

不同流量对滴灌土壤湿润体特征的影响

赵颖娜¹, 汪有科^{1,2}, 马理辉^{1,2}, 黎朋红¹, 段雪松¹, 张陆军¹

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在米脂山地微灌枣树示范基地进行原状土的滴灌入渗试验, 研究了不同流量、不同灌水历时条件下, 地表滴灌湿润体特征值的变化规律及滴灌结束时的水分分布规律。结果表明: 湿润体的水平和垂直扩散距离均与时间有显著的幂函数关系, 相关系数均大于 0.99; 湿润体的体积及湿润体内土壤含水率的分布同时受滴头流量和灌水量的控制, 相同灌水量情况下, 湿润体体积随滴头流量的增加而变小, 平均含水率变大; 并且建立了预测湿润体特征值和湿润体体积的经验模型。

关键词: 滴灌; 湿润体特征值; 流量; 灌水量

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0030-06

水资源短缺是限制陕北黄土高原地区可持续发展的主要因素。红枣作为榆林南部丘陵沟壑区的重要产业, 群众经济收入的主要来源, 其发展在很大程度上受到干旱缺水的制约。为了促进当地山地红枣生态和产量的提高, 2006 年西北农林科技大学实施了“山地红枣林微灌技术与工程示范”项目, 该技术同步达到了防止水土流失和解决干旱缺水的效果, 同时也获得了显著的增产, 滴灌已经成为山地红枣等经济林提高生态经济效益的关键措施。

对滴灌条件下水分运动规律及分布特性的研究, 是进行正确的滴灌系统设计和高水平的田间作物水分管理的前提和基础, 目前国内外学者对该方面的理论和试验研究较多^[1-10], 主要通过试验研究了滴灌入渗过程中湿润体特征值的变化规律、水分分布规律及其影响因素, 并进行数值计算与模拟。但目前的试验研究多用扰动土装箱在室内进行模拟试验, 然而填装土与田间原状土的物理性状差异较大, 特别是对于垂直节理发达的黄土, 这样的差异会造成试验结果与实际情况误差较大。本文通过在山地枣树林采用野外实地原状土进行滴灌入渗试验, 提出了较为简单的地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解, 为当地滴灌系统的设计和已有滴灌系统的运行管理提供了依据, 对滴灌技术在陕北山地枣树乃至其它经济林上的应用具有重要的指导意义。

1 试验设计与方法

1.1 试验地概况

试验于 2009 年 5 月在榆林市米脂县孟岔村山

地微灌枣树示范基地进行, 本区域位于东经 109°49' ~ 110°29', 北纬 37°39' ~ 38°5', 属中温带半干旱性气候区, 是典型的黄土高原丘陵沟壑区, 全年雨量不足, 气候干燥, 日照充沛, 昼夜温差大。年平均降雨量 451.6 mm, 主要集中在 7 ~ 9 月, 最大年降雨量 704.8 mm, 最小年降雨量 186.1 mm, 多年平均气温 8.8℃, 绝对最高气温 38℃, 绝对最低气温 -25℃, 无霜期 160 d, ≥10℃的活动积温为 3 281℃, 年平均日照时间 2 372.7 h。

试验区土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主, 土质均一, 渗透性能良好, 属于粉质壤土, 表层土壤容重平均为 1.29 g/cm³, 0 ~ 80 cm 土壤计划湿润层的田间持水量平均为 23.4%、饱和含水量 39.8% (文中所涉及含水量均为重量含水量), 土壤表层稳定水分入渗速率为 1.4 mm/min, 坡度平均为 17°, 以水平阶水保工程措施为主, 水平阶面平整。

1.2 试验设计

在试验区内选择几种典型的土壤未经扰动的坡面, 去除表层覆土及杂物, 将试验区修成表面光滑整齐的阶地状 (高 1.5 m、宽 1.5 m), 竖直面作为观测面, 将滴头布置在距台阶边缘 2 ~ 5 cm 处, 也就是近似地取湿润的一半进行研究。

