文章编号: 1672 - 3317 (2022) 06 - 0131 - 09

# 暗管断面结构对非饱和土壤中暗管排水排盐效果的影响

韩 寒<sup>1</sup>, 李明思<sup>1\*</sup>, 张锦华<sup>1</sup>, 柳幸爽<sup>1</sup>, 徐 强<sup>1</sup>, 陈文娟<sup>2</sup> (1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2.石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要:【目的】研究不同断面结构的暗管在非饱和土壤中的排水排盐效果。【方法】选用了 4 种断面结构的暗管 在室内进行土柱滴灌排水试验;其中,T1 为底部不透水的圆形暗管,T2 为底部不透水的等边三角形暗管,T3 为底 部带不透水翼的圆形暗管,T4 为底部带不透水翼的等边三角形暗管;各暗管均由金属丝网构成,外裹无聚酯长丝针 刺无纺土工布作滤层。供试土壤为砂土,每个土柱灌水 7 L,每个处理设置 5 个重复。利用 MATLAB 平台对 4 种暗 管周围的非饱和土壤水分运动进行了模拟。【结果】T2 处理的拦截面宽度大于T1 处理,其对水分的吸持能力是T1 处理的 2 倍;且对土壤水分绕流现象的抑制作用比 T1 处理的性能略好。T2 处理的暗管出水时间比 T1 处理的提早 7.45 h;对暗管增加底翼后,可增强其抑制土壤水绕流的能力,提高其排水排盐效果;其中,T3、T4 处理的提早 7.45 h;对暗管增加底翼后,可增强其抑制土壤水绕流的能力,提高其排水排盐效果;其中,T3、T4 处理的暗管底 部 50 cm 处的土壤含水率分别为 17.02% ±0.37%和 16.62% ±0.77%,均小于T1、T2 处理同位置处的土壤含水率;T3、 T4 处理的排水量分别比 T1、T2 处理的值增加 119.8 mL 和 119.7 mL,排盐量增加 16.76 g 和 18.83 g;T3、T4 处理的 暗管出水时间分别比 T1、T2 处理的齿水时间提前 9.79 h 和 3.47 h。通过数值模拟进一步验证了 T2 处理可以抑制绕 流;暗管增加底翼后,可进一步提高其抑制绕流的能力。【结论】在非饱和土壤中,三角形断面暗管抑制土壤含水 率绕流的作用好于圆形断面暗管的同类能力;暗管增加底翼后,可以进一步提高其对绕流现象的抑制作用,提高其 排水排盐能力。

关键词:排水暗管;非饱和土壤;排水排盐;盐碱地治理 中图分类号:S276.7;S156.4 文献标志码:A d

A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022009

OSID:

韩寒, 李明思, 张锦华, 等. 暗管断面结构对非饱和土壤中暗管排水排盐效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 131-139.

HAN Han, LI Mingsi, ZHANG Jinhua, et al. Effect of Cross Section of Subsurface Drain on Its Performance[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 131-139.

## 0 引 言

【研究意义】传统的暗管排水技术是建立在饱和 流理论基础上的<sup>[1]</sup>。在地下水位低于田间排水暗管的 埋设位置时,如果进行灌水压盐并通过暗管排盐,则 需先抬高地下水位才能实现排水、排盐<sup>[2]</sup>,这种做法 对于节约用水和保护地下水质来说都是很不合理的。 在新疆干旱地区,节水和治理盐碱地是当地农业发展 中需要解决的2个根本问题。大面积的滴灌技术推广, 为新疆农业产量的提升和生态保护打下了很好的基 础<sup>[3]</sup>。然而,滴灌技术的特点是"浅灌、勤灌",土 壤始终处在非饱和状态,不适用于将土壤盐分淋洗到 地下水中<sup>[4]</sup>,往往导致盐分在耕作层以下聚积<sup>[5-6]</sup>;如 果要将盐分淋洗出农田,则需在作物非生育期专门进 行大定额灌水压盐、利用排水暗管将盐分排出<sup>[7-8]</sup>。

**基金项目**:国家自然科学基金重大项目(51790533)

作者简介:韩寒(1996-),女,河南睢县人。硕士研究生,主要从事干 旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail:1678534432@qq.com 通信作者:李明思(1965-),男。博士,教授,主要从事灌溉原理与新 技术应用研究。E-mail:leemince@126.com 如何利用滴灌"勤灌"的特点,在作物生育期内实现 暗管在非饱和土壤中的排水排盐效果,是当前需重点 解决的问题。在非饱和土壤中,水分往往会沿着暗管 周围绕流而不进入暗管,为此需要对暗管本身及其周 围的条件进行改造,以抑制绕流现象。前人的研究发 现,通过改进暗管结构、外包滤层结构、滤层的材料 性质、暗管开孔率、增加大孔隙流导管等等措施,可 以减缓土壤水分的绕流现象,实现暗管在非饱和土壤 中排水的效果<sup>[9-11]</sup>。

