基于 HYDRUS-2D 模型的膜下滴灌暗管排水棉田土壤盐分变化

刘洪光，白振涛，李开明

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，石河子 832000；2. 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室，石河子 832000）

摘　要：为研究膜下滴灌暗管排水条件下棉田土壤盐分变化规律，该研究基于新疆 122 团盐碱地暗管排水试验，通过膜下滴灌淋洗，监测 0～200 cm 土层土壤盐分变化，并应用 HYDRUS-2D 数值模型，模拟分析了暗管排水条件下，盐渍化棉田在 2013 和 2014 年生育周期内和秋季返盐阶段土壤盐分变化情况。结果表明：模拟值与实测值之间吻合度较高，模型可用于预测盐碱地土壤层剖面盐分含量变化。模拟结果显示，棉花生育期内滴灌条件下，盐分持续下降；棉花收获后土壤表层开始返盐；2013 和 2014 年棉花吐絮期土壤含盐量与初始含盐量相比，在膜下，0～80 cm 土层平均脱盐率分别达到了 41.11%和 55.56%；膜下及膜间，0～80 cm 土层平均脱盐率分别达到了 14.05%和 17.88%；棉花收获后，土壤表层返盐明显，但与初始含盐量相比仍较低，0～80 cm 土体盐分分别平均下降了 5.55%和 10.15%，0～200 cm 土体盐分分别平均下降了 2.58%和 4.96%，说明暗管控制条件下，使用滴灌淋洗和暗管排盐的模式，土体内的盐分总量呈现降低趋势。研究可为西北内陆干旱区暗管排盐技术和膜下滴灌的推广和应用提供理论支撑和科学指导。

关键词：土壤；盐分；棉花；膜下滴灌；暗管排水；数值模拟；HYDRUS-2D

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.016

中图分类号：S275.6; S277.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-6819(2021)-2-0130-12

刘洪光，白振涛，李开明．基于 HYDRUS-2D 模型的膜下滴灌暗管排水棉田土壤盐分变化[J]．农业工程学报，2021，37(2)：130-141．　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.016　http://www.tcsae.org

Liu Hongguang, Bai Zhentao, Li Kaiming. Soil salinity changes in cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage using HYDRUS-2D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 130-141. (in Chinese with English abstract)　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.016　http://www.tcsae.org

0　引　言

新疆地区在大面积推广膜下滴灌技术之后，逐渐荒废了原有的排水渠，形成了“滴灌无排”的模式[1-2]。该模式短期内可以湿润根系层，使得根系层暂时脱盐，但长期会使新疆地区土壤次生盐渍化加剧[3-4]。刘新永等[5]研究发现，棉花生育期结束后，0～60 cm 土层盐分都有增加，在膜间 0～20 cm 土层盐分强烈累积。牟洪臣等[6]研究发现小定额灌溉不会产生深层渗漏，盐分无法排除土体，大量的盐分会在深层聚集。弋鹏飞等[7]研究发现土壤盐分随膜下滴灌使用年限增长呈逐渐累积的趋势，且累积的盐分逐渐向地表迁移。膜下滴灌是局部灌溉，没有深层渗漏，也不具备排盐效果，使用膜下滴灌多年以后，盐分连年累积，产量明显下降，因此需要新的技术手段提高排盐效率。

滴灌淋洗配套排水措施是非常有效的盐碱地改良方法，排水措施主要有明沟排水、暗管排水和竖井排水等[8]，其中明沟排水和暗管排水最为常用。暗管排水与明沟排水相比，不仅具有占地少、零污染、寿命长等优点，而且满足农业机械化、集约化发展趋势，在新疆地区应用的前景广阔[9-10]。Talukolaee 等[11]通过对伊朗北部 1 年生作物稻田多样化的研究，发现地下排水系统通过影响土壤的饱和导水率和有效孔隙率来影响土壤结构。徐友信等[12]在河北省沿海盐碱区附近的地下埋下暗管进行排水试验，结果表明，暗管排水能促进盐离子的浸出，埋设暗管区域的脱盐率高于非埋设区域。此外，暗管排水不仅能有效控制地下水位[13-14]，降低土壤盐分含量[15-16]，缓解沿海地区高水位引起的土壤盐渍化问题[17]，而且当排水暗管间距小于或等于 12 m 时也可以提高土壤强度[18]。Li 等[19]通过大田试验及数值模拟研究干旱区膜下滴灌暗管排水土壤水盐运动变化及脱盐量，发现使用 1 a 后土壤表层脱盐明显，而农田整体脱盐不显著。

研究地区不同，地下水埋深、土壤类型、气候、地形、作物的种植模式等条件不同，需要的暗管铺方式、间距、深度以及淋洗压盐方案等指标也会有所差异。在干旱区利用暗管排水可以有效地降低土壤中的盐分，但是田间试验所需的面积大、投资费用高、施工量大。和田间试验相比，利用数值模拟来获取和验证这些信息将会更加便捷、有效。李显溦等[20]利用 HYDRUS-2D 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-2D 模型对土壤水盐的迁移进行了模拟分析，结果表明模型

收稿日期：2020-07-22　　修订日期：2021-01-10

基金项目：国家“十三五”重点研发计划（2016YFC0501406）；国家自然科学基金项目(51669029)；南疆重点产业创新发展支撑计划项目（2020DB001）；石河子大学科技特派员项目（KJTP202017）；八师石河子市科技合作计划项目（2019ZH13）

作者简介：刘洪光，博士，正高级实验师，博士生导师，研究方向为干旱区节水灌溉与排水理论与技术。Email：liuhongguang-521@163.com

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。莫彦等[22]基于 HYDRUS-2D 构建并验证了玉米地下滴灌开沟播种模型，确定了适宜于此种模式的滴灌带深埋、开沟深度、灌水量等技术参数。数值模拟技术不仅可以根据不同土壤类型和气象条件等，对土壤水盐运移进行模拟，研究土层内水盐的连续性变化规律，还可以预测未来土层内水盐的去向和动态变化。

为了解决“有灌无排，土体积盐”的问题，本研究选择地下水位季节性升高、土壤盐渍化严重的新疆塔城地区 122 团，通过 2 a 的持续监测，研究在膜下滴灌条件下，暗管排水对盐渍化棉田盐分运移产生的影响，并利用 HYDRUS-2D 模型对该盐碱地农田土壤盐分运移进行模拟，分析盐碱地棉花生育周期内和秋季返盐期间土壤盐分变化情况，进一步量化农田土体的脱盐情况，揭示暗管排水条件下膜下滴灌棉田土壤盐分变化规律，旨在为西北内陆干旱区暗管排盐技术和膜下滴灌的推广和应用提供理论支撑和科学指导。

1　试验材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆生产建设兵团农八师 122 团，地理坐标为 44°37′～44°48′N，85°27′～85°41′E。试验区夏季炎热，冬季寒冷，极端最高气温达 43.1 ℃，极端最低气温达-42.3 ℃，9、10 月份降温迅速，昼夜温差大，光热资源丰富，年平均日照时数 2 861.6 h，年均降水量 141.8 mm，年均潜在蒸发量 1 826.2 mm。试验区地势平坦，盐碱化现象严重，土壤质地基本属于砂壤土。试验区气候干燥和蒸发强烈，由于灌溉不当、排水不畅，引起地下水位上升，土壤母质和地下水中所含的盐分随着土壤中毛细水的上升而集聚在地表，导致该地区土壤次生盐渍化严重。试验区的土壤初始含盐量基本上在 10 g/kg 以上，按新疆盐碱土分类标准[23]，属于重度盐化土。

1.2　试验设计

在大田中埋设暗管，暗管内径为 70 mm，埋深为 2.2 m，间距为 48 m，与地表平行。灌溉水取自玛纳斯河西岸大渠，试验区与大渠之间有一条隔水沟，其作用是降低地下水位，减缓大渠对试验区地下水位的影响，研究区运用暗管排水系统，暗管排出的水汇流到集水沟，研究区剖面图见图 1。在研究区使用单翼迷宫型滴灌带进行滴灌，滴头流速为 3.2 L/h，滴灌模式为一膜两管六行，地膜厚度为 0.015 mm，宽度为 2 m，膜间距为 40 cm，如图 2 所示。本试验种植作物为棉花，品种为创杂 100 号，采用膜下滴灌，作物系数采用 FAO-56 建议的棉花标准作物系数，根据当地灌溉经验确定灌溉制度，如表 1 所示。第 1 年 2013 年 4 月 15 日播种，9 月 30 日收获，第 2 年 2014 年 4 月 10 日播种，9 月 20 日收获。

