

# 土壤质地对地下滴灌灌水器水力要素的影响<sup>\*</sup>

李刚 白丹 王晓愚 付嘉

(西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

**【摘要】** 为研究不同质地土壤中灌水器水力要素的变化规律及其差异,选取灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率为因素,分别在粘土、壤土和砂土中采用混合水平均匀设计安排试验。试验结果表明,不同土壤中的灌水器出流规律一致:即当工作压力不变时,灌水器流量在灌水初期略大,而后减小并趋于恒定,这个变化过程仅1~2 min;在相同压力下,地下滴灌灌水器流量比地表滴灌小5%~20%,压力越大,二者越接近;灌水器流量随工作压力的增加而增大;土壤因素对灌水器流量有微弱的制约作用,使流量减小。相同条件下,土壤质地越轻,灌水器流量越大;但随着土壤容重和土壤初始含水率的增加,土壤质地越轻,流量减小程度越大。

**关键词:** 地下滴灌 灌水器 土壤质地 水力要素

**中图分类号:** S275.4; S275.6

**文献标识码:** A

## Effect of Different Textural Soils on Hydraulic Characteristics of Emitters under Subsurface Drip Irrigation

Li Gang Bai Dan Wang Xiaoyu Fu Jia

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

### Abstract

In order to study hydraulic characteristics and their differences of SDI emitter in various textural soils and to analyze effect of soil factors on emitter discharge, the experimental scheme was arranged in the clay, loam and sand soil based on uniform design with mixed levels of three factors that were respectively work pressure of emitter, soil bulk density and soil initial water content. The results show that the rules of emitter discharges in three textural soils are the same. The discharge of SDI emitter is slightly big at the beginning of irrigation, but it is reduced and tends to be constant after 1~2 min when work pressure remains invariable. At the same work pressure, the discharge of SDI emitter is smaller about 5~20 percent than that of DI emitter. The work pressure is higher, and the discharge of SDI emitter is bigger, and the discharge of both SDI and DI are closer. Soil factors slightly restrict emitter discharge. The lighter textured soil it is, the bigger emitter discharge will be. But discharge reduction of emitter in three textural soils with increase of soil bulk density or soil initial water content is bigger in sandy soil, smaller in loam soil and smallest in clay soil.

**Key words** Subsurface drip irrigation, Emitter, Soil texture, Hydraulic characteristics

### 引言

地下滴灌(subsurface drip irrigation, 简称 SDI)灌水器埋于土中,与地表滴灌不同,其水力要素的变

化规律除受灌水器构造影响外,还受到周围土壤因素的制约。目前,国内外地下滴灌灌水器室内试验主要采用马氏瓶恒压供水<sup>[1~5]</sup>,压力水头一般在100 kPa以下,而实际工程中使用的灌水器,其工作

压力往往高于 100 kPa。国内外学者从不同角度分析了地下滴灌灌水器水力特性,如张昊等<sup>[2]</sup>在两种土质中试验了灌水器水力特性;白丹等<sup>[6]</sup>进行了地下滴灌流量与压力关系的试验研究。Shani U 等<sup>[4]</sup>从土壤导水率角度研究了不同土壤中灌水器的流量;Shaviv A 等<sup>[7]</sup>、Ben Gal A 等<sup>[8]</sup>和 Lazarovitch N 等<sup>[9]</sup>则从地下点源入渗角度分析土壤对灌水器出流和出口处压力的影响,认为当地下滴灌灌水器流量大于土壤水入渗率时,灌水器出口处的正压导致其出流量减小;Lazarovitch N 等<sup>[10]</sup>在此基础上建立了数学模型以分析地下灌水器出流量变化规律和土壤对流量的影响。在田间试验研究<sup>[2,11~12]</sup>中,主要是通过测量地下滴灌土壤水入渗分布间接了解灌水器的出流情况。上述研究对地下滴灌灌水器水力要素影响因素的分析,特别是对影响灌水器流量的土壤物理特性(如土壤质地、土壤容重和初始含水率等因素)的分析还较少。为此,本文着重考虑土壤物理特性对灌水器出流的影响,研究不同土壤中灌水器流量与工作压力之间的关系,并与地表滴灌灌水器流量-压力关系进行比较,以期研究地下滴灌田间管网水力要素变化规律奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤分别选取西安轻粘土、粉壤土和轻砂土,这3种土壤的颗粒分析结果如表1所示<sup>[13]</sup>。

