

基于 HYDRUS-2D 的滨海地区膜下滴灌 土壤水盐运移模拟研究

马波^{1,2}, 周青云^{1,2}, 张宝忠^{2,3}, 王航¹, 尹林萍¹

(1.天津农学院水利工程学院,天津 300384;2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100083;
3.国家节水灌溉北京工程技术研究中心,北京 100083)

摘要:以春玉米‘郑单958’为供试作物,采用膜下滴灌灌水方式,设定两种不同灌水定额,分别是单次灌水定额20 mm和10 mm,测定试验区土壤水分、盐分含量,利用HYDRUS-2D模型对土壤水盐运移进行模拟,将模拟值与实测值进行对比分析,探究滨海地区盐碱化土壤水盐运移规律。结果表明:滴灌过程中,水平方向土壤盐分由膜下向膜边运移,膜下土壤淋洗效果好于膜边;竖直方向0~20 cm土壤水分、盐分变化幅度最大,土壤含盐量降低16.1%,淋洗效果明显;下层土壤盐分淋洗效果一般,土壤含盐量降低值仅为9.6%。土壤水分重分布过程中,0~20 cm土层土壤含水率和含盐量变化幅度比20~60 cm土层大。0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层高灌水定额(20 mm)处理对土壤盐分的抑制作用分别比低灌水定额(10 mm)处理高26%、11%、19%,并且高灌水定额滴灌将土壤盐分淋洗到60 cm土层以下,而低灌水定额滴灌未能将土壤盐分淋洗到60 cm土层以下。HYDRUS-2D模拟得到的土壤含水率与含盐量和实测值基本吻合,模型可靠。

关键词:水盐运移;模拟;膜下滴灌土壤;HYDRUS-2D模型;滨海地区

中图分类号:S156.4⁺² **文献标志码:**A

Simulation of soil water and salt transport under mulched drip irrigation based on HYDRUS Model in coastal area

MA Bo^{1,2}, ZHOU Qingyun^{1,2}, ZHANG Baozhong^{2,3}, WANG Hang¹, YIN Linping¹

(1. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China;

3. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100083, China)

Abstract: Spring maize ‘Zhengdan 958’ was used as the test material in the field experiment. Under mulched drip irrigation with 20 mm and 10 mm irrigation quotas, the contents of soil water and salt were determined. The simulations of soil water and salt transport were carried out by using the model of HYDRUS-2D in this study. By comparing the simulated values with the measured values, the laws of water and salt transport in salinized soil in coastal area were studied. The results showed that the soil salt moved from the middle of the film to the edge of the film in horizontal direction. Therefore, the effect of soil leaching in the center of film was better than that at the edge of film. The soil salt content of 0~20 cm was reduced by 16.1% in the vertical direction. The variation was the largest, and the leaching effect was obvious. The salt leaching effect of the subsoil was moderate, and the decrease in soil salt content was only 9.6%. In the process of soil water redistribution, the variation of soil water and salt contents in 0~20 cm soil layer was greater than that in 20~60 cm soil layer. The inhibition effect of high irrigation quota (20 mm) on soil salt in 0~20 cm, 20~40 cm, and 40~60 cm soil layers was 26%, 11%, and 19% higher than that in low irrigation quota (10 mm), respectively. Moreover, the soil salt was leached below 60 cm soil depth

under high quota drip irrigation, while the low quota drip irrigation failed to leach the soil salt below 60 cm. The simulated values of HYDRUS-2D were basically consistent with the measured values of soil water and salt content, and the model was reliable. The simulation results have certain guiding significance for the prevention and salinization control in coastal area with shallow groundwater.

Keywords: water and salt transport; simulation; soil under mulched drip irrigation; HYDRUS-2D model; coastal area

土地盐碱化是全球农业生产面临的一个严峻问题,不仅影响作物正常生长,还会造成大量土地退化,粮食减产^[1]。我国约有 $920.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 土地受到不同程度盐碱化危害^[2]。天津滨海地区土壤盐分主要来自海水,地势低洼、排水不畅、地下水埋深浅、矿化度高、水资源开发及利用不合理等因素导致该地区土壤盐碱化问题严重^[3]。膜下滴灌是将覆膜技术与滴灌技术结合起来开发利用盐碱地的灌溉技术,自推广以来取得显著效果^[4]。覆膜不仅可以有效减少植物棵间蒸发,实现植物根区土壤的增温保墒,而且能够减少土壤积盐^[5],改善植物生长环境,提高产量。滴灌具有小流量、高频率、能够直接将水分输送到植物根部进行灌溉的特点,较传统灌溉水分损失减少,利用滴头在植物根部形成的淡化湿润区实现精确灌溉,大大提高了农业用水效率,并且能够有效减少深层渗漏和次生盐渍化问题发生^[6]。

水是土壤脱盐的原动力,也是盐分运动的载体^[7],不合理的灌溉方式以及灌水定额都会影响土壤盐分的分布与运移。国内外许多学者对土壤水盐运移规律进行了深入研究,郑晓辉等^[8]对新疆干旱地区盐碱地不同灌水方式下水盐运移的研究发现,相比于沟灌、漫灌,滴灌是最节水的一种灌水方式,并且局部压盐效果最好。牟洪臣等^[9]基于田间实测数据,分析新疆干旱地区棉田土壤水盐运移规律得出,水平方向上滴头位置相较于膜边盐分累积较少,竖直方向上 0~20 cm 土层淋洗效果明显,而 20~60 cm 土层处于缓慢积盐状态,60 cm 以下土层盐分累积严重。汪志荣等^[10]对不同质地土壤滴灌研究发现,土壤湿润体体积与滴头流量、灌水量及土壤性质有关。利用室内试验,分析不同灌水定额(1.4、2.8、4.2 L)对土壤盐分的淋洗效果,李远等^[11]发现灌水量越大淋洗效果越好,湿润峰位置越低。HYDRUS 模型已被广泛运用于模拟土壤水盐运移过程。李显激等^[12]对新疆地区暗管排水、排盐条件的土壤水盐运移进行模拟研究发现,模拟值与实测值具较高精度。Chen 等^[13]利用 HYDRUS-2D 模型对咸水滴灌下土壤水盐运移进行模拟研究,验证了该

