

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0061



射流脉冲三通毛管灌水均匀性试验研究

肖思强, 王新坤*, 徐胜荣, 樊二东

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)



肖思强

摘要: 为了提高低压滴灌系统灌水均匀性, 基于附壁与切换原理发明了射流脉冲三通发生器, 试验研究了不同压力工况下脉冲频率、脉冲振幅2种因素对灌水均匀系数、流量偏差率的影响, 并分析了脉冲条件下毛管铺设长度和进口压力对灌水均匀性的影响. 结果表明: 在毛管铺设长度相同时, 不同低压下射流脉冲三通灌水均匀系数的平均值比普通三通提高了0.65%, 流量偏差率明显低于普通三通, 平均降幅为3.62%; 低压条件下产生脉冲频率高于200次/min, 脉冲振幅高于2.5 m; 相同压力条件下, 灌水均匀系数随毛管铺设长度的增大而降低, 流量偏差率随毛管铺设长度的增大而显著增大; 毛管铺设长度相同时, 灌水器流量随进口压力增大而增大, 进口流量也会随之增大.

关键词: 灌水均匀性; 射流脉冲三通; 脉冲频率; 脉冲振幅

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)07-0632-07

肖思强, 王新坤, 徐胜荣, 等. 射流脉冲三通毛管灌水均匀性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 632-638.

XIAO Siqiang, WANG Xinkun, XU Shengrong, et al. Experimental study on irrigation uniformity of lateral pipe with jet-pulse tees [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(7): 632-638. (in Chinese)

Experimental study on irrigation uniformity of lateral pipe with jet-pulse tees

XIAO Siqiang, WANG Xinkun*, XU Shengrong, FANG Erdong

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to improve the irrigation uniformity of low pressure drip irrigation system, a jet-pulse tee generator was invented based on the attachment and switching principle. Effects of pulse frequency and amplitude on irrigation uniformity coefficient and flow rate deviation ratio were studied experimentally under various pressures conditions, and the influences of lateral pipe length and inlet pressure on irrigation uniformity coefficient were also analysed under pulse conditions. Results show that the irrigation uniformity coefficient of jet-pulse tee is 0.65% higher than the ordinary tee in average and its mean deviation ratio is obviously lower than that of the ordinary tee, exhibiting a decrease by 3.62% in average. In addition, under low pressure conditions, the pulse frequency generated by the tee is higher than 200 times/min and the pulse amplitude is larger than 2.5 m. At an identical pressure, the irrigation uniformity coefficient decreases with increasing length of lateral pipe, but the flow rate deviation ratio increases considerably with the length. In the same length, the flow rate through the emitter increases with increasing inlet pressure, and so does the inlet flow rate. In a word, the pulse lateral pipe is only concerned. However, the irrigation uniformity of a pulse branch and a pulse irrigation area will be tackled in the future. Nevertheless, this will extend drip irrigation equip-

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-05-14; 网络出版时间: 2018-03-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1014.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579116); 江苏省水利科技项目(2016062)

第一作者简介: 肖思强(1992—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生(657300840@qq.com), 主要从事节水灌溉理论与新技术研究.

通信作者简介: 王新坤(1966—), 男, 陕西临潼人, 研究员, 博士生导师(xjwxk@126.com), 主要从事节水灌溉理论与新技术研究.

ment, and is an effective way to create a high - performance drip irrigation system.

Key words: irrigation uniformity; jet - pulse tee; pulse frequency; pulse amplitude

地下低压滴灌技术是近年来滴灌领域研究的热点方向之一,属于高效节能型灌水技术^[1]. 脉冲滴灌技术是利用射流脉冲技术,在毛管内形成脉冲水流,具有强烈紊动和冲击动能的水流进入灌水器^[2-4]. 脉冲滴灌可以提高灌水器的抗堵塞能力及低压滴灌系统灌水均匀性^[5-6]. 王庆安^[7]设计了一种主要由脉冲发生器及定量灌水管组成的脉冲滴灌系统,通过脉冲胶囊储水与脉冲的循环实现连续脉冲流. 岳学军等^[8]设计了一种由脉冲式电磁阀、控制器、计时器等组成的脉冲式低功耗滴灌自动控制装置,通过控制器驱动电磁阀控制滴灌的脉冲频率. 脉冲滴灌核心设备是脉冲发生器,一般通过弹簧、塑料膜、脉冲电磁阀或橡胶、电子脉冲装置等弹性材料产生脉冲水流^[9-10]. 但由于脉冲发生器受到造价、安装维护、可靠性及加工技术等因素的制约,脉冲滴灌技术一直没有得到大面积的推广应用. 基于以上原因,文献[11]发明了一种新型的滴灌脉冲发生器,应用射流附壁与切换技术形成脉冲流,结构简单,便于加工,所用材质与普通三通相同,进口尺寸与普通三通相同,且造价低,安装使用方便.

