

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.018

竖管灌水器入渗特性影响因素分析

何 靖, 白 丹, 郭 霖, 王新端

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 竖管灌水器是一种用于地下灌溉系统的新型灌水器, 本文研究影响竖管灌水器入渗特性的四个因素: 压力水头、竖管灌水器直径、土壤初始含水率和土壤容重等, 为了研究这些因素对粉质壤土累积入渗量的影响程度, 采用正交试验安排试验方案; 而对于砂质壤土主要研究压力水头和竖管灌水器直径对累积入渗量的影响。根据竖管灌水器入渗试验结果, 采用灰色关联度分析对影响粉质壤土累积入渗量的影响因素进行关联度计算, 表明压力水头对入渗量的影响起主导作用, 其次依次为竖管灌水器直径、土壤初始含水率、土壤容重; 砂质壤土试验结果表明: 压力水头和竖管灌水器直径与累积入渗量呈正相关关系, 但随着压力水头和竖管灌水器直径的增大, 累积入渗量的增大幅度减小。这一研究结果对进一步研究竖管灌水器入渗规律具有重要意义。

关键词: 竖管灌水器; 累积入渗量; 压力水头; 竖管灌水器直径; 灰色关联度分析

中图分类号: S275.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0354-05

Study on influence factors of vertical tube emitter's infiltration characteristics

HE Jing, BAI Dan, GUO Lin, WANG Xinduan

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Vertical tube emitter is a new type emitter applied for sub-irrigation system, in order to analyze the importance for cumulative infiltration of silt loam by influence factors which including pressure head, diameter of vertical tube, initial soil moisture content and soil bulk density. So as to the laboratory test have the accuracy, universal and representativeness, the nine groups of the experimental schemes designed based on the orthogonal experimental design table $L_9(3^4)$. In addition, the experiment of effects on sandy loam cumulative infiltration with influence factors of pressure head and diameter of vertical tube carried out. A Mariotte bottle used to regulate the pressure head. The total infiltration time was 7h for every treatment of silt loam and 5h for sandy loam, and the interface—between soil and outlet of emitter—was buried 20cm for every test. According to the results of experiments for silt loam, used grey correlational analysis method to calculate incidence degree between influence factors and cumulative infiltration. The incidence degree pointed out that pressure head was the main influence factor and the order of factors with incidence degree was pressure head > diameter of vertical tube > initial soil moisture content > soil bulk density. The experimental results of sandy loam showed that pressure head and diameter of vertical tube had a positive effect on cumulative infiltration; with the increasing of pressure head and diameter of vertical tube the rangeability of cumulative infiltration decreases. This research has an important significance on further study on infiltration law of vertical tube emitter.

Key words: vertical tube emitter; cumulative infiltration; pressure head; diameter of vertical tube emitter; gray correlation analysis

地下灌溉技术具有节水、节能、投资小、灌水均匀及使用寿命长等优点, 依据灌水器的类型, 地下灌溉可分为地下滴灌^[1-5]、无压灌溉^[6-7]和负水头灌

溉^[8-9]等。地下灌溉技术的入渗影响因素较多, 现有的对灌水器水力参数的分析方法主要有基于计算流体力学 CFD 数值模拟分析^[10-11]和基于流体力学

收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41571222, 5129156); 高等学校博士学科点专项科研基金联合资助课题(20116118110010); 陕西省农业科技攻关项目(2010K02-08)

作者简介: 何靖, 男, 硕士生, 研究方向为节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 18700409806@163.com

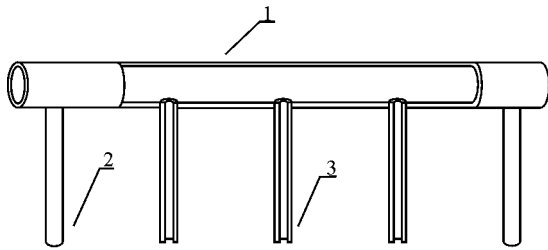
通讯作者: 白丹, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为节水灌溉理论与技术研究。E-mail: baidan@xaut.edu.cn