模型用于田间试验的可靠性。陆阳等^[14]对地下水浅埋区土壤水盐运移规律研究发现,滴灌可以有效减少宁夏银北灌区耕作层土壤积盐,控制地下水位。

上述研究主要针对西北干旱地区不同灌水量、灌水方式土壤水盐运移进行研究,且多偏重于微咸水灌溉及暗管排水研究,而针对北方滨海地区不同灌水定额的土壤水盐运移规律研究较少。本文针对滨海地区淤泥质盐渍土^[15]粘度大、地下水埋深较浅、矿化度较高等特点,通过田间试验研究不同灌水定额下的土壤水盐运移变化,并利用 HYDRUS-2D 模型对土壤水盐运移进行模拟,揭示滨海地下水浅埋区土壤水盐运移规律,以期为滨海地区制定合理的灌溉制度及盐碱地预防和治理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于天津市东南部的葛沽镇(117°38'E, 38°98'N),该地区属于海河流域下游海积与河流冲积形成的平原区,平均海拔为 3 m,地下水埋深约为 1 m,矿化度为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,土壤为淤泥质盐渍土,pH 值为 8.4。该区属暖温带季风型大陆性气候,四季分明,夏季炎热多雨,七月份温度达到最高,平均气温 26~28℃,多年平均年降雨量为 556.4 mm,6—8 月降雨较多,占全年降雨的 75%,多年平均蒸发量为 1 809.6 mm^[16]。

1.2 试验设计

试验以春玉米(郑丹 958)为研究对象,试验地面积 50.0 m × 9.3 m,设置两个不同灌水定额处理(FI₂₀和 FI₁₀),每个处理设置 3 个重复,每个重复小区面积为 8.3 m × 9.3 m,其中 FI₂₀处理单次灌水定额为 20 mm,FI₁₀处理单次灌水定额为 10 mm。种植方式为一膜两管两行等间距平作,行距 60 cm,株距 30 cm。灌溉方式为膜下滴灌,滴灌带间距为 60 cm,滴头间距为 30 cm,滴头布置在玉米茎秆处,滴头流量 $1.38 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。覆膜方式为半覆膜,膜宽 80 cm。在行距方向上布置 2 个取样点,分别位于距离玉米茎秆 15 cm 和 30 cm 处,分别记做 1 号取样点和 2 号

取样点,共 12 个取样点,试验地布置如图 1 所示。2017 年和 2018 年试验期间分别进行了 3 次灌水,灌水日期分别是 2017 年 6 月 10 日、6 月 15 日和 7 月 10 日,2018 年 6 月 1 日、6 月 22 日和 7 月 6 日,试验土样的采集在灌水后的 1~2 d。单点滴灌属于三维水分运动问题,垂直平面上,土壤水分沿滴头所在平面两侧呈对称分布,行距方向的两滴头中间位置形成零通量面,故可以将滴灌问题简化成中心对称的二维水分运动问题^[17]。试验地设置暗管排水设施,可将地下水位控制在 100 cm 处,故取玉米左右行距一半,选择 60 cm × 100 cm 典型区域进行模拟计算,如图 2 所示。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤水分、盐分及土壤水分特征曲线 土壤含水率:将 60 cm 深度土层划分为 0~20、20~40、40~60 cm 3 层,利用试验前埋在土壤中的 PR2 管原位测定玉米根区各层土壤含水率,并用烘干法对土壤含水率进行率定。

土壤含盐量:土壤样品自然风干,过 2 mm 筛,将处理后土壤样品按土:水比例 1:5 混合,振荡、

过滤,利用 DDS-307 型电导率仪测定浸提液电导率,换算得土壤含盐量。

土壤水分特征曲线:挖土壤剖面,用环刀取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 土壤,通过日系 R11D2 高速恒温冷冻离心机测定土壤吸力与含水率的关系,绘制土壤水分特征曲线。

1.3.2 玉米根系分布情况 玉米根系分布密度函数通过 LA-S 植物根系分析系统测定。

1.3.3 气象因子与参考作物蒸发蒸腾量 试验地设有自动气象站,降雨量直接来自气象站数据,参考作物蒸发蒸腾量利用 FAO56-PM 公式计算得到^[18]。2018 年降雨和参考作物蒸发蒸腾量如图 3 所示。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T + 272}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为输入冠层净辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热流强度; e_s 、 e_a 分别为饱和与实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与气温关系的斜率($\text{kPa} \cdot \text{h}^{-1}$); γ 为干湿计常数($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); u_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); T 为平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

1.4 数据处理

运用 Excel 进行数据分析,Excel 以及 Origin 9.0 画图,SPSS 24.0 对模拟值和实测值吻合程度进行分析。

2 HYDRUS-2D 模型

HYDRUS-2D 是 Šimunek 等^[19] 1999 年开发的有限元计算机模型,其主要包括水分运动模块、溶质运移模块和热量运输模块,并加入源汇项考虑根系吸水和生长,该模型被广泛用于滴灌条件下的土壤水盐运移模拟研究。