文中通过试验将射流脉冲三通和普通三通分别接入脉冲滴灌系统中,得出各自的灌水均匀系数和流量偏差率,并分析进口压力、毛管铺设长度、脉冲频率及脉冲振幅与灌水均匀性的关系.

1 材料与方法

1.1 毛管射流脉冲三通结构

毛管射流脉冲三通是基于射流的 Coanda 效应设计的一种新型脉冲发生器. 脉冲三通的附壁与切换是由于射流三通的壁面限制了射流卷吸的范围,导致射流与壁面之间发生干涉,从而引起射流两侧产生压力差,压力差推动射流附壁与偏转^[12-13]. 射流脉冲三通在工作初始阶段射流贴附于三通的左侧壁面上,通过壁面向左侧输出道流出. 由于射流存在卷吸作用,将在左侧壁面产生低压涡流区,压力能通过控制管传递到右侧,在射流处产生向右的压力. 随着射流的持续,压力增大,使射流发生偏转,附壁于右侧壁面,并沿该侧壁面向右侧输出道流出. 同样地,由于射流的卷吸作用,射流处产生向左的压力,使射流再次发生偏转,水流恢复到原先

通道. 如此循环往复,分别在射流脉冲三通的 2 个输出道形成一定频率与波幅的间歇水流,在 2 条毛管内形成脉冲水流. 与普通三通相比,在相同工况脉冲三通能够在毛管内产生间歇性水流,将射流脉冲三通应用到滴灌系统可显著提高灌水均匀系数和降低灌水器的流量偏差率,并在低压范围内保持较高的灌水均匀性.

射流脉冲三通的结构在设计上与普通三通不一样,脉冲三通主要由三大部分组成:进口段、出口段、射流元件,其中射流元件是其核心部分,射流元件的关键因素分别为:喷嘴、控制道、位差、侧壁倾角、分流劈和输出道,实物如图 1 所示.

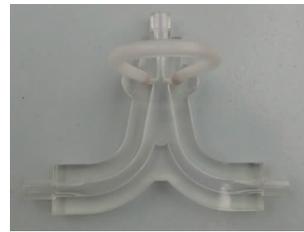


图 1 射流脉冲三通实物图
Fig. 1 Physical jet - pulse tee

1.2 试验方案与装置

根据试验研究内容,有 3 种影响因素分别是试验三通、单侧毛管的长度 L 和进口水头 H . 试验三通分别是射流脉冲三通和普通三通,单侧毛管铺设长度为 60, 70, 80 m. 进口水头设定为 5, 6, 8, 10, 12 m. 试验用毛管为内镶片式滴灌带,滴头间距 30 cm,管径 16 mm,在 10 m 的额定水头下,滴头流量为 2.7 L/h,其中毛管中的流量与压力关系为 $q = 0.215h^{0.549}$.

不同的三通接入试验系统中,按照不同的毛管长度和压力依次进行试验,试验装置设计如图 2 所示.

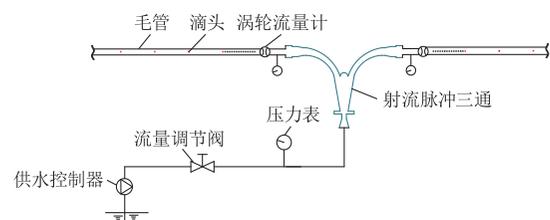


图 2 毛管灌水均匀性试验装置设计图
Fig. 2 Sketch of set-up design for irrigation uniformity experiment of lateral pipe

每组试验测定时间为 15 min,秒表计时. 在试验前,记录涡轮流量计的初始流量. 在两端毛管上每

隔15个滴头设置1个监测点,将每个监测点进行编号,并在每个监测点下放一个盛水容器.试验中,用摄像机拍摄记录左右两侧压力表摆动情况,并记录压力表摆动最大值及最小值,压力最大值与最小值的差值定为脉冲振幅,压力表每分钟来回摆动的次数定为脉冲频率.试验后,记录涡轮流量计最终流量,然后按照编号依次用量筒读出每个容器中的水量.涡轮流量计记录的最终流量与初始流量差值是所有滴头流量的总和,理论上各监测点流量之和的15倍.

