doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.005

动态水压下非旋转式折射喷头水力特性*

葛茂生[1]　吴普特[1,2]　朱德兰[1,2]　张　林[2]　巩兴晖[1]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,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:为解决非旋转式折射喷头水量分布集中,打击动能较大的问题,构建了动态水压喷灌测试平台。选择 Nelson D3000 型喷头为研究对象,施加以三角函数型动态变化的水压,对喷头的径向水量分布与能量分布进行测试,并与恒压条件下的水量和能量分布进行对比。结果表明:构建的动态水压测试平台能够满足对动态供水压力的要求,施加了动态水压的 Nelson D3000 型喷头径向湿润范围由恒压时的 0.85 ~ 1.36 m 增加到 2.55 ~ 4.42 m,喷灌强度最大值降低 67.6% ~ 78.4%,能量通量密度最大值降低 52.9% ~ 71.6%,说明采用动态水压供水可以有效地改善 Nelson D3000 型喷头的径向水量分布和能量分布。

关键词:非旋转式折射喷头　动态水压　水量分布　水滴粒径　能量

中图分类号:S275.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)02-0027-07

Hydraulic Performance of Fixed Spray Plate Sprinkler under Dynamic Water Pressure

Ge Maosheng[1]　Wu Pute[1,2]　Zhu Delan[1,2]　Zhang Lin[2]　Gong Xinghui[1]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to improve the sprinkler application rate and kinetic energy distribution of fixed spray plate sprinkler, a dynamic water pressure based sprinkler test platform was built. A Nelson D3000 nozzle was selected and then the water application rate and kinetic energy distribution in radial direction were tested under both dynamic water pressure in trigonometric type and constant pressure. The results showed that the test platform could well meet the demands of dynamic water pressure. The wetness area of Nelson D3000 nozzle in radial direction increased from 0.85 ~ 1.36 m to 2.55 ~ 4.42 m. The maximum value of sprinkler application rate was reduced by 67.6% ~ 78.4%, and the maximum value of energy density flux was reduced by 52.9% ~ 71.6%. Both the sprinkler application rate and kinetic energy distribution of Nelson D3000 nozzle were effectively improved.

Key words: Fixed spray plate sprinkler　Dynamic water pressure　Application rate　Droplet diameter　Kinetic energy

引言

非旋转式折射喷头是一种被广泛应用于中心支轴式喷灌机上的喷头。该类型喷头具有能耗低、价格优惠等优点,但是也存在射流碎裂不充分,水量分布集中的缺点,虽然其喷洒半径可达 6.0 m 左右,但降水一般散落在 1.0 ~ 1.5 m 的湿润区域内,局部地区易发生降水强度过高或打击动能过大[1-2],导致土壤侵蚀和地表径流的发生。如何有效改善非旋转式折射喷头的水量分布和能量分布具有重要的研究价值。

为提高喷头的喷洒均匀度,国外研发了具有更

收稿日期:2014-01-11　修回日期:2014-02-14

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B00)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目

作者简介:葛茂生,博士生,主要从事节水灌溉新技术研究,E-mail:gmsnongshui@sina.com

通讯作者:吴普特,研究员,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究,E-mail:gizwpt@vip.sina.com

大射程的旋转式折射喷头,该喷头的水量分布与能量分布相对均匀[3-7],但需要更高的工作压力,能耗相对较高。变量喷洒是一种可以有效调节喷洒域的精确灌溉技术,喷洒过程中水量随着射程的变化而变化[8]。袁寿其等[9]在摇臂式喷头基础上安装动静片并改装异形喷嘴装置,研制了一种新型的异形喷嘴变量喷洒喷头;韩文霆等[10]通过变量喷洒组合喷灌试验研究了变量调节器对喷头性能的影响;国外也有学者从改变喷头流道结构的角度研发出不同的变量喷头模型[11-12]。改变喷嘴或流道结构的工作使喷头加工工艺更加复杂,造成生产成本的增加。

国内外学者在喷头变量喷洒上进行了一系列探索,但大多从改变喷嘴结构入手实现变量喷洒,而采用动态水压改变喷头喷洒水力特性的研究较少。本文通过施加周期性动态水压的方法实现普通非旋转式折射喷头的变量喷洒,以期达到改善其水量分布和能量分布均匀性的目的。

