

全射流喷头喷洒水滴动能分布规律

朱兴业^{1,2}, 刘兴发¹, 刘俊萍¹, 袁寿其¹, 鲍亚¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 华盛顿州立大学农业灌溉研究发展中心, 美国普罗瑟 99350)

摘要: 喷灌动能是评价喷头水力性能优劣的重要指标之一。该文在 0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 MPa 工作压力下, 采用激光雨滴谱仪测量技术 (laser precipitation monitor, LPM) 对全射流喷头的水滴直径、速度和水量分布等参数进行试验, 研究了单个水滴动能、单位体积水滴动能、动能强度分布规律及动能强度均匀性系数与组合间距之间的关系。结果表明: 全射流喷头的单个水滴动能分布与水滴直径之间的关系与该文所建立的模型拟合较好, 呈幂函数关系; 单位体积水滴动能沿径向呈一次函数关系增大, 与压力的-0.556 次方呈正比关系; 动能强度沿径向逐渐增大, 而在射程末端迅速减小至 0, 随压力增大而减小, 且沿径向距离的增大而动能强度减小程度越大; 在各工作压力下, 全射流喷头的矩形最佳组合间距分别为 1.2、1.0、1.1、1.0、1.1 倍喷头射程; 所对应的动能强度均匀性系数分别为 56.6%、71.1%、76.2%、77.2%、72.9%。该结果对研究喷头外特性、优化喷头结构、喷灌系统优化配置提供了一定的理论价值。

关键词: 喷灌系统; 动能; 喷洒; 水滴; 全射流喷头; 动能强度; 动能强度分布均匀性系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.004

中图分类号: S277.9⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0026-06

朱兴业, 刘兴发, 刘俊萍, 袁寿其, 鲍亚. 全射流喷头喷洒水滴动能分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 26-31. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.004 http://www.tcsae.org

Zhu Xingye, Liu Xingfa, Liu Junping, Yuan Shouqi, Bao Ya. Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 26-31. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.004 http://www.tcsae.org

0 引言

喷头喷洒水滴动能是衡量喷灌系统优劣的重要指标, 对水土保持及作物生长的研究也具有一定价值^[1]。喷洒水滴动能过大会对土壤表面结构产生影响, 造成土壤板结, 降低水的入渗率, 形成径流^[2]。国内外学者对此作了大量研究, Yan 等^[3]研究指出水滴动能对土壤板结、地表径流等有较大影响。Bubenzer 等^[4]发现喷洒水滴对粉砂土的破坏程度分别与水滴动能和喷灌强度呈幂函数关系。Thompson 和 James^[5]发现喷洒水滴落地时的水滴动能与土壤表面结构的破坏程度密切相关, 土壤的入渗能力随水滴动能的增大而降低。Mohammed 等^[6]研究了多个压力下全射流喷头单位体积动能的分布规律, 发现沿径向的单位体积水滴动能随压力减小而增大。金兆森等^[7]进行了摇臂式喷头喷洒水滴对土壤的压力试验, 发现该压力沿径向呈增大趋势。李久生^[8]通过面粉法和水滴运动方程研究了方形和圆形喷嘴不同测点处的水滴动能分布情况, 探寻了喷嘴形状与水滴动能之间的关系。刘海军等^[9]总结了水滴动能对土壤结构影响的研究方法, 提出了有效减小水滴动能对土壤性能影响的措施。

全射流喷头 (complete fluidic sprinkler, PXH) 是中国自主研发的新型节水喷头, 在附壁元件内由于附壁效应, 吸入的空气使射流两边形成压差从而改变射流方向, 利用水射流附壁产生的反作用力驱使喷头旋转, 具有喷头水力性能优良、结构简单和使用寿命长等优点^[10-13]。因此, 全射流喷头的内部流体为气液两相, 喷洒水舌在附壁元件内受空气影响已经破碎成小水滴, 喷头外部流场分布特性与内部流体为单相水的旋转式喷头有很大不同。而以上学者对内部流体为单相水的旋转式喷头进行了相关研究, 研究结果尚不能充分表达内部流动为气液两相射流喷头的水滴动能分布规律。本文以 PXH10 型全射流喷头为研究对象, 采用 LPM 雨滴谱仪测试不同工作压力下距喷头不同位置处的水滴直径与速度分布, 掌握全射流喷头单个水滴动能与水滴直径、动能强度与水量分布之间的关系及组合喷灌时喷灌动能强度分布均匀性与喷头组合间距之间的关系, 并建立相应的数学模型。为进一步指导全射流喷头结构优化、研究喷头外流场水力学特性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

