

惠民县微咸水灌溉区土壤水盐运移数值模拟及分析

赵志强, 徐征和, 闫良国, 庞桂斌, 王 通, 张立志

(济南大学 资源与环境学院, 济南 250022)

摘 要:为合理利用水资源、保证地下水盐环境,以惠民县桑落墅项目区为研究对象,运用HYDRUS软件,构建了土壤水盐运移数值模型,并在微咸水灌溉条件下对该地区土壤水盐运移进行了数值模拟和分析。结果表明, HYDRUS模型可以较好对土壤水盐运移规律进行模拟,按照淡水-微咸水-淡水顺序灌溉,每次灌后土壤湿润层积盐位置分别离土壤表层40、40、20 cm。5月土壤含盐量最低,4月土壤含盐量较3、5月偏高。3月土壤含水率最低,5月较3、4月要高。3、4、5月,研究区地下水埋深变化范围为0.7~3.5 m。研究区域土壤属于轻度盐渍化。

关 键 词:惠民县;微咸水灌溉;数值模拟;分布特征;运移规律

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.006

赵志强,徐征和,闫良国,等.惠民县微咸水灌溉区土壤水盐运移数值模拟及分析[J].灌溉排水学报,2017,36(1): 33-39.

0 引 言

土壤水盐运动理论最早起源于Darcy^[1]定律,并由Richards^[2]建立了多孔介质中水流运动的基本方程。目前,研究工作者利用HYDRUS模型对微咸水灌溉区土壤水盐运移进行了大量的模拟研究,并取得了大量的研究成果。许迪等^[3]利用HYDRUS模型模拟了冬小麦田间土壤水分运移过程,得出土壤质地结构决定滴头流量规格和适宜埋深的重要因素;曹巧红等^[4]运用HYDRUS模型对农田水分和氮素的运移特征进行了分析,得出水分渗漏是影响氮淋失主要因素,调整灌溉措施减少根层水分渗漏是减少氮淋失的有效措施。余根坚等^[5]运用HYDRUS模型模拟不同灌水模式下土壤水盐运移特征,得出在相同灌水定额下,100 cm土体内沟灌平均土壤含盐量比畦灌平均土壤含盐量降低24.4%,沟灌可以有效控制土壤盐分的累积。在农田土壤中水盐运移、分布特征的模拟方面,美国盐渍土实验室有较深入研究外,国内相关研究^[6]也取得了丰硕的研究成果,并且运用HYDRUS模型进行模拟的研究应用已十分广泛。但在黄河三角洲微咸水灌溉区的研究很少,土壤水盐对农作物正常的生长发育扮演着十分重要的角色,研究土壤水盐运移分布特征对于改良地下水环境、防止土壤次生盐渍化有着重大的实际意义^[7-8]。为此,选取惠民县桑落墅微咸水灌溉区作为研究对象,进一步丰富土壤水盐运移特征的相关理论,同时可使HYDRUS模型得到广泛应用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

桑落墅镇地处鲁北平原,黄河下游北岸,滨城、阳信、惠民三区交界处,地理位置得天独厚,黄泛冲击是造成惠民县贫咸水区面积大的主要原因。研究区总面积1 666.75 hm²,多年平均降水量为549.82 mm,多年平均蒸发量1 133.3 mm^[9],平均地下水位7.5 m。地下水在垂直方向上呈淡水和淡咸水相间分布,构成了

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509105);山东省自然科学基金项目(ZR2014EEQ020);山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201410);济南大学研究生创新基金资助项目(GIFUJN)

作者简介: 赵志强(1990-),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1299324237@qq.com

通信作者: 徐征和(1968-),男,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xu4045@126.com

咸-淡、淡-咸-淡与全淡型结构。土壤类型主要为壤土和砂壤土,砂壤土主要在地下80 cm处。该区域农作物以冬小麦和夏玉米为主,灌溉方式以畦灌为主,灌溉水源分为引黄灌溉和机井灌溉。以冬小麦为研究对象,在其生长期,探究微咸水灌溉对土壤水盐的影响。

