

暗管间距和埋深对田间水盐运移变化的影响

张丽^{1,3}, 焦平金², 董勤各^{1,3,4*}, 陶园²

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100048; 3.西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】研究河套灌区漫灌模式下田间尺度不同暗管间距和埋深对土壤水盐运移特征的影响。【方法】基于田间监测数据率定验证 HYDRUS-2D 模型, 并模拟暗管埋深 1.5 m 下 5 种间距 (5、15、25、50、100 m) 与暗管间距 25 m 下 5 种埋深 (0.6、1.0、1.5、2.0、2.5 m) 下的排水排盐量和土壤剖面水盐时空分布特征。【结果】①模型模拟水盐变化的精度较高, 土壤剖面水分和盐分模拟结果的决定系数 R^2 分别为 0.81 和 0.71, 均方根误差 $RMSE$ 分别为 0.038 和 0.026, 纳什系数 NSE 分别为 0.93 和 0.86。②累积排水量和排盐量随暗管间距减小和暗管埋深增加而增加, 埋深 1.5 m 下暗管间距从 100 m 减至 5 m 排水总量增长了 4.96 倍, 排盐总量增长了 5.06 倍; 暗管间距 25 m 下埋深从 0.6 m 增至 2.5 m 排水总量增长了 64.24 倍, 排盐总量增长了 60.08 倍。③土壤剖面含水率在排水期随暗管间距减小和埋深增加而降低, 土壤剖面含水率降幅随时间增加而减小; 土壤剖面含盐量在非排水期随暗管间距减小和埋深增加而降低, 土壤剖面含盐量降幅随时间增加而增大。④水平方向, 土壤含盐量在非排水期随水平距离的增加而增大, 增幅随暗管间距减小和埋深增大而减小。埋深 1.5 m 下暗管间距 5 m 与暗管间距 100 m 土壤含盐量差异从暗管处的 26.67% 增加到暗管中间的 39.88%, 暗管间距 25 m 下埋深 0.6 m 与埋深 2.5 m 土壤含盐量差异从暗管处的 30.56% 增加到暗管中间的 50.39%; 垂直方向, 土壤含水率随土层深度增加呈先增大后减小的“镰刀”状变化; 排水初期土壤含盐量随土层深度的增加而增大, 非排水期随土层深度的增加而减小。【结论】减少暗管间距和增加暗管埋深可有效提高暗管排水排盐量并降低排水期的土壤剖面蓄水量和非排水期的土壤剖面含盐量, 初步认为暗管间距在 15~50 m, 暗管埋深在 1.0~2.0 m 范围内作为河套灌区的暗管排水布设参数较为合适。

关键词: 暗管排水; 水盐运移; 暗管间距; 暗管埋深; HYDRUS-2D

中图分类号: S276

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022681

OSID:



张丽, 焦平金, 董勤各, 等. 暗管间距和埋深对田间水盐运移变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 92-101.

ZHANG Li, JIAO Pingjin, DONG Qin'ge, et al. Effects of Spacing and Depth of Subsurface Drain on Water and Salt Transport in the Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 92-101.

0 引言

【研究意义】河套灌区是黄河中游的特大型灌区, 也是我国重要的产粮基地^[1]。由于降雨稀少和蒸发强烈^[2], 河套灌区主要通过引黄灌溉来满足农业发展的用水和洗盐需求, 但年均 47.03 亿 m^3 的引水量显著抬高了地下水位并加重了土壤次生盐渍化程度^[3]。通过加大春灌或秋浇灌水量淋洗土壤盐分可缓解盐害, 却进一步抬升了地下水位, 不仅造成水资源浪费, 又使土壤返盐严重。随着灌区一系列节水工程的实施, 农田地下水位有所下降, 然而由于排水效果不佳, 根区土壤仍处于积盐状态, 发生土壤次生盐渍化的风险仍然很大。因此加强排水、健全排灌配套体系是实现

灌区节水控盐及可持续发展的关键环节^[4]。

【研究进展】暗管排水是调控土壤水盐、保证灌溉农业可持续发展的重要措施, 可排出土壤剖面中过多水分和盐分, 维持土壤透气性。暗管间距和埋深是暗管布设的 2 个重要参数, 暗管布设对土壤剖面水盐的运移具有显著影响^[5-6]。暗管间距对土壤盐分淋洗的影响随暗管间距减小而增大^[7-8]。张洁等^[9]研究发现, 大棚土壤次生盐渍化土壤中暗管埋深 70 cm 的土壤改良效果优于埋深 40 cm。水盐运移是指土壤中水盐随时空变化的过程, 了解水分和盐分在土壤中的分布和变化对灌区水管理和盐渍化治理具有重要作用^[10]。王振华等^[8]研究表明, 暗管中点位置处土壤脱盐率最小。Moreno 等^[5]研究发现, 暗管下方土壤脱盐效果较好。在蒸发作用下土壤含水率整体呈缓慢降低趋势^[11], 土壤含盐量整体上呈逐年加重趋势^[12]。

【切入点】然而, 上述研究仅从暗管间距或埋深方面分析暗管排水对土壤盐分淋洗的影响, 探讨了土壤含水率和含盐量的空间分布规律, 但缺乏对多水平暗管

收稿日期: 2022-12-08 修回日期: 2023-05-09 网络出版日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52179054)

作者简介: 张丽 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事农田排水与盐碱地治理研究。E-mail: 1430519575@qq.com

通信作者: 董勤各 (1982-), 男, 副研究员, 主要从事节水灌溉方法与技术、土壤水盐运移调控与模拟研究。E-mail: qgdong2011@163.com

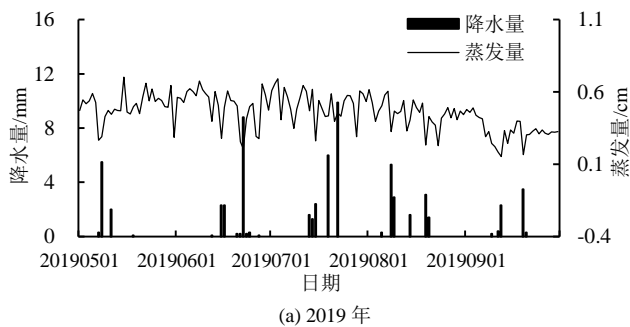
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

间距和埋深共同作用下土壤水盐时空运移特征的系统研究。【拟解决的关键问题】为此, 基于田间试验率定和验证模拟模型, 构建了多种暗管间距和埋深模拟情景, 分析暗管排水驱动下向日葵田土壤水盐运移特征, 并从时间与空间 2 个角度进一步揭示不同暗管间距和埋深条件下土壤水盐运移机制, 以丰富干旱半干旱地区农田节水控盐的技术体系。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区巴彦淖尔市五原县长试验站 (107°37'19"—108°51'04"E, 40°45'57"—41°17'58"N), 平均海拔为 1 092 m。该区属于温带大陆性气候, 降水稀少 (年均降水量 139~222 mm), 蒸发强烈 (年均蒸发量 2 200~2 400 mm), 冻融期较长, 达 180 d, 平均冻土深度为 1.1 m。年平均风速为 2.7 m/s; 年平均气温为 6.6~7.7 °C; 年平均日照时间为 3 200 h, 太阳辐射量多达 6 200 MJ/m²。试验区的灌溉方式主要为大水漫灌, 主要排水方式为明沟排水和暗管排水;



主要种植作物有玉米和向日葵, 作物生育期内地下水埋深为 0.52~2.20 m, 地下水矿化度约为 0.65 g/L。试验田土壤质地为粉壤土, 平均干体积质量为 1.50 g/cm³, 田间持水率为 0.23~0.29 cm³/cm³, 土壤表层含盐量高达 15 g/kg 左右, 土壤属于中度盐渍土^[10]。

