排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 10 月 Oct. 2015 | 第 33 卷 第 10 期 Vol. 33 No. 10

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0149

基于 LPM 的摇臂式喷头水滴分布试验研究

朱兴业，刘兴发，刘俊萍，蒋建园，田坤
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）


朱兴业

摘要：为了研究旋转式喷头水滴直径、速度及动能的分布规律，采用激光雨滴谱仪（Laser Precipitation Monitor，LPM）对 3026B 型摇臂式喷头分别在 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa 这 5 种工作压力下进行了室内无风水滴分布试验，并根据最小二乘法原理建立了水滴分布数学模型. 试验结果表明：3026B 型摇臂式喷头的喷洒水滴直径与喷头距离之间总体上呈指数函数分布；直径为 1～3 mm 的水滴在 5 种压力下占整个喷洒区域的频率分别为 56.80%，64.35%，72.14%，61.72%，40.17%；距喷头不同距离的水滴累积频率曲线斜率随着压力的增加逐渐减小；水滴速度与直径呈对数函数分布；水滴动能与喷头距离呈指数函数分布，其相关系数在 0.800 以上. 压力对近处水滴直径、速度及动能的分布规律影响较小，对远处的影响较大.

关键词：摇臂式喷头；激光雨滴谱仪；水滴速度；水滴直径；水滴动能
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)10-0908-07

朱兴业，刘兴发，刘俊萍，等. 基于 LPM 的摇臂式喷头水滴分布试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(10)：908-914.

Zhu Xingye，Liu Xingfa，Liu Junping，et al. Droplets distribution research of impact sprinkler based on Laser Precipitation Monitor [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2015，33(10)：908-914.(in Chinese)

Droplets distribution research of impact sprinkler based on Laser Precipitation Monitor

Zhu Xingye，*Liu Xingfa*，*Liu Junping*，*Jiang Jianyuan*，*Tian Kun*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：In order to research the droplet distribution of rotating sprinkler，droplet diameter and droplet velocity of 3026B impact sprinkler were measured by Laser Precipitation Monitor. The experiment was applied under the operating pressure of 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa with no wind. Droplets mathematical models were built based on the method of least squares. The results show that the relationships between droplets diameter and the distance along the sprinkler were indicted by exponential function，except the droplets at 4 meters from the sprinkler. The droplets frequency were up to 56.80%，64.35%，72.14%，61.72%，40.17% respectively，under the operating pressures of 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa. The droplets frequency was the ratio of the droplets volume that diameter between in 1-3 mm to all the droplets in the whole spray area. The slope of droplets diameter cumulative frequency curve decreased with the operating pressure increasing. The relation between droplet velocity and droplet diameter were indicted by linear function model built. There were exponential rela-

收稿日期：2014-09-15；**网络出版时间**：2015-09-29
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150929.2112.026.html
基金项目：国家 863 计划项目(2011AA100506)；国家自然科学基金资助项目(51309117)；中国博士后科学基金特别资助项目(2014T70484)
作者简介：朱兴业(1982—)，男，浙江永康人，副研究员，博士(zhuxy@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及排灌机械研究.
刘兴发(1990—)，男，重庆云阳人，硕士研究生(liuxingfadream@163.com)，主要从事流体机械及排灌机械研究.

tionships between droplet kinetic energy and the distance along the sprinkler and the correlation coefficient were higher than 0.800.

Key words: impact sprinkler; Laser Precipitation Monitor; droplet velocity; droplet diameter; droplet kinetic energy

喷头喷洒水滴直径和降落速度是评价喷灌系统质量的重要指标，对喷头的水力性能及喷洒效果有重要影响[1-3]. 因此，研究喷头喷洒水滴分布规律对水土保持及农作物生长具有重要意义，喷头喷洒的水滴直径、水滴速度及水滴动能等参数的分布规律研究对喷灌系统的评价及喷洒效果的预测具有重要作用.

