

深层坑渗灌田间单点入渗湿润锋分布特性 及拟合模型研究

李 涛, 张建丰, 程慧娟, 杨艳芬, 秦 涛

(西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为了了解深层坑渗灌灌水后湿润锋的分布规律, 通过大田原状土上的入渗试验, 研究了不同灌水量和不同灌水器管径对不同深度湿润锋水平直径的影响。结果表明: 在质地较粗的原状土壤条件下, 水平湿润直径的最大值一般出现在深度约 30~50 cm 之间的土层, 灌水器管径 200 mm 和灌水量 30 L/次所达到的灌水效果比较好。此外, 建立了具有明确物理意义的深层坑渗灌的单灌水器拟合模型。经过初步评价认为: 该模型计算误差在 10% 以内, 计算精度较高, 是一种符合深层坑渗灌湿润锋分布规律的函数形式。

关键词: 深层坑渗灌; 湿润锋; 入渗

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0036-04

深层坑渗灌是一种将地面灌溉与地下渗灌相结合的新型灌水技术。在田间原状土条件下研究不同灌水器的参数对其灌水后湿润锋分布规律的影响, 将科学地指导灌水器规格的选择和灌水定额的制定, 并且为田间灌水器布置方式的确定提供依据。国内外许多学者对各种新型节水灌水技术进行了研究。孙海燕等^[1]、Goldberg 等^[2]指出同一种土壤, 在相同滴头流量下, 随着灌水量的增加, 湿润锋水平、垂直运动距离均在不断增大。Levin^[3]和 Goldberg^[4]等认为滴头流量对湿润锋水平运移影响很大。费良军^[5,6]、程东娟^[7]、吴军虎^[8]、徐首先^[9]等通过室内及大田实验, 深入研究了膜孔单点及交汇的入渗机理和影响因素; 费良军^[10]和雷雁斌^[11]等研究了在膜孔灌单点入渗情况下水肥耦合对湿润体及入渗特性的影响。王忠波^[12]、陈仰斗^[13]和赵有彪^[14]等阐述了渗灌技术在实际中运用存在的问题及技术特点, 为渗灌技术的广泛应用奠定基础。目前国内外鲜有对深层坑渗灌的相关研究报道。研究不同灌水器参数对其水分入渗过程的影响规律, 是该技术实际应用和评价的前提。因此, 本文首先探讨灌水量和灌水器直径对灌后湿润锋分布规律的影响, 给出湿润锋分布的数学形式, 将对该灌水技术的进一步研究、评价及田间实际运用提供科学依据。

1 深层坑渗灌简介

深层坑渗灌的原理是通过灌水器将水分直接输

送至作物根系主要生长的深层土壤, 使地表附近根系分布较少的土壤层保持干燥, 从而减少了土壤表面无效水分的蒸发, 以达到水分高效利用和节约水资源的目的。如图 1 所示, 深层坑渗灌灌水原理示意图, 水由毛管 1 经稳流器 3 从小管 2 进入灌水器 4, 灌水器为上下开口、四周不透水的管子, 再由灌水器底部入渗进入吸水根系分布的土壤区, 形成湿润区 5, 使得棵间近地表土层 6 不接受供水, 从而使水资源得到最大程度的利用, 提高水的利用效率。

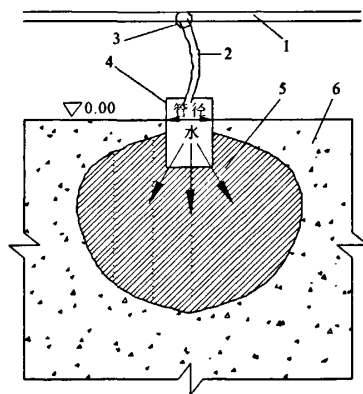


图 1 深层坑渗灌灌水原理示意图

Fig. 1 Diagram of deep pit irrigation irrigator

注: 1. 毛管; 2. 小管; 3. 稳流器; 4. 灌水器; 5. 湿润区; 6. 非湿润区

Note: 1. Capillary pipe; 2. Mini pipe; 3. Flow-stabilizing device; 4. Irrigator; 5. Wetting area; 6. Non-wetting area

深层坑渗灌的优点是: (1) 深层坑渗灌减少或

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAD38B03); 新疆自治区重大专项(200731136-5)