【研究进展】李显溦等<sup>[12]</sup>将暗管底部做防渗处理, 利用 HYDRUS-2D 软件对这种暗管在滴灌条件下的 排水效果进行了模拟分析,发现此种处理可增大暗管 的汇流面积,进而提高暗管的排水排盐效果。陈名媛 等<sup>[13]</sup>通过室内土槽试验,研究了滴灌条件下暗管的排 水排盐规律,发现只有当地下水位淹没暗管以后,暗 管才会实现排水。秦文豹等<sup>[9]</sup>通过改变暗管滤层的结 构,减缓了暗管周围水分的绕流过程,实现了非饱和 土壤中的暗管排水。聂锦杰等<sup>[10]</sup>通过使用连接大孔隙 流导管的暗管,在土槽中实现了滴灌条件下非饱和土

收稿日期: 2022-03-04

壤中的暗管排水。谢中意[14]测定了不同土工布对水分 的吸持能力,发现其在作为暗管外包裹滤层材料时, 会将土壤中的水分吸附到暗管管壁上,进而促进暗管 排水;同时,该研究还通过对暗管设定不同开孔率, 比较其排水的阻力差异,得出暗管开孔率越大,水分 进入暗管的阻力越小。学者们也常用仿真工具来研究 暗管排水过程,例如:HYDRUS、DRAINMOD、SWAP、 RZWQM 等软件,取得了很多有价值的结果;但是, 这些仿真工具在解决暗管排水问题时主要是针对饱 和土壤[15-18],没有考虑非饱和土壤的特殊情况。【切 入点】前人在非饱和土壤暗管排水方面的研究取得了 大量成果,但这些成果仍然是探索性的。例如,复杂 的砂砾石滤层结构可以使暗管在非饱和土壤中排水 排盐,但施工复杂;利用大孔隙流理论来促进暗管排 水,不仅存在暗管制作工艺上的问题,还存在大孔隙 流导管对田间耕作造成不便的问题。尽管如此,前人 的研究成果证明了可以通过一定的技术改造使暗管 在非饱和土壤中实现排水效果。由于这一问题有其特 殊的研究背景,目前的研究成果还较少,因此有必要 围绕这一问题探索新的方法,使该技术或理论进一步 完善。为了进一步探究非饱和土壤中的暗管排水过程, 故采用可以模拟非饱和土壤中暗管排水的 MATLAB 软件进行非饱和土壤中的暗管排水的模拟。【拟解决 的关键问题】本研究以土工布滤层和大开孔率暗管为 基础,在前人研究成果的基础上,提出不同断面结构 的暗管,比较其在非饱和土壤中的排水排盐效果,分

析适用于非饱和土壤排水的暗管结构形式,为开发用 于滴灌盐碱地的节水治盐技术提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2020 年 11 月—2021 年 10 月在石河子大 学水利建筑工程学院水利与土木工程实验中心进行。 试验用土为砂土(其中砂粒量 96.80%±0.77%,粉砂 粒量 0.86%±0.08%,黏粒量 2.95%±0.06%),土壤干 体积质量为 1.72 g/cm<sup>3</sup>;土壤饱和含水率、田间持水 率、初始含水率分别为 22.44%、16.32%、1.25%(质 量百分数);土壤盐分类型以硫酸盐为主,初始含盐 量为 1.8%,为中度盐渍土。试验用土柱规格为:内 径 20 cm,高度 80 cm。试验用暗管为金属丝网架结 构无壁管,开孔率为 72.3%,其断面结构形式分别为: 圆形、三角形和底翼型;管外包裹滤层材料规格为 300 g/m<sup>2</sup>的无聚酯长丝针刺无纺土工布<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验设计与方法

### 1.2.1 暗管断面结构设计

将金属丝网加工成管状,外包土工布,做成排水 暗管。其中,暗管断面结构设计成4种形式,T1:底 部不透水的圆形暗管;T2:底部不透水的等边三角形 暗管;T3:底部带不透水翼的圆形暗管;T4:底部带 不透水翼的等边三角形暗管。圆形暗管直径为5 cm, 等边三角形暗管的边长为5.24 cm,二者的周长均为 15.71 cm;不透水翼的总长为12 cm。每种形式的暗 管长度均为18 cm。横截面结构见图1。





## 1.2.2 暗管排水装置布置

试验前在土柱底部装填5cm厚的砂砾石垫层。将 盐碱土风干后粉碎过筛,再分层装填到土柱中,每层 为5cm。砂砾石垫层和盐碱土之间设置隔水板,隔水 板的开孔率为25%。将制作好的暗管布置在土层深度 40~45cm之间,暗管布置坡度为1%(图2(a))。 试验中采用容量为1L的树木输液袋供水,每个土柱 设置一个输液袋,输液袋的滴头位于土柱中间。试验 用水为自来水,矿化度0.15g/L。试验中4种处理的暗 管均开始出水后停止灌水,以保持每个处理灌水量相 同,试验中每个土柱灌水7L,每种处理设置5个重复, 取平均结果进行分析。





