doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.032

引黄灌区播前土壤水盐含量和向日葵出苗率对不同春灌模式的响应机制

李仙岳[1]　甄致新[1]　王　军[2]　佟长福[2]　何　锐[2]　郭淑豪[1]

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020)

摘要:在北方盐渍化灌区,春灌能明显提高土壤水分并降低土壤盐分,然而传统春灌定额较大,春灌时间难以确定,故优化春灌模式(定额和时间)对于提高农业用水效率和生产力具有重要意义。本研究于 2022—2023 年在内蒙古自治区鄂尔多斯市黄河南岸灌区设置 135 mm 和 180 mm(W1、W2)2 个春灌定额水平,以及播前 18 d、播前 12 d 和播前 6 d(T1、T2、T3)3 个灌水时间,共 6 个处理的田间试验以及 2 个春灌定额室内入渗试验,研究春灌定额和时间对土壤入渗以及向日葵出苗率的影响,并基于 HYDRUS 模型探索不同处理下播前土壤水盐动态变化,向日葵播前水盐与不同春灌模式的关系。结果表明,春灌定额越高,湿润锋运移距离与累计入渗量越大,通过构建向日葵出苗率与播前土壤水盐含量定量关系,得出最优含水率(SWC)和电导率(EC)分别为 0.254 cm^3/cm^3 和 0.683 dS/m,利用 HYDRUS 模型对不同春灌模式水盐运移进行模拟,结果显示 HYDRUS 模型能较好模拟春灌有压入渗和重分布阶段的水盐动态,在验证期,SWC 均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、平均相对误差(MRE)平均值分别为 0.02 cm^3/cm^3、0.96、7.7%,EC 分别为 0.32 dS/m、0.90 和 9.9%。相同春灌定额下,越早春灌,播前 EC 越高、SWC 越低,与播前 18 d 春灌处理相比,推后春灌 6 d 和 12 d 处理,播前耕层(0~30 cm)2 年平均 EC 降低 10.1% 和 16.8%,平均 SWC 提高 3.4% 和 6.2%。在相同春灌时间下,与低春灌定额(W1)相比,高春灌定额(W2)在播前耕层 2 年平均 EC 降低 13.4%,平均 SWC 提高 4.5%。基于 HYDRUS 模型情景分析灌溉定额 90~315 mm、播前 3~18 d 不同春灌模式下的播前土壤水盐含量,并利用最优 SWC 和 EC 进行寻优,得出该地区适宜春灌模式:春灌定额为 180 mm、春灌时间为播前 18 d 和春灌定额为 135 mm、春灌时间为播前 15 d,该研究结果可为黄河流域盐渍化灌区农业节水以及农业生产提供理论支撑。

关键词:春灌定额和时间;水盐动态;向日葵出苗率;HYDRUS 模型;引黄灌区

中图分类号:S274.1;S275.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)02-0333-11　　**OSID**:

Response Mechanisms of Pre-sowing Soil Water and Salt Content and Sunflower Germination Rate in Yellow River Irrigation District to Different Spring Irrigation Patterns

LI Xianyue[1]　ZHEN Zhixin[1]　WANG Jun[2]　TONG Changfu[2]　HE Rui[2]　GUO Shuhao[1]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*
2. *Institute of Pastoral Water Resources Science*, *Ministry of Water Resources*, *Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: In northern saline-affected irrigation districts, spring irrigation significantly increases soil moisture and reduces soil salinity. However, traditional spring irrigation quotas are relatively high, and the optimal timing for spring irrigation is difficult to determine. Therefore, optimizing spring irrigation patterns (quotas and timing) is crucial for enhancing agricultural water use efficiency and productivity. The research was conducted in the irrigation district south of the Yellow River in Ordos City, Inner Mongolia, during 2022—2023. Two spring irrigation quota levels (135 mm and 180 mm, denoted as W1 and W2) were established, along with three irrigation timing points: 18 days before sowing (T1), 12 days before sowing (T2), and 6 days before sowing (T3), totaling six treatments. Additionally, two

收稿日期:2024-09-30　修回日期:2024-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(U24A20179)、"科技兴蒙"行动重点专项(2021EEDSCXSFQZD011)、内蒙古自然科学基金项目(2023MS05002)、内蒙古自治区教育专项资金项目(2025)、内蒙古自治区科技计划项目(2025KYPT0099、2025KYPT0091)、自治区一流科研项目(YLXKZX-NND-022)和内蒙古高校科研业务费项目(BR251028)

作者简介:李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究,E-mail:lixianyue80@126.com

indoor infiltration experiments were conducted to examine the effects of spring irrigation quotas and timing on soil infiltration and sunflower emergence rates. Using the HYDRUS model, the pre-sowing soil water-salt dynamics under different treatments and the relationship between pre-sowing water-salt conditions and various spring irrigation patterns were explored. It was found that higher spring irrigation quotas resulted in greater wetting front migration distances and cumulative infiltration volumes. By establishing a quantitative relationship between sunflower emergence rate and pre-sowing soil water-salt content, the optimal soil water content (SWC) and electrical conductivity (EC) were determined to be 0.254 cm^3/cm^3 and 0.683 dS/m, respectively. The HYDRUS model was employed to simulate water-salt transport under different spring irrigation patterns. Results indicated that the HYDRUS model effectively simulated water and salt dynamics during the pressurized infiltration and redistribution phases of spring irrigation. During the validation period, the root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), and mean relative error (MRE) for SWC averaged 0.02 cm^3/cm^3, 0.96, and 7.7%, respectively, while corresponding values for EC were 0.32 dS/m, 0.90, and 9.9%. Under identical spring irrigation quotas, earlier irrigation resulted in higher pre-sowing EC and lower SWC. Compared with the 18 days pre-sowing irrigation treatment, delaying irrigation by 6 days and 12 days reduced the 2-year average EC in the tillage layer (0 ~ 30 cm) by 10.1% and 16.8%, respectively, while increasing the average SWC by 3.4% and 6.2%. Under identical spring irrigation timing, compared with the low spring irrigation quota (W1), the high spring irrigation quota (W2) reduced the 2-year average pre-sowing EC in the plow layer by 13.4% and increased the average SWC by 4.5%. Based on HYDRUS model scenario analysis of pre-sowing soil water and salt content under spring irrigation regimes with irrigation quotas ranging from 90 mm to 315 mm and timing from 3 days to 18 days before sowing, optimization was conducted using optimal SWC and EC values. The optimal spring irrigation regime for this region was determined as follows: spring irrigation quota of 180 mm with timing 18 days before sowing, or spring irrigation quota of 135 mm with timing 15 days before sowing. These findings can provide theoretical support for agricultural water conservation and production in saline-affected irrigation areas of the Yellow River Basin.