全射流喷头水滴分布试验在直径为 44 m 的室内无风喷灌试验室内进行。试验样机选取基元孔直径为 4 mm 的 10 型全射流喷头, 喷头安装高度为 1.4 m, 在工作压力分别为 0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 MPa 的情况下作全圆喷洒。喷头工作压力由 0.4 级的精密压力表读出, 流量通过 0.5 级精度的电磁流量计测量得出。喷灌强度采用内径

收稿日期: 2015-03-03 修订日期: 2015-07-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2011AA100506); 国家自然科学基金 (51309117); 中国博士后科学基金特别资助 (2014T70484); 中国博士后科学基金 (2015M570415)。

作者简介: 朱兴业, 男, 浙江永康人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: zhuxy@ujs.edu.cn

为 0.2 m、高为 0.6 m 的雨量筒以 1 m 间距按径向 6 条线布置测得, 在稳定运转 10 min 后开始试验, 测试时间为 1 h, 具体操作参照国家标准 GB/T22999-2008《旋转式喷头》^[14]和国家标准 GB/T 27612.3-2011《水量分布均匀性和试验方法》^[15]。水滴直径与速度由德国 ThiesClima 研制的激光雨滴谱仪 (laser precipitation monitor, LPM) 测得, 在喷头稳定运转 10 min 之后用 LPM 以 1 m 间距测定各个位置上的水滴直径与速度。

激光雨滴谱仪的激光光学发射源产生一组平行光束。位于接收端的透镜光二极管可以测量光强并把它转换成电信号。当水滴穿过激光束时产生接受信号, 通过减小的振幅计算出水滴直径。通过减小信号的持续时间测得水滴的下降速度, 并将所测得的结果以水滴谱图及 Excel 表格 2 种形式输出, 测量粒径范围 0.125~8.0 mm; 粒子速度范围 0.2~20.0 m/s。为了减小由于测量水滴飞溅、重叠等原因造成的误差, 每测点采集的数据不少于 10 000 滴, 并采用正态分布“3 δ 法则”进行误差处理^[16], 图 1 为试验现场照片。



图 1 试验现场照片

Fig.1 Experiment schematic diagram

1.2 数据处理方法

1.2.1 单个水滴动能计算方法

通过 LPM 测得不同测点处的水滴直径及速度, 可计算出单个水滴落地时的动能。由于同一测点处的喷洒水滴数量很多, 水滴之间速度差异性较大, 因此, 此处单个水滴动能是指测点处某一直径级水滴的水滴动能平均值, 计算公式如式 (1) 所示^[17-19]:

$$E_{sd} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{12} \pi \cdot \rho_w \cdot d^3 \cdot W \cdot V_{di}^2}{\sum_{i=1}^n W} \quad (1)$$

式中: E_{sd} 为直径为 d 的单个水滴动能, J; ρ_w 为水的密度, kg/m³; V_{di} 为直径为 d 的水滴速度, m/s; W 为 V_{di} 对应的粒子数; i 为直径为 d 的水滴速度级数; n 为 LPM 测量的粒子速度级数。

1.2.2 单位体积水滴动能计算方法

单位体积水滴动能是指在喷洒区域中不同测点处的单个水滴动能总和与总体积的比值, 其计算公式^[20]为:

$$E_{ks} = \frac{\sum_{j=1}^m E_{sdj}}{1000 \sum_{j=1}^m \frac{1}{6} \pi \cdot W \cdot d_j^3} \quad (2)$$

式中: E_{ks} 为单位体积水滴动能, J/L; j 为水滴直径级名;

m 为 LPM 测量的粒子直径级数。

1.2.3 动能强度计算方法

动能强度是表征喷灌系统中降水能量分布、预测地表径流的重要参数^[21-22]。喷灌系统动能强度由喷洒水滴直径、速度及喷灌强度决定, 表示单位时间内测点处的动能大小^[17], 计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m E_{sdj}}{1000 \sum_{j=1}^m \frac{1}{6} \pi \cdot d_j^3} \times \frac{h_j}{3600} \quad (3)$$