1.2 试验设计

选取3块典型试验田进行相关试验,测定主要指标有土壤含盐量、土壤含水率。每块试验田长120 m,宽4.5 m,分别位于研究区域的南、西南、东南3个方向;研究选取井渠混灌的方式进行灌溉,采用灌3水的灌溉制度,其中,抽穗水用微咸水灌溉,微咸水水质指标EC(电导率)为3.5 dS/m,阴离子HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻物质的量浓度分别为15.1、19.2、15.6 mmol/L,阳离子Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺物质的量浓度分别为2.4、16.6、117.5 mmol/L,矿化度为2.45 g/L,灌水定额见表1;微咸水井井深30 m,单井出水量45 m³/h,单井控制面积6 hm²,井间距200 m,井群间隔均衡布置;田间灌溉为给水口加移动软管,管径70 mm。

表1 研究区冬小麦灌溉制度

频率/%	灌溉定额/(m ³ ·hm ⁻²)	生育阶段	灌溉时间	灌水时间/d	灌水定额/(m ³ ·hm ⁻²)
50	3 750	拔节水	0326—0407	12	1 050
		抽穗水	0420—0430	11	1 350
		灌浆水	0524—0605	13	1 350
75	4 050	拔节水	0326—0407	12	1 200
		抽穗水	0420—0430	11	1 425
		灌浆水	0524—0605	13	1 425

1.3 试验材料

主要仪器:洛阳铲、双功能水浴恒温振荡器、土壤粉碎机FT-1000A、火焰光度计、离子色谱仪等。

1.4 样品采集

选取3块典型试验田作为重复试验,每个试验田布置1个取样点,共有取样点3个,剖面共18个取样点,均匀分布在研究区域,采用GPS定位取样点,3、4、5月按旬取样,每月的1、11、21日取样,并在灌后加测1次,试验土壤样品共648个。测取的土壤样品以壤土为主,共540个,其次为砂壤土,共108个。

1.5 测定方法

首先,将采集的土壤样品风干,再过1 mm筛,然后以5:1的水土质量比将土壤样品配成土壤溶液,振荡过滤,然后采用火焰光度计测定土壤溶液组成离子的K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺;SO₄²⁻、Cl⁻利用离子色谱测定土壤可溶性盐分的阴离子;CO₃²⁻、HCO₃⁻运用双指示剂滴定法测定;以上8大离子的质量之和即为土壤全盐量,土壤全盐量反映土壤盐渍化程度的主要指标,数值模拟运用HYDRUS模型。土壤含水率采用烘干法测定,计算结果与土体湿密度之积即为相应土层的体积含水率。

2 HYDRUS 模型原理

2.1 模拟条件

HYDRUS软件是用来模拟土壤非饱和带水流和溶质运移的数值模型。在运行该模型时,其边界条件的设置极为重要。大气对土壤水流运动的影响忽略不计,模型中Richards方程控制水流运动。其水流边界条件视情况不同而不同,例如定水头和变水头边界、自由排水边界、大气边界等。在运行该模型时,根据已有的实测数据对模拟结果进行反算,得出水盐运动参数,将率定好的参数再次带入模型模拟。水盐模拟土壤表面边界为开放大气边界,接受降雨、灌溉补给,排泄主要以蒸发方式排泄。土壤深度的下边界设为已知变水头边界,根据实测的地下水埋深来确定压力水头;土壤盐分下边界为已知质量浓度边界,根据采样实测得的土壤盐分浓度分别赋予各层土壤盐分质量浓度。

利用HYDRUS模型模拟田间小麦地0~120 cm土层范围内土壤盐分的运移特征。该模型的上边界为大气边界,受降雨、灌溉的补给影响,通过蒸发、渠道排泄。根据已得到的降雨、蒸发数据,输入到模型进行模拟计算。模拟土壤深度为120 cm,而研究区地下水埋深最大为3.5 m,因此模型下边界定位变水头边界水头值根据实测地下水位计算得到(水头=模型模拟深度-地下水埋深)。其他边界为通用边界条件。

