

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

聂锦杰¹, 李明思^{1*}, 梁萌帆¹, 秦文豹²

(1.石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832003;

2.阿克苏塔河源勘测设计院有限公司, 新疆阿克苏 843000)

摘要:【目的】解决滴灌条件下暗管排水困难的问题。【方法】提出一种具有大孔隙流作用的排水暗管结构,通过土槽试验研究其对暗管排水和排盐效果的促进作用。试验中设置3种大孔隙流导管布置密度(3、4、5根),设置2种布置形式,即垂直埋设和弯曲埋设,并以无大孔隙流暗管的排水暗管作为对照(CK);在相同灌水量和滴头流量条件下监测各种处理的土壤含水率和含盐量、暗管排水量和排盐量。【结果】①无大孔隙流导管的暗管不排水,而布置了大孔隙流导管的暗管均排出水分,排水量为7.81~12.25 L;并且随着大孔隙流导管布置密度的增大,暗管排水量也相应增加。②大孔隙流导管垂直布置时的排水量普遍比导管弯曲布置时的排水量大7.97%~19.57%。③CK的上层土壤脱盐、下层土壤积盐,而布置了大孔隙流导管的土壤整体处于脱盐状态,而且其表层土壤脱盐率最高可达92.86%,下层土壤脱盐率最高可达65.25%;导管布置密度越大,脱盐率越高。【结论】大孔隙流对暗管排水和排盐效果有促进作用,密度越大,促进作用越明显。

关键词:滴灌;暗管排水;大孔隙流导管;排水效果;脱盐率

中图分类号:S276; S156.4; S275.6

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180064

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.

0 引言

2000年以来,膜下滴灌技术在新疆盐碱农田中获得大面积应用^[1-2],但滴灌条件下的盐碱地治理仍是难题。滴灌土壤处于非饱和状态,难以将盐分淋洗掉^[3-4],因此农田中始终存在大量盐分。研究认为^[4-5],滴灌只是将盐分抑制在湿润锋处,且在耕作层以下形成积盐区,当地下水位上升或蒸发作用强烈时,农田随时有返盐风险。如果使用明沟排水洗盐,不仅需要增加灌水量,而且占用耕地,反而失去了滴灌的优越性。李显激等^[6]提出在滴灌条件下采用暗管排水洗盐的模式,但需要在暗管下方铺设不同宽度的防渗材料,以提高暗管局部含水率来促进暗管排水。这实际上仍然是饱和土壤排水洗盐的原理,只是应用滴灌系统灌水,排盐用水量大。

土壤是结构复杂的多孔介质,当土壤中存在孔径大于毛管孔径(或基质吸力很弱)的孔隙结构时,该孔隙中的水流运动速度将快于基质流区域的水流速度,水及溶质就会绕过大部分基质流区域而优先运移到土壤深层,产生优先流现象^[7-8],学术界也将其称为大孔隙流^[9-11]。大孔隙流是重力流,孔隙中毛管吸力相对较弱,且流速和流量均高于基质流指标^[12],因此在土壤水分流动过程中,大孔隙流将产生漏斗吸力,对周围的基质流有拉动作用,从而促使基质流运动^[13]。如果能借助大孔隙流作用促进非饱和土壤中的水分进入排水暗管,将有利于实现非饱和土壤中的排水排盐效果。

前人做的大孔隙流方面的研究多针对水分入渗和溶质运移^[14-15],对大孔隙流在排水或者盐碱地治理方面的作用研究很少。为解决土壤非饱和条件下暗管排水困难和积盐问题,设计一种能够在土壤中形成大

收稿日期:2018-01-19

基金项目:新疆生产建设兵团软科学项目(2011BB039);国家自然科学基金项目(51569028,41361071)

作者简介:聂锦杰(1991-),女,河南周口人。硕士研究生,主要从事灌溉原理与技术应用研究。E-mail:16349413252@qq.com

通信作者:李明思(1965-),男,新疆乌苏人。教授,主要从事灌溉原理与技术应用研究。E-mail:leemince@sina.com

孔隙流的新型排水暗管结构,在土槽中进行滴灌条件下的暗管排水试验,检验该排水暗管结构的排水、排盐效果,以期为解决滴灌淋洗盐分问题提供思路,同时也为滴灌条件下暗管排水工程设计提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年4—10月在石河子大学水利与土木工程实验中心进行(44°18'25"N, 86°03'27"E,海拔451 m)。多年平均气温6.1℃,多年平均降雨量208 mm,蒸发量为1 967 mm。利用比重计法分析供试土壤颗粒,测得土壤物理黏粒(<0.01 mm)量为15.09%,根据卡庆斯基土壤质地分类法定为沙壤土。其原状土壤的干体积质量为1.63 g/cm³,孔隙率42.71%,田间质量持水率17.15%,饱和质量含水率26.20%。

