文章编号:1000-7601(2019)03-0224-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.29

基于 HYDRUS 模型的暗管排水水盐运移模拟

石培君,刘洪光,何新林,李　红,李开明

(石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘　要:为了探索暗管排水条件下膜下滴灌农田的水盐运移规律,本文设计了埋深 1 m,间距 4 m 的暗管排水模型试验,研究分析灌水淋洗过程中土壤水分和盐分的动态变化规律,并利用 HYDRUS 模型对暗管排水条件下的水盐运移规律进行数值模拟分析与验证。结果表明:经过 3 次灌水淋洗后,表层 0~20 cm 土层内盐分含量下降至 2 g·kg^{-1},达到了非盐化土水平,20~60 cm 土体内上层土壤脱盐效果高于下层,总盐分含量下降至 8 g·kg^{-1}以下;经过实测值与模拟值的验证,土壤盐分和水分的均方根误差 *RMSE* 最大分别为 0.632 和 1.324,决定系数 R^2 最小分别为 0.992和 0.906,说明模拟结果与实测结果吻合度较好,HYDRUS 模型能够较好地模拟暗管排水过程中水盐运移规律。通过模型模拟 6 次灌水(共 90 d)后暗管排水条件下不同土层深度的水盐动态变化特征,模拟结果表明,0~40 cm 土层内盐分含量下降至 2 g·kg^{-1},40~80 cm 土层内盐分含量下降至 4 g·kg^{-1}左右,基本达到轻度盐化水平;距离暗管不同间距处的土壤剖面盐分含量呈波动变化,距离暗管越远,土壤剖面含盐量越大,盐分含量在 0~8 g·kg^{-1}范围内变化。

关键词:暗管排水;HYDRUS 模型;水盐运移;盐分分布;模拟

中图分类号:S277.5　　**文献标志码**:A

The simulation of water and salt transportation under subsurface drainage by HYDRUS model

SHI Pei-jun, LIU Hong-guang, HE Xin-lin, LI Hong, LI Kai-ming

(*College of Water Conservancy & Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*;
Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*)

Abstract: To explore the transport of water and salts of underground pipe drainage under mulch-drip irrigation system, we conducted an experiment with underground pipe drainage system of a 1 m deep and 4 m spacing pipes. The dynamic changes of soil moisture and salinity were measured during irrigation and leaching, and the transport was analyzed and verified with HYDRUS numerical model under the condition of subsurface drainage. The results showed that after three times of irrigation and washing, the salt content decreased to 2 g·kg^{-1} in 0~20 cm soil layer, reaching the level of non-salinized soil. The effect on upper layer desalination was greater than that on lower layer soil of 20~60 cm, and the total salt content was less than 8 g·kg^{-1}.Through verification of the measured and simulated values, the maximum *RMSE* of soil salinity and moisture were 0.632 and 1.324, and the minimum values of R^2were 0.992 and 0.906, respectively, which indicated the simulation results were in good agreement with the measured results.The HYDRUS model was more reliable to simulate the transport of water and salt in the subsurface drainage system.The dynamic characteristics of water and salt in different depths of soil layer under the subsurface drainage after irrigation for 6 times (90 days) were simulated by the model.The simulation results showed that the salt content was decreased to 2 g·kg^{-1} in 0~40 cm soil layer, reaching the level of non-saline soil.The salt content in 40~80 cm was decreased to 4 g·kg^{-1}, which basically reached the level of slight salinization. The salt content in the soil profile fluctuated with distances from the pipe. The greater the distance from the pipe, the greater the salt

收稿日期:2018-01-12　　**修回日期**:2018-12-03

基金项目:国家自然科学基金(51669029);国家"十三五"重点研发计划(2016YFC0501406,2016YFC0501402)

作者简介:石培君(1992-),男,甘肃古浪人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:783149396@qq.com

通信作者:刘洪光(1980-),男,山东金乡人,高级实验师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:liuhongguang-521@163.com

content in the soil and the salt content varied within the range of 0~8 g · kg^{-1}.

Keywords: subsurface drainage; HYDRUS model; water and salt migration; salt distribution; simulation

土壤盐渍化是当前人类面临的一个全球性生态环境问题[1-2],尤其在干旱半干旱地区,水资源短缺和土壤盐渍化已成为制约灌溉农业可持续发展的关键因子,也是造成土地退化的重要原因[3-4]。新疆作为干旱半干旱农业大区,其盐渍化耕地面积占新疆总耕地面积的 30.2%,已严重制约农业的发展。膜下滴灌技术具有节水抑盐、增温保墒、调控土壤盐分的作用,使作物根区处于脱盐状态,为作物生长提供了相对良好的微环境,在干旱区和盐碱化耕地具有应用价值[5-7]。据统计,目前新疆膜下滴灌种植面积已达到 3.3×10^6 hm^2,种植覆盖率超过 90%。许多学者对其水盐运移规律研究发现,膜下滴灌由于灌溉量小,淋溶作用微弱,一般不会产生深层渗透,很难利用灌溉水淋洗盐分[8-9],只有根区范围处于脱盐区,而其下土层处于积盐区,其盐分仅在土层中转移而无法消除,在强蒸发条件下出现了次生盐渍化威胁[10-11],对干旱区绿洲生态环境的和谐发展产生较大影响。