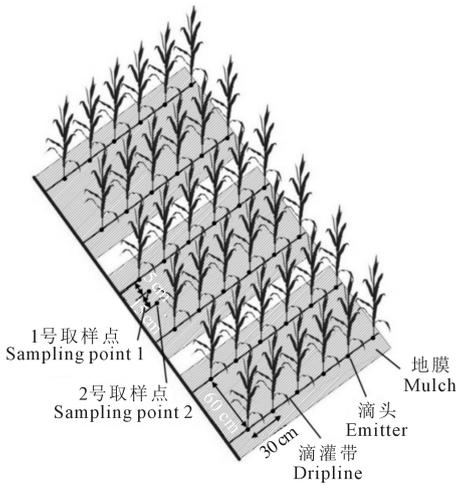


图 1 试验地布置图

Fig.1 Diagram of test layout

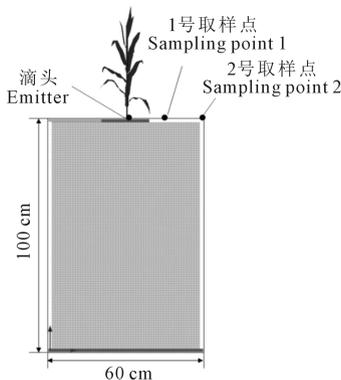


图 2 模拟区域

Fig.2 Simulation area

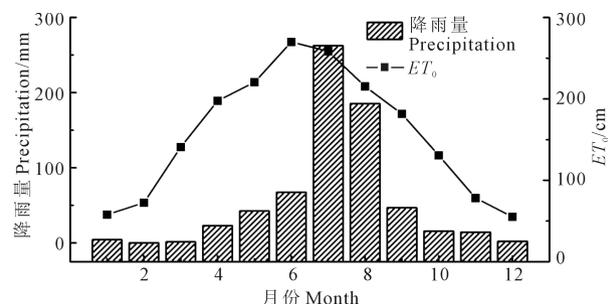


图 3 2018 年降雨和参考作物蒸发蒸腾量变化

Fig.3 Variation in rainfall and reference crop evapotranspiration in 2018

2.1 数学模型构建

2.1.1 土壤水分运动模型 假设试验地土壤均质、各向同性,忽略气相和温度对水分运动的影响,考虑质量守恒定律和达西定律,采用 Richards 水分运动控制方程^[20],其公式为:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial h}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(h)}{\partial z} - S(h) \quad (2)$$

式中, θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土壤基质势(cm); z 为垂向坐标,向上为正; x 为横向坐标; t 为时间(d); $K(h)$ 为非饱和土壤导水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); $S(h)$ 为根系吸水项。

2.1.2 土壤溶质运移模型 溶质在土壤中的运移受对流和水动力弥散作用影响,模型采用对流-弥散方程来描述溶质的运移^[20],其公式为:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_L \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_i c)}{\partial z} - S(h) \quad (3)$$

式中, c 为土壤溶液浓度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); q_i 为水流通量($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); D_T 为横向弥散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); D_L 为纵向弥散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)。

土壤含盐量与土壤溶液中盐分含量转换关系式为^[21]:

$$SSC = \frac{c \cdot \theta}{1000\gamma} \quad (4)$$

式中, SSC 为土壤含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); γ 为土壤堆积密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

2.1.3 根系吸水模型 根系吸水采用 Feddes 模型^[22],计算公式为:

$$S(h) = \alpha(h) b(x, z) T_p L \quad (5)$$

$$b(x, z) = \frac{b'(x, z)}{\int_{\Omega_R} b'(x, z) d\Omega} \quad (6)$$

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h_1 - h}{h_1 - h_2} & h_2 < h \leq h_1 \\ 1 & h_2 \leq h \leq h_1 \\ \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & h_4 \leq h < h_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\alpha(h)$ 为水分胁迫系数; $b(x, z)$ 为根系吸水分配密度函数,按照实际根系分布确定; T_p 为潜在蒸腾速率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); L 为根区分布最大土壤表面宽度(cm); h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 为根系从土壤中吸水的不同压力水头(cm),具体参数参考 Wesseling 等^[23]提出的参考值。

2.2 初始条件与边界条件

模拟区域上边界为半覆膜,滴灌过程中滴头处为饱和水头边界;覆膜部分为零通量边界,未覆膜部分为大气边界。模拟区域地下水埋深为 100 cm,故下边界为饱和水头边界,左右边界两侧为对称面,为零通量边界。

(1) 初始条件。即模拟区各位置初始的土壤水分、盐分分布情况。

$$h(x, z, t) = h_0(x, z),$$

$$(0 \leq x \leq 60, 0 \leq z \leq 100, t = 0) \quad (8)$$

式中, h_0 为初始土壤基质势(cm)。

$$c(x, z, t) = c_0(x, z),$$

$$(0 \leq x \leq 60, 0 \leq z \leq 100, t = 0) \quad (9)$$

式中, c_0 为初始含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

(2) 上边界条件。滴灌过程中滴头处为饱和水头边界,故

$$h(x, z, t) = 0, \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (10)$$

$$-\theta \left(D_L \frac{\partial c}{\partial z} + D_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) + qc = qc_s, \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (11)$$

式中, q 为地表水分通量($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), c_s 为上边界盐分浓度($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

覆膜部分上边界条件为零通量条件,故

$$-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial r} + 1 \right) = 0 \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (12)$$

$$-\theta \left(D_L \frac{\partial c}{\partial z} + D_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) + qc = 0 \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (13)$$

未覆膜部分上边界条件为大气边界条件,故

$$-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial r} + 1 \right) = q_0(x, t) \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (14)$$

$$-\theta \left(D_L \frac{\partial c}{\partial z} + D_T \frac{\partial c}{\partial x} \right) + qc = qc_1(x, z, t) \quad (z = 0, t \geq 0) \quad (15)$$

(3) 下边界条件。下边界为饱和水头边界,故

$$h(x, z, t) = 0, \quad (z = 100, t \geq 0) \quad (16)$$

$$c(x, z, t) = c_b(t), \quad (z = 100, t \geq 0) \quad (17)$$

式中, c_b 为地下水含盐量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.3 模型参数

将试验测得土壤理化性质与 HYDRUS-2D 中的 Rosetta 模型相结合,得出土壤水力参数;将 2017 年土壤含水率和含盐量实测值输入 HYDRUS-2D 模型反求溶质运移参数。利用 2017 年土壤水分盐分实测数据对模型参数进行率定,土壤含水率 R^2 为

0.664, 均方根误差 ($RMSE$) 为 $0.025 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均绝对误差 (MAE) 为 $0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤含盐量 R^2 为 0.718, 均方根误差 ($RMSE$) 为 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均绝对误差 (MAE) 为 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 率定精度较高, 故最终确定土壤水力参数如表 1 所示, 土壤溶质运移参数如表 2 所示。

2.4 模型模拟

对 2018 年 6 月 1 日—2018 年 7 月 21 日共计 50 d 春玉米土壤水盐运移进行模拟, 模拟区域如图 2 所示。沿竖直方向将 100 cm 土层根据土壤质地及容重分成 3 层, 共划分 101 个节点, 水平方向划分 61 个节点, 采用三角形网格将模拟区域离散化, 共生成 12 000 个网格, 模拟的时间单位为 d。