1 材料与方法

1.1 动态水压生成装置

动态水压的生成由可编程逻辑控制器 PLC、变频器和水泵实现。将希望得到的动态水压模式的实现程序输入 PLC 对变频器进行控制,从而控制加压水泵的运行频率,水泵电动机变转速运行产生动态的水压。通过动压参数设置,可以设定水压的极大值和极小值,同时也可以调整动压周期。本研究采用的动压类型是三角函数动态水压供水模式,其喷头流量与出口压力随时间的变化关系如图 1 所示。

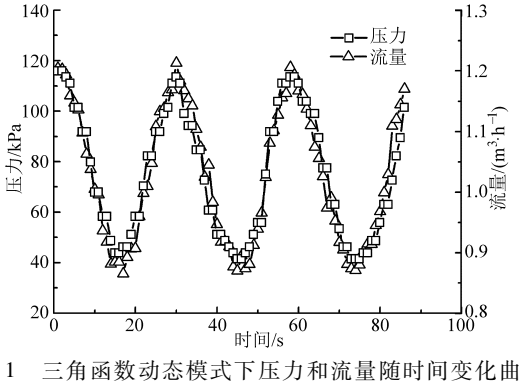

图 1 三角函数动态模式下压力和流量随时间变化曲线

Fig. 1 Variation curves of pressure and flow rate *vs* time under trigonometric dynamic mode

1.2 试验设计

1.2.1 试验平台

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉水力学实验厅进行,为开展动态水压供应下喷头射流特性的试验研究,构建了如图 2 所示的动态水压喷灌测试平台。试验用喷头为 Nelson D3000 型喷头(Nelson Irrigation Co., Walla Walla),喷嘴直径 4.76 mm,喷盘采用 36 沟槽蓝色喷盘,如图 3 所示,喷头距地面高度为 1.95 m;压力传感器位于喷头上方 0.20 m 处,压力传感器采用西安新敏电子科技有限公司生产的 CYB13I 型压力变送器(量程0 ~ 0.6 MPa,精度 0.1%,输出信号 4 ~ 20 mA);电磁流量计采用 EMF5000 型电磁流量计(量程 0.289 5 ~ 28.95 m^3/h),水泵选用功率为 2.2 kW 的管道式离心泵;上游水库容积为 20 m^3。

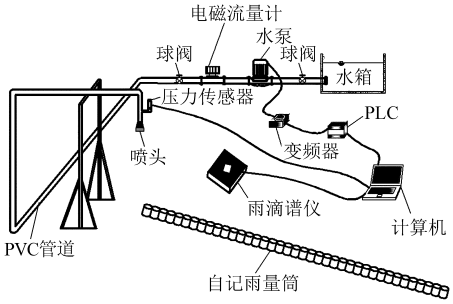

图 2 动态水压喷灌测试平台装置示意图

Fig. 2 Layout of test platform



图 3 试验采用的喷头及其喷盘

Fig. 3 Sprinkler nozzle and plate used in experiment

1.2.2 试验设计

三角函数动态输出频率(下文简称 *D*)选取 10.0 ~ 17.3 Hz、13.6 ~ 21.0 Hz 和 13.6 ~ 24.7 Hz,周期为 30 s;作为对照,恒压输出频率(下文简称 *C*)选取 13.6 Hz、17.3 Hz 和 19.2 Hz,各频率对应的输出压力如图 4 所示,动态水压输出呈规律的三角函数曲线,周期为 30 s。根据压力波动特征参数将其满足的三角函数公式统计入表 1,监测动态水压及其对应恒定水压下喷头的平均流量,一并计入表 1。由表 1 可知,动态水压与恒定水压下平均流量偏差率在 2% 以内,说明在相同时段内 2 种供水方式下的出水量相同,避免了流量差异对试验结果的影响。因此,试验处理采用 3 组三角函数动态水压并以相应的恒定水压作为对照,处理设置分别为,处理Ⅰ:11.5 ~ 68.5 kPa, CKⅠ: 38.5kPa; 处理Ⅱ: 38.5 ~ 116.3 kPa,CKⅡ: 68.5 kPa;处理Ⅲ:38.5 ~ 142.3 kPa, CKⅢ:84.8 kPa。

