doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.021

变量喷洒喷头组合喷灌试验*

韩文霆[1]　姚小敏[1]　朱冰钦[1]　张　超[1]　周新梅[1]　吴普特[2]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 变量喷头可以根据喷洒地块形状和喷洒量的要求实现射程和流量的同步可控,对精确灌溉具有重要意义。试验研究了基于扇形通孔动静片调节器的变量喷头在系统不同压力工况下组合喷灌时的水量分布及喷灌均匀度等水力性能,并与传统圆形喷洒域喷头进行了对比,研究了变量调节器对喷头性能的影响及其对工作压力的敏感性。工作压力和调节器的双因素重复全面试验结果表明,变量精确灌溉喷头较传统圆形喷洒域喷头单喷头控制面积降低了 15.4%,喷灌均匀度提高了 9.5%,喷灌强度降低了 15.7%,射程损失了 5.9%,喷洒域系数可达 64.0%。组合均匀度方差分析结果表明,调节器和工作压力以及两者之间的交互作用对组合均匀度都有极显著影响,变量调节器的设计需要满足喷头在不同工作压力工况条件下的性能要求。

关键词: 精确灌溉　变量喷头　组合均匀度　水量分布

中图分类号: S275.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)07-0121-06

Test and Evaluation on Variable-rate Irrigation Sprinkler

Han Wenting[1]　Yao Xiaomin[1]　Zhu Bingqin[1]　Zhang Chao[1]　Zhou Xinmei[1]　Wu Pute[2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*

2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Variable-rate nozzle achieves range and flow synchronous control according to the spraying shape and spray volume requirements. It has important significance on the precision irrigation. The variable nozzle with fan-shaped hole and static vane regulator was studied. Hydraulic performance, such as irrigation distribution and irrigation uniformity of variable nozzle under different pressure conditions was analyzed. Comparing with the traditional round nozzle spray domain, influence of variable vane regulator on nozzle performance and sensitivity to the working pressure were studied. The results of double factors repeated test showed that the single nozzle control area of variable precision irrigation sprinkler was reduced by 15.4% than the traditional round nozzle. The sprinkler irrigation evenness was increased by 9.5%. The sprinkler irrigation intensity was reduced by 15.7%. The range was reduced by 5.9%. The spraying domain coefficients reached to 64.0%. Combination evenness variance analysis results showed that the regulator and pressure as well as the interaction between them had significant influence. The design of the variable modifiers needs to meet the performance of nozzle under different working pressure conditions.

Key words: Precise irrigation　Variable-rate nozzle　Combination of uniformity　Water distribution

引言

喷灌系统中喷头性能的优劣直接影响喷灌系统的质量。变量喷头可以根据喷灌需要实现喷洒域和喷洒量可控喷洒,提高喷灌系统整体喷洒均匀性,实现精确灌溉[1~4]。

收稿日期: 2013-01-06　修回日期: 2013-01-18

*国家自然科学基金资助项目(51079140)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)和高等学校学科创新引智项目(B12007)

作者简介: 韩文霆,副研究员,博士生导师,主要从事智能控制精准灌溉技术与装备研究,E-mail: hanwt2000@126.com

通讯作者: 吴普特,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用技术研究,E-mail: scipapers@126.com

国内外对于变量喷头的研究主要是对其喷洒域和结构进行研究[5~8],并集中在变域实现形式和实现装置方面。2004 年,美国的 Beckman[9] 研制了一种用于中心支轴式喷灌机上的仰角自动调节仿形喷头,使用凸轮机构和仿形器来改变喷嘴喷射角度,实现变量喷洒。2004 年,美国的 Bui[10] 发明了一种变量喷头,喷嘴采用弹性材料制造,内部使用锥形头作为调节机构,水压控制锥形头的运动进而改变喷嘴形状。2001 年王正中等研制出了流量自动调节喷头,是在原有的喷头上添加带有上下过水节的流量调节器,通过调节过水节通孔大小调节流量[11]。2011 年魏洋洋等设计的异型喷嘴通过弹簧和动静调节片实现了正方形和三角形喷洒域[12]。2011 年,刘俊萍等研制了变量喷洒全射流喷头,并对副喷嘴进行了优化和评价[13]。