2.1.1 初始条件

初始条件为开展本次研究初始的初始土壤含水率,采用实测值,即:

$$h(z,t)=h_0(z), \quad 0 \leq z \leq 1 \quad t=0。 \quad (1)$$

2.1.2 边界条件

根据已知资料,此次研究采用已知压力水头(Dirichlet type)边界条件,即:

$$h(z,t)=\Psi(z,t), \quad z \in \Gamma_D。 \quad (2)$$

与已知坡降的边界条件为:

$$\left[K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz}^A \right] n_i = \sigma_i(z, t) \quad \text{for } (z) \in \Gamma_G, \quad (3)$$

式中: Γ_D 、 Γ_G 分别表示 Dirichlet、Neumann 和坡降类型边界部分; σ_i 是 z 和 t 的函数(cm/s); n_i 是 Γ_G 指向外的矢量分量。

2.2 模型参数的确定

2.2.1 时间步长的设定

模拟土壤深度为地下0~120 cm,每20 cm为1层,共6层。模拟时间为200 d,运用变时间步长剖分方式,根据收敛迭代次数对时间步长进行微调。在设定时间步长时,起初时间步长设为0.1 d,进行调整时最小步长为0.01 d,最大步长为5 d;土壤体积含水率容许偏差为0.000 5,压力水头允许偏差为1.2 cm。

2.2.2 土壤水分运动参数的设定

通常使用实测数据反演估计土壤水分运动参数,该方法称为参数反演优化或“试估-校正”法^[10]。

2.3 模型率定与检验

主要基于实测值与模拟值之间的模拟效率系数(Ens)、相对误差(RE)均方根误差($RMSE$)3个评价指标来衡量^[11]。其中,模拟效率系数(Ens)反映模拟效果随时间变化过程的符合程度,相对误差(RE)反映模型模拟过程中模拟值与实测值之间的相对误差,均方根误差($RMSE$)反映模拟过程中模拟值与实测值之间绝对误差的平均水平。各评价指标的计算公式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (r_i - r)^2}, \quad (4)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n r_i} - 1, \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - r_i)^2}{n}}, \quad (6)$$

式中: r_i 为实测土壤含水率; m_i 为模拟土壤含水率; r 为各层实测土壤含水率平均值; n 为样本数量。

当 $Ens=1$ 时,说明模拟值与实测值相等, $Ens>0.5$ 时为可接受值。图2模拟结果得知,6个剖面的 Ens 分别为0.72、0.75、0.83、0.85、0.88、0.80,均在可接受范围内。从相对误差(RE)和均方根误差($RMSE$)来看,其可接受范围分别 $RE<3.5\%$, $RMSE<0.05$ 。根据实测值与模拟值的计算,得出相对误差(RE)绝对值均 $<3.5\%$,均方根误差均 <0.01 ,体现出了较好的模拟精度。不同土层3个模拟系数表现出了较好的模拟精度,且表现出模型对深层土壤含水率的模拟精度高于表层。模型对土壤含水率的模拟精度较好,可用于田间土壤水分运动的模拟。

3 结果与分析

3.1 样品结果

将每月测的3个取样点相同深度的土壤含盐量及体积含水率取平均值,作为相应月份土层的值,结果如图1所示。由图1可知,土壤湿润层含盐量表现为5月 $<$ 3月 $<$ 4月,土壤体积含水率表现为3月 $<$ 4月 $<$ 5月。在纵向上,由于不同土层土壤类型的差别,土壤含盐量与土壤体积含水率没有明显的变化规律。

