DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.40

浅埋式滴灌土壤水分分布规律试验研究

张 营[1], 缴锡云[1,2], 卢 佳[1], 白云岗[3], 王颖聪[4]
(1.河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3.新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 4.南京市浦口区水务局, 江苏 南京 210031)

摘 要: 以探寻合理的滴头埋深与流量为目的,开展浅埋式滴灌下土壤水分分布规律的试验研究。试验土箱净尺寸为30cm×30cm×60cm(长×宽×高),供试土壤取自新疆青河县阿苇灌区试验站。试验设置5、10、15 cm 3个滴头埋深,各埋深条件下设置不同流量的处理。结果表明:不同滴头埋深的情况下均存在土体破坏的临界流量,滴头埋深越大临界流量也越大,滴头埋深为5、10和15 cm对应的临界流量分别为1.0、1.7和2.5 L/h;随着流量的增大,滴头埋深过浅时,水量向湿润体上部聚集,当埋深超过一定深度时,水量向湿润体下部聚集;在临界流量情况下,湿润锋前60 min运移速率较快,随着滴头埋深的增大,灌水结束后湿润体的垂向湿润长度越长,土壤平均含水率值越小;滴头埋深为10 cm、流量1.7 L/h时,湿润体水分分布较为合理。

关键词: 浅埋式滴灌; 湿润体; 土壤水分; 分布规律; 滴头埋深; 滴头流量
中图分类号:S275.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2018)02-0240-06

Laboratory experimental study on the soil moisture distribution of shallow subsurface drip irrigation

ZHANG Ying[1], JIAO Xiyun[1,2], LU Jia[1], BAI Yungang[3], WANG Yingcong[4]
(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 2. *State Key Laboratory of Hydroligy-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 3 *Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi* 830049, *China*; 4. *Pukou Water Affairs Burean, Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: In this study, the distribution of soil moisture in shallow buried drip irrigation was investigated in order to find a reasonable buried depth and discharge of the drip. Tested soil was taken from Awei irrigation area, Qinghe, Xinjiang. The net size of the test soil box was 30cm × 30cm × 60cm (length × width × height). The drips were buried at 5, 10 and 15 cm, and different drip discharges were set at each depth. The results showed that there was a critical flow of soil damage under the condition of different drip depth, and the critical flow increased with the increase of the buried depth. The critical flow of the 5, 10 and 15 cm depths of the drip were 1.0, 1.7 and 2.5 L/h, respectively. When the dripper depth was too shallow, the amount of water gathered to the upper part of the wetting body. When the depth exceeded a certain depth, the water gathered to the lower part of the wetting body. In the case of critical flow, the migration rate of wet front was faster in the first 60 min. The deeper the drip buried, the longer the wetting length of the wetting body (after irrigation) was, the smaller the soil moisture content was. The wetting body moisture distribution was more reasonable when the drip depth was 10cm and drip discharge was 1.7 L/h.

Key words: shallow subsurface drip irrigation; soil wetting body; soil moisture; soil moisture distribution law; dripper buried depth; drip discharge

收稿日期:2017-09-26; **修回日期**:2017-10-24
基金项目:新疆维吾尔自治区科技支撑项目(201431107)
作者简介:张 营(1992-),女,河北邯郸人,硕士研究生,从事节水灌溉理论与技术研究。
通讯作者:缴锡云(1962-),男,河北廊坊人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

1　研究背景

近年来,浅埋式滴灌技术因其高效节水和对牧草灌溉的良好适应性,在牧草种植地区得到了示范推广。浅埋式滴灌是较为适合苜蓿等多年生牧草作物的灌溉方式,且在北疆牧区苜蓿种植灌溉方法的选择及大面积地块苜蓿种植的灌溉管理中,能够较好的满足北疆牧区的灌溉需求,可有效节水增产、增收,并提高畜牧业的抗灾能力,适合在新疆牧区推广应用[1-2]。我国新疆地区水资源短缺,同时又是我国主要牧草种植区之一,因此研究浅埋式滴灌技术,对新疆牧草高效节水灌溉具有重要意义。

