

## 射流式喷头水量分布动态仿真及试验

朱兴业<sup>1,2</sup>, 史永杰<sup>2\*</sup>, 胡广<sup>2</sup>, 刘俊萍<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/河南省节水农业重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 【目的】研究工作压力, 喷头组合间距、组合方式和旋转速度对射流式喷头及多喷头组合喷灌均匀性系数(CU)和分布均匀系数(DU)的影响。【方法】采用不同工作条件下单喷头和多喷头组合喷灌水量分布的动态仿真代码, 对射流式喷头开展了水力性能试验; 研究了射流式喷头在不同工作压力及安装高度条件下对喷灌强度、水量分布的影响; 建立了水量峰值强度与工作压力的回归关系式; 模拟了单喷头在正方形和三角形组合喷灌下的空间水量分布。【结果】喷头在1.5 m安装高度、100~300 kPa压力条件下, 水量峰值集中在5 mm/h附近, 标准偏差(STD)为0.23。喷头在100 kPa工作压力, 安装高度为1.1、1.3 m的水量峰值强度分别可高达8.9、10.5 mm/h。不同工作压力下的单喷头喷灌的DU和CU标准偏差分别为15.5%、9.3%, 且DU对压力的变化相对更为敏感。【结论】在实际喷灌工程中正方形组合喷灌的间距应小于8 m, 三角形组合喷头之间的间距应布置在8 m附近, 此时的喷灌均匀度最高, 单个喷灌设备覆盖范围最广, 成本最低。

**关键词:** 射流式喷头; 网格化; 转动均匀性; 动态仿真; 水力性能

中图分类号: S277.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019047

朱兴业, 史永杰, 胡广, 等. 射流式喷头水量分布动态仿真及试验[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 74-83.

ZHU Xingye, SHI Yongjie, HU Guang, et al. Dynamic Simulation and Test of Water Distribution of Fluidic Sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 74-83.

### 0 引言

【研究意义】喷灌均匀度是衡量灌溉质量和喷头水力性能的重要指标, 是喷灌系统规划设计中的重要参数<sup>[1-4]</sup>。实践证明, 在整个喷洒面积上喷洒的均匀度对作物的增产有决定性的影响<sup>[5]</sup>。为提高喷灌系统灌溉的均匀性, 国内外不少学者在喷灌水量分布均匀性的计算以及喷头结构的改进等方面进行了大量研究。【研究进展】朱忠锐等<sup>[6]</sup>提出了一种计算有风条件下喷灌系统组合均匀度的方法。韩文霆等<sup>[13]</sup>分析了采样间距、插值方法、计算网格间距对均匀系数的影响规律。吕名礼等<sup>[3]</sup>利用 Visual Basic 6.0 开发出不同环境条件下单喷头或多喷头组合喷灌水量分布的模拟软件。汤攀等<sup>[9]</sup>建立了将实测平地单喷头水量分布图转换成坡地上单喷头水量分布图的计算模型。以往学者对喷头喷灌水量分布的模拟和均匀性评价, 大多数学者都是对试验中测量点的径向水深进行分析处

理, 得到该喷头的水力性能。喷灌水量分布的模拟软件在对测量点进行数据处理过程中也较少考虑到旋转式喷头由于旋转的不均匀性导致不同径向方向上水量分布的不一致性。关于喷头改进和开发方面, 朱兴业等<sup>[12]</sup>深入探索了国内原创旋转式射流喷头结构参数与喷洒均匀性之间的关系。刘俊萍等<sup>[8]</sup>根据射流理论分析设计了不同结构的副喷嘴, 并对全射流喷头的变量喷洒均匀性进行了综合评价。许正典等<sup>[11]</sup>对垂直摇臂式喷头的可调工作参数进行了优化研究, 使喷头运行时处于最优水力性能状态。【切入点】以上关于喷头结构的优化主要是针对中高压情况下, 在低压工况下, 摇臂式喷头在实际运行中由于压力不足会出现喷头水力性能下降的现象。【拟解决的关键问题】射流式喷头是通过信号水实现射流元件内部主射流的附壁, 低压情况下会出现难以取得信号水的问题。因此, 研发出低压工况下, 结构简单、工作稳定的射流式喷头具有重要意义。

本文对全射流喷头射流元件进行了优化, 选择合理的取水方式, 提出一种新型射流式喷头, 并采用新的水量分布计算方法对该喷头进行单喷头和多喷头组合喷灌水量分布动态仿真, 探究出该喷头在不同工作压力和安装高度下的水力性能。

收稿日期: 2019-05-07

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(现代农业)(BE2018313); 河南省节水农业重点实验室开放基金项目(FIRI2016-21)

作者简介: 朱兴业(1982-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究。E-mail: zhuxy@ujs.edu.cn

通信作者: 史永杰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究方向。E-mail: syj66482695@163.com

# 1 材料与方法

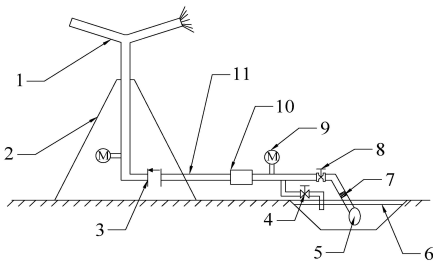
## 1.1 试验方法

喷头喷洒试验系统主要由水泵、电磁流量计、压力表、流量控制阀、压力调节器、回流阀、输水管、喷头和雨量筒等组成。试验在直径为 44 m 的室内无风喷灌实验室内进行，试验样机如图 1 所示，喷头安装高度分别为 1.1、1.3 和 1.5 m，在工作压力分别为 100、150、200、250 和 300 kPa 的情况进行全圆喷洒。喷头连接压力调节器，工作压力由 0.4 级的精密压力表读出，喷灌水量采用内径为 0.2 m、高为 0.6 m 的雨量筒测量，雨量筒以喷头垂下地面位置为中心辐射径向布置 1 条线，雨量筒间距为 0.5 m，在喷头稳定运转 10 min 后开始试验，测试时间为 1 h，每组试验重复 3 次。图 2 为喷头试验系统示意图，图 3 为雨量筒布置图。测出喷头旋转速度，采用 KB874 红外对管、对射式光电开关、红外传感器等仪器设计如(图 4) 所示的装置测量喷头在 11 条射线方向上的瞬时速度，发射器安装在喷头旋转部位，接收器 1、2 分别安装在发射器正下方，相距 0.5 m，固定在输水管上，当喷头旋转至接收器位置时，接收器 1、2 将接收到高频模拟信号，采用 A/D 转换器将其转换成数字信号并通过示波器显示出该两束矩形波，2 束波形的时差即近似为喷头的瞬时速度。



图 1 射流式喷头样机

Fig.1 Prototype of fluidic sprinkler



- 1.喷头; 2.固定支架; 3.压力调节器; 4.回流阀; 5.水泵; 6.蓄水池; 7.过滤器; 8.流量控制阀; 9.压力表; 10.电磁流量计; 11.输水管