的理论分析^[12]、试验分析^[13],这些分析方法都是基于现有的一些模型对灌水器水力参数的一种数值模拟计算。为了分析竖管灌水器入渗影响因素的主次顺序,本文在室内试验的基础上,采用灰色关联分析法分析了竖管灌水器入渗试验中几种主要影响因素对累积入渗量的影响,并对这几个影响因素进行了主次排序,以确定竖管灌水器入渗的主要影响因素。对竖管灌水器的入渗规律的进一步研究提供一定的理论基础。

1 入渗试验

1.1 竖管灌水器

竖管灌水器是一种新型地下灌溉灌水器,以该灌水器为核心的灌溉系统同现有的地下灌溉系统的唯一区别在于灌水器。竖管灌水器为长度 30 cm 的 PVC 管,其上端与毛管相连,下端开敞与土壤接触,形成一个圆形的水土接触面。竖管灌水器如图 1 所示。



1. 毛管; 2. 竖管灌水器; 3. 竖管灌水器剖面

图 1 竖管灌水器

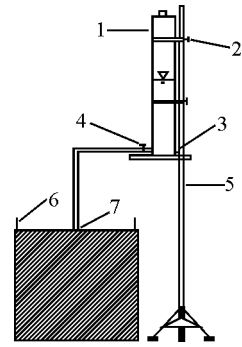
Fig. 1 Schematic diagram of vertical tube emitter

1.2 试验材料及方法

1.2.1 试验材料及装置

试验用土选用西安周边的粉质壤土及新疆的砂质壤土。西安粉土的土壤颗粒粒径小于 0.001 的含量为 3.817%, 小于 0.002 的含量为 8.566%, 小于 0.005 的含量为 19.857%, 小于 0.01 的含量为 34.065%, 小于 0.1 的含量占到总量的 99.868%, 小于 0.2 的含量为 99.997%。新疆砂质壤土的土壤颗粒粒径小于 0.001 的含量 0.63%, 小于 0.002 的含量为 1.46%, 小于 0.05 的含量为 30.47%, 小于 0.1 的含量为 61.23%, 小于 0.5 的含量为 94.87%。

试验装置主要由马氏瓶(长×宽×高:7×6×60 cm)、试验土箱(四周为 10 mm 钢化玻璃,底部为 5 mm 钢板,尺寸:长 41 cm×宽 31 cm×高 55 cm)、高度可调铁架及核心部件竖管灌水器(竖管直径分别为 4 mm、8 mm、12 mm)。试验装置如图 2 所示。



1. 马氏瓶; 2. 固定夹; 3. 进气阀; 4. 出水口; 5. 铁架; 6. 土箱;
7. 竖管灌水器

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental equipment

1.2.2 试验方法

本次室内试验中,粉质壤土主要考虑压力水头 h 、竖管灌水器的竖管直径 d 、土壤初始含水率 θ 和土壤容重 γ 四个因素。试验过程中,竖管灌水器的出水口处理深均为 20 cm,每组试验的地观测时间为 420 min,进行 3 次重复取其平均值进行分析。根据正交试验设计表 $L_9(3^4)$ 设计试验方案(见表 1)。

表 1 试验方案
Tab. 1 The experimental plan

试验方案	h/m	d/mm	$\theta/\%$	$\gamma/(g \cdot cm^{-3})$
1	0.60	4.00	7.00	1.32
2	0.60	8.00	10.00	1.37
3	0.60	12.00	13.00	1.42
4	1.30	4.00	10.00	1.42
5	1.30	8.00	13.00	1.32
6	1.30	12.00	7.00	1.37
7	2.00	4.00	13.00	1.37
8	2.00	8.00	7.00	1.42
9	2.00	12.00	10.00	1.32