综上所述,国内外有关变量喷洒喷头的研究主要是通过改变喷头工作压力、仰角、流量等来实现变域喷洒,对变量喷头水力性能在系统不同运行工况下的变化情况和稳定性的定量研究较少。变域喷洒喷头可以实现精确灌溉,但同时增加了系统成本,目前关于变量喷头和常用圆形喷洒域喷头性能的对比试验研究较少。本文以基于扇形通孔动静片调节器的变量喷头为对象,以雨鸟 30PSH 型喷头为本体,试验研究调节器和工作压力对喷头工作性能的影响,分析喷头的水量分布及组合均匀度,从技术和经济两个方面指标对喷头的工作性能进行评价,为变量喷头的优化设计和应用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 喷头及变量调节器

本文研究的变量喷洒精确灌溉喷头是在雨鸟 30PSH 型喷头上安装变量调节器实现的,如图 1 和图 2 所示。喷头的变量调节器由动片、静片、螺纹套管、环形支承节组成。螺纹套管将喷头与喷管连接在一起,螺纹套管内部固定有环形支承节。环形支承节两端有定位孔,将静片的定位杆插入定位孔中使得静片不能转动。动片与喷头的入水口固连在一起,随喷头一起转动。动片和静片均由类梯形孔、类梯形阻水片和中央通孔组成。喷头转动时动静片间发生相对运动,周期性地改变了喷头过水断面,从而改变喷头压力、流量和射程。

试验中阻水片的圆形通孔直径为 2 mm,类梯形通孔直径为 12.6 mm,类梯形孔中心角是 45°。雨鸟 30PSH 型喷头的技术参数见表 1。

1.2 试验系统及雨量筒布置

喷头试验在国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心室内喷头试验场地进行。试验系统包括变量喷洒精确灌溉喷头、象限十字架、管路系统、水泵机组、量水筒等,如图 3 所示。试验时通过调频箱将压力稳定在 0.3 MPa 和 0.4 MPa。试验时流量 1.72 m^3/h。喷头安装在圆形喷头试验场的中心试验台上,喷头安装高度为 0.7 m,测量点喷灌强度的量水筒直径 20 cm,高 20 cm。喷头在旋转过程中流量随着旋转角度的变化而变化;试验场地平整,地面坡度小于 1%。

因为喷头喷洒域对称,为简化试验,只对喷头喷洒域 45°范围的水量分布进行测量。喷头的水量分布测量采用径向等间距形式布置量水筒,量水筒从 0°、22.5° 和 45° 方向布置,每个方向上依次布置 16 个,间隔 1 m,试验时间为 45 min。试验场地及现场布设如图 4 所示。