试验采用自制的灌水系统供水, 由一个供水桶、一个装有浮球阀的可提供恒定水头的塑料桶和 φ16 的 PE 管组成, 在恒定水头下通过调节旋扭开度或者改变针头型号大小来控制滴头流量。试验为不同滴头流量和不同灌水历时的二因素试验, 选取滴头流量分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0 L/h (相当于

收稿日期: 2009-11-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目“陕西半干旱区山地特色果品综合节水技术与示范”(2007BAD88B05)

作者简介: 赵颖娜 (1985—), 女, 陕西户县人, 硕士研究生, 主要研究方向为节水理论与新技术。E-mail: jouler@sohu.com。

通讯作者: 汪有科 (1956—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 主要从事节水灌溉方面的研究。E-mail: gjzwyk@vip.sina.com。

实际滴头流量为 1.0、2.0、3.0、4.0、6.0、8.0 L/h), 灌水历时分别为 4、6、8 h。

1.3 观测内容及方法

入渗开始后,用秒表计时并按照先密后疏的时间间隔定时观测土壤湿润体的水平扩散距离和垂直入渗距离,同时在竖直观测剖面湿润线特征点上(一侧不少于 5 个)插细针,以滴头所在位置为坐标原点,用卷尺在观测面测量每个细针处的纵横坐标,通过 CAD 点绘成图,利用 CAD 软件的自带工具求湿润体的体积。试验过程中用不透光塑料布盖在土壤表面,以减少蒸发对湿润体的影响。

在灌水结束时,迅速用直径为 1.5 cm 的土钻在滴头所在垂直剖面进行取土,因为滴灌湿润体为旋转对称体,所以只取一侧,按“一”型排列,土钻间距都为 5 cm,竖直方向每 10 cm 取一土样,直到湿润峰

处。取样后用烘干法测量土壤含水率。每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌流量对湿润锋运移的影响

滴灌入渗的地表水平扩散半径 $R(t)$ 和垂直入渗距离 $H(t)$ 是湿润体的 2 个重要的特征值。图 1 和图 2 为 6 种流量下湿润体水平扩散半径 $R(t)$ 和垂直入渗距离 $H(t)$ 随时间 t 的变化过程。由图 1 和图 2 可以看出,随着灌水历时(灌水量)和滴头流量的增加,水平距离和垂直距离都呈增加趋势。

利用幂函数关系对湿润体水平扩散半径 $R(t)$ 和垂直入渗距离 $H(t)$ 的变化试验资料进行拟合。拟合结果表明:相关系数均大于 0.99,拟合值与实测值吻合较好(表 1)。

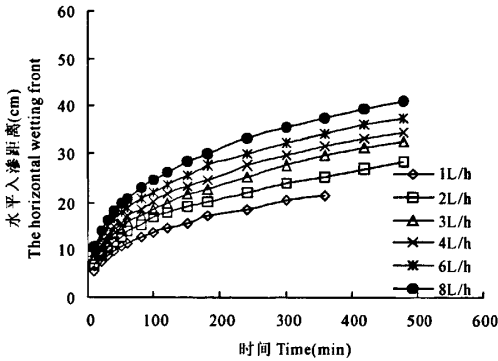


图 1 湿润体水平扩散半径变化过程

Fig.1 The change of horizontal wetting front during infiltration

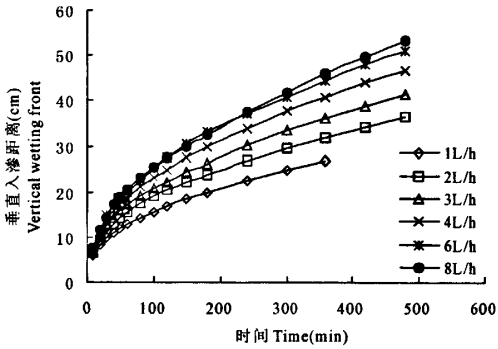


图 2 湿润体垂直入渗距离变化过程

Fig.2 The change of vertical wetting front during infiltration

表 1 不同滴头流量下湿润锋运移的拟合方程参数

Table 1 The fitting coefficient of wetting front transfer under different dripper discharges