1.3 测量方法

1.3.1 喷灌强度测试

D3000 型喷头射流以股状水流向外射出,水流股数与喷盘流道数目相同且水流破碎不明显,每股

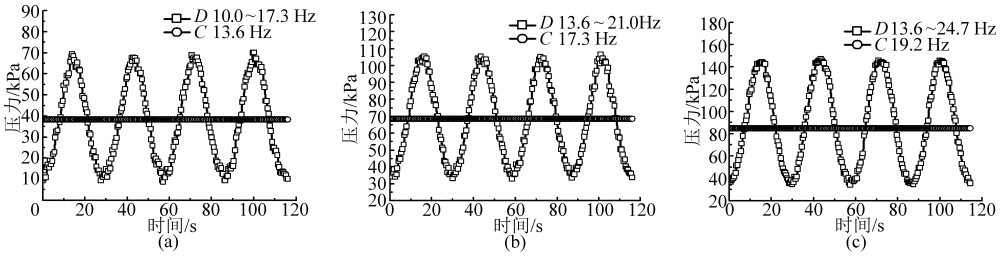

图 4　三角函数动态频率与恒定频率下的压力随时间变化规律

Fig. 4　Variation of pressure *vs* time under trigonometric dynamic frequency and constant frequency

(a) 处理Ⅰ和 CKⅠ　(b) 处理Ⅱ和 CKⅡ　(c) 处理Ⅲ和 CKⅢ

表 1　动压与恒压供水模式下的平均流量及其偏差率

Tab. 1　Average flow rate and deviation rate under dynamic and constant water pressure

处理	输出频率/Hz	水压随时间变化规律	压力/kPa	平均流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	流量偏差率/%
Ⅰ	10.0 ~ 17.3	$p = 28.5\sin\left(\frac{\pi}{15}t + \frac{3}{2}\pi\right) + 40.0$	11.5 ~ 68.5	0.647	
CKⅠ	13.6		38.5	0.654	1.07
Ⅱ	13.6 ~ 21.0	$p = 38.9\sin\left(\frac{\pi}{15}t + \frac{3}{2}\pi\right) + 77.4$	38.5 ~ 116.3	0.836	
CKⅡ	17.3		68.5	0.843	0.83
Ⅲ	13.6 ~ 24.7	$p = 51.9\sin\left(\frac{\pi}{15}t + \frac{3}{2}\pi\right) + 90.4$	38.5 ~ 142.3	0.933	
CKⅢ	19.2		84.8	0.916	1.86

注：p 表示压力，kPa；t 表示时间，s。

水流相对独立[13]。本研究假设各股水流的水量分布都相同，因此只针对 1 条流道的出射水流进行研究，雨量筒沿射流方向径向紧密布置。所用雨量筒为 HOBO RG3 - M 型自记雨量筒（精度 ±1%，分辨率为 0.02 mm），筒高 25.7 cm，内径 15.2 cm，外径 17.0 cm，沿射流方向每隔 17 cm 布置 1 个测点，共布置 45 个测点，每次测量时间为 1 h，重复进行 3 次。

1.3.2　水滴粒径与速度测试

水滴粒径与速度的测量选用奥地利 Joanneum Research 公司生产的 2D 视频水滴谱仪（下文简称 2DVD）。该仪器通过 2 个摄像头对通过测试区域内的雨滴进行线性扫描，可对降水过程中的降水总量、强度、单个水滴尺寸、速度以及入射角进行精确定量的监测与记录，测定水滴的最小直径为 0.19 mm，垂直速度精度为 ±4%，测量区域为 100 mm × 100 mm。2DVD 沿喷头射流方向径向布置，如图 5 所示，水量分布较少的区域采用 0.5 m 间距布设测点，降水集中区域对测点进行局部加密，各测点的测量时间为 3 min，设置 3 次重复。