此前,科研工作者们在地埋式滴灌方面做了大量的研究。为探究地下滴灌滴头的合理埋深,夏玉慧等[3]研究了地下滴头埋设深度(10、20、30 cm)对紫花苜蓿生长的影响,分析了各个生育期滴头埋深对产量的影响;任杰等[4]分析了地下滴灌毛管埋深对作物生长和发育的影响,总结了国内外地下滴灌毛管埋深和间距的研究进展,并对不同的毛管埋深进行了土壤水分运移试验分析,为地下滴灌系统的合理设计提供了理论依据。在滴头流量方面,王超等[5]在滴头埋深 25 cm 条件下,对相同质地土壤的滴头流量大小进行了探究,认为随着滴头流量的增大,存在某一滴头流量使得湿润体的平均含水率由固定值变为变化值,该流量值可以作为地下滴灌设计的依据。张树振等[6]进行了苜蓿田土壤水分分布规律的研究,认为在滴头埋深 20 cm 时,湿润体呈中部凸起、下部略尖的坛状,入渗深度随灌溉量增加而增大;张中海[7]、Gao 等[8]验证了运用 surfer11 软件采用克里金插值的方式绘制等值线图良好的适用性;申祥民等[9]利用 Sufer 软件绘制土壤含水率等值线图,分析膜下滴灌棉田均匀布点方式下土壤含水率的空间变异规律,为土壤水分分布规律的研究提供了方法。部分学者利用 HYDRUS-2D 模型和现场收集的数据进行对比,验证了该模型能够较好地预测滴头周围土壤剖面水分的变化趋势,评估地下滴灌的轴对称渗透过程和土壤湿润体的大小,且可以用于模拟粉砂壤土中地下滴灌系统的土壤水流运动状态[10-12]。其他学者基于土壤水动力学理论,运用数值模拟,研究土壤水分运动规律,给滴灌系统设计提供依据[13-16]。

综上所述,目前的研究中滴头埋深大部分不小于20cm,而针对滴头埋深较浅及其适宜流量选择的相关研究还较少,因此针对浅埋式滴灌系统中滴头埋深及流量等参数的设计还缺乏依据。基于此,本文通过试验对滴头在不同埋深、不同流量条件下的土壤水分分布规律开展研究,为浅埋式滴灌技术的示范推广提供理论参考。

2　材料与方法

2.1　试验概况

试验在河海大学水文水资源国家重点实验室进行。供试土壤取自新疆青河县阿苇灌区试验站,土壤基本物理指标见表 1。土样经自然风干后,过 2 mm 孔径的筛,分层(5 cm)均匀装入有机玻璃箱内,为保证土体整体性,装土时上层土与下层土间打毛。考虑到滴灌常用滴头间距为 30 cm、滴灌管布设间距为 60 cm,故试验土箱内部尺寸为 30 cm×30 cm×60 cm(长×宽×高),采用 8 mm 厚有机玻璃制作。考虑到入渗湿润体的对称性,将滴头埋设于距土箱侧壁内 1 cm 处的垂向中心线上,试验将大致形成半个湿润体。在箱壁垂直方向上每隔 5 cm 刻线,便于装土时控制土壤干容重及在试验过程中观测湿润峰的运移位置。具体装置见图 1。

表 1　供试土壤基本物理指标

颗粒含量/%			干容重/	田间持
黏粒	粉粒	沙粒	($g \cdot cm^{-3}$)	水率/%
12.50	35.93	51.57	1.6	31.2(体积含水率)

2.2　试验设计

本试验设置 5、10、15 cm 3 个滴头埋深,在各埋深条件下,设置流量初始值各为 0.5、1.3、2.0 L/h,流量梯度为 0.1 L/h,进行多次试验,直至土体遭到破坏,每次试验过程中控制累计灌水量为 3 L,初始含水率均为 3.2%(体积含水率)。为便于阐述,针对试验土体建立直角坐标系,以过滴头的垂线与土壤表面的交点为原点,以过滴头的向下垂线为 Z 轴,以滴头所在侧壁与土壤表面的交线为 X 轴,以垂直于 X 轴、Z 轴的水平线为 Y 轴,如图 2 所示。