表1 土壤颗粒组成

土壤质地	粒径/mm		
	0.05~1	0.01~0.05	<0.001
轻粘土	38.21	28.70	32.02
粉壤土	10.45	61.13	0.90
轻砂土	55.75	35.09	0.11

灌水器采用以色列 PLASSIM 公司生产的紊流迷宫内镶式滴灌管,滴灌管外径 16 mm,壁厚 1.0 mm。试验测得该灌水器在地表滴灌(drip irrigation, 简称 DI)时的流量  $q_{DI}$  (L/h) 与工作压力  $h$  (kPa) 之间的关系式为

$$q_{DI} = 0.361 0h^{0.5088} \quad (R^2 = 0.9996) \quad (1)$$

### 1.2 试验方法

试验系统由供水加压装置、管道、灌水器、土桶和支架组成,采用高位水箱和水泵联合加压的方式供水,根据试验所需压力调节闸阀<sup>[14]</sup>。进行每组试验时,先测量所用灌水器在设计工作压力下的地表滴灌流量。土桶外径 40 cm,试验设计装土深 40 cm,设计灌水器埋深 20 cm。

试验过程中,利用地下滴灌灌水器测试系统<sup>[14~15]</sup>每 1 min 采集一组土桶质量和对应时刻的灌水器工作压力。随着灌水时间的增加,得到土桶初始质量与累积时间段内灌水量之和,减去土桶初始质量便是每 1 min 对应的灌水器累积出水量,由此可计算出一定时段内地下灌水器的流量  $q_{SDI}$ 。

### 1.3 试验方案

以灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率为因素,根据实际情况与试验条件,确定这3个因素的变化范围:灌水器工作压力  $h$  为 50~400 kPa;考虑土壤的农业生产意义,土壤容重和土壤初始含水率都不能过小或过大,土壤容重  $\gamma$  为 1.25~1.40 g/cm<sup>3</sup>,土壤初始含水率  $\theta_0$  为 12%~18%。本试验  $h$  取 8 个水平, $\gamma$  与  $\theta_0$  分别取 4 个水平。为减少试验次数并使各试验点具有代表性,采用混合水平均匀设计安排试验<sup>[16~17]</sup>。按试验方案进行试验,实测数据见表2。

## 2 地下滴灌灌水器出流过程分析

结果发现,采用3种土壤按试验方案进行的各次试验中均存在如下规律<sup>[15]</sup>:实测灌水器出水量随

表2 3种土壤中的试验因素与灌水器流量实测值

Tab.2 Measured values of experimental factors and SDI emitter discharges in three type textural soils

试验 序号	轻粘土				粉壤土				轻砂土			
	$h$ /kPa	$\gamma$ /g·cm <sup>-3</sup>	$\theta_0$ /%	$q_{SDI}$ /L·h <sup>-1</sup>	$h$ /kPa	$\gamma$ /g·cm <sup>-3</sup>	$\theta_0$ /%	$q_{SDI}$ /L·h <sup>-1</sup>	$h$ /kPa	$\gamma$ /g·cm <sup>-3</sup>	$\theta_0$ /%	$q_{SDI}$ /L·h <sup>-1</sup>
1	61.30	1.35	17.89	2.384	61.60	1.35	17.99	2.435	61.30	1.35	18.15	2.478
2	106.64	1.25	15.66	3.413	102.63	1.25	16.02	3.368	105.37	1.25	15.79	3.408
3	156.28	1.35	14.52	4.272	155.85	1.35	13.76	4.193	153.13	1.35	14.34	4.065
4	201.39	1.25	11.90	4.913	201.35	1.25	11.73	4.961	199.24	1.25	12.54	4.947
5	249.43	1.40	18.13	5.330	252.23	1.40	17.68	5.331	253.98	1.40	17.92	5.323
6	299.63	1.30	16.60	5.926	305.05	1.30	16.15	6.064	302.12	1.30	15.97	6.088
7	352.44	1.40	13.74	6.562	352.51	1.40	13.70	6.706	353.92	1.40	13.82	6.680
8	369.79	1.30	12.23	6.738	368.80	1.30	12.03	6.892	378.04	1.30	12.35	7.241

