

## 新疆地下滴灌棉田一次性滴灌带埋深数值模拟与分析

李显激<sup>1</sup> 石建初<sup>2</sup> 王 数<sup>2</sup> 左 强<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 由于灌水频率高、定额小, 在新疆地区大面积应用膜下滴灌进行棉花种植时, 常出现根系分布浅、植株易早衰等影响产量的问题, 灌水湿润区域相对较深的地下滴灌可能是解决上述问题的方法之一。但因顾及机械耕作和多次使用, 传统地下滴灌带通常埋深较大, 致使苗期灌水及管理维护极其不便。随着工艺水平提高和生产成本降低, 地下滴灌生产实际中采用一次性滴灌带已成为可能, 本研究通过数值模拟方法来探讨地下滴灌一次性滴灌带的合理埋深问题。为了验证所建立的数值模型和选用的土壤物理参数, 首先在新疆玛纳斯地区开展了地下滴灌田间试验, 继而采用 HYDRUS-2D/3D 软件对该试验条件下的土壤水盐动态进行了模拟。结果表明, 模拟值与实测值之间整体吻合较好, 其中土壤含水量分布的平均绝对误差  $M_e$  和均方根差  $R_m$  分别不高于 0.034、0.040  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 相关系数  $R$  最小值为 0.8, Nash 效率系数  $N_e$  在 0.34~0.62 之间; 含盐量  $M_e$ 、 $R_m$  也分别不超过 3.31、4.24  $\text{g}/\text{kg}$ ,  $R$  最小值为 0.6,  $N_e$  在 -0.06~0.38 之间, 相关模型和参数较为合理可靠。在此基础上, 对该地区不同滴灌带埋深(分别设为 5、15、30 cm)情景下灌水过程中的水盐运动规律进行了进一步模拟与分析, 结果表明: 不同埋深导致土壤淡化和积盐区域分布不同, 淡化区域主要集中在滴灌带附近, 在远离滴灌带的湿润锋边缘出现积盐; 随着滴灌带埋深加大, 土面蒸发损失逐渐降低, 但对表层土壤供水能力也相应减弱; 综合考虑回收利用、棉花苗期水分供应、根区淡化脱盐需求及单方水的淡化脱盐效率等因素, 当地地下滴灌棉田一次性滴灌带不宜埋设过深, 建议布置在 15 cm 左右。

**关键词:** 地下滴灌; 一次性滴灌带; 合理埋深; 数值模拟; HYDRUS-2D/3D; 水盐运动

**中图分类号:** S275.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0191-08

## Numerical Simulation and Analysis on Depth of Disposable Tape in Cotton Field under Subsurface Drip Irrigation in Xinjiang, China

LI Xianwei<sup>1</sup> SHI Jianchu<sup>2</sup> WANG Shu<sup>2</sup> ZUO Qiang<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The technology of film mulched drip irrigation (FMDI) is applied widely to cotton cultivation in Xinjiang, China. Resulted from its characteristics of high ratio and small amount of irrigation, a problem of shallow roots and weak adversity resistance is often found in practice and thus would limit further development of FMDI. Since the irrigation water is supplied deeper in the root zone, the subsurface drip irrigation (SDI) is easily to be considered as an alternative to solve the problem. To avoid probable damage from mechanical farming and prolong the application duration, the irrigation tape in a traditional SDI system is usually buried in deeper root zone (e. g. beneath 35 cm from the soil surface), which might be extremely inconvenient for seedling irrigation and management maintenance of the irrigation system. In fact, with the technological progress and cost reduction for manufacturing the irrigation tape, the practical use of disposable drip irrigation tape is becoming more and more popular. The objective was to explore the reasonable depth of disposable drip irrigation tape in SDI by using numerical simulation method. The HYDRUS-2D/3D software was used to simulate the dynamics of soil water and salt, and a field experiment was conducted in Manasi County of Xinjiang autonomous region to validate the numerical model and selected hydraulic parameters. Simulated and observed soil water

收稿日期: 2017-05-05 修回日期: 2017-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501401、2016YFD02003003)

作者简介: 李显激(1986—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: lxwei5945@163.com

通信作者: 左强(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与节水农业机理研究, E-mail: qiangzuo@cau.edu.cn

content distributions were in good agreement with the maximum mean absolute error ( $M_e$ ) and root mean square error ( $R_m$ ) of  $0.034 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  and  $0.040 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , the minimum correlation coefficient ( $R$ ) of 0.8 and Nash - Sutcliffe efficiency coefficient ( $N_s$ ) of  $0.34 \sim 0.62$ , respectively, between them. Correspondingly for soil salinity distributions, the values of maximum  $M_e$  and  $R_m$  were  $3.31 \text{ g/kg}$  and  $4.24 \text{ g/kg}$ , the minimum  $R$  was 0.6 and  $N_s$  were  $-0.06 \sim 0.38$ , respectively, which was also in acceptable range. Then the transport processes of soil water and salt under SDI with different burying depths  $H$  (5 cm, 15 cm and 30 cm, respectively) for irrigation tape were simulated by using the validated numerical model and hydraulic parameters. The results showed that salt was gradually driven away from the tape by irrigation water, with soil salinity decreased around the tape but increased near the wetting front. While the increase of  $H$  resulted in decrease of evaporation loss, the shallow soil layers near surface would be more and more difficult to be wetted by irrigation water. Synthesizing the factors such as recycling convenience of disposable tape, water requirement for cotton seedling, desalination demand of root zone and water use efficiency for desalination, local disposable tape of SDI was recommended to set at about 15 cm, a moderate depth from the soil surface.