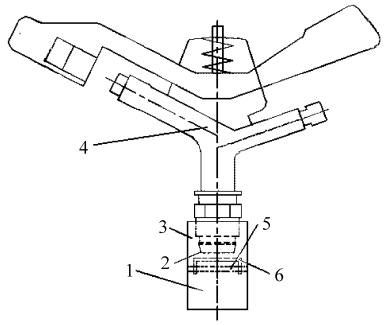

图 1 变量喷洒精确灌溉喷头结构示意图

Fig. 1 Diagram of variable-rate sprinkler

1. 调节装置 2. 动片 3. 螺纹套管 4. 本体 5. 环形支承节 6. 静片

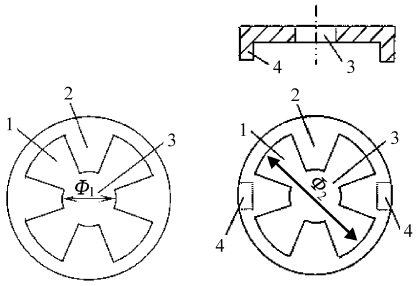

图 2 动静片结构图

Fig. 2 Diagram of regulator

1. 类梯形孔 2. 类梯形阻水分片 3. 圆形通孔 4. 定位杆

表 1 30PSH 型喷头的压力、流量和射程

Tab. 1 Pressure, flow and range of type 30PSH sprinkler

阶数	工作压力/MPa	流量/$m^3 \cdot h^{-1}$	射程/m
1	0.20	2.17	13.8
2	0.25	2.58	15.4
3	0.30	2.77	15.8
4	0.35	3.07	16.2
5	0.40	3.20	16.4
6	0.45	3.44	16.7
7	0.50	3.60	17.0

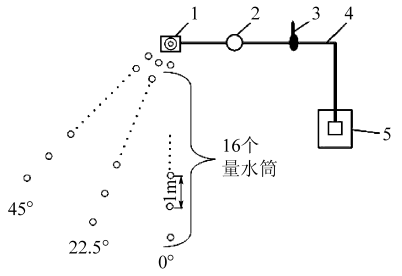

图 3　喷头喷洒试验系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of nozzle spray experiment system

1. 喷头　2. 压力表　3. 阀门　4. 水管　5. 供水系统

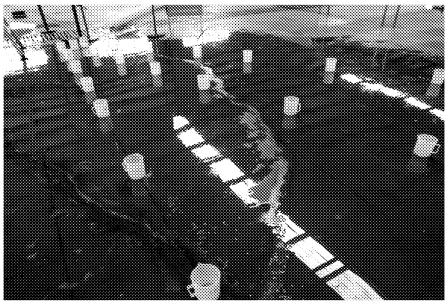

图 4　喷头试验场地及现场布设图

Fig. 4　Layout of sprinkler test site

1.3　试验方案设计

变量调节器是通过调节压力和流量来实现变量喷洒的，因此受压力影响很大。本文主要分析压力对变量喷头工作性能的影响，因此试验选取工作压力 A 为一个主要影响因素。通过试验研究变量调节器的性能和作用，因此试验选取有无调节器 B 为第 2 个主要影响因素。进行双因素等重复的全面试验，对于喷头工作压力选用 0.3 MPa(A_1)和0.4 MPa(A_2)2 个水平。调节器因素分无调节器(B_1)和有调节器(B_2)2 个水平，试验方案如表 2 所示。

表 2　双因素等重复喷头试验方案设计

Tab. 2　Test design of double factors sprinkler

工作压力 A/MPa	无调节器 B_1	有调节器 B_2
0.3(A_1)	$A_1B_1r_1$	$A_1B_2r_1$
	$A_1B_1r_2$	$A_1B_2r_2$
0.4(A_2)	$A_2B_1r_1$	$A_2B_2r_1$
	$A_2B_1r_2$	$A_2B_2r_2$

注：r_1 为重复 1 次，r_2 为重复 2 次。

1.4　喷头性能评价方法

安装调节器的变量喷头虽然实现了变量喷洒，但也增加了喷头成本，同时也使喷头的水量分布发生变化，因此从技术和经济 2 个方面的指标对变量喷头的性能进行评价。

(1)喷灌均匀度：根据计算方法不同，喷灌均匀度评价指标有多种，最常用的是克里斯琴森均匀度、分布均匀系数和变异系数[14~21]。本文选用克里斯琴森均匀度 C_u。克里斯琴森均匀度表示各测点水深与平均水深偏差的绝对值之和，它可以较好地表征整个田间水量分布与平均值偏差的情况，计算公式为

$$C_u = \left(1 - \frac{|\Delta h|}{\bar{h}}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中　$\bar{h}$——喷洒面积上各测点平均降水深，mm