1.3　测试指标及方法

考虑灌溉周期与作物生育期，取样时间分别设定为 2013 年 5 月 25 日（苗期）、2013 年 7 月 20 日（花期）、2013 年 9 月 30 日（吐絮期）、2014 年 5 月 20 日（苗期）、2014 年 7 月 25 日（花期）和 2014 年 9 月 20 日（吐絮期）。为了研究排盐效果随距暗管距离的变化情况，在研究区棉田地块中间选取 3 个水平距离（分别为垂直于暗管上方 8、16、24 m 处）和 10 个土层深度（分别为 0～20、20～40、40～60 、60～80、80～100、100～120、120～140、140～160、160～180 和 180～200 cm）设置取样点，为尽量消除试验误差，每个采样点设置 3 个重复，3 个重复之间的水平距离为 3 m，试验结束后取 3 组试验结果的平均值，取样点均在覆膜处。

将取回的土样按 1∶5 的土水比配置溶液，使用雷磁 DDS-11A 型数显电导率仪（上海仪电科学仪器股份有限公司）测定土壤样品浸提液的电导率 EC（Electrical Conductivity，mS/cm），其中土壤浸提液电导率与土壤含盐量之间的关系为

$$Q = 3.72\mathrm{EC}_{1:5} + 0.44, R^2 = 0.98 \qquad (1)$$

式中 Q 为土壤含盐量，g/kg；$\mathrm{EC}_{1:5}$ 为土壤浸提液的电导率，mS/cm。

土壤脱盐率[24]为土壤盐分初始值与土壤盐分终值的差值与土壤盐分初始值之比。

新疆冬季积雪于 4 月上旬融化，上层土壤基本处于饱和状态。根据布置在研究区南侧和北侧的观测井观测，研究区地下水位深度在灌溉季节（4—10 月）的波动范围是 1.75～2.10 m，非灌溉季节地下水位深度均在 2.20 m 以下，如表 2 所示。2013 和 2014 年分别对暗管排水、观测井中地下水和西岸大渠中灌溉水取样各 3 次，每次取 3 瓶，每瓶 500 mL，并采用烘干法测定矿化度，取平均值，其中地下水取样深度取决于地下水位高度。2013 年 4 月 15 日播种后，采集各采样点的初始盐含量，为简化模型的初始条件，计算和测定各土层的平均含盐量和初始含水率（表 3）。建立 HYDRUS-2D 模型模拟棉花生育期的盐分迁移和秋季返盐期盐分迁移，盐分模拟值通过 0～200 cm 土层土壤剖面盐分实测值进行验证。

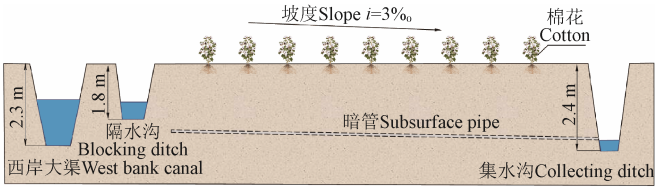


图 1　试验区剖面图

Fig.1　Sectional view of experiment area

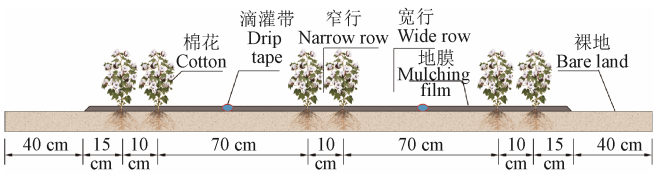


图 2　棉花种植模式示意图

Fig.2　Schematic diagram of cotton planting model

1.4 HYDRUS-2D 模型基本方程原理

HYDRUS-2D[25]是用来模拟二维饱和-非饱和介质中水、热及溶质运移的软件，在软件中有不同的水分运动方程、植物根系作用方程、土壤介质的水力参数的数据库可供选择，符合本研究数值模拟参数选择要求。

表 1 2013—2014 年试验区灌溉制度

Table 1 Irrigation system of experiment area in 2013—2014

灌水日期 Irrigation date	灌水定额 Irrigation quota/($m^3 \cdot hm^{-2}$)
04-20	1 800
05-01	600
06-01	600
06-21	600
06-30	600
07-11	600
07-21	600
07-31	600
08-11	600
08-21	600

表 2 2013—2014 年灌溉季节各月份地下水位

Table 2 Groundwater level in each month of irrigation season in 2013—2014

月份 Month	地下水位 Groundwater level/m	
	2013	2014
4	2.10	2.05
5	1.85	1.88
6	1.75	1.75
7	1.75	1.77
8	1.78	1.79
9	1.85	1.82
10	1.90	1.92

表 3 各土层初始含盐量和初始含水率

Table 3 Initial salt content and water content of each soil layer

土层深度 Soil depth/cm	土壤初始含盐量 Initial soil salt content/($g \cdot kg^{-1}$)	土壤初始体积含水率 Initial soil volumetric water content/($m^3 \cdot m^{-3}$)
0～20	23	15.42
20～60	20	17.03
60～100	18	20.67
100～140	14	26.34
140～160	15	29.41
160～200	15	32.52

1.4.1 数学模型

1）土壤水分运动模型

膜下滴灌是点源入渗，暗管排水时土壤水盐运移属于三维运动入渗问题，但其运动模式可简化为二维问题来解决[26]。根据达西定律和质量守恒定律[27]，假定土壤均匀和各向同性，不考虑空气、温度及土壤水分滞后效应对土壤水分运动的影响，考虑作物根系吸水，此时土壤水分运动可用 Richards 方程[28]表示为

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

式中 $\theta(h)$为土壤体积含水率，cm^3/cm^3；h 为压力水头，cm；$K(h)$为土壤非饱和导水率，cm/d；t 为时间，d；x 为横向坐标，z 为垂向坐标，规定 z 向下为正；$S(h)$为源汇项，此处表示根系吸水率，即根系在单位时间内由单位体积土壤中所吸收水分的体积，$cm^3/(cm^3 \cdot d)$，其具体表示为[29]

$$S(h)=\alpha(h)S_p \quad (3)$$

式中 S_p 为 $\alpha(h)=1$ 时无水分胁迫周期内的吸水率，$\alpha(h)$是植物根系吸水的无量纲响应函数[28-30]，定义为

$$\alpha(h)=\begin{cases}\dfrac{h_1-h}{h_1-h_2} & h_2<h\leqslant h_1\\ \dfrac{h-h_4}{h_3-h_4} & h_4\leqslant h\leqslant h_3\\ 1 & h_3\leqslant h\leqslant h_2\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \quad (4)$$

式中 h_1 为作物根系吸水厌氧基质势值，cm；h_2 为土壤初始基质势值，cm；h_3 为土壤末态基质势值，cm；h_4 为根系凋萎时土壤基质势值，cm。式（2）中涉及到 $\theta(h)$、h、$K(h)$三者之间的关系，模拟中采用 van Genuchten-Mualem 模型[30]拟合，即

$$\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} \quad (5)$$

$$K(h)=K_s S_e^l\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (6)$$

$$S_e=[\theta(h)-\theta_r]/(\theta_s-\theta_r) \quad (7)$$

式中 K_s 为土壤饱和导水率，cm/d；S_e 为相对饱和系数，无量纲；θ_r 为土壤剩余体积含水率，cm^3/cm^3；θ_s 为土壤饱和体积含水率，cm^3/cm^3；α、n、m 均为土壤物理特性有关的拟合参数，α 为经验参数，cm^{-1}；n 是曲线形状参数，$n>1$；$m=1-1/n$；l 为形状系数。