1.3 滴灌灌水均匀性评价方法

评价滴灌灌水均匀性指标一般选择灌水均匀系数、流量偏差率^[14-15].文中灌水均匀程度使用Christiansen公式计算得出的流量均匀系数.滴头流量偏差率采用最大滴头流量和最小滴头流量之差与滴头平均流量的比值.

Christiansen计算公式为

$$C_u = 1 - \frac{\Delta \bar{q}}{\bar{q}},$$

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i,$$

$$\Delta \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|, \quad (1)$$

式中: C_u 为灌水均匀系数; \bar{q} 为灌水器的平均流量,L/h; $\Delta \bar{q}$ 为每个灌水器的流量与平均流量之差的绝对值平均值,L/h; q_i 为第*i*个灌水器的流量,L/h; n 为灌水器的数目.

流量偏差率公式计算为

$$q_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_a}, \quad (2)$$

式中: q_v 为滴头流量偏差率,%; q_{\max} 为灌水小区内滴头最大流量,L/h; q_{\min} 为灌水小区内滴头最小流量,L/h; q_a 为滴头平均流量,L/h.

2 结果与讨论

2.1 试验结果

将射流脉冲三通和普通三通监测点的数据进行整理,得出毛管长度60,70,80 m各监测点流量 Q 分布,如图3,4所示.

从图3中可以看出,在同一压力条件下,由于水头损失的存在,整个曲线形态呈现中间高两边低,在水头5~12 m条件下监测点的分布符合这样的变化趋势.在5~10 m水头条件下,监测点流量的最大

值和最小值都是随压力增大而增大,但差值在0.19 L/h左右;在12 m水头条件下,监测点流量的最大值和最小值之间的差值最大,为0.24 L/h.随着压力的增大,全部监测点的流量增加,随之进口流量增加.例如毛管铺设长度60 m时,在5,6,8,10,12 m水头下,进口流量分别为626.15,692.43,796.12,882.15,929.60 L/h,增长率分别是10.58%,15.03%,10.80%,5.33%,单位水头增长率是6.91%.由图3b,c可知,70和80 m的整体监测点流量分布趋势与60 m的趋势大致相同.在整体的趋势上与60 m的相同,都是随压力的增大,最大值和最小值均增大.

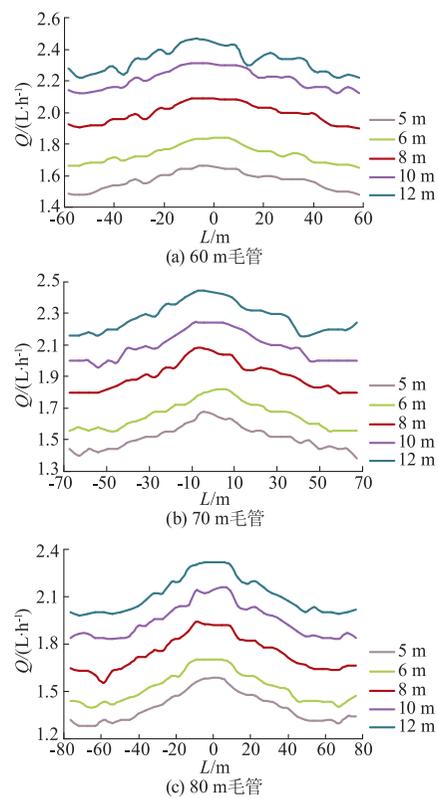


图3 脉冲三通监测点流量分布

Fig. 3 Flow rate distribution at monitoring points in jet-pulse tee

结合图3可知,在相同压力下,毛管长度越长,监测点流量最大值和最小值就越小,而且监测点流量的最大值与最小值之间的差却越大.这是由于毛管越长,滴头变多,但进口压力未改变,所以监测点最大值就会变小.又因为毛管变长,沿程水头损失和局部水头损失增加,导致监测点流量最小值变小.毛管增长对监测点流量的最大值和最小值均有影响,但水头损失对监测点流量最小值的影响较大,所以两者的差值就越来越大.在相同压力下,毛

管越长,虽然监测点流量的最大值和最小值在变小,但进口流量却在变大.这是由于毛管增长,滴头变多,所以流出水量变多.