式中: K 为至喷头距离 j 处的喷洒动能强度, W/m²; h_j 为至喷头不同距离处的喷灌强度, mm/h。

1.2.4 动能强度分布均匀性系数计算方法

动能强度分布均匀性系数与喷头单位体积水滴动能分布和水量分布密切相关, 因此能够较好地反映喷灌系统中降水的能量分布, 综合评价喷灌系统的优劣性。此外, 经研究发现当动能强度大于 0.6 W/m² 时易产生地表径流^[18,22], 动能强度分布均匀性系数较低时, 喷灌系统中出现过动能强度的可能性增大, 对土壤的破坏程度增大; 而均匀性系数较高时, 造成过大动能强度的机率减小, 进而减小对土壤的破坏程度。

水量分布均匀性系数一般采用 Christiansen 公式^[23-25]进行计算, 本文采用 Christiansen 方法来计算动能强度分布均匀性系数, 如公式 (4) 所示:

$$CU_K = \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^N |K_k - \bar{K}|}{\sum_{k=1}^N K_k}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: CU_K 为动能强度分布均匀性系数, %; k 为水量分布试验的测点; N 为测点总数; \bar{K} 为平均动能强度, W/m²;

$$\bar{K} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_k。$$

2 结果与分析

2.1 水滴动能分布规律

2.1.1 单个水滴动能分布规律

根据公式 (1) 计算不同水滴直径的单个水滴动能。图 2 为全射流喷头在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 5 种工作压力下的水滴动能与水滴直径之间的关系。

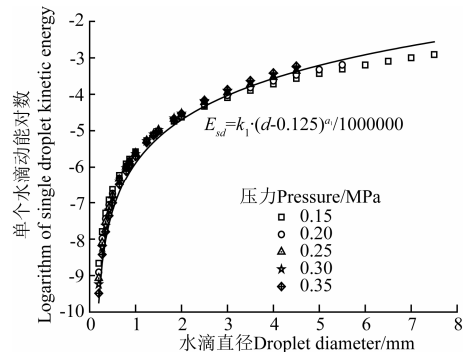


图 2 全射流喷头水滴动能与水滴直径分布关系

Fig.2 Relationship between drop kinetic energy and droplet diameter of PXH

由图 2 可以看出, 在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 压力下, 全射流喷头的单个水滴动能随直径的增大而增大, 增大的幅度随直径增大而逐渐减小。距喷头的距离对单个水滴动能的影响并不大, 这说明距喷头的距离对水滴直径与水滴速度的分布影响较小。各个压力下距喷头 1~6 m 处的单个水滴动能分布规律几乎相同, 大于 6 m 处的水滴动能随压力增大而减小。

采用最小二乘法分别对全射流喷头在 5 个工作压力下的水滴动能与水滴直径之间的关系进行回归分析, 如图 2 所示。建立适用于全射流喷头水滴动能 E_{sd} 分布模型, 如公式 (5) 所示:

$$E_{sd} = \frac{k_1 \cdot (d - 0.125)^{a_1}}{1000000} \quad (5)$$

式中: d 为水滴直径, mm; k_1 为模型系数; a_1 为模型指数。

由于激光雨滴谱仪所能测得的最小水滴直径为 0.125 mm, 因此本文所建的单个水滴动能模型适用于水滴直径大于 0.125 mm 的情况, 而水滴直径小于 0.125 mm 的单个水滴动能很小, 对喷灌系统的喷灌动能影响较小。

文献[20]采用低速摄影的方法对摇臂式喷头洒水水滴直径及速度进行了试验, 发现内部流动为单相水的摇臂式喷头的单个水滴动能与水滴直径呈幂函数关系, 如公式 (6) 所示:

$$E_{sd} = \frac{d^{a_2}}{500000} \quad (6)$$

式中: a_2 为模型指数。

将公式 (5) 与公式 (6) 进行对比分析, 发现单相射流喷头的单个水滴动能模型不适用于描述全射流喷头单个水滴动能的分布规律。将全射流喷头在 5 个压力下的单个水滴动能数据利用文献[20]中模型进行拟合, 得到的相关系数不理想, 这说明单相射流喷头单个水滴动能分布规律与全射流喷头有较大差异。这是由于单相射流喷头洒水水舌自喷嘴射出后在空气阻力、重力的共同作用下形成洒水水滴, 水滴直径沿径向呈指数函数分布, 水滴速度与水滴直径之间呈对数关系; 而全射流喷头的射流破碎机与摇臂式等单相射流喷头有很大区别, 其附壁元件内部流体为气液两相流, 水射流由喷头射出后在附壁元件内在气体及信号水流的作用下破碎成水滴, 从而使射流核心长度和破碎长度明显小于单相射流喷头^[10], 这导致全射流喷头的水滴直径及水滴速度的分布与单相射流喷头有较大差异, 因此单相射流喷头水滴动能分布模型不适用于描述全射流喷头单个水滴动能分布情况。