**Key words:** subsurface drip irrigation; disposable drip irrigation tape; reasonable depth; numerical simulation; HYDRUS - 2D/3D; water and salt dynamics

## 引言

膜下滴灌技术具有增温、保墒和淡化根区等特点,节水效率高且对盐碱地适应能力较强<sup>[1]</sup>,在降水稀少、蒸发强烈、土壤盐渍化危害严重的新疆地区得以快速发展<sup>[2]</sup>。随着膜下滴灌技术推广面积的不断增长,一些在生产实际中普遍存在且亟待解决的问题逐渐暴露出来,如:春季低温、降雨阻碍出苗、地膜残留污染严重以及高频率、低定额的地面滴灌造成棉花根系浅、抗性弱、易早衰等<sup>[3]</sup>。

地下滴灌是一种包括毛管在内的各级输水管道均处于地下的灌溉技术<sup>[4]</sup>,相对于地面灌溉来讲,可直接输送水分及养分至植物根区<sup>[5]</sup>,除具有较高的节水效率外,还可促进根系下扎,增强棉花抗性<sup>[6-7]</sup>,因而可能是解决上述膜下滴灌所导致问题的有效方式之一。我国新疆地区从20世纪末开始推广应用地下滴灌技术,相关研究主要集中在比较地表滴灌与地下滴灌对作物生长、土壤水盐分布的影响<sup>[8-10]</sup>:地下供水可促进棉花根系向深处生长,形成较为发达的根系,作物生长性状较好<sup>[11-12]</sup>;与常规地面沟灌和膜下滴灌相比,地下滴灌可分别节水36.1%和4.2%,铃数增多27.4%和9.2%,单株铃数增多36.8%和4.4%,单铃质量增加9.2%和2.2%<sup>[13]</sup>。

为降低成本和避免农机损坏,目前新疆棉田地滴灌带埋深多在35 cm左右<sup>[9]</sup>。尽管地下滴灌已呈现较高的节水效率和增产潜力,但大面积推广应用仍存在一定的困难,主要原因在于:地理滴灌管容易被机械和植物根系破坏,检修繁琐;由于埋深较大,苗期灌水存在困难<sup>[14-15]</sup>;为降低成本,地理滴灌带常多年使用,滴头可能会因为杂质淤积导致流量

减小、均匀度降低,需要定期冲洗维护<sup>[16]</sup>等。事实上,随着材料工艺水平的提高和生产规模的扩大,逐渐降低的生产制造成本使滴灌带的一次性使用已完全成为可能,采用一次性滴灌带代替多年使用的滴灌管,或许能应对上述问题。显然,为便于回收利用,一次性滴灌带的埋深不宜过大;为提高水分利用效率,其埋深也不宜过小。如何合理规划一次性滴灌带的埋深和布置模式仍有待进一步研究。

由于土壤类型及作物种类不同,实践中滴灌带埋深从2 cm到70 cm,铺设间距从25 cm到500 cm均有涉及<sup>[17]</sup>。做好地下滴灌系统规划设计的前提和关键是充分了解滴水过程中水分和盐分的动态变化过程,湿润区域大小和含水量分布、土壤淡化区域大小和分布都是设计滴灌带埋深和间距等所需参考的重要指标<sup>[6, 17]</sup>。用于了解滴灌过程中土壤水盐运动和分布情况的方法众多,数值模拟是其中最为准确和可靠的手段之一<sup>[18-19]</sup>,相对于耗时费力的田间试验,数值模拟可以根据需要任意调整埋深等设置参数进行研究,从而选择最优方案,因而具有更高的效率,此外,数值模拟结果也可为田间试验的进一步检验验证提供合理可靠的依据。由美国国家盐渍土实验室研发的HYDRUS软件是一款被广泛用于模拟饱和-非饱和带土壤水分、溶质运动的数值模拟软件,其模拟准确性较高<sup>[20]</sup>,并已获得大量验证和诸多成功应用<sup>[21]</sup>。国内地下滴灌数值模拟大多是在室内均质土壤中采用点源试验基础上进行的,主要针对土壤质地、滴头流量和埋深等因素对土壤水分运动的影响<sup>[22-24]</sup>,对土壤盐分运动的研究相对较少。