Key words: spring irrigation quotas and timing; water-salt dynamics; sunflower germination rate; HYDRUS model; Yellow River diversion irrigation area

0 引言

播前灌溉是盐渍化地区农业生产中的重要环节,主要分冬灌和春灌 2 种方式。其中冬灌主要是利用前一年冬季闲置的水资源进行灌溉压盐保墒[1],在引黄灌区,特别是河套灌区被大规模采用,该方式对盐渍化地区种植玉米具有重要作用[2]。然而冬灌后离播种时间较长,往往需要较大灌水定额才能达到压盐保墒效果,另外引黄灌区无法同时保障对大型灌区灌溉水源供给。故当种植生育期较短的作物时,利用春灌代替冬灌,不仅能缓解灌区冬季短时间内大规模输水难题,也能减少灌水量和节约水资源[3]。目前春灌技术已在盐渍化地区进行了大规模推广,如春灌占河套灌区全年灌溉定额的 13%左右[4]。然而,在水资源进一步短缺的背景下,传统春灌定额仍然较大,且适宜的春灌时间难以确定,过早春灌会导致土壤水分过度消耗,造成播种时土壤含水率低与土壤返盐,而过晚春灌又会导致土壤过湿、压盐不充分,无法进行机械播种。因此揭示土壤水盐动态对不同春灌定额和时间响应对于优化春灌模式,提高农业水利用效率和作物出苗率具有重要意义。

目前,有关春灌的研究主要集中在不同春灌定额对土壤水分、温度、盐分以及脱盐率等的影响,也有部分学者对春灌时间进行了分析。徐鑫等[5]研究了不同程度盐渍化土壤水盐时空分布特征,发现春灌对灌区土壤盐分有较好淋洗效果,但过早或过晚灌水都会减弱土壤脱盐效果。孙珍珍等[6]分析田间试验结果后,得出春灌定额为 1 800 m^3/hm^2 时脱盐效果较好,春灌定额过小达不到淋洗标准,过大会抬高地下水位造成盐分上升;林栋等[7]利用 SHAW 模型对南疆地区棉田休闲期土壤水热盐运移进行模拟,指出只进行春灌下,2 250 m^3/hm^2 造墒模式能够满足棉花出苗要求;杨鹏年等[8]针对不同盐渍化土壤开展不同定额的春灌试验,指出非盐渍化或轻度盐渍化土壤可采用滴灌出苗等小定额春灌模式;高福奎等[9]通过探究不同春灌策略下滴灌棉田生育期适宜灌溉淋洗定额发现,滴水春灌 90 mm 模式下,灌水定额推荐为 45 mm,全生育期灌水 10 次,可以获得合理的盐分分布与脱盐效果。窦旭等[10]认为在传统春灌定额(2 250 m^3/hm^2)的基础上减少 10%并采用暗管排水,能实现控盐、节水、稳产目的。

除了春灌定额对播前土壤水盐有重要影响，实际春灌时间不同，播前水盐也会存在明显差异，春灌时间越早，播前土壤含水率越低且土壤含盐量越高，春灌时间过晚会造成土壤含水率过高无法出苗，因此春灌过早或过晚都会减弱土壤脱盐效果[5]。

尽管通过田间试验能揭示春灌定额和时间对播前水盐动态的影响，但其有耗时和工作量大的缺点，而通过模型能快速、低成本揭示灌水定额、时间与土壤水盐的关系[11]。例如，李瑞平等[12]利用 SHAW 模型模拟内蒙古河套灌区土壤冻融过程水、热、盐动态的基础上，优化了不同盐渍化农田合理的秋浇节水灌溉制度；有学者利用 HYDRUS 模型对不同灌水方式、不同土壤类型条件下水盐运移规律和盐分淋洗效率进行模拟，优化了生育期灌水定额和盐分淋洗定额[13]。其中 HYDRUS 模型由于具有友好的图形用户界面和灵活的边界条件处理能力已被广泛使用[14-16]。但目前利用 HYDRUS 模型针对不同春灌定额，特别是不同春灌时间处理下水盐动态的研究相对较少，现有 HYDRUS 模型模拟灌溉过程中也较少考虑有压动态入渗过程，从而导致灌后初期土壤水分入渗量不均匀。因此，本研究针对春灌定额和时间双因素，考虑上边界有压入渗和重分布，分析春灌至播前水盐分布以及脱盐率变化规律，并探索不同作物春灌模式对作物出苗率的影响，以及播前水盐动态与出苗率的关系，揭示播前水盐对春灌模式的响应机制，并优化该地区适宜的春灌模式，为引黄灌区农业水高效利用和土壤盐渍化防控提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2022—2023 年在内蒙古自治区鄂尔多斯市黄河南岸灌区达拉特旗东海心村节水试验站进行(40°29′32″N，109°52′46″E)，该地区属于典型温带大陆性气候，年平均气温为 6.7℃，全年日照时数达 2 206 h，年均降水量为 201 mm，年均蒸发量却高达 2 516 mm；该地区属于季节性冻土区，无霜期为 135～150 d，在 4 月中下旬至 5 月上旬冻层通融。试验区 0～100 cm 土层平均土壤容重为 1.43 g/cm^3，土壤质地为黏壤土和壤土(表 1)，地下水位常年较浅，在 1.25～1.4 m 之间。

1.2　试验处理

考虑春灌定额和春灌时间 2 个因素，其中春灌定额设置 2 个水平，分别为 W1、W2(75% 当地春灌定额：135 mm；当地春灌定额：180 mm)；春灌时间设置 3 个水平，分别为 T1、T2 和 T3(播前 18 d、播前 12 d、播前 6 d)，共有 6 个处理，3 次重复，共 18 个小区，具体见表 2。春灌形式采用畦灌，利用水表控制水量，每个小区面积为 6 m×9 m。小区和小区之间用田埂划分，田埂中间铺设塑料，避免田间侧向渗漏。2022 年和 2023 年研究区向日葵春灌时间分别为 5 月 19 日和 5 月 14 日，播种时间分别为 6 月 13 日和 6 月 8 日。另取试验区土样运回内蒙古农业大学土壤实验室，试验用土为黏壤土和壤土，将土壤进行风干、碾压，再用孔径 2 mm 滤筛进行筛分，过筛后混合均匀备用。根据试验区土壤容重，按照每层 5 cm 取相应质量进行填装，层间打毛(图 1)。土柱填装完成后，土表覆盖滤纸，静置 48 h。调整马氏瓶高度，春灌定额 135 mm 和 180 mm 等比例缩小后分别对应压力水头为 3.4 cm 和 4.5 cm，开始入渗试验。试验按照由密到疏，记录湿润锋位置及通过马氏瓶读取累计入渗量。

表 1　土壤质地

Tab. 1　Soil texture

土层深度/cm	土壤粒径占比/%			田间持水量/(cm^3·cm^{-3})	土壤容重/(g·cm^{-3})	土壤质地
	黏粒	粉粒	砂粒			
0～20	38.3	38.4	23.3	0.27	1.44	黏壤土
20～40	37.2	38.9	23.9	0.29	1.45	黏壤土
40～60	23.7	41.1	35.2	0.33	1.43	壤土
60～80	19.6	44.3	36.1	0.33	1.42	壤土
80～100	14.6	47.5	37.9	0.33	1.40	壤土

表 2　试验处理

Tab. 2　Experimental treatment

试验处理	春灌定额/mm	灌水时间
W1T1	135	播前 18 d
W1T2	135	播前 12 d
W1T3	135	播前 6 d
W2T1	180	播前 18 d
W2T2	180	播前 12 d
W2T3	180	播前 6 d

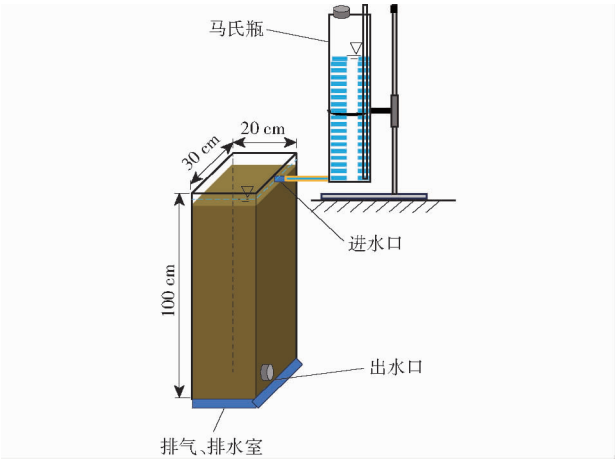

图 1　入渗试验装置

Fig. 1　Infiltration test device

1.3 观测指标

1.3.1 气象数据

在试验农田中间安装自动气象站(Hobo U30 型,Onset Computer Inc.,美国),监测指标包括空气湿度和温度、太阳总辐射、风速、降雨量,每 5 min 测量 1 次,每 1 h 记录 1 次,逐时存储到数据储存器中。参考作物蒸散发(ET_0)采用 Penman-Monteith 方程[17]计算,其中,2022、2023 年春灌到播前 ET_0 和分别为 164.6 mm 和 216.9 mm(图 2)。