作者简介: 李 涛(1984—), 男, 陕西延安人, 硕士生, 主要从事节水方面的研究。E-mail: litao4891@163.com。

通讯作者: 张建丰(1961—), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事土壤水分运动与灌区自动化等研究。E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn。

消除了地表的湿润面积,从而大大减少了棵间的蒸发,有效地节约水资源。并且其灌水时,灌水器中存在一定的水头压力,使水分湿润深度足以达到植株根系生长的范围。(2) 该方法虽然使水分深层入渗,但灌水器和供水装置均布置在地表,使得灌水器在沟里或垄上的布置比较容易。并且可以根据植株根系的分布,设计最优的灌水器布置方式,保证根系分布的区域能够湿润。(3) 在运行过程中,不要求很高的压力水头,运行成本降低。由于灌水器置于地表,所以比较容易检查与维修。

2 材料与方法

2.1 试验地点

试验地位于新疆吐鲁番鄯善县葡萄瓜果研究中心试验田。该地区海拔较低,周围是隔壁、沙漠和火焰山,形成了极端干旱的温带内陆荒漠气候,成为我国最炎热的地区之一。年降雨量为 17.6 ~ 25.3

mm,年蒸发量为 2 751 ~ 3 216.6 mm,热量丰富(10℃以上积温为 4 522.6 ~ 5 548.9℃),日照充足(全年日照时数 2 900 ~ 3 100 h),昼夜温差大(平均日较差 14.3 ~ 15.9℃,最大可达 17 ~ 26.6℃),无霜期长(192 ~ 224 d),对葡萄的生长发育极为有利,土壤质地主要为砾石沙壤土,土壤基本物理参数见表 1。

2.2 试验设计与方法

试验直接在大田原状土上进行,依据田间灌溉水量和灌水器管径等实际状况,试验设计两个影响因素为:灌水量 W(10、15、30、45、60 L)和灌水器管径 D(110、160、200、250 mm)。灌水器采用不同管径的 PVC 管,埋深 20 cm。采用截面为 500 cm² 的自制马氏瓶定水头供水,控制供水流量为 10 L/h。试验中记录累积入渗量、入渗时间,记录过程先密后疏。供水结束后,立即用铁锹挖一个湿润锋剖面,测量不同深度湿润锋的水平直径。3 组重复,取其平均值。

表 1 土壤基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of experiment soil

深度 Depth (cm)	饱和含水量 Saturated water content (%)	田间持水量 Field capacity (%)	深度 Depth (cm)	容重 Density (g/cm ³)	土壤含石砾状况质量百分比(%) Soil containing the situation of the quality of the percentage of stone				
					> 50 mm	20 ~ 50 mm	10 ~ 20 mm	2 ~ 10 mm	< 2 mm (土)
0 ~ 20	24.5	16.5	0 ~ 20	1.40	0	7.02	15.01	26.37	51.60
20 ~ 40	19.9	11.9	20 ~ 40	1.15	0	7.28	12.16	23.67	56.89
			40 ~ 60	1.54	9.44	22.69	18.71	23.06	26.10
50 以下 Below 50	9.2	5.0	60 ~ 80	1.70	5.13	11.69	11.93	23.89	47.36
			80 ~ 100	1.35	11.87	21.27	16.54	19.23	31.10

注:含水量为质量含水量。其他值均为平均值
Note: Water content means the percentage of the quality. The other values are the average.

3 结果与分析

不同管径和灌水量对湿润锋的影响见图 2。如图所示,不同管径和灌水量对湿润锋的分布有着明显的影响。在不同灌水量条件下,不同深度的湿润锋水平直径基本随灌水量增大而增大,最大湿润锋水平直径出现在地表以下 30 ~ 50 cm 左右,30 L、45 L 和 60 L 灌水量对不同深度湿润锋水平直径的影响效果相当;在不同管径条件下,不同深度的湿润锋水平直径基本随管径的增大而增大,最大湿润锋水平直径也出现在地表以下 30 ~ 50 cm 左右,200 mm 和 250 mm 管径对不同深度湿润锋水平直径的影响效果相当。综合以上分析,从经济和灌水效果两方面考虑,在该种土壤质地条件下,灌水器管径 200 mm、灌水量 30 L 所达到的灌水效果比较好。