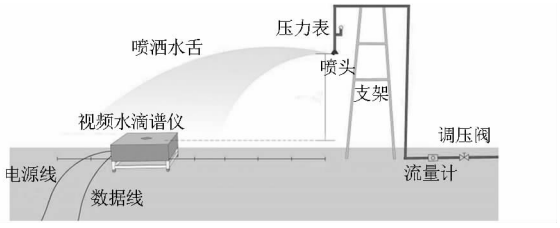

图 5　水滴粒径与速度测试平台布置示意图

Fig. 5　Layout of droplet diameter and velocity test platform

2　结果与分析

2.1　径向喷灌强度

径向喷灌强度反映了喷头沿射程方向的水量分布，是评价喷头喷洒效果的重要特征参数。由自记雨量筒采集的数据得到各测点的平均喷灌强度，各处理径向喷灌强度的分布如图 6 所示。从图中可以看出，恒定水压为 38.5 kPa 时，水量分布非常集中，呈瘦高型的三角形分布，绝大多数的水量集中分布在距原点 2.89 ~ 3.74 m 的区域内，最大喷灌强度达到 197.4 mm/h，这是因为非旋转式折射喷头在恒压条件下射流碎裂不充分，喷射主流分布在 1 m 左右的有限区域内，灌水量呈面包圈状分布，这与 Faci 等[3]的描述一致。采用动态水压 11.5 ~ 68.4 kPa 时，水量分布均匀性相比恒压情况下好，呈上边两端略微凸起的梯形，集中分布在 2.04 ~ 4.76 m 的区域内，喷灌强度为 25 ~ 35 mm/h，两端最大的喷灌强度在 40 mm/h 左右，这是由于在动态水压下，喷头出水口处压力呈三角函数周期性振荡，出射水流的射程也呈周期性变化，使得喷射主流均匀地扫过射程的极大值与极小值之间的区域。根据试验假定，各流道射出水流的水量相同，动态水压和恒定水压下相同时间内的出流量也相同，可以认为动态水压和恒定水压下相同时间内通过单流道射出的水量近似

相等,即图 6a 中 2 条水量分布曲线与横轴所构成的 2 个封闭区域的面积是相等的。在相同喷洒水量的条件下,动态水压供水水量分布更加均匀,平均喷灌强度也相应减小。将喷灌强度大于 5 mm/h 的区域定为有效降水区域,则恒压情况下有效喷灌区域跨度为 0.85 m,动态水压下有效喷灌区域跨度为 2.72 m。动态水压下有效喷灌区域跨度较恒压时增加 220%,最大喷灌强度由恒压时的 197.4 mm/h 降低到 42.6 mm/h,下降了 78.4%。

处理Ⅱ和Ⅲ的试验结果与处理Ⅰ所呈现的规律基本相同。除符合上述规律外,随压力的增加喷头射程和喷射水流的碎裂程度略有增加。恒定水压为 38.5、68.5 和 84.8 kPa 时对应的有效喷灌区域分别为 0.85、1.19 和 1.36 m。这是因为压力升高时水流射出的初始速度增大,使得水舌在空中运行的距离增加,掺气更加充分,导致了水流碎裂程度的增加。此外,图 6b 与图 6c 中动态水压波动振幅由 77.8 kPa 增加到 103.8 kPa,相应地有效喷灌区域跨度由 2.55 m 增大到 4.42 m,这是因为动态水压波动振幅越大,喷射主流在压力最小值与最大值对应位点之间均匀扫过的区域越大,有效喷灌区域的跨度越大。平均喷灌强度随有效降水区域跨度的增大而减小,当喷灌强度低于土壤的水分入渗速度时便不易产生地表径流。

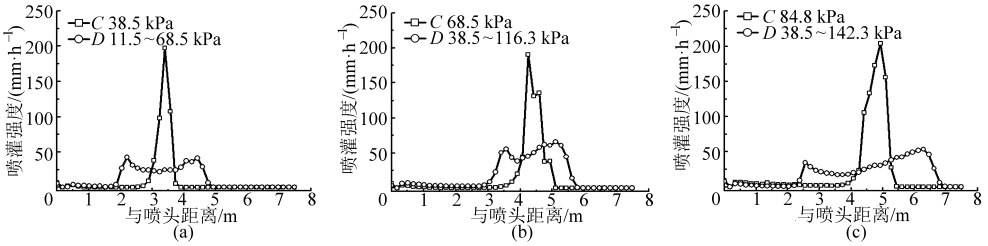

图 6 动态供水与恒压供水条件下水量分布

Fig. 6 Radial distribution under dynamic and constant water pressure

(a) 处理Ⅰ和 CKⅠ (b) 处理Ⅱ和 CKⅡ (c) 处理Ⅲ和 CKⅢ

2.2 粒径分布

水滴粒径分布是反映喷头喷洒效果的重要特征参数之一,对喷洒的水量分布和能量分布产生直接的影响,因此有必要对不同供水模式下的粒径分布特征进行比较。

水流从喷盘射出后碎裂成的水滴个数极多,每个测点处的水滴直径都有较大的变化范围;为比较不同供水模式下沿径向水滴粒径的变化趋势,采用平均水滴直径表征单个测点的水滴粒径值。水滴平均粒径的常用表示方法有算术平均值 $\bar{d}$、体积加权平均值 d_v 和中数粒径值 d_{50}。体积加权平均值 d_v 能够较好地反映水滴的粒径分布规律[14],即

$$d_v = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^4}{\sum_{i=1}^{n} d_i^3} \tag{1}$$