暗管排水被认为是地下水平衡和农田水管理实践中最适合的方法[12],同时,也是防止和治理盐碱化最直接、最有效的措施之一[13-14]。张金龙等[15]研究了暗管排水间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响,得出排水间距对田面各点土壤脱盐效果影响较大。张展羽等[16]在滨海盐碱地模拟研究了不同埋深和间距的暗管排水系统的地下水埋深动态变化,得出暗管技术参数对地下水埋深的动态影响较大。王洪义等[17]在地下水埋深为 1.5 m 的盐碱地进行不同埋深和间距的暗管排水试验,结果表明暗管间距 5 m、埋深 0.8 m 为大庆地区苏打盐碱土降渍脱盐的最佳工程布设参数。王振华等[18]在地下水埋深大于 4 m 的盐碱地上,研究了滴灌淋洗条件下不同暗管埋深和间距对土壤脱盐效果的影响,结果表明暗管间距为 15 m 时土壤脱盐效果较好。刘玉国等[19]研究了干旱区暗管排水对不同程度盐碱化土壤脱盐效果的影响,结果表明轻度和中度盐渍化农田盐分由表聚型向脱盐型转变。李显溦等[20]利用 HYDRUS 软件对暗管排水的水盐运动参数进行了校验,结果表明模拟值与实测值吻合度较高,可以较好地描述暗管排水、排盐过程中的土壤水盐动态。李亮等[21]利用 HYDRUS 模型对土壤水盐的迁移进行了模拟分析,结果表明模型对土壤含水率和含盐率运移的模拟具有较高精度,反映出盐分积聚和水分运移规律。

上述研究均表明暗管排水可有效降低地下水位和土壤盐分含量,土壤脱盐效果较好。但暗管排水与膜下滴灌相结合的水盐运移问题,至今尚不清楚,阻碍了暗管排水技术在膜下滴灌条件下的推广和应用,而模型模拟是研究和解决该问题的重要工具。因此,为探索膜下滴灌条件下暗管排水的水盐分布特征及运移规律,本文利用 HYDRUS 模型对暗管排水模型试验的水盐运移规律进行模拟验证,分析膜下滴灌暗管排水条件下土壤水盐分布特征和动态变化规律,揭示膜下滴灌条件下暗管排水排盐效果,为干旱区暗管排水技术的推广提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验在新疆石河子大学水利建筑工程学院水利与土木工程实验中心进行,试验用模型由混凝土砌筑而成,长、宽、高分别为 5 m、2 m、1.8 m。模型装置分为土槽和蓄水池,长、宽、高分别为 5 m、1 m、1.8 m,底部以连通管模拟控制地下水位,其管径为 3.2 cm,管壁上开 5 mm 圆孔,开孔率为 10%,包裹透水无纺布。埋设 2 根暗管,管径为 9 cm,埋深 1 m,间距 4 m,倾斜度为 5‰,暗管上开 5 cm×0.2 cm 矩形孔,开孔率为 6%。暗管外包裹一层透水无纺布,无纺布外铺设 3~5 cm 细砂和粗砂,细砂平均粒径为 0.35~0.5 mm,粗砂平均粒径为 5~10 mm,细砂位于无纺布周围,粗砂铺设于细砂上方。连通管和暗管均为 PVC 管。采用单翼迷宫式滴灌带,滴头流量为 3.6 L · h^{-1},布管方式采用大田普遍使用的一膜三管铺设方式,共铺设 6 条滴灌带。通过塑料水桶与水泵形成供水系统,利用水表控制灌溉水量,暗管排水模型剖面示意图如图 1 所示。

试验用土为新疆生产建设兵团农八师 146 团盐荒土,土壤初始含盐量为 14 g · kg^{-1},根据中国盐土分类标准,该土壤为重度盐碱土。试验前将土风干,过 5 mm 土筛除去杂质,将土壤混和均匀形成均质土壤,分层进行装填,每 10 cm 夯实一次,保证每次压实度基本相同,装填后土壤容重为 1.48 g · cm^{-3},第一次灌水后略有沉降为 8 cm,经计算土壤容重达到了 1.52 g · cm^{-3}。试验用水为地下水,其矿化度为 0.25 g · L^{-1},灌溉结束后地下水矿化度增加到 2.7 g · L^{-1}。