自 18 世纪末以来，国内外许多学者对喷洒水滴直径做了大量研究. Bautista 等[4-5]采用粒子追踪技术研究了喷灌喷头的喷洒水滴分布特性，对比了不同喷洒水滴测试方法对喷头喷洒水滴分布规律的影响. 徐红等[6-7]研究了水滴直径分布，得到了整个喷洒区域的水滴直径正态分布模型、平方根正态分布模型、对数正态分布模型、上限对数正态分布模型(简称 ULLN)等. Yan 等[8]利用弹道模型对水滴速度及水滴动能做了相关的研究. 然而上述研究成果未能描述距喷头不同距离处的水滴直径分布规律，明确水滴直径、水滴速度以及水滴打击动能三者之间的关系，未能满足深入研究水滴破碎机理、水量分布模型、水滴运动模型等方面对这部分基础理论的要求.

文中以摇臂式喷头为例，采用激光雨滴谱仪对水滴直径及速度分布进行试验，系统总结水滴打击动能、水滴直径及水滴速度的径向分布规律，并探讨水滴速度、水滴打击动能与水滴直径三者之间的关系，为进一步研究喷射水舌破碎机理及喷头外部流场数值仿真提供参考.

1　材料与方法

1.1　激光雨滴谱仪测量原理

ThiesClima 激光雨滴谱仪是德国制造的精密探测地面降水粒子的新一代仪器，其结构如图 1 所示.

激光雨滴谱仪由激光发射源、接收端、控制运算存储电路等部分组成. 激光雨滴谱仪由激光发射源发射一组平行光束，通过位于接收端的光电二极管测量光强并把它转换成电信号来测量水滴信息. 当水滴穿过激光束时会遮挡一部分激光光束，从而使接收端的电压信号发生变化. 控制运算存储电路，利用减小的振幅计算出水滴直径，通过减小信号的持续时间来计算水滴的下降速度. 激光雨滴谱仪还可以对所测得的水滴体积进行累计从而计算出降雨强度并进行必要的分析，绘出水滴谱图. 水滴谱图可以显示出水滴大小范围、水滴速度范围和相应的粒子个数，每分钟数据以 Excel 表格形式输出. 其测试区域为 46 cm^2(23.0 cm × 2.0 cm)，测量粒径范围 0.16 ~ 8.00 mm；粒子速度范围 0.2 ~ 20.0 m/s；测量降水强度范围 0.005 ~ 250.000 mm/h[9]. 图 2 为激光雨滴谱仪的水滴谱分析图. 同常用的测量水滴直径的色斑法、面粉法[10-12]等相比具有处理数据方便、实时监测、能同时测量水滴速度和直径等优点.

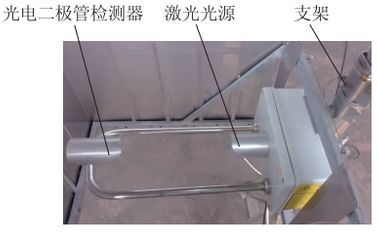


图 1　激光雨滴谱仪结构图
Fig. 1　Structure of LPM

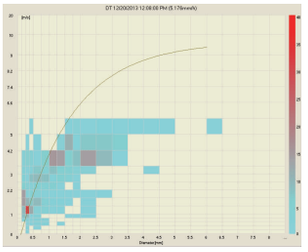


图 2　激光雨滴谱仪水滴谱图
Fig. 2　Droplet spectra of LPM

1.2　试验方案及数据处理

文中采用 LPM 对 3026B 型摇臂旋转式喷头在江苏大学无风试验厅内进行全圆喷洒水滴试验，喷头为单喷嘴喷头，安装高度为 1.4 m，圆形喷嘴直径为 4 mm. 喷头稳定运转 10 min 之后，分别在 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa 工作压力下，从距喷头 1 m 处到喷洒射程范围内以 1 m 间距进行水滴试验，每种压力下每测点重复测量 4 次. 喷头压力由 0.4 级的精密压力表读出，流量由 0.5 级精度的电磁流

量计测量.

本试验通过 LPM 采集了大量数据,为了减小由于测量粒子飞溅等原因造成的偶然误差、边缘效应误差,文中根据喷灌喷头的喷洒水滴直径与喷洒水滴落地速度之间的关系,采用随机误差正态分布规律的"3σ"准则分别对各直径级的速度值所对应粒子数进行统计检验,判别并剔除其粗大误差,同时舍去直径级测量的水滴数量少于 15 滴的数据[13].