式中 n——测点水滴总个数

d_i——第 i 个水滴的直径,mm

图 7 为动态水压供水与恒压供水条件下水滴粒径分布。由图 7a 可知,动态水压供水与恒压供水条件下沿射程方向水滴粒径分布有明显的差异:恒压条件下沿射流方向水滴平均粒径逐渐增大,呈指数函数分布;动压条件下射流方向水滴平均粒径在距喷头一定范围内在某一粒径值附近波动,将该区域称为等效粒径区。处理Ⅰ中,2~4 m 射程范围内的平均水滴粒径值几乎没有增长,在 1.7~1.9 mm 内波动。处理Ⅱ和处理Ⅲ中存在类似现象:处理Ⅱ的等效粒径区出现在 3.5~4.8 m 射程范围内,平均粒径值在 1.7~1.8 mm 内波动;处理Ⅲ的等效粒径区出现在 3.5~5.5 m 射程范围内,平均粒径值在 1.7~1.9 mm 区间内波动。这与动压条件下的射流运动规律有关,由于射流水舌随喷头出口压力的波动而扩张和收缩,水舌周期性的从等效粒径区扫过,此过

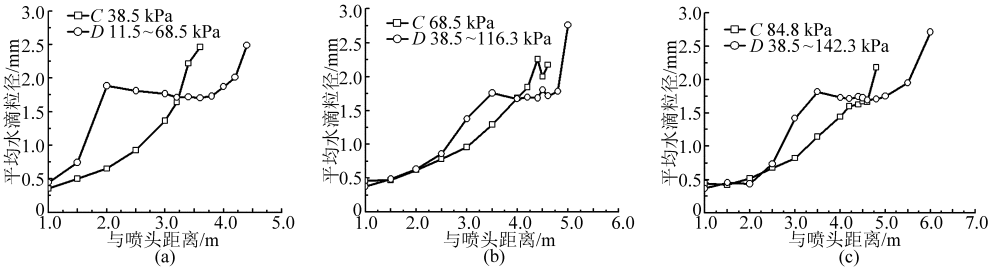

图 7 动态供水与恒压供水条件下水滴粒径分布

Fig. 7 Droplet diameter distribution under dynamic and constant water pressure

(a) 处理Ⅰ和 CKⅠ (b) 处理Ⅱ和 CKⅡ (c) 处理Ⅲ和 CKⅢ

程中不同粒径的雨滴均会落入该区域，因此等效粒径区内的水滴粒径分布应比恒压条件时水滴粒径分布均匀。

为进一步分析不同供水模式下水滴粒径的分布规律，以处理Ⅰ中与喷头距离 2.5 m 和 3.2 m 测点为例，绘制这 2 个测点的粒径频率直方图如图 8 所示。与喷头距离 2.5 m 测点处，恒定水压条件下粒径在 1.0～1.2 mm 的水滴数占总数的 81%，而在动态水压条件下水滴粒径分布更加均匀，粒径在 1.5 mm 以上的水滴占水滴总数的 56%，因此在图 7a 中，与喷头 2.5 m 处动态水压条件下的平均水滴粒径约为恒定水压供水条件下平均水滴粒径的 3 倍。与喷头距离 3.2 m 测点处，只从图 7a 来看，2 种供水方式下平均粒径值几乎相等，分别为 1.64 mm 和 1.71 mm；结合图 8b 可知动压条件下水滴粒径分布较恒压条件下粒径分布更加均匀，动压条件下水滴粒径值在 1.0～1.8 mm 范围内的水滴占总数的 46%，恒压条件下仅为 22%。