软件模拟的是膜下滴灌，棉花生育期降水量很小，故忽略降水对水盐盐分运移的影响。土壤容重采用环刀取原状土测定，根据在试验区内 0～300 cm 土层测得土壤中黏粒、粉粒和砂粒的平均含量，经 RETC 软件拟合，其土壤水力特性参数：土壤容重 r 取 1.51 g/cm^3，K_s 取 106.1 cm/d，θ_r 取 0.065 cm^3/cm^3，θ_s 取 0.41 cm^3/cm^3，α 取 0.075 cm^{-1}，n 取 1.89，l 取 0.5。

2）土壤溶质运移模型

在研究中，使用土壤溶质穿透曲线来推导水动力弥散系数，它是反映溶质在非饱和土壤中运移的基本曲线。将风干土样装入土柱中，控制容重，用示踪剂连续恒定注入土壤中，然后根据示踪剂溶质在土壤中运移时通过某截面的相对浓度与时间或体积的关系绘制曲线。本试验使用氯化钠溶液作为示踪剂。为了获得实测值与模拟值之间的最佳拟合，在土壤穿透曲线的基础上对修正后的水动力弥散系数进行调整，得出修正后的水动力弥散系数，其中溶质运移参数纵向弥散度为 21 cm，横向弥散度为 4.5 cm。在均匀介质中，用可控的对流弥散方程模

拟非反应离子运移[29]，其公式为

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial(q_i c)}{\partial x_i}-S(h)C_s \quad (8)$$

式中 c 为溶质浓度，g/cm^3；q_i 为入渗率，cm/d；D_{ij} 为弥散系数，cm^2/d；下标 i，j 表示 x，z 轴坐标；C_s 为汇项盐分含量，g/L。

3）根系吸水模型

盐度胁迫响应函数采用乘法模型中的阈值模型，并在 HYDRUS 数据库中选择与棉花相对应的阈值和斜率值。棉花根系吸水参数取值情况：土体空隙被水完全充满时对应的负压值（P0）取-10 cm；土壤毛管上升水达到最大量时对应的负压值（Popt）取-25 cm；土壤毛管水因地表蒸发和作物吸收发生断裂时对应的极限高负压值（P2H）取-200 cm；土壤毛管水因地表蒸发和作物吸收发生断裂时对应的极限低负压值（P2L）取-600 cm；作物产生永久凋萎时对应的负压值（P3）取-14 000 cm；最大根系深度取 60 cm；最大根系深度取 25 cm；最小渗透压头（盐度阈值）值取 15.4 cm，高于该值时根系水分的吸收不会降低；斜率取 2.6，为确定分根曲线的斜率，盐度每增加 1 个单位，其吸水量就下降到阈值以下。

采用修正的 Feddes 模型[31]，公式如下：

$$S(h,h_\varphi,x,z)=\alpha(h,h_\varphi,x,z)b(x,z)S_tT_p \quad (9)$$

式中 $\alpha(h, h_\varphi, x, z)$为土壤水盐胁迫函数；$h_\varphi$ 为渗透压力，cm；$b(x, z)$为根系分布函数，cm^{-2}；S_t 为与蒸腾关联的地表长度，cm；T_p 为潜在蒸发速率，cm/d。

4）参考作物蒸发蒸腾量

参考作物蒸发蒸腾量按照 Penman-Monteith 公式[19]计算，数据来源为当地气象站的气象数据，计算结果如图 3 所示。潜在蒸发量和潜在蒸腾量计算公式[19]为

$$\mathrm{ET_p}=K_c\cdot\mathrm{ET_0} \quad (10)$$

$$E_p=\frac{\Delta R_n}{L(\Delta+\gamma)}\cdot e^{-0.39\mathrm{LAI}} \quad (11)$$

$$T_p=\mathrm{ET_p}-E_p \quad (12)$$

式中 $\mathrm{ET_p}$ 为潜在蒸发蒸腾速率，cm/d；K_c 为棉花的作物系数；$\mathrm{ET_0}$ 为参考作物蒸发蒸腾量，cm/d；E_p 为潜在蒸发速率，cm/d；T_p 为潜在蒸腾速率，cm/d；Δ 为饱和水汽压温度曲线上的斜率，kPa/℃；R_n 为净太阳辐射，MJ/m^2；L 为水汽化的潜热，MJ/kg；γ 为湿度常数，kPa/℃；LAI 为叶面积指数。

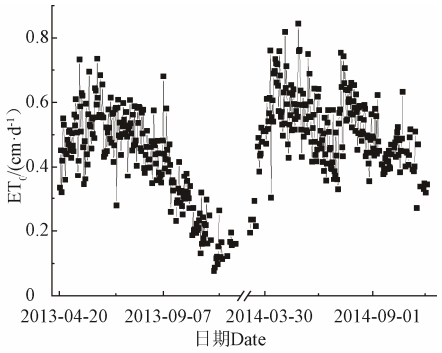


图 3　试验区参考作物蒸发蒸腾量（$\mathrm{ET_0}$）

Fig.3　Reference crop evapotranspiration ($\mathrm{ET_0}$) in experiment area

1.4.2　初始条件

以 2 根暗管中心线为轴，左右呈现对称，为了减少模型运算可以简化模型，将试验区域以 2 根暗管中心线进行划分，对其左侧进行模拟，模拟区域以及边界条件见图 4。模拟计算区域为长（水平方向）2 470 cm、宽（垂直方向）300 cm 的矩形。模型模拟地下 0～200 cm 深度范围土壤盐分变化特征，按照土壤初始含盐量和初始含水率进行分层。模拟时间从 2013 年 4 月 20 日至 2014 年 12 月 1 日，共建立 4 个数值模型，分别模拟 2013 和 2014 年的灌溉期（2013 年 4 月 20 日—2013 年 9 月 30 日、2014 年 4 月 20 日—2014 年 9 月 20 日）和秋季返盐期（2013 年 10 月 1 日—2014 年 4 月 9 日、2014 年 9 月 21 日—2014 年 12 月 1 日），模拟时长共计 590 d，前 1 个阶段的模拟结果按节点逐个赋值为下 1 个阶段的初始输入条件，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[32]。模拟结束，将 4 次模拟的数据整合在一起来分析灌溉期和秋季返盐期的盐分变化规律。

1）水分运动初始条件

$$\theta(x,z,t)=\theta'(x,z,0),0\leqslant x\leqslant X,0\leqslant z\leqslant Z,t=0 \quad (13)$$

式中 $\theta'(x, z, 0)$为土壤初始含水率，cm^3/cm^3；X 为暗管到模型右边界间距，cm；Z 为地面到模型下边界的距离，cm。

图 4 为研究区模型边界示意图。灌溉期模型土壤初始边界条件为：模型的上边界条件由膜下滴灌覆膜区、滴头区和膜间裸地组成，覆膜区为零通量边界；膜间裸地为大气边界；在二维垂直水流运动下，滴头流量造成的通量变化可视为变通量边界；暗管管壁有微孔，表面并包裹有滤料和土工织布，可视为渗流面边界；左、右边界为零通量边界；研究区模型下边界远低于地下水位，研究区地下水稳定，视为模型下边界与地下水基本不发生水量交换和溶质运移，下边界可视为零通量边界。

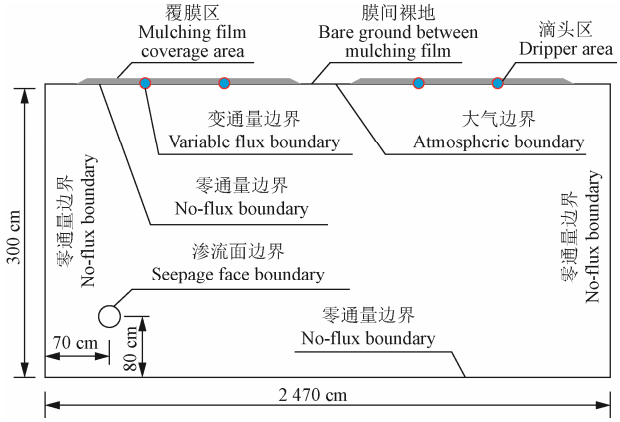


图 4　试验区模型边界示意图

Fig.4　Schematic diagram of experiment area model boundary

秋季返盐期模型土壤初始边界条件为：模型的上边界条件为大气边界，降水量和灌水量设为 0，在裸土条件下进行模拟；其余边界条件同灌溉期模型边界条件。在

膜下和膜间分别设置观测点，用土壤盐分平均值的变化来表示整个模拟区总盐分的变化。

2）溶质运移初始条件

$$C(x,z,t)=C_0(x,z,0),0\leqslant x\leqslant X,0\leqslant z\leqslant Z,t=0 \quad (14)$$