试验开始后,按预先设定的时间间隔用记号笔在土箱垂直面记录湿润锋的推进形状,观测土壤湿润峰向上、向下和向水平方向的运移距离,记录所见湿润体轮廓。

灌水结束后,立即测定土壤含水率,沿 Z 轴向下每 5 cm 在 XOY 平面上取 19 个样点(见图 2),直至湿润峰垂直向下运移最远处。分层取土时,用相机拍照记录各层土壤湿润体剖面形状,采用烘干法测

定各取样点土壤含水率。

3 结果与分析

3.1 临界流量

在滴头埋深相同时,若流量过大则可能引起土壤水压力增加,造成紧邻周边土壤结构的破坏并产生裂缝。为探索在不同滴头埋深条件下,土壤结构破坏的临界流量,通过多次试验发现流量超过某一临界值后,试验土体会遭到破坏。各埋深条件下临界流量,见表2,各临界流量时试验土体的破坏情况见图3。

随着滴头流量的增加,周围土体的渗透压力逐渐增大,由于浅埋式滴灌滴头埋设深度较小,所以当滴头流量增加到一定程度,其上部的土体将首先发生渗透破坏,对应的滴头流量即为临界流量。在实际运行中,滴头流量应小于临界流量。

3.2 土壤湿润体的变化过程

针对5、10、15 cm 3种滴头埋深处于临界流量条件下,取*XOZ*平面观察入渗过程中湿润锋随时间变化过程,分析湿润体的变化规律。湿润锋随时间变化过程如图4所示。

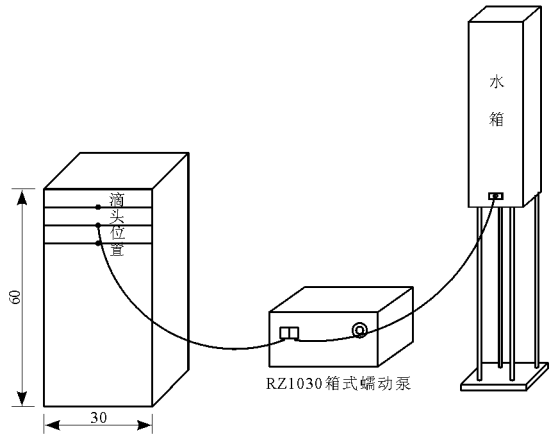


图1 浅埋式滴灌入渗试验装置示意图(单位:cm)

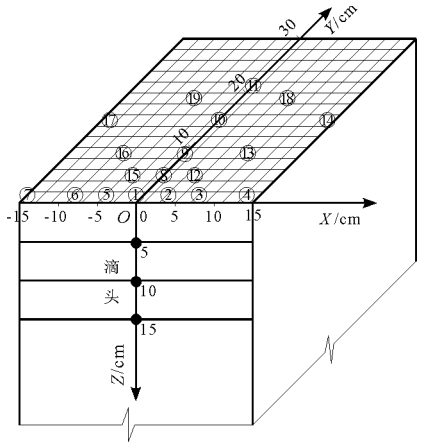


图2 取样点分布示意图

表2 各埋深条件下临界流量

滴头埋深/cm	临界流量/(L·h^{-1})	现象描述
5	1.0	流量q >1.0 L/h时,湿润体从滴头处开始产生裂缝,逐渐被水流冲蚀,扩展成孔洞直至土壤表层,土壤表层出现积水,见图3(a)。
10	1.7	流量q >1.7 L/h时,湿润体从滴头处开始产生裂缝,逐渐被水流冲蚀,扩展成孔洞直至土壤表层,土壤表层出现积水,见图3(b)。
15	2.5	流量q >2.5 L/h时,湿润体从滴头处开始产生裂缝,裂缝从侧面逐渐扩展,导致土体分层破坏,土壤表层无积水,见图3(c)。

由图4可以看出,湿润锋水平运移距离最大的位置在滴头所在平面。在入渗初期,湿润峰水平运移距离较垂向增长快,土壤基质势梯度是主要驱动力。随着时间的增长,湿润体体积不断增大,由于单位时间内灌水量不变,湿润半径的增量逐步减小,在入渗时间达到60 min时,水平和垂向湿润锋的发展都开始明显减慢。表3为灌水结束后湿润体的垂向运移距离。

