doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.021

基于 2DVD 的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律*

巩兴晖[1]　朱德兰[1,2]　张　林[2,3]　张以升[1]　葛茂生[1]　杨　雯[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;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:采用基于三维视频粒子测量原理的视频雨滴谱仪(Two-dimensional video disdrometer,2DVD)对喷灌机中常用的 Nelson D3000 型喷头在多个工作压力下水滴直径沿射程的分布进行了测量,分析了水滴直径沿射程的变化趋势及水滴速度、水滴角度与水滴直径之间的关系。结果表明:水滴直径与射程符合指数函数关系,在距离喷头相同测点处,水滴直径随工作压力的升高而减小,而射程末端的水滴直径随着压力的升高而增大;水滴速度随水滴直径增加而增大,两者呈对数关系;水滴落地时与地面夹角(简称水滴角度)随水滴直径增加呈减小趋势,水滴直径小于 1.0 mm 时,50、100、150 和 200 kPa 工作压力下,与地面夹角为 90°的水滴个数占总水滴数的比值分别为 90.46%、84.46%、89.91% 和 89.15%,其余水滴与地面夹角在 30°~89°之间,水滴直径在 1.0~2.25 mm 范围内,水滴角度随水滴直径的增加迅速减小,水滴直径大于 2.25 mm 时减小趋势变缓,4 个工作压力下最大直径水滴落地时与地面夹角平均值为 45°;工作压力对于水滴直径与速度、水滴直径与角度之间的关系影响较小。

关键词:喷头　水滴直径　水滴速度　水滴角度　工作压力　视频雨滴谱仪

中图分类号:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)08-0128-06

引言

喷洒水滴直径是评价喷灌系统工程质量的重要指标之一。喷灌过程中,粒径小的水滴容易受到风的影响,造成蒸发飘逸损失,降低了灌溉水的利用系数;粒径大的水滴具有较大的动能,会伤害作物并导致土壤表面结皮,降低了土壤入渗性能,加剧地表径流[1-6]。因此通过有效的测量手段获取水滴粒径信息,对于喷头的开发和应用具有重要意义。

国内外学者通过面粉法[7-8]、滤纸色斑法[9]、浸入法[10]、照相法[11-12]和激光法[13-15]等试验方法对水滴直径的分布规律进行了大量研究。面粉法[7]和滤纸色斑法[8]具有试验成本低的特点,但只能测试喷洒水滴直径,不能测试水滴速度和水滴角度。激光法在测试水滴直径的同时,能够提供水滴速度的统计平均值,但水滴重叠和测试边界问题严重影响测试数据的准确性,许多学者通过改进试验方法或数据后处理的方式对其进行改进,能够在一定程度上弱化上述问题对试验的影响,但无法从硬件本身彻底解决。奥地利 Gratz 应用系统研究机构研制的基于三维视频测量原理的视频雨滴谱仪(Two-dimensional video disdrometer,2DVD),目前主要用于测量降水粒子的形状、尺寸、速度等,但还未应用于喷洒水滴测试中。在喷灌水滴直径沿射程的分布模型方面,国内外学者在大量试验研究基础上得出许多模型,其中正态分布、指数函数分布[5]、上限对数正态分布(Upper limit log normal distribution)[16]等模型被喷灌学者广泛应用,但由于测试方法的限制,关于水滴直径与水滴速度、水滴落地时与地面夹角(以下简称水滴角度)之间的变化关系研究较少。

本文以喷灌机常用的 Nelson D3000 型非旋转折射式喷头为研究对象,利用 2DVD 对水滴直径、水滴速度及水滴角度进行测试,研究喷洒水滴直径沿射程方向的变化趋势,并探讨水滴速度、水滴角度分别同水滴直径之间的变化关系。

1　材料与方法

1.1　2DVD 测试原理

1.1.1　水滴直径测试

2DVD 通过光源部分产生呈正交的两片状光,

收稿日期:2014-01-20　修回日期:2014-03-19

*国家工程技术研究中心再建项目(2011FU125Z27-1)、西北农林科技大学科技创新专项资助项目(Z109021207)和教育部、国家外国专家局"111"计划资助项目(B12007)