已有研究表明用体积加权法计算水滴平均直径更符合实际情况,因此文中采用体积加权法计算某测点处的水滴平均直径,计算公式为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i d_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \tag{1}$$

$$W_i = \frac{n_i \rho \pi d_i^3}{6}, \tag{2}$$

式中:i 为水滴直径组名;n 为水滴直径分级数;d_i 为第 i 组水滴对应的直径;W_i 为直径 d_i 对应的水重;n_i 为直径 d_i 对应的水滴数目;ρ 为水的密度.

文中水滴频率是指某一直径的水重占某测量点处喷洒水重的比值,计算公式为

$$x_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}. \tag{3}$$

文中采用个数加权法计算水滴平均速度,计算公式为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{j=1}^{m} n_j v_j}{\sum_{j=1}^{m} n_j}, \tag{4}$$

式中:j 为速度分级名;m 为水滴速度分级数;n_j 为第 j 级水滴数目;v_j 为第 j 级水滴速度.

文中测点处的水滴打击动能计算公式为

$$E_{kr} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \rho W_i v_i^2. \tag{5}$$

2 摇臂式喷头水滴分布规律

2.1 不同压力下水滴直径径向分布规律

图 3 为 3026B 型摇臂旋转式喷头 0.15,0.20,0.25,0.30,0.35 MPa 压力下的平均水滴直径沿径向分布规律,图中 d 为水滴直径,l 为距喷头距离.由图可以发现在相同压力下,随着距喷头距离增大水滴直径逐渐增大;而随着压力增大,相同测点处的水滴直径逐渐减小,曲线斜率也逐渐减小,这说明雨滴直径沿径向的增大趋势减小.随压力增大射程呈现先增大后减小趋势,在 0.30 MPa 达到最大值,而射程末端水滴直径逐渐减小,这说明喷头射程与压力、水滴直径有密切联系.为了研究水滴直径与压力、距喷头距离之间的关系,对喷头在 0.15,0.20,0.25,0.30,0.35 MPa 压力下的水滴直径沿径向的分布规律进行回归分析可得

$$d = a\exp(bl), \tag{6}$$

式中:d 为水滴直径,mm;a,b 为拟合系数;l 为水滴至喷头的距离,m.拟合得到的系数见表 1,表中 R^2 为相关系数.

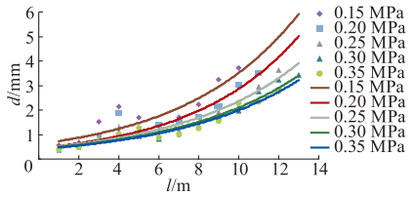


图 3 不同压力下水滴平均直径与距离关系曲线

Fig. 3 Relationships between volumetric mean droplet diameter and distance from sprinkler at different pressures

表 1 不同压力下拟合系数表

Tab. 1 Fitting coefficient at different pressures

H/MPa	a	b	R^2
0.15	0.619	0.174	0.805
0.20	0.442	0.187	0.889
0.25	0.441	0.168	0.939
0.30	0.402	0.160	0.928
0.35	0.431	0.153	0.921

由曲线发现在距喷头 3~5 m 处的水滴直径分布规律不能很好地满足指数函数关系,且其差异随压力增大而减小,这是由于摇臂式喷头的摇臂击打主射流时水舌破碎加剧,导致部分较大水滴散落在 3~5 m 处所致.而射流破碎长度随压力增大变短,压力越大水舌破碎越剧烈,水舌破碎程度受摇臂的影响越小,与指数函数关系的差异也就越小;反之,压力越小近处水滴直径受摇臂的影响越大,其差异也就越大.为了更清楚地描述水滴直径分布规律,进一步建立了压力、水滴直径与距喷头距离的回归模型,其函数关系式为

$$d = 4.586H^{0.168}\mathrm{e}^{0.725l}, R^2 = 0.892, \tag{7}$$

式中:H 为喷头工作压力.

2.2 不同压力下水滴频率分布规律

图 4 为不同压力下的水滴频率分布图.为了便于研究,文中采用体积加权法计算水滴频率,图中不同直径的水滴频率 p 为

$$p = \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{8}$$

式中：x_i 为某测点处直径级为 i 的水滴频率；n 为喷头射程.