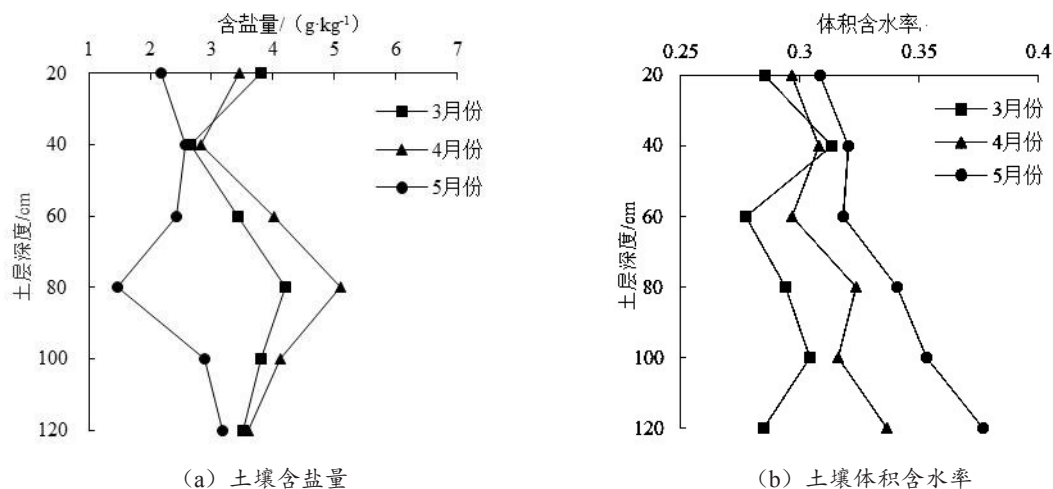


图1 样品处理结果

3.2 土壤动力学调参结果

将研究区模拟土层划分为2层,上层为壤土,下层为砂壤土。根据各土层土壤粒径组成和密度,利用模型自带的神经网络预测模块,初步确定土壤动力学参数,在模拟过程中进一步确定,结果见表2。

表2 土壤动力学参数

土壤类型	$Q_1/(\text{m}^3\cdot\text{m}^3)$	$Q_2/(\text{m}^3\cdot\text{m}^3)$	$\text{Alpha}/(\text{cm}^{-1})$	n	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$
壤土	0.058	0.43	0.036	1.56	18.96
砂壤土	0.065	0.41	0.075	1.89	80.10

3.3 土壤水盐运移特征

3.3.1 土壤盐分模拟结果

由图2可知,模拟含盐量与实测含盐量模拟效果良好,较好地体现了研究区域地下土壤盐分的分布情况。该研究区土壤含盐量整体偏高,阳离子主要以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,其次为 K^+ , Mg^{2+} 量最少。阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,含极少量的 CO_3^{2-} 。由于该区灌溉方式主要为井灌,地下水含盐量较高,在2~3 g/L 范围内,因此,土壤含盐量偏高。