由表3可知,灌水结束后,在灌水量基本相同的情况下,临界流量时,滴头埋深5 cm时,垂直湿润总长度和垂直向下距离均较小;滴头埋深15 cm时,土箱表层部分土体未湿润,垂向湿润总长度较滴头埋深10 cm相差不多;而滴头埋深10 cm时,垂直向下距离较大。可见,滴头埋深较浅时,湿润体整体位置分布较浅且灌水结束后基本呈长方体,随着滴头埋深的增大,湿润体整体位置分布逐渐加深,灌水结束后的形状逐渐趋向于椭球体。

3.3 滴头流量对土壤水分分布影响

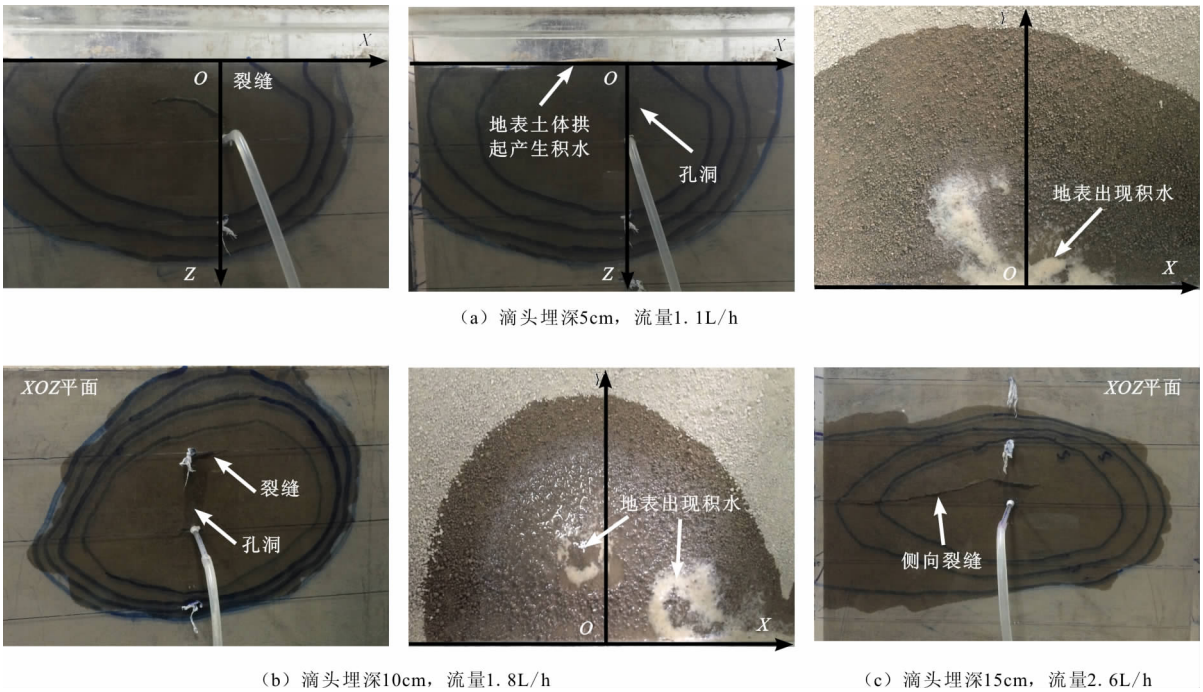
根据*XOY*平面各层取样点含水率变化值进行线性插值,分析各层含水率分布规律并按含水率等值线进行积分,逐层计算湿润体储水量。各滴头埋深在不同流量的情况下,灌水量基本一致时,土壤湿

润体各层储水量情况见表 4。

由表 4 可以看出,可能由于试验与计算误差,储水量计算值较实际灌水量略有偏小。在滴头埋深 5 cm 时,湿润体的储水量大体分布在垂直深度 0 ~ 15 cm 间,随着滴头流量的增加,垂直深度 10 cm 以下部分的储水量无显著增加,灌溉增加的水量主要聚集在上部,待超过临界流量时水分涌出土体表面;滴头埋深 10、15 cm 时,伴随滴头流量的增加,在流量未达到临界流量时,储水量则随垂直深度的增加呈增加趋势。由此可见,滴头埋深不宜太浅,建议在 10 cm 左右。