由图 4 可以发现喷头压力与水滴直径分布密切相关，随着压力增大，直径小于 1.00 mm 的水滴频率明显增大，直径大于 3.00 mm 的水滴频率明显减小，最大水滴直径减小，直径较小水滴的频率明显增大，雾化效果越好. 此外，随着压力增大，水滴直径分布的差异逐渐减小，0.30 MPa 与 0.35 MPa 之间的各测点的水滴直径差异较小. 压力在 0.25 MPa 及以下，在距喷头 1 ~ 4 m 处的水滴直径主要范围为 0.25 ~ 2.00 mm，而直径大于 2.00 mm 的水滴主要分布在距喷 4 ~ 10 m 处. 随着距喷头距离的增大，小直径水滴频率减小，较大直径水滴的频率逐渐增大，射程末端的水滴直径最大. 压力对近处的水滴直径影响较小，对距喷头较远处的水滴直径影响较大，随着压力增大，距喷头 3 ~ 5 m 处的水滴直径分布之间的差异逐渐变小，这与工作压力影响水滴直径分布规律的结论吻合.

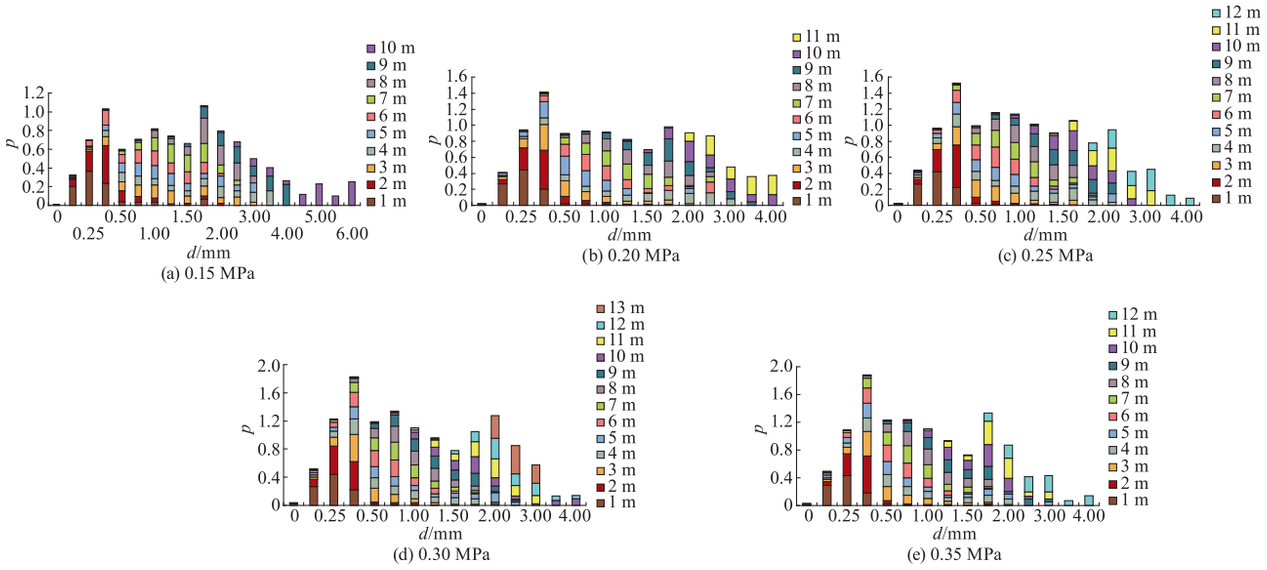


图 4　不同压力下距喷头不同距离的水滴分布图

Fig. 4　Droplet frequency at different pressures and distance from sprinkler

随喷头压力升高，直径较小水滴的频率明显增大，直径较小的水滴易产生漂移现象和蒸发损失. 由文献[14]可知水滴直径越小蒸发率越大，因此直径较小水滴的频率越大，蒸发损失越严重，喷洒效率越低；由文献[8]可知，喷洒水滴直径越大，对土壤表面结构的破坏性越大，不利于水土保持及作物生长. 文献[2]认为适宜喷洒水滴直径范围为 1.00 ~ 3.00 mm，在工作压力为 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa 时水滴直径在 1.00 ~ 3.00 mm 的水滴占整个喷洒区域的频率分别为 56.80%，64.35%，72.14%，61.72%，40.17%，因此当工作压力为 0.25 MPa 时喷洒区域内直径为 1.00 ~ 3.00 mm 的水滴频率最大.