在同一压力条件下,靠近普通三通的监测点的流量较大,而远离普通三通的监测点流量较小,整个曲线呈中间高两边低的形式.水力损失的存在,所以离普通三通越远损失越大,监测点的流量就越小.由图4b,c可知,70和80m的整体监测点流量分布趋势与60m的趋势基本一致.结合图4可知,总体的分布规律相一致,60m的监测点流量变化较为平缓,其次是70m的监测点流量,最后是80m的监测点流量.监测点流量最大值和最小值变化均减小,变化趋势与射流脉冲三通相同.

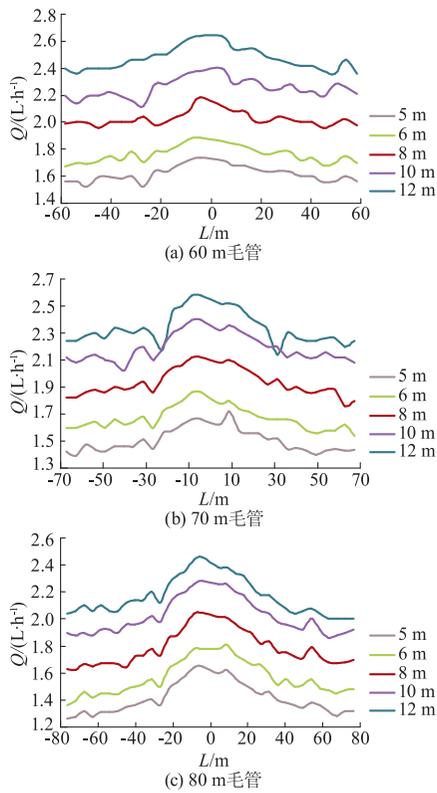


图4 普通三通监测点流量分布
Fig.4 Flow rate distribution at monitoring points in ordinary tee

2.2 灌水均匀性分析

用式(1) - (2)将监测点流量进行处理,计算得出脉冲三通和普通三通灌水均匀性,如图5,6所示.射流脉冲三通在毛管铺设长度60m时,灌水均匀系数在96.82%~97.49%,流量偏差率在8.74%~11.50%;在毛管铺设长度70m时,灌水均匀系数在95.76%~96.63%,流量偏差率在12.50%~19.88%;在毛管铺设长度80m时,灌水均匀系数在94.24%~95.36%,流量偏差率在16.19%~21.52%.

进口水头为5,6m时,60和80m毛管的灌水均匀系数变化趋势和幅度基本一致.整体趋势上毛管越长,灌水均匀系数就越低,流量偏差率就越大,均匀性就越低.同一毛管铺设长度下,随着压力的增大,灌水均匀性有增大的趋势,流量偏差率有减小的趋势.铺设长度L由60m增至70m与70m增至80m相比,灌水均匀系数和流量偏差率的增幅均较小.

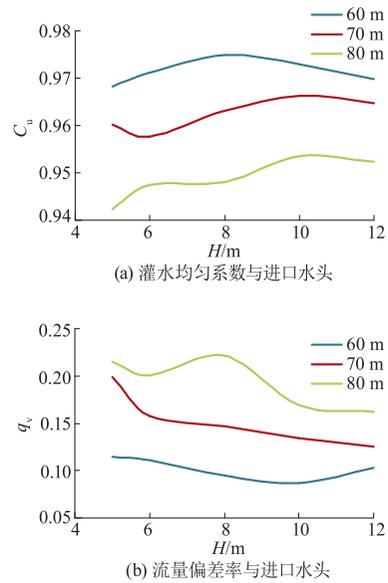


图5 脉冲三通灌水均匀性
Fig.5 Irrigation uniformity of jet-pulse tee

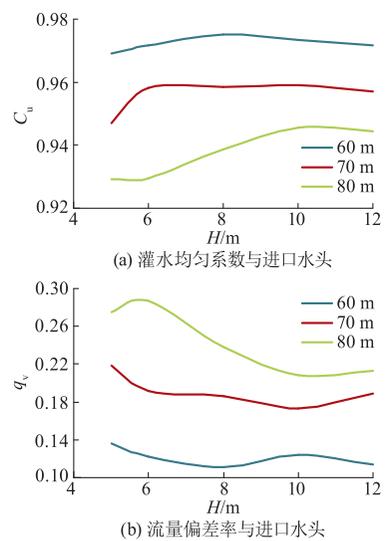


图6 普通三通灌水均匀性
Fig.6 Irrigation uniformity of ordinary tee

普通三通在60m毛管长度下灌水均匀系数在96.91%~97.50%,流量偏差率在11.08%~13.60%;在70m毛管下均匀性在94.70%~95.89%,流量偏差率在17.36%~21.82%;在80m毛管长度下均匀系数在92.91%~94.55%,流量偏

