进行大田试验。

### 1.2 试验设计

试验设 3 个因素 (冬灌定额、排水方式及生育期灌水方式), 每个因素 2 个水平, 采用完全随机区组设计, 共 8 个处理, 每个处理设 3 个重复。其中, 冬灌定额为 0 和 1800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 生育期灌水量依据当地灌溉经验值和前人研究理论值进行设计, 生育期灌水方

式为畦灌 (全生育期灌溉 4 水, 每次灌溉定额为 1200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 不包括冬灌)、高效节灌 (采用内镶贴片式滴灌带, 滴水间距 300 mm, 灌溉时间根据作物需耗水规律灌溉全生育期, 灌溉定额为 3150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), 排水方式为暗管排水、无暗管排水, 暗管采用无纺布波纹管, 埋深 1.5 m, 间距 50 m, 铺设长度 120 ~ 150 m。试验方案如表 1 所示。

表 1 试验设计

处理	冬灌	生育期灌水方式	暗管排水
T1	无	畦灌	有
T2	无	畦灌	无
T3	无	高效节灌	有
T4	无	高效节灌	无
T5	有	畦灌	有
T6	有	畦灌	无
T7	有	高效节灌	有
T8	有	高效节灌	无

### 1.3 观测指标及方法

(1) 土壤含水率: 采用传统土钻法对 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 土层取样, 用烘干法测定土壤含水率。采样点的选择基于土壤盐分分布的调研和分析, 以确保样品的代表性, 并采用多点采样的方法进行验证, 以减少因盐分变异带来的误差。

(2) 盐分: 采用电导率仪测定不同土层电导率并换算为土壤盐分。

(3) 产量: 作物成熟后测定产量。

(4) 作物生长指标: 作物生长指标测定内容包括株高、茎粗、叶面积指数和干物质积累量。株高在每个观测点位随机选取 3 株采用钢卷尺测量; 茎粗采用游标卡尺测量; 叶面积指数通过叶面积测量及计算获得; 干物质积累量在收获后称量。

(5) 地下水位: 在试验地不同区域布设地下水观测井, 定期监测水位变化。

### 1.4 数据分析统计

数据均采用 Origin 2018 和 SPSS 25.0 进行绘图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下土壤水分时空变化规律