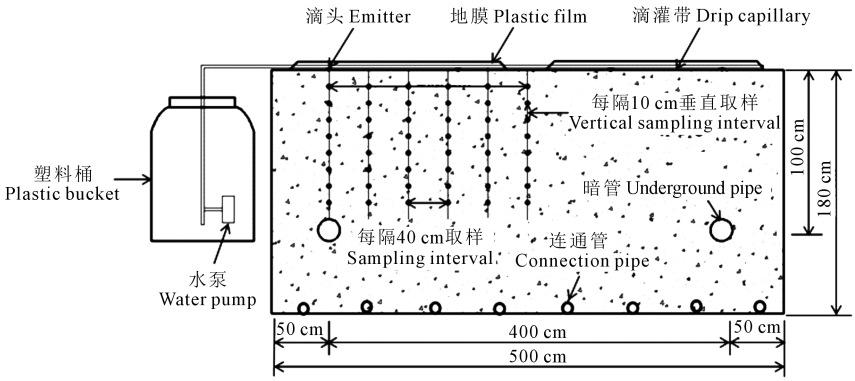

图 1 暗管排水模型剖面示意图

Fig.1 Diagram of model profile subsurface drainage pipe

1.2 试验设计及方法

试验前在蓄水池中注入水,水位控制在 1.2~1.4 m范围内,保证下层土壤基本接近饱和状态。试验开始通过水泵持续灌水,至暗管开始排水即停止灌水并记录灌水量。为保证水分和盐分在土壤内重新分布且时空变化较小,每次灌水时间间隔基本相同,共进行 3 次灌水淋洗,灌溉排水参数如表 1 所示。暗管排水结束后 24 h 内在水平方向距离暗管 0、40、80、120、160、200 cm 处分别进行取样,纵向每隔 10 cm 取一个样,取样总深度为 80 cm,取样点如图 1 所示。将所取土样在 105℃下烘干 8 h,用烘干法测定其含水量,将烘干土样研磨、过 0.5 mm 土壤筛,按土水比为 1∶5 配置成溶液,用玻璃棒搅拌、静置使上层液澄清,用电导率仪测定其电导率,用干燥残渣法确定土壤含盐量与电导率之间的标定关系式,如公式(1)所示。

$$y = 0.0035EC + 0.8972 \tag{1}$$

式中,y 为土壤含盐量(%);EC 为电导率($\mu s \cdot cm^{-1}$)。

1.3 模型建立

1.3.1 HYDRUS 模型介绍 HYDRUS 软件是一种可用来模拟水流和溶质在非饱和多孔隙介质中运移的数值模型[22],是利用土壤物理参数模拟水、热及溶质在非饱和土壤中的一维(二维)运动的有限元计算机模型[23]。该模型能够较好地模拟水分、溶质与能量在土壤中的分布以及时空变化和运移规律。

1.3.2 模型的基本方程

土壤水分运动方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \tag{2}$$

式中,θ 为土壤体积含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$);$K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率($cm \cdot d^{-1}$);t 为时间(d),z 为土壤深度(cm)。

表 1 灌溉排水参数

Table 1 The irrigation and drainage parameters

灌水日期 Irrigation date	灌溉历时/h Irrigation duration	灌溉水量/m^3 Irrigation amount	排水历时/h Drainage duration	灌溉定额/mm Irrigation quota
2017-08-16	19	1.68	8	336
2017-09-02	3.5	0.32	24	64
2017-09-17	4.5	0.4	36	84

土壤水力参数 van Genuchten 模型

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \tag{3}$$

$$K(\theta) = K_s \theta_e^l \left[1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{m}})^m\right]^2 \tag{4}$$

式中,K_s 为土壤饱和导水率($cm \cdot d^{-1}$);θ_e 为土壤相对饱和度($cm^3 \cdot cm^{-3}$);θ_r 为土壤残余体积含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$);θ_s 为土壤饱和体积含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$);$\theta(h)$ 为土壤体积含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$);h 为负压水头(cm);$K(\theta)$ 为土壤非饱和导水率($cm \cdot h^{-1}$);n、m、α 均为经验参数。其中 $m = 1 - 1/n$,α 是与土壤物理性质有关的参数;l 为经验拟合参数,通常取平均值 0.5。

盐分运移基本方程

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial(q_i C)}{\partial x_i} \tag{5}$$

式中,C 为溶质浓度($g \cdot cm^{-3}$);q_i 为水通量($cm \cdot d^{-1}$);D_{ij} 为扩散度($cm^2 \cdot d^{-1}$);x_i 为空间坐标($i = 1, 2$),$x_1 = x$,$x_2 = z$,$D_{11} = Dxx$,$D_{12} = Dxz$。

1.4 模型的初始条件和边界条件

土壤水分上边界采用零通量边界,由于地膜的覆盖忽略蒸发的影响。滴头处采用第一类边界条件,输入通过滴头处的通量值,包括灌水量,其他边界均为零通量边界。由于在试验期间没有降水,因此忽略降雨量的影响。上边界初始含水率为 0.025 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,下边界初始含水量为 0.41 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,

上下边界初始含盐量均为 14 g · kg^{-1},灌水过程中,上边界为常压,待灌水结束,上边界为零通量。整个灌溉过程中,暗管边界设为渗透边界,将土壤含水率和土壤含盐量的实测值及模拟值分别进行对比,相应调整土壤水力特性参数,使两者充分接近为止,修正的模型参数如表 2 所示。修正后的基本参数不变,以每次灌水量和灌水时间的试验数据进行模型的验证。模拟值和实测值的吻合程度采用决定系数 R^2 和均方根误差 *RMSE* 指标进行评价,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(S_i - M_i)^2} \qquad (6)$$

式中,S_i,M_i 分别为模拟值和实测值;N 为数值比较值,无量纲。

表 2　土壤物理特性参数

Table 2　Parameters of soil physical properties

参数 Parameter	θ_r /(cm^3 · cm^{-3})	θ_s /(cm^3 · cm^{-3})	K_s /(cm · d^{-1})	α/cm	n	l
初始值 Initial value	0.033	0.41	106.1	0.075	1.89	0.5
修正值 Correction value	0.028	0.41	108.3	0.089	2.28	0.5

注:θ_r 为残余土壤体积含水率;θ_s 为饱和土壤体积含水率;K_s 为饱和导水率;α、n 为土壤水分特征曲线拟合参数;l 为孔隙连通性参数。

Note: θ_r is residual soil water content; θ_s is saturated soil volume water content; K_s is saturated water conductivity; α and n are fitting parameters of soil moisture characteristic curve; l is pore connectivity parameter.