试验区面积为 3 000 m², 小区内布设 3 根平行暗管, 暗管间距 50 m, 暗管长均为 20 m, 埋深 1.6 m, 管径 75 mm 的外包土工布透水管, 坡降为 0.002。试验进行 2 a, 2019 年试验区内种植玉米, 生育期内进行 3 次灌水, 每次的灌水定额为 2 000 m³/hm²; 2020 年试验区内种植向日葵, 生育期内不灌水, 在播种前进行春灌, 春灌定额 2 300 m³/hm², 灌溉水电导率范围为 550~700 μS/cm。在生育期及各关键节点采集土样, 测定土层深度为 120 cm, 测定土层为 0~10、10~30、30~50、50~70、70~100、100~120 cm 土样, 共 6 层。土壤含水率采用烘干法测量, 先用电导率仪测定土壤标准液电导率再转化为土壤含盐量, 计算式为^[13]:

$$S = EC_{1:5} \times 0.0032, \quad (1)$$

式中: S 为全盐量 (g/kg); $EC_{1:5}$ 为土壤电导率 (μS/cm)。

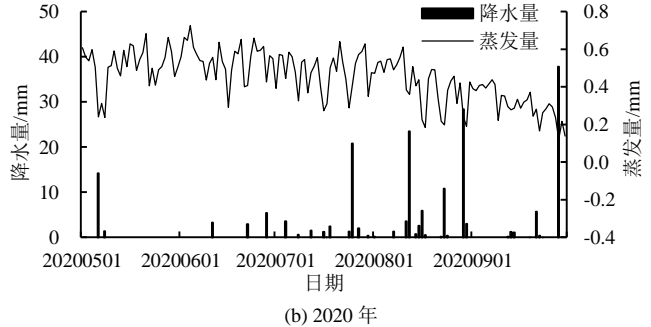


图 1 试验区降水量与蒸发量

Fig.1 Distribution of rainfall and evaporation in the test area

1.2 二维土壤水盐运移模拟模型构建

HYDRUS-2D 是一种可用来模拟水流和溶质在非饱和多孔介质中运移的数值模型^[14], 输入气象、含水率和含盐量等基本数据, 可模拟土壤水盐的时空变化特征。土壤水分运移通过 Richards 方程来描述, 土壤水力特性通过 van Genuchten 公式来描述, 土壤盐分运移通过对流-弥散方程来描述。

2019 年从第 1 次灌水前取土时 (6 月 22 日) 开始模拟, 模拟时长为玉米整个生育期共 137 d, 2020 年从春灌前取土时 (5 月 13 日) 开始模拟, 模拟时长为向日葵整个生育期共 166 d。模型模拟区域以及边界条件见图 2, 模拟计算区域为长 50 m, 宽 30 m 的矩形, 模型实际模拟 0~120 cm 土层土壤水盐变化特征。暗管位于区域中间, 埋深 1.6 m 处, 控制两边各 25 m。由于需考虑降水、蒸发等影响土壤水分运动的气象因素, 将土壤水分上边界条件设为大气边界或变水头边界。当灌水时, 上边界为变水头边界, 当

灌水完全入渗, 地表没有积水后, 上边界变为大气边界; 暗管处设为渗透面边界; 左、右边界设为零通量边界; 下边界远低于地下水位, 视下边界基本不与地下水发生水分运移和溶质运移, 视为具有不透水性, 因此将下边界也视为零通量边界。土壤溶质运移边界条件与水分运移边界条件相对应, 左、右边界及下边界为零通量边界, 上边界和暗管处为第三类边界条件。

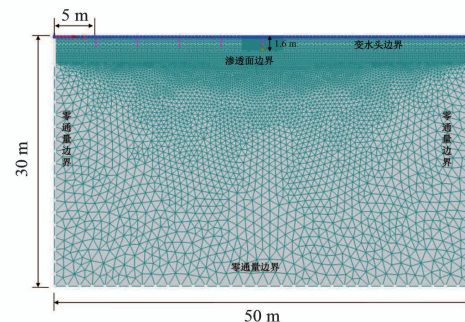


图 2 试验区模型边界条件

Fig.2 Boundary conditions of the model in the test area

表 1 土壤类型及水力特性参数

Table 1 Soil type and hydraulic parameters

土层深度/cm	土壤类型	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
0~10	粉壤土	0.067	0.46	0.012	1.5	9.16	0.5
10~30	粉壤土	0.067	0.45	0.011	1.5	8.80	0.5
30~50	粉壤土	0.067	0.46	0.011	1.4	10.44	0.5
50~100	粉壤土	0.067	0.45	0.010	1.3	8.44	0.5
100~3 000	粉壤土	0.067	0.40	0.016	1.6	14.90	0.5

注 θ_r 为残余土壤含水率 (cm^3/cm^3); θ_s 为饱和土壤含水率 (cm^3/cm^3); α 、 n 为土壤水分特征曲线拟合参数; K_s 为饱和导水率 (cm/d); l 为孔隙连通性参数。

1.3 模型率定与验证

采用决定系数 (R^2)、均方根误差 ($RMSE$) 和纳什系数 (NSE) 3 个指标来评价模型的模拟结果。 R^2 和 NSE 越接近于 1, $RMSE$ 越接近于 0, 模拟精度越高, 一般认为 R^2 在 0.5 以上达到率定要求^[15]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}, \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})]^2}{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2]}, \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}, \quad (4)$$

式中: M_i 为第 i 个时段的实测值, \bar{M} 为全部时段实测值的平均值; S_i 为第 i 个时段模拟值, \bar{S} 为全部时段模拟值的平均值。

本研究利用 2019 年玉米整个生育期土壤水盐数据进行模型的率定, 将模拟值与实测值进行拟合, 调整参数, 土壤物理参数见表 1, 土壤溶质运移参数参考文献[16]确定, 纵向弥散度 (D_L) 为 79 cm, 横向弥散度 (D_T) 为 2 cm, 并用 2020 年的数据进行验证。2019 年生育期土壤水分和盐分的模拟值与实测值的 R^2 分别为 0.78、0.70, $RMSE$ 分别为 0.03、0.03, NSE 分别为 0.93、0.85; 2020 年生育期土壤水分和盐分模拟值与实测值的 R^2 分别为 0.81、0.71, $RMSE$ 分别为 0.04、0.03, NSE 分别为 0.93、0.86。2019 年和 2020

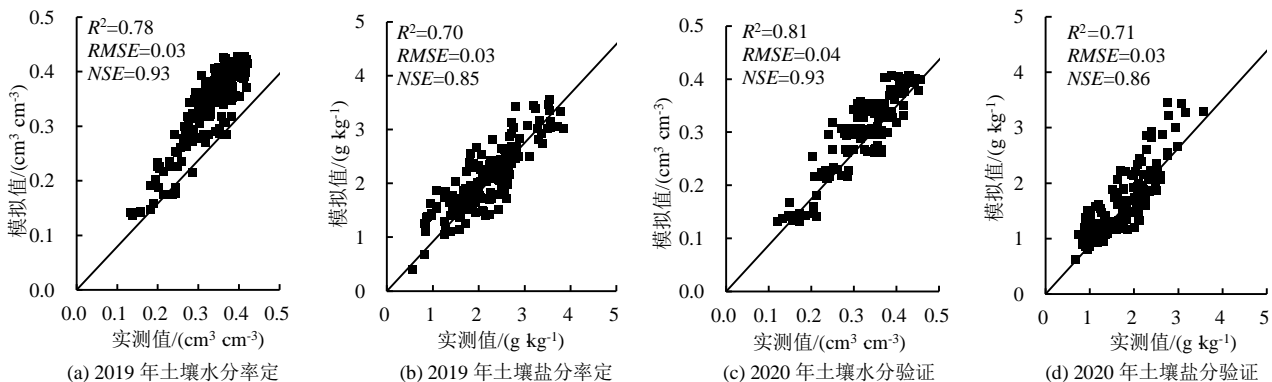


图 3 模型率定与验证结果

Fig.3 Model calibration and verification results

2.2 暗管埋深对排水排盐的影响

暗管间距 25 m 下不同暗管埋深对土壤累积排水

量、累积排盐量和累积灌水量的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 累积排水量和累积排盐量随暗管埋深的增