不同处理下, 0 ~ 100 cm 土层土壤水分随时间变化规律如图 1 所示。冬灌与对应未冬灌处理土壤

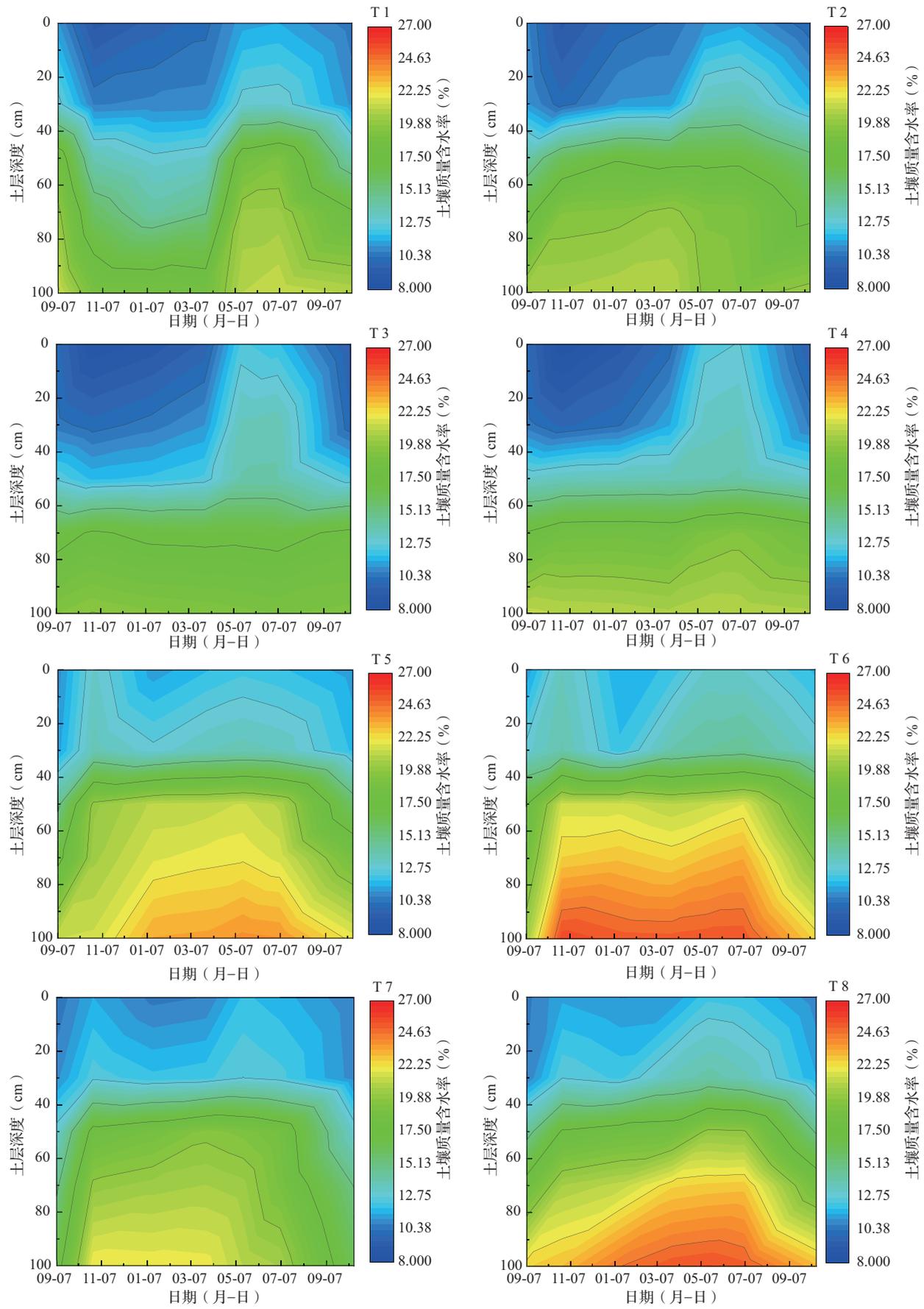


图1 不同处理土壤水分时空变化规律

含水量分布差异显著 ( $P < 0.05$ ), 冬灌处理 (T5、T6、T7、T8) 浅层土壤含水率明显高于对应未冬灌处理 (T1、T2、T3、T4)。冬灌结束后, 随冬灌水持续下渗, 0 ~ 40 cm 土层水分迅速增加, 灌后 15 d 左右, 温度降低, 表层土壤逐渐冻结, 0 ~ 20 cm 土层水分向冻结边缘方向运移; 随温度持续降低冻结深度逐渐加深, 0 ~ 40 cm 冻土层未冻结水缓慢向下移动, 40 ~ 100 cm 土层水分有所增加; 翌年 3—4 月, 气温升高导致地表积雪和土壤冻结层融化, 0 ~ 20 cm 土层含水率恢复至灌后 15 d 水平。此外, 暗管排水对土壤含水率影响显著, T3 处理各土层含水率明显低于其他各处理, 而 T6 处理无暗管排水措施, 在冬灌和畦灌多重影响下, 60 ~ 100 cm 土层含水率明显高于其他各处理。