1.5　模型模拟

为探索干旱区暗管排水条件下土壤水分和盐分的动态变化规律,将土槽简化为二维模型进行计算模拟,计算区域为一个高(垂直方向)180 cm、长(水平方向)500 cm 的矩形区域。模型模拟 0~80 cm 深度范围土壤水分和盐分变化特征,模拟时间共计 45 d,采用变时间步长剖分方式,根据收敛迭代次数调整时间步长。设定初始时间步长为 0.001 d,最小步长为 0.0001 d,最大步长为 5 d;土壤含水量容许偏差为 0.001,压力水头容许偏差为 1 cm。

2　结果分析

2.1　灌水后的水盐分布特征及变化规律

图 2(a),(b),(c)分别为 3 次灌水后不同剖面处的土壤盐分动态变化特征。由图 2 可知,每次灌水后 0~30 cm 土层内盐分下降速率较快,30~80 cm 土层内盐分下降速率缓慢。各土层内盐分含量随土壤深度的增加而增加,距离暗管不同间距处各土层盐分含量变化趋势一致,但相同剖面处盐分含量存在差异。水平距离暗管 200 cm 处各土层内盐分含量最大,这是由于土壤盐分随水流在运动过程中受到对流弥散作用的影响,且纵向弥散作用大于横向弥散作用,水平距离暗管间距越大,其剖面内盐分被灌溉水淋洗到暗管内的越少。总体来看,每次灌水后盐分含量在垂直方向上随土壤深度的增加盐分含量下降速率减缓;水平方向上距离暗管间距越大,各剖面处盐分含量相对较大,土体脱盐率较小。3 次灌水淋洗过程中,各剖面处土壤脱盐率从大到小依次为第 2 次灌后、第 1 次灌后、第 3 次灌后,第 1 次灌水后水平距离暗管不同间距处盐分含量存在明显差异,这是由于试验土样经筛分、分层装填后存在大孔隙,灌水后形成孔隙流使盐分得不到充分的溶解,只有少量盐分随水流流入暗管,因此,第 1 次灌水后盐分含量随土壤深度的变化趋势较为平缓。由图 2(b)、(c)可知,第 2 次灌水和第 3 次灌水后土壤盐分含量随土壤深度的增加呈现先减小后增加的趋势,距离暗管不同间距处盐分含量变化规律不明显,距离暗管 200 cm 处各土层内盐分含量最大,表层 0~20 cm 土层内盐分含量明显高于 20~40 cm 土层盐分含量,说明地下水埋深较浅时强烈蒸发很容易使盐分随水分通过毛细管上升至表层,出现明显的盐分表聚现象。20~40 cm 土层内盐分含量下降速率较快,盐分含量下降至 2 g · kg^{-1}左右,40~60 cm 土层内盐分呈现逐渐增大的趋势,60~80 cm 土层内盐分含量处于稳定变化的趋势,土壤盐分下降速率变缓,脱盐效果不明显,这是由于靠近暗管周围土壤内的水分含量接近饱和,水势梯度减弱,减少了与地下水之间的水量交换和盐分淋洗量;随着灌溉次数的增加,地下水中盐分含量增加,溶质浓度变大,暗管周围土体与地下水中的盐分交换量也减小,说明地下水矿化度大小与土壤脱盐率以及暗管排盐量有着密切的关系。第 3 次灌水后,0~80 cm 土壤内总盐分含量下降速率较快,各剖面处盐分的质量分数下降至 8 g · kg^{-1}以下,表明暗管排水技术在膜下滴灌条件下的土壤水盐运移具有较好的变化规律,对土壤盐分的淋洗效果较好。

图 3 为 3 次灌水后各剖面处土壤水分动态变化特征。由图 3 可知,水平距离暗管不同间距处各土层内水分含量随土壤深度的增加变化趋势基本一致,均随土壤深度的增加而增加。0~20 cm 土层内水分含量变化较大,这是由于表层土壤受到强蒸发作用的影响,另外,上层土壤水分在重力势的作用下