1.4 模拟方案

为探索不同暗管间距和埋深下土壤水盐的动态变化规律, 本研究设置了暗管埋深 1.5 m 下 5 种暗管间距 (5、15、25、50、100 m), 以及暗管间距 25 m 下 5 种暗管埋深 (0.6、1.0、1.5、2.0、2.5 m)。采用 2020 年数据来进行情景模拟。模型输入参数与率定的水分和盐分参数相同, 初始含水率采用原先各土层土壤含水率平均值, 初始含盐量采用原先各土层土壤含盐量平均值, 边界条件不变。种植作物、灌溉制度和气象参数等均与 2020 年保持一致。

2 结果与分析

2.1 暗管间距对排水排盐的影响

暗管埋深 1.5 m 下不同暗管间距对土壤累积排水量、累积排盐量和累积灌水量的影响如图 3 所示。由图 3 可见, 累积排水量和累积排盐量均随暗管间距的增大而减小。间距 5 m 暗管单位面积累积排水量最大为 60.80 mm, 分别是间距 15、25、50、100 m 暗管累积排水量的 1.42、1.87、3.18、5.96 倍; 间距 5 m 暗管单位面积累积排盐量最大为 273.7 g/m^2 , 分别是间距 15、25、50、100 m 暗管的 1.43、1.88、3.22、6.06 倍。不同暗管间距处理均从第 3 天 (灌水当天) 开始排水排盐, 初始排水阶段排水量和排盐量均呈爆发式增长, 尤其暗管间距 5、15 m 更为明显。经历一段时间后, 排水速率、排盐速率逐渐减小, 最终达稳定状态时停止排水和排盐。暗管间距 5、15、25、50、100 m 处理灌后农田爆发式排水排盐持续时间分别为 11、15、18、20、22 d。

量、累积排盐量和累积灌水量的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 累积排水量和累积排盐量随暗管埋深的增

大而增加。埋深 2.5 m 暗管累积排水量最大为 163.10 mm，分别是埋深 0.6、1.0、1.5、2.0 m 暗管的 65.24、16.47、5.00、1.96 倍；埋深 2.5 m 暗管单位面积累积排盐量最大为 710.72 g/m²，分别是埋深 0.6、1.0、1.5、2.0 m 暗管单位面积累积排盐量的 61.80、15.62、4.89、1.94 倍。不同暗管埋深处理开始排水时间不同，埋深 2.0 m 以下暗管从第 3 天（灌水当天）开始排水排盐，

排水历时均在 25 d 以内，而埋深 2.0、2.5 m 暗管从第 1 天就开始排水排盐，排水历时高达 43、79 d。可见，与暗管间距相比，排水时间受暗管埋深和地下水位影响更大。因此以暗管埋深为 1.5 m 时各暗管间距处理下最长排水时间为临界时间，灌水后开始排水至排水结束期间（第 3~第 25 天）称为排水期，排水结束后至生育期结束期间（第 25~第 166 天）称为非排水期。

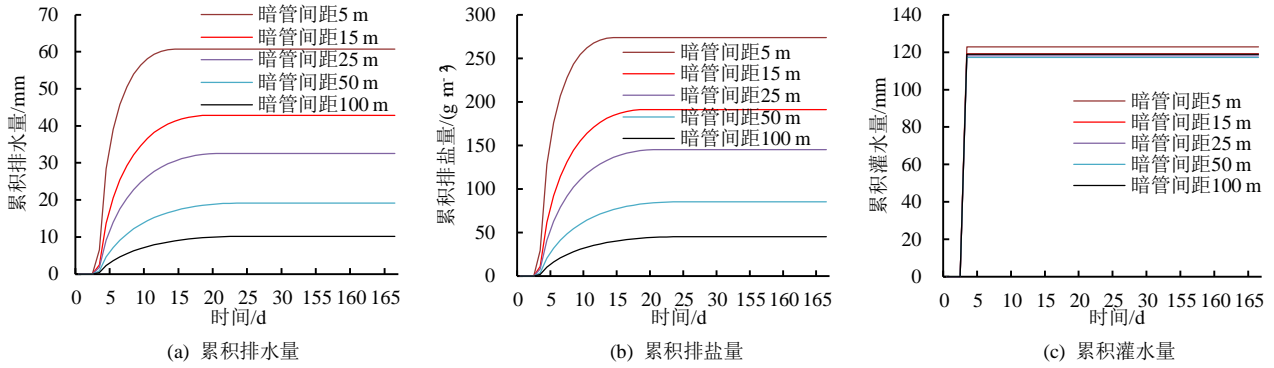


图 4 不同暗管间距对累积排水量、累积排盐量、累积灌水量的影响

Fig.4 Effects of different spacing of subsurface pipes on drainage, salt discharge and irrigation volume

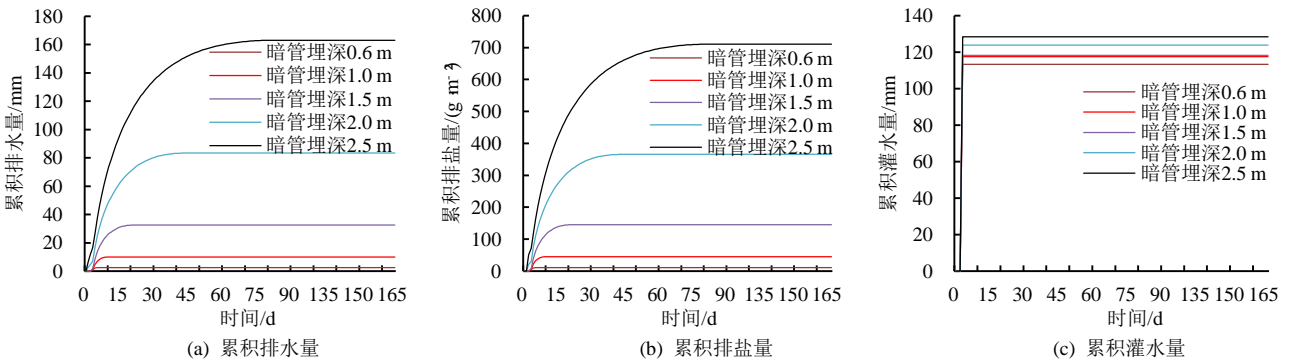


图 5 不同暗管埋深对累积排水量、累积排盐量、累积灌水量的影响

Fig.5 Influence of different buried depth of subsurface pipe on water discharge, salt discharge and irrigation

2.3 暗管间距对土壤剖面水盐时空分布的影响

2.3.1 土壤剖面含水率

暗管埋深 1.5 m 时，不同时期不同暗管间距下 0~120 cm 土层土壤含水率变化如图 6 和图 7 所示。从时间上看，整个生育期内，不同处理的土壤剖面含水率整体均呈下降趋势，土壤整个剖面含水率在不同暗管间距下的差异也随时间推进逐渐缩小，暗管间距 5 m 与暗管间距 100 m 之间的土壤整个剖面含水率，差异在生育期开始时为 9.16%，生育期结束时为 0。