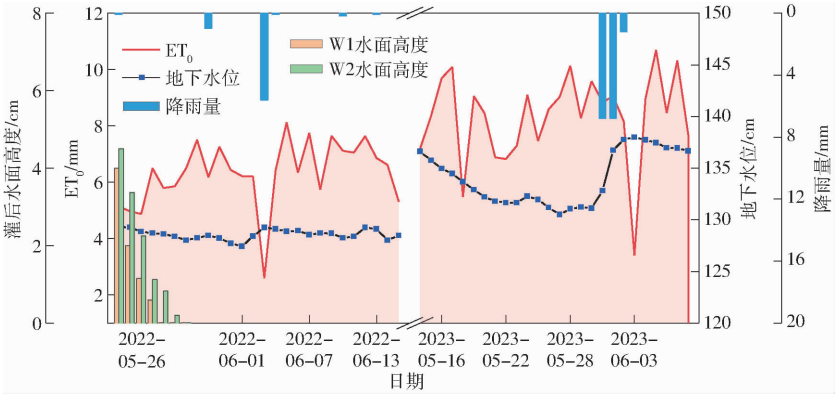

图 2 试验区 ET_0、降雨量、灌后水面高度和地下水位

Fig. 2 ET_0, rainfall and water surface height after irrigation and groundwater level in test area

1.3.2 土壤含水率和电导率

在每个小区中间安装智能墒情监测仪(IPH, TRIME-PICO,德国),用于监测土壤水盐含量,在春灌到播前每 3 d 在监测仪周边人工取样,对监测仪数据进行校准,取样深度为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm。将取回土样分为 2 部分,一部分利用烘干法测土壤含水率(Soil water content,SWC),另一部分干燥后按土水质量比 1∶5 配置溶液,使用雷磁电导率仪(DDS-11A 型,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定土壤样品电导率(EC,dS/m)。同时利用烘干残渣法测得水溶性盐质量(SC),其中 SC 和 EC 拟合关系式为 $SC = 5.2EC + 0.0624$($R^2 = 0.95$)。

1.3.3 灌后水层深度

灌前在每个小区设置 3 个水尺用于测量灌后水层深度变化,每天早中晚各测量一次,取平均值。

1.3.4 地下水位

在试验场中心位置设地下水位观测井,并安装水位传感器(Hobo U20 型,Onset Computer Inc.,美国),5 min 采集 1 次数据(图 2),定期对数据进行手动验证并测量地下水中矿化度和 EC。

(5)出苗率

播种 15 d 后在每个试验区中取 3 个 1 m×1 m 正方形网格,计算正方形网格中的播种数量和正常出苗数量,出苗率为出苗株数占总播种粒数百分比。

1.3.5 土壤入渗率

土壤入渗率 f(也称入渗速率)是指单位时间内单位面积土壤入渗水量,计算公式为

$$f = \frac{\Delta V}{A\Delta t} \tag{1}$$

式中 A——入渗面积,m^2

ΔV——Δt 时间内入渗水量,m^3

Δt——测量入渗水量时间间隔,h

1.3.6 土壤淋盐率

土壤淋盐率是单位时间内盐分降低百分比,计算式为

$$DR = \frac{EC_{i-1} - EC_i}{EC_{i-1}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 DR——土壤淋盐率,%

EC_{i-1}、EC_i——初始、末时土壤电导率,dS/m

1.4 HYDRUS 模型初始和边界条件

2022—2023 年实测地下水位最大值为 143 cm,考虑到地下水补给,故将建模域设置为深 150 cm 和宽 50 cm 长方形区域。春灌后农田积水深度随着时间降低,因此将整个上边界设为变水头边界和大气边界。下边界采用变水头边界[18-19]。2 个侧边界被指定为“无通量”边界条件(图 3),初始条件根据实测值设置。

1.5 评价指标

采用均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)以及决定系数(R^2)3 个指标[20],评价模型模拟精度,并基于单因素 ANOVA 的 Duncan 进行方差分析,利用 Excel 2019、SPSS 对数据进行整理和分析,利用 Origin 2021 绘图。其中,RMSE 与 MRE 表示模拟值与实测值间的误差,值越小表示模拟误差越小;R^2 表示模型拟合精度,数值在 0~1 之间,模拟精度越高,越趋近于 1。

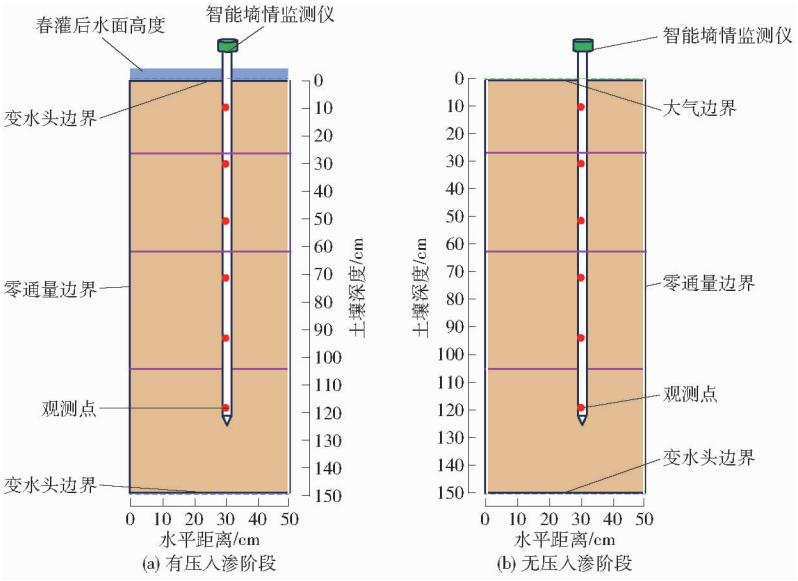

图 3　模拟区域及边界条件

Fig. 3　Simulation area and boundary conditions

2　结果分析

2.1　不同春灌模式对入渗特征的影响

湿润锋运移距离与累计入渗率受不同春灌定额的影响明显(图 4)。在相同入渗时间条件下,湿润锋运移距离会随着春灌定额的增大而显著增加。例如,在入渗 10 h 时,W1 和 W2 处理湿润锋运移距离分别为 21.9、27.2 cm,相较于 W1 处理,W2 处理提高 19.5%。此时,W1 和 W2 入渗率分别为 1.63、2.03 cm/h,W2 入渗率比 W1 提高 19.4%。此外,当湿润锋运移距离达到 45 cm 时,W1 和 W2 所需时间分别为 48、30 h。这表明,随着灌溉定额增加,湿润锋运移速度也在增加。在整个入渗时间段内,累计入渗量随着压力水头的增大而持续增加。到入渗结束时,W1 和 W2 累计入渗量分别达 40.5、46.8 cm,W2 累计入渗量为 W1 的 1.2 倍。在此阶段,W1 和 W2 入渗率分别为 0.56、0.65 cm/h,相同入渗时间内,压力水头越大即春灌定额越大,具有更多克服土壤颗粒间的阻力,累计入渗量越大,在实际农田生产活动中能将表层盐分淋洗的距离也越深。