Note 1.Sprayer; 2.Fixed support; 3.Pressure governor; 4.Reflux valve; 5.Pump; 6.Impounding reservoir; 7.Percolator; 8.Flow control valve; 9.Piezometer; 10.Electromagnetic flowmeter; 11.Water duct

图 2 喷头试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of sprinkler test system

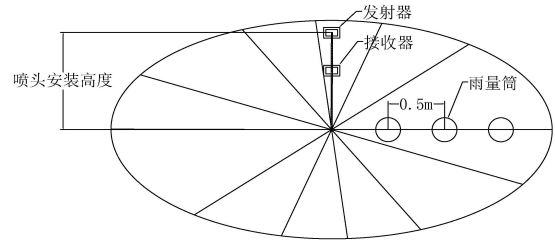


图 3 雨量筒布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of rain gauge arrangement

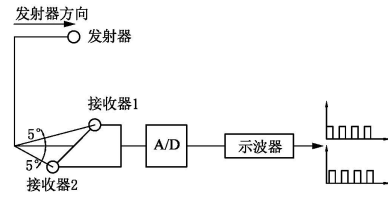
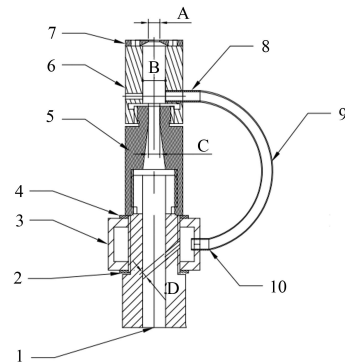


图 4 旋转速度测量装置

Fig.4 Rotation speed measuring device

## 1.2 射流元件及喷头工作原理

射流元件是射流式喷头完成步进旋转的关键部件。图 5 为射流元件结构简图。



- 1.入水口; 2.固定环; 3.储水环; 4.调节环; 5.主元件体; 6.补气孔; 7.喷嘴; 8.入水嘴; 9.导流管; 10.信号嘴

1.Water inlet; 2.Fixed collar; 3.Water storage ring; 4.Regulating ring; 5.The main components of body; 6.Compensating hole; 7.Nozzle; 8.Prospore; 9.Air chamber tube assy; 10.Signal mouth

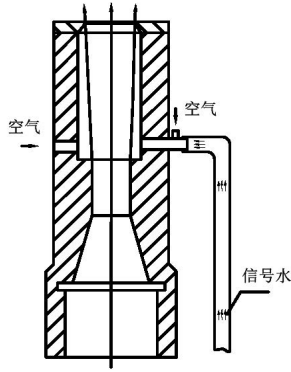
图 5 射流式喷头射流元件

Fig.5 Jet type nozzle jet element

射流式喷头的工作过程包括直射和附壁 2 个状态。图 6 (a)、图 (b) 所示为直射状态图，图 6 (c)、图 (d) 所示为附壁状态图。

直射状态：如图 6 (a) 所示，射流元件左侧由补气孔补入空气，射流元件右侧由入水嘴上的导流管补入空气，因此主射流左右两侧的气压大小基本相等，主射流处于直射状态。

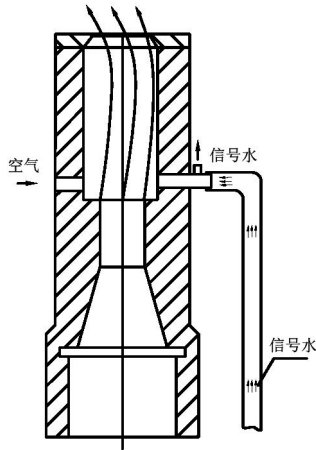
由图 6 (c) 可知，信号水从管道流入入水嘴，射流元件右侧的导流管被信号水堵死，右侧无法补入空气，形成局部低压旋涡区，右侧压力低于左侧，射流向右侧附壁。



(a) 直射状态示意图 (a) Diagram of collineation state



(b) 直射状态实物图 (b) Direct state picture



(c) 附壁状态示意图 (c) Attached wall state diagram



(d) 附壁状态实物图 (d) Attached wall status diagram

图 6 喷头工作原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of nozzle working principle

### 1.3 全圆域水量分布计算方法

试验中布置的雨量筒测得的水深是喷头  $X$  轴向上的径向水量分布, 考虑到射流式喷头转速在全圆域内并不均匀, 因此 1 条射线上的水深并不能代表全圆域内喷头喷洒水量的空间分布。本文中设定有 4 条射线将喷洒域划分为 4 个象限 I、II、III、IV, 表示其水量分布各不相同。全圆域水量分布计算算法流程如下:

1) 通过样条插值计算喷头  $X$  轴方向上任意一点  $P$  的水量值, 记  $X$  轴方向上的角度为  $\theta$ 。

2) 对喷洒域进行正方形网格划分, 在划分过程中, 由于随着网格数目不断增多, 正方形网格的面积不断减少, 因此, 可以根据喷头不同工况下的射程设置足够多的网格节点数并将网格区域近似为一个点, 通过该点的位置坐标计算网格区域的极坐标值。喷洒域内数值插值示意图如图 7 所示。

3) 通过式 (1)、极坐标夹角值  $\theta$  和样条插值法计算喷洒域内各网格点的权值。

4) 采用径向插值分别计算出各辐线上与喷头  $X$  轴方向上相同距离的水量  $h_i$ 。

5) 喷头全圆喷洒域内任意点的水深即为  $H_i$ , 其计算式为:

$$r_i = \frac{A_1}{P}, \quad (1)$$

$$H_i = h_i \times r_i, \quad (2)$$

式中:  $A_1$  为喷头灌溉过程中  $X$  轴方向上的旋转速度 (rad/s);  $P$  为喷头灌溉过程中在位置  $P$  的旋转速度 (rad/s);  $r_i$  为网格  $P$  位置的权值。

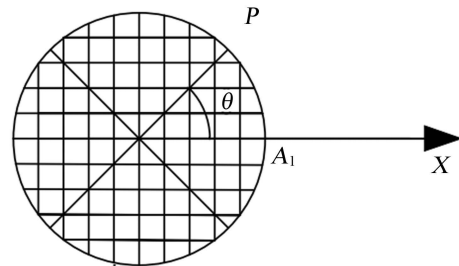


图 7 喷洒域内数值插值示意图

Fig.7 Schematic diagram of numerical interpolation in spraying field

### 1.4 喷灌均匀性评价模型

1) 克里斯琴森均匀系数  $CU$  常用来评价喷头在喷灌面积上水量分布的均匀程度计算式<sup>[15-17]</sup>为:

$$CU = \left(1 - \frac{|\Delta h|}{\bar{h}}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $CU$  为克里斯琴森均匀系数 (%);  $|\Delta h|$  为每一侧点喷洒水深的平均离差 (mm);  $\bar{h}$  为喷管面积上的平均喷洒水深 (mm)。