本文拟建立地下滴灌条件下的土壤水盐动态模拟数值模型,采用HYDRUS - 2D/3D软件和田间试



边界(包括图1中AB、DE和FG段)均为隔水边界(零通量边界)。模拟时长与试验持续时间相同,为36 h。

为了验证所建模型和所取得的土壤物理参数,采用平均绝对误差 $M_e$ 、均方根误差 $R_m$ <sup>[29]</sup>、相关系数 $R$ 和Nash效率系数 $N_s$ <sup>[30]</sup>对模拟结果进行评估,其中前几项为常用评估参数,而 $N_s$ 使用相对较少,其计算公式为

$$N_s = 1 - \frac{\sum_i^f (M_i - S_i)^2}{\sum_i^f (M_i - \bar{M})^2}$$

式中  $S_i$ ——第*i*个深度模拟值

$M_i$ ——第*i*个深度实测值

$\bar{M}$ ——实测平均值

$f$ ——实测点数, $f=10$

效率系数 $N_s$ 在负无穷至1之间,越接近于1表示模拟效果越好,接近于0则表示模拟结果接近观测值的平均值,总体结果相对较为一致。

### 3 情景设置

盐碱棉田中使用地下滴灌时,滴头间距与流量、毛管间距和埋深等众多参数均对土壤水盐分布产生较大影响,并最终影响根系生长、生物量累积和棉花产量。合理灌溉模式和参数的选择需基于不同布置方式下地下滴灌过程中水、盐运动规律的分析结果,因此,有必要设置不同布置情景,并对不同条件下滴灌带湿润范围、脱盐效果和水分利用效率等进行分析讨论,从而筛选出科学合理的布置方案。鉴于本研究的主要目的在于探索一次性滴灌带在新疆地下滴灌棉田中的合理埋深,因此数值模拟情景将主要针对不同埋深设置,其他各主要参数(如滴头间距与流量、毛管间距等)则参照实际应用和以往的研究成果取为固定值,具体如下:为了满足棉花在苗期的用水需求且实现滴灌带回收利用,减小施工难度和成本,滴灌带埋设深度( $H$ )不宜过大。因此,本研究共设置3个处理:5、15、30 cm。

主要受土壤水分分布的影响,地下滴灌条件下棉花根系分布通常较膜下滴灌深。如滴灌带埋深为35 cm时,根系主要分布在15~50 cm,并在15 cm(苗期形成)和30 cm(铃期形成)有2个明显的根系集中层<sup>[11]</sup>。因此,综合考虑植株生长不同时期根系吸水需求,模拟过程中,将0~40 cm土层设定为计划湿润层,当计划湿润层土壤平均含水量达到田间持水量( $0.36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )时即停止供水,继而分析比较不同处理剖面土壤含水量和含盐量的分布情况。

初始条件仍按田间试验实测获得的初始含水量、含盐量分布(图2、图3)给定。

其他参数包括:毛管铺设间距主要取决于当地的气候条件、土壤质地、作物种植模式等,较小的毛管间距有助于灌溉水分的均匀分布,但间距太小会使投资增加<sup>[31]</sup>。参照新疆近年来主要推荐的超宽膜膜下滴灌棉花种植方式常设的滴灌带间距<sup>[32]</sup>,本研究将毛管间距固定设为70 cm,根据对称原理,取单条滴灌带控制区域的一半( $35 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ )作为研究区域(即图1中的AG长度为35 cm,AE长度为100 cm),边界条件设置与上述第2节数值模型相同。另外,模拟过程中,根据当地一次性滴灌带实际应用情况<sup>[2]</sup>,将滴头间距和流量分别设定为30 cm和1.0 L/h。为了便于计算,按100 cm长度滴灌带来分析模拟结果。鉴于地下滴灌通常可以避免铺设薄膜,且灌溉过程也相对较为短暂,故模拟过程中暂不考虑作物根系吸水、覆膜及裸行等因素的影响,地表均统一设定为蒸发边界。

根据生产实际和相关研究结果,共设置了以上3个处理情景,相对于传统地下滴灌中滴灌带布置深度(35 cm),情景处理中5、15、30 cm的滴灌带埋深相对较浅,田间布置施工要求降低,且滴灌带布置间距具有配套的生产机械,进行田间试验验证时具有较强的可操作性。

## 4 结果与分析

### 4.1 试验结果及模型、参数验证

地下滴灌田间试验中,滴灌带埋深 $H=20 \text{ cm}$ ,供水持续36 h,耗水量为 $0.35 \text{ m}^3$ 。试验前后,水平方向上距滴灌带10 cm(图1中P点)和20 cm(图1中Q点)处剖面土壤含水量、含盐量的实测分布情况分别如图2、图3所示。

供水开始后,水分经滴灌带和滴头被源源不断地送进土壤,致使滴头周围土壤含水量逐渐增加,湿润范围不断扩大,距滴灌带越近,含水量越高,滴头处附近含水量增幅最大。受灌溉水分淋洗和蒸发作用等影响,距离滴灌带较近的区域脱盐(如图3a中5~40 cm深度范围内土壤含盐量明显降低,其中15~35 cm脱盐程度最大),而湿润锋边缘和地表局部区域处于积盐状态(如图3a中0~5 cm,及图3b中15~45 cm深度处均积盐)。

应用上述模型、参数和软件对地下滴灌试验中的水盐动态进行了模拟,结果表明:除个别点外,剖面土壤含水量分布模拟值和实测值总体吻合较好(图2),平均绝对误差 $M_e$ 和均方根差 $R_m$ 分别不大于0.034、 $0.040 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (表2),相关系数 $R$ 最小值