4 单灌水器深层坑渗灌湿润锋分布特征模型

通过对图 1 资料的分析发现,在不同管径和灌水量条件下,湿润锋直径与土壤深度之间都符合二次函数关系,见式(1)。

$$y = ax^2 + bx + c \tag{1}$$

式中: x 为垂直深度(cm); y 为湿润锋水平直径(cm); a 、 b 、 c 为拟合参数。当 $x = 0$ 时, $y = c$, 即拟合参数 c 表示地表的湿润锋直径,当 $c > D$ 时,表明地表有湿润锋,湿润锋直径为 c ; 当 $c < D$ 时,地表没有湿润锋。

利用式(1)对图 2 资料经行拟合,拟合结果见表 2。在取显著性水平为 0.01 的条件下,拟合相关系数均大于其相对应的临界相关系数 $R_{0.01}$,说明湿润

锋直径与土壤深度之间存在极显著的相关关系。

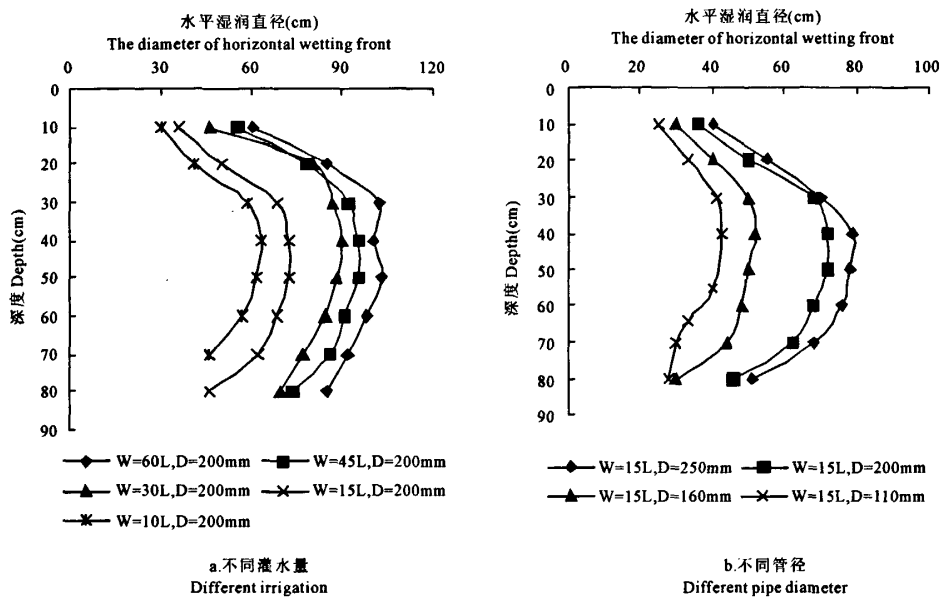


图 2 不同管径和灌水量对湿润锋的影响

Fig.2 The effect of different pipe diameter and irrigation volume on moisture front

表 2 不同管径和灌水量条件下拟合参数及相关性

Table 2 Fitting parameters and relevance analysis under the different pipe diameter and irrigation volume

管径 Pipe diameter (mm)	灌水量 Irrigation quantity (L)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i>	<i>R</i> _{0.01}
200	60	-0.0253	2.5114	41.989	0.9575	0.834
200	45	-0.0256	2.4979	35.729	0.982	0.834
200	30	-0.026	2.5042	31.168	0.9273	0.834
200	15	-0.0263	2.5226	12.821	0.9906	0.834
200	10	-0.0278	2.5181	5.8429	0.9859	0.874
250	15	-0.0275	2.6645	14.821	0.9955	0.834
160	15	-0.0179	1.6213	15.582	0.9868	0.834
110	15	-0.0128	1.1298	16.127	0.9331	0.834

为了进一步了探究拟合参数的物理意义,及其与影响因素的关系,用 SPSS16.0 软件,对各影响因素与各个拟合系数作相关性分析,分析结果见表 3。

表 3 各影响因子与各拟合系数的相关性分析
Table 3 The correlation analysis between difference impact factor and the fitting coefficient