Δh——各测点(量水筒)降水深的平均偏差，mm

(2)喷灌均匀度增加率：在组合间距相同的情况下，变量喷头组合喷灌系统的喷洒均匀度比原圆形喷洒域喷头的喷洒均匀度增加的百分比。克里斯琴森均匀度增加率计算公式为

$$\delta_{Cu} = \frac{C_{us} - C_{uc}}{C_{uc}} \times 100\% \tag{2}$$

式中　δ_{Cu}——方形喷洒域喷头组合喷灌系统克里斯琴森均匀度增加率，%

C_{us}——方形喷洒域喷头组合喷灌系统克里斯琴森均匀度，%

C_{uc}——圆形喷洒域喷头组合喷灌系统克里斯琴森均匀度，%

(3)喷灌强度降低率：本文给定的喷灌强度降低率指的是在组合间距相同的情况下，变量喷头喷灌系统的喷灌强度比原圆形喷洒域喷头组合喷灌系统的喷灌强度降低的百分比，计算公式为

$$\delta_q = \frac{q_c - q_s}{q_c} \times 100\% \tag{3}$$

式中　δ_q——变量喷头喷灌系统喷灌强度降低率，%

q_s——变量喷头喷灌系统喷灌强度

q_c——圆形喷洒域喷头喷灌系统喷灌强度

(4)射程损失率：指的是方形喷洒域喷头的射程比原圆形喷洒域喷头的射程降低的百分比，计算公式为

$$\delta_R = \frac{R_c - R_s}{R_c} \times 100\% \tag{4}$$

式中　δ_R——变量喷洒域喷头射程损失率，%

R_s——方形喷洒域喷头射程，m

R_c——圆形喷洒域喷头射程，m

(5)喷洒域系数：以正方形喷洒域的变量喷头为例，因此给定的喷洒域系数指的是喷头喷洒域形状接近正方形的程度。本文提出的方形喷洒域系数 η 定义为

$$\eta = \left(1 - \frac{\lambda - R\cos\left(\frac{\pi}{n}\right)}{R - R\cos\left(\frac{\pi}{n}\right)}\right) \times 100\% \tag{5}$$

式中　λ——方形边线中点方向上实测喷头射程，m

R——方形顶点方向上实测喷头射程，m

n——多边形边数

(6)单喷头控制面积增加率:指的是当给定某一喷灌均匀度值时,变量喷洒域喷头的喷灌均匀度大于该值时的最大单喷头控制面积比圆形喷洒域喷头的喷灌均匀度大于该值时的最大单喷头控制面积增加的百分比,计算公式为

$$\delta_l = \frac{l_s - l_c}{l_c} \times 100\% \tag{6}$$

式中 δ_l——方形喷洒域喷头单喷头控制面积增加率,%

l_s——方形喷洒域喷头喷灌组合均匀度大于给定值时的最大单喷头控制面积,m^2

l_c——圆形喷洒域喷头喷灌组合均匀度大于给定值时的最大单喷头控制面积,m^2

2 结果与讨论

2.1 喷头水量分布

原雨鸟 30PSH 型单喷头的水量分布曲线和三维水量分布分别如图 5 和图 6 所示。雨鸟 30PSH 型喷头正方形组合(组合间距系数 $k = 1.2$)的水量分布以及水量分布等值线图如图 7 和图 8 所示。

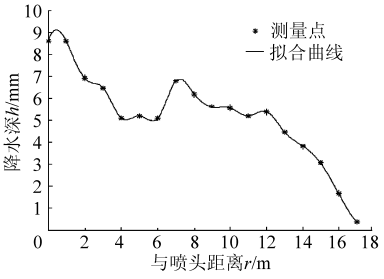

图 5 30PSH 型喷头水量分布曲线

Fig. 5 Water distribution curves of type 30PSH sprinkler

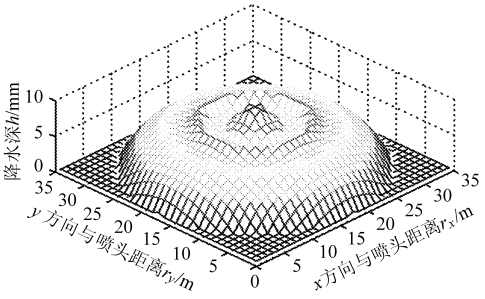

图 6 30PSH 型喷头三维水量分布图

Fig. 6 3-D water distribution map of type 30PSH sprinkler

工作压力为 0.3 MPa、安装有调节器喷头的射程周线如图 9 所示,水量分布及等值线图如图 10 和图 11 所示。变量喷头正方形组合水量分布及等值线图如图 12 和图 13 所示。