作者简介:巩兴晖,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail:pennygxh@163.com

通讯作者:朱德兰,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail:dlzhu@126.com

分别入射至 2 个具有光电探测器的线性扫描相机上，两片状光的交叠部分为水滴粒子采样区域，重叠面积 100 mm × 100 mm，垂直距离 6.2 mm（图 1）。

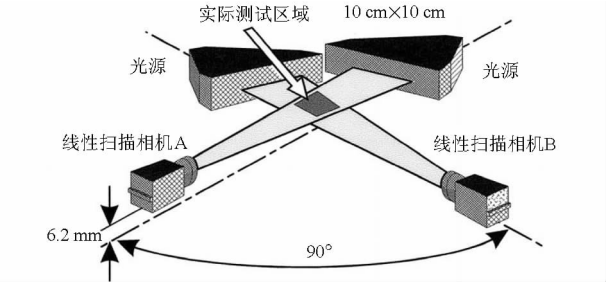

图 1　2DVD 测试原理[17]

Fig. 1　Principles of the two-dimensional video disdrometer[17]

当降水粒子落入采样区域，成像于光学系统的像面上，带有光电探测器的线性扫描相机经过多周期扫描获得粒子的图像。单一片层光下粒子图像信号获取、重建的过程如图 2 所示。测试时水滴粒子向下运动，线性扫描相机静止，图 2 中的水滴粒子在 t_1、t_2、t_3、t_4 4 个时刻被扫描，每扫描一个周期就存储一次数据，存储的数据形成一个切片，直到粒子离开片状光，获得的数据通过处理，即可获得粒子在正对探测器一侧的图像。通过 2 个正交的投影图像，系统会还原出降水粒子的三维形状并计算其体积，进而换算得到等体积球体的水滴直径，完成一次水滴直径的测量[17]。

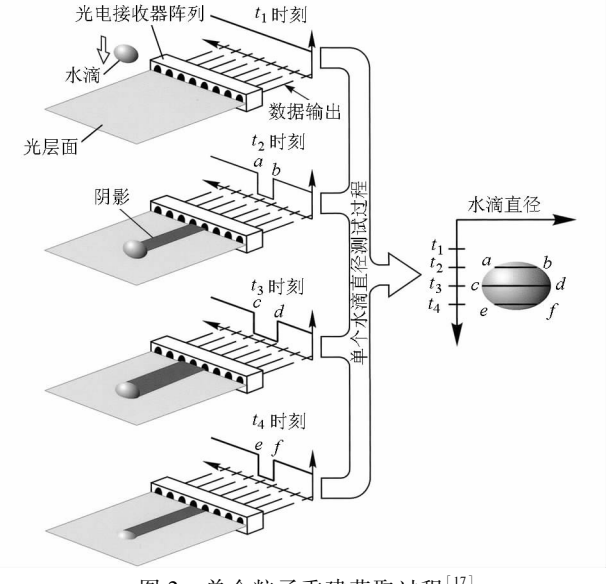

图 2　单个粒子重建获取过程[17]

Fig. 2　Reconstructing shape of a hydrometeor[17]

1.1.2　水滴速度测试

图 3 为 2DVD 水滴粒子速度测试原理示意图。图中 t_0 和 t_2 分别为水滴进入光层面 A 和 B 时刻，t_1 和 t_3 为水滴离开光层面 A 和 B 时刻，S 为两个光层面之间的距离，S_a 和 S_b 为水滴在光层面 A 和 B 的水平位移。