从空间上看，不同暗管间距下排水期（第 3~第 25 天）土壤剖面含水率空间分布差异明显，土壤剖面含水率与暗管间距正相关。水平方向，排水初期（第 5 天），虽然不同暗管间距下土壤剖面含水率上层差异较大，但其差异基本上不随距暗管距离变化而变化（除暗管处），与暗管间距 5 m 相比，暗管间距 100 m 表层土壤含水率增加 9.16%。排水末期（第 25 天），不同暗管间距间下层土壤含水率差异较大，与暗管间距 5 m 相比，暗管间距 100 m 下层土壤含水率增加

4.57%。非排水期（第 25~第 127 天），不同暗管间距下土壤含水率无显著差异，其根区平均土壤含水率约为 0.23 cm³/cm³。垂直方向，随着土层深度的增加，土壤剖面含水率均呈先增大后减小的变化趋势，排水初期土壤含水率在 50 cm 土层深度处最大，为 0.45 cm³/cm³，之后土壤含水率在 70 cm 土层深度最大，为 0.39 cm³/cm³。

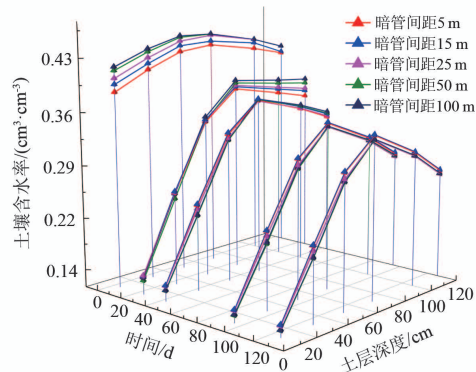


图 6 不同暗管间距各土层土壤含水率随时间变化
Fig.6 Variation of soil water content under different soil layer with time under different subsurface pipe spacing

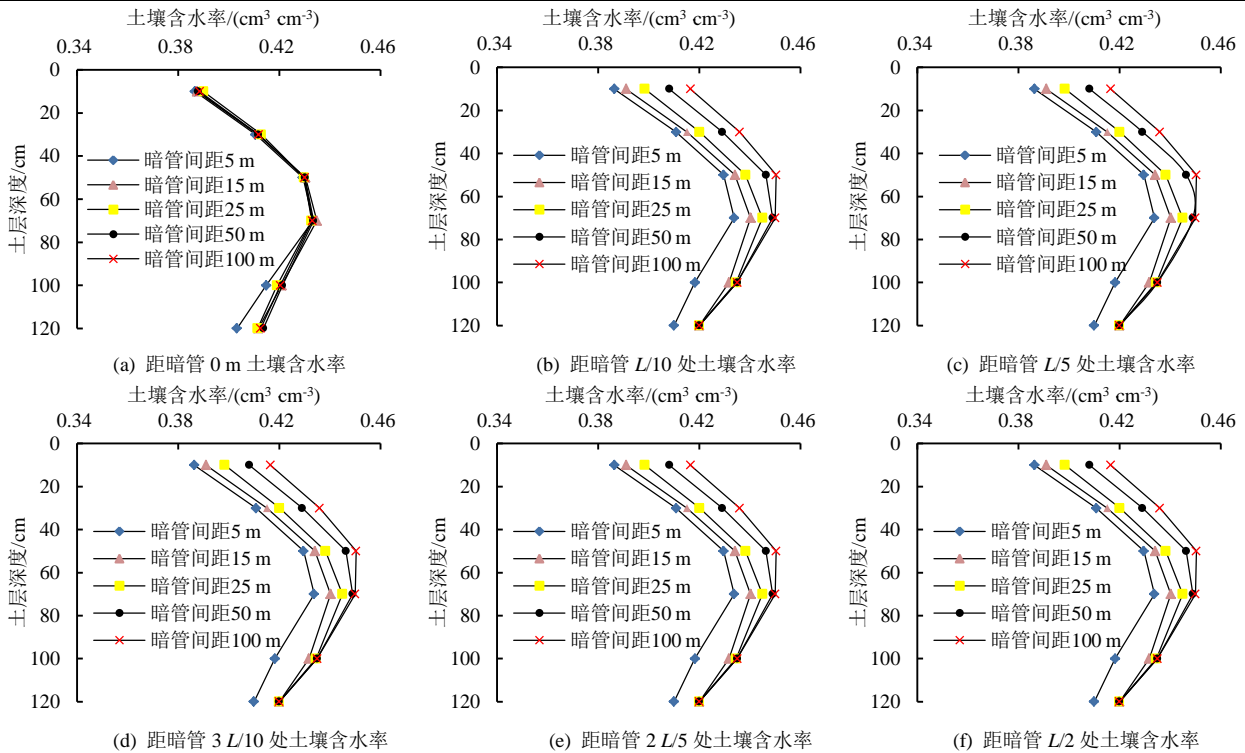


图 7 第 5 天不同暗管间距下土壤含水率随距暗管水平距离变化 (L 指 2 根暗管之间的距离)
 Fig.7 Variation of soil water content with horizontal distance under different subsurface pipe spacing on day 5
 (L refers to the distance between two subsurface pipes)

2.3.2 土壤剖面含盐量

暗管埋深 1.5 m 时, 不同时期不同暗管间距下 0~120 cm 土层土壤含盐量变化如图 8 和图 9 所示。从时间上看, 整个生育期内, 不同处理下的土壤剖面含盐量整体呈上升趋势, 土壤整个剖面含盐量在不同暗管间距处理间的差异也随时间推进逐渐增大; 随生育进程推进, 暗管间距 5 m 与暗管间距 100 m 处理之间的土壤剖面含盐量差异最大达到 55.16%。各暗管间距下土壤含盐量差异先在土壤表层显现, 而后逐渐转移至下层。

从空间上看, 不同暗管间距下土壤含盐量空间分布在非排水期差异明显, 土壤剖面含盐量与暗管间距正相关。第 127 天成熟时, 与暗管间距 5 m 相比, 暗管间距 100 m 土壤整个剖面平均含盐量增加 39.88%。水平方向上, 随着距暗管水平距离的增加不同暗管间距间土壤含盐量差异增大, 土壤剖面含盐量也增大, 暗管间距 5 m 与暗管间距 100 m 土壤含盐量差异从

管处的 26.67% 增加到距暗管 $L/2$ 处的 39.88%。垂直方向, 随着土层深度增加, 土壤剖面含盐量在非排水期均呈逐渐降低的趋势, 且土壤含盐量在不同暗管间距间的差异也随土层深度的增加逐渐减小, 0~10 cm 土层土壤含盐量差异最大, 100~120 cm 差异最小。