试验用玻璃土槽规格(长×宽×高)100 cm×20 cm×80 cm;土槽底部铺10 cm厚的细砾石垫层,上覆多孔PVC隔板,板厚10 mm,板上开孔,孔距50 mm×50 mm。试验用排水暗管为PVC管,管径5 cm;暗管上开孔,孔径0.5 cm,孔距2 cm,开孔率为3.1%;暗管外包透水无纺布。用纤维网搓成长50 cm的柔软细条,下端与暗管直接相连,上端距土体表面2 cm,使其在土壤中能形成大孔隙流现象,称其为大孔隙流导管。暗管埋在土槽中间,暗管坡度为1/500(SL4—2013农田排水工程技术规范),用量桶收集暗管排出的水分和盐分,试验装置见图1(a)。

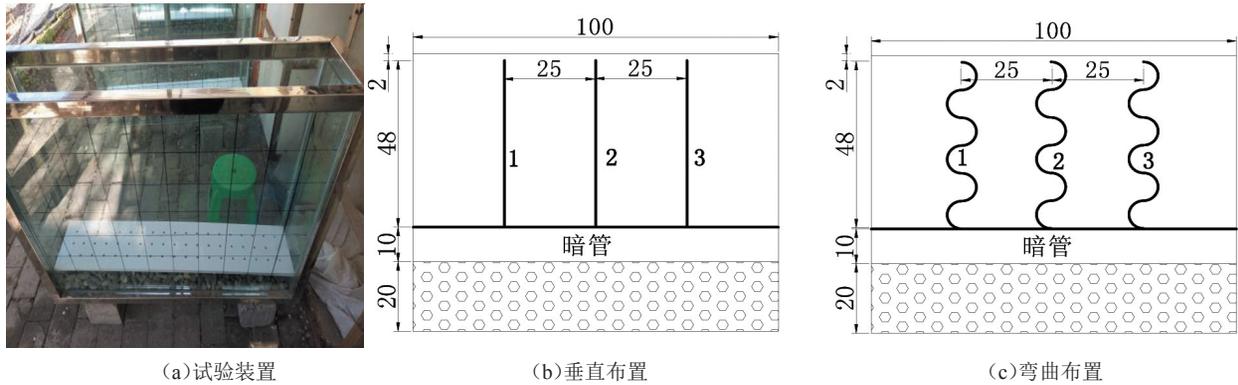


图1 大孔隙流导管布置图(单位:cm)

1.2 试验方法

试验中,一方面对大孔隙流导管的密度做处理,分别在排水暗管上连接3、4、5个导管;另一方面,对大孔隙流导管的布置形式做处理,分别设置垂直布置(导管垂直水平面,图1(b))和弯曲布置(垂直方向呈波浪状,图1(c))2种形式,排水管简称为V₃、V₄、V₅和Z₃、Z₄、Z₅,共6种组合,每种处理重复2次。以无大孔隙流导管的暗管排水作为对照,标注为CK,并重复3次试验。各种处理及重复总共做15次试验,每次试验的灌水量均为62.8 L。以此分析大孔隙流导管密度及布置形式对暗管排水、排盐的影响。

试验前先将土壤风干、磨碎,过2 mm筛以去除杂质。装土时按照设计体积质量分层装填,每装填10 cm厚就将土压实。各层之间表面刷毛以保证上下土层接触良好,土槽装填总高度60 cm。暗管埋深50 cm。装填完成后,从土槽边缘每隔25 cm取土样测土壤初始质量含水率 θ 与初始含盐量C₀(表1)。为了减少蒸发耗水干扰,土壤装填好后其表面覆盖塑料薄膜。

表1 各处理土壤初始质量含水率与初始含盐量

处理	CK	V ₃	V ₄	V ₅	Z ₃	Z ₄	Z ₅
θ %	1.5	1.6	0.8	0.9	1.8	1.4	0.9
C ₀ /(g·kg ⁻¹)	20.63	20.7	17.49	17.49	13.05	22.34	16.83

采用果树输液袋供水,以其针头模拟滴头滴灌,每个输液袋容量为1 L。沿土槽轴线布置滴头,分别位于距土槽边缘12.5、37.5、62.5及87.5 cm处,每次试验共用4个输液袋,间距25 cm。试验用水为自来水,矿化度0.15 g/L,属于淡水。控制滴头流量为1 L/h。试验中每隔1 h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8 h后开始取样测土壤含水率和含盐量。CK灌水结束后经过水分再分布8 h后取土样。

1.3 测试指标

考虑滴头位置以及大孔隙流导管位置,沿土槽轴向距槽边缘6.25、18.75、31.25、43.75 cm处确定取样点位置,并在暗管正上方和距离暗管中心位置5 cm处的侧部设2排取样点(图2)。