式中 C_0 为土壤初始含盐量，g/kg。

溶质运移边界条件与水分运动边界条件相对应，滴头处、暗管边壁处同为第三类边界条件。

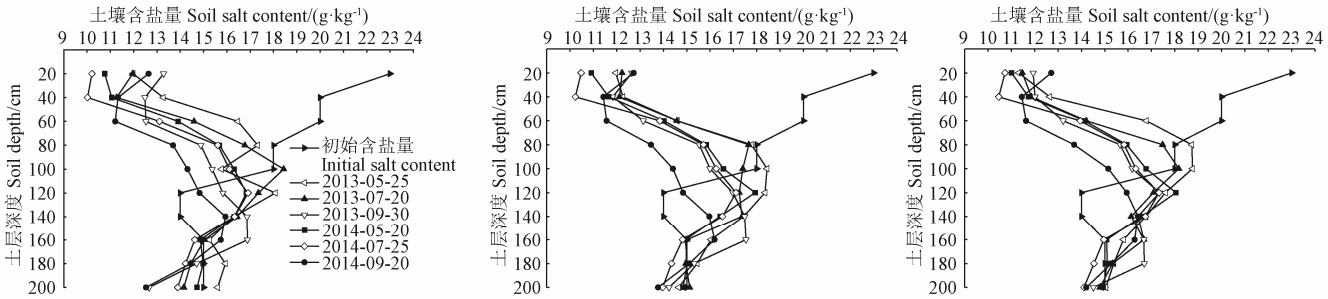
1.4.3 模型检验

利用 SPSS 软件对重复取样实测值进行最小显著性差异方法（Least Significant Difference，LSD）分析，利用均方根误差（Root Mean Squared Error，RMSE）和纳什效率系数（Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient，NSE）验证模拟结果的可靠性[33]，RMSE 越接近 0，NSE 越接近 1，表示模拟值与实测值差异越小，两者吻合越好。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分实测数据分析

利用最小显著性差异方法计算得到的重复取样的样本数据 P 值均大于 0.05，说明土壤的实测值均无显著性差异，一致性较好。由图 5 可知，2014 年根系层土壤含盐量降低到 11 g/kg 左右，与初始含盐量相比显著下降，出苗率明显提高。与初始盐含量相比，在 0～80 cm 的深度范围内，土壤盐分下降明显，随着土壤深度的增加，土壤盐分含量减少的速率呈逐渐下降的趋势，在 100～120 cm 的深度范围内，随着土壤深度的增加，土壤含盐量呈现相反的变化规律。土壤盐分含量峰值伴随棉花生育期过程逐渐向下迁移，最终从 100～120 cm 的土层深度迁移至 140～160 cm 的土层深度。这表明，盐分随着灌溉水向下运移，上层土壤盐分不断被淋洗，上层土壤处于脱盐状态，并在下层土壤一定深度处聚集。



a. 距暗管 8 m
a. 8 m from subsurface pipe

b. 距暗管 16 m
b. 16 m from subsurface pipe

c. 距暗管 24 m
c. 24 m from subsurface pipe

图 5 暗管排水棉田土壤盐分分布观测值

Fig.5 Observed values of soil salt distribution in cotton field with subsurface pipes drainage

暗管排水水样平均矿化度为 90.6 g/L，观测井中地下水和西岸大渠中灌溉水的水样矿化度分别为 10.3 和 0.96 g/L，均远低于暗管排出水样的含盐量，这说明暗管排出的盐分绝大部分来自于土体。灌溉期灌水后地下水位上升至暗管以上，灌溉水与地下水在暗管上方形成汇流流入暗管，上层淋洗到下层的盐分也随之排出暗管，说明膜下滴灌与暗管排水对盐碱化土壤的改良具有良好的协同作用。

2.2 HYDRUS-2D 模型验证结果分析

图 6 为 0～200 cm 深度范围距离暗管不同间距处各剖面土壤盐分模拟值与实测值的对比情况，由图 6 可知，在 0～40 cm 土层范围内，土壤盐分模拟值大多数略小于实测值，尤其在图 6a 的模拟结果对比中尤为明显。这可能是由于土壤上表层电导率受实际外界因素影响明显，而模型构建过程中的边界情况与实际边界情况存在细微差异，实际情况中的蒸发蒸腾等边界条件比模型中所构建的要复杂，这些差异对土壤电导率会产生一定影响。

在 140～200 cm 土层范围内，土壤盐分模拟值大多数略大于实测值，尤其在图 6d 和图 6h 的模拟结果对比中尤为明显。这可能是因为土壤溶质运移过程本身比较复杂，溶质运移参数与仪器所测电导率的精确程度都会带来实测值与模拟误差。但是从 RMSE 和 NSE 值总体来看，模拟值与实测值两者差异不大且变化趋势一致，吻合性较好。

在 0～80 cm 深度范围内，随着生育期的推进，土壤盐分含量明显下降；80～200 cm 深度范围内，随着土层深度的增加，土壤盐分含量的总体呈下降趋势，但由于初始含盐量的影响，最终形成上层和下层土壤含盐量较少，中间含盐量较大的分布情况。这是因为灌水后土壤上层的盐分会随着水流运动向下迁移，随着土壤深度的增加盐分运移对土壤含盐量变化的影响程度会变小。土壤盐分含量峰值伴随灌溉时间的增加逐渐向下迁移，从 100～120 cm 的土层深度迁移至 140～160 cm 的土层深度，模拟值与实测值吻合度较好。

在水平方向上，距离暗管越远，土壤脱盐率越小，不同距离的含盐量模拟精度的均方根误差 RMSE 和纳什效率系数 NSE 范围分别为 0.39～1.26 g/kg 和 0.66～0.97，个别模拟值变异程度较大，其他模拟结果的变异程度不是很大，说明各个距离的土壤盐分实测值与模拟值差异不大，模型在模拟土壤的盐分分布时具有较高的精度，参数较可靠，满足模拟精度要求。模拟值与实测值拟合结果较为理想，较好地反映出了土壤盐分在试验期内的变化规律，模拟结果可靠。