2.3　不同压力下水滴累积频率径向分布规律

水滴累积频率能清楚地反映水滴在不同位置处的分布情况. 同压力下，距喷头不同距离的水滴累积频率如图 5 所示，图中 x 为水滴累积频率. 由图 5 可以得出同一压力下距喷头较近处的曲线斜率较大，随着距喷头距离增大，曲线斜率逐渐减小，说明距喷头距离越近，小直径水滴数量越多，随着距离增大，小直径水滴数量减少，大直径水滴数量增多. 压力对摇臂式喷头水滴直径累积频率分布有较大影响，随压力增加，各测点处曲线斜率之间的差异减小，距喷头相同距离的水滴累积频率曲线斜率逐渐增大，这说明直径较小的水滴数量随压力增大而增多，水滴直径沿径向增大的趋势减小，雾化程度增大，这与水滴直径和喷头工作压力及距喷头距离有关的结论一致.

中数直径 d_{50} 是指水滴累积频率达到 50% 时对应的水滴直径. 图 6 为不用压力下水滴中数直径距离喷头不同距离时的变化曲线，图中 l 为距喷头距离. 由图 6 可以看出中数直径随距喷头距离增大而增大，随压力增大而减小；压力对中数直径的影响随距喷头距离增加而增大. 随着压力增大，中数直

径减小的趋势逐渐减缓,而距喷头3~5 m处的中数直径的变化趋势与平均直径的变化趋势一致.

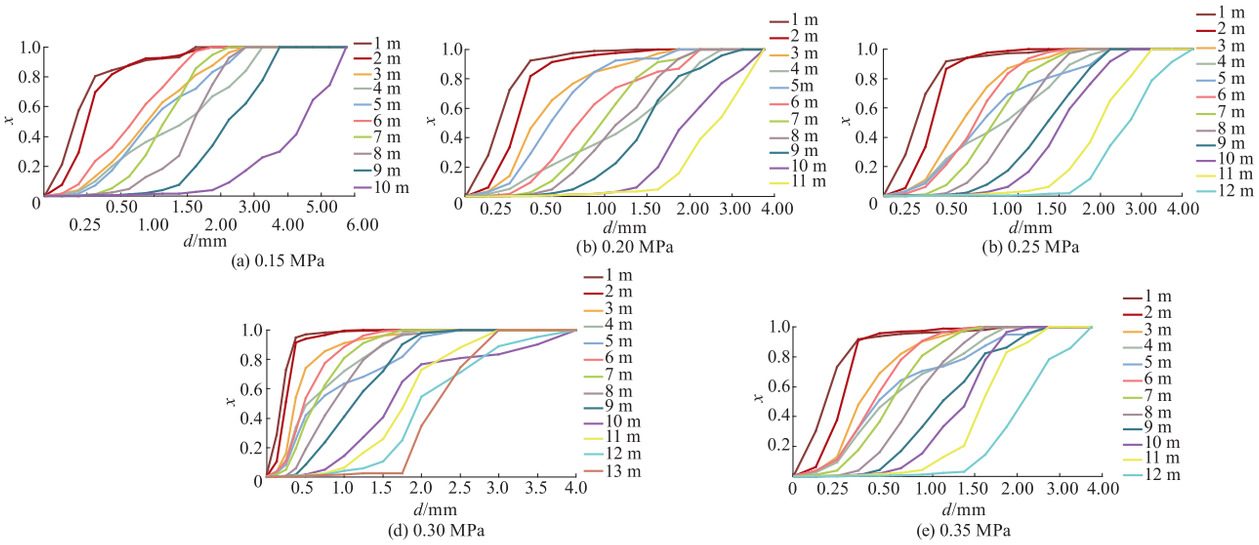


图5 不同压力下距喷头不同距离的水滴累积频率分布图

Fig. 5 Droplets cumulative frequency at different pressures and distance from sprinkler

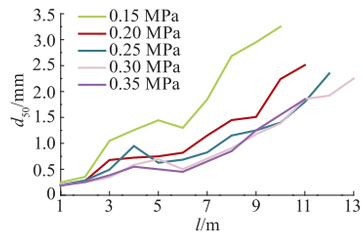


图6 不同压力下水滴中数直径分布图

Fig. 6 Droplets median diameter at different pressures

2.4 不同压力下水滴速度分布规律

喷洒水滴速度是决定水滴打击动能的重要因素,试验通过激光雨滴谱仪测出不同测点处不同直径水滴的速度. 图7绘出了3026B型摇臂式喷头在0.15,0.20,0.25,0.30,0.35 MPa工作压力下水滴速度随水滴直径的变化规律,图中v为水滴速度,d为水滴直径.