项目 Items		滴头流量 Dripper discharge (L/h)					
		1	2	3	4	6	8
水平 Horizontal $R(t) = at^b$	a	2.4786	3.0102	3.4267	3.878	4.509	5.09
	b	0.3703	0.3668	0.3667	0.3573	0.3467	0.3416
	R^2	0.992	0.9969	0.9983	0.9989	0.9971	0.997
垂直 Vertical $H(t) = ct^d$	c	2.409	2.55	2.7112	2.725	2.7772	2.7784
	d	0.408	0.4321	0.4421	0.4626	0.4753	0.4786
	R^2	0.999	0.9971	0.9973	0.9953	0.9951	0.9955

注:对应时间 t 单位(min),长度单位(cm)。
Note: The unit of time is minute and that of length is “cm”.

由表 1 可见,拟合函数系数 a 、 c 和拟合函数指数 d 都随滴头流量的增大而增大,而拟合函数指数 b 随滴头流量的增大而减小。对拟合函数系数和拟合函数指数随流量的变化进行拟合,发现系数 a 、 c 和指数 d 与滴头流量 q 间存在着良好的乘幂关系,且

R^2 均大于 0.9;而指数 b 与滴头流量 q 符合直线函数关系, R^2 大于 0.96。因此湿润体水平扩散距离 $R(t)$ 和垂直入渗距离 $H(t)$ 与入渗时间的关系表达式为:

$$R(t, q) = 2.4091 q^{0.3482} t^{(-0.0045 q + 0.376)} \quad (1)$$

$$H(t, q) = 2.4394q^{0.0721}t^{0.4085}q^{0.0807} \quad (2)$$

利用式(1)和(2)可预测不同流量下陕北黄绵土湿润体特征值随时间 t 的变化过程。为了验证公式的精度,用公式分别对滴头流量为 5 L/h 和 9 L/h 入渗 4h 情况下湿润体特征值随时间 t 的变化过程进行预测(如图 3),将预测结果与试验实测结果进行误差分析,结果表明:当流量为 5 L/h 时,除垂直入渗距离第 10 min 的预测值与实测值的相对误差为