砂质壤土主要考虑压力水头和竖管直径对入渗的影响。压力水头取 1.0 m、2.0 m、3.0 m,竖管直径取 4 mm、8 mm、12 mm,埋深 20 cm,初始含水率 10%,容重 $1.35 g/cm^3$ 进行试验研究,记录 300 min,进行 3 次重复取其平均值进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

根据表 1 的安排进行试验,获得了在表中所述 4 个因素的影响下各组的累积入渗量随时间的变化情况,如图 3(a)所示。砂质壤土给出了 2.0 m 压力水头及竖管直径 8 mm 下的试验结果,如图 3(b)、(c)所示。

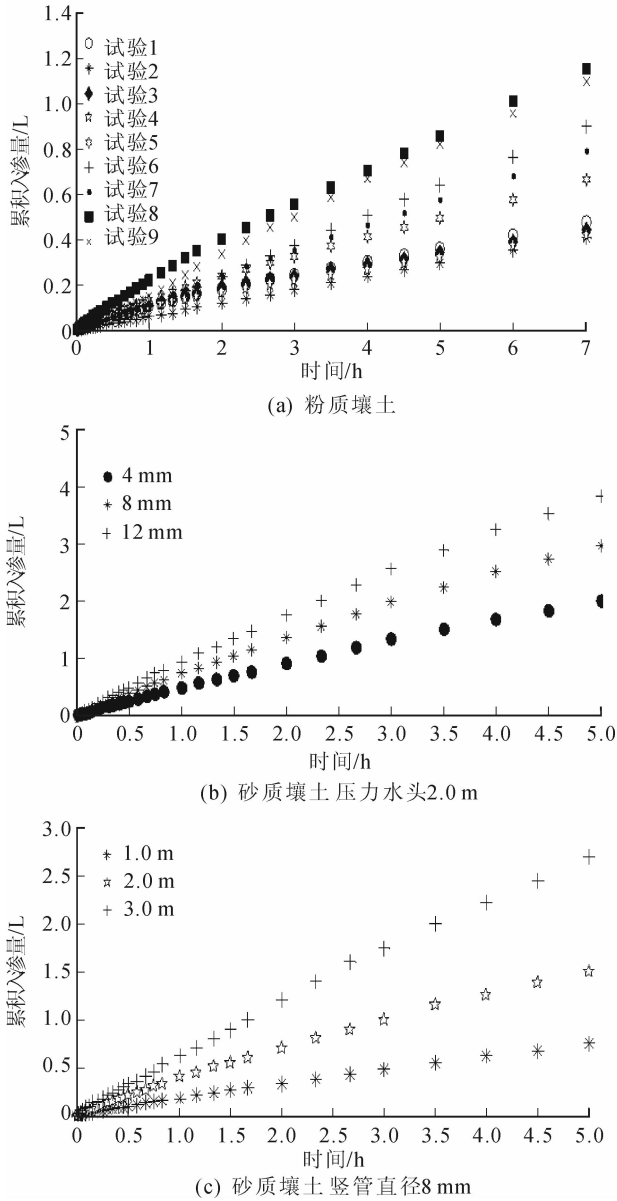


图 3 累积入渗量与时间的关系

Fig. 3 The relationship between cumulative infiltration and time

2.2 试验结果分析

2.2.1 粉质壤土结果分析

为了明确粉质壤土入渗试验中 4 个因素对累积入渗量的影响程度,本文采用灰色关联分析法对这一试验结果进行了分析。

由于 4 个因素与累积入渗量的量纲不同,在分析之前首先需要进行无量纲化处理。无量纲化处理有多种方法,如初值化、均值化等方法,本文采用均值化无量纲化处理。对各数列进行无量纲化处理,所得结果如表 2 所示。其中 I 表示累积入渗量。