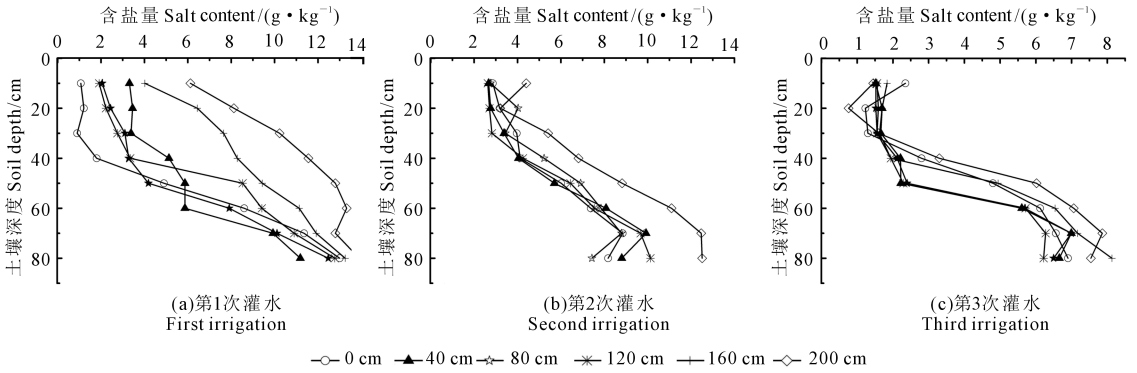

图 2　3 次灌水后土壤不同剖面处的盐分含量变化

Fig.2　Changes of salt content in different profiles of soil after three times of irrigation

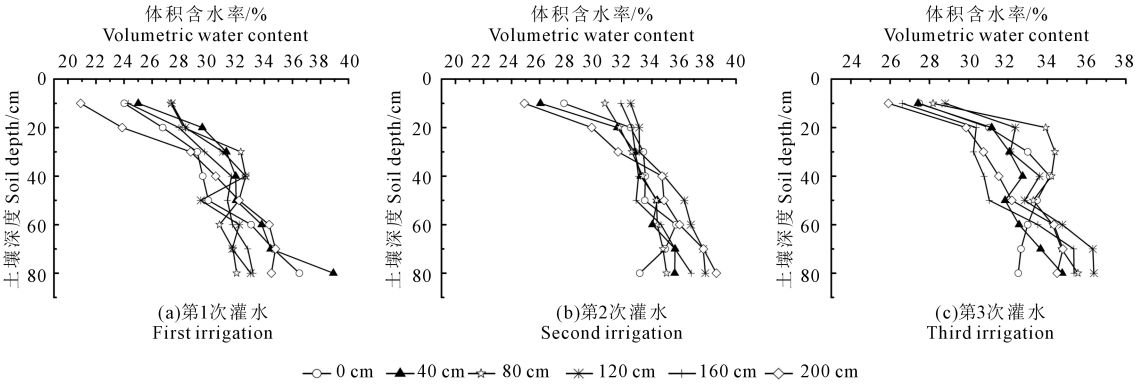

图 3　3 次灌水后土壤不同剖面处的水分含量变化

Fig.3　Changes of water content in different profiles of soil after three times of irrigation

不断向下运移。垂直方向 20~80 cm 土层内各剖面处的水分变化趋势一致,随着土壤深度的增加逐渐增加,水分含量差异不明显,80 cm 土层内含水量几乎接近饱和状态。水平方向距离暗管不同间距处各剖面的水分含量存在明显差异,且没有明显的变化规律,这可能是受覆膜边界条件、蒸发作用、地下水的影响。由图 3(b)、(c)可以看出,水平距离暗管不同间距处各土层内含水量随土壤深度的增加而增加,但水平距离暗管 0 cm 处在 60~80 cm 土层内呈减小趋势,说明暗管排水可以降低暗管上方土壤水分含量。总体来看,3 次灌水后暗管周围土壤内含水量较高,基本接近饱和含水率,垂直方向上变化规律较好,均随土壤深度的增加而增加,水平方向上距离暗管不同间距处各剖面含水量差异不大。

2.2　模型验证

根据构建的数值模型,输入土壤水力特性参数,同时设置时间、空间离散化处理参数后运行计算,并进行模型可靠性验证分析。通过比较第 1 次灌水、第 3 次灌水后距离暗管不同间距处各土层内含水量和含盐量的实测值与模拟值,两者差异较小且总体变化趋势一致,如图 4、5、6 所示。第 1 次灌水后距离暗管不同间距处土壤盐分模拟值与实测值的 *RMSE* 分别为 0.364 和 0.632,R^2 分别为 0.995 和 0.992,距离暗管不同间距处土壤水分模拟值与实测值的 *RMSE* 分别为 1.024 和 1.324,R^2 分别为0.906 和 0.921;第 3 次灌水后距离暗管不同间距处土壤盐分模拟值与实测值的 *RMSE* 分别为 0.505 和 0.197,R^2 分别为 0.996 和0.994。由此看出,水平距离暗管不同间距处土壤盐分和水分实测值与模拟值的 *RMSE* 均较小,R^2 均较大,表明两者之间具有较好的一致性。从图 6 可以看出,尽管水分变化在某些观测点上存在一定的误差,但总体规律基本一致。

图 4(a)和(b)表示第 1 次灌水后水平距离暗管 0 cm 和 200 cm 处各剖面盐分含量实测值和模拟值的变化趋势。从决定系数和均方根来看,模拟值和实测值吻合较好,第 1 次灌水结束后,水平距离暗管 0 cm 处 0~30 cm 土层内盐分变化较小,盐分含量下降较大,实测值和模拟值存在较大的误差,是由于灌水过程中强烈蒸发使盐分随毛管水上升至表面,造成实测值偏大,40~80 cm 土层内盐分迅速增加,这是由于在灌溉水流的扩散作用下,盐分通过对流、弥散作用不断向下迁移。水平距离暗管 200 cm 处 0~40 cm 土层内盐分含量呈线性增长趋势,实测值与模拟值吻合度较好,50~80 cm 土层内盐分含量