时间呈线性递增趋势,直线斜率就是灌水器的流量值。每组试验中,流量值自第2 min之后基本保持稳定,而第1 min的流量值要略大,这个变化过程时间很短,仅1~2 min。因此,可近似认为流量在整个灌水过程中是一个相对恒定的值。

### 3 地下滴灌灌水器流量经验公式

在对3种土壤中的地下滴灌灌水器流量进行分析后,可将灌水器流量与各影响因素之间的关系描述为<sup>[15]</sup>

$$q_{SDI} = k\gamma^a\theta_0^c h^x \quad (2)$$

式中  $k$ 、 $a$ 、 $c$ 、 $x$ ——经验指数

3种土壤下,回归方程的显著性检验  $F$  值均大于  $F_{0.01}(3,4) = 16.6944$ ,表明回归显著。回归方程的检验值及公式中各参数值见表3。

表3 3种土壤中的经验公式参数值与检验值

Tab.3 Regression coefficients and  $F$  value of discharge equations in three type textural soils

土壤 质地	经验公式参数				$R^2$	$F$ 值
	$k$	$a$	$c$	$x$		
轻粘土	0.315 2	-0.089 1	-0.077 5	0.557 5	0.998 3	782.59
粉壤土	0.324 9	-0.156 4	-0.083 8	0.560 0	0.999 5	2 464.05
轻砂土	0.346 1	-0.252 0	-0.098 9	0.561 9	0.998 3	795.79

## 4 土壤质地对地下滴灌灌水器流量的影响

### 4.1 地下滴灌灌水器流量影响因素分析

从建立的回归方程来看, $\gamma$ 和 $\theta_0$ 的指数 $a$ 和 $c$ 均为负值。说明在3种土壤中,土壤容重和土壤初始含水率对试验所选灌水器的出流均起到制约作用,并且土壤质地越轻, $\gamma$ 和 $\theta_0$ 对灌水器流量的制约作用越大。

回归系数的统计检验  $t$  值的绝对值越大,对应的因素越显著,对试验结果的影响越重要<sup>[18]</sup>。计算各项回归系数的  $t$  值如表4。查  $t$  分布表有:当显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 双侧检验临界值  $t_{\alpha/2}(4) = 2.1318$ 。比较  $k$ 、 $a$ 、 $c$  和  $x$  的  $|t|$  值可知,灌水器流态指数  $x$  的  $|t|$  值明显大于其他回归系数的  $|t|$  值,其次是  $k$  值对应的  $|t|$  检验值,而  $a$ 、 $c$  的  $|t|$  值都很小。可知,在3种土壤中,均是工作压力这一因素最重要,对灌水器流量影响最大;系数  $k$  和  $x$  同时也反映灌水器的性能,这说明灌水器水力性能同样是影响其在地下滴灌出流的关键因素。对比相同土壤条件下的系数  $a$  和  $c$  的  $t$  值可知,因素  $\gamma$  和  $\theta_0$  的显著性都很弱,对灌水器流量影响较小, $\theta_0$  比  $\gamma$  对灌水器流量的影响程度略大。

表4 回归系数的  $t$  统计检验值

Tab.4 Statistical test  $t$  values of regression coefficients

土壤质地	$k$	$a$	$c$	$x$
轻粘土	-5.973 8	-0.448 5	-1.262 4	38.201 1
粉壤土	-10.185 6	-1.406 9	-2.444 9	66.175 6
轻砂土	-4.642 0	-1.237 3	-1.370 1	35.735 0