比较变量喷洒精确灌溉喷头和雨鸟 30PSH 型喷头的水量分布图发现,雨鸟 30PSH 型喷头的喷洒域为圆形喷洒域,组合时必须要重叠。变量精确灌溉喷头的喷洒域为方形喷洒域,该喷洒域在形式上便于喷头的组合喷洒。

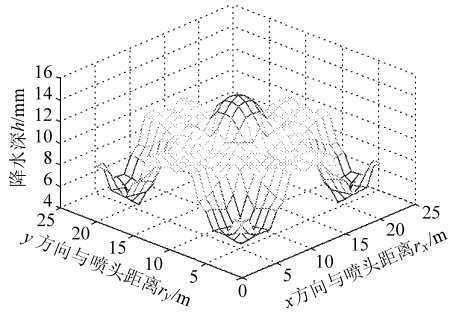

图 7 30PSH 型喷头组合三维水量分布图

Fig. 7 Combined 3-D water distribution map of type 30PSH sprinkler

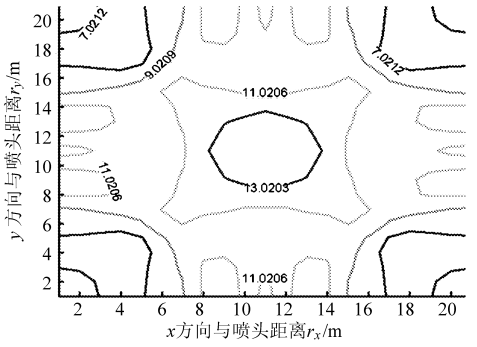

图 8 30PSH 喷头组合水量分布等值线图

Fig. 8 Combined water distribution isoline map of type 30PSH sprinkler

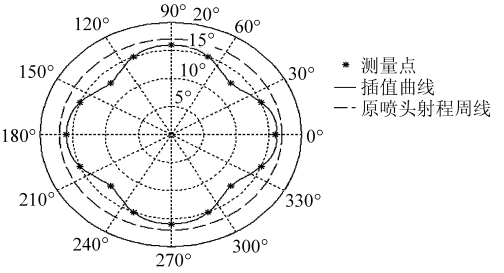

图 9 变量精确灌溉喷头射程周线图

Fig. 9 Variable precision irrigation sprinkler range weekly

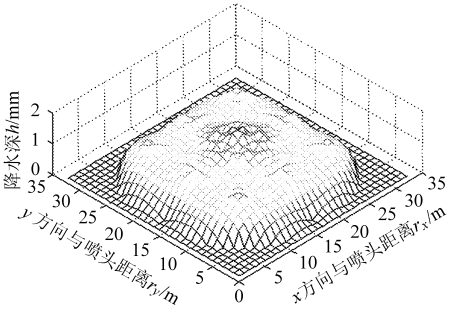

图 10 变量精确灌溉喷头三维水量分布图

Fig. 10 3-D water distribution map of variable precision irrigation sprinkler

雨鸟 30PSH 型喷头的单喷头水量分布相对均匀,但组合后由于水量局部重叠,水量分布不是很均匀,局部降水量大容易形成径流。变量精确灌溉喷

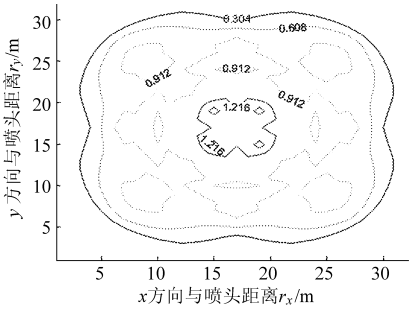

图 11　变量精确灌溉喷头水量分布等值线图

Fig. 11　Water distribution isoline map of variable precision irrigation

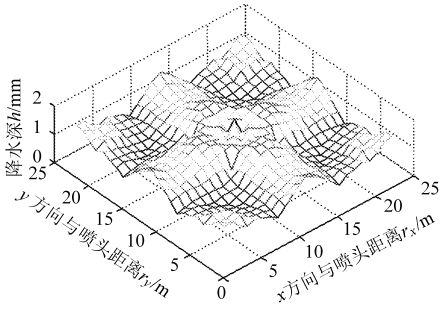

图 12　变量精确灌溉喷头三维组合水量分布图

Fig. 12　Combined 3-D water distribution map of variable precision irrigation

头无论是单喷头的水量分布还是多喷头的组合水量分布都相对均匀，因此变量喷洒精确灌溉喷头更利于组合喷灌。

2.2　组合均匀度及方差分析

在压力为 0.3 MPa 和 0.4 MPa、有调节器和无调节器的试验条件下，测量了在 0°、22.5° 和 45° 方向径向上的降水量。利用三次样条插值法求得网格点的降水深，然后将网格点的降水深代入式(1)，计算组合均匀度，结果如表 3 所示。