## 2.2 不同处理下土壤盐分时空运移规律

由图 2 可以看出, 各处理 0 ~ 100 cm 深度土壤盐分随时间动态变化规律差异显著。冬灌可以有效淋洗土壤盐分至深层, 和冬灌前相比, 冬灌结束后 1 周, 水分下渗使各土层盐分产生对流与弥散, 0 ~ 40 cm 土壤盐分有所降低, 其中 T5、T7 降低最明显; 随温度降低土壤开始冻结, 0 ~ 40 cm 土层在冻结和蒸发的双重作用下盐分有所增加; 解冻期时期表层土壤蒸发强烈, 盐分随水分向地表运移, 0 ~ 40 cm 土层盐分逐渐升高; 生育期在灌水淋洗作用下, 0 ~ 40 cm 土层盐分持续降低, 其中 T5 畦灌盐分淋洗作用最显著。暗管排水对盐分运移也有一定影响, T2、T6 处理 60 ~ 100 cm 土层盐分随时间呈现逐渐积累趋势, 这是排水不畅导致的结果; T1、T5 由于布设了暗管排水, 60 ~ 100 cm 土层盐分无积累趋势。此外, 和节灌相比, 生育期畦灌也能有效淋洗表层盐分至土壤深层。

## 2.3 不同处理下作物玉米生长指标及产量的影响

冬灌及排水方式影响播种前土壤水盐原生分布状态, 降低土壤耕作层盐分, 进而影响次年作物生长指标及产量, 本研究通过连续监测不同处理下玉米产量、株高、茎粗、叶面积指数及干物质质量等生理生长指标, 探究各处理对作物生长的影响机理。

### 2.3.1 不同处理对次生盐渍化玉米产量的影响

各处理产量对比如图 3 所示。可以看出, 生育期其他管理措施一致情况下, 冬灌处理产量较对应未冬灌处理均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 其中 T5、T6、T7、T8 平均产量为 6181.20、5880.00、6556.05、5743.20 kg/hm<sup>2</sup>, 比对应未冬灌处理 (T1、T2、T3、

T4) 平均增加 20.02%、20.87%、22.32%、12.18%, 冬灌淋洗能有效提高次生盐渍化玉米地产量。其他处理措施一致情况下, 生育期节灌产量略高于畦灌, 其中 T7 产量较 T5 增加了 6.06%。此外, 暗管排水对次生盐渍化玉米地产量也有一定影响, 各处理中有暗管排水 (T1、T3、T5、T7) 产量均高于对应无暗管排水 (T2、T4、T6、T8), 其中 T7 和 T8 差异最显著, T7 产量较 T8 增加了 14.15%。

### 2.3.2 不同处理对次生盐渍化玉米性状的影响

各处理玉米生长指标如表 2 所示。冬灌对株高、茎粗、叶面积指数及干物质质量的影响均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 其中 T7 株高、茎粗、叶面积指数及干物质质量较 T3 分别增加了 7.65%、6.79%、15.72% 和 10.22%, 说明冬灌可以有效淋洗表层土壤盐分, 提高土壤含水率, 进而促进作物生长。对比 T6、T8 可以发现, 无暗管排水条件下, 生育期灌水方式对株高、茎粗及叶面积指数影响不显著, 仅干物质质量差异显著, 而有暗管排水情况下, T5、T7 各生长指标均存在显著差异, T7 各生长指标略高于 T5。由于铺设暗管加快了水分下渗速率, 盐分随灌溉水一同下渗并随暗管排出, 导致玉米根系土层抑制生长的盐分比例降低, 且节水灌溉频次高, 操作灵活, 可以根据作物需水情况及时灌溉, T7 生长指标优于 T5。

T3 处理株高、茎粗、叶面积指数及干物质质量均高于 T1、T2 和 T4, 说明暗管排水与生育期节灌交互作用可以有效促进作物生长。此外, 8 个处理中 T7 各项生长指标均高于其他处理, 是次生盐渍化玉米地提产增收的最佳方式。