表 3　灌水结束后湿润体垂向运移距离

滴头埋深/cm	灌水量/L	流量/(L·h^{-1})	垂直向上距离/cm	垂直向下距离/cm	垂向湿润总长度/cm
5	2.9	1.0	5.0	13.1	18.1
10	2.9	1.7	10.0	16.0	26.0
15	3.0	2.5	12.7	14.3	27.0

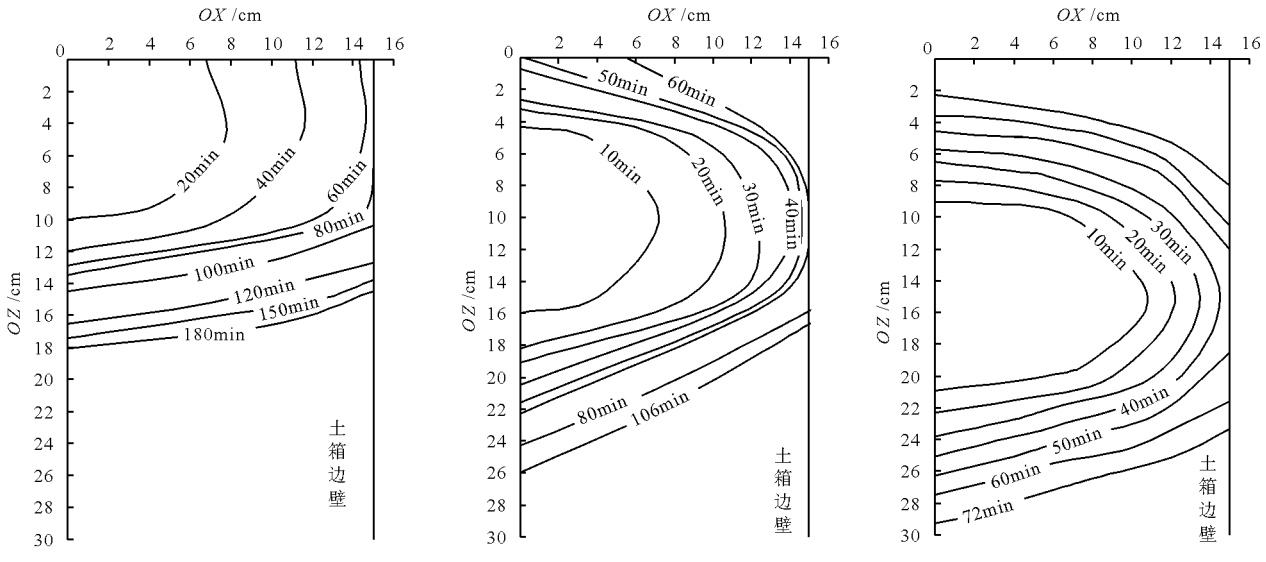


（a）滴头埋深5cm，流量1.1L/h

（b）滴头埋深10cm，流量1.8L/h

（c）滴头埋深15cm，流量2.6L/h

图 3　临界流量时试验土体破坏情况



（a）滴头埋深5cm，流量1.0L/h

（b）滴头埋深10cm，流量1.7L/h

（c）滴头埋深15cm，流量2.5L/h

图 4　湿润锋运移曲线

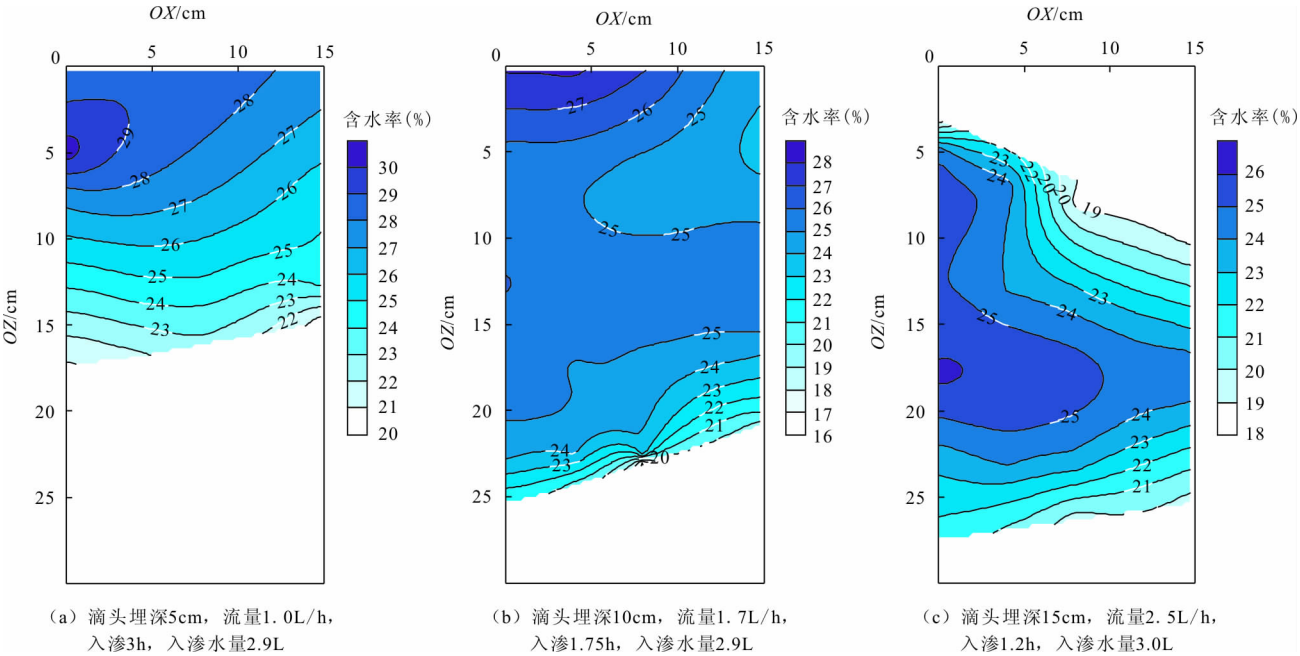
表4 不同流量下湿润体各层储水量 L/h, L

测试参数	滴头埋深5 cm储水量			滴头埋深10 cm储水量			滴头埋深15 cm储水量		
	q=0.5	q=0.8	q=1.0	q=1.3	q=1.5	q=1.7	q=2.0	q=2.3	q=2.5
入渗时间/h	6.00	3.75	3.00	2.30	2.00	1.75	1.50	1.30	1.20
实际灌水量/L	2.749	2.738	2.859	2.883	2.859	2.907	2.979	3.027	3.046
垂直深度/cm 0~5	0.748	0.748	0.781	0.587	0.423	0.430			
5~10	0.753	0.784	0.775	0.611	0.657	0.387	0.328	0.410	0.389