2) 分布均匀性系数是指部分测点水深的均值与总水深平均值的比值<sup>[18-19]</sup>, 其计算式为:

$$DU = \frac{h^*}{\bar{h}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中： $h^*$ 为 N/4 个最小水深测点的平均值(mm)； $\bar{h}$ 为喷灌面积上的平均喷灌水深 (mm)。

3) 变异系数  $CV$  用于表示各雨量筒水深的标准差与算术平均值的比值。喷灌均匀性越高，测得的变异系数越小。计算式<sup>[20-21]</sup>为：

$$CV = \frac{SD}{MN} \times 100\%, \quad (5)$$

式中： $CV$ 为变异系数 (%)； $SD$ 为所有雨量筒中水量的标准差 (mm)； $MN$ 为所有雨量筒中水量的算术平均值 (mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷灌强度局部变化规律

喷头单位时间的喷洒水深是评价喷头喷洒效果的重要特征参数。通过试验读取雨量筒采集的数据，得到了 1.1、1.3、1.5 m 安装高度和 100、150、200、250、300 kPa 工作压力下的径向水量分布曲线如图 8 所示。【从图 8 (b)、图 (c) 中可以看出，喷头在安装高度为 1.3 和 1.5 m 时，射程随着压力的加大而增长，在压力为 100~150 kPa 之间时，射程增长得很快，而后增速逐渐变缓，因为随着压力的不断增大，水滴的运动速度增大，水滴所受空气阻力变大，射流破碎的更充分，变成细小水滴，运动距离变近。安装高度为 1.1 m 时，射程随压力的增大变化相对均匀，这是由于水滴在空气中没有完全破碎的导致的】。如图 8 (a)、图 (b) 所示，安装高度为 1.1、1.3 m，压力在 150~300 kPa 时，水量在距喷头初始位置 2~8.5 m 处分布均匀，而在喷洒末端一段距离内，水深急剧下降，说明喷头洒水柱破碎均匀，洒水水滴直径及相应在同一数量级的频数成互相关趋势，相比单相流喷头其组合均匀性能更优越。安装高度为 1.5 m 时，水量在距喷头初始位置 3~8.6 m 处均匀分布，这是由于安装高度增高，降落在近处的水滴在空中运动时间加长运行距离会更远，且远处的水滴速度水平分量与垂直分量之间的夹角大，因而水滴运动距离变化并不是很明显。

### 2.2 压力-流量关系

射流式喷头在 1.3 m 安装高度的流量测量值如表 1 所示。从表 1 可知，喷头的流量与压力呈正相关关系，随着喷头压力的增大，喷头的流量也随之增大。根据流体力学知识喷头流量与喷嘴直径以及工作压力的关系为：

$$Q_p = 3600\mu A\sqrt{2gH}。 \quad (6)$$

由此可得出流量系数的公式：

$$\mu = \frac{Q_p}{3600A\sqrt{2gH}}, \quad (7)$$

式中： $Q_p$ 表示喷头流量 ( $m^3/h$ )； $\mu$ 表示流量系数； $A$ 表示喷嘴过流断面面积( $m^2$ )； $H$ 表示喷嘴出口压力，以米水柱表示 (m) 且  $1 m H_2O=10 kPa$ 。根据上式计算出该喷头的流量系数，可得到流量系数在 0.545~0.585 之间波动，随着压力的增大，流量系数呈先上升后下降趋势。

表 1 压力-流量关系表

工作压 Operating Pressure/kPa	100	150	200	250	300
流量/ ( $m^3 h^{-1}$ ) Flow rate	0.825	1.003	1.125	1.212	1.312
	0.827	1.022	1.165	1.236	1.344
	0.847	1.041	1.134	1.234	1.347
平均值 Average data	0.833	1.022	1.141	1.228	1.335
$q$	0.585	0.586	0.566	0.545	0.541
$\sigma$	0.012	0.019	0.02	0.014	0.019
CV/%	1.465	1.872	1.821	1.103	1.47

### 2.3 水量峰值局部变化规律

图 9 为不同工作压力下水量峰值强度变化柱状图。从图 9 可以看出，相同工作压力下，喷头在 1.3 m 安装高度时，水深峰值强度最大，当安装高度升高至 1.5 m 时，水量峰值强度明显降低，工作压力为 100 kPa，安装高度为 1.1、1.3、1.5 m 时的水量峰值强度的对比分别为 8.9、10.5、5.3。由此可见，喷头在压力为 100 kPa、高度为 1.1、1.3 m 时产生较大的喷灌水量峰值，易损伤作物，且破坏土壤结构，形成地表径流及冲蚀土壤，为喷头不利工况条件。相同安装高度下，灌溉水深峰值强度随着压力的增大呈现减小的趋势，但当压力增大到 150 kPa 之后，减小的效果并不明显。这是由于随着压力的增大，喷头流量增大，已经开始弥补了水滴破碎而造成的灌溉水深强度减小的损失。当安装高度为 1.5 m，工作压力分别为 100、150、200、250、300 kPa 时，其水量峰值强度分别为 5.3、5.1、4.9、4.7、4.9 mm/h，标准偏差 (STD) 为 0.23 mm/h，说明此工况下喷灌水量峰值离散程度小，水量峰值集中 5 mm/h 附近，适用于动压下进行喷灌。为探明安装高度为 1.1、1.3 m 时，水量峰值强度与工作压力的非线性关系，本文利用 MATLAB 软件，建立非线性数学建模型，回归出水量峰值强度与工作压力的变化函数为：