### 4.2 各种土质地地下滴灌灌水器流量的变化规律

对试验选用的灌水器在地下滴灌条件下出流的影响因素进行分析可知,3种土壤中灌水器流量分别随  $h$ 、 $\gamma$  和  $\theta_0$  的变化趋势基本一致:系统工作压力  $h$  是影响灌水器出流的关键因素,灌水器流量随压力的增加而增大,与相同压力下地表滴灌相比,地下滴灌灌水器流量减小5%~20%,总体趋势是工作压力越大, $q_{SDI}$ 越接近  $q_{DI}$ 。相同  $\gamma$ 、 $\theta_0$  和  $h$  条件下,3种土壤中的灌水器流量从小到大依次为:轻粘土、粉壤土、轻砂土。当  $h$  和  $\theta_0$  不变时,随  $\gamma$  增大, $q_{SDI}$ 几乎呈线性递减趋势,即土壤容重越大,灌水器流量越小;当  $h$  和  $\gamma$  不变时,随着  $\theta_0$  的增加, $q_{SDI}$ 总体呈减小的趋势;但在对农业生产与灌溉有实际意义的土壤容重和土壤初始含水率的变化范围<sup>[19]</sup>内,地下滴灌灌水器流量减小的并不多。相同条件下,土壤质地越轻,此减小量越大。

### 4.3 不同土壤条件下地下滴灌灌水器流量变化

#### 4.3.1 工作压力

当  $\gamma$  与  $\theta_0$  一定时,3种土壤中供试灌水器的地下滴灌流量  $q_{SDI}$ 随工作压力变化趋势的差别并不明显,尤其是当  $\gamma$  和  $\theta_0$  都较大时,3条流量-压力曲线几乎重合(图1)。在  $\gamma$  和  $\theta_0$  都较小时,压力越大,不同土壤中  $q_{SDI}$ 之间的差别越明显,相同  $\gamma$  和  $\theta_0$  条件下,土质越轻,土壤的透水性能越强,对灌水器出流的制约作用就越小。

#### 4.3.2 土壤容重

由图1可以看出,随着  $\gamma$  和  $\theta_0$  的变化,3种土壤中供试灌水器的地下滴灌流量  $q_{SDI}$ 的减小程度略有差异。当  $\theta_0$  和  $h$  一定时,随着  $\gamma$  增加,轻砂土  $q_{SDI}$ 减小的幅度最大,粉壤土  $q_{SDI}$ 次之,轻粘土  $q_{SDI}$ 减小的幅度最小(见图2),说明土壤质地越轻, $\gamma$ 对  $q_{SDI}$ 的制约作用越明显。这是因为土壤容重的变化改变了土壤孔隙度和孔隙分布。一般在各种质地土壤中,砂土中大孔隙发育,其通气性和透水性强,受土壤容重变化的影响较大。粘土孔隙分布比较均匀且小孔隙多,透水性较弱,受土壤容重变化的影响较小,故粘土中灌水器流量的减小程度受土壤容重的影响较小。壤土的这一特性介于粘土和砂土之间,所以地下滴灌灌水器流量受土壤容重的制约作用也

介于这两者之间。

### 4.3.3 土壤初始含水率

在3种土壤中,  $\theta_0$  对供试灌水器的地下滴灌流

量  $q_{SDI}$  的制约作用均较弱, 其中轻粘土中的  $q_{SDI}$  受  $\theta_0$  影响最小, 而轻砂土中  $q_{SDI}$  对  $\theta_0$  的变化稍敏感, 粉壤土居中(图3)。

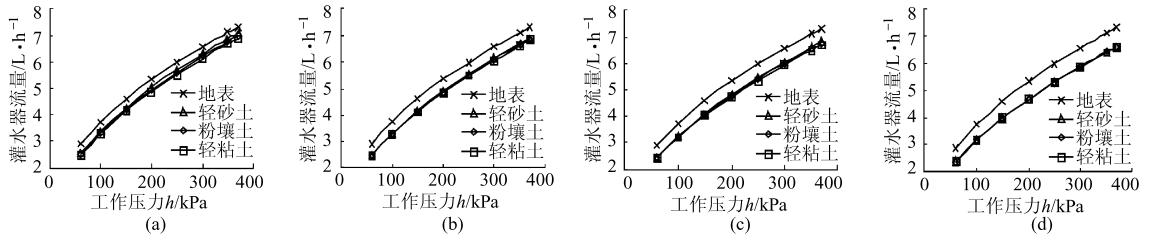


图1 地表滴灌和不同土壤地下滴灌灌水器流量与压力的关系曲线

Fig.1 Relations between SDI emitter discharges in various textural soils and work pressure for certain soil bulk density and initial soil water content and relation between DI emitter discharge and work pressure