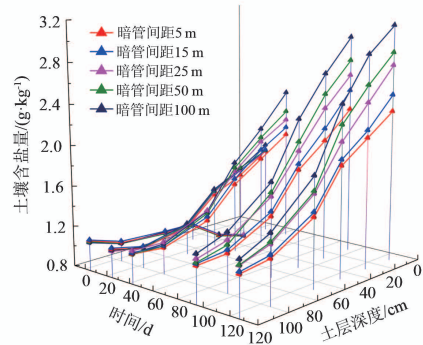
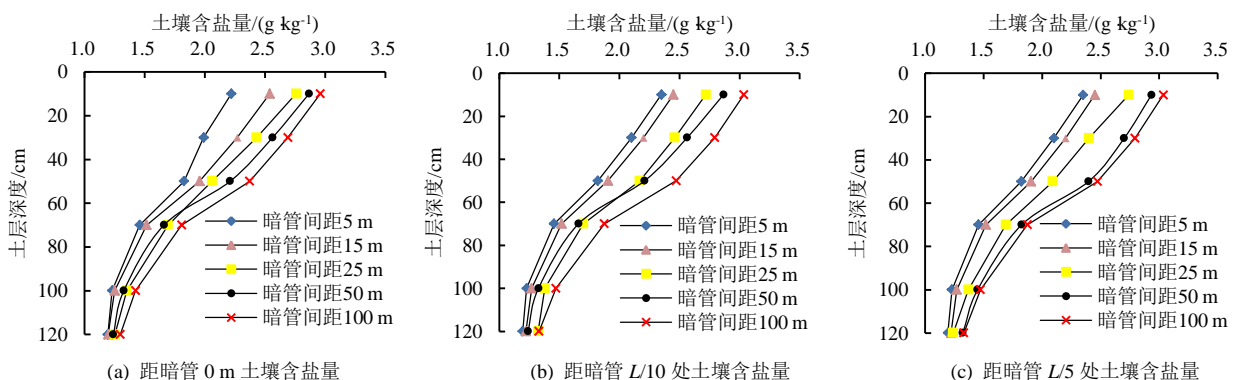


图 8 不同暗管间距各土层土壤含盐量随时间变化
 Fig.8 Variation of soil salinity under different soil layer with time under different subsurface pipe spacing



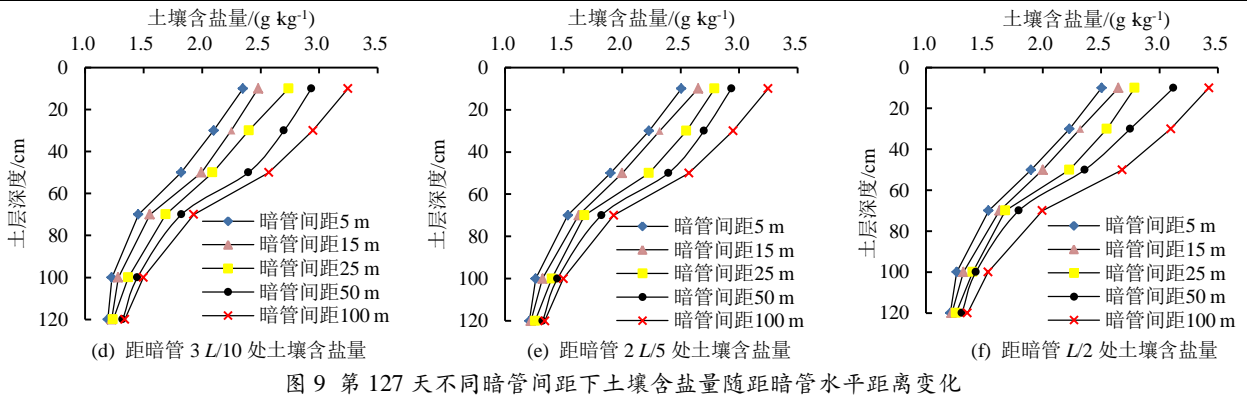


Fig.9 Variation of soil salinity with horizontal distance under different subsurface pipe spacing on day 127

2.4 暗管埋深对土壤剖面水盐时空分布的影响

2.4.1 土壤剖面含水率

暗管间距 25 m 时，不同时期不同暗管埋深下 0~120 cm 土层土壤含水率变化如图 10 和图 11 所示。从时间上看，整个生育期内，不同处理的土壤剖面含水率整体呈下降趋势，整个土壤剖面含水率在不同暗管埋深处理间的差异也随时间推进逐渐减小，暗管埋深 0.6 m 处理与暗管埋深 2.5 m 处理的土壤剖面含水率差异在生育期开始时为 7.69%，生育期结束时为 0.12%。排水初期上层差异较大，与暗管埋深 0.6 m 处理相比，暗管埋深 2.5 m 处理表层含水率降低 7.69%。排水第 25~第 127 天，不同暗管埋深处理间土壤剖面含水率差异主要在 70~120 cm 处显现，与暗管埋深 0.6 m 处理相比，暗管埋深 2.5 m 处理的下层土壤平均含水率降低 4.35%。

从空间上看，不同暗管埋深下土壤含水率空间分布差异明显，土壤剖面含水率与暗管埋深负相关。第 5 天，与暗管埋深 0.6 m 处理相比，暗管埋深 2.5 m 处理土壤剖面平均含水率降低 4.55%。在水平方向，排

水初期随距暗管水平距离的增加不同暗管埋深处处理间土壤含水率差异逐渐减小，暗管埋深 0.6 m 处理与埋深 2.5 m 处理土壤剖面平均含水率差异从暗管处的 7.69% 减小到距暗管 L/2 处的 4.95%。垂直方向，随着土层深度的增加，土壤剖面含水率均呈先增大后减小的规律，排水初期 50 cm 土层土壤含水率最大，达到 0.45 cm³/cm³，之后土壤含水率在 70 cm 土层最大，达到 0.39 cm³/cm³。

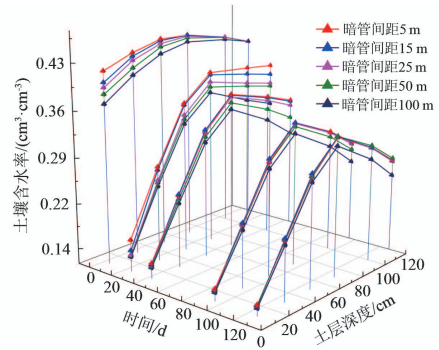


图 10 不同暗管埋深下各土层土壤含水率随时间变化
Fig.10 Variation of soil water content under different soil layer with time under different buried depths of subsurface pipes

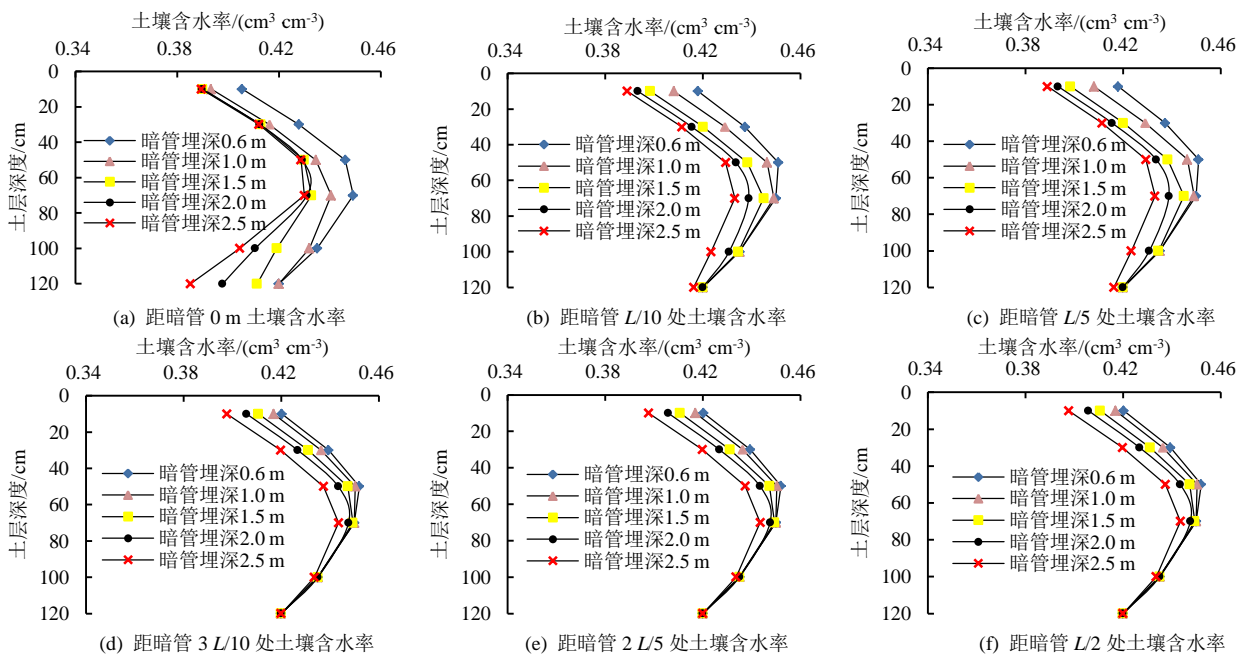


图 11 第 5 天不同暗管埋深下土壤含水率随距暗管水平距离变化

Fig.11 Soil water content varies with horizontal distance under different buried depths of subsurface pipe on day 5