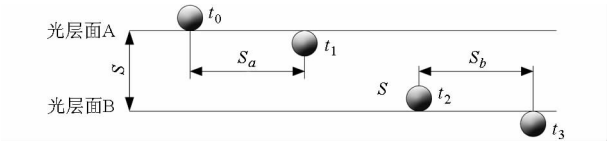

图 3　单个水滴粒子垂直速度计算

Fig. 3　Calculation of vertical velocity of hydrometeor

其中水滴垂直速度为

$$v_v = \frac{2S}{t_2 - t_0 + t_3 - t_1} \tag{1}$$

单个粒子若具有水平速度，在水滴重建过程中不同时刻的切片会形成椭圆形图像，将不同时刻形成的切片中点连线，会形成规则的直线[18]，通过连线在水平方向上的投影得到水滴粒子在光层面 A 和 B 上的水平位移 S_a 和 S_b，水滴经过两个光层面的时间分别是 $t_a = t_1 - t_0$ 和 $t_b = t_3 - t_2$，则水平速度为

$$v_H = \sqrt{(S_a/t_a)^2 + (S_b/t_b)^2} = \sqrt{v_{Ha}^2 + v_{Hb}^2} \tag{2}$$

式中　v_{Ha}——水滴在光层面 A 的水平速度，m/s

v_{Hb}——水滴在光层面 B 的水平速度，m/s

应用 2DVD 可测得水滴落地的垂直速度和水平速度，则水滴落地时与地面的夹角（简称：水滴角度）为

$$\theta = \arctan \frac{v_v}{v_H} \tag{3}$$

1.2　试验方法

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，图 4 为试验布置示意图。试验在室内无风条件下进行，室内温度 18 ℃。选用喷灌机中常用的 Nelson D3000 型喷头（蓝色喷盘，36 流道），喷嘴为圆形，直径 4.76 mm（图 5），喷头测试高度 2.5 m。喷头工作压力设 50、100、150 和 200 kPa 4 个水平。从距离喷嘴 1 m 处到水滴洒落的射程范围内，以 1 m 间距测定各个位置上的水滴直径和速度，通过对 2DVD 原始数据实时监控，控制每个测点收集不少于 10 000 个水滴。

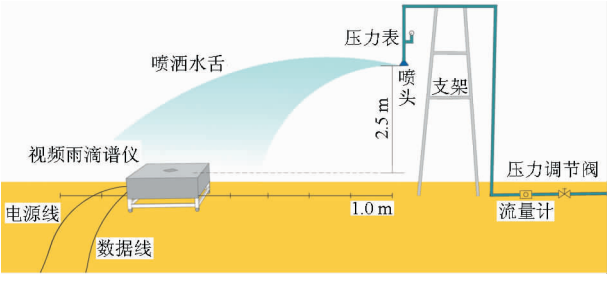

图 4　水滴直径测试试验布置

Fig. 4　Experimental setup for drop characterization

1.3　水滴直径的计算方法

非旋转折射式喷头从喷嘴射出的水流打击喷

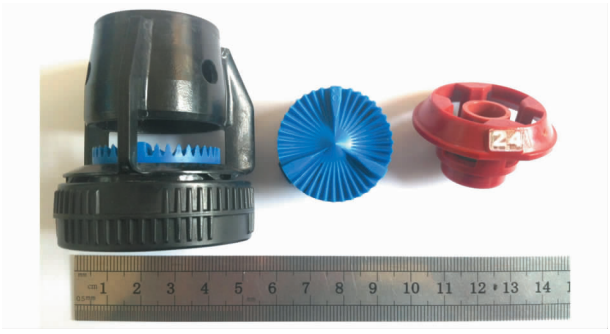

图 5 Nelson D3000 型喷头和喷嘴

Fig. 5 Nelson D3000 sprinkler with blue plates used in investigation

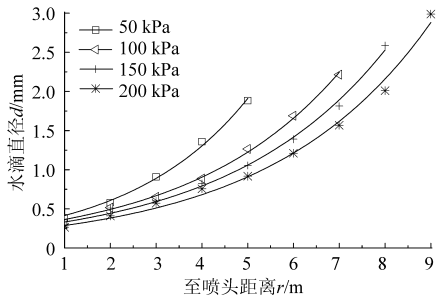

图 6 水滴直径沿射程分布及回归曲线

Fig. 6 Drop sizes distribution andregression curve for estimation of volumetric mean diameter from different distance of sprinkler