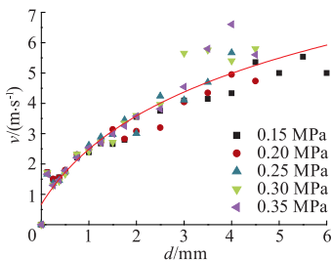


图7 在不同压力下水滴直径与速度曲线

Fig. 7 Relationships between droplet diameter and velocity at different pressures

从图7可以看出水滴速度随着水滴直径增大而逐渐增大,在最大水滴处达到最大值,这说明水滴直径是决定水滴速度的重要因素. 在5个工作压力下的水滴速度和水滴直径之间呈较好的对数关系,因此对数函数模型能较好地描述水滴速度和水滴直径之间的关系. 工作压力对水滴速度也有一定影响,直径小于3.00 mm的水滴的速度受压力影响较小,水滴直径与速度的关系与对数函数模型吻合良好;随着水滴直径增大,压力对水滴速度的影响有所增大. 为研究工作压力对水滴速度的综合影响,将各工作压力下的水滴速度在5%的显著性水平下进行方差分析,计算结果P为0.507,说明工作压力对水滴速度的影响较小. 此外,随着压力逐渐增大,末端水滴直径变小而水滴速度增大幅度较小,因此压力大于0.30 MPa时射程逐渐减小,这与压力对射程影响的结论一致. 将5种工作压力下的水滴速度与水滴直径分布的试验数据通过最小二乘法进行回归分析,发现水滴速度与水滴直径之间存在对数函数关系,关系式为

$$v = 0.392\,5 - 2.818\,8\ln(d + 1.103\,7),$$
$$R^2 = 0.908\,4. \tag{9}$$

2.5 不同压力下水滴动能径向分布规律

图8绘出了3026B型摇臂式喷头在0.15,0.20,0.25,0.30,0.35 MPa 5种工作压力下沿径向的水滴动能的分布情况,图中E_k为水滴动能.

随着距喷头距离的增大,由于水滴直径及水滴速度的增大,水滴动能逐渐增大,且在湿润半径的80%处水滴动能达到最大值. 这是由于喷洒水舌被

周围气体包围，水舌在惯性力、黏性力、重力作用和表面张力的共同作用下不断掺气而分裂出大量水滴. 喷洒水舌在破碎成水滴的过程中，从水舌表面逐渐向核心发展，水舌核心区产生的水滴直径与速度均较大，因此随着距喷头距离的增大，水滴直径逐渐增大，小直径水滴频率逐渐减小，较大直径水滴频率逐渐增大. 故距喷头越远处的水滴直径越大，速度越大，水滴动能也越大. 为进一步研究水滴动能与距喷头距离之间的关系，将试验数据进行回归分析可得

$$E_k = E_{k0} + k\exp(\alpha l), \tag{10}$$

式中：l 为距喷头距离，m；k，α，E_{k0} 为拟合系数，其在不同压力下的值见表 2，表中 H 为喷头工作压力.

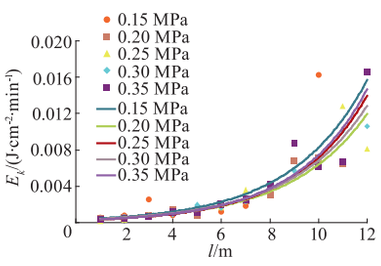


图 8　不同压力下沿径向水滴动能分布图

Fig. 8　Distribution of droplet kinetic energy at different pressures

表 2　不同压力下水滴动能函数模型系数表

Tab. 2　Droplet kinetic energy fitting coefficient at different pressures

H/MPa	E_{k0}	k	α	R^2
0.15	8.789×10^{-4}	5.007×10^{-6}	0.804	0.975
0.20	−0.002	0.002	0.165	0.862
0.25	−0.003	0.002	0.152	0.813
0.30	-9.406×10^{-4}	8.328×10^{-4}	0.225	0.973
0.35	3.569×10^{-4}	1.823×10^{-4}	0.364	0.845

结果表明：水滴动能沿径向分布规律与指数函数模型拟合情况较好，其相关系数均在 0.800 以上. 随着压力增大水滴动能逐渐减小，而压力对近处水滴动能影响较小，随着距喷头距离增大，压力对水滴动能的影响逐渐增大. 因此适当增大喷头工作压力能有效降低喷洒水滴的打击动能，降低对土壤侵蚀及土壤结构的破坏能力，达到保持水土的目的.