### 1.2.3 测试指标

试验在室内进行,试验过程中环境比较稳定,室 内温度在 17~20 ℃之间,无风。另外,从灌水停止 到取土样之间的时间不长,所以认为蒸发量不大;为 减少水分蒸发,试验中在土壤表面覆盖了1层滤纸。 试验中每隔1h在土槽外部观察水分入渗情况,并标 注湿润锋位置。暗管排水结束48h后开始取样,测 土壤含水率和含盐量。

在暗管正上方和暗管两侧用直径 2 cm 的土钻取 土,取样点分布见图 2 (b)。取样时,沿土层深度 方向每隔 5 cm 取 1 个样。用烘干法测定土壤质量含 水率。提取 1:5 土—水质量比的浸提液,测定其电 导率;然后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,即:

C=0.361 2 $E_c$ -0.064 2 ( $R^2=0.986$  7), (1) 式中: C 为土壤含盐量(%);  $E_c$  为电导率( $\mu$ s/cm)。

待暗管出水后,每隔2h利用 50 mL 量筒量测暗 管的排水量,试验中利用电导率法测暗管排出水的电 导率,再利用式(1)换算含盐量。

1.3 数据处理与分析

利用 Excel 2013 对试验数据进行整理并绘制水 分分布图和盐分分布图;采用 SPSS 19.0 对暗管排水、 排盐效果进行显著性分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同断面暗管对土壤水的拦截能力分析

前人研究表明,在非饱和土壤中要提升暗管排水 效果就要解决土壤水沿暗管周围绕流的问题<sup>[9]</sup>;而在 暗管周围对土壤水进行拦截、吸持、降低其进入暗管 的阻力等措施,可以起到抑制或减缓绕流现象的效果。 由谢中意<sup>[11]</sup>针对不同规格土工布所做的吸水能力试 验结果可知,无聚酯长丝针刺无纺土工布不仅具有比 短丝土工布更好的吸水能力,而且当土工布放置的水 平夹角(土工布的切线方向与水平方向的夹角)越小 时,其对水分的吸持能力越强。



图 3 暗管的投影面宽度示意

Fig.3 Projection plane width diagram of concealed tube

圆形断面暗管的外包土工布在暗管上半部位与 水平方向的夹角是从 0°(在暗管顶部)逐步增大到 90°(在暗管侧面)(图 3 (a));而在暗管的下半 部位,土工布与水平方向的夹角大于 90°,吸持在土 工布中的水分受重力作用向下方运动,对水分绕流现 象的抑制作用降低。

对于等边三角形断面的暗管,其外包土工布与水 平方向的夹角始终是 60°(图 3(b))。在断面周长 相同的情况下(即制作管道的材料用量相同),设圆 形断面暗管与等边三角形断面暗管的断面周长均为*L*, 取单位管段长度 *b*;可以分析出等边三角形断面暗管 的土工布以 60°角拦截并吸持土壤水分的面积 *A*<sub>t</sub> 为:

$$A_{t} = \frac{2}{3} L \cdot b_{\circ} \tag{2}$$

对圆形断面的暗管,根据谢中意<sup>[11]</sup>的研究结论, 圆心角 2×60<sup>9</sup>所对应的圆周上部圆弧段对土壤水分的 拦截作用和相应的土工布对土壤水分的吸持作用,都 大于在这个弧段以下部分的弧段的同类作用,而这个 弧段的长度为 *L*/3。圆形断面暗管上土工布吸持土壤 水的面积 *A*<sub>c</sub>为:

$$A_{\rm c} = \frac{L \cdot b}{3} \, . \tag{3}$$

表明在此条件下,等边三角形断面的暗管对土壤 水分的吸持能力是圆形断面暗管对水分吸持能力的 2倍。由此推断,本试验中等边三角形断面暗管对土 壤水分绕流现象的抑制作用应该好于圆形断面暗管 的同类性能。

暗管的断面宽度对土壤水分的绕流过程起着一定的阻碍作用。断面越宽,暗管顶部水分的绕流路径 将会越长,暗管断面对水分的拦截作用也就越强,水 分绕流越困难。在暗管断面周长相同的情况下,本试 验中的等边三角形暗管的断面拦截宽度 *B*<sub>t</sub> 与圆形暗 管的断面拦截宽度 *B*<sub>c</sub>分别为:

等边三角形暗管:

$$B_{\rm t} = \frac{L}{3^{\circ}} \tag{4}$$

圆形暗管:

$$B_{\rm c} = \frac{L}{\pi^{\circ}}$$
(5)

由于 π>3, 所以 B<sub>t</sub>>B<sub>c</sub>,即等边三角形断面暗管 的拦截宽度大于圆形断面暗管的拦截宽度;所以,推 断出等边三角形断面暗管对土壤水分绕流现象的抑 制作用应该好于圆形断面暗管的同类性能。