盘,通过喷盘上收缩的流道形成多股小型水舌抛向空中,水舌在空中掺气碰撞粉碎后形成不同直径的水滴降落到地面完成喷灌。喷洒范围内任意位置处的水滴直径变化范围较大,通常采用平均水滴直径来表示不同位置处的水滴大小。国内外常用的计算水滴直径的方法:个数加权平均法、体积加权平均法和中数直径法。许多学者对 3 种方法进行了很多对比,发现体积加权平均法计算的水滴直径沿射程变化规律能更好地符合实际。本文采用体积加权平均法对水滴直径进行计算,计算公式为

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

式中 D_v——测试点体积加权平均水滴直径,mm

i——测试水滴系列中的个数

d_i——测试水滴 i 对应的水滴直径,mm

2 结果与分析

2.1 水滴直径沿射程分布规律

喷洒水滴直径沿射程的分布规律受到喷头类型、工作压力、喷头安装高度等因素的影响,随着离开喷嘴距离的增加,水滴直径逐渐增大,在射程末端达到最大值。图 6 绘出了 Nelson D3000 型喷头在 50、100、150 和 200 kPa 4 个工作压力下,采用体积加权平均法计算的各测点水滴平均直径沿射程的变化规律。

从图 6 可以看出,工作压力对于水滴直径沿射程的分布具有一定的影响,以距喷头 1 m 和 5 m 测点处为例。在距离喷头 1 m 位置处,50、100、150 和 200 kPa 工作压力下对应的水滴直径分别为 0.384、0.314、0.305、0.264 mm,与 50 kPa 工作压力相比,200 kPa 工作压力对应的水滴直径减小了 31.23%。在距离喷头 5 m 位置处,50、100、150 和 200 kPa 工作压力下对应的水滴直径分别为 1.882、1.265、1.054、0.918 mm,与 50 kPa 工作压力相比,200 kPa 工作压力对应的水滴直径减小了 51.23%。可以看出水滴至喷头距离相同时,水滴直径随着压力的升高而减小,并且在近喷头处,各工作压力下水滴直径差异较小,随着射程的增加差异逐渐增大。这是因为射流破碎成大小不同的水滴,其决定因素是速度,速度越大,射流破碎后形成的水滴尺寸越小,即雾化效果越好,并随着射程的增加,雾化效果表现得更加明显。

末端水滴直径作为衡量喷头雾化标准的重要依据[19-20],在一定程度上反映了喷洒的打击强度。从图 6 可以看出末端粒径随着压力升高而增大。50、100、150 和 200 kPa 工作压力下的射程为 5.0、7.0、8.0 和 9.0 m,对应的末端水滴直径分别为 1.882、2.215、2.586 和 2.988 mm,与 50 kPa 工作压力相比,100、150 和 200 kPa 工作压力下的末端水滴直径分别增大了 58.7%、41.1% 和 21.4%。这一结果与其他学者的研究结果相反,主要原因是喷头的类型和工作原理不同。非旋转折射式喷头从喷嘴射出的水流打击喷盘,通过喷盘上收缩的流道形成多股水舌抛向空中,喷盘上的流道对末端水滴直径产生影响。当工作压力升高,喷盘上流道的流量变大,致使射流流速变大,射程变远,造成末端水滴直径随着压力的升高而增大的规律。以末端水滴直径作为标准,Nelson D3000 型喷头在相对较低的工作压力下不会对土壤和作物造成太大的打击。

根据最小二乘法原理对 4 个工作压力下水滴直径沿射程分布规律进行回归分析,表达式如表 1 所示。在表 1 中,d 表示水滴直径(mm),r 表示水滴降落到地面上的位置与喷头的水平距离(m),r 必须小于相应喷头工作压力时的射程。结果表明,各工作压力下水滴直径沿射程方向呈指数函数关系,决定系数在 0.96 以上。Nelson D3000 型喷头水滴直径沿射程变化趋势与文献[3]中研究结果一致。为了更好地反映该喷头在不同工作压力下水滴直径沿射