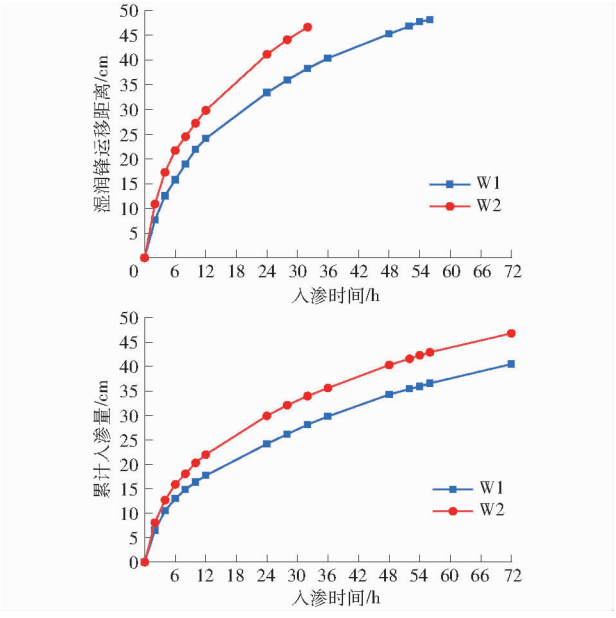

图 4　不同春灌定额对入渗特征的影响

Fig. 4　Effects of different spring irrigation depths on infiltration characteristics

2.2　不同春灌模式对出苗率的影响

在 2 年试验相同春灌时间下,高春灌定额在播种前 15 d 对向日葵出苗率具有促进作用,但在播种前 6 ~ 12 d 具有抑制作用。由表 3 可知,W2 处理春灌定额在 T1、T2、T3 的出苗率分别比 W1 各处理增加 1.7%、降低 0.9% 和降低 1.6%。相对应地,推迟春灌时间也会对向日葵出苗产生抑制作用,两年中,W1T2 处理出苗率最高,其次是 W2T1 处理,而

表 3　不同处理播前 0 ~ 30 cm EC 和 SWC 与出苗率

Tab. 3　EC and SWC at 0 ~ 30 cm before sowing and germination rates in different treatments

年份	处理	播前 SWC/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	播前 EC/($dS \cdot m^{-1}$)	出苗率/%
2022	W1T1	0.247 ± 0.003	0.932 ± 0.004	86.6 ± 1.00
	W1T2	0.258 ± 0.004	0.839 ± 0.013	87.6 ± 1.30
	W1T3	0.280 ± 0.003	0.787 ± 0.011	86.5 ± 0.08
	W2T1	0.270 ± 0.003	0.731 ± 0.015	87.7 ± 1.30
	W2T2	0.274 ± 0.006	0.666 ± 0.013	86.7 ± 0.08
	W2T3	0.280 ± 0.003	0.628 ± 0.014	84.9 ± 1.20
2023	W1T1	0.255 ± 0.003	0.939 ± 0.044	84.4 ± 0.09
	W1T2	0.263 ± 0.003	0.831 ± 0.015	86.7 ± 1.10
	W1T3	0.269 ± 0.002	0.765 ± 0.025	84.1 ± 1.40
	W2T1	0.267 ± 0.003	0.772 ± 0.015	86.6 ± 1.40
	W2T2	0.267 ± 0.004	0.667 ± 0.014	85.1 ± 2.10
	W2T3	0.271 ± 0.003	0.628 ± 0.012	84.8 ± 1.30

W1T1 和 W1T3 处理平均出苗率比 W1T2 低 1.7% 和 1.9%，W2T2 和 W2T3 处理平均出苗率比 W2T1 低 1.3% 和 2.3%。春灌定额与春灌时间对出苗率的影响与当地气候有一定关系，2023 蒸发量较 2022 年增加 52 mm，相同灌水定额和时间下，2023 年各处理平均出苗率比 2022 年低 1.6%。将出苗率与播前 0～30 cm 土层的 EC 和 SWC 进行相关性分析，结果如表 4 所示，在 2022、2023 年中，各处理向日葵出苗率与播前 EC 呈显著负相关（$P<0.05$），随着 EC 增加，向日葵出苗率逐渐减小；向日葵出苗率与播前 SWC 呈显著正相关（$P<0.05$），随着 SWC 增加，向日葵出苗率逐渐增加。

表 4 不同处理出苗率与 EC 和 SWC 的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between germination rates and EC and SWC in different treatments

指标	2022 年出苗率					
	W1T1	W1T2	W1T3	W2T1	W2T2	W2T3
播前 EC	−0.997*	−0.997*	−0.998*	−0.998*	−0.997*	−0.997*
播前 SWC	0.999*	0.997*	0.998*	0.999*	0.999*	0.999*
指标	2023 年出苗率					
	W1T1	W1T2	W1T3	W2T1	W2T2	W2T3
播前 EC	−0.998*	−0.997*	−0.998*	−0.998*	−0.998*	−0.997*
播前 SWC	0.999*	0.999*	0.997*	0.999*	0.998*	0.998*

注：* 表示显著相关（$P<0.05$）。

两年中，不同处理播前土壤水盐含量也不同，根据表 3 建立播前水盐含量与出苗率的二元二次回归方程（x_1 为播前 SWC 和 x_2 为播前 EC），出苗率回归方程为

$$y=-109.8x_1^2-0.6x_2^2-10.1x_1x_2+66.2x_1+3.4x_2-0.45 \quad (3)$$

经检验，决定系数 R^2 为 0.63，能较好反映出苗率随播前土壤水盐含量的变化过程。

对式（3）求偏导，得到偏微分方程

$$\frac{\partial y}{\partial x_1}=-219.6x_1-10.1x_2+66.2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2}=-1.2x_2-10.1x_1+3.4 \quad (5)$$

同时通过求解方程，令 2 个偏导数等于 0，得到 $x_1=0.254$，$x_2=0.683$，即向日葵最大出苗率对应的播前 SWC 和 EC 分别为 0.254 cm^3/cm^3 和 0.683 dS/m 时，向日葵出苗率最大。

2.3 模型率定与验证

由于本试验中设置灌水量和灌水时间较少，无法全面得出不同春灌模式下向日葵播前水盐的动态变化，利用 HYDRUS 模型模拟不同春灌模式下土壤水盐含量以及播前 EC 和 SWC。模拟分别使用 2022 年和 2023 年观测数据进行率定及验证，结果如图 5 所示。结果表明，HYDRUS 模型能较好地模拟不同春灌条件下的土壤水盐动态。在率定期（2022 年），不同灌溉处理下 SWC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.02 cm^3/cm^3、0.97、7.3%，EC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.29 dS/m、0.97、9.1%。在验证期（2023 年），不同灌溉处理下 SWC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.02 cm^3/cm^3、0.96、7.7%。EC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.32 dS/m、0.90 和 9.9%，故基于 HYDRUS 模型构建的不同春灌模式模拟模型可用于水盐运移模拟，满足要求。率定后的土壤水力参数见表 5[21-22]。