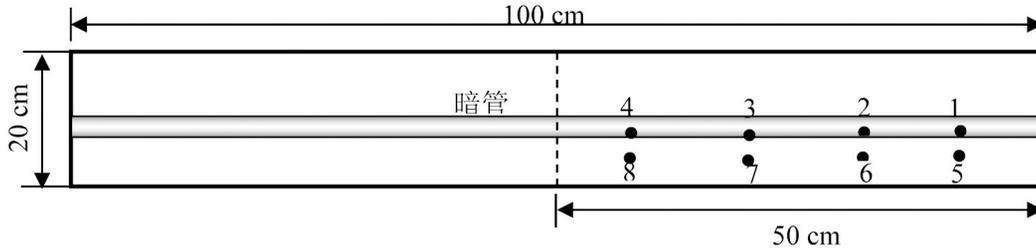


图2 取样点布置

其中,1、2、3、4点在暗管正上方,从土体表层向下每10 cm取1个样,暗管顶部取至暗管处。5、6、7、8点在暗管侧部,从土体表层向下每10 cm取1个样,取到60 cm深处。试验过程中土壤湿润区是对称的,为了弥补取样失败以及便于重复取样,图2中2排取样点所表示的范围只占土槽整个剖面的1/4,留出3个区作为备选区。

用烘干法测土壤质量含水率。将从土槽中取得的土样立即称质量,然后放置在烘箱中在105 °C下烘8 h以上,经晾凉后称质量并计算含水率。计算式为:

$$\theta = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \times 100\% , \quad (1)$$

式中: θ 为土壤质量含水率(%); m_0 为铝盒质量(g); m_1 为烘干土样与铝盒重量(g); m_2 为湿土样与铝盒质量(g)。用刻度1 000 mL的量桶测量暗管排水量。

采用测定土壤浸提液电导率的方法测土壤含盐率,其中,电导率仪为DDS-11A型(上海雷磁)数显电导率仪。用残渣烘干法标定土壤含盐量与电导率之间的关系式,即:

$$y = 3.437x + 0.248 \quad (R^2 = 0.983; n = 104), \quad (2)$$

式中: y 为土壤含盐量(g/kg); x 为电导率(mS/cm); n 为样本数。

将各处理的试验终了时刻的含盐量与初始含盐量进行比较,计算含盐量相对变化率:

$$\eta = \frac{\omega_h - \omega_0}{\omega_0} \times 100\% , \quad (3)$$

式中: η 为含盐量相对初始值的变化率(%); ω_h 为试验终了时刻不同深度的含盐量(g/kg); ω_0 为初始含盐量(g/kg)。

并对各处理平均脱盐率进行比较,脱盐率计算式为:

$$\bar{\eta} = \frac{h \left[0.5(\eta_1 + \eta_n) + \sum_{i=2}^{n-1} \eta_i \right]}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} , \quad (4)$$

式中: $\bar{\eta}$ 为0~60 cm土层的平均脱盐率(%); h 为取样层厚度(10 cm); η_1 为表层(0 cm处)土壤脱盐率(%); η_n 为底层(60 cm处)土壤脱盐率(%); n 为取样层数($n=7$); i 为第*i*个土层。

2 结果与分析

2.1 新型排水暗管对土壤水分分布的影响

试验过程中,CK的暗管始终没有排水,且试验结束后其暗管内壁干燥,未见悬垂水滴。大孔隙流导管处理(不论是导管垂直布置还是弯曲布置)的暗管均出现排水现象。各处理的土壤含水率都小于饱和含水率,而大于田间持水率;暗管两侧都有程度不同的深层渗漏现象,水分渗漏到土层下部的砾石垫层中;但CK和大孔隙流导管处理的暗管以上土层中的含水率分布形式截然不同,其中,CK的含水率垂直分布是Bodman悬着毛管水分布形式^[6],表层含水率为23%~24%,暗管埋深层,即50 cm土层深的土壤含水率为

22%~23%;CK的整个深度平均含水率为23.26%,标准偏差为0.57。其暗管顶部的各测点平均含水率与暗管侧部的同类指标相差不大,仅为0.30%~0.64%。故CK土壤入渗比较均匀,符合基质流分布特点,没有出现优先流。 V_3 处理各层含水率水平分布不均匀,其均值和标准差变化大(表2)。 V_3 处理的含水率分布是上小、下大的斜线,表层含水率为21%左右,暗管埋深层的含水率为22%~24%,而且 V_3 处理的排水量为9.71 L,表明 V_3 处理的上部土层排水(图3)。

表2 V_3 处理含水率分布

土层深度/cm	0	10	20	30	40	50
平均含水率/%	20.97	21.57	22.11	22.33	22.95	23.97
标准差/%	0.34	0.45	0.75	0.69	0.69	0.69