本文的动能模型及文献[20]中的动能模型相关系数分别见表 1。本文所建立的水滴动能模型能更准确的反映全射流喷头的单个水滴动能与水滴直径之间的关系, 相关系数在 0.9 以上。

为了研究压力与单个水滴动能分布规律之间的关系, 将 5 个工作压力下各测点处的水滴数据进行统一回归分析, 得到全射流喷头水滴动能与直径关系模型, 如式 (7) 所示。

$$E_{sd} = \frac{3.069(d - 0.125)^{3.599}}{1000000} (R^2 = 0.8265) \quad (7)$$

表 1 单个水滴动能模型拟合系数表

工作压力 Work pressure/MPa	本文模型 Model of this paper			文献[20]模型 Model of paper[20]
	k_1	a_1	R^2	R^2
0.15	3.869	2.882	0.902	0.800
0.20	3.431	3.439	0.962	0.819
0.25	3.732	2.876	0.939	0.772
0.30	3.573	3.362	0.930	0.724
0.35	3.194	3.328	0.918	0.789

注: k_1 、 a_1 为单个水滴动能模型系数。

Note: k_1 , a_1 are coefficients of droplet kinetic energy model.

从式 (7) 可以看出, 全射流喷头在 5 个压力下回归曲线的相关系数降低并不多, 说明单个水滴动能受压力的影响较小, 仅与水滴直径有关。

2.1.2 单位体积水滴动能径向分布规律

根据公式 (2) 求不同测点出的单位体积动能。图 3 为全射流喷头在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 5 种工作压力下的单个水滴动能及单位体积水滴动能径向分布, 此处单个水滴动能为测点处不同直径单个水滴动能的平均值。

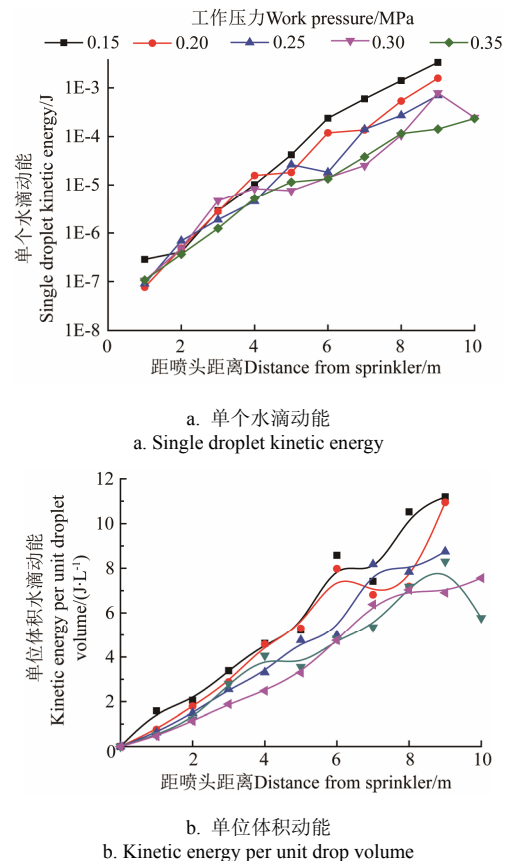


图 3 全射流喷头单个水滴动能及单位体积动能径向分布
Fig.3 Drop diameter of single droplet kinetic energy and per unit drop volume kinetic energy distribution in different distances from sprinkler of PXH

由图 3 可看出, 全射流喷头洒水水滴的单位体积水滴动能与单个水滴动能关系密切, 水滴直径与单位体积水滴动能在距喷头近处均较小, 随着距喷头距离增加而增大。压力对单个水滴动能及单位体积水滴动能的径向分布有较大影响, 随着压力增大相同测点处的单位体积动能逐渐减小。

为了研究全射流喷头的单位体积水滴动能径向分布规律，本文通过对各压力下的单位水滴动能进行回归分析，并建立单位体积水滴动能与距喷头距离分布模型，如式（8）所示：

$$E_{ks} = k_s \cdot r + b \tag{8}$$

式中： r 为距喷头距离，m； k_s 、 b 为拟合系数。

全射流喷头的单位体积水滴动能与公式(8)拟合相关系数均在 0.9 以上，拟合系数见表 2。文献[20]中指数函数模型的拟合系数小于 0.8，拟合效果较差。其原因是全射流喷头附壁元件结构导致射流在喷头出口处的雷诺数增大，加剧了主射流破碎，从而使近处的单位水滴动能相对单相射流喷头较大，远处的单位体积水滴动能相对较小。因此，全射流喷头的单位体积水滴动能分布规律与单相射流喷头之间有较大区别，本文所建一次函数模型能更准确的描述其分布情况。