2.4.2 土壤剖面含盐量

暗管间距 25 m 时, 不同时期不同暗管埋深下 0~120 cm 土层土壤含盐量变化如图 12 和图 13 所示。从时间上看, 整个生育期内, 不同暗管埋深处理土壤剖面含盐量整体呈上升趋势, 不同土层土壤含盐量在不同暗管埋深间的差异也随时间推进逐渐增加; 随着作物生育进程推进, 暗管埋深 0.6 m 处理与暗管埋深 2.5 m 处理土壤剖面平均含盐量差异最大达到 50.39%, 且各暗管埋深处理间土壤含盐量差异均呈上层大于下层的规律。第 127 天成熟时, 距暗管 $L/2$ 处埋深 2.5、0.6 m 处理暗管的上层土壤含盐量差异比下层大 33.92%。

从空间上看, 不同暗管埋深下土壤含盐量空间分布在非排水期差异明显。土壤剖面含盐量与暗管埋深负相关, 第 127 天, 与暗管埋深 0.6 m 处理相比, 暗管埋深 2.5 m 处理土壤剖面平均含盐量降低 23.53%。非排水期, 水平方向上, 随着距暗管水平距离的增加土壤剖面含盐量均值增加, 不同暗管埋深处理间土壤

剖面含盐量差异越大。第 127 天, 暗管埋深 0.6 m 处理与暗管埋深 2.5 m 处理土壤剖面平均含盐量差异从暗管处的 30.56% 增加到距暗管 $L/2$ 处的 50.39%。垂直方向上, 土壤剖面含盐量随土层深度的增加而减小, 且不同暗管埋深下土壤上层 (0~50 cm) 含盐量之间的差异大于土壤下层 (50~120 cm)。

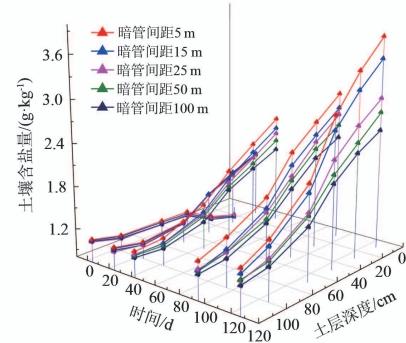


图 12 不同暗管埋深下各土层土壤含盐量随时间变化

Fig.12 Variation of soil salinity under different soil layer with time under different subsurface pipe burial depths

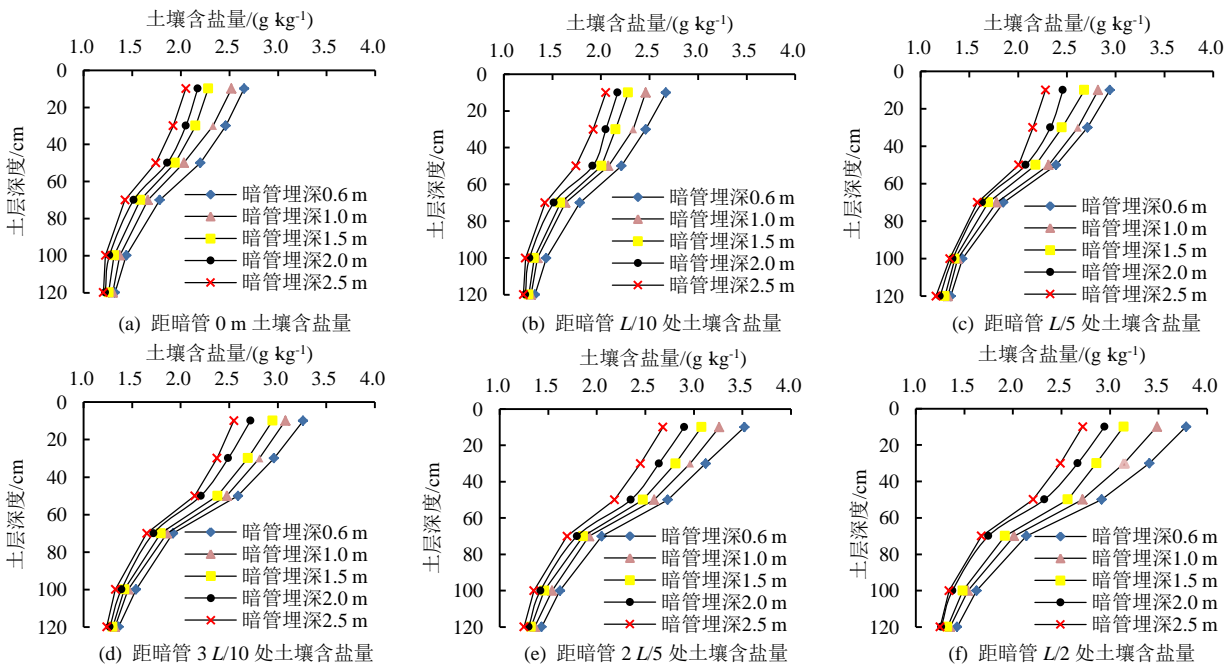


图 13 第 127 天不同暗管埋深下土壤含盐量随距暗管水平距离变化

Fig.13 The salt content of soil under different buried depths of subsurface pipe varied with horizontal distance on day 127

3 讨论

3.1 暗管间距和暗管埋深对排水排盐的影响

暗管排水可以排出农田多余的水分, 抑制地下水位的抬升^[17], 也可以排出土壤中过高的盐分, 改良盐渍化土壤^[18]。暗管间距和暗管埋深作为暗管排水 2 个重要的布设参数, 对农田排水和排盐具有显著影响^[6]。本研究发现, 农田排水量和排盐量与暗管间距成反比, 暗管埋深 1.5 m 下暗管间距从 100 m 减至 5 m 但排水总量增长了 4.96 倍, 排盐总量增长了

5.06 倍; 农田排水量和排盐量与暗管埋深成正比, 暗管间距 25 m 下埋深从 0.6 m 增至 2.5 m 排水总量增长了 64.24 倍, 排盐总量增长了 60.08 倍。这与张金龙等^[19]的研究结论相一致。暗管间距较小时, 灌溉水入渗强度较大, 排水排盐效率也较高; 另一方面暗管间距较小时土壤水盐的运移距离缩短, 更易随暗管排出^[7], 所以暗管间距越小, 排水量和排盐量越大。暗管埋深较大时, 水分在土壤中运移时间较长, 经暗管排出时带出较多的盐分, 所以排水排盐量大。王振华等^[8]通过滴灌淋洗试验发现, 排水时间与暗管间距

成正比, 土壤脱盐淋洗效率与暗管间距成反比, 暗管间距 15、20、25 m 小区分别持续排水 76、78、84 h。与王振华等^[8]研究相比, 本试验排水历时较长, 一方面可能是因为本文的土壤质地和灌溉方式与其不同, 且本文灌溉量较大; 另一方面在相同暗管间距下, 本研究暗管埋深较深, 排水排盐量较多, 所以排水持续时间较长。因此, 进行农田暗管排水试验时应采用较小的暗管间距和较大的暗管布设深度。