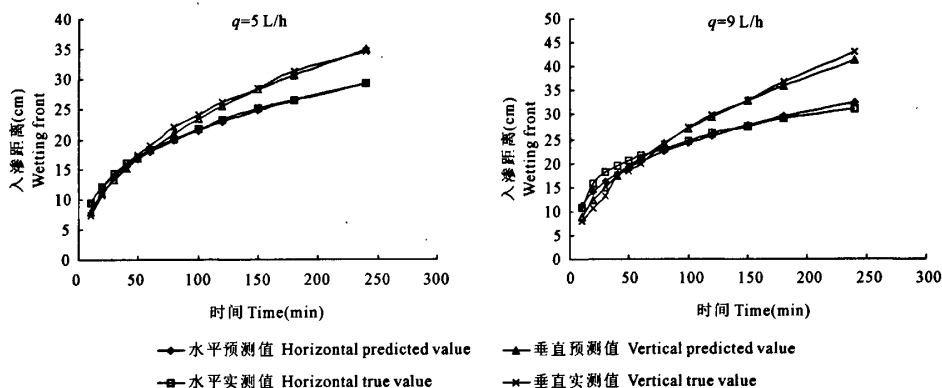


图 3 湿润体水平扩散距离和垂直入渗距离的预测结果

Fig.3 The predicted value of horizontal wetting front and vertical wetting front

2.2 不同滴头流量对湿润体大小的影响

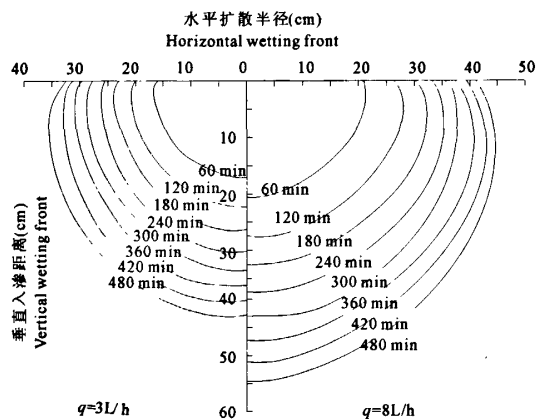


图 4 湿润峰运移曲线

Fig.4 Wetting front transport curves

滴灌土壤湿润体大小由水平和垂直入渗距离确定,掌握湿润体大小的变化规律,是正确进行滴灌田间布置和水分管理的重要依据。论文只列举两个湿润体的湿润峰运移曲线图。图 4 为滴头流量为 3 L/h 和 8 L/h 不同时刻湿润体的轮廓线,从图 4 可知,随着灌水量或滴头流量的增大,湿润体体积不断增大。由于在滴灌入渗过程中水分水平运动的动力

主要是基质势梯度,而垂直向下运动的动力除基质势梯度外还有重力势梯度,并且随着入渗时间的延长重力势的作用越显著,所以垂直方向的湿润锋推进速度较水平方向的快,特别是对于渗透性能好、垂直节理发达的黄土,这种趋势随着入渗时间的延长越来越明显,最终湿润体的轮廓线形状呈近似的竖直椭圆形。大量试验表明,湿润体的最大水平扩散半径位置并非在土壤表面,而是在地表以下 5~20 cm 处,滴头流量越大入渗时间越长(灌水量越大),最大水平扩散半径出现的位置就越深。但为了计算方便,仍将土壤表层看作水平扩散半径最大位置^[11,12],因此可假设地表滴灌入渗土壤湿润体为半个椭球体,则湿润体中心处湿润峰曲线随时间的变化方程为:

$$x^2/R(t, q)^2 + z^2/H(t, q)^2 = 1 \quad (3)$$

湿润体体积公式为:

$$V = 2n\pi R(t, q)^2 H(t, q)/3 \quad (4)$$

式中: $R(t, q)$ 、 $H(t, q)$ 分别为某一滴头流量某一时刻湿润峰水平扩散距离和垂直入渗距离(cm); n 为修正系数。由于表层水平扩散半径并非最大水平扩散半径,因此用椭球体公式计算的湿润体体积较实际值偏小,需要进行修正。通过分析大量试验数据发现,当滴头流量小于等于 5 L/h 时, n 取 1.33,

当滴头流量大于 5 L/h 小于等于 8 L/h 时, n 取 1.38。

据我们对山地红枣根系的调查,枣树根系主要分布在 180 cm × 180 cm × 70 cm 的范围,利用式(3)和(4)计算可知,在滴头流量不大于 8 L/h,灌水历时不大于 10 h 的情况下所形成的土壤湿润体的范围均在枣树根系主要分布的范围内。

对土壤湿润体体积随入渗时间的变化进行分析表明:湿润体体积大小不仅受灌水量影响还受滴头流量影响,相同灌水量情况下,湿润体体积随滴头流量的增大而减小,以 24 L 灌水量为例,滴头流量为 8 L/h 所形成的湿润体体积比滴头流量为 3 L/h 的相对减小了 14.7%。这是由于滴头流量越大,达到相

同灌水量的时间就越短,最终湿润体的轮廓就越小。因此采用滴灌进行灌溉时,选择合适的滴头流量和灌水量(或灌水历时)对于水分在根区的分布有重要作用。

2.3 不同滴灌流量对湿润体水分分布的影响

了解湿润体内的含水量分布状况对于制定正确的滴灌灌溉制度有着重要的指导意义^[13]。用绘图软件 SURFER 对实测的各点处的含水率进行绘制,获得含水率的等值线剖面。湿润体含水率等值线图可给出平面上含水率变化的趋势。图 5 为几种不同滴头流量、不同灌水量情况下的土壤含水率在剖面上的分布状况。