10~15	0.704	0.665	0.696	0.568	0.673	0.596	0.546	0.632	0.525
15~20	0.513	0.525	0.509	0.561	0.616	0.600	0.601	0.735	0.721
20~25				0.413	0.439	0.487	0.527	0.519	0.576
25~30						0.300	0.430	0.359	0.366
合 计	2.719	2.721	2.762	2.740	2.808	2.800	2.432	2.655	2.577

3.4 滴头埋深对土壤水分分布影响

分别对滴头埋深为5、10和15 cm进行试验,选取各埋深情况下的滴头临界出水流量,分析滴头埋深对土壤水分分布状况的影响规律。

试验过程中控制累计入渗量均为3 L左右,根据取样点含水率值,采用克里金插值的方式绘制湿润体零通量面(*XOZ*平面)含水率等值线,如图5所示。由图5可见,不同滴头埋深情况下的水分分布存在着较为明显的差异。滴头埋深为5 cm时,湿润体水量主要集中分布在滴头附近至土箱表层处,最大湿润深度仅有18 cm左右,土壤含水率值比其它2个滴头埋深情况高出2%~4%(土壤含水率值)左右。滴头埋深为15 cm时,土箱表层部分土体未湿润,湿润体水量主要分布在紧邻滴头下方的土体,湿润体湿润的垂向范围较大,达28 cm左右。当滴头埋设在10 cm深度时,紧邻滴头上方的土体土壤含水率最高,垂直方向上0~20 cm间土壤含水率均在25%左右,湿润深度达26 cm左右。由此可见,滴头埋深为10 cm、流量为1.7 L/h时,土壤含水率分布最为均匀。