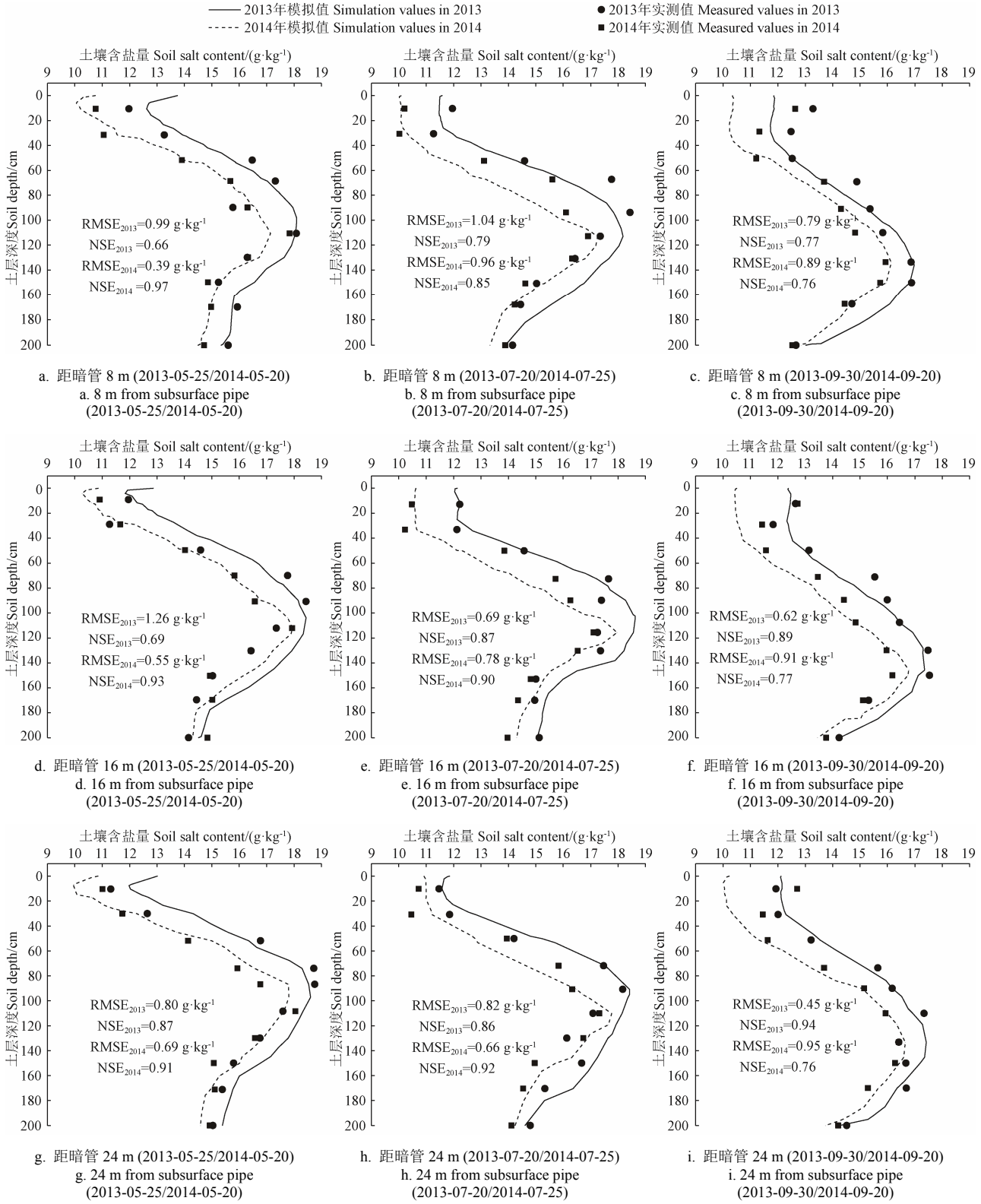


图 6　土壤盐分模拟值与实测值对比

Fig.6　Comparison of simulated and measured soil salt content values

3　模型应用

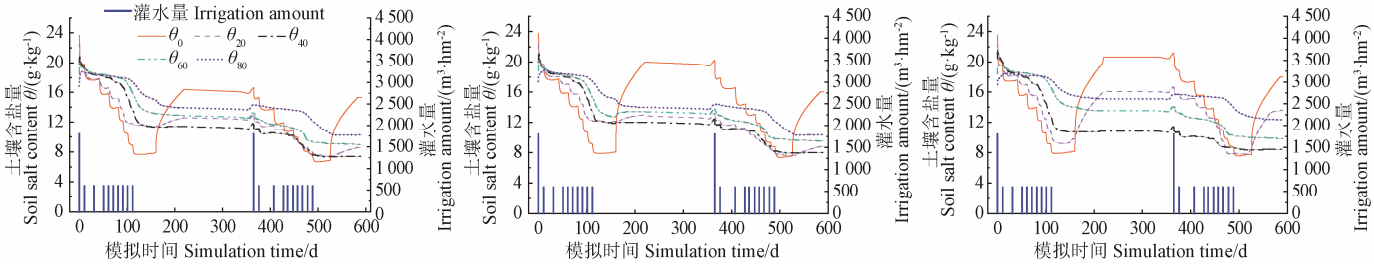
应用经过实测值与模拟值修正参数后的膜下滴灌棉田暗管排盐模型分别对 2013 和 2014 年的灌溉期和秋季返盐期土壤盐分运移进行更长时间序列的模拟计算，共进行 4 个阶段为期 590 d 的模拟，以研究土壤盐分随时间的连续动态变化。

3.1　0～80 cm 土层土壤含盐量分析

图 7 是在模拟区以膜下为取样点表示距离暗管不同位置处 0～80 cm 土层内盐分含量变化曲线。由图 7 可知，2013 和 2014 年棉花生育期内根系层盐分含量呈下降趋势，脱盐量随土层深度的增加而减小。与初始含盐量相比，2013 和 2014 年棉花生育期末表层 0 cm 处盐分分别平均下降了 66.66%和 69.41%，20 cm 处盐分分别平均下降了 50.85%和

64.31%，40 cm 处盐分分别平均下降了 42.31%和 59.60%，60 cm 处盐分分别平均下降了 26.52%和 47.96%，80 cm 处盐分分别平均下降了 7.13%和 28.24%，0～80 cm 土层膜下平均脱盐率分别达到了 41.11%和 55.56%。灌水间歇期在蒸发、施肥及根系吸水作用影响下，上层土壤盐分有小幅波动上移变化特点，但由于地膜覆盖盐分随水分上移受到抑制，土壤水分仅在膜间裸地一定范围内向上运动强烈，盐分随水分进入根区总量相对有限，因此在整个生育期灌溉制度周期性灌水作用下，土壤盐分总量呈降低趋势。

9 月下旬灌水停止，去除地膜后，在蒸发作用下盐分逐渐由深层向上不断迁移一部分，使得土壤表层 0～20 cm 土层内盐分含量迅速上升，40～80 cm 土层内盐分没有明显变化（从图 7 中的第 160 天到第 220 天和第 530 天到第 590 天）。距暗管 16 和 24 m 处的 0 cm 表层土壤盐分增加量明显高于 8 m 处；距 24 m 处的 20 cm 土层土壤盐分增加量明显高于 8 m 和 16 m 处。与距暗管 8 m 和 16 m 处 0～20 cm 土层土壤盐分升高情况相比，24 m（两暗管中间位置）处明显高于前二者，这可能是由于距暗管较远，脱盐效果有所减弱，该处土壤中的盐分含量较高，在蒸发的作用下，盐分向表层运移与聚集。



a. 距暗管 8 m
a. 8 m from subsurface pipe

b. 距暗管 16 m
b. 16 m from subsurface pipe

c. 距暗管 24 m
c. 24 m from subsurface pipe

注：θ 为 0～80 cm 各土层土壤含盐量，下标代表对应的土层深度。
Note: θ is the soil salt content of each soil layer from 0 to 80 cm, and the subscript represents the corresponding soil depth.

图 7 模拟区 0～80 cm 土层土壤含盐量变化趋势
Fig.7 Variation trend of soil salt content in 0-80 cm soil layer in simulation area

3.2 0～80 cm 土层膜下和膜间整体脱盐率分析

分别在数值模型区域的膜下和膜间设置取样点，取各层土壤盐分的平均值，计算 0～80 cm 土层范围内距离暗管 0～8、8～16、16～24 m 的土体（膜下和膜间）平均含盐量和土体脱盐率（与初始含盐量相比），见表 4 和表 5。由表 5 可知，在 0～80 cm 土层范围内，2013 年吐絮期土体脱盐率分别为 15.70%、13.83%、12.62%；冻土形成前土体脱盐率分别为 8.90%、4.71%、3.03%；2014 年吐絮期土体脱盐率分别为 22.41%、16.88%、14.35%；冻土形成土体脱盐率分别为 16.81%、8.37%、5.27%。与初始含盐量相比，2013 和 2014 年棉花生育期末膜下及膜间 0～80 cm 土层整体平均脱盐率分别达到了 14.05%和 17.88%，秋季返盐后脱盐率分别达到了 5.55%和 10.15%，秋季返盐明显。在棉花生育期内，0～80 cm 深度范围内随着灌溉次数的增加，土壤盐分向下淋洗，土体盐分逐渐降低，土体脱盐率是逐渐减少的，前期脱盐的速率远大于后期，随着距暗管距离的增加，土体脱盐率有减小的趋势。这说明脱盐主要发生在灌水洗盐阶段，且距暗管的距离越近脱盐效果越好。秋季返盐阶段，0～80 cm 深度范围内土体盐分逐渐增加，0～8 m 土体盐分增加的程度小于 8～16 m 和 16～24 m 土体盐分增加的程度。