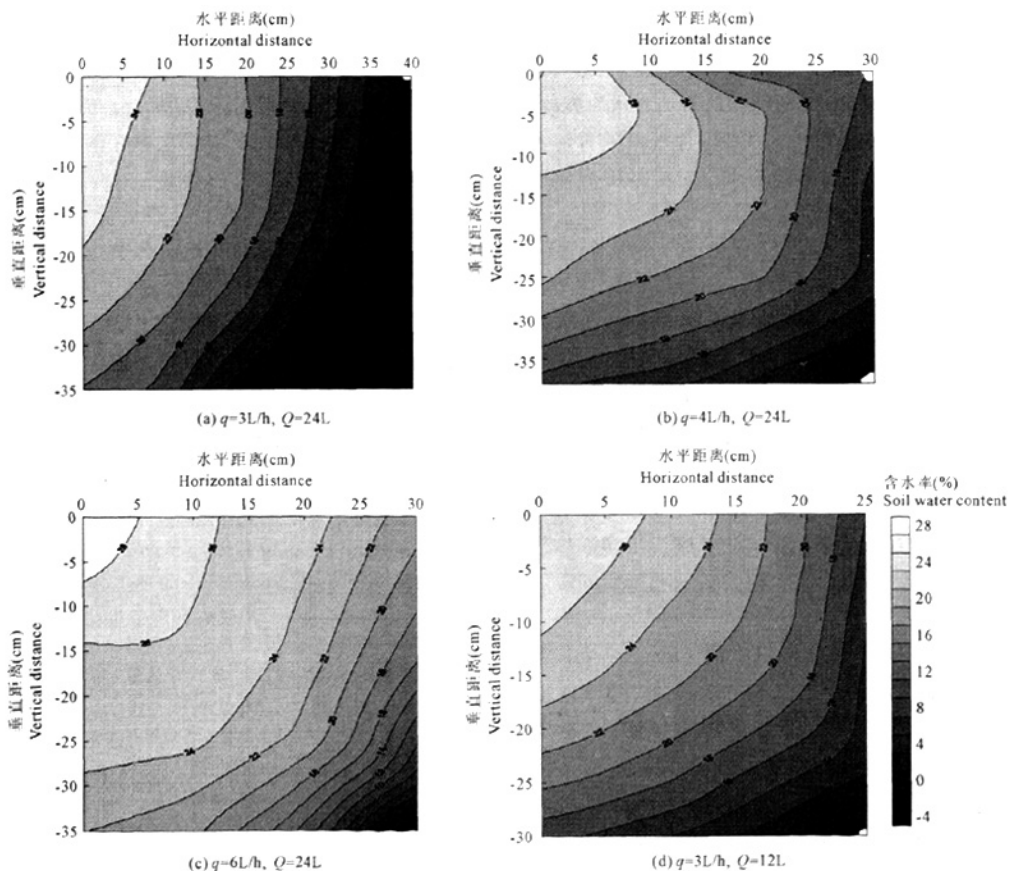


图5 湿润体土壤含水率分布

Fig.5 Distribution of soil water content in wetted soil

由图 5 可见,土壤含水率在剖面上的分布形状类似于湿润体形状,同一方向在离滴头由近到远的位置上,等值线图由疏到密分布,这表明水势梯度逐渐变小;土壤含水率由大到小变化,土壤含水率在滴头正下方的地表处最大,但均小于土壤饱和含水率,

同方向随着距滴头距离的增大,土壤含水率由大到小变化;在距滴头等距离处,滴头下方含水率高于滴头侧面的含水率,以图 5(b)为例,地表距滴头水平 10 cm 处土壤含水率为 24.1%,而滴头下方距滴头 10 cm 处土壤含水率为 26.6%,比前者高出了 2.5

个百分点。由图 5(a)、(b)、(c)可见,当灌水量相同时,流量越大相同湿润区的含水率越大,反之则小;滴头附近各节点的土壤含水率也随滴头流量的增大而增大。这说明滴头流量通过土壤表面的积水不仅影响着湿润体的形状,而且还影响着土壤含水率的分布。

图 5(a)和(d)为 $q = 3 \text{ L/h}$ 不同灌水量情况下灌水结束时的土壤含水率在剖面上的分布状况。由图 5(a)和(d)可知,随着灌水量的增加,湿润体体积增大,滴头附近节点的含水率却减小了。这表明湿润体内土壤含水率的分布同时受滴头流量和灌水量的控制。