相对保持稳定状态。图 5(a)和(b)显示第 3 次灌水后距离暗管不同剖面处盐分含量实测值和模拟值数据,决定系数和均方根均显示模拟值和实测值吻合很好,水平距离暗管 200 cm 处 0~20 cm 土层内出现盐分表聚现象,是由于水平距离暗管 200 cm 处没有覆盖地膜,蒸发作用使盐分通过毛细管上升至表面,20~60 cm 土层内盐分含量增加速率较快。水平距离暗管 0 cm 处 60~80 cm 土层内盐分含量呈下降趋势,而水平距离暗管 200 cm 处 60~80 cm 盐分含量保持不变。图 4 和图 5 相比较,可以看出经过 3 次灌水后盐分总含量明显减小,说明膜下滴灌与暗管排水相结合的技术可以有效地改良盐碱地。

图 6(a)和(b)为第 1 次灌水后水平距离暗管 0 cm 和 200 cm 处各剖面土壤水分含量实测值和模拟值变化,由图 6 可以看出,土壤水分的运动具有较好的规律,随着土层深度的增加呈现逐渐增加的趋势,水平距离暗管 0 cm 和 200 cm 处表层 20 cm 范围内土层含水量相差较大,这是由于水平距离暗管 200 cm 处没有覆膜,受蒸发影响大,且暗管对水分的运动影响相对较小。从相关系数和均方根来看,实测值和模拟值吻合好,是因为土壤筛分后,分层装填,比较符合达西定律及土壤水盐运动方程的均匀连续性假设。

2.3　模型应用

利用实测值和模拟值修正后的参数进行更长时间序列的模拟计算,共进行 6 次灌水的模拟,总时长为 90 d。图 7(a)和(b)表示距离暗管不同位置处各土层内盐分含量变化曲线。图 7(a)显示 0~40 cm 土层内盐分含量<2 g·kg^{-1},达到了非盐化土水平,40~80 cm 土层内盐分含量随着深度的增加呈对数型增长趋势,整体盐分质量分数<8 g·kg^{-1},达到中度盐化水平。图 7(b)显示距离暗管不同间距处盐分含量呈现波动变化,这是由于覆膜造成边界条件的变化,无膜覆盖处土壤水分既受重力作用的影响,又受到大气环境的影响,而覆膜位置处土壤水分受大气环境的影响较小,运移主要依靠重力势和基质势,因此土壤中的可溶性盐在对流、弥散和水流运移作用下呈现波动变化。在水平距离暗管间距 150 cm 范围内,20~40 cm 深度土层内盐分含量趋于 1 g·kg^{-1}左右,60 cm 深度土壤内盐分含量趋