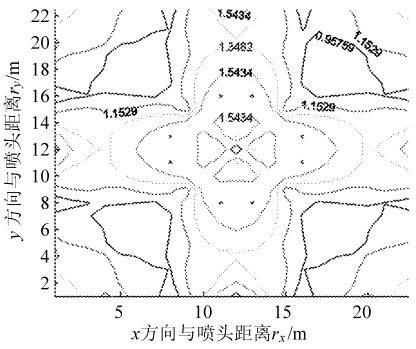

图 13　变量精确灌溉喷头组合水量分布等值线图

Fig. 13　Combined water distribution isoline map of variable precision irrigation

表 3　双因素等重复试验喷灌组合均匀度

Tab. 3　Sprinkler uniformities of double factors equal repeated trials

工作压力/MPa	均匀度/%	
	无调节器(B_1)	有调节器(B_2)
0.3(A_1)	82.72	77.43
	83.67	77.54
0.4(A_2)	83.85	91.70
	82.50	92.12

表 3 给出了喷头正方形组合、组合间距系数为 1.40 时的克里斯琴森均匀度。增加了调节器后喷头的喷洒域变成了方形喷洒域，使得喷头更利于组合，降低了重复喷灌面积，增加了组合喷灌均匀度。随着喷头工作压力的增加，喷洒雨滴进一步碎裂，射程降低使得喷洒域更趋于方形喷洒且重复喷灌处喷洒量降低，提高了组合喷灌均匀度。

为进一步分析喷头工作压力与调节器对喷灌均匀度的影响，对表 3 数据进行方差分析，结果如表 4 所示。

表 4　双因素等重复试验喷灌组合均匀度方差分析表

Tab. 4　Variance analysis of sprinkler uniformity in double factors equal repeated trials

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F	F_a	显著性
A	103.75	1	103.75	284.886	$F_{0.05}(1.7)=5.59$	**
B	104.33	1	104.33	286.471	$F_{0.01}(1.7)=12.25$	**
$A\times B$	4.58	1	4.58	12.563		**
误差 e	1.46	4	0.364			
总和	214.11	7				

注：** 显著性为极显著。

由表 4 可知，加装调节器后，喷洒域变成方形使得喷洒重叠面积降低，而且加装的动静片增加了喷头雾化程度，降低了喷洒重叠区域的喷洒量。工作压力增加后，使得喷头射程降低，雾化程度加强，降低了重合区域的喷洒量。工作压力和调节器均能增加雾化强度，降低重合区域的喷洒量，因此调节器、工作压力以及两者之间的交互作用对喷灌组合均匀度的影响都是极显著的。