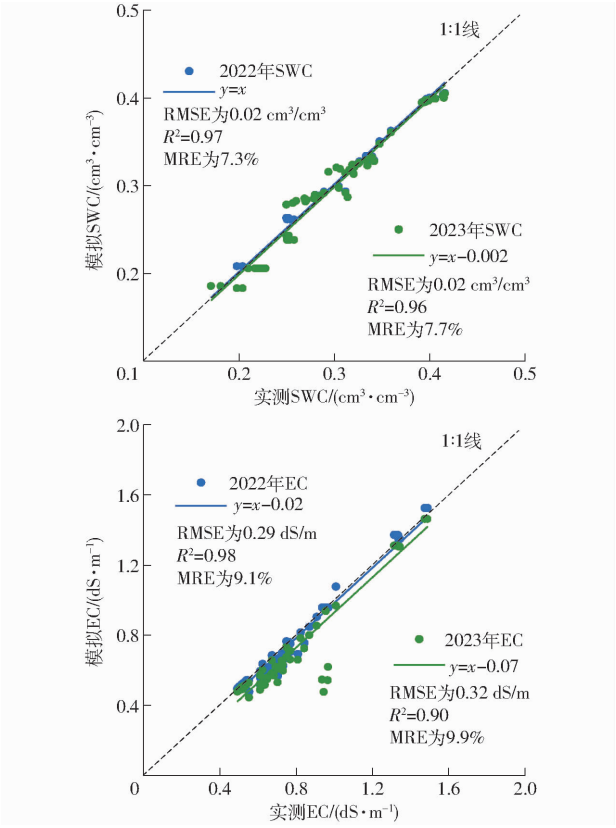

图 5 模型验证与率定结果

Fig. 5 Model validation and calibration results

表 5 土壤水力参数

Tab. 5 Soil hydraulic parameters

参数	土层深度/cm		
	0～30	30～60	60～100
残余含水率/($cm^3\cdot cm^{-3}$)	0.030	0.048	0.048
饱和含水率/($cm^3\cdot cm^{-3}$)	0.38	0.46	0.48
形状系数/cm^{-1}	0.013	0.024	0.019
经验参数	1.2	1.3	1.4
饱和导水率/($cm\cdot d^{-1}$)	13.15	24.96	24.96
纵向弥散性/cm	30	30	30
横向弥散性/cm	3	3	3

2.4 不同春灌模式对土壤水盐的影响

不同春灌模式处理后 0～100 cm 土层土壤水分在春灌-播种阶段变化明显，在播种-出苗阶段变化

不明显。高春灌定额在灌后春灌-播种阶段能更明显提高 0 ~ 30 cm 土层 SWC。从图 6 可看出，在春灌有压入渗阶段，0 ~ 30 cm 土层 SWC 在春灌后快速增加到饱和并持续饱和，高春灌定额比低春灌定额多持续 1 d。在 2 个年份中，灌后 SWC 与春灌定额呈正比，高春灌定额各处理播前 SWC 比低春灌定额各处理高 0.02、0.03、0.02 cm^3/cm^3，相较于低春灌定额，高春灌定额在春灌后 3 ~ 6 d SWC 增加 0.1 ~ 0.3 cm^3/cm^3。随着时间推移，播种 10 d 后灌水量对含水率影响逐渐减弱。春灌处理在一定程度上能减少蒸发，推迟春灌越久，SWC 越大，W1T3 和 W1T2 平均 SWC 比 W1T1 高 0.02、0.01 cm^3/cm^3；W2T3 和 W2T2 平均 SWC 比 W2T1 高 0.04、0.02 cm^3/cm^3，即春灌推迟 6 d 和 12 d 处理的 SWC 较播前 18 d 提高 3.4% 和 6.2%。30 ~ 60 cm 土层 SWC 在春灌后的变化基本上与 0 ~ 30 cm 一致，而 60 ~ 100 cm 土层 SWC 基本不受影响。相同灌水时间下，春灌定额越大，0 ~ 30 cm SWC 增大越明显，W2 处理 SWC 较 W1 提高 4.5%。将农机不可耕作区[23]作为含水率上限，对播前含水率进行限制，发现 W1T3、W2T2、W3T3 处理播前含水率均处于农机不可耕作区。

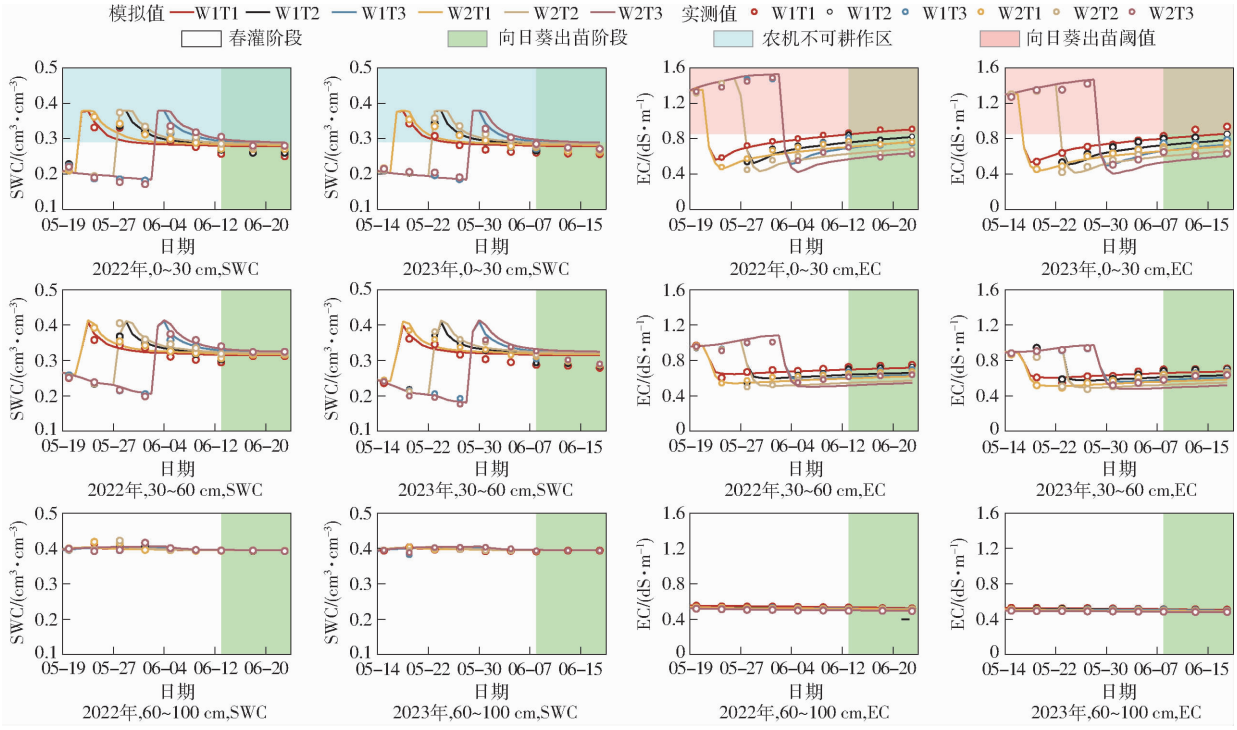

图 6　不同春灌模式下水盐含量动态变化曲线

Fig. 6　Water-salt dynamics curves under different spring irrigation patterns

按照 EC 变化趋势将整个土层分为 0 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm，0 ~ 60 cm EC 受到灌水定额影响较大。进行春灌后，0 ~ 60 cm 土壤盐分在有压入渗阶段快速降低，春灌后随着时间推移表现为先降低后增加。研究结果表明高春灌定额对盐分的淋洗能力优于低春灌定额处理，2022 年高春灌定额处理播前 EC 比低春灌定额处理的低 0.05 ~ 0.07 dS/m。在 2023 年，高春灌定额处理播前 EC 比低春灌定额处理低 0.07 ~ 0.08 dS/m，2 年平均降低 13.4%。推迟春灌处理也能增加播前 EC 降低幅度，推迟春灌越多播前 EC 越低，2022 年 W1T3 和 W1T2 播前平均 EC 较 W1T1 低 0.07、0.02 dS/m；W2T3 和 W2T2 播前 EC 比 W2T1 低 0.05、0.03 dS/m。2023 年 W1T3 和 W1T2 播前平均 EC 比 W1T1 低 0.06、0.02 dS/m；W2T3 和 W2T2 播前平均 EC 比 W2T1 低 0.08、0.03 dS/m，2 年平均降低 10.1% 和 16.8%。随着春灌定额增加和春灌时间推移，播前 EC 均表现为减小趋势，这说明增大灌水定额和在一定范围内推迟春灌处理都会降低土壤 EC。2 年间，60 ~ 100 cm EC 受春灌影响不明显。为进一步明确春灌模式对土壤盐分的作用效果，利用出苗阈值（向日葵苗期的出苗阈值）[24]对向日葵适宜春灌模式进行评价。2022 年和 2023 年 W1T1 处理土壤含盐量高于向日葵出苗含盐量阈值，其余各处理均低于向日葵出苗含盐量阈值，满足向日葵正常生长。