3.3 0～200 cm 土层整体脱盐率分析

由表 5 可知，经过秋季返盐阶段后，土体含盐量仍然表现呈减少趋势，暗管发挥出了排盐的效果。2013 年冻土形成前（11 月 27 日）与初始含盐量相比，0～200 cm 深度范围内土体脱盐率分别为 2.97%、2.44%、2.32%（0～8、8～16、16～24 m）。2014 年冻土形成前（11 月 28 日）与初始含盐量相比，土体脱盐率分别为 5.71%、4.64%、4.52%（0～8、8～16、16～24 m）。0～8 m 土体内脱盐率显著高于 8～16 m 和 16～24 m 土体，三者间差异均达到显著水平。与初始含盐量相比，2013 和 2014 年棉花生育期末 0～200 cm 深度范围内整体平均脱盐率分别达到了 2.26%和 4.85%，秋季返盐后 0～200 cm 深度范围内土体平均脱盐率分别为 2.58%和 4.96%。

表 4 模拟区 0～80 cm 和 0～200 cm 土层平均含盐量
Table 4 Average salt content of 0-80 cm and 0-200 cm soil layers in simulation area

土层深度 Soil depth/cm	距暗管间距 Distance from subsurface pipe/m	平均含盐量 Average salt content/(g·kg^{-1})								
		2013					2014			
		04-15	05-25	07-20	09-30	11-27	05-20	07-25	09-20	11-28
0～80	0～8	20.25a	18.34b	17.79c	17.07c	18.45c	16.77c	16.32c	15.71c	16.85c
	8～16	20.25a	18.46a	17.87b	17.45b	19.30b	17.71b	17.20b	16.83b	18.56b
	16～24	20.25a	18.48a	18.01a	17.69a	19.64a	18.18a	17.58a	17.34a	19.18a
0～200	0～8	17.20a	16.93a	16.84b	16.75b	16.69b	16.50b	16.36b	16.24b	16.22b
	8～16	17.20a	16.98a	16.90a	16.83a	16.78a	16.59a	16.49a	16.42a	16.40a
	16～24	17.20a	16.98a	16.92a	16.85a	16.80a	16.60a	16.51a	16.44a	16.42a

注：同一土层深度同列不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。
Note: Different letters in the same soil layer depth row and the same column mean significant difference (P<0.05) among treatments. The same as below.

表 5　模拟区 0～80 和 0～200 cm 土层平均脱盐率

Table 5　Average desalination rate of 0-80 and 0-200 cm soil layer in simulation area

土层深度 Soil depth /cm	距暗管间距 Distance from subsurface pipe/m	脱盐率 Desalination rate /%							
		2013				2014			
		05-25	07-20	09-30	11-27	05-20	07-25	09-20	11-28
0～80	0～8	9.45a	12.14a	15.70a	8.90a	17.17a	19.41a	22.41a	16.81a
	8～16	8.83b	11.73b	13.83b	4.71b	12.54b	15.08b	16.88b	8.37b
	16～24	7.73c	11.06c	12.62c	3.03c	10.23c	13.21c	14.35c	5.27c
0～200	0～8	1.59a	2.11a	2.62a	2.97a	4.08a	4.89a	5.59a	5.71a
	8～16	1.28b	1.72b	2.13b	2.44b	3.54b	4.12b	4.53b	4.64b
	16～24	1.25b	1.64c	2.04c	2.32c	3.46c	4.04c	4.42c	4.52c

4　讨　论

潘延鑫等[34-38]进行盐碱地膜下滴灌研究时发现，当灌水定额足够大时，由于上层土壤盐分随着灌溉水向下迁移，在土壤湿润锋处的含盐量增大的同时，上层土壤含盐量也在减小。本试验研究结果表明，在棉花的生育期内，灌水后上层盐分会向下迁移，伴随着棉花生育期的过程，土壤盐分含量峰值也逐渐向下迁移，最终由 100～120 cm 迁移到 140～160 cm 土层深度内。这是因为覆膜抑制了蒸发，农田土壤水分向上运动由原来的棵间蒸发和植株蒸腾 2 个渠道变成了植株蒸腾单一渠道，因此水分向上运动的趋势大大减少。Li 等[39-40]在进行月季的滴灌试验以及滨海盐渍化土壤滴灌试验研究时发现，土壤盐分在生育期阶段盐分降低，但是后期返盐明显。这与本研究结果类似，但不同之处在于，本试验研究结果表明，在灌水结束去除地膜后，土壤表层 0～20 cm 土层内盐分含量迅速上升，40～80 cm 土层内盐分没有明显变化，下层土壤盐分未向上明显迁移。这是因为虽然研究区地处蒸发强烈的西北干旱区，土壤盐分易向土体表面聚集，但排水系统的存在使农田水分向下运动有了通道，且暗管排水控制地下水位，根系层土壤未受到地下水顶托作用，所以农田水分整体运动的趋势是向下的，下层盐分向上运动受到抑制。

采用暗管排水的措施可以有效控制地下水位，排走土体盐分。张金龙等[41]通过漫灌淋洗暗管排水表明，暗管埋深 1.2 m 处，淋洗 43d 后 0～30 cm 土层脱盐率在 74.8%～95.4%之间。Wang 等[42]基于不同暗管埋深和管径进行田间灌溉排水试验，结果表明暗管 0.6 m 埋深脱盐效果优于 1.0、1.4 m 埋深，平均脱盐率达到了 57.04%。与以上研究有所差异，本试验研究结果表明，2013 和 2014 年棉花生育期与 2013 年初始含盐量相比，在 0～80 cm 土层范围内，膜下平均脱盐率分别达到了 41.11%和 55.56%，膜下及膜间整体平均脱盐率分别达到了 14.05%和 17.88%，一方面是因为研究土层深度不同，土壤脱盐率会随着土层深度的增加而降低，说明土壤盐分在向下运移；另一方面是因为暗管埋深不同，暗管浅埋会增加暗管以上土层的脱盐效率，但盐分并未完全被暗管排走，更大一部分被淋洗至暗管以下土层。另外，暗管间距、暗管埋深型和作物种植模式等指标[13,43-44]也会影响各土层的脱盐率。

不同区域土壤脱盐率与距暗管的距离成负相关。距暗管越近，排盐速率越快，距暗管越远，排盐速率相对减慢[45-46]。本试验研究结果表明，距离暗管 0～8 m 土壤平均脱盐率显著高于 8～16 m 和 16～24 m 土壤平均脱盐率，但后两者的差别较小，形成了距暗管近的区域盐分少，距暗管远的区域盐分多的状况。但依据溶质运移规律及盐分平衡原理，农田中的盐分会随着时间的推移由盐分多的区域向盐分少的区域运移，从而形成了土壤盐分整体下降、根系层盐分下降更加明显的结果。2013 和 2014 年秋季返盐后与 2013 年初始含盐量相比，0～80 cm 土体盐分分别平均下降了 5.55%和 10.15%，0～200 cm 深度范围内土体盐分分别平均下降了 2.58%和 4.96%，这进一步说明了灌水后大部分盐分被淋洗到土壤下层，一部分滞留在土壤中，一部分溶解于地下水被暗管排走，但长期使用该模式土体含盐量将会持续降低[47]。

5　结　论

基于 HYDRUS-2D 模型建立了暗管排水条件下膜下滴灌棉田土壤盐分变化的数学模型，比较了 HYDRUS-2D 模拟结果和试验数据，利用统计分析指标均方根误差 RMSE 和纳什效率系数 NSE 验证了数值模拟方法的可靠性。在此基础上，对 0～80 cm 土层内盐分随时间的变化、根系层土壤脱盐率以及 0～200 cm 土层脱盐率进行模拟分析。得出以下结论：

1）膜下滴灌技术与暗管排水相结合，使土壤根系层脱盐效果显著。利用 HYDRUS 软件得到的模拟值与实测值吻合度较高，含盐量均方根误差 RMSE 和纳什效率系数 NSE 范围分别为 0.39～1.26 g/kg 和 0.66～0.97，均在可接受范围内。