程的变化规律，对水滴粒径数据的进一步分析，建立了水滴直径、工作压力和射程的回归模型，其函数关系式为

$$d = 9.662p^{-0.8201}e^{0.3654r} \quad (R^2 = 0.993) \quad (5)$$

式中　p——工作压力，kPa

表 1　水滴直径沿射程方向分布规律回归模型

Tab. 1　Predictive equations for estimation of volumetric mean diameter from distance of Nelson D3000 sprinkler

工作压力/kPa	回归模型	水滴距喷头距离 r/m	R^2
50	$d = 0.271e^{-0.393r}$	5	0.995
100	$d = 0.235e^{0.340r}$	7	0.991
150	$d = 0.242e^{0.307r}$	8	0.967
200	$d = 0.224e^{0.282r}$	9	0.995

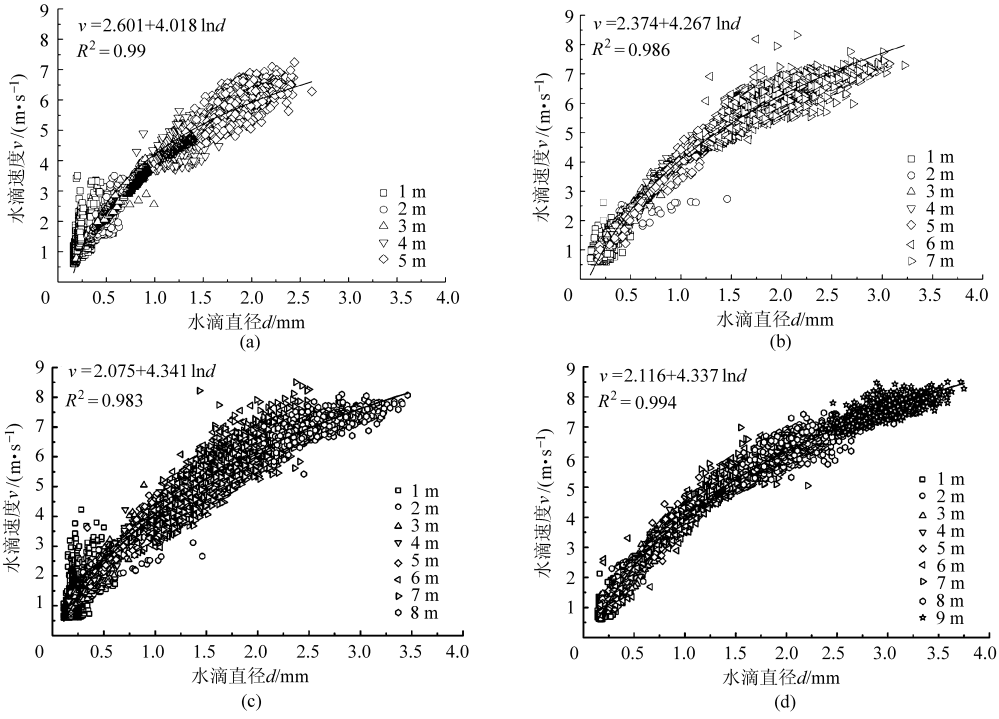

图 7　水滴速度与水滴直径分布关系

Fig. 7　Relationship between drop velocity and drop diameter obtainedfrom different distance of the sprinkler operating pressure at 50, 100, 150 and 200 kPa

(a) 50 kPa　(b) 100 kPa　(c) 150 kPa　(d) 200 kPa

从图 7 可以看出 4 个工作压力下水滴速度随水滴直径的增大而增大。通过回归分析，得到 4 个压力下水滴速度和水滴直径的关系式及决定系数，见图 7。从图 7 中可以看出，4 个工作压力下水滴速度和水滴直径之间呈较好的对数关系，R^2 均在 0.98 以上。