### 2.2 暗管断面结构对非饱和土壤排水的影响

试验过程中,渗入到砂砾石垫层中的水面始终低 于隔水板,即隔水板以上的土壤始终都没有达到饱和 状态。试验结束后对各土层土壤质量含水率进行分析, 发现 4 种处理下的土柱中各土层含水率均小于饱和





5 次重复试验结果显示,无翼情况下,三角形暗 管(T2)底部 50 cm 深度处的土壤平均含水率为 17.13%±0.61%;圆形暗管(T1)底部 50 cm 深度处 土壤平均含水率为 17.66%±0.59%,表明这 2 种形式 的管道都出现了绕流现象,但是,三角形暗管的绕流 现象轻于圆形管道的绕流现象。对暗管上部 40 cm 处 的土壤平均含水率进行分析发现,T2 处理的土壤含 水率(18.32%±0.93%)略大于T1 处理的土壤含水率 (18.16%±0.87%左右),表明T2 处理的暗管上部出 现了一定程度的积水,其对上部土壤水的拦截能力好 于T1 处理。

暗管底部加翼以后,T3、T4处理的暗管底部50 cm 处的土壤水分分别为17.02%±0.37%、16.62%±0.77%, 均小于不带翼暗管该深度的土壤水分,表明暗管加 翼后对土壤水绕流的抑制作用明显增大。对暗管上 部的水分分布进行分析发现,T4处理的水分梯度大 于T3处理的值。根据土壤水动力学理论可知,T4 处理的排水速度应该大于T3处理的排水速度。对暗 管上部40cm处的土壤含水率进行分析得出,T4处 理的土壤含水率(16.83%±0.53%)略小于T3处理 (16.93%±0.29%),但二者的差异性不显著(p>0.05)。

这可能与底部不透水翼对土壤水分所起的拦截作用较大有关。

#### 2.3 暗管断面结构对土壤排盐的影响

对 4 种处理下的各土层含盐量进行分析发现, 土壤含盐量均随着土层深度的增加而增大; 0~30 cm 土层是脱盐状态,暗管顶部以下土层逐步呈积盐状态(图 5)。







4 个处理在 0~30 cm 土层平均含盐量依次为 0.18%±0.02% 、 0.18%±0.01% 、 0.26%±0.02% 、 0.27%±0.04%; 与初始含盐量相比,该层土壤排盐率 均达到 90%左右。对暗管顶部及其两侧的土壤含盐量 进行分析发现,各处理暗管顶部(40 cm 处)的土壤 含 盐 量 依 次 为 2.14% ±0.58% 、 1.92% ±0.81% 、 2.55% ±1.57% 、 2.72% ±0.98%,均高于初始含盐量; 而其两侧的土壤含盐量均小于或接近初始含盐量,依 次为 1.06% ±0.63%、0.95% ±0.50%、1.69% ±0.62%、 1.75% ±0.65%。各处理暗管顶部(40 cm)的土壤含盐 量分别比其两侧土壤含盐量高 1.07% ±0.85%、 0.97% ±0.85%、0.86% ±1.85%、0.97% ±0.91%,说明盐 分会在暗管顶部累积;其中,T1 处理的盐分在暗管 顶部的聚集得最多,T3 处理的盐分在暗管顶部聚集 得最少。各处理 45 cm 土层(带翼暗管的翼上方)处 的含盐量依次为 2.53% ±1.10%、2.02% ±1.35%、 3.59% ±1.05%、2.57% ±1.17%;其中,T3 翼上的土壤 含盐量比T1同土层含盐量多 1.06%;T4 翼上的土壤 含盐量比T2 同土层含盐量多 0.55%,说明盐分会在 翼的上方出现累积现象。

## 2.4 暗管断面结构对排水起始时间的影响

改变暗管断面结构增大了暗管对水分的吸持面 积和拦截宽度,提高了暗管在非饱和土壤中的排水能 力。试验结果表明,等边三角形断面暗管开始排水的 时间早于圆形断面暗管的排水时间;带翼的暗管开始 排水的时间早于不带翼的暗管排水时间,见表1。

表1 不同处理下的排水排盐效果

 Table 1
 Effect of drainage and salt

 removal under different treatments

removal under unterent treatments			
处理	暗管开始排水 所需要的时间/h	排水量/mL	排出总盐量/g
T1	41.02d	70.9b	11.11b
T2	33.57c	68.7b	11.58b
Т3	31.23b	190.7a	27.87a
T4	30.10a	188.4a	30.41a