表 2 不同滴头流量和灌水量条件下湿润体体积及平均含水率

Table 2 The wetted volume and average water content for different dripper discharges and irrigation amount

项目 Items	$Q = 24 \text{ L}$		$Q = 36 \text{ L}$		$Q = 48 \text{ L}$
	$q = 3 \text{ L/h}$	$q = 4 \text{ L/h}$	$q = 6 \text{ L/h}$	$q = 6 \text{ L/h}$	$q = 6 \text{ L/h}$
湿润体体积 Wetted volume(L)	123.25	113.51	96.53	149.74	207.17
平均含水率 Average water content(%)	20.24	21.22	23.05	22.59	22.03

由表 2 可以看出:当灌水量相同时,湿润体的平均含水率随着滴头流量的增加而增加,这是由于滴头流量大,达到相同灌水量的时间就越短,最终形成湿润体的体积就越小,湿润体的平均含水率就越大。而当流量相同时,湿润体的平均含水率随着灌水量的增加而减小,但是不同灌水量对应的湿润体平均含水率相差不大,减小率不到 3%。

3 结 论

1) 地表滴灌湿润体水平扩散半径和垂直入渗距离均随入渗时间的增大而增大,并且与入渗时间存在着良好的乘幂关系, R^2 均在 0.99 以上;并且拟合系数与滴头流量间也存在良好的相关关系,文中给出了湿润体特征值与滴头流量、入渗时间之间的经验关系式,经试验验证,当滴头流量小于 8 L/h 时经验公式能精确地表示不同流量情况下湿润体水平扩散半径 $R(t)$ 和垂直入渗距离 $H(t)$ 随时间 t 的变化过程。

2) 湿润体的最大水平扩散半径位置并非在土壤表面,而是在地表以下 $5 \sim 20 \text{ cm}$ 处,滴头流量越大入渗时间越长(灌水量越大),最大水平扩散半径出现的位置就越深。但为了方便计算,湿润体轮廓线的形状仍用半椭圆型方程表示,视地表水平扩散半径为最大水平扩散半径。因此,用半椭体积公式计算的湿润体体积需进行修正,当滴头流量小于等于 5 L/h 时修正系数取 1.33,当滴头流量大于 5 L/h 小于等于 8 L/h 时系数取 1.38。利用修正后的体积公式预测结果表明:当滴头流量不大于 8 L/h ,灌水历时不大于 10 h 的情况下所形成的土壤湿润体的范围均在枣树根系主要分布的范围内。

3) 试验反映出湿润体体积大小不仅受灌水量影响还受滴头流量影响,相同灌水量情况下,湿润体

体积随滴头流量的增大而减小。因此采用滴灌进行灌溉时,选择合适的滴头流量和灌水量(或灌水历时)对于水分在根区的分布范围有重要作用。

4) 湿润体内土壤含水率的分布同时受滴头流量和灌水量的控制,土壤含水率在剖面上的分布形状类似于湿润体形状,在离滴头由近到远的位置上,土壤含水率由大到小变化。灌水量相同时,相同湿润区的含水率越大,滴头附近各节点的土壤含水率和湿润体的平均含水率都随滴头流量的增大而增大;流量相同时,滴头附近各节点的土壤含水率随滴头流量的增大而减小,湿润体平均含水率也随灌水量的增大而减小。

参 考 文 献:

[1] Meshkat M, Warner R C, Workman S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. Trans of the ASAE, 2000,43(1):79—86.

[2] Michael A B, Bruce G S, David G B. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems[J]. Irrig Sci, 2003,22:135—141.

[3] 汪志荣,王文焰,王全九,等.点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].水利学报,2000,(6):39—44.

[4] 刘雪芹,范兴科.滴灌条件下土壤水分再分布过程研究[J].干旱区农业研究,2006,24(4):42—45.

[5] 刘晓英,杨振刚,王天俊.滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J].水利学报,1990,(1):11—21.