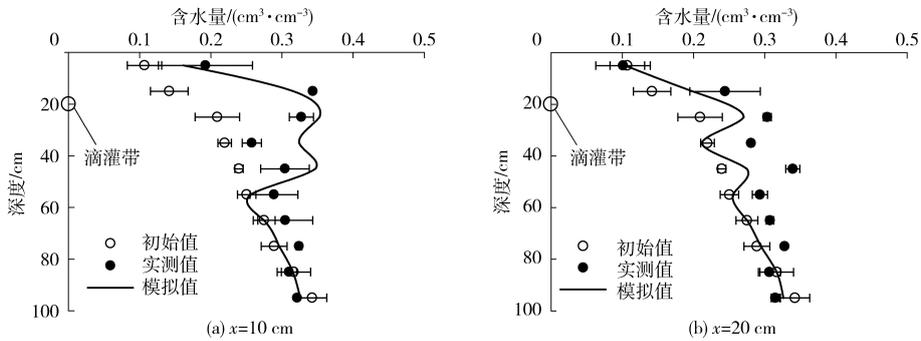


图2 初始含水量分布及灌水结束时水平方向距滴灌带不同位置处含水量分布实测值与模拟值的对比

Fig.2 Comparisons of measured and simulated soil water content distributions at different sampling sites

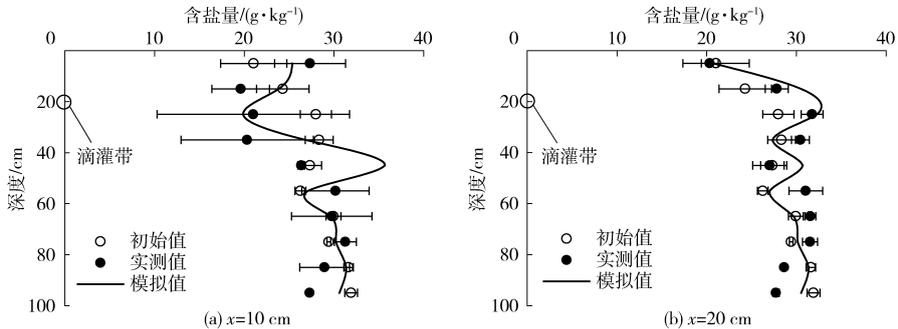


图3 初始含盐量分布及灌水结束时水平方向距滴灌带不同位置处含盐量分布实测值与模拟值的对比

Fig.3 Comparisons of measured and simulated soil salinity distributions at different sampling sites

为 0.8, Nash 效率系数  $N_s$  在 0.34 ~ 0.62 之间, 在可接受范围之内; 含盐量分布结果也基本反映实测盐分变化动态(图3), 相应  $M_e$  和  $R_m$  分别不大于 3.31、4.24 g/kg(表2),  $R$  最小值为 0.6,  $N_s$  在 -0.06 ~ 0.38 之间, 两层土壤分层界面附近模拟值与实测值之间的较大误差导致盐分分布模拟效果稍差, 但其他深度处的总体趋势仍然基本一致。由于剖面土壤含盐量整体较高(基本在 20 g/kg 以上), 这样的数值模拟误差也应在可接受范围之内。总体而言, 所建立的模型和选用的土壤物理参数是合理可靠的, 可有效用于模拟当地地下滴灌过程中的水、盐运动规律。当然, 如何提高不同质地土壤分界面处水盐动态的模拟精度仍有待进一步研究。

#### 4.2 情景模拟

应用以上经校验的模型和参数, 按照前述第3节所设置的情景(包含 5、15、30 cm 共3种埋深)

表2 数值模型和土壤物理参数验证情况

Tab.2 Validation results of numerical model and soil physical parameters

项目	剖面 $x/cm$	$M_e$	$R_m$	$R$	$N_s$
含水量	10 (P)	0.029 $cm^3/cm^3$	0.034 $cm^3/cm^3$	0.8	0.34
	20 (Q)	0.034 $cm^3/cm^3$	0.040 $cm^3/cm^3$	0.9	0.62
含盐量	10 (P)	3.31 g/kg	4.24 g/kg	0.6	-0.06
	20 (Q)	2.31 g/kg	2.60 g/kg	0.7	0.38

进一步进行数值模拟, 以探讨一次性滴灌带的合理埋深问题。

#### 4.2.1 不同埋深对灌水量及水分损失的影响

模拟开始后, 水分从滴灌带进入周边土壤, 经过一定时间后(表3), 3个处理计划湿润层(0 ~ 40 cm)土壤平均含水量均从 0.17  $cm^3/cm^3$  上升到 0.36  $cm^3/cm^3$  (田间持水量), 相应的灌水量、蒸发及深层渗漏损失量如表3所示。

表3 不同滴灌带埋深条件下的供水时长、灌水量、蒸发及渗漏损失量

Tab.3 Duration of drip irrigation and corresponding amount of irrigation, evaporation and deep drainage under different treatments