2.5 模型统计量

利用 SPSS 24.0 对土壤含水率、含盐量模拟值与实测值进行 T 检验, 并计算其均方根误差 ($RMSE$)、平均绝对误差 (MAE) 来验证模型用于大田模拟的可靠性^[24]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - S_i| \quad (19)$$

式中, M_i 为第 i 个实测值; S_i 为第 i 个模拟值; n 为数据个数。 $RMSE$ 和 MAE 越接近 0, 表明模拟值与实测值吻合程度越好。

3 结果与分析

3.1 距离滴头不同位置土壤水盐运移过程

以 2018 年 6 月 1 日灌水前土壤含水率和含盐

量为初始值对模拟区域进行土壤水盐模拟计算, 滴灌前后 FI_{20} 处理土壤水盐运移情况如图 4、图 5 所示, 可以看出整个模拟期内, 灌水前后距离滴头不同位置取样点土壤水盐运移趋势基本一致。6 月 1 日灌水前 0~20 cm 土层土壤含水率较低, 最小值出现在滴头正下方, 为 $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 含盐量较高, 为 $4.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

盐随水动, 土壤水分运动决定着盐分的运移。在灌溉过程中, 土壤盐分受到水分淋洗作用向外扩散, 土壤含盐量在滴头处出现最小值。水平方向上, 随着距滴头距离的增加土壤含盐量呈现增大趋势, 土壤水分将盐分带到膜边, 并在膜边形成积盐区, 距离滴头更近的 1 号取样点洗盐效果明显好于 2 号取样点; 竖直方向上, 随着土层深度增加盐分逐渐增大, 0~20 cm 土层盐分明显降低, 40~60 cm 土层盐分降低不明显, 土壤盐分随着水分向下运移, 下层土壤出现盐分累积现象, 洗盐区域为 0~60 cm。

在水分重分布过程中, 随着玉米生长、作物蒸腾耗水, 土壤下层的盐分随水分向上运动, 水去盐留, 土壤表层出现盐分积聚现象^[25], 使得 6 月 22 日灌水前表层土壤含盐量较高。6 月 22 日与 7 月 6 日进行灌水处理, 土壤受灌溉水淋洗, 0~20 cm 土层盐分明显减小, 40~60 cm 土层含盐量增大, 灌溉水将盐分淋洗到 60 cm 土层以下。80~100 cm 土层土壤饱和和导水率 (K_s) 较小, 土壤干容重 (γ_d) 较大, 且试验地设置有地下排水暗管能够将地下水位控制在 100 cm 以下, 使得地下水对 0~60 cm 土层土壤含水率和含盐量影响很小。

表 1 土壤水力参数

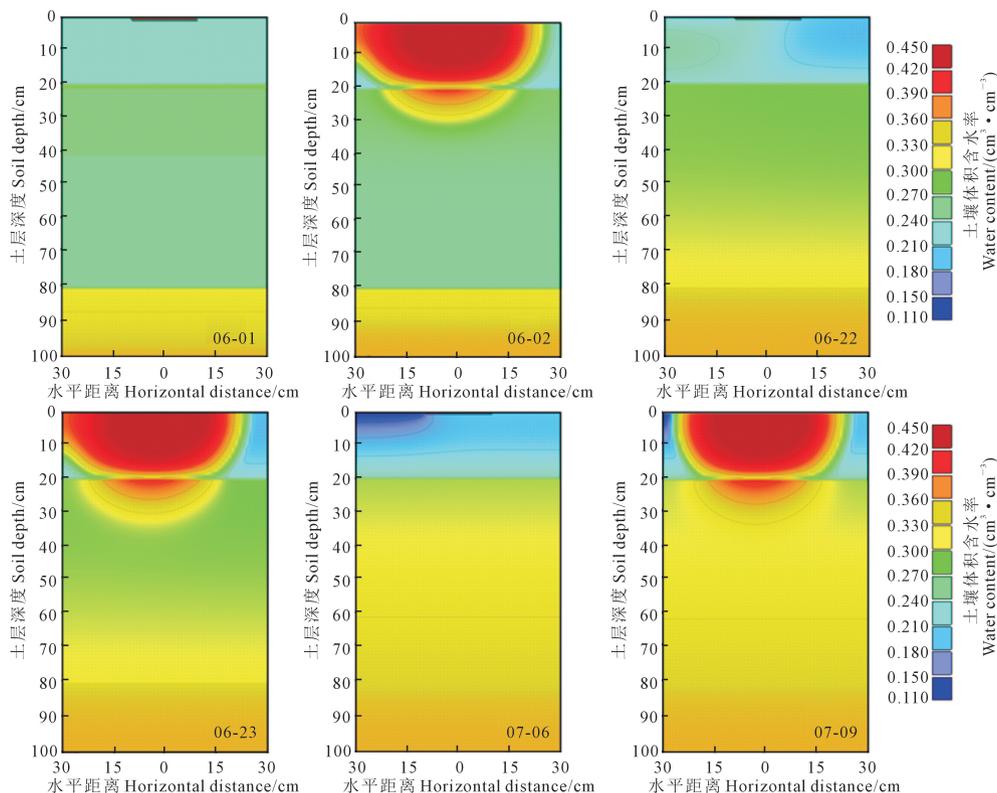
Table 1 Soil hydraulic parameters

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density $\gamma_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 Saturated water content $\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	残余含水率 Residual water content $\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	进气值倒数 Reciprocal of air entry value $\alpha / (\text{cm}^{-1})$	经验参数 Experienced parameter n	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity $K_s / (\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
0~20	1.42	0.45	0.067	0.0200	1.41	10.80
20~80	1.53	0.47	0.087	0.0076	1.52	11.80
80~100	1.72	0.50	0.070	0.0050	1.09	0.48

表 2 土壤溶质运移参数

Table 2 Soil solute transport parameters

土层深度 Soil depth/cm	纵向弥散系数 Longitudinal dispersivity D_L / cm	横向弥散系数 Transverse dispersivity D_T / cm	自由水中分子扩散系数 Molecular diffusion coefficient in free water $D_w / (\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	土壤空气中分子扩散系数 Molecular diffusion coefficient in soil air $D_G / (\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$
0~80	1.0	0.10	2.4	0
80~100	0.5	0.05	0.2	0