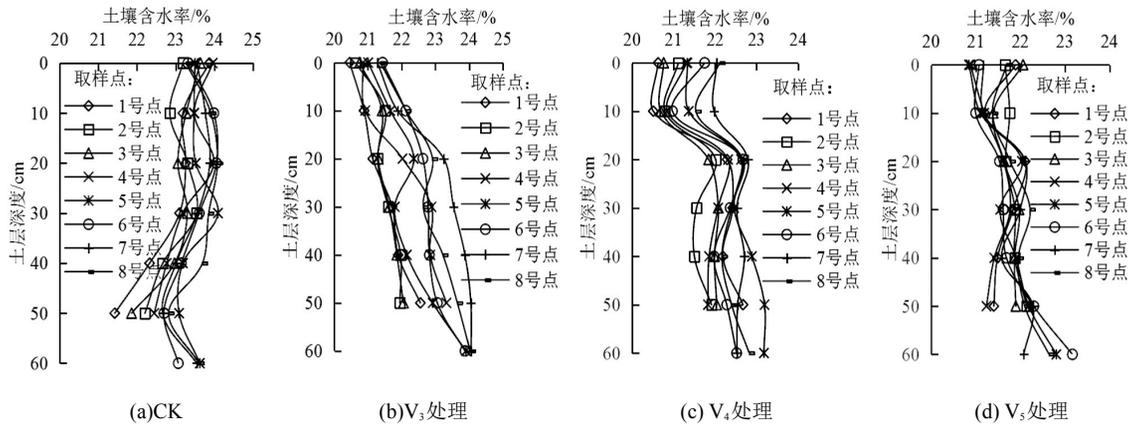


图3 土壤含水率垂直分布

从表2可以看出,对于 V_3 处理随土层深度的增加,土壤含水率的标准差增大,最后达到稳定状态,表明随土层深度增加,暗管顶部测点与其侧部测点间的流态不一致,二者之间的平均含水率相差1.69%,不符合均质土壤基质流特点,而是符合优先流特点。但0~10 cm土层的标准差较小,暗管顶部测点与其侧部测点间的平均含水率相差仅0.12%,二者流态接近一致。Wang等^[17]认为大孔隙流是重力流,其流速大于周围的基质流流速,对基质流区会产生漏斗吸力,拉动基质流区的水分进入大孔隙而一起向下运移,所以会导致基质流区流态趋近于大孔隙流态。故 V_3 处理的排水现象是大孔隙流排水。另外, V_3 处理的平均含水率垂直分布的斜率(即水分梯度)为0.44,表明表层的排水效果远好于深层的排水效果。

2.2 大孔隙流导管密度对暗管排水效果的影响

对 V_3 、 V_4 和 V_5 处理的试验结果进行比较分析。 V_4 处理的下层土壤含水率比 V_3 处理的同类指标小,且含水率指标在10~20 cm土层突然增大1.31%,之后缓慢增大。 V_3 处理0~50 cm土层含水率稳定在21%~22%之间,60 cm处有小幅度增长,比50 cm深度处的指标平均增长0.73%。随着大孔隙流导管密度的增加,土壤含水率垂直分布线的斜率变小,虽然表层含水率变化不大,但是暗管埋深处的含水率越来越小;而且各层的含水率分布越来越均匀(图3)。

试验中测得 V_4 处理的总排水量为10.66 L, V_5 处理的总排水量为12.25 L,分别比 V_3 处理的大了0.95 L和2.54 L。 V_4 和 V_5 处理的暗管埋深处的平均含水率分别比 V_3 处理的小了0.59%和1.00%,证明大孔隙流导管密度的增加主要增大了深层土壤排水量。另外, V_4 处理的各层含水率相对于其平均含水率的标准差为0.30~0.52, V_5 处理的为0.19~0.44,分别比 V_3 处理减小0.23和0.31,表明随着大孔隙流导管密度的增加,各测点的土壤水分运移过程越来越趋于一致。对CK、 V_3 、 V_4 和 V_5 处理暗管顶部测点与其侧部测点的各层平均含水率差值进行比较,发现随着大孔隙流导管密度的增加,导管附近基质流区的流态逐步类似于大孔隙流导管中的流态(表3)。与CK相比,由于大孔隙流导管的作用,使暗管侧部土壤含水率与顶部土壤含水率差值先增大后减小。

表3 各处理暗管侧部含水率与顶部含水率差值

土层深度/cm	0	10	20	30	40	50
CK	-0.25	0.59	0.48	0.50	0.58	0.83
V_3 处理	0.59	0.77	1.35	0.74	0.88	0.95
V_4 处理	0.86	0.75	0.57	0.40	0.55	0.49
V_5 处理	0.43	0.22	0.10	-0.02	0.12	0.55

注“-”表示暗管侧部土壤含水率小于顶部指标。

V_5 处理的暗管顶部土壤含水率与侧部含水率差值普遍小于 V_4 处理同类指标,平均减小了0.28%,比 V_3 处理同类指标减小0.64%,表明大孔隙流效果的增加对周围基质流的拉动作用也增加,使导管附近的基质流区持水能力下降,水流速度加快。 V_4 处理各层平均含水率垂直分布的斜率为0.23, V_5 处理各层平均含水率垂直分布的斜率为0.18,即随着大孔隙流导管布置密度的增大,土壤水分梯度的绝对值减小;与此同时,土壤平均含水率也减小(V_4 处理的平均含水率21.98%, V_5 处理的平均含水率21.74%),导致非饱和导水率 $k(\theta)$ 减小。对于同一种土壤来说,含水率梯度绝对值降低意味着土壤基质势梯度绝对值也降低,根据达西定律可知,此时水分的垂直入渗通量应该随大孔隙流导管密度的增大而减小,但是排水量是增加的,说明这些排水量不是通过基质流形式进入排水暗管,而是通过大孔隙流(重力流)形式进入排水暗管的。基质流区的水分在大孔隙流的吸力拉动下,通过大孔隙进入暗管的;否则基质流区水分的垂直入渗会越来越困难。