[6] 张振华,蔡焕杰,郭永昌,等.滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究[J].农业工程学报,2002,18(2):17—20.

[7] 张振华,蔡焕杰,杨润亚.地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解[J].土壤学报,2004,41(6):870—875.

[8] 王成志,杨培岭,任树梅,等.保水剂对滴灌土壤湿润体影响的室内实验研究[J].农业工程学报,2006,22(12):1—7.

[9] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32—35.

[10] 孙海燕,王全九.滴灌湿润体交汇情况下土壤水分运移特征的研究[J].水土保持报,2007,21(2):115—118.

- [11] Gardner W R, Mayhugh M S. Solution and tests of the diffusion equation for the more moist of water in soil[J]. Soil Sci Soc Amer proc, 1958,22:197—201.
- [12] 费良军,吴军虎,王文焰,等. 充分供水条件下单点膜孔入渗湿润性研究[J]. 水土保持学报,2001,15(5):137—140.
- [13] 张振华,杨润亚,蔡焕杰,等. 土壤质地、密度及供水方式对点源入渗特性的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2004,20(2):81—85.

Study on effects of different dripper discharge on wetting soil characteristic of drip irrigation

ZHAO Ying-na¹, WANG You-ke^{1,2}, MA Li-hui^{1,2}, LI Peng-hong¹, DUAN Xue-song¹, ZHANG Lu-jun¹

(1. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The experiment was conducted to investigate the effect of different dripper discharge and irrigation amount on the characteristic value of soil wetted volume and the course of soil water distribution with drip irrigation in Jujube demonstration base of mountain micro-irrigation in Mizhi. The results show that horizontal and vertical advance distance of soil wetted front conforms to power function of infiltration time for point source drip irrigation and calculated value is all above 0.99; the soil wetted volume and the distribution of soil water content in wetted soil controlled by dripper discharge and irrigation amount. The soil wetted volume reduced and average moisture content increase with dripper discharge increase under same irrigation amount. Some models were presented to predict horizontal and vertical wetting front and volume of wetted soil.

Keywords: drip irrigation; characteristic value of wetted volume; dripper discharge; irrigation amount

(上接第29页)

Model of coupling water with fertilizer in gravel-mulched watermelon field and its optimum combination scheme

MA Bo^{1,2,3}, TIAN Jun-cang^{1,2,3}

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Ningxia Research Center of Technology on Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Center of Engineering Research on Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agricultural in Arid Regions, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Based on the current rotary combination design method of square regression with three factors and five levels, experiment of coupling water with fertilizer in gravel-mulched watermelon field was conducted in central arid region of Ningxia. The results show that irrigation quota is the main factor affecting watermelon yield, and the planting distance was the second factor, while the nitrogen quantity was the third one. Water and nitrogen quantity interaction has certain effect, and it will get high yield when low nitrogen quantity and high irrigation quota are combined, middle nitrogen quantity and high irrigation quota combined. Optimum combination indexes of water and fertilizer on different watermelon yield were gained through the model simulation and experiment. The optimal combination scheme of factors on different yield level of watermelon in gravel-mulched field is: (1) When watermelon yield is 12 000 ~ 15 000 kg/hm², irrigation quota is 48 ~ 61.5 m³/hm², nitrogen quantity is 24 ~ 31.5 kg/hm², and planting distance is 1.7 ~ 1.9 m; (2) When watermelon yield is 115 000 ~ 18 000 kg/hm², irrigation quota is 55.5 ~ 69 m³/hm², nitrogen quantity is 24 ~ 30 kg/hm², and planting distance is 1.4 ~ 1.6 m; (3) When watermelon yield is 18 000 ~ 21 000 kg/hm², irrigation quota is 58.5 ~ 72 m³/hm², nitrogen quantity is 24 ~ 30 kg/hm², and planting distance is 1.2 ~ 1.3 m. All these can provide reference for water-saving irrigation of watermelon in gravel-mulched field in central arid region of Ningxia.

Keywords: watermelon; gravel-mulched field; coupling water with fertilizer; function of water and fertilizer with yield