## 2.4 不同处理下地下水位时空分布规律

各处理地下水埋深随时间变化如图 4 所示。可以看出, 无冬灌、生育期节水灌溉条件下地下水位最低, 其中 2022 年 9—10 月 T3 地下水位最深, 11 月至翌年 7 月 T4 处理地下水位最深; 2022 年 10 月冬灌结束后各处理地下水位逐渐变浅, 随后在下渗、蒸发多重作用下地下水位有所回落, 冻融期结束后随气温升高在融雪、降水影响下地下水位持续变浅, 生育期内各处理地下水位在蒸发、作物生长消耗、降水及灌溉交互作用下上下波动, 玉米收获期停止灌溉且降水减少, 地下水位逐渐回落至上年同期水平。此外, 在冬灌和生育期畦灌多重补给作用下, T6 处理土壤积蓄了大量水分, 并且无暗管排水措施, 因此, T6 地下水位埋深最浅, 冬灌结束后达到峰值 1.04 m。

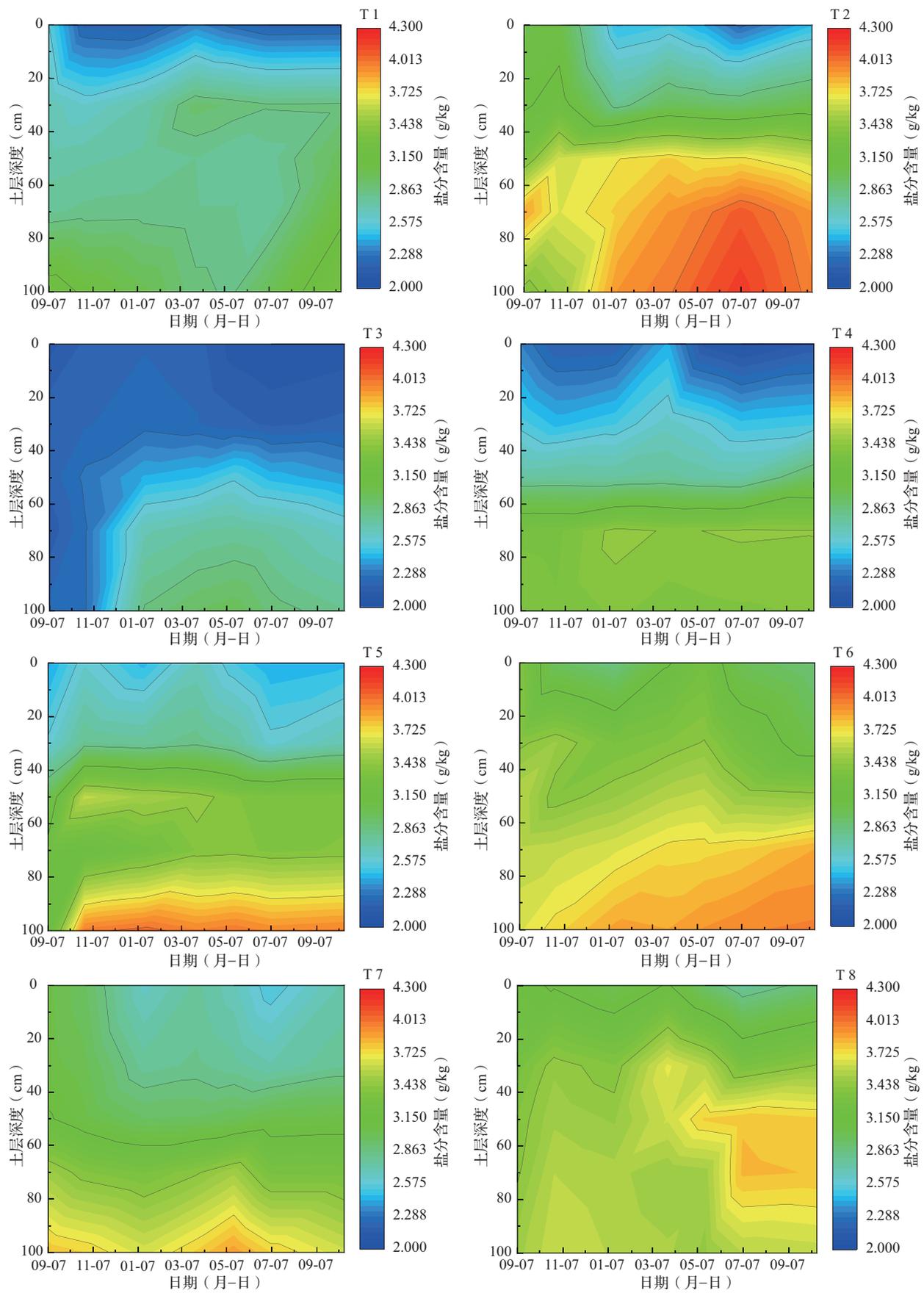


图2 不同处理土壤盐分时空变化规律

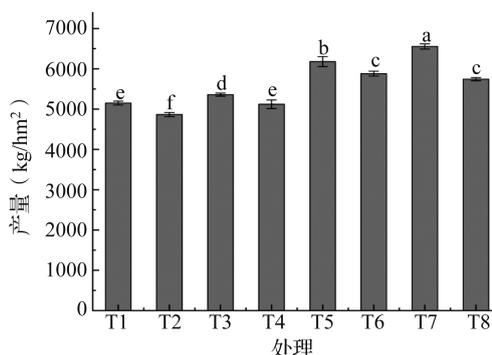


图3 不同处理的玉米产量

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表2 各处理玉米生长指标

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶面积指数	干物质量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
T1	188.233 ± 0.472e	28.977 ± 0.076e	3.703 ± 0.045e	2333.10 ± 14.798e
T2	182.066 ± 1.943g	28.407 ± 0.352f	3.600 ± 0.026e	2185.61 ± 28.274g
T3	195.233 ± 1.929d	29.320 ± 0.036d	3.880 ± 0.020d	2389.76 ± 9.675d
T4	185.200 ± 0.361f	28.657 ± 0.035e	3.630 ± 0.026e	2268.80 ± 30.429f
T5	204.733 ± 1.002b	30.597 ± 0.168b	4.350 ± 0.036b	2555.04 ± 35.025b
T6	198.767 ± 0.306c	30.117 ± 0.060c	4.240 ± 0.030c	2405.90 ± 32.252d
T7	210.167 ± 2.011a	31.310 ± 0.235a	4.490 ± 0.131a	2633.96 ± 51.806a
T8	200.133 ± 0.551c	30.216 ± 0.045c	4.177 ± 0.201c	2480.85 ± 50.082c