由于要考虑的是各因素对累积入渗量的影响,所以将累积入渗量作为参考数列,各因素数列作为对比数列。

表 2 均值化值
Tab. 2 The equalization values

试验方案	h/m	d/mm	$\theta/\%$	$\gamma/(g \cdot cm^{-3})$	I/L
1	0.461 5	0.500 0	0.700 0	0.963 5	0.676 8
2	0.461 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.579 0
3	0.461 5	1.500 0	1.300 0	1.036 5	0.623 4
4	1.000 0	0.500 0	1.000 0	1.036 5	0.593 7
5	1.000 0	1.000 0	1.300 0	0.963 5	0.938 1
6	1.000 0	1.500 0	0.700 0	1.000 0	1.274 2
7	1.538 5	0.500 0	1.300 0	1.000 0	1.122 1
8	1.538 5	1.000 0	0.700 0	1.036 5	1.638 7
9	1.538 5	1.500 0	1.000 0	0.963 5	1.553 9

根据表 2 中的均值化数值,计算各比较数列同参考数列的绝对差。计算步骤如下。

试验 1:

$$\begin{aligned} \Delta_{(01)}(1) &= |0.6768 - 0.4615| = 0.2153 \\ \Delta_{(02)}(1) &= |0.6768 - 0.5000| = 0.1758 \\ \Delta_{(03)}(1) &= |0.6768 - 0.7000| = 0.0232 \\ \Delta_{(04)}(1) &= |0.6768 - 0.9635| = 0.2867 \end{aligned}$$

根据上述计算步骤,再分别计算出其余 8 组试验的绝对差,结果如表 3 所示。

由表 3 中可以获得最大和最小绝对差值分别为: $\Delta_{max} = 0.938 7$, $\Delta_{min} = 0.015 4$ 。

表 3 绝对差序列
Tab. 3 Absolute difference sequence

试验方案	$\Delta_{(01)}(i)$	$\Delta_{(02)}(i)$	$\Delta_{(03)}(i)$	$\Delta_{(04)}(i)$
1	0.215 3	0.176 8	0.023 2	0.286 7
2	0.117 5	0.421 0	0.421 0	0.421 0
3	0.161 9	0.876 6	0.676 6	0.413 1
4	0.406 3	0.093 7	0.406 3	0.442 8
5	0.061 9	0.061 9	0.361 9	0.025 4
6	0.274 2	0.225 8	0.574 2	0.274 2
7	0.416 3	0.622 1	0.177 9	0.122 1
8	0.100 2	0.638 7	0.938 7	0.602 2
9	0.015 4	0.053 9	0.553 9	0.590 4

由此可以计算各因素对累积入渗量的关联系数,在计算关联系数时,分辨系数 ρ 取值 $0.05^{[14-15]}$ 。计算步骤如下:

$$\begin{aligned} \zeta_{(0n)}(i) &= \frac{\Delta_{(min)} + 0.05\Delta_{(max)}}{\Delta_{(0n)}(i) + 0.05\Delta_{(max)}} = \\ &= \frac{0.015 4 + 0.05 \times 0.938 7}{\Delta_{(0n)}(i) + 0.05 \times 0.938 7} = \frac{0.062 3}{\Delta_{(0n)}(i) + 0.046 9} \end{aligned}$$

计算结果如表 4 所示。

表4 关联系数值
Tab.4 Related coefficient values

试验方案	$\zeta_{(01)}(i)$	$\zeta_{(02)}(i)$	$\zeta_{(03)}(i)$	$\zeta_{(04)}(i)$
1	0.237 7	0.278 5	0.889 3	0.186 8
2	0.379 1	0.133 2	0.133 2	0.133 2
3	0.298 5	0.067 5	0.086 1	0.135 5
4	0.137 5	0.443 1	0.137 5	0.127 3
5	0.572 6	0.572 6	0.152 5	0.861 5
6	0.194 1	0.228 6	0.100 3	0.194 1
7	0.134 6	0.093 2	0.277 3	0.368 7
8	0.423 6	0.090 9	0.063 2	0.096 0
9	1.000 0	0.618 4	0.103 7	0.097 8