无翼情况下,T2 处理暗管开始排水所需要的时 间比 T1 处理暗管所需要的时间短 7.45 h, 且二者之 间具有显著性差异。但是2种处理的暗管排水量和总 排盐量差异不显著(p<0.05)。底部加翼以后,T3 处理和 T4 处理的暗管开始排水所需要的时间缩短, 分别比 T1 处理和 T2 处理的初始排水时间缩短 9.79 h 和 3.47 h; 暗管的排水量和总排盐量也显著增加, 分 别比 T1 处理和 T2 处理的排水量增加 119.8 mL 和 119.7 mL, 排盐量增加 16.76 g 和 18.83 g。T3 处理和 T4 处理开始排水所需要的时间具有显著性差异,特 别是三角形断面所需时间更短。说明在增加底翼后, 三角形断面结构与圆形断面相比仍然具有优势。表1 中显示,三角形暗管的排水总量比圆形暗管的排水总 量略小,但其排盐总量却比后者略大,虽然这一现象 并没有达到显著水平,但仍能反映三角形断面对水盐 的吸持和拦截优势。

#### 2.5 等边三角形与等腰三角形暗管的排水模拟

为了从机理上阐明排水暗管的断面结构在非饱 和土壤中对土壤水分绕流的影响以及实现非饱和土 壤排水的效果,对试验中的4种处理进行模拟。

## 2.5.1 土柱中暗管排水基本方程

滴灌条件下的土壤处在非饱和状态,其水分运动 理论模型是 Richards 方程<sup>[19]</sup>。土柱中的土壤水分运动 可以用一维垂直运动来表达。由于非饱和土壤中的暗 管排水效果取决于对土壤水分绕流现象的抑制作用, 因此,暗管排水是不确定因素;所以,可将排水暗管 作为 Richards 流区中的内边界处理,而土柱边界是流 区的外边界;如此,只需模拟土柱与暗管之间的土壤 中的水分运动状况,见式(6)。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}, \qquad (6)$$

式中: $\theta$ 为土壤体积含水率(%);z为垂向坐标(cm);  $k(\theta)$ 为非饱和土壤导水率(cm/d); $D(\theta)$ 为饱和土壤 水扩散率(cm<sup>2</sup>/min)。

求解 Richards 方程的定解问题需要借助初始条件和边界条件;其中,含水率边界为 Diriclet 条件, 又称第一类边界条件;通量边界为 Neumann 条件, 又称第二类边界条件;通量与含水率的组合边界为 Generalized Neumann 条件,又称第三类边界条件。

对于外边界条件,其上边界为距离暗管底部 6 cm 处的土壤含水率条件(图 6),是 Diriclet 条件;试 验中,4 种处理在该位置处的含水率最小值约为田间 持水率,所以,模型中该处含水率设为田间持水率; 下边界为暗管底部无穷远处的土壤含水率,也是 Diriclet 条件;左、右边界为土柱壁,水分通量为 0, 是 Neumann 条件(图 6)。对于内边界条件,暗管的 左、右边界上的土壤含水率会随着时间增加而增加, 说明边界上存在水分通量,故采用 Neumann 边界条 件;暗管的底部是不透水的结构,故暗管下边界也采 用 Neumann 边界条件。





2.5.2 MATLAB 仿真平台应用

MATLB 仿真平台的 PDE 工具箱用于求解偏微分 方程,其中的抛物线模型可用于求解渗透介质中的流 动与扩散问题<sup>[16]</sup>。PDE 中的标准抛物线型方程为:

$$d\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (c \cdot \nabla u) - a \cdot u + f , \qquad (7)$$

式中:c、a、f为求解领域中的函数;u为未知函数, 对应于方程(6)中的 $\theta$ 。

将式(6)与式(7)对比得到各参数的关系。 因含水率 $\theta$ 是关于时间t的函数,所以,根据土柱试验结果可设定式(7)中 $a=\partial K(\theta)/\partial z=t^{0.1}, f=0, c=D(\theta)=49 \times t^{0.4}$ 。

PDE 中的 Diriclet 边界条件和 Neumann 边界条件 分别如式(8)和式(9):

$$h \cdot u = r, \tag{8}$$

$$n(c \, \nabla u) + p \, u = g, \qquad (9)$$

式中: *h、r、g、p* 为求解域中的函数; *n* 为求解域中的外法向矢量。

对应 Richards 方程和图 6 的要求设定相应的边界 条件;其中,土柱的上边界设为田间持水率,为 28% (体积含水率),式(8)中各参数为: *h*=1,*r*=0.28; 土柱的下边界为暗管底部无穷远处的土壤含水率<sup>[21]</sup>, 式(8)中各参数为: *h*=1,*r*=0.0215;土柱的左、右 边界是水分零通量条件,式(9)中各参数为:*p*=0, *g*=0。对于内边界条件,暗管的左、右边界上存在水 分通量,考虑到外包土工布的持水和透水特性,将暗 管的外包土工布的含水率设定为时间函数,式(9) 中各参数为: *p*=0, *g*=0.004 5×*t*。暗管的底部是不透 水的结构,式(9)中各参数为: *p*=0, *g*=0。