为了分析工作压力对水滴速度的影响，选取各工作压力下，水滴直径为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 mm 所对应的水滴速度，设水滴直径为自变量，水滴速度为因变量，工作压力为协变量在 5% 的显著性水平下进行协方差分析，计算结果 P 等于 0.539，工作压力对水滴速度的影响不显著（$P > 0.05$），说明工作压力对水滴直径与水滴速度之间关系的影响较小。因此根据最小二乘法原理对 4 个工作压力下水滴速度与水滴直径数据进行统一回归分析，得到了水滴落地时速度与水滴直径间的对数关系，关系式为

$$v = 2.42 + 4.332\ln d \quad (R^2 = 0.965) \quad (6)$$

2.2　水滴速度与水滴直径的关系

水滴速度是水滴粒径信息中关键的参数，是计算喷洒能量分布的依据。为此利用 2DVD 测出单个水滴降落到地面上的垂直速度和水平速度，然后计算出水滴落地时的合速度。图 7 绘出了 4 个工作压力下水滴直径与水滴降落到地面时速度的关系。

2.3　水滴角度与水滴直径的关系

喷洒水滴落地时会与地面形成一定的角度，相同直径水滴落地时与地面夹角不同，对土壤的剪切力和压力不同，研究水滴直径与水滴角度的关系对于计算水滴对土壤的剪切力和压力有重要意义。

图 8 绘出了 50、100、150 和 200 kPa 工作压力下水滴角度与水滴直径的关系曲线。从图 8 可以看出，4 个工作压力下水滴夹角与水滴直径的关系可划分为 3 个区域：Ⅰ区，水滴直径小于 1.0 mm 时，50、100、150 和 200 kPa 工作压力下，与地面夹角为 90°的水滴个数占总水滴数的比值分别为 90.46%、

84.46%、89.91%和89.15%,其余水滴与地面夹角在30°~89°之间。图8中由于水滴角度为90°时,水滴重叠形成一条直线,水滴角度在30°~89°范围时,相对分散,会造成垂直降落的水滴所占比例较小的视觉误差;Ⅱ区,水滴直径在1.0~2.25 mm内,各工作压力下垂直降落的水滴不再存在,所有水滴都与地面形成一定角度,且随着水滴直径的增大水滴角度呈线性减小;Ⅲ区,当水滴直径大于2.25 mm后,水滴落地角度减小趋势变缓,各工作压力下最大水滴直径具有的平均水滴角度为45°。