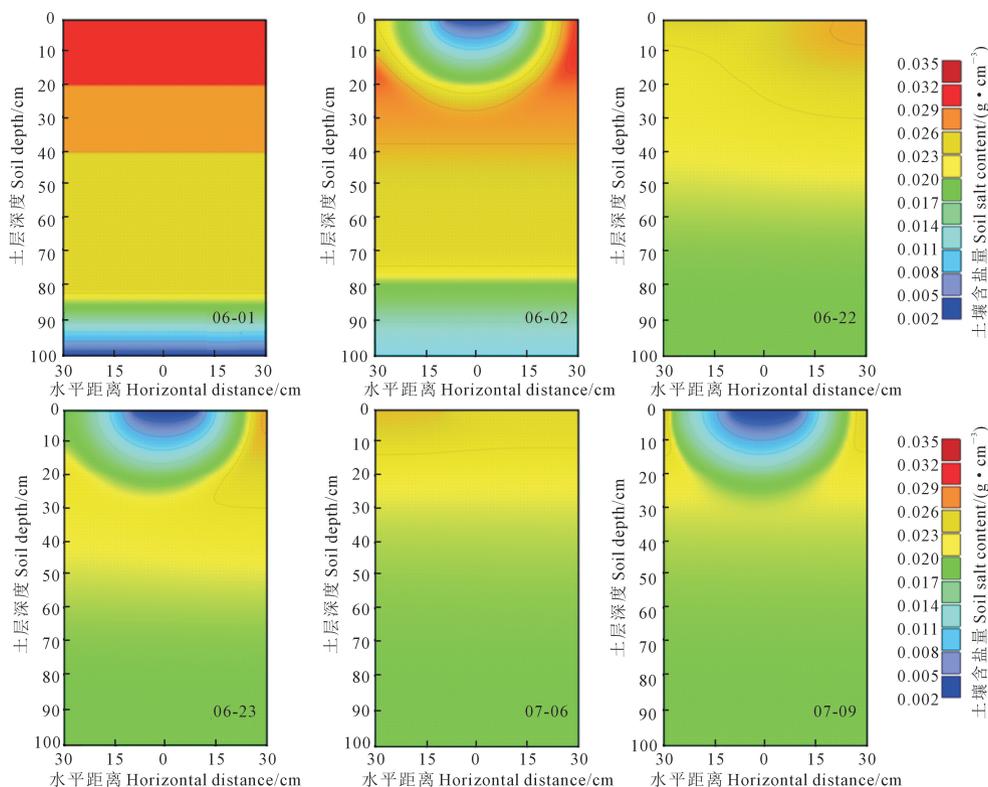


注:图中线条表示土壤体积含水率等值线。

Note: The lines in the figure represent the contour lines of soil volume water content.

图 4 FI₂₀处理灌水前后土壤体积含水率变化

Fig.4 Variation of soil volumetric water content before and after irrigation of FI₂₀ treatment



注:图中线条表示土壤含盐量等值线。

Note: The lines in the figure represent the contour lines of soil salt content.

图 5 FI₂₀处理灌水前后土壤含盐量变化

Fig.5 Variation of soil salt content before and after irrigation of FI₂₀ treatment

3.2 不同灌水量土壤盐分淋洗效果

图 6、图 7 为 FI₂₀ 处理和 FI₁₀ 处理各取样点土壤含盐量变化,对比图 6、图 7 可知不同灌水定额下各层土壤含盐量变化趋势基本一致,0~20 cm 土层淋洗效果明显好于 20~60 cm 土层。2018 年 6 月 1 日、6 月 22 日和 7 月 6 日灌水后 0~20 cm 土层土壤含盐量下降幅度最大,其土壤含盐量比灌水前降低 16.1%,随着土层深度的增加含盐量降低幅度有所

减小,20~60 cm 土层土壤含盐量比灌水前降低约 9.6%,并且下层土壤含水率和含盐量变化幅度维持在较小范围内。结果表明滴灌对 0~20 cm 土层盐分淋洗效果明显,对 20~60 cm 土层盐分有抑制作用。

图 8 为 1 号取样点和 2 号取样点各深度土壤含盐量变化,对比 1、2 号取样点各深度土壤含盐量可知不同深度高灌水定额 FI₂₀ 处理土壤含盐量均小于低灌水定额 FI₁₀ 处理,在 0~20 cm、20~40 cm、40~

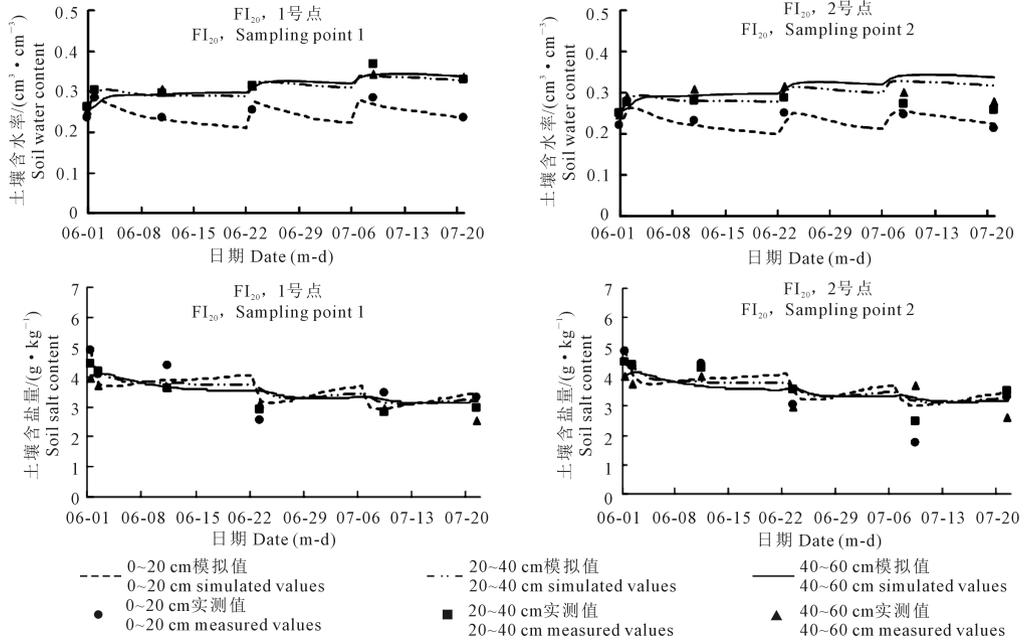


图 6 FI₂₀ 处理各取样点土壤含水率和含盐量变化

Fig.6 Variation of soil water content and salt content at each sampling point in FI₂₀ treatment