滴灌带埋深/cm	供水时长/h	灌水量/mm	蒸发		深层渗漏		水分综合损失	
			蒸发量/mm	蒸发损失率/%	渗漏量/mm	渗漏损失率/%	损失量/mm	综合损失率/%
5	21	99.7	2.3	2.3	4.8	4.9	7.2	7.2
15	12	57.0	1.8	3.1	2.9	5.1	4.7	8.2
30	15	71.2	0.9	1.3	13.2	18.6	14.2	19.9

注: 蒸发、渗漏、综合损失率分别指蒸发量、渗漏量、水分综合损失量在灌水量中所占的比例。

滴灌带埋深不同,使得计划湿润层达到田间持水量所需灌水时长和灌水量差异较大。15 cm 滴灌带靠近计划湿润层中部位置,因此使计划湿润层达到田间持水量所需供水时长最短、灌水量最少,与 5 cm 和 30 cm 相比,15 cm 供水时长分别减少 9 h 和 3 h,灌水量分别减少 43% 和 20%。

3 个处理的蒸发损失量分别为 2.3、1.8、0.9 mm (表 3),显然,加大  $H$  有助于减少土面蒸发损失。但  $H$  的加大将直接导致深层渗漏量的增加,故 30 cm 处理深层渗漏量最大,损失率达 18.6%,相比之下,5 cm 和 15 cm 渗漏损失率仅有 4.9% 和 5.1%,事实上,由于供水时间长、灌水量大,尽管 5 cm 处理的渗漏损失率较 15 cm 处理略低,但其深层渗漏损失量却大大高于 15 cm。总体而言,与 15 cm 相比,5 cm 和 30 cm 处理损失水量较多,蒸发和渗漏量之和分别增加 53% 和 202%。

#### 4.2.2 不同埋深对土壤水盐分布和淡化脱盐效果的影响

不同  $H$  处理灌水结束时剖面土壤含水量分布

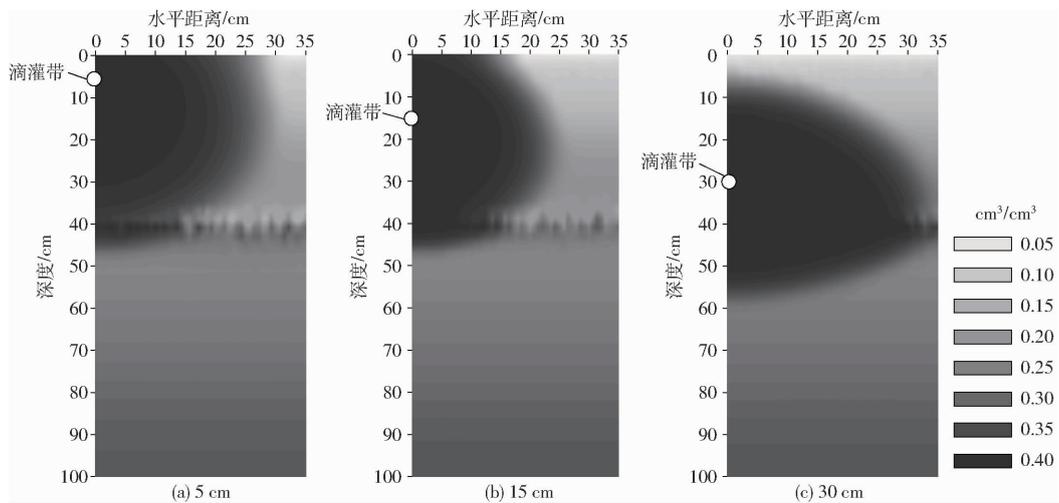


图 4 不同滴灌带埋深( $H$ )灌水结束时土壤剖面含水量分布情况

Fig. 4 Simulated distributions of soil water content at end of simulation for different treatments

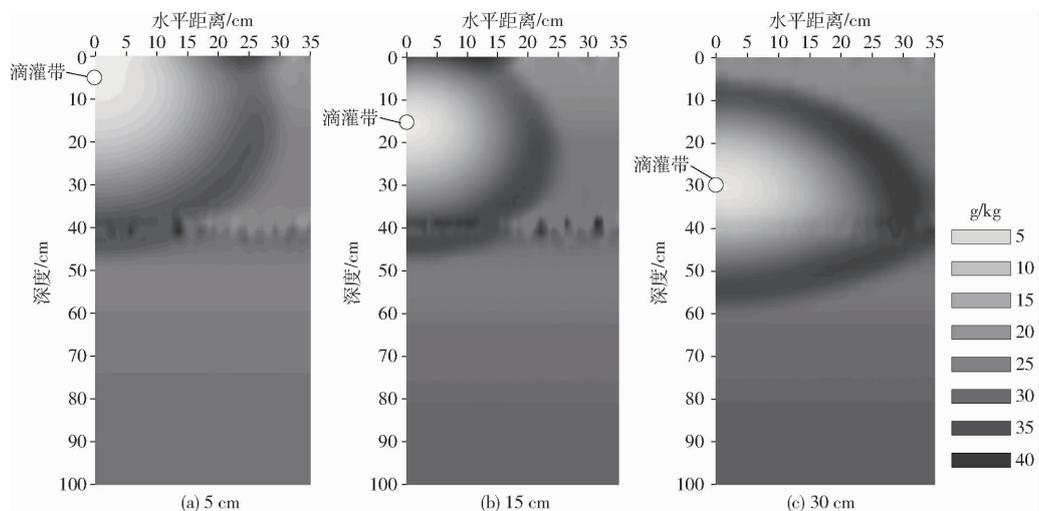


图 5 不同滴灌带埋深( $H$ )处理灌水结束时土壤剖面含盐量分布情况

Fig. 5 Simulated distributions of soil salinity at end of simulation for different treatments