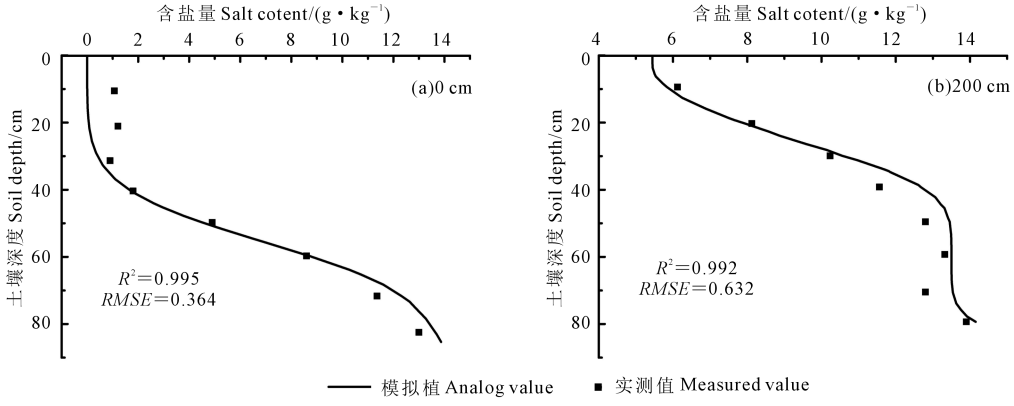

图 4　第 1 次灌水后土壤盐分变化

Fig.4　Changes of soil salt content after the first irrigation

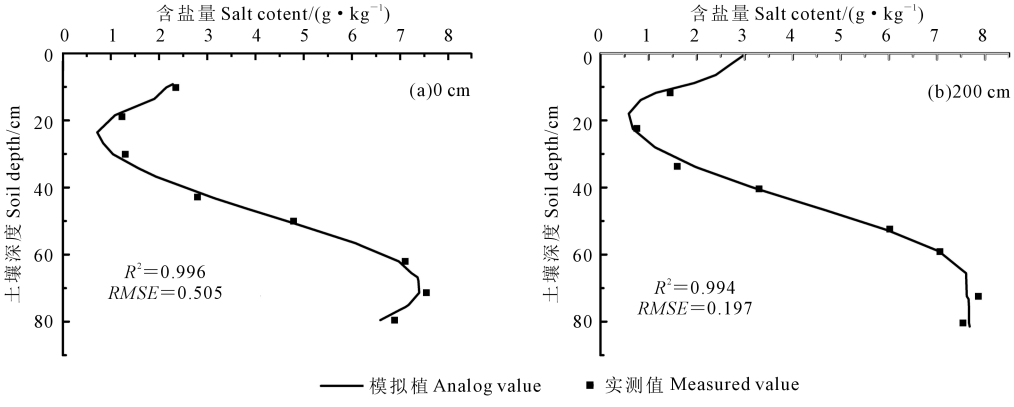

图 5　第 3 次灌水后土壤盐分变化

Fig.5　Changes of soil salt content after the third irrigation

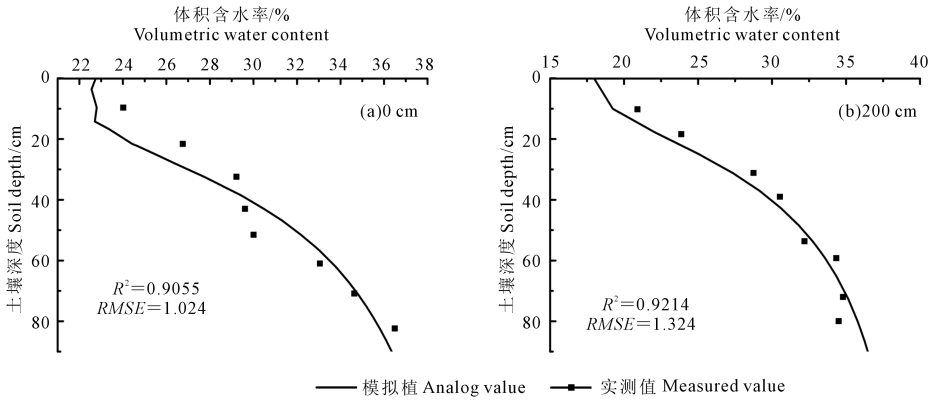

图 6 第 1 次灌水后土壤水分变化

Fig.6 Changes of soil moisture after the first irrigation

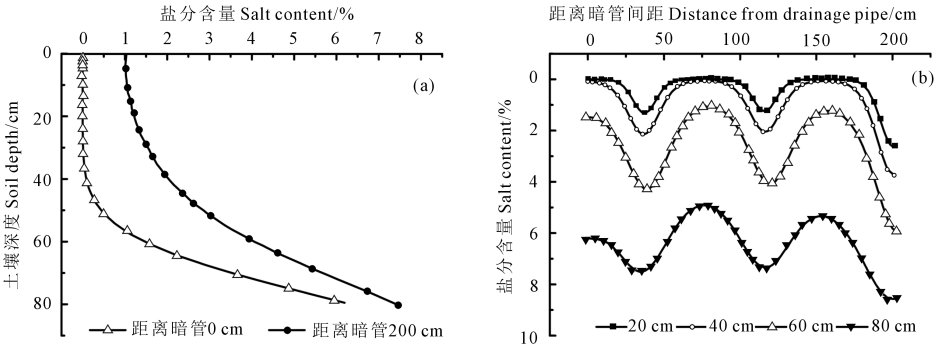

图 7 模拟不同剖面出盐分变化曲线

Fig.7 Simulation curve of salt change at different profiles

于 2~4 g·kg^{-1}变化,80 cm 深度土层内盐分含量在 6~8 g·kg^{-1}范围内变化,各土层内盐分含量在水平距离暗管 200 cm 处(两暗管中间位置)相对较大。

3 结 论

1)通过膜下滴灌与暗管排水相结合的模型试验,经过 3 次灌水淋洗后,土槽内总盐分含量降低较快,表层 0~20 cm 土壤盐分含量下降速率最大,达到了非盐化土水平,膜下滴灌与暗管排水技术的结合可以有效地降低土壤盐分含量。

2)利用 HYDRUS 模型对膜下滴灌暗管排水条件下的水盐运移规律进行了模拟,土壤水分含量和盐分含量的实测值与模拟值具有很好的一致性,模型能够较好地模拟土壤水盐分布特征以及随时间和土壤深度变化的规律,这将为干旱区膜下滴灌暗管排水条件下的水盐运移理论研究提供帮助。

3)基于修正的模型参数进行 HYDRUS 模型的应用,通过时长为 90 d 的灌水模拟试验,发现表层 40 cm 范围内盐分含量下降至 2 g·kg^{-1},已达到非盐化土水平。暗管排水条件下灌水排盐可以有效地保证作物的正常生长,膜下滴灌与暗管排水相结合的技术可高效地改良盐碱地。

参 考 文 献:

[1] 孙法圣,程品,张博.HYDRUS1-D 在土壤明渠排水洗盐模拟中的应用[J]. 节水灌溉,2014,(2):44-47.

[2] 陈小兵,杨劲松,杨朝晖,等. 基于水盐平衡的绿洲灌区次生盐碱化防治研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):32-37.

[3] Valipour M. Future of the area equipped for irrigation[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2014, 60(12):1641-1660.

[4] Chen W, Hou Z, Wu L, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12):2001-2008.

[5] Assouline S, Möller M, Cohen S, et al. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: bell pepper case study[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5):1556-1568.

[6] Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols[J]. Irrigation Science, 2008, 26(5):439-450.

[7] 徐飞鹏,李云开,任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. 农业工程学报, 2003,19 (1):25-27.