表 2 单位体积水滴动能拟合系数表

Table 2 Fitting coefficient of kinetic energy per unit volume				
工作压力 Work pressure/MPa	本文数学模型 Model of this paper			指数函数模型 Exponential function model
	k_s	b	R^2	R^2
0.15	1.204	0.565	0.965	0.7487
0.20	1.141	0.316	0.914	0.7846
0.25	1.057	0.453	0.948	0.6432
0.30	0.837	0.224	0.962	0.7379
0.35	0.751	0.074	0.908	0.6771

注： k_s 、 b 为拟合系数。
Note: k_s , b are fitting coefficients.

从表 2 可以看出，在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 5 种压力下全射流喷头拟合曲线的斜率随压力增大而减小，即随压力增大全射流喷头单位体积水滴沿径向增大的幅度逐渐减小。将 5 种压力下的单位体积水滴动能数据进行统一回归，对单位体积动能进一步分析，建立全射流喷头单位体积动能、距喷头距离与工作压力关系的数学模型，函数关系式如式（9）所示：

$$E_{ks} = 0.454P^{-0.556} \cdot r + 0.195(R^2 = 0.946) \tag{9}$$

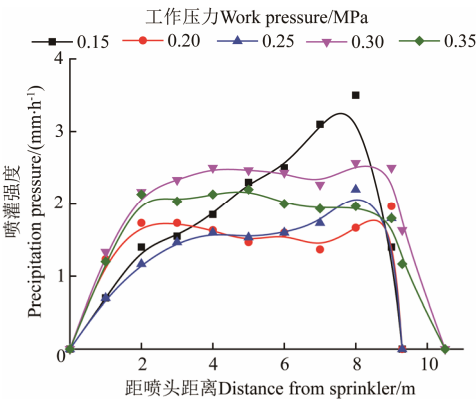
式中： P 为喷头工作压力，MPa。

2.2 动能强度分布规律

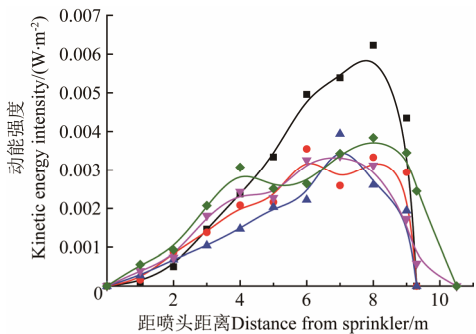
2.2.1 单喷头动能强度分布规律

根据公式(3)求不同测点处的动能强度。图 4 为 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 工作压力下全射流喷头至喷头不同距离处的喷灌强度和动能强度。从图 4 中可以看出，全射流喷头在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 工作压力下的最大动能强度分布在 8、6、7、7、8 m 处，各压力下的最大动能强度相差不大。5 个压力下的动能强度沿径向的分布趋势相同，随着距喷头距离增大而逐渐增大，在达到最大动能强度后迅速减小为 0。距喷头 0~4 m 处的动能强度受压力影响较小，分布在 4 m 至末端的动能强度受压力影响较大，但除 0.15 MPa 外各压力下的动能强度沿径向均随压力增大而增大。出现这种趋势的原因是由于测点处的单位体积水滴动能和喷灌强度共同决定了动能强度的大小。全射流喷头近处喷灌强度较小，远处喷灌强度随压力升高而增大，且各压力下距喷头 2~9 m 处的喷灌强度波动幅度较小；而单位体积水滴动能与距喷头距离呈

一次函数关系，近处水滴动能较小而末端较大。因此全射流喷头距喷头相同位置处的动能强度随压力升高而增大，但在 4~8 m 处波动幅度较小。



a. 全射流喷头喷灌强度
a. Precipitation pressure of PXH



b. 全射流喷头动能强度
b. Kinetic energy intensity of PXH

图 4 全射流喷头喷灌强度及动能强度径向分布
Fig.4 Precipitation pressure and kinetic energy intensity radial distribution of PXH