2.5　基于出苗率的春灌模式优化

利用 HYDRUS 模型对不同春灌模式（春灌定额为 90 ~ 315 mm、春灌时间为播前 3 ~ 18 d）进行模拟，结果如图 7 所示。随着春灌定额增加和春灌时间推迟，播前 SWC 表现为逐渐增加趋势，播前 EC

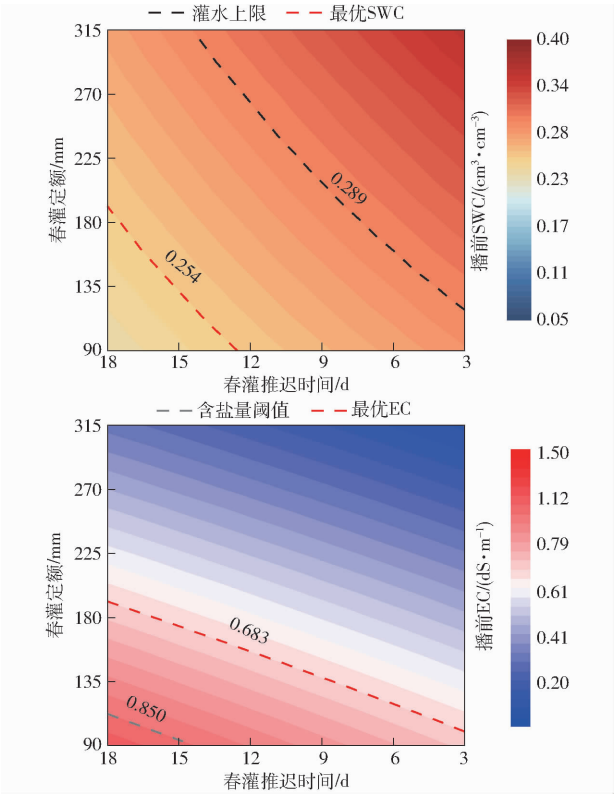

图 7 不同春灌模式下播前 0 ~ 30 cm 土壤水盐含量变化

Fig. 7 Changes in soil water-salinity content from 0 ~ 30 cm before sowing under different spring irrigation modes

表现为逐渐降低趋势,在春灌定额 315 mm 和播前 3 d 时达到极值。模拟结果显示,每增加春灌定额 45 mm,土壤 SWC 增加 0.01 ~ 0.02 cm^3/cm^3,土壤 EC 降低 0.13 ~ 0.15 dS/m;每推迟 3 d 春灌,土壤 SWC 增加 0.01 ~ 0.02 cm^3/cm^3,土壤 EC 降低 0.05 ~ 0.06 dS/m。无论是增加春灌定额还是推迟春灌时间,对播前 SWC 的影响相对较小,但增加春灌定额对播前土壤 EC 的影响大于推迟春灌的影响,增加春灌定额的脱盐率大于推迟春灌定额的脱盐率。基于田间试验得到播前水盐含量与出苗率定量关系解得的最优解,其对应的 SWC 和 EC 分别为 0.254 cm^3/cm^3 和 0.683 dS/m,另根据文献[23]可知农机在 SWC 超过一定值时无法耕作,即农机耕作上限,将农机耕作上限作为含水率上限,以 70% 田间持水量(本田间试验区为 0.20 cm^3/cm^3)作为灌水下限,土壤含水率都在该区间内,故不做考虑。同时,当播前土壤含盐量超过一定数值时,向日葵幼苗无法正常发芽,即向日葵出苗含盐量阈值[24],将该阈值作为 EC 上限。以 SWC 为标准可得到 19 个春灌模式,以 EC 为标准可得到 9 个春灌模式,由上文得到向日葵出苗率最大时对应的 SWC 和 EC,并将其设置为最优水盐含量。利用最优水盐含量对情景模拟进行寻优,其中方案 1 春灌定额为 180 mm、春灌时间为播前 18 d 和方案 2 春灌定额为 135 mm、春灌时间为播前 15 d 最接近最优 SWC 和 EC,方案 1 和方案 2 可作为优化后结果。具体实施可跟根据当地春灌供水量和供水时间选择。

3 讨论

3.1 不同春灌模式对土壤水盐运移的影响

在北方干旱、半干旱区盐渍化向日葵农田中,春灌是一种可以降低表层(0 ~ 30 cm)土壤含盐量,保持土壤墒情的措施[25-26]。本试验中,2 年间春灌后土壤含水率急剧增加,0 ~ 30 cm 表层在春灌-播种时间段内受到蒸发影响导致 SWC 减小,春灌定额越大,表层 SWC 在播种前越大,甚至达到或超过田间持水量,这一研究与高福奎等[9]、陈小芹等[27]的研究结果一致。随着春灌定额升高,30 ~ 100 cm 土层 SWC 也达到较高水平,且在春灌定额 135、180 mm 下,0 ~ 100 cm 土层 SWC 在 0.24 ~ 0.4 cm^3/cm^3,超过田间持水量。但春灌定额并非越高越好,大春灌定额会造成过量深层渗漏、水资源浪费,引起土壤中养分流失严重、破坏土壤结构、引起地下水位抬高和地下水污染等问题[28]。春灌推迟后,受到的土壤蒸发量减少,该处理的表层 SWC 高于春灌不推迟处理。另外,春灌定额 135 mm 推迟 6 d 后 0 ~ 30 cm 土层 SWC 与春灌定额 180 mm 不推迟的 SWC 相近,且 0 ~ 100 cm 土层含水率均达到田间持水量或超过田间持水量。另外,本研究中 2022 年和 2023 年蒸发强度不同,造成相同灌水定额的土壤表层(0 ~ 30 cm 土层)SWC 在 2 年间有所差异,这与钟哲等[29]的研究相似,蒸发强度会影响土壤灌溉后表层 SWC。

土壤盐分变化与水分运移密切相关,灌溉后盐分溶于水并向水平和垂直方向移动,最终淋洗至深层[30]。一般研究认为,土壤淋盐率、淋盐深度和水分渗漏与灌溉水量呈正相关,灌水定额越大,留在主根区的盐分越少。本研究中,设置 2 个春灌定额入渗试验,相对于低春灌定额,高春灌定额处理的湿润锋在 20 h 运移距离高 19.5%,而其入渗率提高 19.4%,到入渗试验结束时,W2 累计入渗量是 W1 的 1.2 倍,这与薛万来等[31]的研究相似。有压入渗阶段淋盐速度会随着春灌后水面高度增加而增加,而高春灌处理的 0 ~ 30 cm 土壤淋盐率比低春灌处理平均高 8.2% ~ 8.7%,这与王瑞萍等[32]的研究相似。也有研究表明增加或减少灌溉定额会增加作物主根区的土壤盐分,本研究由于设置灌溉定额数量较少,未能发现主根区盐分有增大现象。本研究设置 2 个春灌定额以及 3 个春灌时间,春灌推迟处理较未推迟处理土壤含盐量低 0.02 ~ 0.07 dS/m,该种情况是由于土壤水分受到提供的上升力后携带盐