差率在 20.82% ~ 28.73%。整体趋势上毛管越长,灌水均匀系数就越低,流量偏差率就越大。

由图 5,6 可以看出,毛管铺设长度 60 m 时,射流脉冲三通与普通三通的灌水均匀系数基本一致,普通三通流量偏差率大于脉冲三通,此时脉冲水流对灌水器影响不显著。毛管铺设长度增至 70 m 或 80 m 时,脉冲三通的灌水均匀系数明显大于普通三通,且流量偏差率小于普通三通,此时脉冲水流对灌水器影响显著,因为毛管产生的脉冲能量增大了水流的传播距离。进口水头 5 ~ 12 m 时,脉冲三通的灌水均匀系数均大于普通三通,且流量偏差率均小于普通三通,灌水均匀系数的增幅随着进口水头增加而增大,在 12 m 时两者差值最大。

2.3 脉冲特性影响

毛管及灌水器作为射流脉冲三通的负载,由射流三通诱发而产生的脉冲水流也会对其脉冲特性产生影响。试验已经证明,在相同压力条件下,射流三通灌水均匀性高于普通三通。其主要原因是射流三通会诱发产生脉冲能,而脉冲能的表现形式是脉冲振幅 A_p 和脉冲频率 P_p ,所以探究脉冲振幅和脉冲频率对灌水均匀性的影响十分必要。振幅是输出道出口最大水头与最小水头的差值,脉冲频率是 2 个输出道出流相互切换形成间歇性水流的速率。将射流三通的脉冲振幅、脉冲频率与灌水均匀系数、流量偏差率的关系进行整理,得出的结果如图 7,8 所示。

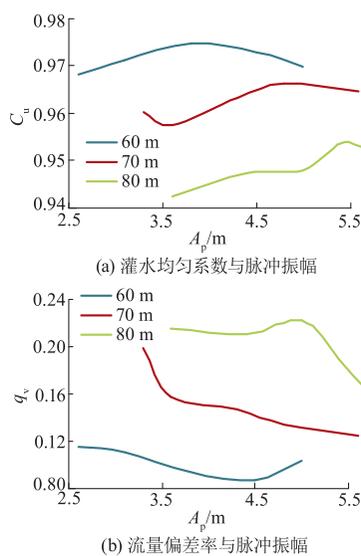


图 7 脉冲振幅与灌水均匀性的关系

Fig. 7 Relation between pulse amplitude and irrigation uniformity

进口压力水头 5 ~ 12 m 时,脉冲振幅在 2.5 ~ 5.5 m,脉冲频率在 210 ~ 260 次/min。脉冲频率与灌

水均匀性变化趋势和脉冲频率与灌水均匀性变化趋势较为一致。根据相关性结果,灌水均匀系数表现趋势与脉冲振幅和脉冲频率均呈正相关性,流量偏差率与脉冲振幅和脉冲频率均呈负相关性。其主要原因是在工作时由于附壁效应导致大部分水流往一侧流出,只有少量水流往另一侧输出道流出,下一过程因为内部压力不均衡使水流发生切换,这一过程在同一输出道形成了水头差,当水头差越大,能量释放越大,间歇水流冲向灌水器,加剧水流紊乱。另外脉冲水流切换的速度越快,累积产生的脉冲能越多对水流流态影响越大,从而促使毛管每段的灌水器上流量基本相同。