全射流喷头的动能强度波动幅度较小，对土壤表面结构的打击强度较小；而在 0.15 MPa 压力下工作时，射程末端附近动能强度急剧增大，易造成土壤板结、形成地表径流。

2.2.2 组合喷灌动能强度分布均匀性系数

喷灌系统的喷头一般按照正方形和三角形布置，选用 2 种喷头常用工作压力为 0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 MPa，并采用正方形布置。在 3 次样条插值法进行单喷头动能强度数据分析的基础上，采用叠加法计算喷灌系统动能强度，并运用 MATLAB 语言对组合喷灌动能强度均匀系数进行仿真计算。组合间距选取分别为 1.0R、1.1R、1.2R、1.3R、1.4R，其中 R 为喷头射程。计算结果如表 3 所示。

表 3 不同间距下动能强度均匀性系数

Table 3 Uniformity coefficients of kinetic energy intensity under different combination spacings					
压力 Pressure/MPa	组合间距 Combination spacings				
	1.0R	1.1R	1.2R	1.3R	1.4R
0.15	54.8	51.7	56.6	51.9	56.5
0.20	62.1	53.7	60.3	61.9	54.6
0.25	52.5	76.2	63.2	59.9	58.5
0.30	77.2	65.2	59.7	54.8	64.3
0.35	51.7	72.9	63.5	69.7	66.9

注： R 为喷头射程。
Note: R represents the spraying wetted radius.

由表 3 可以看出, 5 种压力下的全射流喷头在不同间距下的组合动能强度均匀系数不同。结果表明, 在所选 5 种组合间距中, 在 0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 MPa 下全射流喷头的最佳组合间距和动能强度分布均匀性系数分别为 1.2R、1.0R、1.1R、1.0R、1.1R 和 56.6%、62.1%、76.2%、77.2%、72.9%。由此可以看出, 随着压力增大, 组合喷灌动能强度分布均匀性系数逐渐增大, 并在 0.3 MPa 时达到最大值。在最佳组合间距下 0.30 MPa 的组合喷灌动能强度三维分布图如图 5 所示。

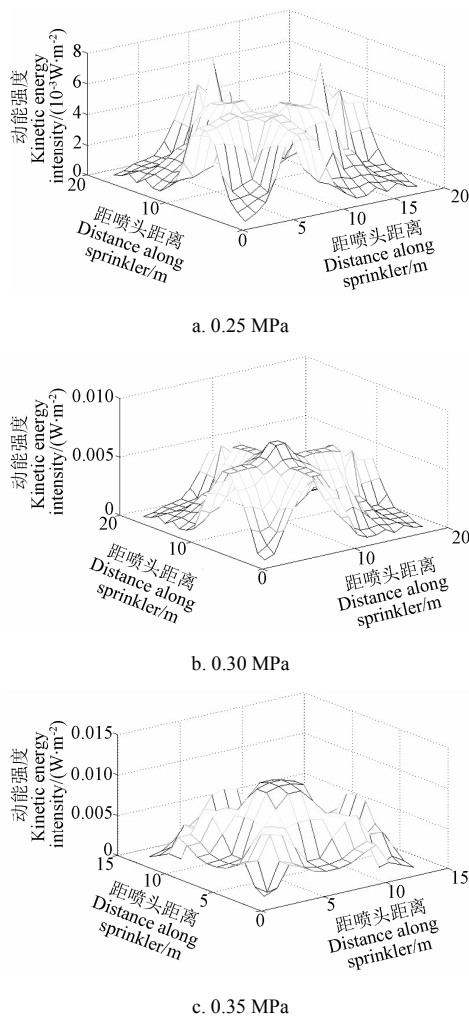


图 5 组合喷灌下动能强度分布

Fig.5 Kinetic energy intensity distribution under different combination spacings under different pressures

在优化设计全射流喷头时应增大近处喷灌强度, 使喷灌强度沿射程方向沿程减小, 避免过大的喷灌强度在射程末端出现, 造成过大动能强度的出现, 以减小喷洒水滴对土壤表面的破坏程度。

3 结论

1) 采用激光雨滴谱仪测量技术对全射流喷头喷洒水滴直径速度及水量分布进行试验, 并建立能准确反映全射流喷头单个水滴动能分布规律的预测模型, 5 种压力下的单个水滴动能与模型拟合的相关系数在 0.9 以上。

2) 建立了全射流喷头单位体积水滴动能、距喷头距离与

工作压力的计算模型, 5 种压力下的水滴动能与距喷头距离呈线性关系, 拟合相关系数在 0.95 左右。各个压力下的单位体积水滴动能在射程末端达最大值, 均随压力升高而增大。