注: 数据为平均值 ± 标准差; 同一列数据后不同小写字母表示  $P = 0.05$  差异显著。

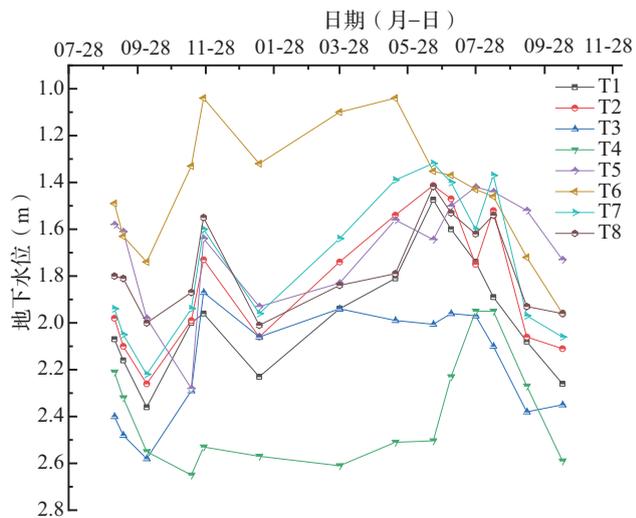


图4 次生盐渍化试验区各处理地下水位随时间变化

### 3 讨论

#### 3.1 不同处理对次生盐渍地水盐运移的影响

红寺堡扬黄灌区开发初期, 地下水位较低, 没有土壤次生盐化问题。随着开发种植面积的扩大,

灌溉引水量的增加, 主要以畦灌为主, 高效节水灌溉技术应用面积非常少, 灌溉水深层渗漏量增加, 致使部分自然排泄条件差的地区地下水位上升, 导致土壤次生盐渍化突显。冬季灌溉、暗管沟道排水以及生育期高效节灌对次生盐渍地土壤盐分、水分时空运移规律影响显著, 有研究表明<sup>[18]</sup>, 冬季灌溉可以有效淋洗土壤盐分, 结合暗管排水、生育期畦灌可有效脱去土壤中的盐分。冬灌比不冬灌冻结时土壤含水率明显升高, 在冻结过程中, 土壤中孔隙缩小, 影响水分和盐分的运移<sup>[19-20]</sup>, 土壤含水率冻融初期在蒸发和冻结作用下, 表层土壤盐分有所增加, 随冻结深度加深, 部分盐分在水土势、重力势、温度势多重作用下向未冻结区运移, 表层土壤盐分减少, 冻融末期表层土壤蒸发强烈, 盐分随水分向上运移, 表层土壤盐分有所增加。王心亮等<sup>[21]</sup>研究表明, 冬灌后各土层盐分均有所下降, 但冻融期后土壤出现返盐现象。生育期内灌水也有一定的淋洗作用, 采用畦灌时表层土壤盐分降低最明显。地下水位在冬灌、暗管排水、生育期灌溉及

作物消耗等因素影响下往复波动。T3、T4 地下水位最深，T6 地下水位埋深最浅，各处理地下水位时空变化规律类似，冬灌后水位先上升后下降，冻融期结束后在融雪、降水影响下水位逐渐上升，播种初期地下水位达到峰值，生育期内在作物消耗、蒸发及降水多重作用下，地下水位往复波动，与以往的研究结果一致<sup>[22]</sup>。解冻后，有冬灌的处理土壤耕作层出现盐分聚集现象，主要是大气温度逐渐回升，0 ~ 40 cm 土层土壤剖面水分向上运移所导致，并且由于表层土壤水分的蒸发，盐分逐渐增多<sup>[23]</sup>；土壤剖面 60 ~ 80 cm 土层土壤含水率也有所升高，主要是溶解时期，土壤表层和深处向冰冻区域双向融化，40 ~ 60 cm 土层土壤中水分分别向上向下运移。

### 3.2 不同处理对次生盐渍地玉米生长及产量的影响

冬灌的玉米生长指标、产量均高，各处理之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，冬灌田间土壤含水量较高，冬季土壤冻融效果好，土壤孔隙度小，减少了病虫害<sup>[21]</sup>。但冬灌后，冻融期结束土壤表层盐分有所聚集，对作物出苗、生长也有一定的影响，本研究监测了有暗管排水和无暗管排水处理，结果表明，有暗管排水处理产量均高于无暗管排水处理，说明冬灌 + 暗管排水提高作物产量，降低土壤盐分，这与卢星航等<sup>[24]</sup>采用作物覆盖和暗管排水措施有效抑制返盐的研究结果类似。宁夏扬黄灌区次生盐渍地有较强的蒸腾、蒸发，土壤表层水分、盐分迁移较频繁，采用高效节灌可抑制土壤耕作层的水分、盐分频繁迁移，对提高玉米产量，控制次生盐渍化增加有一定作用<sup>[25]</sup>。本研究表明，次生盐渍化玉米地作物生长指标及产量差异显著，与无冬灌处理相比，对应冬灌处理玉米株高、茎粗、叶面积指数、干物质质量及产量均显著增大，与陈小芹<sup>[26]</sup>研究结果一致。对于扬黄灌区次生盐渍化治理应科学合理地进行冬灌，因地制宜采用灌排措施，可有效控制次生盐渍化发生。