分向上运动，造成土壤盐分滞留在 0 ~ 30 cm 土层中，推迟春灌降低了春灌-播种期间蒸发强度，减少春灌后 0 ~ 30 cm 土层中滞留盐分。这一研究结果与宋仁友等[33]相似，推迟春灌时间能降低土壤中含盐量。推迟春灌太久，会造成深层土壤含盐量增加，生育期受到蒸发作用后会带动土壤盐分向上迁移，聚集在作物根系活动层中[34]。

土壤水分是控制盐分运移的主要因素，灌水定额直接影响土壤中的盐分分布[35]，其中土壤灌溉脱盐量可作为衡量春灌灌溉效果的评价指标。在本研究设置的灌溉范围内，土壤脱盐量随着春灌定额增加呈增大趋势，这与李瑞平等[36]研究的冬灌脱盐结论相似。但王峰等[37]研究认为，增加灌水定额虽然可以增加盐分淋洗量，但同时也会带来较强的农田蒸散发，带动下层盐分向上迁移，使作物根系活动层出现积盐，这与本研究结果不一致，可能是本研究灌溉水量设置较少，没有达到下层盐分向上迁移临界点。

3.2　不同水盐含量对出苗率的影响

本研究发现，不同春灌定额的适宜推迟时间也不同，春灌推迟时间较大会造成 0 ~ 30 cm 土层的氧气缺失和含水率增加，作物种子无法发芽；春灌推迟时间较短，无法减弱土壤蒸发，导致 0 ~ 30 cm 土层盐分无法淋洗，抑制作物发芽，当春灌推迟时间过长会造成 30 ~ 100 cm 土壤盐分向 0 ~ 30 cm 运移，增加表层土壤盐分[38]。作为评价农田灌水效果的标准之一，出苗率能直接体现土壤水盐对向日葵幼苗的影响[39]。水分是种子萌发的首要条件，播种后向日葵种子萌发出苗所需的水分主要来自 0 ~ 20 cm 土层，且适宜含水率为田间持水量的 65% ~ 70%[40]。薛昌颖等[41]研究发现，对于作物幼苗来说，土壤含水率并非是越高越好，当达到一定量时作物出苗率开始降低。本研究也有相似发现，在蒸发较弱年份，向日葵出苗率在春灌定额为 135 mm 时达到最大。而在蒸发较强年份，向日葵出苗率在春灌定额为 180 mm 或者春灌推迟 3d 时相近，达到最大值。这是由于作物发芽出苗适宜的水分、盐分、温度和氧气无法满足向日葵生长。本研究发现，出苗率随着春灌定额和推迟灌溉时间的增加呈先增大后降低趋势，这是由于当春灌定额过高时，土壤空隙中的空气被排出，造成土壤根区空气较少，抑制作物生长。同时发现推迟灌溉时间产生的影响与增加灌水量产生的影响具有相似性，均会降低土壤含盐量、增加土壤含水率，其中增加灌水量产生的效果优于推迟灌溉时间。

4　结论

（1）播前土壤含水率过高和过低都会降低向日葵出苗率，定量分析播前水盐含量与向日葵出苗率关系，得到最优 SWC 和 EC 为 0.254 cm^3/cm^3 和 0.683 dS/m。

（2）使用 HYDRUS 模型分别对 2022 年和 2023 年观测到的土壤含水率和土壤含盐量数据进行了校准和验证。在验证期，不同灌溉处理下 SWC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.02 cm^3/cm^3、0.96、7.7%，EC 的 RMSE、R^2、MRE 平均值分别为 0.32 dS/m、0.90 和 9.9%，验证期的准确度符合标准要求，即 HYDRUS 模型可用于不同春灌模式下水盐运移模拟。

（3）春灌定额越大，湿润锋运移距离与累计入渗量越大，土壤保墒效果越好，土壤盐分淋洗效果越明显。模拟结果显示，每增加春灌定额 45 mm，土壤 SWC 增加 0.01 ~ 0.02 cm^3/cm^3，土壤 EC 降低 0.13 ~ 0.15 dS/m；每推迟 3 d 春灌，土壤 SWC 增加 0.01 ~ 0.02 cm^3/cm^3，土壤 EC 降低 0.05 ~ 0.06 dS/m。

（4）利用 HYDRUS 模型分析得到黄河南岸灌区适宜春灌模式：春灌定额为 180 mm、春灌时间为播前 18 d 和春灌定额为 135 mm、春灌时间为播前 15 d。

参　考　文　献

[1] 林栋，黄茜，许尊秋，等. 基于 SHAW 模型的南疆典型灌区适宜盐分淋洗定额空间分布[J]. 农业工程学报，2023，39(1)：70 - 80.
LIN Dong, HUANG Xi, XU Zunqiu, et al. Spatial distribution characteristics of the suitable salt leaching quota in typical irrigation areas of southern Xinjiang based on SHAW model[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 70 - 80. (in Chinese)

[2] 李勇，李林，王峰，等. 我国北方盐碱地区冬春灌盐分淋洗研究进展[J]. 中国农村水利水电，2022(11)：71 - 76，82.
LI Yong, LI Lin, WANG Feng, et al. Progress in research on the salt leaching of winter and spring irrigation of North China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(11): 71 - 76, 82. (in Chinese)

[3] 刘祖汀，王丽萍，屈忠义，等. 引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报，2022，41(2)：101 - 108.
LIU Zuting, WANG Liping, QU Zhongyi, et al. The changes in depth and physicochemical properties of groundwater in saline-slkali sreas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 101 - 108. (in Chinese)

[4] 于茹，宋佳珅，张宏媛，等. 秸秆隔层结合春灌对河套灌区盐碱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 中国农业科学，2023，56(12)：2341 - 2353.
YU Ru, SONG Jiashen, ZHANG Hongyuan, et al. Effects of straw interlayer combined with spring irrigation on saline alkali soil

respiration and its temperature sensitivity in Hetao irrigation district[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(12):2341 - 2353. (in Chinese)

[5] 徐鑫,张金珠,李宝珠,等.不同盐度土壤水盐时空分布特征及对棉花出苗的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2022,40(2):204 - 212.
XU Xin, ZHANG Jinzhu, LI Baozhu, et al. Response characteristics and numerical simulation of soil water and saltdynamics in different salinized cotton seedling stage to submembrane drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2022,40(2):204 - 212. (in Chinese)

[6] 孙珍珍,岳春芳.非生育期春灌灌水量对土壤盐分变化的影响[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):237 - 240.
SUN Zhenzhen, YUE Chunfang. Effect of spring irrigation in non growth period on variation of soil salinity[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015,26(3):237 - 240. (in Chinese)

[7] 林栋,王峰,许尊秋,等.基于 SHAW 模型的南疆典型棉田适宜冬春灌盐分淋洗策略[J].农业机械学报,2023,54(1):326 - 338,350.
LIN Dong, WANG Feng, XU Zunqiu, et al. Appropriate winter and spring irrigations for salt leaching in typical cotton field of southern Xinjiang based on SHAW model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):326 - 338,350. (in Chinese)

[8] 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. (in Chinese)

[9] 高福奎,王璐,李小刚,等.不同灌溉制度对南疆棉田水盐分布及作物生长的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(1):54 - 63.
GAO Fukui, WANG Lu, LI Xiaogang, et al. Effects of spring irrigation on water and salt distribution in soil and cotton growth in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(1):54 - 63. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

[11] CHEN N, LI X, ŠIMŮNEK J, et al. Evaluating soil salts dynamics under biodegradable film mulching with different disintegration rates in an arid region with shallow and saline groundwater: experimental and modeling study[J]. Geoderma, 2022, 423: 115969.