3) 全射流喷头在 5 个压力下的动能强度沿径向的分布趋势相同, 在距喷头 0~8 m 处的喷灌强度随距离增大而增大, 自 8 m 到末端处随距离增大而减小, 沿径向随压力增大而增大。

4) 在 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 工作压力下, 全射流喷头的最佳组合间距和动能强度分布均匀性系数分别为 1.2、1.0、1.1、1.0、1.1 倍喷头射程和 56.6%、71.1%、76.2%、77.2%、72.9%。在优化设计全射流喷头时应增大近处喷灌强度, 进而减小地表径流产生的可能。

【参 考 文 献】

- [1] 袁寿其, 李红, 施卫东, 等. 新型喷灌装备设计理论与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] Kincaid D C. Spray drop kinetic energy from irrigation sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(3): 847—853.
- [3] Yan Haijun, Bai Geng. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed sp ray-plate sprinklers on soil infiltration runoff and sediment yield[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 213—221.
- [4] Bubenzer G D, Jones B A. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall[J]. Transactions of the ASAE, 1971, 14(4): 851—864.
- [5] Thompson A L, James L G. Water droplet impact and its effect on infiltration[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(5): 1506—1510.
- [6] Mohammed D, Kohl R A. Infiltration response to kinetic energy[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(1): 108—111.
- [7] 金兆森, 蒋定生, 刘乐融, 等. 喷洒水滴的测量方法及 PY140 型喷头的水滴特性[J]. 喷灌技术, 1982(2): 13—18
- [8] 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 spray drop kinetic energy from sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1997, 16(2): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘海军, 康跃虎. 喷灌动能对土壤入渗和地表径流影响的研究进展[J]. 灌溉排水, 2002, 21(2): 71—75.
Liu Haijun, Kang Yaohu. Effects of droplets kinetic energy on soil infiltration rate and surface runoff under sprinkler irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(2): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [10] 向清江, 袁寿其, 李红, 等. 全射流喷灌喷头射流元件的流场分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 135—138.
Xiang Qingjiang, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Flow analysis on fluidic element of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 135—138. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘俊萍, 袁寿其, 李红, 等. 全射流喷头射程与喷洒均匀性影响因素分析与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 51—54.
Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Analysis and experiment on influencing factors of range and spraying uniformity for complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 51—54. (in Chinese with English abstract)
- [12] 袁寿其, 朱兴业, 李红, 等. 全射流喷头重要结构参数对水力性能的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 113—116.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Effects of complete fluidic sprinkler on hydraulic characteristics based on some important geometrical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 113—116. (in Chinese with English abstract)

- [13] 朱兴业, 袁寿其, 李红. 全射流喷头与摇臂式喷头的对比试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 70—72, 184.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong. Compared experiments between complete fluidic sprinkler and impact sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 70—72, 184. (in Chinese with English abstract)
- [14] GB/T 22999—2008, 旋转式喷头[S].
- [15] GB/T 27612.3-2011, 水量分布均匀性和试验方法[S].
- [16] 王可法, 张卉慧, 张伟, 等. Parsivel 激光雨滴谱仪观测降水中异常数据的判别及处理[J]. 气象科学, 2011, 31(6): 732—736.
Wang Kefa, Zhang Huihui, Zhang Wei, et al. The detection and elimination of abnormal data for the precipitation observed by Parsivel precipitation particle spectrometer[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31(6): 732—736. (in Chinese with English abstract)
- [17] Schönhuber M, Randeu W L, Urban H E, et al. Field measurements of raindrop orientation angles[J]. ESASP, 2000, 444: 9—14.
- [18] King B A, Winward T W, Bjorneberg D L. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray-plate sprinklers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(2): 263—271.
- [19] Bautista C, Robles H, Salinas E, et al. A particle tracking velocimetry technique for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. Irrigation Science, 2014, 41(4): 602—607.
- [20] 徐红, 龚时宏, 贾瑞卿, 等. 新型 ZY 系列摇臂旋转式喷头水滴直径分布规律的试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1416—1422.
- Xu Hong, Gong Shihong, Jia Ruiqing, et al. Study on droplet size distribution of ZY sprinker head[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1416—1422. (in Chinese with English abstract)
- [21] Bautista-Capetillo C, Zavala M, Playán E. Kinetic energy in sprinkler irrigation: Different sources of drop diameter and velocity[J]. Irrigation Science, 2012, 30(1): 29—41.
- [22] Burillo G S, Delirhasannia R, Playán E. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 39(7): 521—531.
- [23] Thompson A L, Regmi T P, Ghidry F, et al. Influence of kinetic energy on infiltration and erosion[C]// Soil erosion research for the 21st century. Proceedings of the International Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, 3-5 January, 2001. American Society of Agricultural Engineers, 2001: 151—154.
- [24] 袁寿其, 朱兴业, 李红, 等. 基于 MATLAB 全射流喷头组合喷灌计算模拟[J]. 排灌机械, 2008, 26(1): 47—52.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Simulation of combined irrigation for complete fluidic sprinkler based on MATLAB[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [25] 朱兴业, 蒋建园, 刘俊萍, 等. 外取水射流喷头与全射流喷头的比较研究[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(2): 172—178.
Zhu Xingye, Jiang Jianyuan, Liu Junping, et al. Compared between outside signal fluidic sprinkler and complete fluidic sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery, 2015, 33(2): 172—178. (in Chinese with English abstract)

Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler

Zhu Xingye^{1,2}, Liu Xingfa¹, Liu Junping¹, Yuan Shouqi¹, Bao Ya¹

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Irrigated Agriculture Research and Extension Center, Washington State University, Prosser 99350, USA)

Abstract: The kinetic energy of sprinkler spraying is an important factor to evaluate sprinkler hydraulic performance, and has a great significance to study soil and water conservation. The kinetic energy of sprinkler spraying mainly includes the droplet kinetic energy, the kinetic energy per unit volume, the kinetic energy intensity and the uniformity coefficient of kinetic energy intensity. All of them are closely related to the hydraulic parameters of sprinkler. The hydraulic parameters contain the water distribution, the droplet diameter and the droplet velocity. To study the kinetic energy distribution of PXH, PXH10 sprinkler hydraulic parameters were tested under the no wind condition, with the operating pressure of 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 and 0.35 MPa, respectively. The single sprinkler water distribution was measured by catch cans. The catch cans were placed on the testing stand with a spacing of 2 m × 2 m. The laser precipitation monitor (LPM) was used to measure the droplet diameter and velocity. The results showed that the kinetic energy of sprinkler spraying distribution of PXH was different from the other types of sprinklers. The droplet kinetic energy increased with the increase of the droplet diameter. The relationship between droplet kinetic energy and droplet diameter of PXH was indicated by the power function model. The correlation coefficients for the model were up to 0.9 in different pressures. It increased by an average of 20% compared with the other models which were used to show the droplet kinetic energy distribution of PXH. Under different pressures, both the droplet kinetic energy and the kinetic energy per unit volume reached a maximum at the end of the spraying wetted radius. When the pressure increased, the maximum of the kinetic energy per unit volume decreased. The kinetic energy per unit volume increased linearly with the distance from the sprinkler increasing. There were proportional relationships between kinetic energy per unit volume and operating pressures. The proportional function model, which was more appropriate than the exponential function model, could be used to express the distribution of the kinetic energy per unit volume for PXH. The kinetic energy intensity was greatly affected by the water distribution and the kinetic energy per unit volume. The kinetic energy intensity decreased with the operating pressure increasing at the same location. Under the pressure of 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 and 0.35 MPa, the maximum kinetic energy intensity of PXH emerged at the distance of 8, 6, 7, 7 and 8 m, respectively. However, there was little difference between these maximum kinetic energy intensity values. Moreover, the kinetic energy intensity gradually increased with the distance from the sprinkler and rapidly decreased at the end of the sprinkler wetted radius. Under different pressures, uniformity coefficients of kinetic energy intensity about the rectangle combination spacing of PXH were simulated by MATLAB. The rectangle combination spacings were 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 times of the spraying wetted radius of PXH. The simulated results showed that under the operating pressure of 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 and 0.35 MPa, the optimum combination spacings were 1.2, 1.0, 1.1, 1.0 and 1.1 times of the spraying wetted radius, respectively, and the uniformity coefficients of kinetic energy intensity were 56.6%, 71.1%, 76.2%, 77.2% and 72.9%, respectively. The results provide certain academic value for studying the sprinkler external spraying characteristics, and optimizing the sprinkler structure and irrigation system.

Key words: sprinkler system; kinetic energy; spraying; droplet; kinetic energy intensity; uniformity coefficient of kinetic energy intensity