2.3　其他性能指标评价结果

变量喷头与普通圆形喷洒域喷头相比，变量喷头的喷灌均匀度增加了 9.5%，有利于组合灌溉。喷灌强度降低率为 15.7%，对于避免形成地表径流更有利。射程损失率为 5.9%，单喷头控制面积降低了 15.4%，这说明变量喷头对于圆形喷洒域喷头

存在射程损失,在组合时有可能需要降低组合间距,这有提高喷灌系统投资的趋向,因此降低射程损失是变量喷头研究的一个重要方面。

有调节器喷头的喷洒域系数为 64.0%,与该喷头的理论喷洒域系数 64.2% 相近,说明本文设计的变量调节器实现了喷洒域可控的技术需求。

3 结论

(1)提出扇形通孔动静片形式的变量喷洒调节器,安装该调节器的变量喷头可以实现喷洒域可控,通过建立的技术与经济指标对变量喷头进行全面评价,变量喷头较传统圆形喷洒域喷头喷灌均匀度提高了 9.5%,喷灌强度降低了 15.7%,可用于高均匀度和喷洒域可控要求的喷灌系统。

(2)工作压力和调节器以及两者之间的交互作用对喷灌组合均匀度的影响都是极显著,调节器在设计时需要考虑工作压力的影响,设计的变量调节器需要满足喷头在不同工作压力工况条件下的性能要求。

(3)该喷头的流量射程调节器使喷头的最大射程相对于原圆形喷洒域喷头的射程损失了 5.9%,导致组合间距降低,有可能增加喷灌工程单位面积的投资,因此减少压力损失是变量喷头今后研究的重要内容。

参 考 文 献

1 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 方形喷洒域变量施水精确灌溉喷头实现理论研究[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(2):105~107.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Variable-rate sprinklers for precision irrigation on square area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(2): 105~107. (in Chinese)

2 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 仿形喷洒变量施水精确灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(1):16~19.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Review on irrigated area profile modeling and variable-rate precision sprinkle irrigation technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1):16~19. (in Chinese)

3 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 非圆形喷洒域变量施水精确灌溉喷头综述[J]. 农业机械学报,2004,35(5):220~224.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Variable-rate sprinklers for precision irrigation on irregular boundary area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):220~224. (in Chinese)

4 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 变量喷头实现均匀喷灌的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(10):13~16.
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Theoretical study on variable-rate sprinklers for high uniformity precision irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10):13~16. (in Chinese)

5 Sadler E J, Evans R G, Buchleiter G W. Site-specific variable-rate precision irrigation[J]. Irrigation Journal, 2001(6):20~24.

6 Ravindra V K, Rajesh P S, Pooran S M. Optimal design of pressurized irrigation subunit[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(2):137~146.

7 Sudheer K P, Panda R K. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(2): 159~167.

8 Hoffmann W C, Bagley W E, Fritz B K, et al. Effects of water hardness on spray droplet size under aerial application conditions[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 11~14.

9 Alfre J B. Adjustable pattern irrigation system: US, 6834814[P]. 2004-12-28.

10 Bui Q D. Nozzle with flow rate and droplet size control capability: WO,023865[P]. 2004-04-13.

11 王正中,冷畅俭. 喷洒面为多种形状的摇臂式喷头: 中国,00257672.4[P]. 2001-09-19.