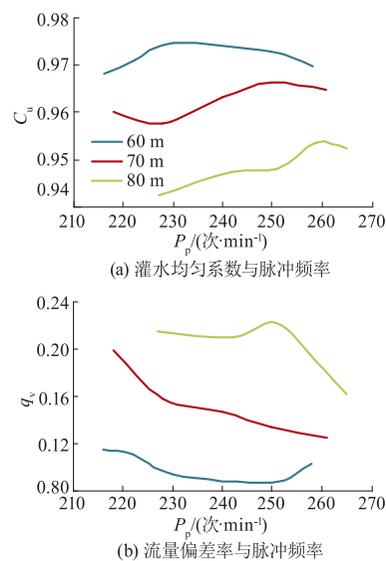


图 8 脉冲频率与灌水均匀性的关系

Fig. 8 Relation between pulse frequency and irrigation uniformity

2.4 监测点可靠性分析

理论上监测点布置的越多越好,但监测点过多又会导致试验测量数据多且处理信息量过大,因此在监测点有限的前提下,对其位置布置十分重要^[16-17]。文中每隔 15 个滴头设置 1 个监测点,选取监测点时应尽可能保证其具有代表性。为验证选取的监测点是否具有合理性、准确性及可靠性,试验采用双向检验,首先用涡轮流量计记录进口流量,同时将各个监测点的平均流量乘以滴头个数换算为进口流量,2 个流量进行对比检验。

表 1,2 为射流三通和普通三通 2 种测算流量结果及误差,可以看出进口流量测算值 Q_i 和监测点计算值 Q_m 的误差 δ 均低于 7.0%,大部分误差在 4% 左右,说明试验选取的监测点具有可靠性,不影响试验结果。从毛管铺设长度,误差的大小与毛管长

度无明显规律性,而且在相同进口水头,误差的大 小与进口水头也无明显规律性.

表1 射流脉冲三通测算流量结果
Tab.1 Measured and estimated flow rate in jet - pulse tee

参数	H_i/m	$L=60\text{ mm}$			$L=70\text{ mm}$			$L=80\text{ mm}$		
		$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$	$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$	$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$
数值	5	643.56	626.15	2.7	714.24	697.95	2.3	761.32	743.59	2.4
	6	698.00	692.43	0.8	788.08	770.50	2.2	866.00	809.47	6.9
	8	822.12	796.12	3.2	894.44	887.16	0.8	970.64	924.55	4.9
	10	913.88	882.15	3.6	998.56	938.56	6.4	1 088.96	1 034.10	5.3
	12	973.08	929.60	4.7	1 077.20	1 060.20	1.6	1 137.52	1 119.87	1.5

表2 普通三通测算流量结果
Tab.2 Measured and estimated flow rate in ordinary tee

参数	H_i/m	$L=60\text{ mm}$			$L=70\text{ mm}$			$L=80\text{ mm}$		
		$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$	$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$	$Q_i/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$Q_m/$ ($L \cdot h^{-1}$)	$\delta/\%$
数值	5	676.56	646.89	4.5	747.56	701.37	6.5	804.48	752.13	6.9
	6	725.96	704.62	3.0	800.00	778.71	2.7	870.84	831.75	4.6
	8	843.96	804.68	4.8	921.56	901.91	2.1	995.12	950.34	4.7
	10	929.32	900.18	3.2	1 040.92	1 021.69	1.9	1 095.20	1 076.08	1.7
	12	1 028.60	987.08	4.2	1 135.04	1 094.80	3.6	1 187.84	1 152.56	3.0

3 结 论

1) 毛管射流脉冲三通和普通三通在毛管铺设长度相同时,随着压力的增大,最大值和最小值流量相应增大,2种三通的进口流量也会随之增大.而在一定压力条件下,毛管越长,三通的进口流量也会增加.射流脉冲三通和普通三通灌水均匀系数随着毛管铺设长度的增大而变小,流量偏差率随着毛管铺设长度的增加而变大.

2) 普通三通灌水均匀系数的平均值为95.59%,射流脉冲三通的灌水均匀系数的平均值为96.24%,比普通三通灌水均匀系数高0.65%.60,70,80 m毛管中,射流脉冲三通的流量偏差率的平均值分别为10.22%,15.26%,19.36%,比普通三通降低了1.87%,3.91%,5.07%,射流脉冲三通的流量偏差率明显低于普通三通.由此可知,射流脉冲三通可以提高滴灌系统灌水均匀性.

3) 射流脉冲三通灌水均匀性比普通三通高的原因是会诱发形成射流脉冲,而脉冲频率和脉冲振幅是影响滴灌系统灌溉均匀系数和流量偏差率的2个主要因素.文中还对监测点选择的可靠性进行了讨论,对比发现监测点选取合理且有代表性,对试验结果没有实质影响.

参考文献 (References)

[1] 贺城,廖娜.我国节水灌溉技术体系概述[J].农业

工程,2014,4(2):39-44.