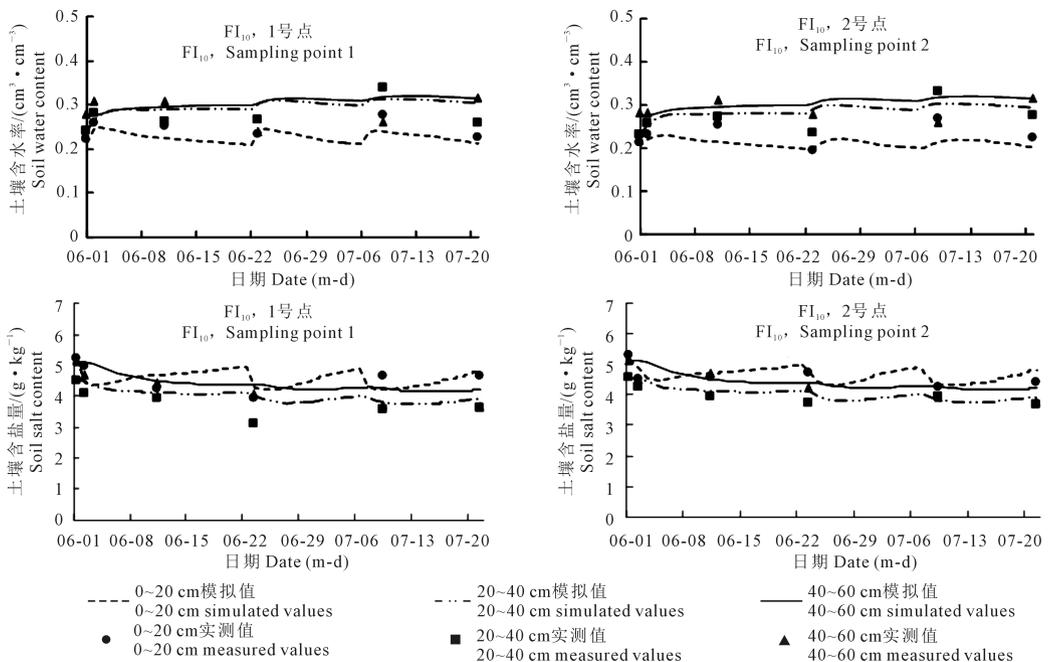


图 7 FI₁₀ 处理各取样点土壤含水率和含盐量变化

Fig.7 Variation of soil water content and salt content at each sampling point in FI₁₀ treatment

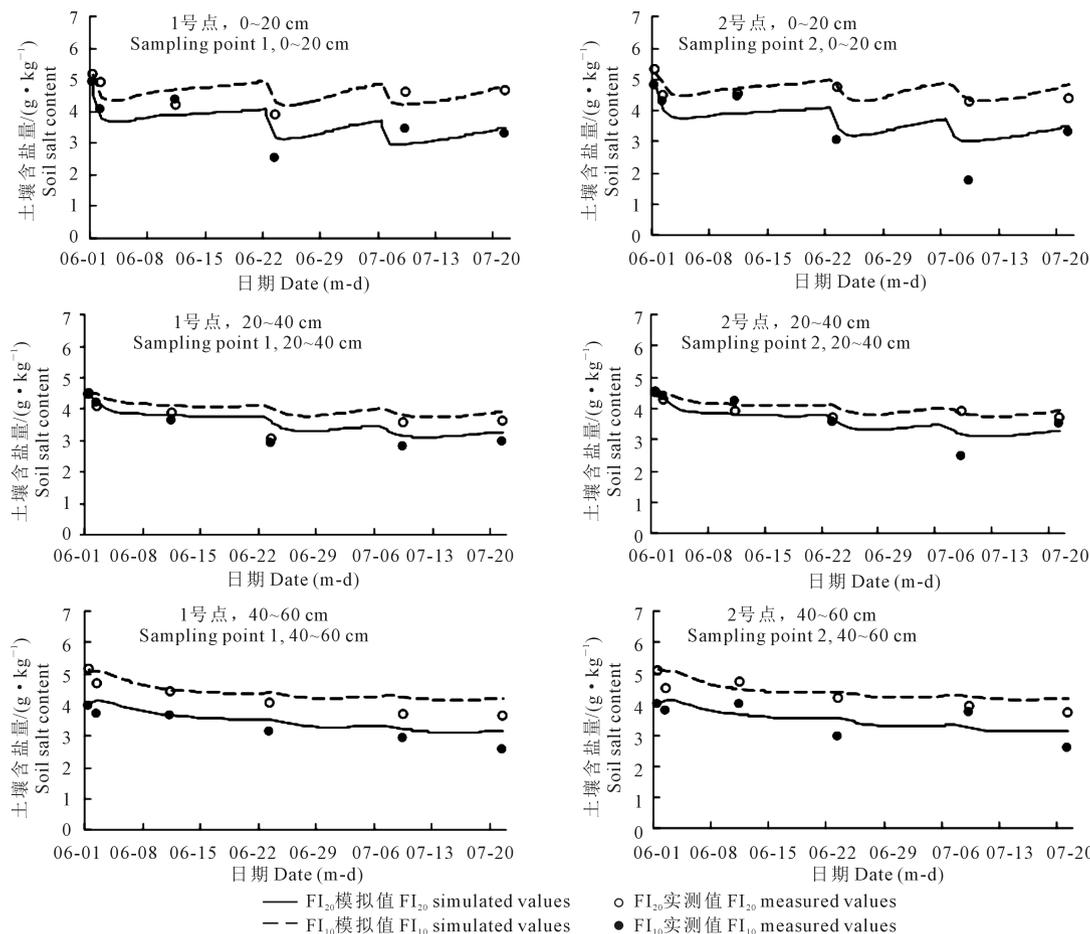


图 8 1 号取样点和 2 号取样点各深度土壤含盐量变化

Fig.8 Variation of soil salt content of sampling points 1 and 2 at different soil depths