(a)  $\gamma = 1.25 \text{ g/cm}^3, \theta_0 = 12\%$  (b)  $\gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3, \theta_0 = 12\%$  (c)  $\gamma = 1.25 \text{ g/cm}^3, \theta_0 = 18\%$  (d)  $\gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3, \theta_0 = 18\%$

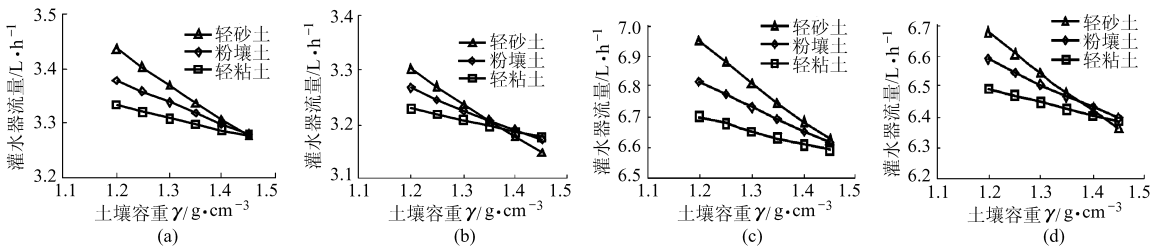


图2 不同土壤地下滴灌灌水器流量与土壤容重的关系曲线

Fig.2 Relations between SDI emitter discharges in various textural soils and soil bulk density for certain work pressure and initial soil water content

(a)  $\theta_0 = 12\%, h = 100 \text{ kPa}$  (b)  $\theta_0 = 18\%, h = 100 \text{ kPa}$  (c)  $\theta_0 = 12\%, h = 350 \text{ kPa}$  (d)  $\theta_0 = 18\%, h = 350 \text{ kPa}$

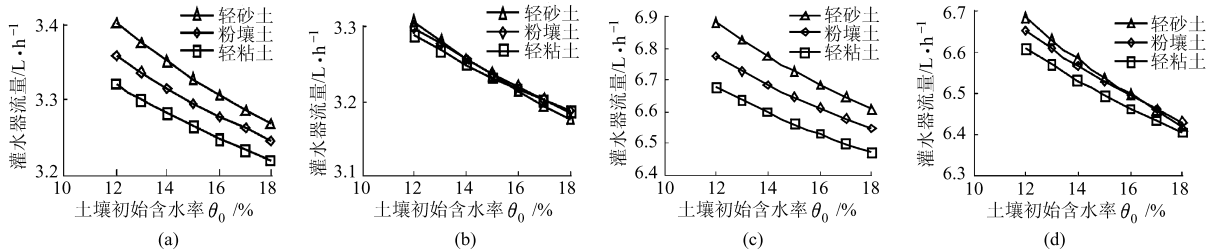


图3 不同土壤地下滴灌灌水器流量与土壤初始含水率的关系曲线

Fig.3 Relations between SDI emitter discharges in various textural soils and initial soil water content for certain work pressure and soil bulk density

(a)  $\gamma = 1.25 \text{ g/cm}^3, h = 100 \text{ kPa}$  (b)  $\gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3, h = 100 \text{ kPa}$  (c)  $\gamma = 1.25 \text{ g/cm}^3, h = 350 \text{ kPa}$  (d)  $\gamma = 1.40 \text{ g/cm}^3, h = 350 \text{ kPa}$

## 5 结论

(1) 当系统工作压力保持稳定, 灌水器流量开始略大, 而后减小并基本保持恒定, 这个时间段很短, 仅 1~2 min, 可将地下滴灌灌水器流量作为常量。

(2) 以灌水器工作压力、土壤容重和土壤初始含水率为自变量, 建立了地下滴灌灌水器流量计算公式。对各因素的显著性检验可知, 轻粘土、粉壤土和轻砂土 3 种土壤中, 系统工作压力都是影响灌水器