3.2 暗管间距和暗管埋深对土壤水盐空间变化的影响

在空间上不同暗管间距和暗管埋深下土壤剖面含水率和含盐量均有明显差异。在水平方向上, 排水初期(第 5 天)暗管处土壤剖面含水率较小, 在 $0.38\sim 0.44\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间。这可能是因为暗管处水动力较强, 水分向暗管处运移速度较快, 造成了土壤剖面含水率较小^[20]。非排水期土壤剖面含盐量与暗管水平距离成正比, 且随着水平距离的增加, 不同暗管间距和暗管埋深处土壤剖面含盐量差异也越大, 土壤剖面含盐量差异随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小。距暗管水平距离越远, 暗管控制效果越差, 土壤水分入渗速度慢, 盐分淋洗效果差, 盐分向暗管处运移的时间也较长^[21]。

从垂直方向上看, 土壤含水率随土层深度增加呈先增大后减小的“镰刀”状变化。排水初期土壤含水率在 50 cm 土层深度处最大, 排水末期及之后最大值下移至 70 cm 土层深度处。与本研究结果不同, 石培君等^[22]通过滴灌试验发现, 不同暗管间距下的土壤含水率均随土层深度增加而增大, 在 80 cm 土层内土壤含水率几乎接近饱和状态。造成这种差异的原因可能是漫灌与滴灌模式下湿润锋的运移不同, 漫灌易产生某土层含水率较高的湿润峰。灌水后上层水分向下层土壤运移, 而下层水分又向暗管处运移导致土层 50~70 cm 处土壤含水率较大。排水初期土壤含盐量随土层深度的增加而增大且不受暗管间距和暗管埋深的变化影响, 非排水期土壤含盐量随土层深度的增加而减小, 土壤含盐量降幅随暗管间距减小和暗管埋深增加而减小。排水初期由于刚灌溉完土壤剖面盐分得到了充分淋洗导致土壤含盐量较小, 在 $0.6\sim 1.2\text{ g/kg}$ 之间; 而非排水期间灌溉水分入渗完毕后, 在蒸发的作用下土壤剖面盐分逐渐向表层聚集出现返盐现象^[23], 导致土壤含盐量较大, 土壤表层含盐量高达 4.0 g/kg 。

3.3 暗管间距和暗管埋深对土壤水盐时间变化的影响

众多学者研究反映了不同暗管间距和暗管埋深对土壤水盐空间分布的影响^[20-23], 但土壤水盐在不同暗管间距和暗管埋深下时间上的差异研究鲜有涉及。而本研究发现, 不同暗管间距和暗管埋深下土壤剖面水盐分布随时间变化差异显著。不同暗管间距和暗管

埋深下的土壤含水率差异在排水期随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小, 土壤含水率降幅随时间推进而减小, 排水初期上层土壤含水率降幅较大, 排水末期下层土壤含水率降幅较大, 非排水期间无明显差异。排水初期土壤剖面含水率迅速增大, 不同暗管间距和暗管埋深下土壤水动力强度不同造成了上层土壤含水率差异大^[20], 排水末期水分已完全入渗, 此时水分均向暗管处运移造成了下层的土壤含水率差异较大^[24], 随时间推进蒸发蒸腾作用效果增强, 土壤剖面含水率逐渐下降, 不同暗管间距和暗管埋深处处理间的含水率差异也逐渐减小。与土壤剖面含水率的时间变化相反, 土壤剖面含盐量在整个生育期内随时间的增加而增大, 不同暗管间距和暗管埋深下的土壤含盐量差异在非排水期随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小, 土壤含盐量降幅随时间增加而增大, 且上层降幅大于下层, 排水期间差异不明显。这是由于本试验采用大水漫灌灌水量较大, 灌溉后土壤盐分得到了充分淋洗导致排水期间不同暗管间距和暗管埋深处处理间的土壤含盐量之间无明显差异且数值较小, 而随着时间推进蒸发强度也增大, 土壤下层盐分在毛管力的作用下向上迁移导致土壤含盐量逐渐增大且上层含盐量之间的差异也逐渐增大^[25]。

综上可知, 不同暗管间距和暗管埋深处处理间的土壤含水率和含盐量差异变幅均随暗管间距增大和暗管埋深减小而增大, 暗管间距越大, 排水排盐效果相对较差, 暗管排出的水盐较少, 更多的水分保留在田间, 所以导致暗管间距越大土壤剖面含水率和含盐量越大^[20], 土壤含水率和含盐量的变幅也与暗管间距成正比。因此, 减小暗管间距可以提高淋洗效果, 降低土壤剖面含盐量。暗管埋深较大时, 水分在土壤剖面滞留的时间较长, 土壤盐分得到了充分淋洗; 土壤排水量较大, 导致暗管埋深大时土壤剖面含水率和含盐量较小。另一方面是因为暗管埋深大时, 地下水位较高, 导致蒸发作用减弱, 土壤剖面含盐量减小^[26], 所以不同暗管埋深处处理间的土壤含水率和含盐量变幅随暗管埋深增大而减小^[27]。本文通过情景模拟还发现, 暗管间距 50 m 处理与暗管间距 100 m 处理之间的土壤含水率差异变幅较小, 仅为 0.23%, 说明暗管间距超过一定阈值时, 对土壤含水率的影响并不明显。暗管埋深 0.6 m 处理与暗管埋深 1.0 m 处理之间土壤含水率差异变幅较小, 仅为 0.29%, 说明暗管埋深小于一定深度时, 对土壤含水率影响也不显著。因此, 综合考虑不同暗管间距和暗管埋深对土壤剖面水盐分布情况及排水排盐情况的影响, 结合田间实际施工成本, 初步认为暗管间距在 15~50 m, 埋深在 1.0~2.0 m 范围内作为河套灌区的暗管排水布设参数较为合适。

4 结论

1) 累积排水量、累积排盐量与暗管间距成反比,与暗管埋深成正比。各暗管间距和暗管埋深下的累积排水排盐量在排水初期均呈爆发式增长,随后达稳定状态直至排水停止。

2) 土壤剖面含水率在排水期随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小,土壤剖面含水率降幅随时间增加而减小。排水初期上层土壤含水率降幅大,排水末期下层土壤含水率降幅大。土壤含盐量在非排水期随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小,土壤含盐量降幅随时间增加而增大,上层土壤含盐量降幅大于下层。