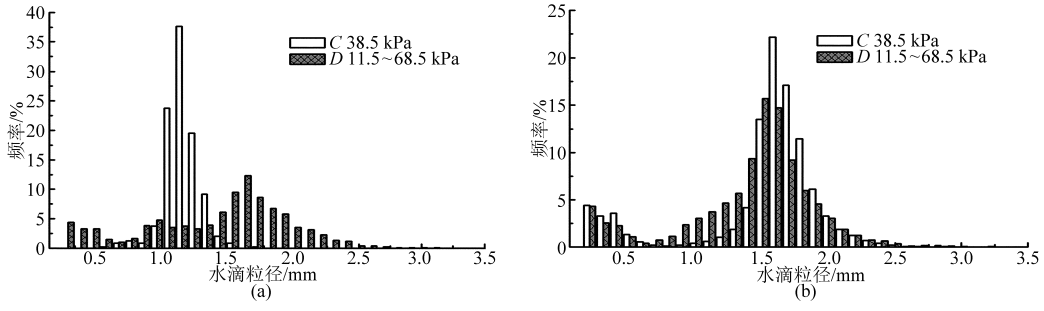

图 8　处理Ⅰ条件下距喷头 2.5 m 和 3.2 m 处水滴粒径频率直方图

Fig. 8　Droplet diameter frequency histograms at the location of 2.5 m and 3.2 m from the nozzle of treatment Ⅰ

(a) 距喷头 2.5 m　(b) 距喷头 3.2 m

2.3　能量分布

降水动能一般取决于水滴的粒径、速度以及水滴密度。一些学者的研究[15-17]认为能量通量密度能够较好地反映喷灌系统中水滴的能量分布，即为

$$E_f = \frac{1\,000\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{24}\pi d^3\rho v^2}{At} \tag{2}$$

式中　E_f——能量通量密度，W/m^2

v——第 i 个水滴速度，m/s

ρ——水的密度，kg/m^3

A——2DVD 有效测试面积，mm^2

t——测试时间，s

各测点的水滴数目，以及由式(1)和式(2)计算得到的平均粒径值与能量通量密度如表 2 所示。从不同压力以及供压方式下水滴数的分布来看，恒压供水模式下水滴数目沿径向一般有 2 个峰值，第 1 个峰值出现在喷头附近，主要是因为在喷头附近往往会产生雾化现象，生成较多微小粒径的水滴，这些雾化小水滴水平速度较小，散落在喷头附近区域。这部分水滴对于水量和能量的分布几乎没有贡献，反而会引起较大的蒸发漂移损失；第 2 个峰值出现在水量集中分布的区域，由所在区域高强度的降水引起。动态水压供水模式下水滴数的分布没有出现恒压条件下突出的峰值，尤其是前文提到的等效粒径区内雨滴数目的分布非常均匀。

动压供水与恒压供水条件下水滴的能量分布如图 9 所示，从图中可以看出，2 种供水方式下的能量分布规律与能量分布比较类似，恒压供水时能量集中分布在 1 m 左右的狭窄区域，存在明显的 E_f 的峰值，最大值超过了 1.1 W/m^2；采用动压供水模式后，在能量分布上起到了均一化的效果，E_f 最大值分别由 0.74、1.12 和 0.87 W/m^2 降低到 0.21、0.39 和 0.41 W/m^2，降低幅度达到 71.6%、65.2% 和 52.9%，最大值出现在喷洒湿润区域的外缘处，这是因为越靠近外缘，水滴平均粒径越大。

当 $E_f > 0.6$ W/m^2 时，水滴达到天然降水的暴雨级别[18]，这种条件下的水滴会对地表土壤产生较大的冲击，导致表层土壤孔隙封闭，降低土壤水分的入渗能力，诱发地表径流的产生。由于这些区域往往又伴随着较高的降水强度，局部地区降水强度超过 200 mm/h，促进了地表径流的产生，在局部低洼的地区还会产生积水；此外较强的水滴打击能量对表层土粒结构造成破坏，引发地表土壤颗粒运移，造成土壤侵蚀。上述问题是非旋转式折射喷头较大的缺陷，在工程实际中经常出现，尤其在低压、黏性土壤条件下问题更为突出，这在喷头型号、喷嘴尺寸以及工作压力的选择上产生了很大的限制。采用动态水压供水有效增大了喷头的喷洒湿润面积，降低了能量通量密度的最大值，使喷灌降水过程更加温和，避免了地表径流和土壤侵蚀现象的发生。

3　结论

(1) 采用 PLC 技术构建的动态水压供水系统运行稳定，能够较好地满足预期压力要求。

(2) 将动态水压应用于非旋转式折射喷头，使

表 2 各测试条件下水滴数、平均粒径和能量通量密度

Tab. 2 Droplet numbers, average droplet diameter and energy density flux of each test