2.3 大孔隙流导管布置形式对暗管排水效果的影响

土壤中的大孔隙主要是由冻胀裂隙、虫孔或植物根孔等物理或生物作用而形成的,其形状不可能都是垂直分布的。为了研究大孔隙流导管弯曲布置时对排水效果的影响,分别对 Z_3 、 Z_4 和 Z_5 处理的试验结果进行了比较。试验测到 Z_3 、 Z_4 和 Z_5 处理的总排水量分别为7.81、9.81和11.21 L;排水效果随着大孔隙流导管布置密度的增大而增强,但是比垂直布置时的排水效果弱一些,其排水量分别减少1.9、0.85、1.04 L。另外,3个处理表层土壤平均含水率与暗管深处的平均含水率相差很小,含水率分布线几乎垂直(图4)。 Z_3 和 Z_4 处理的表层含水率小于CK同类指标,但是大于相应的 V_3 和 V_4 处理的同类指标,表明其上层土壤有排水现象,排水效果相对于导管垂直布置条件下的弱一些。 Z_5 处理的表层含水率(20.85%~22.06%)与 V_5 处理的表层含水率(20.71%~22.11%)接近,但是其各层含水率均匀性小于后者,说明各测点流态不一致。与大孔隙流导管垂直布置时的排水规律不同,弯曲布置时随着导管布置密度的增大,上、下土层的排水效果几乎同步增强,并非只有深层土壤排水效果增强。另外,大孔隙流对其周围基质流区的影响程度与导管密度之间的关系不明显。

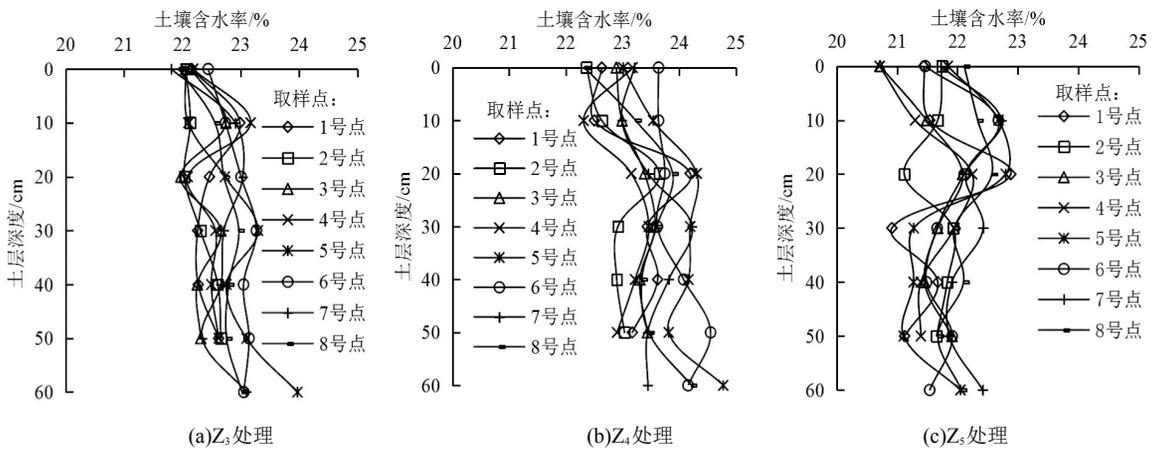


图4 土壤含水率垂直分布

表4 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 处理暗管侧部含水率与顶部含水率差值

土层深度/cm	0	10	20	30	40	50
Z_3 处理	-0.08	-0.18	0.73	0.61	0.41	0.28
Z_4 处理	0.28	0.74	0.25	0.56	0.59	0.68
Z_5 处理	0.63	1.11	0.32	0.21	0.1	0.12

注 “-”表示暗管侧部土壤含水率小于顶部指标。

暗管顶部测点各层土壤平均含水率与其侧部的差值如表4。从表4可以看出,随土层深度的增加, Z_3 和 Z_4 处理的暗管顶部土壤含水率与侧部含水率差值的变化趋势是相反的, Z_3 处理的相应指标是上层小、下层大;而 Z_5 处理相应指标是上层大、下层小。表明 Z_3 和 Z_5 处理下,大孔隙流对土壤水分运动的作用不同。由于大孔隙流导管弯曲布置时,土壤上层没有大孔隙流导管, Z_3 处理的0~10 cm土层基本上都是基质流区,各测点水分运动比较均匀;其下部受到大孔隙流作用时,导致土壤水分流态不一致。 Z_5 处理条件下,尽管其上部也没有大孔隙流导管,但是其下部的大孔隙流导管密度增大,大孔隙流的漏斗吸力对上部土壤水分的影响增大,造成上部基质流区的流态紊乱,而下部土壤的流态基本受大孔隙流控制,流态比较一致。表3显示,各处理10~20 cm土层处含水率差值最大,这与大孔隙流导管顶端的埋设位置相一致,表明大孔隙流与基质流