3) 水平方向土壤含水率差异不明显,土壤含盐量在非排水期随暗管水平距离的增加而增大。垂直方向,排水初期土壤含水率随土层深度增加呈先增大后减小的趋势,土壤含水率变幅随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小,排水末期及之后土壤含水率最大值下移且变幅减小;排水初期土壤含盐量随土层深度的增加而增大且不受暗管间距和暗管埋深影响,非排水期随土层深度的增加而减小,土壤含盐量变幅随暗管间距减小和暗管埋深增大而减小。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- 郑久瑜, 赵西宁, 操信春, 等. 河套灌区农业水土资源时空匹配格局研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 132-136.
ZHENG Jiuyu, ZHAO Xi'ning, CAO Xinchun, et al. Study on spatiotemporal matching pattern of agricultural water and land resources in Hetao Irrigation District[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 132-136.
- REN D Y, XU X, HAO Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River Basin: Application to maize, sunflower and watermelon[J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122-139.
- 张义强, 王瑞萍, 白巧燕. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化发展变化及治理效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 118-122.
ZHANG Yiqiang, WANG Ruiping, BAI Qiaoyan. Development and change of soil salinization in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 118-122.
- 史海滨, 吴迪, 闫建文, 等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 318-331.
SHI Haibin, WU Di, YAN Jianwen, et al. Spatial-temporal variation of soil salinity after water saving transformation in salinized irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 318-331.
- 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.
- QIAN Y Z, 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: 106-115.
- 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 602-609.
ZHOU Liying, LI Ruiping, MIAO Qingfeng, et al. Effects of underground drainage pipe spacing on salt and alkali characteristics and fertility of heavy saline soil in Hetao Irrigation Area[J]. Soils, 2021, 53(3): 602-609.
- 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 253-261.
- 张洁, 常婷婷, 邵孝侯. 暗管排水对大棚土壤次生盐渍化改良及番茄产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 81-86.
ZHANG Jie, CHANG Tingting, SHAO Xiaohou. Improvement effect of subsurface drainage on secondary salinization of greenhouse soil and tomato yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 81-86.
- 迟碧璇, 史海滨, 许迪, 等. 控制暗管排水下土壤剖面水盐分布与变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 148-158.
CHI Bixuan, SHI Haibin, XU Di, et al. Distribution and variation of water and salt in soil profile under controlling subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 148-158.
- 徐存东, 赵志宏, 程慧, 等. 基于 HYDRUS-3D 的干旱区土壤沟灌模式水盐运移模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 134-141.
XU Cundong, ZHAO Zhihong, CHENG Hui, et al. HYDRUS-3D-based simulation of water and salt transport in arid land soil under furrow irrigation patterns[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 134-141.
- 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 221-228.
LIU Qianqian, SU Litan, LIU Guangming, et al. Spatio-temporal variation and migration mechanism of soil salinity in Chanan irrigation area of Ili[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 221-228.
- 毛俊, 伍靖伟, 刘雅文, 等. 盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响试验及数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 62-69.
MAO Jun, WU Jingwei, LIU Yawen, et al. Effects of salt content on evaporation from seasonally frozen soil: Experimental measurement and numerical simulations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 62-69.
- CREVOISIER D, POPOVA Z, MAILHOL J C, et al. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 354-366.
- MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- 史海滨, 郭珈玮, 周慧, 等. 灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 268-278.
SHI Haibin, GUO Jiawei, ZHOU Hui, et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 268-278.
- 石佳, 田军仓, 朱磊. 暗管排水对油葵地土壤脱盐及水分生产效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 46-50.
SHI Jia, TIAN Juncang, ZHU Lei. Effects of subsurface pipe drain on soil desalination and water use efficiency of oil sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(11): 46-50.
- RITZEMA H P. Drain for Gain: Managing salinity in irrigated lands—a review[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 18-28.
- 张金龙, 张清, 王振宇, 等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 85-89.
ZHANG Jinlong, ZHANG Qing, WANG Zhenyu, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 85-89.
- 迟碧璇. 河套灌区控制暗管排水条件下土壤水盐运移特征及模拟

- 研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- CHI Bixuan. Study on the characteristics and simulation of soil water and salt transportation under controlling subsurface drainage in Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [21] YOUNGS E G, LEEDS-HARRISON P B. Improving efficiency of desalinization with subsurface drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(6): 375-380.
- [22] 石培君, 刘洪光, 何新林, 等. 基于 HYDRUS 模型的暗管排水水盐运移模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 224-231.
- SHI Peijun, LIU Hongguang, HE Xinlin, et al. The simulation of water and salt transportation undersubsurface drainage by HYDRUS model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 224-231.
- [23] 刘璐瑶, 张金龙, 张凯, 等. 基于 HYDRUS-2D 模拟排水暗管布设参数对土壤水盐运移的影响[J]. 人民珠江, 2021, 42(4): 70-77.
- LIU Luyao, ZHANG Jinlong, ZHANG Kai, et al. Effect of the subsurface drain parameters on water-salt transport based on HYDRUS-2D[J]. Pearl River, 2021, 42(4): 70-77.
- [24] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 暗管排水条件下春灌定额对土壤水盐运移规律的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 318-328.
- DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effects of spring irrigation quotas on soil water and salt transport under condition of subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 318-328.
- [25] 周宏, 赵文智. 荒漠区包气带土壤物理特征及其对地下水毛管上升影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2 999-3 009.
- ZHOU Hong, ZHAO Wenzhi. Soil physical characteristics of shallow vadose zone and modeling its effects on upward capillary rise of groundwater in an arid-desert area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2 999-3 009.
- [26] 苏挺. 红旗农场土壤盐渍化状况调查及不同埋深暗管排盐效果研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017.
- SU Ting. Investigation of soil salinization status of Hongqi farm and study on salt removal effect of buried pipe with different buried depth[D]. Alaer: Tarim University, 2017.
- [27] 衡通. 暗管排水对滴灌农田水盐分布的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- HENG Tong. Influence of pipe drainage on water and salt distribution in drip irrigation farmland[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.

Effects of Spacing and Depth of Subsurface Drain on Water and Salt Transport in the Field

ZHANG Li^{1,3}, JIAO Pingjin², DONG Qin'ge^{1,3,4*}, TAO Yuan²

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Conservancy, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Objective】Subsurface drains are commonly used in drainage system. This paper investigates the effect of their spacing and depth on water movement and salt transport in field soil under flood irrigation in Hetao Irrigation District. 【Method】The study was based on data measured from a field, which were used to calibrate the HYDRAS-2D model. The validated model was then used to predict spatiotemporal changes in water flow and salt transport when the drain depth was 1.5m by varying the drain spacing from 5 to 100 m, and when the drain spacing was 25 m by varying the drain depth from 0.6 to 2.5 m. 【Result】①The model is accurate for simulating both water flow and salt transport, with the coefficient of determination R^2 for soil profile moisture and salinity being 0.81 and 0.71, the *RMSE* error being 0.038 and 0.026, and the Nash coefficient *NSE* being 0.93 and 0.86, respectively. ②The cumulative displacement and salt discharge increased with the decrease in drain spacing and the increase in drain depth. When the drain depth was 1.5 m, decreasing drain spacing from 100m to 5m increased total drainage by 4.96 times and increased the salt discharge by 5.06 times. When drain spacing was 25 m, increasing drain depth from 0.6 m to 2.5 m increased the total drainage by 64.24 times, and the total salt discharge by 60.08 times. ③The water content in the soil profile decreased with the decrease in drain spacing and drain depth during the drainage period, and the decrease decreased as time elapsed. The salt content in the soil profile decreased with the decrease in drain spacing and depth in non-drainage period, and the decrease increased as time elapsed. ④Horizontally, salt content in the soil increased with the increase in the distance from the drain in non-drainage period, and the increase decreased with an decrease in drain spacing and an increase in drain depth. When drain depth was 1.5 m, the difference in soil salinity between the drain spacing 5 m and 100 m increased from 26.67% in the region proximal to the drains to 39.88% in the middle of the drains. When the drain spacing was 25 m, the difference in soil salinity between the drain depth 0.6 m and 2.5 m increased from 30.56% in the region adjacent to the drain to 50.39% in the middle of the drains. Vertically, soil water content varied in a “sickle” shape with the increase in soil depth. The initial drainage of salt increased with the increase in drain depth, while in non-drainage period it decreased with the increase in drain depth. 【Conclusion】Reducing drain spacing or increasing drain depth can improve the drainage and salt discharge, thereby reducing water storage in soil profile during drainage period and soil salt content during non-drainage period. Our results suggested that the optimal drain spacing was 15~50 m and the drain depth was 1.0~2.0 m for Hetao irrigation district.

Key words: subsurface pipe drainage; water and salt transport; subsurface pipe spacing; subsurface pipe buried deep; HYDRUS-2D

责任编辑: 白芳芳