$$\rho = 0.185P^2 - 7.2P + 133.4 \quad (R^2=0.96), \quad (8)$$

$$\rho = 0.0005P^2 - 0.029P + 30 \quad (R^2=0.97), \quad (9)$$

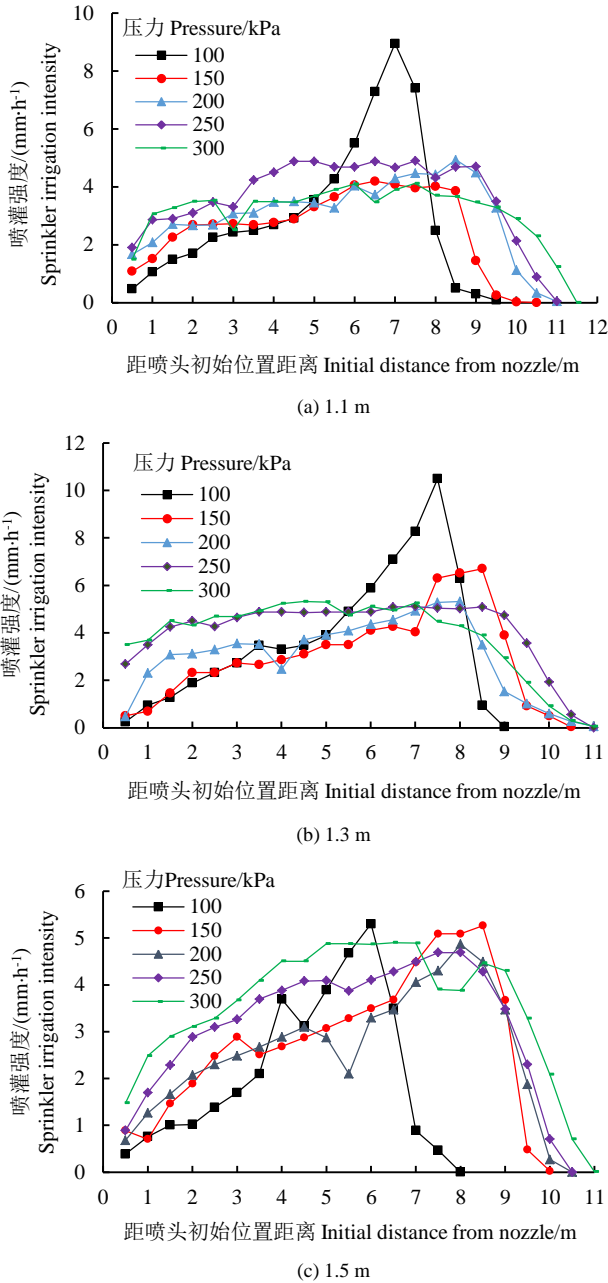


图 8 不同工作压力下喷灌强度变化  
Fig. 8 Variation of sprinkler strength under different working pressure

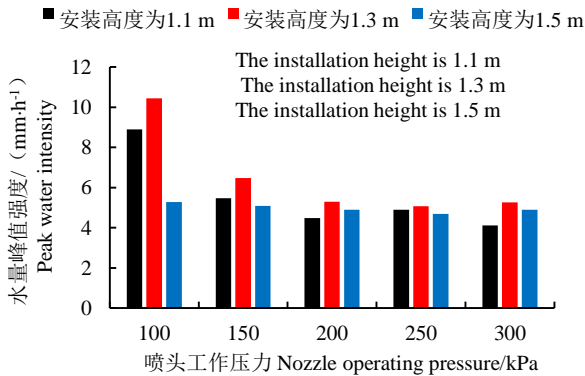


图 9 不同安装高度下水量峰值强度变化  
Fig. 9 Changes in peak water intensity at different installation heights

### 2.4 水量离散程度分析

从表 2 可以看出,喷头在 1.1 m 安装高度、100 kPa 工作压力下 CV 最大,达到 84%说明在该工况下水量分布最不均匀。增大工作压力,变异系数 CV 急剧下降。当增大喷灌压力,高速水柱截面不断扩大并逐步分成小水舌,水舌在重力、空气阻力和射流紊流的共同作用下快速破碎变形,在空气中破裂较为充分,产生许多细小的水滴,在一定范围内有利于提高水量的均匀分布。在工作压力为 200 kPa,安装高度从 1.1 m 经 1.3 m 变化至 1.5 m 时,变异系数反而出现增大的趋势。这是由于随着高度的升高,距离喷头较近位置的水滴运动更远,在一定程度上造成了局部水量过于集中的现象。

表 2 不同工况下水量变异系数

Table 2 Coefficient of water variation under different working conditions

安装高度 <i>H</i> /m Installed height	工作压力/kPa Operating pressure				
	100	150	200	250	300
1.1	84.0	54.1	43.0	38.4	32.0
1.3	77.9	65.4	43.9	43.0	42.5
1.5	78.5	55.3	51.5	43.3	40.2

表 3 压力、安装高度-射程数值表

Table 3 Pressure, mounting height-range table

射程/m Wetted radius	工作压力/kPa Operating pressure				
	100	150	200	250	300
1.1 m	9.12	9.57	10.66	10.85	11.38
	9.28	9.65	10.75	10.9	11.56
	9.14	9.86	10.72	11.08	11.49
平均值 Average data	9.18	9.69	10.71	10.94	11.48
$\sigma$	0.09	0.15	0.04	0.12	0.09
CV/%	0.97	1.53	0.41	1.08	0.81
1.3 m	8.82	10.18	10.44	10.72	10.56
	8.99	10.34	10.62	10.75	10.68
	8.9	10.3	10.67	10.88	10.82
平均值 Average data	8.91	10.27	10.58	10.78	10.69
$\sigma$	0.09	0.08	0.12	0.08	0.13
CV/%	0.98	0.81	1.14	0.78	1.22
1.5 m	7.79	9.68	10.07	10.29	10.79
	7.81	9.86	10.11	10.32	10.9
	7.91	9.72	10.33	10.48	10.86
平均值 Average data	7.84	9.75	10.17	10.36	10.85
$\sigma$	0.07	0.1	0.14	0.1	0.06
CV/%	0.86	0.98	1.36	1	0.51

## 2.5 压力、安装高度-射程关系

根据国家标准《旋转式喷头试验方法》中规定,射程是指喷头在无风条件下正常运行时,受水量雨筒中收集的水深为 0.25 mm/h 的点到喷头中心的水平距离。根据实测水量分布,首先确定试验数据中最后 1 次喷灌强度大于 0.25 mm/h 的水平距离,然后取该元素前 3 个后 1 个元素作为插值的“基准”数据;在利用 3 次样条插值所得的数据确定喷灌强度为 0.25 mm/h 的水平距离。对 3 次试验实测数据处理后,得到射流式喷头的射程如表 3。

在表 3 所示的工况下,以喷头安装高度 1.3 m,压力为 100 kPa 为例,分析工作压力与射程的关系结果如图 10 所示。由图 10 可知,当压力增至 150 kPa 时,射程增加 15.26%;当压力增至 200 kPa 时,射程增加 18.74%;当压力增至 250 kPa 时,射程增加 20.99%;当压力增至 300 kPa 时,射程增加 19.98%。这说明喷头射程随着工作压力增大而增大,开始时增长得比较快,而后逐渐变缓,当达到一定极限时,随着压力继续增大,射程将不再增大。这是因为压力过大,水流的运动速度大,水滴受到空气阻力也增大,大粒径水滴在空气中不断发生二次破碎,变成粒径更小的水滴,飞行距离变近。

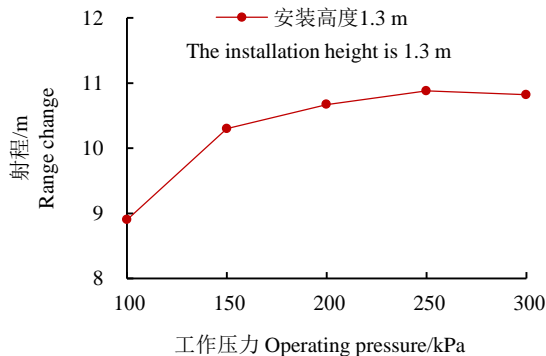


图 10 安装高度为 1.3 m 时工作压力与射程的关系

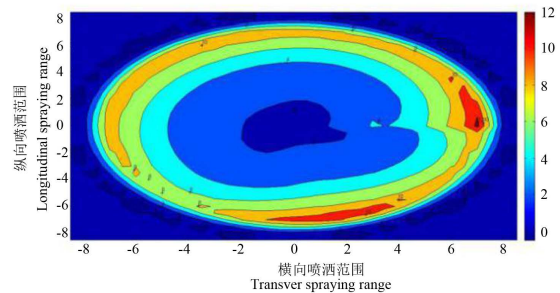
Fig. 10 Relationship between operating pressure and range at installation height of 1.3 m