过渡的状况。

由于大孔隙流是通过增大孔隙中的流速并产生漏斗吸力来影响其周围基质流区的水分运动的,当大孔隙流导管弯曲布置时,其周围的基质流区水分比导管垂直布置时所受的影响小,可能是导管中流速不够大造成的。根据圆形断面弯曲毛管的Hagen-Poiseuille方程^[6]分析可知,各处理中的大孔隙流导管直径 d 保持均匀一致,且不随试验进程而发生变化;导管的实际长度 L_i 也保持一致。大孔隙流导管弯曲布置的暗管排水量比大孔隙流导管垂直布置时的排水量减少,说明导管两端的压力差变小了。这可能与大孔隙流导管弯曲布置时其垂直埋设长度变短、导管顶部与土体表面的距离增大有关,即导管的顶部存在一层基质流区,减小了上部土壤水流直接进入导管的速度,降低了导管顶部的压力势,进而也降低了大孔隙流导管中的流速。

2.4 大孔隙流导管密度对新型暗管的排盐效果的影响

盐分分布与水分运动密切相关,大孔隙流导管的布置影响了水分分布,同样对盐分分布也会产生影响。试验中,CK的暗管没有排水,土壤下层出现盐分积累;布置了大孔隙流导管的处理,土壤都出现脱盐现象(图5)。CK的盐分本底值为20.63 g/kg,试验反映出该处理0~20 cm土层存在脱盐现象,而30~60 cm土层出现积盐现象,而且随土层深度的增加盐分累积越多。另外,各测点的盐分分布较分散,这与CK的水分分布形式相一致。有大孔隙流导管的土壤含盐量也随土层深度增大而增大,但是都小于土壤盐分本底值(表1)。各处理中暗管侧部与暗管顶部含盐量相差不大,但是 V_3 处理与 V_4 和 V_5 处理的盐分分布规律明显不同。 V_3 处理0~10 cm土层的含盐量比较小,而且稳定;10 cm土层以下的含盐量逐步增大。 V_5 处理0~10 cm土层的含盐量同样比较小,而且稳定;然而,10~30 cm土层的含盐量突然增大,然后又趋于稳定。这种现象与 V_3 和 V_5 处理的排水效果相一致;二者表层土壤的排水效果相同,但是前者的深层(30~50 cm)土壤排水效果不好,而后者的深层土壤排水效果随大孔隙导管布置密度的增大而加强,使后者深层土壤的含盐量远小于前者的同类指标。 V_4 处理的土壤盐分状态基本处于 V_3 和 V_5 处理的盐分状态之间。

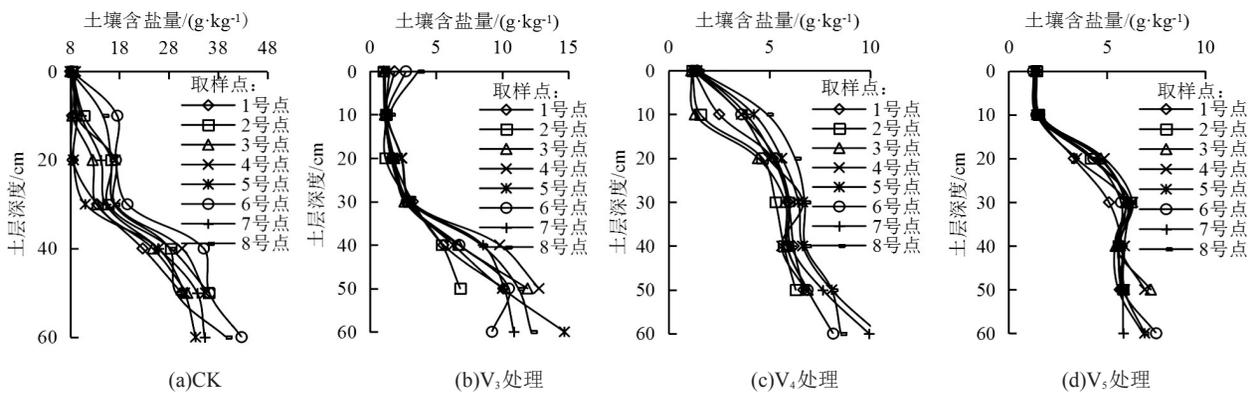


图5 土壤含盐量垂直分布

与土壤盐分本底值相比,有大孔隙流导管处理的土壤均处于脱盐状态,而且上层土壤的脱盐率大于下层土壤的同类指标,随着大孔隙流导管布置密度的增加,下层土壤脱盐率增大(表5)。