各处理的初始含水率 u<sub>0</sub> 设为 2.15%(体积含水 率)。土柱试验中,湿润锋从暗管顶部运动到土柱底 部(隔水板上部)所需要的时间约为8h,故模拟时 间设定为8h。

2.5.3 模拟结果分析

土壤水分沿着暗管周围产生绕流后,在暗管底部 位置汇合,使暗管底部的土壤含水率增大;所以,暗 管底部的土壤含水率等值线的值越大,表明土壤水分 绕流现象越强烈,反之绕流现象被抑制。对4种断面 结构的暗管进行土壤水分运动模拟所得到的结果显 示(图7),T3、T4处理的暗管底部第一条连续的含 水率等值线的数值分别为5.82%、5.85%,远小于T1、 T2处理的同类指标(10.92%、10.79%),这表明底 部带翼的暗管对土壤水分的绕流现象有显著的抑制 作用。而T2处理的暗管下方等值线12.00%和13.21% 之间的区域面积为64.1 cm<sup>2</sup>,小于T1处理的同类指 标(72.4 cm<sup>2</sup>),这表明T2处理的暗管底部的土壤含 水率增加量比T1处理的同类指标少,其对土壤水分 绕流现象的抑制作用略优于圆形暗管。



图7 暗管周围土壤水分模拟



T2 处理的断面上部土壤含水率 20%~25% 的区域 面积 (土壤含水率等值线沿着暗管边缘形成的等值线

"漏斗"区)大于 T1 处理的同类区域面积;以值为 24.51%的等值线为例,T1、T2 处理的该等值线上方

的区域面积分别为 29.06、35.44 cm<sup>2</sup>,说明 T2 处理的 拦截效果好。加翼后,暗管断面上部的土壤含水率等 值线"漏斗"区面积远大于无翼暗管的同类区域面积; 以值为 19.38%的等值线为例,T3、T4 处理的该等值 线上方的区域面积分别为 83.48、93.96 cm<sup>2</sup>,分别比 无翼暗管同等指标大了 27.10、28.71 cm<sup>2</sup>。说明除了 暗管断面的拦截面发挥作用以外,暗管下方的翼部也 可以对水分进行拦截。另外,模拟结果显示,T3 处 理的暗管断面下半部分的水分为反向进入暗管,这些 水分要靠水力坡度驱动才能进入暗管,而只有当土壤 局部接近饱和的情况下才形成水力坡度。但T4 处理 暗管拦截面上的水分均通过拦截作用进入暗管,不需 要暗管周围产生局部饱和。

## 3 讨 论

### 3.1 暗管断面对土壤水分的拦截作用

在饱和土壤中,排水暗管的横断面周长决定了土 壤水向暗管中的汇流量,而当暗管横断面周长不变时, 暗管过水断面的面积决定了其输水能力,所以,在饱 和土壤中往往采用圆形断面暗管<sup>[20-21]</sup>。但是,在非饱 和土壤中,水分向暗管中的汇流量有限,所以,暗管 并不需要很大的过水断面面积,但是却需要能够抑制 或减缓土壤水分沿暗管周围绕流的能力。本试验研究 发现,在暗管断面周长相同的情况下,虽然等边三角 形的暗管的断面面积小于圆形断面的暗管断面面积, 但是,其对土壤水分的绕流现象有一定的抑制作用, 并且其作用略好于圆形断面暗管,能促进非饱和土壤 水进入暗管。以往研究表明[11],圆形断面暗管对水分 吸持和拦截效果最好的部位是暗管顶部-45 ~+45 % 平角所包含的弧段,大于 45 % 平角后,断面对水分 拦截或吸持的作用将降低,对水分绕流的抑制作用也 降低。在断面周长相同、其他边界条件和初始条件相 同的情况下,利用 MATLAB 仿真平台对底角 45°的 等腰三角形断面暗管进行排水模拟(图8),并与本 文试验中的等边三角形暗管排水的模拟情况相比较。 结果显示,等腰三角形暗管下方等值线 12.00%和 13.21%之间的区域面积为 44.4 cm<sup>2</sup>, 小于等边三角形 的同类指标(62.4 cm<sup>2</sup>),这表明等腰三角形暗管对 土壤水分绕流现象的抑制作用略好于等边三角形暗 管。根据计算,等腰三角形的拦截面宽度为: Be=L/2.41, 大于等边三角形拦截面宽度 B=L/3。

## 3.2 暗管底翼对土壤水盐的拦截作用

李显溦等<sup>[12]</sup>的研究发现,在饱和流条件下,暗管 下方铺设防渗膜可以增大汇流量。而本文在非饱和条 件下的试验结果显示,暗管底部加翼之后可以抑制绕 流到暗管底部的水分,并导致翼部土壤形成局部饱和,