以 100 kPa 为例,相比与安装高度 1.1 m 的射程,安装高度达到 1.3 m 的时候,射程减小 2.9%;安装高度达到 1.5 m 的时候,射程减小 14.59%。这说明随着喷头安装高度的增加,射程出现了下降的异常现象。在试验过程中发现在提升喷头安装高度时,压力调节器的位置并没有发生改变,安装高度增加的同时水流的沿程损失也在增加,喷嘴出口处实际压力稍微小。由于射流式喷头与全射流喷头的流道结构不同,随着压力的减小,出口水流扩散减小,水流更集中冲击出口壁面,驱动力增加使得喷头转速加快。因此,出现该异常现象的主要原因是喷头转速的加快。喷头在 1.1、1.3、1.5 m 安装高度的标准差及变异系数分别为 0.09~0.15 和 0.81~1.53、0.09~0.13 和 0.78~1.22、

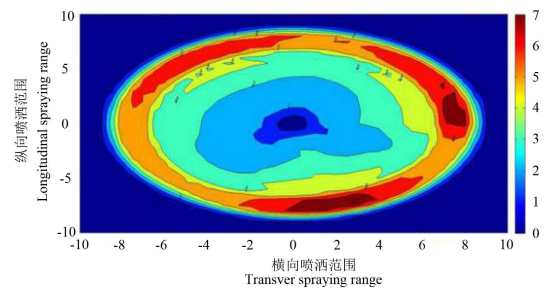
0.06~0.14 和 0.51~1.36,数据波动幅度较小,表明喷头运转的稳定性高。

## 2.6 单喷头全圆域内水量空间分布

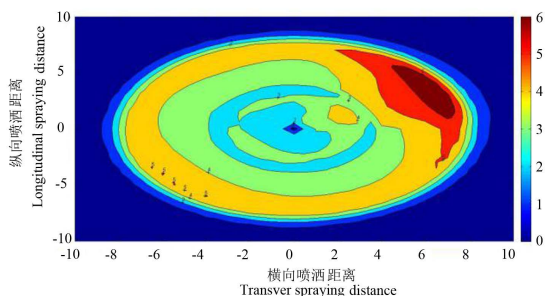
采用 MATLAB 对喷洒域内进行网格划分,通过 3 次样条插值方法求得任意网格点的降水深,得到了单喷头在 1.3 m 安装高度,100、150、200、250 和 300 kPa 的工作压力下射流式喷头的空间水量分布,如图 11 所示。由图 11 可以看出,喷头在整个圆周内由于旋转速度的不一致,造成了局部水量过多的情形,从图 11 中局部水量过多的区域来看,在不同的工作压力下,喷头旋转速度最慢的区域主要分布在 I、IV 象限。在 100 kPa 压力下,喷头 4 m 范围内仅存在 2 个梯度的相同颜色,此区域内旋转均匀性较好,当压力增大至 200 kPa 时,距喷头大概 3 m 处的圆环出现了断口,随后断口位置以喷头为中心不断向外扩张,且开口的角度也不断增大,随着压力升高至 300 kPa 时,断口位置已扩展至距喷头 8 m 处,且 8 m 范围内只有一个不规则的长条形圆环。从图 11 可知,随着工作压力的不断增大,靠近喷头近处的水量越来越多,当喷头压力达到 250 kPa 时,在喷头 2 m 外的 3/4 的圆域内灌水深度高至 4.5 mm/h,随后灌水深度为 4 mm/h 以上的已经占据大部分的喷灌区域。



(a) 100 kPa



(b) 150 kPa



(c) 200 kPa

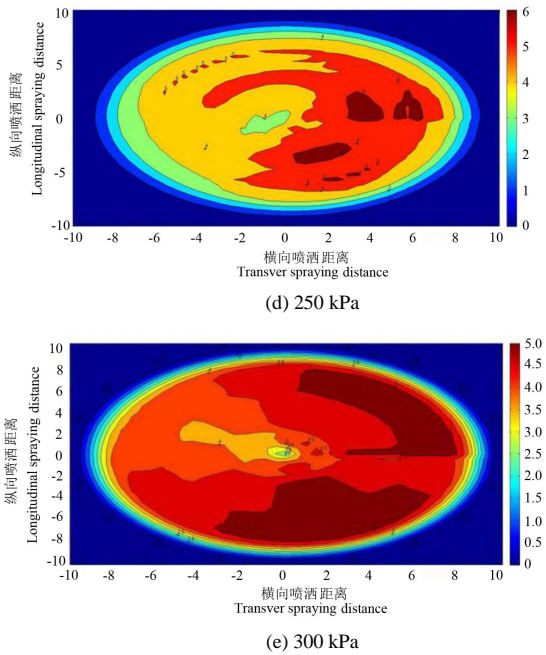


图 11 1.3 m 安装高度单喷头水量分布

Fig.11 Water distribution at 1.3m installation height of single sprinkler head

为评价在 1.3 m 安装高度下喷头水量分布的均匀性,分别计算了不同工作压力下整个喷洒空间范围内的  $DU$  和  $CU$  值的变化曲线,如图 12 所示。由图 12 可知, $CU$  和  $DU$  的均值分别为 64.82%、77.65%,标准偏差分别为 0.155、0.093, $CU$  的标准偏差超过  $DU$  的  $2/3$ ,这说明对评价喷灌水力性能的 2 个指标  $CU$  和  $DU$ ,压力对  $CU$  的影响更为明显,这与文献[28]的研究结论一致。喷头压力在 100~250 kPa 间, $CU$  和  $DU$  的变化趋势基本一致,都随着喷头工作压力的增大而增大,当压力超过 250 kPa 时, $DU$  继续增大而  $CU$  出现了减小的趋势,这说明  $CU$  和  $DU$  在不同的工作压力区内并不都是简单的正相关关系,运用 1stop 软件分别对不同压力下的试验数据进行分析处理,得到  $CU$ 、 $DU$  和压力  $P$  的函数关系式为:

$$DU = 55.19 + 122.2P - 0.03CU (R^2=0.96)。 \quad (10)$$

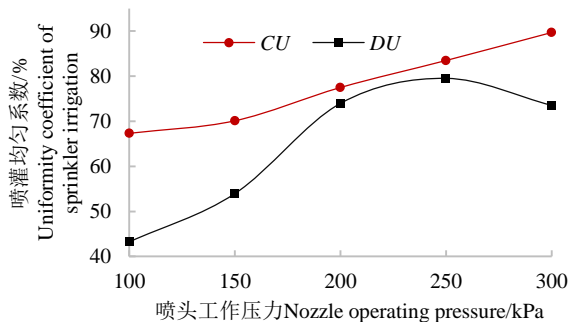
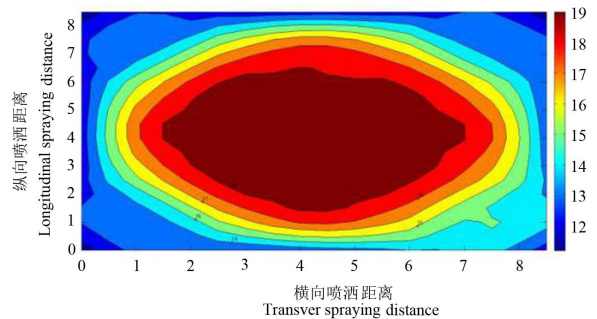


图 12 1.3 m 安装高度,不同工作压力下喷头的分布均匀性系数和克里斯琴均匀系数

Fig.12 The values of  $DU$  and  $CU$  of the nozzle at 1.3m installation height and under different operating pressures

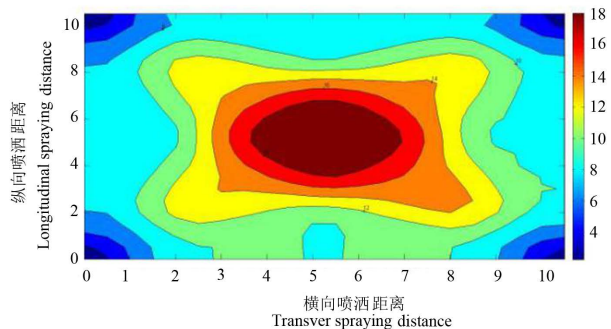
## 2.7 组合喷头的空间水量分布

目前喷灌系统中喷头组合形式主要有正方形和三角形 2 种组合,采用对单喷头空间水量进行线性叠加的方法,得到喷头在 1.3 m 安装高度,250 kPa 工作压力,0.8、1.0  $R$  和 1.2  $R$  ( $R$  为喷头喷洒圆的半径)喷头间距下正方形和三角形组合的多喷头喷灌水量空间分布如图 13 所示,从图 13 可以看出,正方形组合的多喷头喷灌相当于单喷头全圆域喷洒的 4 个象限分别布置在正方形的 4 个顶点,这使得喷灌区域内的水量分布近似对称,至于喷灌区域内水量分布不以矩形中心成完全对称,主要是由于喷头在 4 个象限内旋转的不均匀所造成。由图 13 可知,正方形组合形式的多喷头喷灌区域内喷灌强度峰值随着喷头间距的减小而逐渐增大,当喷头间距为 0.8  $R$  时,喷灌强度峰值达到 19 mm/h,相比 1.2  $R$  的喷头间距增大了 42%。0.8、1.2  $R$  的喷头间距按正方形组合喷洒范围内的喷灌强度峰值均要大于相同组合间距的三角形组合,从喷灌强度峰值指标考虑,选用 0.8  $R$  和 1.2  $R$  及其附近距离的喷头组合应尽量考虑三角形组合。1.0  $R$  的三角形组合的喷灌强度峰值大于所有的组合形式,其值高达 20 mm/h,这说明实际喷灌系统中该喷头应避免采用靠近 1.0  $R$  间距的三角形组合,以防止造成水土流失。



(a) 喷头间距为 0.8  $R$  的正方形组合

(a) Square combination of nozzle spacing 0.8  $R$



(b) 喷头间距为 1.0  $R$  的正方形组合

(b) Square combination of nozzle spacing 1.0  $R$

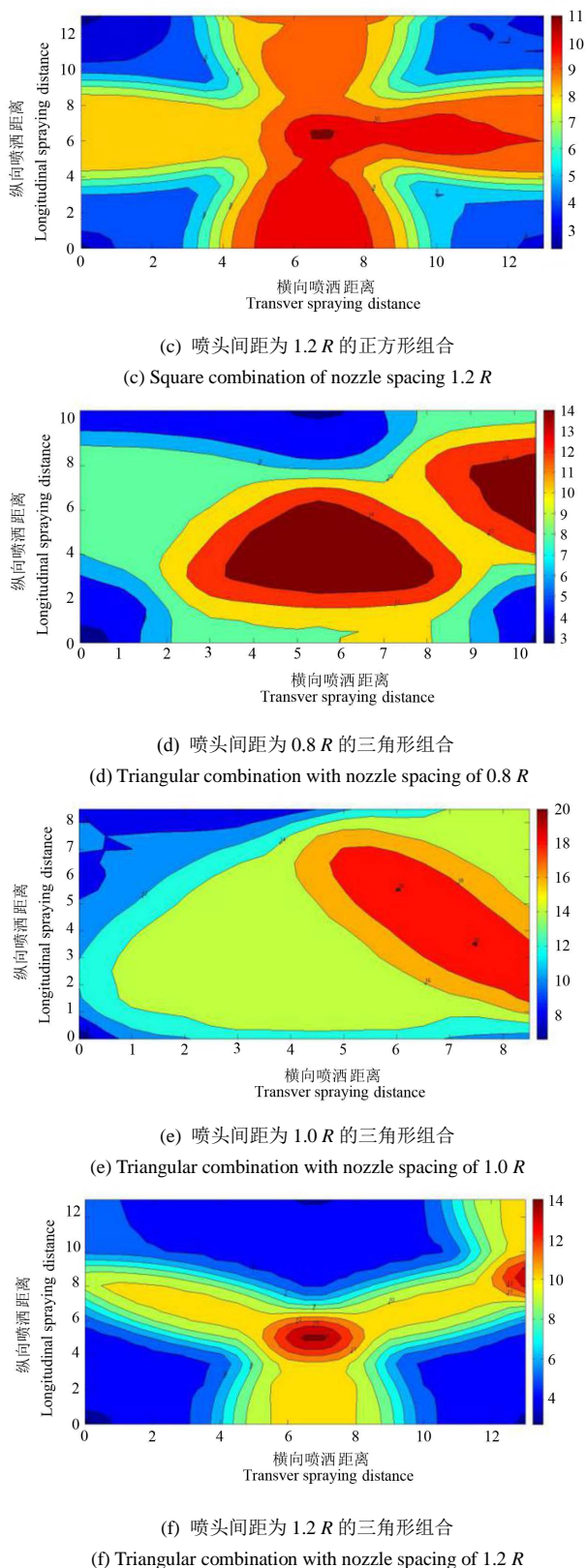


图 13 0.8、1.0、1.2 R 多喷头组合喷灌水量的空间分布

Fig.13 Spatial distribution of water volume of 0.8 R, 1.0 R and 1.2 R combined sprinkler irrigation