V_3 处理0~30 cm土层脱盐率虽然逐渐减小,但均大于 V_4 、 V_5 处理; V_4 处理的脱盐指标小于 V_5 处理的指标。各处理30~60 cm土层的脱盐率随导管密度的增加而逐渐增大。通过式(4)对0~60 cm土层的平均脱盐率进行分析, V_5 、 V_4 、 V_3 处理的整个土层的平均脱盐率分别为73.95%、68.51%、71.04%,且 V_3 处理、 V_4 处理脱盐效率相差不大。0~50 cm土层的脱盐效果可能是暗管直接排水导致的;而50~60 cm土层各处理的脱盐可能是因为暗管排水时对周围土壤产生吸力作用,带动周围基质流区向暗管排水,进而排盐^[18]。

3 讨论

试验中发现,大孔隙流导管垂直布置时,表层土壤含水率随导管布置密度的增加而在21%~22%之间变

表5 各处理土壤脱盐率 %

土层深度/cm	V_3 处理	V_4 处理	V_5 处理
0	-90.01	-92.42	-92.29
10	-92.86	-81.68	-91.51
20	-89.54	-70.28	-75.96
30	-83.08	-65.17	-66.23
40	-58.94	-65.17	-67.93
50	-40.39	-59.03	-65.25
60	-32.90	-47.06	-61.34

注 表中“-”表示脱盐。

化,相对比较稳定。但是其下层土壤含水率却随大孔隙流导管密度的增加而变小,由V₃处理的在23%~24%之间变化降低到V₁处理的22%~23%之间。由于大孔隙流中的流速大于基质流流速,大孔隙流对其周围产生漏斗吸力^[13,17],降低了土壤的持水能力。尽管本试验中土壤表层覆盖了地膜,但是土壤毛管与大气仍然联通,土壤容易进气。根据土壤毛管进气值对水分运动的影响原理^[16]可知,上层土壤水分在大孔隙流漏斗吸力和进气作用下很容易沿着大孔隙向下层入渗,使上层土壤排水较快。相反,下层土壤一方面通气不好,有气堵作用^[9];另一方面大孔隙流的漏斗吸力作用小,所以,水分下渗速度较小,出现积水现象。但是,随着大孔隙流导管布置密度的增加,其对下层土壤的漏斗吸力作用增大,造成下层土壤持水能力降低,下层土壤的排水能力增大。

对比图3可以发现,布置了大孔隙流导管的上层土壤含水率比CK的上层土壤含水率小,随着大孔隙流导管密度增加,其表层土壤含水率变化很小,下层土壤含水率虽然降低,但是未低于表层土壤含水率,因此,可以认为表层土壤含水率已达到大孔隙流漏斗吸力作用下的土壤最小持水能力。与CK相比,大孔隙流漏斗吸力使土壤持水能力降低了2%的含水率水平。

大孔隙流导管弯曲布置与导管垂直布置相比,弯曲大孔隙的水流运动时需要克服阻力,使导管中的流速比垂直布置时的流速小;由于导管顶部存在一层基质流层,减小了上部土壤水流直接进入导管的速度,降低了排水效果。也正是由于导管中的流速小,产生的漏斗吸力也小^[13,17],因此上、下层土壤水分状况并不随导管密度的增大而差异变大。

分析图5发现,CK的上层土壤脱盐,而下层土壤积盐,这与秦文豹等^[20]的试验结果相一致。布置了大孔隙流导管的土壤整体都处于脱盐状态,而且大孔隙流导管垂直布置时的土壤盐分分布比CK的盐分分布集中;随着大孔隙流导管布置密度的增大,盐分分布曲线越加集中。根据多孔介质溶质运移理论^[6],盐分在土壤中遵循对流——弥散的运移方式,当孔隙流速较大时,对流运移的作用增大;而当孔隙流速较小时,弥散运移的作用相对增加。大孔隙流导管中的水分流速大于周围基质流区的水分流速,并且拉动基质流区的水分运移,因此该条件下的土壤盐分的对流运移形式较强,盐分都随水流向下运动,使盐分分布曲线相对集中。而CK中的水分都是基质流,孔隙流速相对于大孔隙流导管中的流速小,因此,CK的土壤盐分的弥散运移形式相对较强;弥散系数是个张量,盐分弥散运移的空间相对较大,因而测得的盐分分布曲线较分散。

王少丽等^[21]通过7a田间试验发现,表土盐分总体呈下降趋势,但土壤盐分聚集在湿润锋附近。如果要利用暗管排出该层的盐分,则要求暗管埋得较浅^[22],土壤总体脱盐效果才越好。然而,对于有控制地下水要求的农田,需要将排水暗管埋在耕作层以下较深的位置。要利用暗管同时解决这2个问题是很难的。在暗管上方布置大孔隙流导管,使上层土壤的盐分可以通过导管运移到暗管,再经暗管排出土体,可以起到同时排出耕作层盐分和控制地下水位的三重作用,是解决此类问题的一个思路。