情况如图 4 所示,从图中可以看出,滴灌带附近含水量最高,距离滴灌带越远含水量越低。随埋深加大,运动到土壤表层的水分相对减少,水分向下运动深度也逐渐加大。5 cm 处理和 15 cm 处理向上运动的水分均达到土壤表面,但 5 cm 处理在土壤表面湿润宽度较 15 cm 处理大;30 cm 处理有相当一部分水分运动到计划湿润层以下,造成较大渗漏损失。另外,随着  $H$  加大,水平方向上最大湿润宽度所在位置逐渐下移,其中 30 cm 处理表现最为明显,受土壤分层结构影响,下层土壤导水性能较上层土壤差,湿润锋到达土壤分层界面后,向下运动速度减缓,水平方向上运动得以加强。

相应地,灌水结束时滴灌带不同埋深处理土壤剖面含盐量分布情况如图 5 所示。滴灌带附近的土壤脱盐淡化,而湿润锋处积盐,滴灌带埋深不同导致土壤淡化和积盐区域分布不同。随埋深加大,土壤淡化区域逐渐下移,5 cm 处理主要在滴灌带附近的土壤表面形成脱盐区域;15 cm 和 30 cm 处理土壤表

面基本处于淡化区之外,因而含盐量有不同程度的增加。相对来看,15 cm 处理淡化区域集中分布在计划湿润层,有利于根系生长。

从湿润层整体含盐水平和淡化脱盐效果看,灌水前各处理土壤盐分分布一致,计划湿润层平均含盐量为 25.4 g/kg,灌水结束时各处理分别为 24.1、25.4、22.9 g/kg。整体来看,15 cm 处理的供水基本以湿润土壤、增加计划湿润层土壤含水量为主,而 5 cm 和 30 cm 处理由于供水时间较长、供水量较多,其深层渗漏量较大,从而对计划湿润层土壤产生了一定的淋洗作用,其中 30 cm 处理的淋洗最强,因此 15 cm 处理整体含盐量基本保持不变,5 cm 处理出现小幅下降,30 cm 处理则下降明显。与初始含盐量相比,各处理计划湿润层内土壤剖面淡化脱盐面积占比分别为 34.7%、27.8%、33.3%,就单位长度(100 cm)滴灌带而言,其单方水的淡化脱盐效率(即淡化脱盐区域体积占灌水量的比例)分别为 1.39、1.95、1.87  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。由此可见,由于灌水量相对较小,且水盐运动主要集中在计划湿润层,尽管 15 cm 处理淡化脱盐面积较小,但其单方水的脱盐效率却最高;而较大的蒸发损失以及灌溉水分运动深度较浅,使得 5 cm 处理单方水的淡化脱盐效率最低。

## 5 讨论

应用一次性滴灌带的地下滴灌技术具有十分明显的优势:①地下滴灌可有效解决膜下滴灌所导致的棉花根系浅、抗性弱、易早衰等问题,而一次性滴灌带的采用则可充分保证苗期水分供应,并避免繁琐的设备维护和检修;合理的滴灌带埋深可减小地表湿润面积和蒸发损失,并进而抑制杂草生长<sup>[31]</sup>。②可避免塑料薄膜的大规模应用,从而减少对田间土壤和周边环境的白色污染<sup>[3]</sup>。③地下滴灌条件下相对干燥的地面还有利于降低病虫害发生概率<sup>[33]</sup>,且便于机械行进、提高田间管理效率。④目前新疆地下滴灌棉田中的滴灌带埋深较大、多年使用,埋设位置往往无法与植株种植模式完全匹配,滴灌带上方可能是植株行,也可能是膜间空白区域,从

而使灌溉效率无法得到可靠保障;而浅埋一次性滴灌带可在播种时将滴灌带准确地布设在植株行中间,既能保证“一管两行”的布置模式,获得较好的灌溉均匀性,还能有效避免根系入侵对滴灌带的影响。

较高的土壤含盐量会对根系水分/养分吸收产生不利影响,无论是地面还是地下滴灌都仅能在滴灌带附近形成一定程度的淡化区域,保持短期内尚不至于对作物生长产生较大影响,但盐分并没有被排除农田之外,从可持续发展角度看,长期滴灌条件下如何保证根区处于脱盐状态仍有待进一步深入研究。