采用 MATLAB 对多喷头组合全喷洒域进行插值后, 计算喷头在 1.3 m 安装高度, 250 kPa 工作压力, 不同组合间距下的  $DU$  和  $CU$  值如图 14、图 15, 由图 14 可知, 喷头组合间距为 5~7.5 m 之间时, 正

形和三角形组合的  $DU$  值基本在 80% 以上, 相比相同安装高度和工作压力下单喷头的  $DU$  值增大 10% 左右, 通过正方形和三角形的多喷头组合, 在合理布置喷头组合间距下, 能够避免田间水量分布灌水深度出现较小的情况, 有利于保证作物获得必要的最小灌水量。由图 14 可知, 正方形组合喷灌的  $CU$  值总体上随喷头间距的减小呈下降趋势, 组合后的最大值出现在喷头 5.25 m (0.5 R) 间距时,  $CU$  为 98.6%; 喷头间距 11.55 m (1.1 R) 时,  $CU$  最低 76.4%, 对  $CU$  趋势进行拟合得到  $CU$  与喷头组合间距存在指数函数关系, 其函数关系式为:

$$CU = 187.4 \times d^{-0.369} \quad (R^2=0.94), \quad (11)$$

从图 15 中三角形组合喷灌的  $CU$  变化曲线可知, 喷头间距在 8~11.5 m 之间,  $CU$  总体呈下降趋势, 在喷头间距为 12 m 时,  $CU$  降至 67.2%。将 8 种不同组合间距下的  $CU$  值进一步分析, 建立三角形组合下喷头间距与  $CU$  值关系的数学模型, 函数关系式为:

$$CU = 0.002 \times d^{3.789} + 89.1 \quad (R^2=0.96)。 \quad (12)$$

对不同组合间距下  $CU$  的预测模型式进一步分析, 射流式喷头为达到喷灌工程规范中规定的行喷灌均匀度 85%, 在实际喷灌工程中正方形组合喷灌的间距应小于 8 m, 三角形组合喷头之间的间距布置在 8 m 附近。

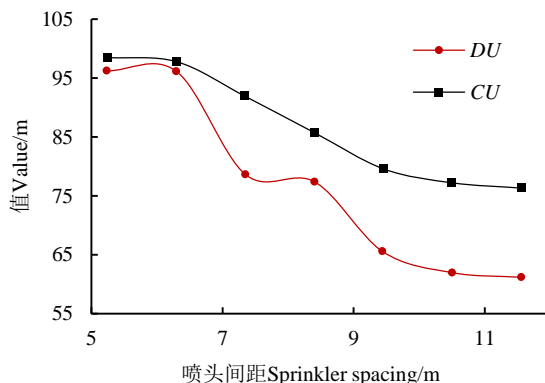


图 14 正方形组合喷灌的  $DU$  和  $CU$  值

Fig.14 Square combination of  $DU$  and  $CU$  for sprinkler

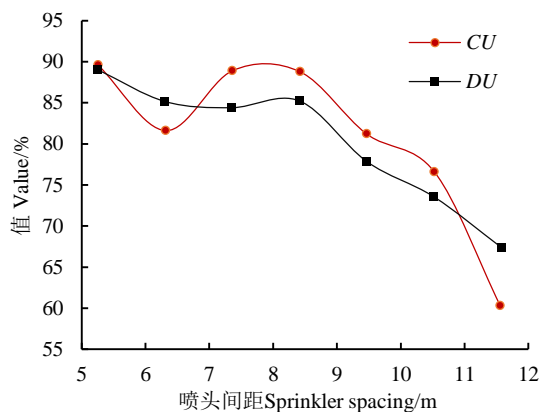


图 15 三角形组合喷灌的  $DU$  和  $CU$  值

Fig.15 The triangle combines  $DU$  and  $CU$  values for sprinkler irrigation



### 3 结论

1) 喷灌强度、水量峰值与喷头的安装高度及工作压力有关。随着安装高度的升高,工作压力的增大,水滴在空气中破碎越充分,喷灌强度在径向方向上分布越均匀。在喷头喷洒末端的一定距离,喷灌强度急剧下降,因而有利于提高该喷头组合喷灌水量分布的均匀度。

2) 针对 100 kPa 下水量峰值强度过高的情形,回归出 1.1、1.3 与 1.5 m 喷头安装高度,100~300 kPa 压力区间的水量峰值强度的预测模型。在实际喷灌作业中应当避免因水量峰值过大从而形成的地表径流。

3) 射流式喷头在 I、IV 象限内旋转接触部位摩擦力相对过大,引起了单喷头喷灌水量分布在此区域内水量集中的情况。在不同的工作压力下,单喷头分布均匀性系数  $CU$  比喷灌均匀性系数  $DU$  变化更为明显,且  $DU$  与  $CU$  呈负相关关系。

4) 建立了多喷头组合喷灌水量分布  $DU$ 、 $CU$  与喷头间距  $d$  的计算模型,拟合均匀系数在 0.94 以上。喷头间距在 7~8.5 m 之间时,正方形组合喷灌的  $DU$  和  $CU$  值均达到喷灌工程规范中规定的行喷灌均匀度;喷头间距在 5.25~11.55 m 之间时,三角形组合喷灌均匀性要优于正方形组合。

#### 参考文献:

- [1] 许迪,李益农,龚时宏,等.面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):63-72.
- XU Di, LI Yinong, GONG Shihong, et al. Waterlogging and saline-alkaline management for development of sustainably irrigated agriculture[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(1): 63-72.
- [2] 李永冲,严海军,徐成波,等.考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟[J].农业机械学报,2013,44(7):127-132.
- LI Yongchong, YAN Haijun, XU Chengbo, et al. Simulation of sprinkler water distribution with droplet dynamics and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 127-132.
- [3] 吕名礼,张中华,刘俊萍.微喷头水力性能及喷灌组合均匀性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(7):641-644.
- LYU Mingli, ZHANG Zhonghua, LIU Junping. Experimental study on hydraulic performance and combined uniformity of micro sprinklers[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(7): 641-644.
- [4] 蒋跃,李红,向清江,等.异形喷嘴自由射流破碎长度及射程的实验研究[J].灌溉排水学报,2014,33(Z1):149-153.
- JIANG Yue, LI Hong, XIANG Qingjiang, et al. Experimental study on breakup length and range of free jet for the non-circle jet nozzle[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Z1): 149-153.
- [5] 王晓丽,安胜鑫,商振清.压力补偿式滴头结构优化及性能测试[J].

灌溉排水学报,2018,37(6):65-70.

WANG Xiaoli, AN Shengxin, SHANG Zhenqing. Optimal design and testing of pressure-compensated drip irrigation emitter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 65-70.