恒压/kPa	距离/m	水滴数	d_v/mm	E_f/(W·m^{-2})	动压/kPa	距离/m	水滴数	d_v/mm	E_f/(W·m^{-2})
	1.0	8 714	0.36	0		1.0	6 430	0.44	0
	1.5	3 055	0.50	0		1.5	1 139	0.75	0
	2.0	912	0.65	0		2.0	5 613	1.89	0.079
	2.5	476	0.93	0.001		2.5	3 401	1.81	0.043
	3.0	7 282	1.36	0.041		3.0	5 270	1.77	0.071
	3.2	55 114	1.64	0.739		3.2	6 930	1.72	0.086
38.5	3.4	17 715	2.22	0.298	11.5~68.5	3.4	8 686	1.72	0.109
	3.6	1 207	2.46	0		3.6	11 821	1.71	0.154
	3.8	0	0	0		3.8	11 819	1.73	0.154
	4.0	0	0	0		4.0	11 356	1.88	0.209
	4.2	0	0	0		4.2	6 978	2.01	0.019
	4.4	0	0	0		4.4	453	2.49	0.002
	4.6	0	0	0		4.6	0	0	0
	1.0	4 657	0.47	0		1.0	7 582	0.38	0
	1.5	3 058	0.47	0		1.5	3 227	0.49	0
	2.0	1 589	0.62	0		2.0	1 373	0.64	0
	2.5	1 954	0.78	0.001		2.5	856	0.86	0.001
	3.0	730	0.96	0.001		3.0	3 530	1.38	0.019
	3.5	5 403	1.29	0.028		3.5	11 680	1.76	0.133
	4.0	44 690	1.69	0.673		4.0	13 204	1.67	0.147
68.5	4.2	52 166	1.84	1.003	38.5~116.3	4.2	17 096	1.69	0.215
	4.4	39 823	1.94	1.051		4.4	18 351	1.69	0.235
	4.5	47 075	2.00	1.123		4.5	17 470	1.81	0.256
	4.6	5 275	2.18	0.005		4.6	19 742	1.71	0.317
	4.8	0	0	0		4.8	22 521	1.78	0.394
	5.0	0	0	0		5.0	5 293	2.76	0.065
	5.5	0	0	0		5.5	0	0	0
	6.0	0	0	0		6.0	0	0	0
	1.0	9 254	0.44	0		1.0	7 728	0.37	0
	1.5	4 824	0.43	0		1.5	7 667	0.45	0
	2.0	2 708	0.51	0		2.0	7 377	0.44	0
	2.5	1 155	0.68	0		2.5	1 412	0.73	0
	3.0	896	0.82	0.001		3.0	2 952	1.42	0.017
	3.5	1 942	1.14	0.006		3.5	3 319	1.82	0.049
	4.0	19 814	1.44	0.167		4.0	9 054	1.73	0.125
	4.2	44 987	1.60	0.582		4.2	11 928	1.71	0.161
84.8	4.4	41 330	1.62	0.548	38.5~142.3	4.4	12 171	1.74	0.180
	4.5	53 070	1.68	0.797		4.5	13 034	1.72	0.201
	4.6	61 455	1.66	0.869		4.6	13 128	1.69	0.180
	4.8	36 071	2.19	0.091		4.8	14 478	1.70	0.205
	5.0	0	0	0		5.0	17 561	1.75	0.305
	5.5	0	0	0		5.5	16 426	1.95	0.409
	6.0	0	0	0		6.0	1 375	2.71	0.021
	6.5	0	0	0		6.5	0	0	0