## 6 结论

(1)地下滴灌田间试验结果表明,本文所建立的数值模型和取得的土壤物理参数可较好地用于模拟地下滴灌条件下的土壤水盐动态,控制土壤含水量分布模拟值和实测值间的平均绝对误差  $M_e \leq 0.034 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、均方根差  $R_m \leq 0.040 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、相关系数  $R \geq 0.8$ 、Nash 效率系数  $N_s$  在 0.34 ~ 0.62 之间;含盐量  $M_e \leq 3.31 \text{ g/kg}$ 、 $R_m \leq 4.24 \text{ g/kg}$ 、 $R \geq 0.6$ 、 $N_s$  在 -0.06 ~ 0.38 之间,除土壤分层界面上下模拟效果稍差外,其他位置整体趋势基本一致。

(2)利用上述经过验证的数值模型和土壤物理参数,根据当地膜下滴灌棉田常规种植模式,以灌水至根系层平均含水量达田间持水量为标准,进一步对 3 种不同滴灌带埋深(5、15、30 cm)条件下灌水过程中的水盐运动规律进行了数值模拟与分析,模拟结果表明:随滴灌带埋深加大,地表蒸发损失减小,但深层渗漏损失相对增加;淡化区域主要集中在滴灌带附近,在远离滴灌带的湿润锋边缘出现积盐;不同埋深导致土壤淡化和积盐区域分布不同,15 cm 处理淡化区域集中分布在计划湿润层,有利于根系生长,尽管其淡化脱盐区域面积相对较小,但由于耗水量较低,其单方水脱盐效率最高,达 1.95  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。总体而言,考虑到回收方便、苗期用水及根区脱盐等需求,当地地下滴灌棉田一次性滴灌带埋深以 15 cm 左右为宜。

## 参 考 文 献

- 1 WANG Ruoshui, KANG Yaohu, WAN Shuqin, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110:109 - 117.
- 2 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊1): 98 - 105.
- 3 LIU Meixian, YANG Jingsong, LI Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(Supp.1):98 - 105. (in Chinese)
- 4 李显微,石建初,左强. 新疆棉花膜下滴灌技术存在的问题及改进措施——双层可降解膜覆盖与地下滴灌技术结合应用探讨[J]. *农业工程*, 2012, 2(10):29 - 35.
- 5 LI Xianwei, SHI Jianchu, ZUO Qiang. Problems and improvements of plastic mulched drip irrigation for cotton plantation in

- Xinjiang feasibility of application for combining double degradable films mulch with subsurface drip irrigation [J]. *Agricultural Engineering*, 2012, 2(10):29–35. (in Chinese)
- 4 仵峰, 宰松梅, 丛佩娟. 国内外地下滴灌研究及应用现状[J]. *节水灌溉*, 2004(1):25–28.
- 5 ELMALOGLOU S, DIAMANTOPOULOS E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11):1587–1595.
- 6 KANDELOUS M M, ŠIMŮNEK J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(7):1070–1076.
- 7 BEDNARZ C W, RITCHIE G L, WHITAKER J R, et al. Cotton subsurface drip and overhead irrigation efficiency, maturity, yield, and quality [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(6):1763–1768.
- 8 宰松梅, 仵峰, 范永申, 等. 不同滴灌形式对棉田土壤理化性状的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12):84–89.  
ZAI Songmei, WU Feng, FAN Yongshen, et al. Effects of drip irrigation patterns on soil properties in cotton field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12):84–89. (in Chinese)
- 9 王振华, 吕德生, 温新明. 地下滴灌条件下土壤水盐运移特点的试验研究[J]. *石河子大学学报:自然科学版*, 2005, 23(1):85–87.  
WANG Zhenhua, LV Desheng, WEN Xinming. Experimental research on characteristic of soil water and salt transport under subsurface drip irrigation [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2005, 23(1):85–87. (in Chinese)
- 10 吕宁, 侯振安, 龚江. 不同滴灌方式下咸水灌溉对棉花根系分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(5):58–62.  
LŪ Ning, HOU Zhen'an, GONG Jiang. Effects on cotton root distribution under different drip irrigation with saline-water [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5):58–62. (in Chinese)
- 11 王振华, 吕德生, 温新明, 等. 地下滴灌对棉花生理性状及产量影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2006(4):11–13.  
WANG Zhenhua, LV Desheng, WEN Xinming, et al. Research on influence of subsurface drip irrigation on cotton physiology character and yield in Xinjiang [J]. *Water Saving Irrigation*, 2006(4):11–13. (in Chinese)
- 12 周建伟, 何帅, 李杰, 等. 棉花地下滴灌灌溉效应研究[J]. *新疆农业科学*, 2005, 42(1):41–44.  
ZHOU Jianwei, HE Shuai, LI Jie, et al. Effect of underground drip irrigation on cotton [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2005, 42(1):41–44. (in Chinese)
- 13 范永申, 仵峰, 张银炎, 等. 地下滴灌条件下棉花土壤水分运移田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(4):1–3.  
FAN Yongshen, WU Feng, ZHANG Yinyan, et al. Changing of soil moisture in cotton field under subsurface drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(4):1–3. (in Chinese)
- 14 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 不同滴灌方式对棉田土壤盐分的影响[J]. *水利学报*, 2011, 42(12):1496–1503.  
ZAI Songmei, WU Feng, WEN Ji, et al. Effect of drip fertigation on soil salinity of cotton field in Northwest China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(12):1496–1503. (in Chinese)
- 15 安俊波, 王振华, 温新明, 等. 不同栽培方式对地下滴灌棉花形态指标及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1):93–96.  
AN Junbo, WANG Zhenhua, WEN Xinming, et al. Test research on influence of different cultivation patterns on growth parameter and yield of subsurface drip irrigation cottons [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1):93–96. (in Chinese)
- 16 仵峰, 吴普特, 宰松梅, 等. 基于田间定位观测的地下滴灌毛管性能评价[J]. *水利学报*, 2009, 40(5):556–563.  
WU Feng, WU Pute, ZAI Songmei, et al. Field investigation and evaluation of drip line performance in subsurface drip irrigation system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(5):556–563. (in Chinese)
- 17 CAMP C R. Subsurface drip irrigation: a review [J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(5):1355–1367.
- 18 SKAGGS T H, TROUT T J, ŠIMŮNEK J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(4):304–310.
- 19 SCHWARTZMAN M, ZUR B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1986, 112(3):242–253.
- 20 KANDELOUS M M, ŠIMŮNEK J. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation [J]. *Irrigation Science*, 2010, 28(5):435–444.
- 21 ELMALOGLOU S, SOULIS K X, DERCAS N. Simulation of soil water dynamics under surface drip irrigation from equidistant line sources [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(12):4131–4148.
- 22 李道西, 彭世彰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分分布影响的计算机模拟[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5–6):507–509.  
LI Daoxi, PENG Shizhang. Computer simulation on soil-water movement under the condition of different irrigation design parameters in subsurface drip irrigation [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5–6):507–509. (in Chinese)
- 23 池宝亮, 黄学芳, 张冬梅, 等. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(3):56–59.  
CHI Baoliang, HUANG Xuefang, ZHANG Dongmei, et al. Numerical simulation and validation of soil water movement under subsurface drip irrigation with point-source emitter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(3):56–59. (in Chinese)
- 24 程先军, 许迪. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6):1–4.  
CHENG Xianjun, XU Di. Mathematical model for simulating water flow and solute transport during non-steady diffusion from subsurface trickle source [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6):1–4. (in Chinese)