12 魏洋洋,袁寿其. 异形喷嘴变量喷头水力性能试验[J]. 农业机械学报,2011, 42(7): 70~74.
Wei Yangyang, Yuan Shouqi. Hydraulic performance experiment of the variable-rate sprinkler with non-circle nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 70~74. (in Chinese)

13 刘俊萍,袁寿其,李红,等. 变量喷洒全射流喷头副喷嘴优化与评价[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 98~101.
Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Evaluation and optimization of variable rate complete fluidic sprinkler vice nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):98~101. (in Chinese)

14 韩文霆. 喷灌分布均匀系数研究[J]. 节水灌溉,2008(7):4~8.
Han Wenting. Research on distribution uniformity coefficient for sprinkler irrigation systems[J]. Water Saving Irrigation, 2008(7):4~8. (in Chinese)

15 韩文霆,吴普特,杨青,等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J]. 农业工程学报,2005, 21(9):172~177.
Han Wenting, Wu Pute, Yang Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9):172~177. (in Chinese)

16 李久生,饶敏杰. 喷灌水量分布均匀性评价指标的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 78~82.
Li Jiusheng, Rao Minjie. Evaluation methods of sprinkler water nonuniformity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(4): 78~82. (in Chinese)

(下转第 112 页)

参 考 文 献

1 王全九,王辉,郭太龙. 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁徙特征与数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

2 Shi Hui, Shao Mingan. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. Journal of Arid Environment, 2000, 45(1): 9 ~ 20.

3 汪有科,黎鹏红,马理辉,等. 涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律实验[J]. 排灌机械工程学报,2010, 28(5): 449 ~ 454.
Wang Youke, Li Penghong, Ma Lihui, et al. Experiment on water migration of surge root irrigation in loess sloping fields [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 449 ~ 454. (in Chinese)

4 赵龙山,宋向阳,梁心蓝,等. 黄土坡耕地耕作方式不同时微地形分布特征及水土保持效应[J]. 中国水土保持科学,2011, 9(2): 64 ~ 70.
Zhao Longshan, Song Xiangyang, Liang Xinlan, et al. Micro-relief characteristics of loess sloping farmland under different tillage practices and its effects of soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(2): 64 ~ 70. (in Chinese)

5 贾洪雷,马成林,刘昭辰,等. 北方旱作农业区蓄水保墒耕作模式研究[J]. 农业机械学报,2007,38(12):190 ~ 194.
Jia Honglei, Ma Chenglin, Liu Zhaochen, et al. Overview of study on the tillage mode of water storage and soil moisture conservation for dry farming region in northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38 (12):190 ~ 194. (in Chinese)

6 Strudley M W, Green T R, Ascough J C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(1):4 ~ 48.

7 薛萐,刘国彬,张超,等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 310 ~ 316.
Xue Jie, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of loess plateau[J]. Transactions of the CSAE , 2011, 27(4): 310 ~ 316. (in Chinese)

8 Hammand A H A, Brresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 39 ~ 47.

9 Vancampenhout K, Nyssen J, Gebremichael D, et al. Stone bunds and soil conservation in the northern Ethiopian highlands: impacts on soil fertility and crop yield [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1): 1 ~ 15.

10 朱显谟. 维护土壤水库确保黄土高原山川秀美[J]. 中国水土保持, 2006(1): 6 ~ 7.

11 徐跃光,王旭东. 鼠洞犁在农田内涝治理中的试验应用[J]. 农机化研究, 1996(2): 63 ~ 65.

12 张宝丽,王存国. 采用“沟、管、洞、缝”模式治理水土流失的探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2008(8): 69.

13 吴发启,赵晓光,刘秉正. 缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2001.

14 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

(上接第 126 页)

17 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报,2008, 39(10):134 ~ 139.
Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):134 ~ 139. (in Chinese)

18 Li J S, Kawano H. Sprinkler performances as function of nozzle geometrical parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(4): 244 ~ 247.

19 Burguete J, Playan E, Montero J, et al. Improving drop size and velocity estimates of an optical disdrometer: implications for sprinkler irrigation simulation[J]. Transactions of the ASABE, 2003, 50(6): 2 103 ~ 2 116.

20 Bautista-Capetillo C F, Salvador R, Burguete J, et al. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(5): 1 493 ~ 1 504.

21 Salvador R, Bautista-Capetillo C, Burguete J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers [J]. Irrigation Science, 2009,27(4): 307 ~ 317.