2）暗管排水和膜下滴灌条件下，2013 和 2014 年棉花生育期末与 2013 年初始含盐量相比，根系层土壤脱盐明显。在膜下，0～80 cm 土层平均脱盐率分别达到了 41.11%和 55.56%；膜下及膜间，0～80 cm 土层平均脱盐率分别达到了 14.05%和 17.88%。

3）2013 和 2014 年秋季返盐后土壤含盐量与 2013 年初始含盐量相比，0～80 cm 土体盐分分别平均下降了 5.55%和 10.15%；0～200 cm 土体盐分分别平均下降了 2.58%和 4.96%，说明暗管控制条件下，使用滴灌淋洗和暗管排盐的模式，土体内的盐分总量呈现降低趋势。

［参　考　文　献］

[1]　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.
Wang Quanjiu, Wang Wenyan, Lyu Dianqing, et al. Water and salt transport features for salt-effected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 54-57. (in Chinese with English abstract)

[2]　田富强，温洁，胡宏昌，等. 滴灌条件下干旱区农田水盐

运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报，2018，49(1)：126-135.
Tian Fuqiang, Wen Jie, Hu Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 126-135. (in Chinese with English abstract)

[3] Wang Ruoshui, Wan Shuqin, Sun Jiaxia, et al. Soil salinity, sodicity and cotton yield parameters under different drip irrigation regimes during saline wasteland reclamation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 209: 20-31.

[4] 孟超然，颜林，张书捷，等. 干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J]. 土壤学报，2017，54(6)：1386-1394.
Meng Chaoran, Yan Lin, Zhang Shujie, et al. Variation of soil salinity in plow layer of farmlands under long-term mulched drip irrigation in arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1386-1394. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘新永，田长彦. 南疆棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J]. 水土保持学报，2005，19(6)：84-87.
Liu Xinyong, Tian Changyan. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in South Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 84-87. (in Chinese with English abstract)

[6] 牟洪臣，虎胆·吐马尔白，苏里坦，等. 不同耕种年限下土壤盐分变化规律试验研究[J]. 节水灌溉，2011(8)：29-31.
Mou Hongchen, Hudan·Tumaerbai, Su Litan, et al. Experimental research on salty soil profile transfer law under different farming times[J]. Water Saving Irrigation, 2011(8): 29-31. (in Chinese with English abstract)

[7] 弋鹏飞，虎胆·吐马尔白，吴争光，等. 棉田膜下滴灌年限对土壤盐分累积的影响研究[J]. 水土保持研究，2010，17(5)：118-122.
Yi Pengfei, Hudan·Tumaerbai, Wu Zhengguang, et al. Research on soil salt accumulation influence by the years of covered cotton under drip irrigation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 118-122. (in Chinese with English abstract)

[8] 高长远. 明沟排水与竖井排灌[J]. 地下水，2001，23(4)：194-197.
Gao Changyuan. Gutter drainage and vertical drainage of groundwater[J]. Ground water, 2001, 23(4): 194-197. (in Chinese with English abstract)

[9] 马利军，王红雨，麦文慧，等. 宁夏银北灌区暗管排水技术应用现状调查分析[J]. 中国农村水利水电，2019(2)：71-74.
Ma Lijun, Wang Hongyu, Mai Wenhui, et al. Investigation and analysis of application of underground pipe drainage technology in Yinbei irrigation area of Ningxia[J]. China Rural Water Hydropower, 2019(2): 71-74. (in Chinese with English abstract)

[10] 谭莉梅，刘金铜，刘慧涛，等. 河北省近滨海区暗管排水排盐技术适宜性及潜在效果研究[J]. 中国生态农业学报，2012，20(12)：1673-1679.
Tan Limei, Liu Jintong, Liu Huitao, et al. Study on the adaptability and potential application effects of subsurface pipe drainage system in the coastal areas of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1673-1679. (in Chinese with English abstract)

[11] Talukolaee M J, Naftchali A D, Parvariji L Z, et al. Investigating long-term effects of subsurface drainage on soil structure in paddy fields[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 177: 155-160.

[12] 徐友信，于淑会，石磊. 高水位盐碱地暗管控制性排水的降盐抑碱作用研究[J]. 干旱区资源与环境，2018，32(3)：164-169.
Xu Youxin, Yu Shuhui, Shi Lei. Effects of subsurface controlled drainage on reducing salinity and preventing basification in saline-alkali areas with underground high water level[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(3): 164-169. (in Chinese with English abstract)

[13] 纪敬辉，王红雨. 暗管排水条件下土壤盐碱性的监测与分析[J]. 宁夏工程技术，2018，17(1)：71-75.
Ji Jinghui, Wang Hongyu. Monitoring and analysis of salinity and alkalinity of soil under the condition of underground pipe drainage[J]. Ningxia Engineering Technology, 2018, 17(1): 71-75. (in Chinese with English abstract)

[14] 麦文慧，王红雨，马利军，等. 基于 VBA 的宁夏引黄灌区暗管排水间距计算方法研究[J]. 灌溉排水学报，2019，38(8)：64-72.
Mai Wenhui, Wang Hongyu, Ma Lijun, et al. Calculation method research on pipe drain spacing of Ningxia Yellow River irrigation region based on VBA[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 64-72. (in Chinese with English abstract)

[15] 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 under subsurface drainage by HYDRUS model[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2019, 37(3): 224-231. (in Chinese with English abstract)

[16] 耿其明，闫慧慧，杨金泽，等. 明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J]. 土壤通报，2019，50(3)：617-624.
Geng Qiming, Yan Huihui, Yang Jinze, et al. Evaluation for soil improvement effect of open ditch and concealed drainage engineering on saline alkali land development[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 617-624. (in Chinese with English abstract)

[17] 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)：782-788.
Zhang Zhanyu, Zhang Yuezhen, Zhang Jie, et al. Simulating

subsurface pipe drainage in saline-alkali farmland along coastlines using the DRAINMOD-S model[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 782-788. (in Chinese with English Abstract)

[18] Mante A A, Ranjan R S, Bullock P. Subsurface drainage for promoting soil strength for field operations in southern Manitoba[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184: 261-268.

[19] Li Kaiming, Liu Hongguang, He Xinlin, et al. Simulation of water and salt transport in soil under pipe drainage and drip irrigation conditions in Xinjiang[J]. Water, 2019, 11(12): 2456

[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.
Li Xianwei, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China Ⅰ: Calibration to models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 537-544. (in Chinese with English abstract)

[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.
Li Liang, Li Meiyan, Zhang Junjun, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS-2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66-71. (in Chinese with English abstract)

[22] 莫彦，李光永，蔡明坤，等. 基于 HYDRUS-2D 模型的玉米高出苗率地下滴灌开沟播种参数优选[J]. 农业工程学报，2017，33(17)：105-112.
Mo Yan, Li Guangyong, Cai Mingkun, et al. Selection of suitable technical parameters for alternate row/bed planting with high maize emergence under subsurface drip irrigation based on HYDRUS-2D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 105-112. (in Chinese with English abstract)

[23] 新疆农业厅，新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京：科学出版社，1996：151-521.

[24] 陈名媛，黄介生，曾文治，等. 外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律[J]. 农业工程学报，2020，36(2)：130-139.
Chen Mingyuan, Huang Jiesheng, Zeng Wenzhi, et al. Characteristics of water and salt transport in subsurface pipes with geotextiles under salt dischargeconditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 130-139. (in Chinese with English abstract)

[25] Rezayati S, Khaledian M, Razavipour T, et al. Water flow and nitrate transfer simulations in rice cultivation under different irrigation and nitrogen fertilizer application managements by HYDRUS-2D model[J]. Irrigation Science, 2020, 38(4): 353-363.