[12] 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 A, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 31 - 36. (in Chinese)

[13] 余根坚,黄介生,高占义.基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J].水利学报,2013,44(7):826 - 834.
YU Genjian, HUANG Jiesheng, GAO Zhanyi. Study on water and salt transportation of different irrigation modes by the simulation of HYDRUS model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 826 - 834. (in Chinese)

[14] YANG T, ŠIMŮNEK J, MO M, et al. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS - 1D and - 2D simulations[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104342.

[15] 肖姚,王珂,赵强,等.基于 HYDRUS - 2D 和 SHAW 模型联合模拟确定膜下滴灌农田秋浇定额[J].中国农村水利水电,2022(4):156 - 161.
XIAO Yao, WANG Ke, ZHAO Qiang, et al. The autumn irrigation quota of drip irrigation farmland under mulch[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4):156 - 161. (in Chinese)

[16] CHEN N, LI X, SHI H, et al. Modeling effects of biodegradable film mulching on evapotranspiration and crop yields in Inner Mongolia[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 107996.

[17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[J]. Fao, Rome, 1998, 300(9): D05109.

[18] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): vzj2016. 04. 0033.

[19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.

[20] CHEN N, LI X, ŠIMŮNEK J, et al. The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292: 106817.

[21] EL-FAKHARANY Z M, SALEM M G. Mitigating climate change impacts on irrigation water shortage using brackish groundwater and solar energy[J]. Energy Reports, 2021, 7: 608 - 621.

[22] ZHAO Y, LI 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.

[23] 李汝莘,高焕文,苏元升.土壤容重和含水量对耕作阻力的影响[J].农业工程学报,1998,14(1):86 - 90.
LI Ruxin, GAO Huanwen, SU Yuansheng. Effect of soil bulk density and moisture content on the draft resistance[J]. Transactions of the CASE, 1998, 14(1): 86 - 90. (in Chinese)

[24] 曾文治. 向日葵水、氮、盐耦合效应及其模拟[D].武汉:武汉大学,2018.
ZENG Wenzhi. Research and simulation for the coupling effects of water, nitrogen, and salt on sunflower[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

[25] LI P, REN L. Evaluating the saline water irrigation schemes using a distributed agro-hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125688.

[26] 郭山强,莫彦,吴忠东,等. 华北地区地下滴灌春玉米出苗及生长对沟播开沟深度的响应[J]. 灌溉排水学报,2021,40(8):27 - 34.
GUO Shanqiang, MO Yan, WU Zhongdong, et al. The effects of furrow depth in alternate row planting on germination and yield of spring maize under subsurface drip irrigation in North China Plain[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2021, 40(8):27 - 34. (in Chinese)

[27] 陈小芹,王振华,何新林,等. 北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(2):132 - 137.
CHEN Xiaoqin, WANG Zhenhua, HE Xinlin, et al. Effects of winter irrigation method on soil moisture, salt and temperature distribution in cotton fields of north Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(2):132 - 137. (in Chinese)

[28] 胡宏昌,田富强,张治,等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J]. 水利学报,2015,46(9):1037 - 1046.
HU Hongchang, TIAN Fuqiang, ZHANG Zhi, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(9):1037 - 1046. (in Chinese)

[29] 钟哲,贾志峰,王智,等. 干旱半干旱地区双垄地布覆盖对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(2):21 - 29.
ZHONG Zhe, JIA Zhifeng, WANG Zhi, et al. Effects of double ridge geotextile mulching on soil moisture in arid and semi-arid regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020,38(2):21 - 29. (in Chinese)

[30] 刘小强,张富仓,何帅,等. 基于整体差异组合模型评价的南疆盐碱化棉田滴灌淋洗量和淋洗时期研究[J]. 农业机械学报,2025,56(4):460 - 470.
LIU Xiaoqiang, ZHANG Fucang, HE Shuai, et al. Evaluation drip irrigation leaching amount and period based on overall difference model for salinized cotton fields in southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(4):460 - 470. (in Chinese)

[31] 薛万来,牛文全,罗春艳,等. 微润灌溉土壤湿润体运移模型研究[J]. 水土保持学报,2014,28(4):49 - 54.
XUE Wanlai, NIU Wenquan, LUO Chunyan, et al. Prediction model of wetted front migration distance under moistube-irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(4):49 - 54. (in Chinese)

[32] 王瑞萍,万核洋,陈帅,等. 河套灌区乌拉特灌域春季土壤盐碱化空间分布特征[J]. 农业工程学报,2021,37(15):105 - 113.
WANG Ruiping, WAN Heyang, CHEN Shuai, et al. Spatial distribution pattern of soil salinization in farmland of Wulate sub-irrigation areas in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia in spring[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15): 105 - 113. (in Chinese)

[33] 宋仁友,吕廷波,刘一凡,等. 春灌定额对不同盐碱度农田水盐分布影响研究[J]. 节水灌溉,2024(4):19 - 26.
SONG Renyou, LÜ Tingbo, LIU Yifan, et al. Study on the influence of spring irrigation quota on the water and salt distribution in different salinization farmlands[J]. Water Saving Irrigation, 2024(4):19 - 26. (in Chinese)

[34] 牟洪臣,虎胆·吐马尔白,苏里坦,等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2011,27(7):18 - 22.
MU Hongchen, HUDAN Tumaerbai, SU Litan, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 18 - 22. (in Chinese)

[35] 闫妍,史海滨,苗庆丰,等. 基于旱排控盐模型的沿黄灌区不同地类间水盐运移与平衡分析[J]. 农业机械学报,2024,55(10):346 - 359.
YAN Yan, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Water and salt transport pattern and balance analysis among different land classes in Yellow River irrigation area based on dry drainage salt control model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):346 - 359. (in Chinese)

[36] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报,2009,40(4):403 - 412.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO A, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(4):403 - 412. (in Chinese)

[37] 王峰,孙景生,刘祖贵,等. 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(12):120 - 127.
WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effect of different irrigation scheduling on salt distribution and leaching in cotton field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):120 - 127. (in Chinese)

[38] 姚宝林. 南疆免冬春灌棉田土壤水热盐时空迁移规律与调控研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
YAO Baolin. Study on rules and regulation of soil water-heat-salt spatiotemporal transfer under no winter and spring irrigation cotton field in Southern Xinjiang[D]. BeiJing: China Agricultural University,2017. (in Chinese)

[39] 李金刚,何平如,陈菁,等. 灌溉水盐度对玉米出苗、产量、品质及土壤盐分动态的影响[J]. 节水灌溉,2024(4):1 - 10.
LI Jinggang, HE Pingru, CHEN Jing, et al. The effects of irrigation water salinity on maize emergence, yield, quality and soil salt dynamics[J]. 2024(4):1 - 10. (in Chinese)

[40] 云文丽,贾成朕. 河套地区食用向日葵干旱等级指标研究[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(3):218 - 223.
YUN Wenli, JIA Chengzhen. Study on the drought classification index of edible sunflower in Hetao area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39(3):218 - 223. (in Chinese)

[41] 薛昌颖,刘荣花,马志红. 黄淮海地区夏玉米干旱等级划分[J]. 农业工程学报,2014,30(16):147 - 156.
XUE Changying, LIU Ronghua, MA Zhihong. Drought grade classification of summer maize in Huang - Huai - Hai area[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(16):147 - 156. (in Chinese)