HE Cheng, LIAO Na. Overview of water-saving irrigation technology system in China[J]. Agricultural engineering, 2014, 4(2): 39-44. (in Chinese)

[2] ELMALOGLOU S, DIAMANTOPOULOS E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation[J]. Agricultural water management, 2007, 90(1/2):160-163.

[3] LAZAROVITCH N, SHANI U, THOMPSON T L, et al. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems[J]. Journal of irrigation & drainage engineering, 2006, 132(6): 531-536.

[4] WARRICK A W, SHANI U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. II. effect on uniformity[J]. Journal of irrigation & drainage engineering, 1996, 122(5):296-300.

[5] BAKEERM G A A, EL-EBAAI F G, EL-SAIDI M T, et al. Effect of pulse drip irrigation on yield and water use efficiency of potato crop under organic agriculture in sandy soils [J]. Journal of irrigation and drainage, 2009, 26(2): 736-765.

[6] ASSOULINE S, MÖLLER M, COHEN S, et al. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity[J]. Soil science society of America journal, 2006, 70(5):35-42.

[7] 王庆安. 脉冲滴灌系统结构设计和工作原理[J]. 节水灌溉, 2001(4):36-37.

WANG Qing'an. Structural design and working principle

- of pulse drip irrigation system[J]. Water saving irrigation, 2001(4):36-37. (in Chinese)
- [8] 岳学军,李加念,洪添胜,等. 脉冲式低功耗滴灌自动控制装置及其控制方法:CN101855980A [P]. 2010-10-13.
- [9] 杨玉超,王新坤,朱燕翔,等. 基于射流脉冲三通滴灌带试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9):111-114.
YANG Yuchao, WANG Xinkun, ZHU Yanxiang, et al. An experimental study of the Jet pulse tee based on drip irrigation pipes[J]. China rural water and hydropower, 2015(9):111-114. (in Chinese)
- [10] 许鹏,王新坤,高世凯,等. 射流振荡三通与滴灌毛管脉冲初步试验研究[J]. 节水灌溉, 2014(3):1-4.
XU Peng, WANG Xinkun, GAO Shikai, et al. Preliminary test of jet oscillation tee and pulse flow in drip irrigation lateral pipe [J]. Water saving irrigation, 2014(3):1-4. (in Chinese)
- [11] 王新坤. 一种射流三通:CN103203293A [P]. 2013-07-17.
- [12] 孟腾,董金钟,吴西云. 流体振荡器在进气道流动控制中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(32):319-324.
MENG Teng, DONG Jinzhong, WU Xiyun. Active flow control with fluidic in s-shaped inlet[J]. Science technology and engineering, 2016, 16(32):319-324. (in Chinese)
- [13] 吴西云,董金钟. 流体振荡器的数值研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(2):58-61.
WU Xiyun, DONG Jinzhong. Numerical study of a fluidic oscillator[J]. Building energy & environment, 2017, 36(2):58-61. (in Chinese)
- [14] 刘洁,王聪,魏青松,等. 波动水压参数对灌水器水力性能影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(4):361-366.
LIU Jie, WANG Cong, WEI Qingsong, et al. Experimental study of effect of fluctuating water pressure factors on hydraulic properties of drip emitters[J]. Journal of Hohai University(natural sciences), 2014, 42(4):361-366. (in Chinese)
- [15] 鞠学良,吴普特,朱德兰,等. 基于样本流量偏差率的微灌灌水均匀度评价方法[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2):173-178.
JU Xueliang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Estimation of micro-irrigation water application uniformity based on sample emitter flow variation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(2):173-178. (in Chinese)
- [16] 王伟哲,郗志红,刘美侠,等. 基于改进遗传算法的供水管网故障监测点布置优化[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1):15-19.
WANG Weizhe, QIE Zhihong, LIU Meixia, et al. Optimized arrangement of fault-monitor sensors of water supply network by improved genetic algorithm [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012, 31(1):15-19. (in Chinese)
- [17] 陈峰,张蕊,赵明. 利用水力模型优化布置供水管网压力监测点[J]. 净水技术, 2015, 34(4):105-109.
CHEN Feng, ZHANG Rui, ZHAO Ming. Layout optimization of monitoring points for water supply pressure of distribution network system in application of hydraulic model [J]. Water purification technology, 2015, 34(4):105-109. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)