流量的最重要因素, 土壤容重和土壤初始含水率的增加使灌水器流量减小, 但影响微弱。

(3) 相同条件下, 土壤质地越轻, 灌水器流量越大, 即砂土中的灌水器流量较大, 壤土次之, 粘土最小; 但土壤质地越轻, 灌水器流量对土壤容重和土壤含水率变化越敏感, 随着二者的增加, 灌水器流量减小程度增大, 而质地较重的粘土中, 灌水器流量减小程度较小, 壤土居中。这与不同质地土壤的孔隙度和孔隙分布以及透水性与持水能力有关。

## 参 考 文 献

- 1 胡笑涛,康绍忠,王晓燕,等.地下滴灌灌水器的筛选试验研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5~6):483~485.  
Hu Xiaotao, Kang Shaozhong, Wang Xiaoyan, et al. Experiment on choosing emitter of subsurface drip irrigation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5~6): 483~485. (in Chinese)
- 2 张昊,许迪,程先军,等.几种地下滴灌(渗灌)灌水器性能的室内外试验研究[J].灌溉排水,1999,18(4):10~14.  
Zhang Hao, Xu Di, Cheng Xianjun, et al. Experimental study on performances of several watering devices for subsurface irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 1999, 18(4): 10~14. (in Chinese)
- 3 仵峰,李王成,范永申,等.地下滴灌灌水器出口正压试验研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):48~50,54.  
Wu Feng, Li Wangcheng, Fan Yongshen, et al. Experimental study on positive pressure in area around emitter in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 48~50, 54. (in Chinese)
- 4 Shani U, Xue S, Gordin-Katz R, et al. Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: pressure measurements[J]. ASCE J. Irrig. Drain. Eng., 1996, 122(5): 291~295.
- 5 Warrick A W, Shani U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: effect on uniformity[J]. ASCE J. Irrig. Drain. Eng., 1996, 122(5): 296~300.
- 6 白丹,宋立勋,王晓愚,等.地下滴灌灌水器流量和压力关系的试验[J].农业机械学报,2008,39(8):189~191.
- 7 Shaviv A, Sinai G. Application of conditioner solution by subsurface emitters for stabilizing the surrounding soil[J]. ASCE J. Irrig. Drain. Eng., 2004, 130(6): 485~490.
- 8 Ben Gal A, Lazarovitch N, Shani U. Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities[J]. Vadose Zone J., 2004, 3(4): 1407~1413.
- 9 Lazarovitch N, Simunek J, Shani U. System dependent boundary condition for water flow from subsurface source[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(1): 46~51.
- 10 Lazarovitch N, Shani U, Thompson T L, et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 531~536.
- 11 吕谋超,彭贵芳,杨跃辉.地下滴灌应用试验研究[J].中国农村水利水电,1999(1):15~17.
- 12 马孝义,康绍忠,王凤翔,等.果树地下滴灌灌水技术田间试验研究[J].西北农业大学学报,2000,28(1):57~61.  
Ma Xiaoyi, Kang Shaozhong, Wang Fengxiang, et al. Field test of apple orchard subsurface irrigation techniques[J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 2000, 28(1): 57~61. (in Chinese)
- 13 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- 14 王晓愚,白丹,李占斌,等.地下滴灌田间管网室内试验测试系统[J].农业工程学报,2008,24(4):88~90.  
Wang Xiaoyu, Bai Dan, Li Zhanbin, et al. Laboratory test system of field pipe network under subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 88~90. (in Chinese)
- 15 王晓愚,白丹,李占斌,等.地下滴灌灌水器水力要素试验研究[J].农业工程学报,2008,24(10):6~10.  
Wang Xiaoyu, Bai Dan, Li Zhanbin, et al. Experiment study on hydraulic characteristics of emitter under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 6~10. (in Chinese)
- 16 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- 17 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.
- 18 邵淑彩,孙韞玉,何娟娟.应用数理统计[M].武汉:武汉大学出版社,2005.
- 19 何龙,何勇.微灌工程技术与装备[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006.