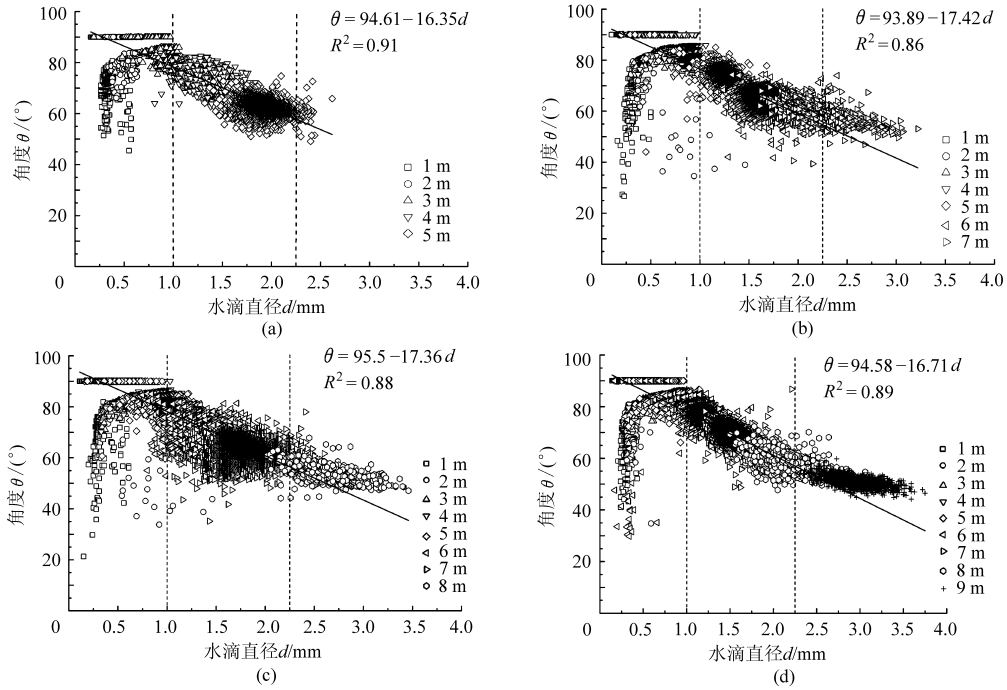

图8 水滴角度与水滴直径分布关系

Fig. 8 Relationship between drop angle and drop diameter obtained from different distance of sprinkler operating pressure at 50 kP, 100 kPa, 150 kPa and 200 kPa

(a) 50 kPa (b) 100 kPa (c) 150 kPa (d) 200 kPa

通过回归分析得到各工作压力下水滴角度和水滴直径的关系式及相关系数,见图8。从图8可以看出,4个工作压力下水滴角度和水滴直径之间呈较好的线性关系,这一规律与文献[12]中利用低速照相法研究的规律基本一致,应用2DVD测得的数据回归的公式相关性更好,R^2均在0.86以上。

为了分析工作压力对水滴角度的影响,同样选取水滴直径为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mm所对应的水滴角度,将水滴直径设为自变量,水滴角度设为因变量,工作压力设为协变量在5%的显著性水平下进行协方差分析,计算结果P等于0.787,工作压力对水滴速度的影响不显著($P>0.05$),说明工作压力对于水滴直径与水滴角度之间的关系影响较小。根据最小二乘法原理对4个工作压力下水滴速度与水滴角度数据进行统一回归分析,得到了水滴角度与水滴直径间的关系表达式为

$$\theta = 94.64 - 16.96d \quad (R^2 = 0.996) \qquad (7)$$

3 结论

(1)体积加权平均水滴直径沿射程方向呈指数函数分布,距离喷头相同测点处,平均水滴直径随喷头工作压力的升高而减小,距喷头较近处差异较小,随着射程的增加差异变大。末端水滴直径随着压力的升高而增大。

(2)通过回归得到了水滴速度与水滴直径之间的关系,水滴速度随水滴直径的增大呈对数函数关系增大,工作压力对两者之间的关系影响较小。

(3)水滴角度随水滴直径的增加总体呈线性减小趋势,水滴直径小于1.0 mm时,50、100、150和200 kPa工作压力下,与地面夹角为90°的水滴个数占总水滴数的比值分别为90.46%、84.46%、89.91%和89.15%,其余水滴与地面夹角在30°~89°之间,水滴直径在1.0~2.25 mm内,各工作压力下水滴角度随水滴直径的增加迅速减小,大于2.25 mm后,减小趋势变缓,各工作压力下最大水滴直径具有的平均水滴角度为45°,工作压力对水滴角度和直径之间的关系影响较小。

参 考 文 献

1 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.

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

3 李久生. 喷洒水滴分布规律的研究[J]. 水利学报, 1988(10): 38 – 45.
Li Jiusheng. Study on drop distribution of sprinklers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988(10): 38 – 45. (in Chinese)

4 李久生. 喷洒水滴直径测试方法的研究[J]. 排灌机械, 1993(1): 45 – 47.

5 Li J, Yu K. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6):1871 – 1878.

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

7 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)

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

9 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)

10 Solomon K H, Kincaid D C, Bezdek J C. Drop size distributions for irrigation spray nozzles[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6):1966 – 1974.

11 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.

12 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): 1493 – 1504.

13 Kincaid D C, Solomon K H, Oliphant J C. Drop size distributions for irrigation sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(3): 839 – 845.