## 4 结论

本研究探讨了冬灌、暗管排水以及生育期灌水方式协同作用对次生盐渍化土水盐运移及作物生长的影响。研究表明，不同处理下土壤水分和盐分变化均呈现明显差异。冬灌处理能有效淋洗盐分至深层，而生育期畦灌也对表层盐分具有淋洗作

用。同时，暗管排水对盐分运移有一定影响，T2、T6 处理的土壤盐分在 60 ~ 100 cm 土层逐渐积累，而 T1、T5 则无此趋势。综合考虑不同处理方式对土壤盐分、水分运移和作物生长的影响，发现冬灌、暗管排水及生育期节水灌溉组合下，玉米产量 6556.05 kg/hm<sup>2</sup>、株高 210.17 cm、茎粗 31.31 mm、叶面积指数 4.49 及干物质质量 2634.00 kg/hm<sup>2</sup>，均高于其他各处理，且盐分淋洗效果较好。

### 参考文献:

- [1] 崔鹏. 宁夏引黄灌区土壤盐渍化现状与地下水动态调控 [J]. 宁夏农林科技, 2009 (6): 142-143.
- [2] 胡敏. 不同改良措施对盐碱化土壤理化性质、温室气体及葵花生长的影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [3] 张莹, 林佳, 宋戈. 基于景观生态风险格局的盐碱地分区规划防治研究——以黑龙江省林甸县为例 [J]. 生态学报, 2018, 38 (15): 5509-5518.
- [4] 王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述 [J]. 地理学报, 2011, 66 (5): 673-684.
- [5] 刘嘉斌, 田军仓, 张萌, 等. 暗管排水砂滤料对稻田盐碱地水盐运移规律的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2022, 41 (11): 114-121.
- [6] Qian Y, Zhu Y, Ye M, et al. Experiment and numerical simulation for designing layout parameters of subsurface drainage pipes in arid agricultural areas [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243 (1): 106455.
- [7] 林永增, 孙池涛, 张俊鹏, 等. 起垄沟播和常规平播下滴灌棉田土壤水盐的运移 [J]. 干旱区研究, 2019, 36 (2): 307-313.
- [8] 靳亚红, 杨树青, 张万锋, 等. 秸秆与地膜覆盖方式对咸淡交替灌溉模式下水盐调控及玉米产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (2): 198-205.
- [9] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 新疆绿洲盐碱地滴灌条件下地下水局部动态对荒地盐分的影响 [J]. 干旱区研究, 2016, 33 (5): 1110-1118.
- [10] 金辉, 郭军玲, 王永亮, 等. 全膜双垄沟种植模式对晋北盐碱土水盐动态特征的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017 (3): 111-117.
- [11] 王飞, 刘洪亮, 褚贵新, 等. 北疆棉区长期膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化与次生盐渍化趋势分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2010 (4): 12-17.
- [12] 杨玉辉, 周新国, 李东伟. 暗管排水对南疆高水位膜下滴灌棉田盐分管控及淋洗效果分析 [J]. 干旱区研究, 2020, 37 (5): 1194-1204.
- [13] 牟洪臣, 王振华, 陈小芹, 等. 北疆棉田不同冬灌方式下的土壤水、盐分布的特点及适宜灌水定额 [J]. 华北农学报, 2017, 32 (S1): 319-324.
- [14] 李玲. 冬灌对盐碱地棉田水热盐运移规律及棉花生长的影响