从表4中,可以知道任意一组试验中任一因素对累积入渗量的关联系数,基于此,进行关联度 r 的计算。关联度计算步骤如下:

$$r_{(01)} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{i=9} \zeta_{(01)}(i) = 0.375\ 3$$

$$r_{(02)} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{i=9} \zeta_{(02)}(i) = 0.280\ 7$$

$$r_{(03)} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{i=9} \zeta_{(03)}(i) = 0.244\ 5$$

$$r_{(04)} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{i=9} \zeta_{(04)}(i) = 0.215\ 9$$

对计算得到的4个关联度数值按照大小进行排序: $r_{(01)} > r_{(02)} > r_{(03)} > r_{(04)}$,即:4个因素对累积入渗量的关联度的排序为压力水头 h 、竖管灌水器的竖管直径 d 、土壤的初始含水率 θ 、土壤容重 γ 。由此可以看出:在多因素影响竖管灌水器入渗试验中,压力水头居于主导地位,对累积入渗量的变化影响最大;竖管灌水器的竖管直径和土壤初始含水率对于累积入渗量的关联度处在同一数值水平上,对累积入渗量起到次要的影响作用;土壤容重的影响程度居于末位。

2.2.2 砂质壤土结果分析

由图3(b)中可以看出,在压力水头一定的条件下,随着竖管直径的增大累积入渗量也在增大。最大累积入渗量依次为2.24 L、2.69 L和3.06 L,4 mm管径时的累积入渗量最小,12 mm时的累积入渗量最大,表明管径对累积入渗量有一定的影响程度。经过计算,12 mm管径较之8 mm管径的累积入渗量增大了13.8%,8 mm管径较之4 mm管径的累积入渗量增大了20.1%;累积入渗量呈现正相关关系,即随管径增大,累积入渗量增大。

由图3(c)可以看出,在竖管直径一定的条件下,压力水头对竖管地下灌溉土壤累积入渗量具有

明显的作用。土壤的累积入渗量随着压力水头的增大而增大。在实际应用中,可以根据不同作物的需水要求,选择适宜的压力水头。开始灌水3 h后,压力水头3.0 m的竖管灌溉累积入渗量比2.0 m的大15.7%、8.2%和7.6%(管径由小到大),压力水头2.0 m的比1.0 m的大71.4%、16.1%和10.0%,5 h后,依次为31.0%、6.3%和6.0%;4.3%、10.4%和10.4%;57.1%、15.2%和9.4%。从以上数据可以看出,随入渗时间增加,压力水头对累积入渗量变化的影响程度减小。因为在灌水初期,土壤含水率较低,土壤水分扩散为非饱和入渗^[16],灌溉水分入渗主要受土壤基质势的作用;随着水分的不断入渗,水土结合面周围的土壤含水率逐渐增大,在水土结合面周围形成一个土壤含水率趋于饱和^[17]的饱和带,在该过程中灌溉水受基质势和压力势的共同作用,基质势的作用逐渐减小,压力势的作用逐渐增大;当土壤达到饱和含水率时,基质势为零,此时灌溉水入渗主要受压力势的作用。

3 结 论

1) 粉质壤土试验通过灰色关联法分析,确定四种影响因素的影响程度大小顺序为:压力水头、竖管直径、土壤初始含水率、土壤容重;压力水头是影响竖管灌水器水分入渗的主要因素,竖管灌水器的竖管直径和土壤初始含水率为次要因素,土壤容重居于末位。

2) 砂质壤土试验得出:竖管直径和压力水头均对累积入渗量呈现为正相关影响,但随着时间的增加,影响程度逐渐减小。

参考文献:

- [1] HOUSE E B. Irrigation by means of under-ground porous pipe[C]. Fort Collins, Colorado: Colorado Agricultural Experiment Station, 1920: 1-14.
- [2] CAMP C P. Subsurface drip irrigation: A review[J]. Transaction of ASAE, 1998, 41(5): 1353-1367.
- [3] KANDELOUS M M, KAMAI T, VRUGT J A, et al. Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfalfa[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 81-93.
- [4] SHARMA S P, LESKOVAR D I, CROSBY K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 75-85.
- [5] 张锐, 刘洁, 诸钧, 等. 实现作物需水触动式自适应灌溉的痕量灌溉技术分析[J]. 节水灌溉, 2013, (1):

- 48-51.
ZHANG Rui, LIU Jie, ZHU Jun, et al. Trace quantity irrigation technology with crop water-requirement triggering and self-adaptive function[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (1): 48-51.
- [6] 赵伟霞, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压灌溉日光温室番茄高产指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 16-21.
ZHAO Weixia, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. High yield indicators of greenhouse tomato under non-pressure irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 16-21.
- [7] 陈新明, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压地下灌溉对番茄根系分布特征的调控效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 10-15.
CHEN Xinming, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. Regulating effect of non-pressure subirrigation on distribution characteristics of tomato roots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 10-15.
- [8] 江培福, 雷廷武, BRALTS V F, 等. 土壤质地和灌水器材料对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 19-22.
JIANG Peifu, LEI Tingwu, BRALTS V F, et al. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 19-22.
- [9] 刘胜尧, 范凤翠, 李志宏, 等. 咸水负压渗灌对番茄生长和土壤盐分的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 108-117.
LIU Shengyao, FAN Fengcui, LI Zhihong, et al. Effects of negative pressure irrigation with saline water on tomato yield and soil salt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 108-117.
- [10] 王立朋, 魏正英, 邓涛, 等. 压力补偿灌水器分步式计算流体动力学设计方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 86-92.
WANG Lipeng, WEI Zhengying, DENG Tao, et al. Step-by-step CFD design method of pressure compensating emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 86-92.
- [11] 李云开, 冯吉. 滴灌灌水器内部水动力学特性测试研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 86-92.
LI Yunkai, FENG Ji. Progress in measurement of hydrodynamic characteristics in drip irrigation emitters[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 86-92.
- [12] 颜廷熠, 仵峰, 宰松梅. 滴头流道内部水流流动机理研究的进展与问题[J]. 节水灌溉, 2008, (5): 19-21.
YAN Tingyi, WU Feng, ZAI Songmei. Advance and problems of research on inner flow mechanism in the flow passage of emitter[J]. Water Saving Irrigation, 2008, (5): 19-21.
- [13] 喻黎明. 结构参数对梯形流道水力性能及抗堵塞性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 197-202.
YU Liming. Influence of the structural parameters of trapezoidal-channel emitters on hydraulic and anti-clogging performance[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2011, 39(8): 197-202.
- [14] 申卯兴, 薛西锋, 张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 68-70.
SHEN Maoxing, XUE Xifeng, ZHANG Xiaoshui. Determination of discrimination coefficient in grey incidence analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(1): 68-70.
- [15] 刘震宇. 灰色系统分析中存在的两个基本问题[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 123-124.
LIU Zhenyu. Two problems existing in grey systems analysis[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(9): 123-124.
- [16] 仵峰, 吴普特, 范永申, 等. 地下滴灌条件下土壤水能态研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 31-35.
WU Feng, WU Pute, FAN Yongshen, et al. Distribution of soil water potential energy under subsurface irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 31-35.
- [17] 仵峰, 李王成, 李金山, 等. 地下滴灌灌水器水力性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 85-88.
WU Feng, LI Wangcheng, LI Jinshan, et al. Hydraulic characteristics of emitter in soil of subsurface drip irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 85-88.

(责任编辑 王绪迪, 王卫勋)