#### 从而促进暗管排水。

李显溦等<sup>[12]</sup>的研究发现,在暗管下方铺设防渗膜 后,防渗膜上方出现盐分累积。本文试验结果也显示 翼部上方的土壤含盐量较高。主要是因为不透水的翼 不断拦截上方的渗流,同时拦截渗流所携带的盐分; 水分的增加,提高了其对周围土壤盐分的溶解作用<sup>[22]</sup>; 随着土壤水分的排出,剩下的水分对盐分的溶解作用 降低,加上外包土工布吸持作用,使得一部分盐分拦 截在土工布外围。同理,积累在暗管顶部土壤中的盐 分也是这样形成的。排水过程中,暗管顶部土壤中的盐 分多;试验结束后,土壤水分进入暗管,暗管顶部土 壤含水率降低,其对盐分的溶解作用也降低,造成一 部分盐分被留在暗管顶部。



#### 3.3 技术的用途

本研究提出的用于非饱和土壤排水的暗管主要 用于膜下滴灌农田节水治盐目的。由于非饱和土壤中 水分运动依靠的是水势梯度,不是水力坡度,所以该 暗管排水的影响宽度有限;因此,在这种条件下确定 暗管埋设间距没有意义。暗管应埋设于地膜所覆盖的 宽度内某一深度处,对于滴灌条件应该埋在土壤湿润 区 70 cm 深度左右。文献[22]的研究指出,在滴灌频 繁时期(灌水高峰期),膜下土壤往往存在盐分向深 层淋洗、并积存在深层的现象,而膜外土壤存在盐分 表聚现象。本文研究的暗管可以应用于这一条件,将 膜下土壤的淋洗盐分通过暗管排出农田,这在一定程 度上既可起到节水作用,又能起到排盐效果。

## 4 结 论

 1)等边三角形断面的暗管对土壤水分的拦截和吸持能力大于圆形断面暗管对水分拦截和吸持能力,前者对水分的吸持面积是后者的2倍、前者对水分的 拦截宽度是后者的1.05倍,在暗管顶部,T2处理的 土壤含水率比T1处理的值大0.16%。因此,等边三 角形断面暗管对土壤水分绕流现象的抑制作用好于圆形断面暗管的同类性能。

2)底部加翼暗管对土壤水分绕流现象的抑制作 用得到增强,绕流到暗管底部的水分减少。在暗管底 部,T3处理和T4处理的土壤平均含水率分别比T1 处理和T2处理土壤平均含水率小0.64%、0.51%。底 部加翼暗管还提高了其在非饱和土壤中的排水排盐 能力,T3处理和T4处理的暗管的排水量分别比T1 处理和T2处理的排水量增加119.8 mL和119.7 mL, 排盐量则分别增加了16.76g和18.83g。

3)等边三角形断面暗管开始排水的时间早于圆 形断面暗管的排水时间;T2、T4处理开始排水时间 分别比T1、T3处理开始排水的时间提早7.45、1.13h。 带底翼的暗管开始排水的时间早于不带底翼的暗管 的排水时间;T3、T4处理开始排水时间分别比T1、 T2处理开始排水的时间提早9.79、3.47h。

#### 参考文献:

- 陶园,王少丽,许迪,等.改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):113-118,179.
   TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Effect of structure-type on improved subsurface drainage performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 113-118, 179.
- [2] 衡通. 暗管排水对滴灌农田水盐分布的影响研究[D]. 石河子: 石河 子大学, 2018.
   HENG Tong. Influence of pipe drainage on water and salt distribution in

HENG long. Influence of pipe drainage on water and sait distribution in drip irrigation farmland[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
   YIN Bo, LIU Yantao. Spatial distribution and accumulation pattern of soil salinity with long term drip irrigation under plastic mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 228-231.
- [6] 杨鹏年,董新光,刘磊,等. 千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, 2011, 27(12): 90-95.
- [7] 胡宏昌,田富强,张治,等. 千旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期 淋洗和多年动态[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1 037-1 046.
  HU Hongchang, TIAN Fuqiang, ZHANG Zhi, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1 037-1 046.

[8] 王兴鹏. 冬春灌对南疆土壤水盐动态和棉花生长的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
 WANG Xingpeng. Effects of winter-spring irrigation on soil water-salt

dynamics and cotton growth[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. 秦文豹, 李明思, 李玉芳, 等. 滴灌条件下暗管滤层结构对排水、排

[9] 秦文豹,李明思,李玉芳,等. 滴灌条件下暗管滤层结构对排水、排 盐效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 80-85. QIN Wenbao, LI Mingsi, LI Yufang, et al. Proposed gravel filters for pipe-drain to improve the efficacy of the drainage system under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 80-85.