60 cm 土层中, FI₂₀ 处理对土壤盐分的抑制作用分别比 FI₁₀ 处理高 26%、11%、19%。从图 6、图 7 可以看出, 整个模拟期内 FI₂₀ 处理 40~60 cm 土层土壤含盐量相对较低, 而 FI₁₀ 处理 40~60 cm 土层土壤含盐量相对较高, 说明高灌水定额 FI₂₀ 处理将土壤盐分淋洗到 60 cm 土层以下, 而低灌水定额的 FI₁₀ 处理未能将盐分淋洗到 60 cm 以下, 在 40~60 cm 土层出现盐分累积现象, 结果表明高灌水定额 FI₂₀ 处理对土壤盐分淋洗效果优于低灌水定额 FI₁₀ 处理。

3.3 模型可靠性验证

利用 2018 年土壤水分、盐分实测数据对模型可靠性进行验证, 由图 6、图 7 可以看出土壤含水率和含盐量模拟值与实测值个别点存在一定的偏差, 但总体上拟合效果较好。土壤含水率和含盐量 *T* 检验的 *P* 值分别为 0.592 和 0.752, 均大于 0.05, *RMSE* 与 *MAE* 值分别为 0.022、0.014 cm³·cm⁻³ 和 0.357、0.288 g·kg⁻¹, 相对较小, 与 Phogat 等^[26] 的研究统计结果范围一致, 如表 3 所示, 表明模型可靠, 能够准确反映滴灌前后土壤水盐运动规律, 可用于田间土壤水盐运移模拟。

表 3 HYDRUS-2D 模型统计量

Table 3 HYDRUS-2D model statistics

指标 Index	土壤含水率 Soil water content /(cm ³ ·cm ⁻³)	土壤含盐量 Soil salt content /(g·kg ⁻¹)
<i>T</i> 检验概率 <i>p</i> <i>T</i> test probability <i>p</i>	0.592	0.752
<i>R</i> ²	0.868	0.857
均方根误差 <i>RMSE</i>	0.022	0.357
平均绝对误差 <i>MAE</i>	0.014	0.288

4 讨论

对滨海地下水浅埋区不同灌水定额土壤水盐运移进行模拟研究, 结果表明, 滴灌使土壤水分含量发生变化, 从而导致盐分再分布, 土壤水分将表层盐分带到下层, 使表层土壤含盐量明显下降, 而下层土壤出现盐分累积现象; 植物蒸腾耗水使得土壤盐分随水分向上运动并在地表聚集。

距离滴头的深度及灌水量的大小都会影响土

壤盐分的分布,灌溉水将土壤表层盐分淋洗到下层,0~20 cm 土层土壤淋洗效果明显,20~60 cm 土层淋洗效果一般;距滴头距离越近淋洗效果越好,灌溉水形成的湿润区将玉米根区盐分带到膜边,与牟洪臣等^[9]、张治^[27]的研究结论一致。水分重分布过程中,由于覆膜原因,降雨少量进入土壤,地表蒸发较小,土壤含水率的变化主要取决于植物蒸腾耗水量,植物蒸腾作用与根系分布密度呈正相关^[28],玉米根系主要吸水部分分布在 0~20 cm 土层^[29],所以在土壤水分重分布过程中 0~20 cm 土层相比其他土层含水率和含盐量变化幅度更大,这与周和平等^[30]研究结论一致。高灌水定额的 FI_{20} 处理将盐分淋洗到 60 cm 土层以下,而 FI_{10} 处理未能将土壤盐分淋洗到 60 cm 土层以下,代表了滴灌淋洗深度,这与张治^[27]研究结论一致。

HYDRUS-2D 模型能够准确模拟滨海地区土壤水盐运移情况,灌水量的多少决定淋洗效果,谭军利等^[31]认为盐碱地滴灌灌水量较小会影响压盐效果。对于地下水埋深较浅的干旱地区,朱文东等^[32]认为大量灌水提高地下水位,棵间蒸发和根系吸水作用使地下水向上运动,加剧土地盐碱化,这使得灌水量的多少成为滨海地下水浅埋区研究的关键。本试验采用的灌溉方式为小灌水定额滴灌,对土壤中盐分有较好的抑制作用且没有抬高地下水位,试验地 80~100 cm 土层是粘土,土壤致密,并且设置有排水暗管能够将地下水位控制在 100 cm 处,使得高矿化度的地下水对 0~60 cm 土层土壤含盐量影响较小。

5 结 论

1) 灌溉过程中,不同取样点不同深度土壤含水率和含盐量沿水平、竖直方向变化趋势基本一致。滴灌使土壤盐分发生重分布,土壤水分将表层盐分带到下层,使土壤表层含盐量明显下降,而土壤下层出现盐分累积现象;作物生长、蒸腾耗水使得土壤盐分向上运动并在地表聚集。0~20 cm 土层较其他土层淋洗效果明显,灌水对下层土壤影响较小;距滴头距离越近淋洗效果越好。水分重分布过程中,0~20 cm 土层相比其他土层土壤含水率和含盐量变化幅度最大。这对于滨海地区盐碱地预防与治理具有一定的指导意义。

2) 灌水定额对土壤盐分分布影响显著,高灌水定额 FI_{20} 处理对土壤盐分的淋洗效果明显好于低灌

水定额 FI_{10} 处理, FI_{20} 处理将土壤盐分淋洗到 60 cm 土层以下,而 FI_{10} 处理由于灌水量小,未能将土壤盐分淋洗到 60 cm 土层以下。

3) 利用 HYDRUS-2D 对滨海地区不同灌水定额处理下土壤水盐运移进行模拟,将模拟值与田间实测数据对比分析,结果表明,HYDRUS-2D 模型可靠,能够很好地模拟滨海地下水浅埋区土壤的水盐运移。

参 考 文 献:

- [1] Bouzourra H, Bouhlila R, Elango L, et al. Characterization of mechanisms and processes of groundwater salinization in irrigated coastal area using statistics, GIS, and hydrogeochemical investigations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22:2643-2660.
- [2] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].*土壤学报*,2008,45(5):837-845.
- [3] 毛建华,陆文龙,潘洁,等.天津地区碱化土壤分布规律及形成原因[J].*天津农业科学*,1998,4(4):8-13.
- [4] 王全九,王文焰,吕殿青,等.膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J].*农业工程学报*,2000,16(4):54-57.
- [5] Hou X Y, Wang F X, Han J J, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of Northwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1):115-121
- [6] 何子建,史文娟,杨军强.膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J].*农业工程学报*,2017,33(23):129-138.
- [7] 李玮,王立,姜涛.地下水浅埋区盐碱地滴灌条件下土壤盐分运移研究[J].*干旱地区农业研究*,2007,25(5):130-135.
- [8] 郑晓辉,巴特儿·巴克,李宏,等.不同灌水方式下干旱区盐碱地土壤水盐运移特征分析[J].*东北农业大学学报*,2011,42(5):95-99,148-149.
- [9] 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.
- [10] 汪志荣,王文焰,王全九,等.点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].*水利学报*,2000,(6):39-44.
- [11] 李远,郑旭荣,王振华,等.基于 Hydrus-1D 的土壤水盐运移数值模拟[J].*中国农学通报*,2014,30(35):172-177.
- [12] 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.
- [13] Chen L J, Feng Q, Li F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146:24-33.
- [14] 陆阳,王乐,韩小龙,等.垄作覆膜滴灌条件下温室盐碱土壤水盐运移规律研究[J].*节水灌溉*,2018,(10):27-32.
- [15] 郭紫伊.天津滨海及其周边地区土壤盐渍化特征分析[D].天津:天津大学,2018.
- [16] 周青云,孙书洪,王仰仁,等.复垦方式对农村宅基地土壤性质的影响研究[J].*中国农村水利水电*,2016,(9):24-27,34.
- [17] 周青云,李松敏,孙书洪,等.基于 Hydrus-2D 的负压灌溉水分动态模拟[J].*人民黄河*,2017,39(8):133-136.

- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements — FAO irrigation and drainage paper 56 [R]. Rome: FAO, 1998.
- [19] Šimunek J, van Genuchten M T. Development and applications of the Hydrus and Stanmod software packages and related codes [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2):587-600.
- [20] 王水献,董新光,吴彬,等.干旱盐渍土区土壤水盐运动数值模拟及调控模式[J].农业工程学报,2012,28(13):142-148.
- [21] Xu X, Huang G H, Sun C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin [J]. Agricultural Water Management, 2013, 125:46-60.
- [22] 李会昌,沈荣开,张瑜芳.作物水分生产函数动态产量模型-Feddes 模型初探[J].灌溉排水学报,1997,(4):1-5.
- [23] Wesseling J G, Brandyk T. Introduction of the occurrence of high groundwater levels and surface water storage in computer program SWATRE [M]. Wageningen, the Netherlands: Institute for Land and Water Management Research (ICW), 1985: 30-46.
- [24] 范严伟,赵彤,白贵林,等.水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J].农业工程学报,2018,34(4):115-124.
- [25] 李亮,史海滨,贾锦凤,等.内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J].农业工程学报,2010,26(1):31-35.
- [26] Phogat V, Skewes M A, Cox J W, et al. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching [J]. Hydrology, 2014, 513:504-516.
- [27] 张治.绿洲膜下滴灌农田水盐运移及动态关系研究[D].北京:清华大学,2014.
- [28] 任书杰,李世清,王俊,等.半干旱农田生态系统覆膜进程和施肥对春小麦耗水量及水分利用效率的影响[J].西北农林科技大学学报,2003,31(4):1-5.
- [29] 宋海星,王学立.玉米根系活力及吸收面积的空间分布变化[J].西北农业学报,2005,14(1):137-141.
- [30] 周和平,王少丽,吴旭春.膜下滴灌微区环境对土壤水盐运移的影响[J].水科学进展,2014,25(6):816-824.
- [31] 谭军利,王西娜,田军仓,等.不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):100-108.
- [32] 朱文东,杨帆.潜水作用下土壤水盐运移过程[J].土壤与作物,2019,8(1):11-22.

(上接第 167 页)

- [21] 刘月岩,刘会灵,乔匀周,等. CO₂ 浓度升高对不同水分条件下冬小麦生长和水分利用的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(11):1365-1370.
- [22] 杨培培,杨明欣,董文旭,等.保护性耕作对土壤养分分布及冬小麦吸收与分配的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):755-759.
- [23] 国海燕.褪黑素引发种子处理对冬小麦光合特性及生长发育的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [24] Wei W, Li Q T, Chu Y N, et al. Melatonin enhances plant growth and abiotic stress tolerance in soybean plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(3):695-707.
- [25] Wang Q N, An B, Wei Y X, et al. Melatonin regulates root meristem by repressing auxin synthesis and polar auxin transport in *Arabidopsis* [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1882-1893.
- [26] Zhang R M, Sun Y K, Liu Z Y, et al. Effects of melatonin on seedling growth, mineral nutrition, and nitrogen metabolism in cucumber under nitrate stress[J]. Journal of Pineal Research, 2017, 62(4):1-13.
- [27] 谢连杰.冬小麦生育中后期光合源分布及不同茎生叶光合性能研究[D].泰安:山东农业大学,2008.
- [28] Tang Y, Lin L J, Xie Y D, et al. Melatonin affects the growth and cadmium accumulation of *malachiumaquaticum* and *galinsogaparviflora* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018, 20(4):295-300.
- [29] Wang Q N, An B, Shi H T, et al. High concentration of melatonin regulates leaf development by suppressing cell proliferation and endoreduplication in *Arabidopsis* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(5):991-1007.
- [30] Posmyk M M, Kuran H, Marciniak K, et al. Pre-sowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations[J]. Journal of Pineal Research, 2008, 45(1):24-31.
- [31] Kang S Z, Lu Z, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Systems, 2002, 55(3):203-216.
- [32] 王家仁,郭风洪,孙茂真,等.冬小麦调亏灌溉节水高效技术指标试验初报[J].灌溉排水学报,2004,23(1):36-40.