[26] 李淑芹，王全九. 垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟[J]. 农业机械学报，2011，42(3)：51-57.
Li Shuqin, Wang Quanjiu. Simulation of soil water distribution under vertical line source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 51-57. (in Chinese with English abstract)

[27] 李光永，郑耀泉，曾德超，等. 地埋点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J]. 水利学报，1996，27(11)：47-56.
Li Guangyong, Zheng Yaoquan, Zeng Dechao, et al. The mathematical model and experiment of water movement from a buried trickle source[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(11): 47-56. (in Chinese with English abstract)

[28] 冀荣华，王婷婷，祁力钧，等. 基于 HYDRUS-2D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟[J]. 农业机械学报，2015，46(4)：113-119.
Ji Ronghua, Wang Tingting, Qi Lijun, et al. Numerical simulation of soil moisture infiltration under negative pressure irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 113-119. (in Chinese with English abstract)

[29] 李卓然，虎胆·吐马尔白，由国栋. 基于 HYDRUS-2D 滴灌棉田不同深度排盐沟土壤水盐运移的试验及模拟[J]. 石河子大学学报：自然科学版，2018，36(3)：376-84.
Li Zhuoran, Hudan·Tumaerbai, You Guodong. Experiment and simulation on saltremoving of drip irrigation under the film in cotton field[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2018, 36(3): 376-384. (in Chinese with English abstract)

[30] 马亮，魏光辉，王婷，等. 基于 Feddes 模型的干旱区滴灌幼龄枣树根系特征数值模拟[J]. 节水灌溉，2016(3)：11-14.
Ma Liang, Wei Guanghui, Wang Ting, et al. Numerical simulation of young jujube root characteristics under drip irrigation in arid area based on Feddes model[J]. Water Saving Irrigation, 2016(3): 11-14. (in Chinese with English abstract)

[31] 王在敏. 干旱区微咸水膜下滴灌棉花—水—溶质相互作用研究[D]. 武汉：中国地质大学，2013.
Wang Zaimin. Study on the Cotton-Water-Solute Interactions under Mulched Drip Irrigation with Brackish Water in an Arid Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese with English abstract)

[32] 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 with English abstract)

[33] 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.
Fan Yanwei, Zhao Tong, Bai Guilin, et al. HYDRUS-2D

simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(4): 115-124. (in Chinese with English abstract)

[34] 潘延鑫，罗纨，贾忠华，等. 基于 HYDRUS 模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J]. 干旱地区农业研究，2017，35(1)：135-142.
Pan Yanxin, Luo Wan, Jia Zhonghua, et al. The simulation of water and salt transportation by HYDRUS model in Lubotan of Shaanxi，China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 135-142. (in Chinese with English abstract)

[35] 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.
Zhang Wei, Lyu Xin, Li Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 15-19. (in Chinese with English abstract)

[36] 谭军利，康跃虎，焦艳平，等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. 农业工程学报，2008，24(6)：59-63.
Tan Junli, Kang Yuehu, Jiao Yanping, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt-affected field under mulch-drip irrigation in different planting years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 59-63. (in Chinese with English abstract)

[37] 李明思，刘洪光，郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报，2012，28(22)：82-87.
Li Mingsi, Liu Hongguang, Zheng Xurong. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 82-87. (in Chinese with English abstract)

[38] 杨鹏年，董新光，刘磊，等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. 农业工程学报，2011，27(12)：90-95.
Yang Pengnian, Dong Xinguang, Liu Lei, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 90-95. (in Chinese with English abstract)

[39] Li Na, Kang Yaohu, Li Xiaobin, et al. Management of sea reclamation land using drip irrigation with treated effluent and its effect on Rosa chinensis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228(Suppl): 105887.

[40] Li Xiaobin, Kang Yaohu, Wang Xunming. Response of soil properties and vegetation to reclamation period using drip irrigation in coastal saline soils of the Bohai Gulf[J]. Paddy and Water Environment, 2019, 17(4): 803-812.

[41] 张金龙，刘明，钱红，等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. 农业工程学报，2018，34(6)：98-103.
Zhang Jinlong, Liu Ming, Qian Hong, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water-salt movement in coastal saline soil improved by flooding and subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 98-103. (in Chinese with English abstract)

[42] Wang Zhenhua, Heng Tong, Li Wenhao, et al. Effects of subsurface pipe drainage on soil salinity in saline-sodic soil under mulched drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2019, 69(1): 95-106.

[43] 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 81-86. (in Chinese with English abstract)

[44] 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.
Wang Hongyi, Wang Zhihui, Yang Fengjun, et al. Research for the effect of shallow-tight type subsurface drain pipes on improving soda saline-alkaline land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 269-272. (in Chinese with English abstract)

[45] 陈阳，张展羽，冯根祥，等. 滨海盐碱地暗管排水除盐效果试验研究[J]. 灌溉排水学报，2014，33(3)：38-41.
Chen Yang, Zhang Zhanyu, Feng Genxiang, et al. Desalination of subsurface pipe drainage in saline-alkali land of coastal areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 38-41. (in Chinese with English abstract)

[46] 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. (in Chinese with English abstract)

[47] 阿尔娜古丽·艾买提，刘洪光，何新林，等. 膜下滴灌盐碱地排水工程控盐效果试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(4)：347-353.
A’ernaguli·Aimati, Liu Hongguang, He Xinlin, et al. Experimental study on salt controlling effect in drainage system in saline-alkali land with drip irrigation under mulch[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(4): 347-353. (in Chinese with English abstract)

Soil salinity changes in cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage using HYDRUS-2D model

Liu Hongguang, Bai Zhentao, Li Kaiming

(1. *College of Water & Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*; 2. *Key Laboratory of Modern Water- Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: With the long-term use of under mulched drip irrigation, the problem of salt accumulation in farmland soil has attracted increasing attention. In order to explore the changes of soil salt content in a cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage, a subsurface pipes drainage experiment was conducted in the saline-alkali soil of Xinjiang 122 group in 2013 and 2014. The buried depth of the subsurface pipes is 2.2 m, and the spacing is 48 m. The changes of soil salt content in the 0-200 cm soil layer were monitored through under mulched drip irrigation. Sampling points were set at 8, 16, and 24 m perpendicular to the subsurface pipes and the sampling time was set to the cotton seedling, flowering, and boll opening periods of 2013 and 2014, respectively. Soil electrical conductivity (EC) was detected by an electrolytic conductivity meter at a soil-to-water ratio of 1:5. Based on the HYDRUS-2D model, a mathematical model of soil salt content changes in cotton fields under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage was established, and the HYDRUS-2D simulation results and experimental data were compared. The range of the statistical analysis index salt content RMSE and NSE are 0.39-1.26 g/kg and 0.66-0.97, respectively. They were within the acceptable range, which verified the reliability of the numerical simulation method. On this basis, the model simulated and analyzed the changes of salt content with time in 0-80 cm soil layer, the desalination rate of root layer, and the desalination rate of 0-200 cm soil layer in the salt content of 2013 and 2014 during cotton growth and the autumn salt return stage. The simulation results showed that under mulched drip irrigation during the growth period of cotton, the soil salt content continued to decrease, and the soil surface began to return after the harvest. The soil salt content in the cotton boll opening period in 2013 and 2014 was compared with the initial salt content, the average desalination rate of the 0-80cm soil layer reached 41.11% and 55.56%, respectively. And the total salt content of the 0-80cm soil layer under and between the mulching films decreased by 14.05% and 17.88%, respectively. After the cotton was harvested, salt returned to the upper layer of soil. However, it still showed a decrease compared with the initial salt content. The average salt content of 0-80 cm soil decreased by 5.55% and 10.15%, and the average salt content of 0-200 cm decreased by 2.58% and 4.96%. These results showed that the total salt content in soil showed a decreasing trend by using under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage mode. The average soil desalination rate of 0-8 m (2.97% and 5.71%) from the subsurface pipes was significantly higher than that of 8-16 m (2.44% and 4.64%) and 16-24 m (2.32% and 4.52%), but the difference between the latter two was small. The area close to the subsurface pipes had a low soil salt content, while the area far away from the subsurface pipes had a higher soil salt content. According to the law of solute transport and the principle of salt balance, the salt in the soil would change from the area with more salt to less salt over time. As a result, the overall soil salt content decreased, and the root layer salinity decreased more obviously. The results revealed the changing law of soil salt content in the cotton fields under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage, aiming to provide theoretical support and scientific guidance for the popularization and application of subsurface pipes drainage technology and under mulched drip irrigation in the inland arid area of Northwest China.

Keywords: soils; salts; cotton; under mulched drip irrigation; subsurface pipes drainage; numerical simulation; HYDRUS-2D