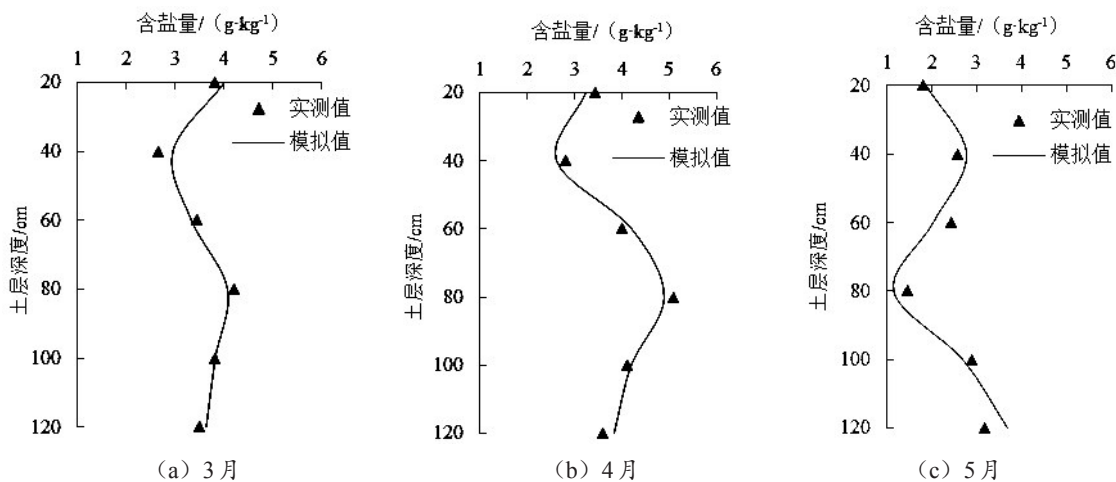


图2 土壤盐分运移规律

3月土壤中可溶盐分在20~40 cm 土层最低,为2.6 g/kg 左右,其他深度一般在3.4~4.0 g/kg 之间,中层80 cm 含盐量最高,达到4.2 g/kg 左右。土壤表层含盐量较大,为3.8 g/kg 左右。3月上旬冻结层上部开始融化,中旬冻结层融通,气温升高多风,蒸发强烈,造成土壤表层积盐。

4月整体含盐量高于3、5月,因为研究区4月有1次微咸水灌溉。4月底在0~40 cm 土层含盐量较3月有所下降,为2.8~3.5 g/kg,这是由于在4月下旬有过1次灌溉,土壤类型主要为壤土,灌溉初期水分以灌溉入渗为主,土壤表层受到淋洗作用,含盐量下降。含盐量在相同土层深度较3月偏高,土深为80 cm 时,含盐量最

高,达到5.0 g/kg。3、4月在深度为80 cm时,含盐率都很高,这是因为在经过寒冬后,冻土层开始融化,补给地下水,上层盐分向下淋洗使该层含盐率增加。

5月下旬为小麦灌浆期,进行1次浇灌且灌水量较3月大,土壤表层盐分受到的淋洗作用大于蒸腾作用,水分以土壤下渗为主,表层含盐量下降,为2.1 g/kg左右。随着盐分的下移,盐分主要在40~60 cm聚集,4、5月是冬小麦拔节、抽穗期,是灌水量较大、灌溉周期较短的一段时期,土壤受到淋洗作用,含盐量较3、4月明显下降,深度在80 cm左右时土层以砂壤土为主,含盐量下降最为明显,为1.45 g/kg。而在80~120 cm,土壤上层盐分随着水分下移,含盐量逐渐升高。由此可知5月的土壤含盐量主要集中在土层底部。

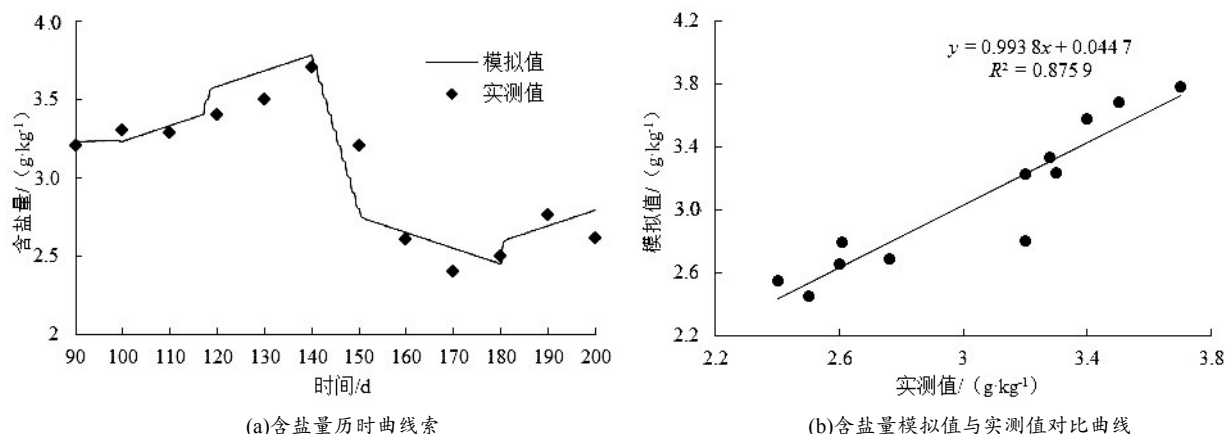


图3 土壤湿润层盐分变化规律

由图3可知,研究区冬小麦生育期的土壤含盐量的实测值与模拟值相关性较好,决定系数 $R^2=0.8759$,其中 Ens 为0.86, RE 为1.8%, $RMSE$ 为0.03。该区土壤盐分在4月中下旬达到最高,5月底最低。总体上土壤湿润层含盐量在小麦生长期内的变化幅度最大为1.33 g/kg,在合理范围之内,含盐量平均值在3.03 g/kg。