4 结论

1)布置大孔隙流导管不仅使暗管排出水分,而且随着大孔隙流导管布置密度的增大,暗管排水量增多。大孔隙流导管垂直布置条件下,每增加1根导管,暗管排水量平均增加1.2L左右。大孔隙流导管布置密度的增多主要增大了深层土壤的排水量。

2)大孔隙流导管弯曲布置将降低导管两端的水力坡度,降低导管中的流速。与大孔隙流导管垂直布置相比,大孔隙流导管弯曲布置时的暗管排水量比导管垂直布置时的排水量减少了约7.97%~19.57%。随着弯曲大孔隙流导管布置密度的增大,土壤垂直剖面排水效果几乎同步增强,并非只有深层土壤排水效果增强。

3)与无大孔隙流导管的处理比较,布置了大孔隙流导管的土壤均处于脱盐状态,暗管下方亦未出现积盐现象。导管密度越大,土壤脱盐率越高;表层土壤脱盐率最高可达92.86%;下层土壤脱盐率最高可达61.34%,且每增加一个大孔隙流导管,土层脱盐率增大14%左右,排盐效果较好。

参考文献:

- [1] 李毅,王文焰,王全九.论膜下滴灌技术在干旱-半干旱地区节水抑盐灌溉中的应用[J].灌溉排水,2001,20(2):42-46.
- [2] 吕殿青,王全九,王文焰,等.膜下滴灌土壤盐分特性及影响因素的初步研究[J].灌溉排水,2001,20(1):28-31.
- [3] 宁松瑞,左强,石建初.新疆膜下滴灌棉田水盐运移特征研究进展[J].灌溉排水学报,2014,33(2):121-125.
- [4] 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.

- [5] MMOLAWA K. Root zone solute dynamics under a drip-Irrigated crop:experiments and analytic model[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(6): 1 597-1 608.
- [6] 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.
- [7] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. 生态学报, 2006, 26(1):231-243.
- [8] CLOTHIER B E, GREEN S R, DEURER M. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(1):2-13.
- [9] HENDRICKX J M H, FLURY M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone, Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone, National research council[M]. Washington DC: National Academy Press, 2001, 1(1):149-187
- [10] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5):1 311-1 325.
- [11] 冯杰. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] IQBAL M Z, KROTHER N C. Transport of bromide and other inorganic ions by infiltrating storm water beneath a farmland plot[J]. Ground Water, 2010, 34(6):972-978.
- [13] WANG Zhi, LU Jianhang, WU Laosheng, et al. Visualizing preferential flow paths using ammonium carbonate and a pH indicator[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2):109-133.
- [14] 郝振纯, 冯杰. 水及溶质在大孔隙土壤中运移的实验研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1):67-71.
- [15] ONUR A, GAREY A. Laboratory experiments and numerical modeling of the interconnectivity of macropores and subsurface drainage[D]. University of Mississippi Doctoral Dissertation, 2007.
- [16] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [17] WANG Zhi, WU Laosheng, HARTER T, et al. A field study of unstable preferential flow during soil water redistribution[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4):14.
- [18] 刘培斌. 暗管排水稻田中氮素淋失动态混合模型及应用[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1):13-17.
- [19] 李惠娣, 杨琦, 聂振龙, 等. 土壤结构变化对包气带土壤水分参数的影响及环境效应[J]. 水土保持学报, 2002(6):100-102, 106.
- [20] 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.
- [21] 王少丽, 焦平金, 许迪, 等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(7):623-628.
- [22] 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.

Performance of a New Subsurface Drain System

NIE Jinjie¹, LI Mingsi^{1*}, LIANG Mengfan¹, QIN Wenbao²

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

2. Taheyuan Survey and Design Institute, Akesu 843000, China)

Abstract: **【Objective】** The efficacy of subsurface drain depends on many factors and the aim of this paper is to present a new system and the testing results of its efficiency. **【Method】** The new system consisted of ordinary subsurface drain and vertical or zig-zag pipes functioning as macropores to facilitate downward soil water flow. The experiment was conducted in soil tanks and we compared the performance of using three, four and five such pipes to enhance soil water movement; subsurface drain without such pipes was the control. In each treatment, we measured soil moisture, salt content, and water drainage from the subsurface drain. **【Result】**① Subsurface drain without the pipe failed to function, while coupled with the pipes enabled it to drain 7.81 to 12.25 L of water, increasing with the pipe number. ② The vertical pipes was more effective, increasing water drainage by 7.97%~19.57% compared to the zigzag pipes. ③ CK leached salt from the top soil but accumulated it in the subsoil. In contrast, the drain with the pipes can leach salt from the entire soil profile, with a leaching rate of 92.86% for the topsoil and 65.25% for the subsoil; the leaching rate increased with the pipe number. **【Conclusion】** The new subsurface drain system could facilitate salt leaching and the leaching rate increased with pipe numbers. It can be used in areas where the soil is less permeable.

Key words: drip irrigation; subsurface pipe drainage; macropore flow conduit; drainage effect; desalination rate

责任编辑:白芳芳