因素 Factors	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
管径 Pipe diameter	-0.959	0.959	-0.568
灌水量 Irrigation quantity	0.859	-0.598	0.958

由表 3 知,拟合参数 *a* 与灌水量和管径有很好的相关性,拟合参数 *b* 与管径的相关性很好,拟合

参数 *c* 与灌水量的相关性很好。这说明 *a* 与灌水量、管径之间存在二因素相关,*b* 与管径之间存在单因素相关,*c* 与灌水量之间存在单因素相关。因此,建立 *a* 与灌水量和管径的二元线性回归, *b* 与管径和 *c* 与灌水量的二元线性回归,回归表达式见式(2)、式(3)和式(4)。

$$a = 0.00011 - 0.00012D - 0.00001944W$$
$$R = 0.9244 > R_{0.05} = 0.863 \quad (2)$$

$$b = 0.0118D - 0.1458$$
$$R = 0.9590 > R_{0.05} = 0.950 \quad (3)$$

$$c = 0.7118W + 2.7339$$
$$R = 0.9575 > R_{0.05} = 0.878 \quad (4)$$

式中: W 为灌水量(L); D 为灌水器管径(mm)。

联立式(2)、式(3)、式(4)和式(1)得到以灌水量与灌水器直径为参数,深度为自变量,湿润锋为因变量的深层坑渗灌湿润锋分布特征模型:

$$y = (0.00011 - 0.00012D - 0.00001944W)x^2 + (0.0118D - 0.1458)x + 0.7118W + 2.7339 \quad (5)$$

式中符号意义同上。

5 模型的验证及评价

根据前面提出的模型,用式(5)对管径 110 mm、灌水量 45 L 的深层坑渗灌不同深度湿润锋水平直径进行计算,并与实测值进行比较。比较结果见表 4。

表 4 深层坑渗灌单点入渗不同深度湿润锋
水平直径模型计算值与实测值比较

Table 4 Comparison of calculated and measured level diameter
of wetting front in infiltration conditions

深度(cm) Depth	实测值(cm) Calculated mean	计算值(cm) Measured mean	误差(%) Error
10	41	44.89	9.49
20	48	52.22	8.80
30	56	56.76	1.36
40	63	58.51	7.13
50	62	57.46	7.32
60	59	53.62	9.11
70	52	46.99	9.63
80	41	37.57	8.38

由表 4 可以看出:模型的计算值与实测值之间的误差均小于 10%,在考虑到田间原状土壤存在空间差异性的客观情况下,可以认为模型计算精度较高,可以满足田间实际运用的需求,对田间灌水器的布置具有重要的指导意义。

从模型推导过程可以明显看出:该模型具有明确的物理意义,在应用时仅需知道灌水器管径和灌溉水量,便可以求出不同深度湿润锋水平直径,所需资料容易获得,应用十分方便,具有较高的使用性。但是,深层坑渗灌湿润锋分布特征模型是建立在土壤质地较粗和灌水器埋深一定的条件下,具有一定的局限性,然而经过验证认为,该模型是一种符合深层坑渗灌后湿润锋分布规律的函数形式,将为其入渗规律的进一步研究及评价提供重要的依据。

6 结 论

综上所述,主要得到以下结论:

- 1) 介绍了深层坑渗灌的灌水原理及其特点;
- 2) 在土壤质地较粗的原状土和灌水器埋深 20 cm 的条件下,深层坑渗灌不同深度湿润锋直径随灌水量的增大而增加、随灌水器管径的增大而增加,而且最大水平湿润直径都出现在地表以下 30 ~ 50 cm 左右;
- 3) 建立了具有明确物理意义的单点深层坑渗灌湿润锋分布特性模型;
- 4) 该模型是在土质较粗的原状土试验的基础上推求的,经验证,模型精度较好,计算值与实测值之间的误差均小于 10%,因此,该模型是一种符合深层坑渗灌后湿润锋分布规律的函数形式,将为其入渗规律的进一步研究及评价提供的依据。

参 考 文 献:

- [1] 栗岩峰,马娟娟,孙西欢,等.蓄水瓶坑均质土壤水分运动的数值模拟[J].山西农业大学学报,2002,2(2):166—171.
- [2] 郭文华,孙西欢,潘军锋,等.蓄水瓶坑非均质土中蓄水瓶坑水分运动的数值模拟[M].山西:太原理工大学,2002:37—45.
- [3] 孙西欢,马娟娟,周青云,等.蓄水瓶坑法技术要素初探[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5—6):405—407.
- [4] 郭向红,孙西欢,马娟娟.蓄水瓶坑单坑土壤水分运动有限元模拟[J].太原理工大学学报,2007,10(23):1—5.
- [5] 周青云,孙西欢,康绍忠.蓄水瓶坑条件下土壤水分运动的数值模拟[J].水利学报,2006,3(37):342—349.
- [6] Khumoetsile. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(6):1657—1671.
- [7] Skaggs T H, Trout T J. Comparison of HYDRUS_2D simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2004,130:304—310.
- [8] 费良军,李发文.膜孔灌单向交汇入渗数学模型研究[J].农业工程学报,2003,(5):68—72.
- [9] 吴军虎,费良军,王文焰.膜孔灌单孔入渗特性研究[J].水科学进展,2001,(9):307—312.
- [10] 费良军,程东娟,朱兴华.单膜孔点源肥液入渗水氮分布特性试验研究[J].农业工程学报,2006,(10):12—15.
- [11] 雷雁斌,董玉云,费良军.膜孔灌单向交汇肥液入渗湿润体特性试验研究[J].灌溉排水学报,2007,(1):33—36.
- [12] 王忠波,王晓斌,肖建民.渗灌技术研究[J].农机化研究,2004,(5):115—117.
- [13] 陈仰斗,段中锁,卫典臣.渗灌技术应用浅析[J].灌溉排水,1996,(2):62—63.
- [14] 赵有彪,冯永涛.渗灌高效节水灌溉实验研究[J].甘肃科技,2007,(5):212—214.

(英文摘要下转第 45 页)

The application of alternate furrow irrigation on open field spring cabbage

WANG Zhi-ping¹, ZHOU Ji-hua¹, HUANG Xing-fa², ZHAO Yi³

(1. Beijing Agro-Technical Extension Center, Beijing 100029, China;

2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Yanqing Agro-Technical Extension Station, Beijing 102100, China)

Abstract: The effects of alternate furrow irrigation on open field spring cabbage were studied on soil moisture, plant growth, psychology and water use efficiency, with furrow irrigation and full irrigation control. The results showed: comparing to furrow irrigation, alternate furrow irrigation after revival saved water by 17%, while water use efficiency increased 3.5 kg/m^3 ; alternate furrow irrigation after lotus seat saved water by 8%, while water use efficiency increased 3.4 kg/m^3 ; comparing to full irrigation, furrow irrigation saved water by 17%, while water use efficiency increased 5.0 kg/m^3 . Comparing to full irrigation, alternate furrow irrigation after lotus seat could increase photosynthetic rate, root length density and total root surface area, reduce transpiration rate, increase economic yield by 24%, increase water use efficiency by 8.4 kg/m^3 , while save water by 23%. What's more, combined with suitable irrigation pipe and fertigation equipment, alternate furrow irrigation is a useful and economical way for water saving.

Keywords: cabbage on open field; alternate furrow irrigation; psychology; water use efficiency, irrigation pipe

(上接第39页)

The wetting front distribution characteristic and the fitting model of single point free infiltration under deep pit irrigation in the field

LI Tao, ZHANG Jian-feng, CHENG Hui-juan, YANG Yan-fen, QIN Tao

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to understand the distribution of wetting front for deep-pit irrigation, the effects of different irrigation and different emitter diameters on wetting front diameter of different levels and depth is studied with the experiment of infiltration on undisturbed soil. The mainly findings are as follows: The principle of deep-pit irrigation is introduced; In the coarse texture of the original soil, the maximum diameter of horizontal wetting front is usually from about 30 cm to 50 cm in depth, and 200 mm of irrigation device diameter and 30 L of each time irrigation quantity are appropriate. Additionally, the fitting model of a single irrigator is established with clear physical meaning. After preliminary evaluation, the model, with less than 10% error, proves relatively high accuracy in calculation and a kind of appropriate mathematical form for wetting front distribution of deep-pit irrigation, which will provide an important reference for further research on deep-pit irrigation.

Keywords: deep pit irrigation; wetting front; infiltration