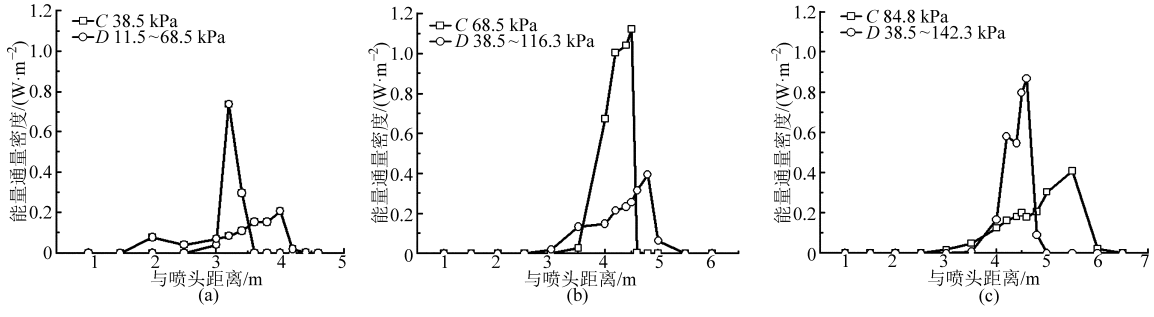

图 9 动态水压与恒定水压条件下水滴的能量分布

Fig. 9 Kinetic energy distribution of droplets under dynamic and constant water pressure

(a) 处理Ⅰ和 CKⅠ (b) 处理Ⅱ和 CKⅡ (c) 处理Ⅲ和 CKⅢ

径向湿润范围由恒压时的 0.85 ~ 1.36 m 增加到 2.55 ~ 4.42 m，喷灌强度最大值降低了 67.6% ~ 78.4%，同时使得单喷头有效湿润面积增加，湿润区域内水量均匀分布，平均降水强度显著降低。

（3）动态水压应用于非旋转式折射喷头后，水滴粒径沿射程方向分布更加均匀，平均水滴粒径在一定区域内出现等效粒径区。

（4）动态水压应用于非旋转式折射喷头后，能量分布规律与水量分布规律相似，湿润区域内能量分布更加均匀，能量通量密度 E_f 的最大值降低了 52.9% ~71.6%。

参 考 文 献

1 Levy G J, Ben-Hur M, Agassi M. The effect of polyacrylamide on runoff, erosion, and cotton yield from fields irrigated with moving sprinkler systems[J]. Irrigation Science, 1991, 12(2): 55 – 60.

2 King B A, Bjorneberg D L. Evaluation of potential runoff and erosion of four center pivot irrigation sprinklers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(1): 75 – 85.

3 Faci J M, Salvador R, Playán E, et al. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(4): 224 – 233.

4 Sourell H, Faci J M, Playán E. Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 376 – 380.

5 DeBoer D W. Drop and energy characteristics of a rotating spray-plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(3): 137 – 146.

6 Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed spray-plate sprinklers on soil infiltration, runoff and sediment yield[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 213 – 221.

7 Burillo G S, Delirhasannia R, Playán E, et al. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(7):521 – 531.

8 韩文霆. 变量喷洒可控域精确灌溉喷头及喷灌技术研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学, 2003.

9 袁寿其, 魏洋洋, 李红, 等. 异形喷嘴变量喷头结构设计及其水量分布试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):149 – 153.
Yuang Shouqi, Wei Yangyang, Li Hong, et al. Structure design and experiments on the water distribution of the variable-rate sprinkler with non-circle nozzle[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):149 – 153. (in Chinese)

10 韩文霆,姚小敏,朱冰钦,等. 变量喷洒喷头组合喷灌试验[J]. 农业机械学报,2013, 44(7):121 – 126.
Han Wenting, Yao Xiaomin, Zhu Bingqin, et al. Test and evaluation on variable-rate irrigation sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):121 – 126. (in Chinese)

11 King B A, Kincaid D C. A variable flow rate sprinkler for site-specific irrigation management[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(6): 765 – 770.

12 Armindo R A, Botrel T A, Garzella T C. Flow rate sprinkler development for site-specific irrigation[J]. Irrigation Science, 2011, 29(3): 233 – 240.

13 Clark G A, Srinivas K, Rogers D H, et al. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 321 – 330.

14 李久生. 谈平均水滴直径的计算方法[J]. 喷灌技术, 1987(4): 21 – 23.

15 DeBoer D W, Monnens M J, Kincaid D C. Measurement of sprinkler droplet size[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(1): 11 – 15.

16 Yan H J, Jin H Z, Qian Y C. Characterizing center pivot irrigation with fixed spray plate sprinklers[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(5): 1398 – 1405.

17 Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed spray-plate sprinklers on soil infiltration, runoff and sediment yield[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 213 – 221.

18 Thompson A L, Regmi T P, Ghidey F, et al. Influence of kinetic energy on infiltration and erosion[C]// Soil Erosion Research for the 21st Century: Proceedings of the International Symposium, 2001: 151 – 154.