3　结　论

文中采用激光雨滴谱仪分别在 0.15，0.20，0.25，0.30，0.35 MPa 工作压力下对 3026B 型摇臂旋转式喷头进行了水滴直径和速度的试验研究，经过分析得到以下结论：

1）采用激光雨滴谱仪测量能准确、方便地测量水滴速度和直径，为进一步研究水滴分布提供了一种较好的试验方法.

2）水滴直径沿径向呈指数函数分布，压力对水滴平均直径及中数直径的影响均随距喷头距离增大而增大，摇臂对水滴直径分布规律的影响随着压力增大逐渐减小. 在同一位置处的水滴直径随压力升高而减小，距喷头越远减小得越快. 直径较小的水滴频率随距喷头距离增大而减小，随压力增大而增大；直径较大的水滴频率则呈相反的规律.

3）水滴速度与水滴直径呈对数函数分布，拟合精度为 0.908 4，工作压力对水滴直径与水滴速度之间关系影响较小. 水滴动能沿径向分布与指数函数模型拟合情况较好，水滴动能随距喷头距离增大而增大，在射程 80% 处达最大值，工作压力对水滴动能分布的影响随距喷头距离增大而增大.

参考文献(References)

[1] 袁寿其，李红，王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(1)：78－92.
Yuan Shouqi，Li Hong，Wang Xinkun. Status，problems，trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2015，33(1)：78－92. (in Chinese)

[2] 吴普特，朱德兰，吕宏兴，等. 农田灌溉过程中的水力学问题[J]. 排灌机械工程学报，2012，30(6)：726－732.
Wu Pute，Zhu Delan，Lü Hongxing，et al. Hydraulics problems in farmland irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2012，30(6)：726－732. (in Chinese)

[3] 涂琴，李红，王新坤，等. 基于灰色关联法的多喷头轻小型喷灌机组比选[J]. 江苏大学学报：自然科学版，2014，35(6)：657－662.
Tu Qin，Li Hong，Wang Xingkun，et al. Comparison and selection of small-scale irrigation machines with multiple sprinklers based on grey relational analysis[J]. Journal of Jiangsu University：Natural Science Edition，2014，35(6)：657－662. (in Chinese)

[4] Bautista C，Playán E，et al. A particle tracking velocimetry technique for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. Irrigation Science，2014，41(4)：602－607.

[5] Salvador Raquel，Bautista－Capetillo C，Burguete J，et

al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers [J]. Irrig Sci, 2009, 27(1): 307 – 317.

[6] 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 sprinler head[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1416 – 1422. (in Chinese)

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

[8] 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.

[9] King B A, Winward T W, Bjirneberg D L. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of spray – plate sprinklers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 26(2): 263 – 271.

[10] 李红,任志远,汤跃,等. 喷头喷洒雨滴粒径测试的改进研究[J]. 农业机械学报,2005,36(10): 50 – 53.
Li Hong, Ren Zhiyuan, Tang Yue, et al. Measurement and Amelioration of the test to raindrop size of sprinklers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 50 – 53. (in Chinese)

[11] 徐向舟,张红武,朱明东. 雨滴粒径的测量方法及其改进研究[J]. 中国水土保持,2004,25(2): 22 – 25.
Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, Zhu Mingdong. Study on measuring method of particle size of raindrop and its improvement[J]. Soil and Water Conservation in China, 2004, 25(2): 22 – 25. (in Chinese)

[12] 白更,严海军,王敏. 喷洒水滴直径面粉测定法改进[J]. 农业机械学报,2011,42(4):76 – 80.
Bai Geng, Yan Haijun, Wang Min. Measuring sprinkler droplet size with modified flour methodology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 76 – 80. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 白更,严海军. 空气阻力系数对水滴运动及蒸发的影响[J]. 水利学报,2011,42(4):448 – 453.
Bai Geng, Yan Haijun. Effect of air drag coefficient on motion and evaporation of water droplet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 448 – 453. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)