1995, 32(8):789-793.

- 15 文棋. 全自动自清洗过滤器过滤机理分析及控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- 16 宗全利, 刘飞, 刘焕芳, 等. 滴灌用自清洗网式过滤器排污压差计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):107-112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121120&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121120&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.020.  
ZONG Quanli, LIU Fei, LIU Huanfang, et al. Calculating and experiment on drainage pressure difference of self-cleaning screen filter for drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):107-112. (in Chinese)
- 17 刘飞, 刘焕芳, 宗全利, 等. 自清洗网式过滤器水头损失和排污时间研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5):127-134. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130523&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130523&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.023.  
LIU Fei, LIU Huanfang, ZONG Quanli, et al. Experiment on head loss and discharge time of self-cleaning screen filter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):127-134. (in Chinese)
- 18 徐茂云. 微灌用筛网式过滤器水力性能的试验研究[J]. 水利学报, 1992, 23(3):54-56, 64.
- 19 丁启圣, 王唯一. 新型实用过滤技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- 20 KONRAD H, THOMAS H, MICHAEL S, et al. Analysis of adhesion forces between particles and wall based on the vibration method[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2012, 19(4):269-276.
- 21 CHI Tien, BANDARU V R. Modeling the performance of cross-flow filtration based on particle adhesion [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 117:336-345.

(上接第 198 页)

- 25 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.  
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)
- 26 ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M Th, ŠEJNA M. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water heat and multiple solutes in variably-saturated media technical manual version 1.0 [M]. Prague, Czech Republic: PC-progress, 2006.
- 27 张明柱, 黎庆淮, 石秀兰. 土壤学与农作学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- 28 张林, 吴普特, 范兴科. 多源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):40-45.  
ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):40-45. (in Chinese)
- 29 RAMOS T B, ŠIMŮNEK J, GONÇALVES M C, et al. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters [J]. Agricultural Water Management, 2012, 111:87-104.
- 30 徐旭, 黄冠华, 黄权中. 农田水盐运移与作物生长模型耦合及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):110-117.  
XU Xu, HUANG Guanhua, HUANG Quanzhong. Coupled simulation of soil water flow, solute transport and crop growth processes at field scale and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4):110-117. (in Chinese)
- 31 仵峰, 宰松梅, 徐建新, 等. 地下滴灌的应用模式与启示[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 2016, 37(3):19-22.  
WU Feng, ZAI Songmei, XU Jianxin, et al. Application modes and inspiration of subsurface drip irrigation [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2016, 37(3):19-22. (in Chinese)
- 32 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22):90-99.  
NING Songrui, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):90-99. (in Chinese)
- 33 刘毅, 李春燕, 刘志刚, 等. 新疆膜下滴灌棉田病虫害的发生特点及防治[J]. 江西棉花, 2010, 32(3):61-62.