3.3.2 土壤体积含水率的模拟结果

图4为土壤水分剖面模拟值与实测值对比图。由图4可知,模拟效果较好,3个土壤剖面只有在土壤含水率较低时的模拟值与实测值偏差相对较大。3月土壤水分主要集中在40、100 cm土层处,为31%左右;4月土壤水分主要集中在底层,为34%左右;5月土壤含水率呈由上到下逐渐增大趋势,最底层体积含水率达到了38%左右。土壤含水率整体分布特征是上小下大,土壤上层体积含水率在27%左右,底部含水率较大,在35%左右。

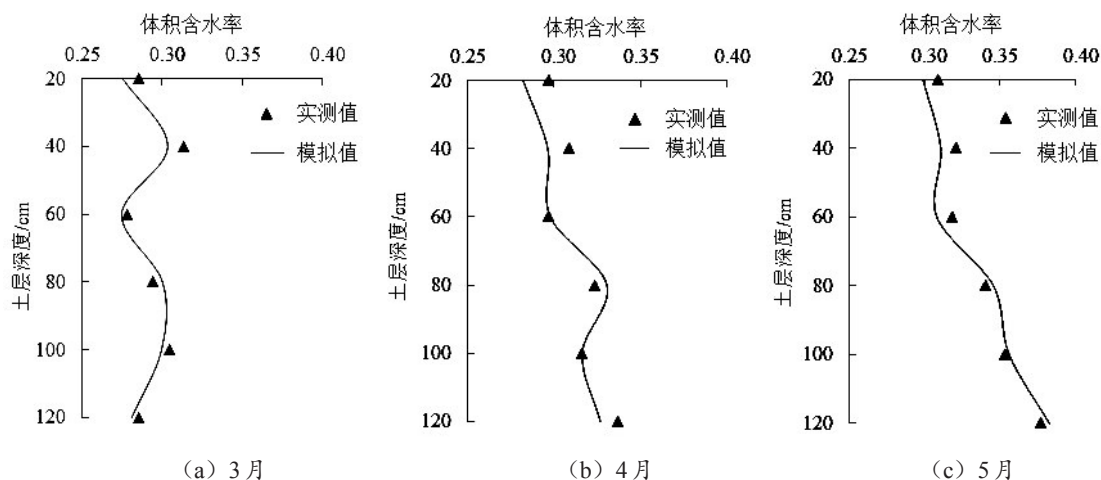


图4 土壤水分运移规律

由图5可知,运用HYDRUS模型模拟土壤水分,实测值与模拟值的决定系数为 $R^2=0.88278$, Ens 为0.85, RE 为1.5%, $RMSE$ 为0.02,模拟值较好地反映了土壤湿润层在冬小麦拔节期、抽穗期、灌浆期内的体积含水率的变化规律。由图4可以看出,土壤体积含水率主要受灌溉、降雨的影响。在灌溉或降雨比较集中的时间段,土壤体积含水率波动比较大。