- [6] 朱忠锐,范永申,段福义,等.喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):174-178.
- ZHU Zhongrui, FAN Yongshen, DUAN Fuyi, et al. Effects of sprinkler irrigation and fertilization on water dynamic and yield of spring wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(2): 174-178.
- [7] 李久生,马福才.喷嘴形状对喷洒水滴动能的影响[J].灌溉排水,1997,16(2):1-6.
- LI Jiusheng, MA Fucui. Effect of nozzle shape on the spraydrop kinetic energy from sprinklers[J]. Irrigation and Drainage, 1997, 16(2): 1-6.
- [8] 刘俊萍,刘伟忠,鲍亚,等.全射流喷头水滴分布试验及模型[J].排灌机械工程学报,2017,35(8):731-736.
- LIU Junping, LIU Weizhong, BAO Ya, et al. Drop size distribution experiments of gas-liquid two phases fluidic sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(8): 731-736.
- [9] 汤攀,李红,陈超,等.考虑工作压力的垂直摇臂式喷头可调结构参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(20):99-107.
- TANG Pan, LI Hong, CHEN Chao, et al. Optimization and experiment of adjustable structural parameters for vertical impact sprinkler with working pressure[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 99-107.
- [10] 段福义,刘建瑞,范永申,等.轻型卷盘喷灌机运行效果影响因素分析[J].排灌机械工程学报,2017,35(6):541-546,552.
- DUAN Fuyi, LIU Jianrui, FAN Yongshen, et al. Influential factor analysis of spraying effect of light hose-fed traveling sprinkling system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(6): 541-546, 552.
- [11] 许正典,向清江, AHMED Q W, 等.摇臂喷头低压掺气情况下田间组合喷灌试验研究[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):841-845.
- XU Zhengdian, XIANG Qingjiang, AHMED Q W, et al. Field combination experiment on impact sprinklers with aerating jet at low working pressure[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 841-845.
- [12] 朱兴业,陆科骥,陈震,等.精准灌溉拖移式智能喷灌机的研发[J].灌溉排水学报,2018,37(S1):9-12.
- ZHU Xingye, LU Keji, CHEN Zhen, et al. Development of a lateral move machine of accurate and intelligent sprinkling irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 9-12.
- [13] 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.
- [14] LIN Y Y, ZHANG Z X, XU D, et al. Effect of water and fertilizer coupling optimization test on water use efficiency of rice in black soil regions. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,

- 2016; 34(2): 151-156.
- [15] 孙丰刚, 谢高畅, 彭志颖, 等. 组合方式对喷灌均匀度的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 66-72, 98.  
SUN Fenggang, XIE Gaochang, PENG Zhiying, et al. Irrigation uniformity affected by spatial arrangement of sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 66-72, 98.
- [16] 胡广, 朱兴业, 袁寿其, 等. BP 和 RBF 神经网络预测射流式喷头射程对比[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(3): 263-269.  
HU Guang, ZHU Xingye, YUAN Shouqi, et al. Comparison of Ranges of fluidic sprinkler predicted with BP and RBF neural network models[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(3): 263-269.
- [17] 朱兴业, 万景红, ALEXANDER Fordjour, 等. 旋转折射式喷头水量分布与喷灌均匀性试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 145-152.  
ZHU Xingye, WAN Jinghong, FORDJOUR A, et al. Experiment of water distribution and uniformity of rotating plate sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 145-152.
- [18] 李鸿平, 崔宁博, 陈昱辛. 低压滴灌不同生育期水分亏缺对柑橘叶片生理特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 1-9.  
LI Hongping, CUI Ningbo, CHEN Yuxin. Effects of water deficit at different growth stages on physiological characteristics and yield of citrus leaves under low-pressure drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(10): 1-9.

## Dynamic Simulation and Test of Water Distribution of Fluidic Sprinkler

ZHU Xingye<sup>1,2</sup>, SHI Yongjie<sup>2\*</sup>, HU Guang<sup>2</sup>, LIU Junping<sup>2</sup>

(1. Farmland Irrigation Research Institute, CAAS/Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Henan Province, Xinxiang 453002, China; 2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** 【Background】 Sprinkling irrigation is an irrigation method that uses special equipment to spray pressure water into the air to form tiny water droplets, similar to natural precipitation, and evenly fall on the field. Sprinkler irrigation can control crop water consumption and prevent the radial and infiltration of water loss. The hydraulic performance of uniformity is an important index to measure the quality of sprinkler irrigation. It is also an important parameter in the planning and design of sprinkler system. 【Objective】 This paper aims to present the influence of working pressure, nozzle combination spacing, combination mode and rotation speed on uniformity coefficient ( $CU$ ) and distribution uniformity coefficient ( $DU$ ) of sprinkler nozzle and multi-nozzle combination. In the actual sprinkler irrigation operation, surface runoff caused by excessive water peaks should be avoided. 【Method】 The dynamic simulation code of the distribution of sprinkler water in the combination of single sprinkler head and multiple sprinkler heads under different working conditions was used to test the hydraulic performance of jet sprinkler heads. The influence of different working pressure and installation height on sprinkler irrigation intensity and water distribution was studied. The regression relationship between peak water intensity and working pressure is established. The spatial water distribution of a single sprinkler under square and triangle combined sprinkler irrigation is simulated. 【Result】 Under the pressure of 100~300 kPa at the installation height of 1.5 m, the peak water volume was concentrated around 5 mm/h, and the standard deviation ( $STD$ ) was 0.23. The nozzle works under the pressure of 100 kPa, and the peak intensity of water volume at the installation height of 1.1 m and 1.3 m can be as high as 8.9 m and 10.5 mm/h, respectively.  $DU$  and  $CU$  standard deviations of single sprinkler irrigation under different working pressures were 15.5% and 9.3%, respectively, and  $DU$  was more sensitive to pressure changes. 【Conclusion】 The frictional force of the rotating contact parts of the jet sprinkler in the quadrants I and IV is relatively large, which has caused the concentration of the sprinkler irrigation water distribution in this area. Under different working pressures, the uniformity coefficient  $CU$  of a single sprinkler distribution changes more significantly than the uniformity coefficient  $DU$  of sprinkler irrigation, and  $DU$  and  $CU$  have a negative correlation. Sprinkler intensity and peak water volume are related to the installation height and working pressure of the sprinkler. As the installation height increases and the working pressure increases, the more water droplets are broken in the air, the more evenly the sprinkler intensity is distributed in the radial direction. In the actual sprinkler irrigation project, the spacing between square combined sprinkler irrigation should be less than 8 m, and the spacing between triangular combined sprinkler should be arranged around 8 m. At a certain distance from the spraying end of the sprinkler, the intensity of the sprinkler irrigation drops sharply, which is conducive to improve the uniformity of the water distribution of the sprinkler combination spraying and irrigation. In this case, the sprinkler irrigation uniformity is the highest, and the coverage of a single sprinkler irrigation device is the widest, the cost being the lowest.

**Key words:** fluidic sprinkler; meshing; rotation deviation; dynamic simulation; hydraulic performance

责任编辑：赵宇龙