14 Montero J, Tarjuelo J M, Carrión P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer[J]. Irrigation Science, 2003, 22(2): 47 – 56.

15 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.

16 Bezdek J C, Solomon K H. Upper limit lognormal distribution for drop size data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1983, 109(1): 72 – 88.

17 Kruger A, Witold F Krajewski. Tow-dimensional video disdrometer: a description[J]. Journal of Antmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602 – 617.

18 Schönhuber M, Randeu W L, Urban H E, et al. Field measurements of raindrop orientation angles[C]// ESA SP-444 Proceedings, 2000, 444: 9 – 14.

19 陈超, 袁寿其, 李红, 等. 异形喷嘴对变量喷头水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 111 – 115.
Chen Chao, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Effect of non-circle nozzle on hydraulic performance of impact variable-rate sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 111 – 115. (in Chinese)

20 魏洋洋, 袁寿其, 李红, 等. 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, Li Hong, et al. Hydraulic performance experiment of the variable-rate sprinkler with non-ciecle nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 70 – 74. (in Chinese)

21 Sayyadi H, Nazemi A H, Sadraddini A A, et al. Characterising droplets and precipitation profiles of a fixed spray-plate sprinkler[J]. Biosystems Engineering, 2014, 119: 13 – 24.

22 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. (in Chinese)

(下转第 148 页)

content of topsoil OM was 13.58 g/kg, TN was 0.81 g/kg and C/N was 9.84, and all of them were in relatively low level. Spatially, topsoil OM and TN contents generally increased from north to south along with geomorphologic types while topsoil C/N was high in north and south and low in the middle. Both OM and TN showed spatial cluster at 0.01 significance level and demonstrated moderate spatial correlation. The spatial variability was influenced by both natural factors such as topography and geomorphology, soil types and human factors including fertilization, cropping system, irrigation and so on, and the geographical guide of human activity was playing more and more important roles. With the same sampling numbers (n = 554), compared with ordinary Kriging, Cokriging with OM as subsidiary variable was more suitable for spatial interpolation of TN and could provide more local variation information, but was unavailable for the raster ratio calculation to obtain soil C/N map.

Key words: Soils Organic matter Total nitrogen Carbon to nitrogen ratio Spatial variability

(上接第 133 页)

Drop Size Distribution of Fixed Spray-plate Sprinklers with Two-dimensional Video Disdrometer

Gong Xinghui[1] Zhu Delan[1,2] Zhang Lin[2,3] Zhang Yisheng[1] Ge Maosheng[1] Yang Wen[1]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering of China*, *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*
3. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: A two-dimensional video disdrometer (2DVD) was used to measure drop size, drop velocity and drop angle from Nelson D3000 spray-plate sprinklers with a 4.78 mm nozzle and operating pressure of 50, 100,150, 200 kPa. The relationship among drop sizes, drop velocity and drop angle were analyzed. Results indicated that the relationship between drop diameter and distances along the sprinkler met exponential function. The volumetric mean diameter increased with the distance along the sprinkler increased, and at the same location from the sprinkler the average droplet diameter decreased with the increase of working pressure. The relationship between drop velocity and drop diameter met logarithmic function. Drop velocity increased with the drop diameter increased, and the effect of operating pressure on the relationship between drop diameter and velocity was not obvious. Drop angle decreased with the increase of drop diameter. When drop diameter was smaller than 1.0mm and operating pressure was at 50, 100, 150, 200 kPa, 90.46%, 84.46%, 89.91% and 89.15% of the droplets descended perpendicularly to the ground, respectively. The rest of the droplets descended to the ground with angle between 30°~89°. When drop diameter was between 1.0 mm and 2.25 mm, the drop angle decreased rapidly with the drop diameter increased. And when drop diameter was greater than 2.25 mm, the decrease trend became slower. The relationship between drop angle and drop diameter met a good linear function, and the effect of operating pressure on the relationship between drop angle and diameter was not obvious.

Key words: Sprinkler Drop size Drop velocity Drop angle Operate pressure Two-dimensional video disdrometer