(a) 滴头埋深5cm, 流量1.0L/h, 入渗3h, 入渗水量2.9L

(b) 滴头埋深10cm, 流量1.7L/h, 入渗1.75h, 入渗水量2.9L

(c) 滴头埋深15cm, 流量2.5L/h, 入渗1.2h, 入渗水量3.0L

图5 湿润体零通量面含水率等值线(体积含水率)

4 结 论

(1)滴头不同埋深的情况下均存在着土体破坏的临界流量,滴头埋深越大临界流量也越大,实际运行时滴头流量应小于临界流量。

(2)随着滴头流量的增大,滴头埋深过浅时,水

量主要向湿润体上部聚集,当埋深超过一定深度时,水量开始向湿润体下部聚集。由此,建议滴头埋深为 10 cm 左右。

(3)在临界流量情况下,入渗过程中,湿润锋运移速率初期较快,60 min 后开始减慢,随着滴头埋深的增大,灌水结束后的湿润体湿润长度越长,土壤含水率值越小。其中,滴头埋深 10 cm、流量 1.7 L/h 时湿润体湿润深度适中,土壤含水率分布最为均匀。

参考文献:

[1] 韩方军. 浅谈牧草浅埋式滴灌技术示范与推广项目的实施[J]. 新疆水利,2014(5):19 - 21 + 38.

[2] 王金魁. 浅埋式滴灌技术在北疆牧区苜蓿种植的应用性探讨[J]. 内蒙古水利,2016(9):53 - 54.

[3] 夏玉慧,汪有科,汪治同,等. 地下滴灌埋设深度对紫花苜蓿生长的影响[J]. 草地学报,2008, 16(3):298 - 302.

[4] 任 杰,温新明,王振华,等. 地下滴灌毛管适宜埋深及间距研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2007, 18(6):48 - 51.

[5] 王 超,李援农. 地下滴灌土壤水分运移分布规律试验研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(1):136 - 138.

[6] 张树振,张鲜花,隋晓青,等. 地下滴灌苜蓿地土壤水分分布规律[J]. 草业科学,2015,32(7):1047 - 1053.

[7] 张中海. Surfer 软件在膜孔灌溉土壤含水率绘制中的应用[J]. 地下水, 2011, 33(5):27 - 29.

[8] GAO Huiyan, YANG Luhua. Temporal and spatial variation of soil moisture in cornfield mulched with wheat straw in Heilonggang Area[C]// 2007 International Conference on Agriculture Engineering, Daqing, China:2007.

[9] 申祥民,雷晓云,李 彦,等. 膜下滴灌棉田土壤水分参数的空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 41 - 43.

[10] PROVENZANO G. Using HYDRUS - 2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2007, 133(4):342 - 349.

[11] NAGHAVI H, NIA M H, GOOGHARI S K, et al. Capability of HYDRUS - 2D simulation model for simulating wetting pattern in soil under subsurface drip irrigation systems[J]. Journal of Science & Technology of Agriculture & Natural Resources, 2012, 16(61):89 - 98.

[12] EBRAHIMIAN H, MONJEZI M S, LIAGHAT A, et al. Soil - wetting front in surface and subsurface drip irrigation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 2013, 166(5):272 - 284.

[13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(3):56 - 59.

[14] ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9):40 - 45.

[15] XI Benye,JIA Liming,ZHU Yan. Development of numerical simulation on soil - water movement under agriculture and forestry subsurface drip irrigation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4):50 - 56.

[16] SANTOS L N S D, MATSURA E E, GONÇALVES I Z, et al. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities[J]. Agricultural Water Management, 2016, 170:91 - 98.