- 研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2021.
- [15] 钱颖志, 朱焱, 黄介生, 等. 干旱地区排盐暗管优化布局关键参数研究 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (14): 117-126.
- [16] 李勋章, 张瀚, 杨鹏年, 等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究 [J]. 灌溉排水学报, 2016, 35 (11): 42-46.
- [17] 鄂继芳, 杨树青, 刘鹏, 等. 不同地下水埋深与灌水量对玉米生长效应及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (2): 209-219.
- [18] 高宏远, 刘霞, 高晓瑜, 等. 不同灌排模式下盐渍化土壤盐分及离子迁移规律及均衡分析 [J]. 水土保持学报, 2023, 37 (2): 361-370.
- [19] Bing H, He P, Zhang Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (1): 675-681.
- [20] Pradhan N, Downer C, Marchenko S. Catchment hydrological modeling with soil thermal dynamics during seasonal freeze-thaw cycles [J]. Water, 2019, 11 (1): 116.
- [21] 王心亮, 王春颖, 袁银, 等. 宁夏青铜峡灌区冬灌对冻融期土壤水热盐分布及作物生长影响 [J]. 水土保持通报, 2023, 43 (3): 54-60, 68.
- [22] 景清华, 刘学军. 宁夏银北灌区暗管排水技术应用与工程效果监测 [J]. 灌溉排水学报, 2005 (1): 45-49.
- [23] 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.
- [24] 卢星航, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (1): 148-154.
- [25] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (3): 246-253.
- [26] 陈小芹. 北疆滴灌棉田冬灌灌水关键技术研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2014.

### Impact of winter irrigation and dark tube drainage on the water and salt movement in secondary saline soil and maize growth

JIAO Bing-zhong\*, WU Hui-fang, ZHU Xu-dong, SHI Su-qi, TANG Rui (The Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Ningxia Dry Farming, Water Saving and Efficient Agricultural Engineering Technology Research Center, Yinchuan Ningxia 750021)

**Abstract:** The synergistic effects of winter irrigation, dark tube drainage and irrigation methods in growth period on water and salt transport and crop growth in secondary saline soil were discussed. The experiment was conducted in Baozitan village, Hongsibao district, Yanghuang irrigation district, Ningxia province. Three influencing factors, including different winter irrigation modes (0, 1800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), dark tube drainage (yes, no), and fertility irrigation methods during the growth period (ground irrigation, water-saving irrigation), were set up to investigate the spatial and temporal changes in soil salinity, water content, crop growth indicators, and groundwater level in the secondary saline soil. The results showed that there were significant differences in the spatiotemporal changes of soil moisture under different treatments. The soil moisture content in the winter irrigation treatment was significantly higher than that in treatment without winter irrigation, and the dark tube drainage treatment significantly reduced the soil moisture content. There were significant differences in the dynamic changes of soil salt over time in the 0-100 cm soil layer depth among different treatments. Winter irrigation could effectively wash the soil salt to deeper layers, with T5 (winter irrigation, border irrigation, and dark tube drainage) treatment showing the most significant desalination of surface soil (0-40 cm). In the initial stage of freeze-thaw, the surface soil (0-40 cm) of each treatment showed salt-returning under the freezing and evaporation. As the freezing depth deepened, some salt was released and transported through the freezing front to the unfrozen area. The salt content of the deeper soil (40-100 cm) increased. During the thawing period, salt was transported to the surface with water under evaporation, and the salt content in the surface soil increased. In addition, maize yield and growth indicators of the winter irrigation combined with the dark tube drainage and water-saving irrigation treatment (T7) were the best, with an average output of 6556.05 kg/hm<sup>2</sup>, plant height of 210.17 cm, stem diameter of 31.31 mm, leaf area index of 4.49, dry matter of 2634 kg/hm<sup>2</sup>. Dark duct drainage could effectively control the groundwater level. Among them, the groundwater levels of T3 and T4 were the lowest. T6 had the higher soil moisture content under the multiple supplies of winter irrigation and border irrigation during the growth period, and there was no dark tube drainage measure, and the groundwater level of T6 was the shallowest, reaching a peak of 1.04 m after the end of winter irrigation. Therefore, in the planting, management and treatment of crops in secondary saline soil in the Yellow River irrigation area, it could be considered to increase the drainage facilities reasonably and adopt the efficient water-saving irrigation method.

**Key words:** secondary saline soil; winter irrigation; dark tube drainage; efficient water-saving irrigation; water and salt transport; maize