[8] 刘洪亮,褚贵新,赵风梅,等. 北疆棉区长期膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化与次生盐渍化趋势分析[J]. 中国土壤与肥料,2010,(4):12-17.

[9] 殷波,柳延涛. 膜下长期滴灌土壤盐分的空间分布特征与累积效应[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):228-231.

[10] 王少丽,杨继富,李杰,等. 新疆盐渍化灌区水盐平衡现状及对策[J]. 中国农村水利水电,2006,(4):12-15.

[11] 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农

业工程学报,2008,24(8):15-19.
[12] Gates T K, Grismer M E. Irrigation and drainage strategies in a salinity affected regions[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1989,115(2):87-99.
[13] 刘建刚,罗纨,贾忠华,等. 从水盐平衡的角度分析控制排水在银南灌区实施的可行性[J]. 农业工程学报,2005,21 (4):43-46.
[14] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.
[15] 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.
[16] 张展羽,张月珍,张洁,等. 基于 DRAINMOD-S 模型的滨海盐碱地农田暗管排水模拟[J]. 水科学进展,2012,23(6):782-789.
[17] 王洪义,王智慧,杨凤军,等. 浅密式暗管排盐技术改良苏打盐碱地效应研究[J]. 水土保持研究,2013,20(3):269-272.
[18] 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.
[19] 刘玉国,杨海昌,王开勇,等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. 农业工程学报, 2014,30(16):84-90.
[20] 李显溦,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.
[21] 李亮,李美艳,张军军,等. 基于 HYDRUS-2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):66-71.
[22] 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.
[23] Roberts T, Lazarovitch N, Warrick A W, et al. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(1):233-240.

(上接第 223 页)

自净能力不高,因此处于高负荷-低承载能力区间,但下游的阿拉善盟的水质评分劣于张掖、酒泉两市,主要是由于下游河道水量较少,来自上游的污染物累加导致下游水质较差;水域和水流方面,三地均处于高负荷-低承载能力区间,主要是由于水资源开发利用率过高、农业用水挤占生态用水等原因。需要采取调控手段在水量、水域、水流等方面进行“增强承载”和“卸荷”,例如实施节水农业措施,提高污水处理水平,提高河、湖、湿地保留力度、荒漠化防治等。

目前关于水资源承载系统评价的指标选取和方法尚未形成统一标准,水资源荷载系统不均衡的问题在不同流域有不同的特征,需要进一步完善评价指标体系,探索更加符合水资源荷载系统特点的评价模型。

参 考 文 献:

[1] 陈雷.保护好生命之源、生产之要、生态之基—落实最严格水资源管理制度[J].求是,2012,(14):38-40.
[2] Harris J M,Kennedy S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues[J].Ecological Economics,1999,29(3):443-461.
[3] Rijsberman, Michiel A,Frans H M van de Ven. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental Impact Assessment Review,2000,20(3):333-345.
[4] Koop S H A, V Leeuwen C J. Assessment of the sustainability of water resources management: a critical review of the city blueprint approach [J]. Water Resources Management,2015,29(15):5649-5670.
[5] 王浩,秦大庸,王建华,等.西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J].自然资源学报,2004,19(2):151-159.
[6] 谢高地,周海林,甄霖,等.中国水资源对发展的承载能力研究[J].资源科学,2005,(4):2-7.
[7] 王建华,翟正丽,桑学锋,等.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J].水利学报,2017,48(9):1-7.
[8] 何仁伟,刘邵权,刘运伟.基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例.[J].地理科学,2011,31(11):1376-1382.
[9] 金菊良,洪天求,王文圣.基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型.[J].水力发电学报,2007,26(4):22-28.
[10] 袁伟,楼章华,田娟.富阳市水资源承载能力综合评价[J].水利学报,2008,39(1):103-108.
[11] 周亮广,梁虹.基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究——以贵阳市为例[J].自然资源学报,2006,21(5):827-833.
[12] 宰松梅,温季,仵峰,等.河南省新乡市水资源承载力评价研究[J].水利学报,2011,42(7):783-788.
[13] 周云哲,粟晓玲.基于指标规范化的正态云模型的水安全评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(4):18-24.
[14] 信桂新,杨朝现,杨庆媛,等.用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J].农业工程学报,2017,33(1):238-249.
[15] 邹志红,孙靖南,任广平.模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J].环境科学学报,2005,25(4):552-556.
[16] 杨志超,张成龙,葛乐,等.基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J].电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
[17] Li D Y. Knowledge representation in KDD based on linguistic atoms [J]. Journal of Computer Science and Technology, 1997, 12(6):481-496.
[18] 张杨,严金明,江平,等.基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J].农业工程学报,2013,29(22):252-258.
[19] 冯学慧.基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J].水电能源科学,2015,33(11):57-60.
[20] 江辉,张清联,彭建春.基于改进云物元模型的风电场电能质量评价[J].电网技术,2014,38(1):205-210.
[21] 龚艳冰.基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):169-174.
[22] 李陶,李付伟,李向新,等.地震灾害风险的正态云模型评价——以毕节市为例[J].中国安全科学学报,2015,25(10):166-171.
[23] 李祚泳,王文圣,汪嘉杨.水资源水环境模型智能优化[M].北京:科学出版社,2014:129,132.