- [10] 聂锦杰,李明思,梁萌帆,等. 一种基于大孔隙流理论的农田排水暗 管的工作性能试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 86-93.
   NIE Jinjie, LI Mingsi, LIANG Mengfan, et al. Performance of a new subsurface drain system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 86-93.
- [11] 谢中意,李明思,韩寒,等. 排水暗管滤层土工布的水力性能与其孔隙结构关系的研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(12):87-96.
   XIE Zhongyi, LI Mingsi, HAN Han, et al. The relationship between hydraulic properties and pore structure of geotextile used in subsurface drainpipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(12): 87-96.
- [12] 李显濛, 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 II: 模型应用[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 616-625.
  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 II: Application of the calibrated models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 616-625.
- [13] 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, 2020, 36(2): 130-139.
- [14] 谢中意.网壁排水暗管在非饱和土壤中的排水排盐效果的研究[D].
   石河子:石河子大学,2020.
   XIE Zhongyi. Study on drainage and salt-removal effect of reticulated

wall dark pipe in unsaturated soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

- [15] FILIPOVIĆ V, MALLMANN F J K, COQUET Y, et al. Numerical simulation of water flow in tile and mole drainage systems[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 105-114.
- [16] 洪林, 罗文兵. 基于 DRAINMOD 的农田地表径流氮素流失动态模 拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 703-709.
  HONG Lin, LUO Wenbing. Dynamic simulation of nitrogen losses in surface runoff from farmlands using the DRAINMOD model[J].
  Advances in Water Science, 2011, 22(5): 703-709.

[17] 钱争, 冯绍元, 庄旭东, 等. 基于 RZWQM2 模型的农田排水暗管优 化布置研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 113-121.
QIAN Zheng, FENG Shaoyuan, ZHUANG Xudong, et al. Using root zone water quality model to optimize subsurface drain in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 113-121.

- [18] 庄旭东,冯绍元,于昊,等. SWAP 模型模拟暗管排水条件下土壤水 盐运移[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):93-101.
  ZHUANG Xudong, FENG Shaoyuan, YU Hao, et al. Simulating water flow and salt transport in soil under the impact of subsurface drains using the SWAP model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8):93-101.
- [19] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
   LEI Zhidong. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [20] 彭芳麟. 数学物理方程的 MATLAB 解法与可视化[M]. 北京:清华

#### 大学出版社, 2004.

PENG Fanglin. MATLAB solution and visualization of mathematical physics equations[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.

[21] 孙海燕. 膜下滴灌土壤水盐运移特征与数值模拟[D]. 西安: 西安理 工大学, 2008.

SUN Haiyan. Water movement and salt transfer characteristics and simulation under film drip irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of

Technology, 2008.

[22] 陈文娟,李明思,秦文豹,等.水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分 布调控效果研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 276-286.
CHEN Wenjuan, LI Mingsi, QIN Wenbao, et al. Effect of horizontal tillage measures regulatory on soil water and salt distribution under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 276-286.

## Effect of Cross Section of Subsurface Drain on Its Performance

HAN Han<sup>1</sup>, LI Mingsi<sup>1\*</sup>, ZHANG Jinhua<sup>1</sup>, LIU Xingshuang<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>1</sup>, CHEN Wenjuan<sup>2</sup>

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Faculty of Science Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract**: **Objective** Subsurface drain is an engineering technology to control groundwater table not exceeding a critical depth. Its performance depends not only on soil properties but also on design parameters. The purpose of this paper is to investigate the impact of geometrical configuration of the drain on its performance in controlling water and salt movement in the soil. [Method] We compared four cross sections: circular section with an impermeable drain bottom (T1); equilateral triangular section with an impermeable bottom; circular section with an impermeable wing at the drain bottom; equilateral triangular section with an impermeable wing at the drain bottom. All drains were made by metal wire meshes; they were wrapped by non-polyester filament and perforated non-woven geotextile filter layer. The drainage experiment was conducted in soil columns repacked with a sandy soil. Each column was irrigated by 7 L of water. During the experiment, we measured soil water movement around the drain; water flow in the soil was simulated using a MATLAB program. [Result] The time that water started exiting the outlet of the drain in T2 was 7.45 h ahead of that in T1. Adding an impermeable wing at the bottom of the drain inhibited water exfiltration thereby improving drainage efficiency. It was found that soil moisture content at the bottom of the drain (50 cm deep) in T3 was 17.02% ±0.37% lower than that in T1, while that in T4 was 16.62% ±0.77% lower than that in T2. T3 drained 119.8 mL of water and 16.76 g of salt more than T1, while T4 increased 119.7 mL water drainage and 18.83 g salt removal than T2. The time that water started exiting the outlet of the drain in T3 was 9.79 h earlier than that in T1, while the starting time for water to exit the drain in T4 was 3.47 h ahead of that in T2. Numerical simulation confirmed that T2 reduced water exfiltration more, especially with an added impermeable wing at the bottom of the drain, and it is hence most effectively in draining water and removing salt. [Conclusion] Subsurface drain with triangular cross section was more effective in inhibiting water exfiltration, especially after adding an impermeable wing to its bottom.

Key words: subsurface drain; unsaturated soil; draining water and salt; reclamation of saline-alkali land

责任编辑:韩洋