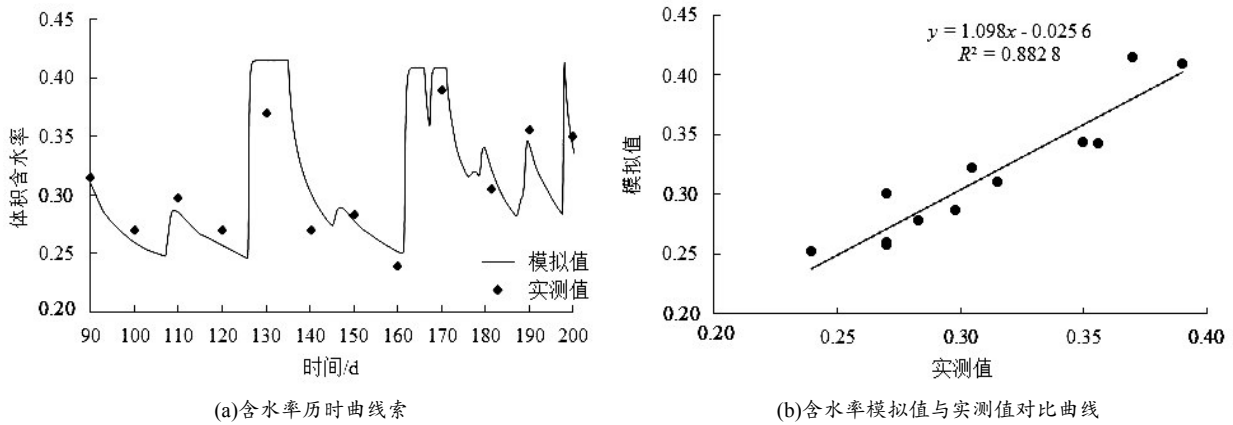


图5 土壤湿润层体积含水率变化规律

3.3.3 地下水埋深变化特征

在现状年根据降雨资料及灌溉情况,确定研究区有效降雨入渗量为121.57 mm,灌溉有效入渗量为323.2 mm,模型上边界为大气边界,土壤深度200 cm处为下边界,下边界水头值设为0,向上为负,向下为正。模型中,在研究土层60、80 cm处分别设置水头观测点,运行HYDRUS模型得出60、80 cm处水头值,与实际水头值进行比较得出水头差,水头差即为地下水位的变化量。水头值的绝对值越大,说明地下水位的变化量越大,反之越小。实际观测的水位与水头差之和即为该时段的地下水位。依次计算出每个时间段前后的水头差,得出相应时间段地下水位。

如图6所示,观测值与模拟值的决定系数 $R^2=0.9008$, Ens 为0.65, RE 为2.0%, $RMSE$ 为0.046,根据以上检验指标,可知模拟效率系数 Ens 大于0.5,相对误差与标准偏差都在可接受范围内,得出平均地下水埋深在1.8 m左右,最大地下水埋深为3.5 m,最小地下水埋深为0.7 m。地下水位出现较大波动在3月,拔节期是冬小麦生长最为重要的灌溉期,3月初土壤冻层底部开始融冻,融冻的水分开始补给地下水,到中旬有1次淡水灌溉,且在8—9日有1次明显的降雨,地下水位明显上升;4月无明显降雨,除中旬1次微咸水灌溉,地下水位上升,地下水位整体上逐渐下降;5月地下水位又开始回升,这是由于在6—9日有连续的降雨,下旬有1次淡水灌溉。灌溉、降雨是影响该区域地下水位变化的重要因素。由图3和图6可知,4月研究区地下水位开始明显下降,而含盐量却开始逐渐升高;5月地下水位逐渐升高,而土壤含盐量明显下降;6—7月地下水位又明显升高,而土壤含盐量则明显下降。

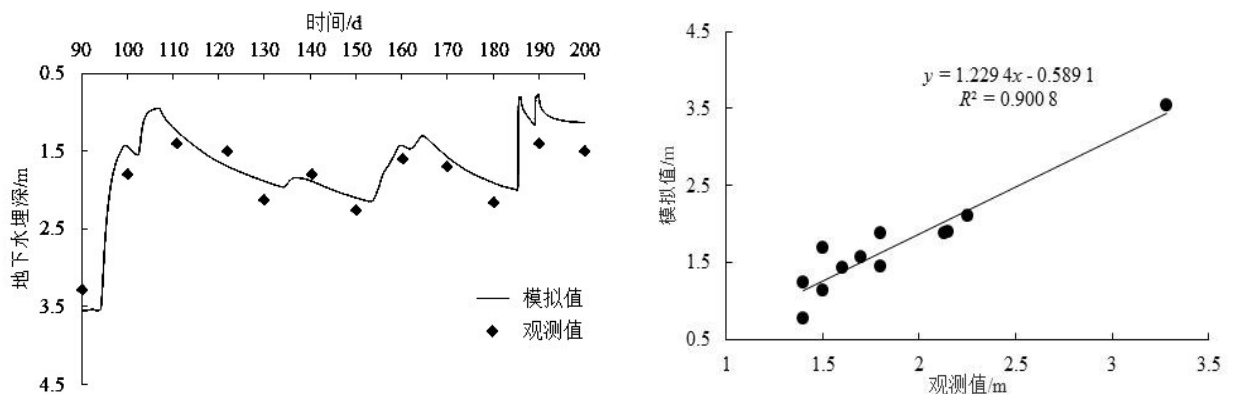


图6 地下水埋深

4 结论

- 1)HYDRUS模型较好地模拟了研究区域土壤水盐的分布特征。
- 2)研究区3月含水率最低,5月最高。纵向上,土壤水分主要集中在60~80 cm土层,研究区各层土壤含水率整体上处于轻旱。
- 3)研究区5月含盐量最低,4月含盐量最高。纵向上,土壤含盐量主要集中在80 cm土壤层,研究区土壤

整体上属于轻度盐渍化。

4)研究区平均地下水埋深 1.8 m,最大水埋深 3.5 m,最小地下水埋深为 0.7 m,研究时段埋深最大变幅为 2.6 m。

5)以淡水-微咸水-淡水轮灌的前提下,研究区土壤水盐变化都在合理的变化范围内。

6)研究区域地下水埋深与土壤含盐量在冬小麦拔节、抽穗、灌浆期整体上负相关。

参考文献:

- [1] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids in porous mediums[J]. Physic, 1931(1):318-333.
- [2] NARASIMHAN T N. Hydraulic characterization of aquifers, reservoir rocks and soils: A history of ideas[J]. Water Resources Research, 1998, 34(1):33-46.
- [3] 许迪,程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1):27- 31.
- [4] 曹巧红,龚元石. 应用 HYDRUS-1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J]. 土壤肥料与植物营养学报, 2003, 9(2):139-145.
- [5] 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.
- [6] 徐力刚,杨劲松,张奇. 冬小麦种植条件下土壤水盐运移特征的数值模拟与预报[J]. 土壤学报, 2005, 42(6):923-929.
- [7] WANG Y, ZHAO H L, ZHAO X Y, et al. Water and salt dynamics in farmland salinization in arid oasis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1):186-192.
- [8] 吉力力·阿不都外力,阿依古丽·买买提,唐杨. 玛纳斯河流域绿洲土壤春季盐渍化研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2):189-195.
- [9] 王峰,王丽静,王凤娇,等. 1961—2008 年惠民县降水和温度变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30):17 111-17 114.
- [10] 徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4):494-501.
- [11] 吕殿青,邵明安. 非饱和土壤水力参数的模型及确定方法[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1):163-166.

Numerical Simulation and Analysis of the Transport of Soil Water and Salt in Brackish Water Irrigation Area of Huimin

ZHAO Zhiqiang, XU Zhenghe, YAN Liangguo, PANG Guibin, WANG Tong, ZHANG Lizhi

(College of Resources and Environment, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China)

Abstract: The project area of Sang Luoshu in Huimin was taken as the object in order to make use of water resources reasonably and to ensure the groundwater salt environment. The numerical model of soil water and salt movement were constructed using the HYDRUS software, and the numerical simulation and analysis of soil water and salt movement in this area were carried out under the condition of brackish water irrigation. The results indicated that, the HYDRUS was an appropriate model to simulate soil water and salt movement, salification zone positions were respectively at 40, 40, 20 cm from the soil surface layer after the alternate irrigation by fresh water, brackish water and fresh water; The soil salt content in May was the lowest, and it was higher in April than those in March and May. The lowest soil moisture existed in March, and it was higher in May compared with those in April and in March; Thirdly, in March, April, May, the maximum change of groundwater level ranged from 0.2 m to 2.6 m in the study region, and the study area soil belongs to mild salinization.

Key words: Huimin County; brackish water irrigation; numerical simulation; distribution characteristics; migration regularity

责任编辑:白芳芳