

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.009

人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴特性测试*

韩文霆^{1,2} 曹培¹ 刘文帅¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用 2D 视频雨滴谱仪, 对喷头喷洒的雨滴形状、尺寸分布、平均直径和垂直降落速度等进行准确测量, 分析了喷嘴直径、工作压力对雨滴平均直径变化趋势的影响, 建立了雨滴平均直径与垂直降落速度间的关系模型。结果表明: 人工模拟降雨系统下喷头喷洒雨滴的直径范围在 0~3 mm; 在相同喷嘴直径下, 随着工作压力的增大, 雨滴平均直径呈下降趋势; 在工作压力不变的情况下, 随着喷嘴直径的增大, 雨滴平均直径会随之增大; 通过雨滴平均直径与垂直下落速度间的关系模型, 能够较好地预测雨滴的降落速度。

关键词: 雨滴特性 人工模拟降雨系统 2D 视频雨滴谱仪 平均直径

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0056-06

引言

在节水灌溉中, 雨滴特性是喷头水力性能的一个重要指标, 通过测量雨滴特性可以计算喷头喷洒雨滴的打击强度、雾化程度, 从而判断喷头的水力性能, 同时喷头喷洒雨滴的特性是开展侵蚀定量分析与建立侵蚀量预报数学模式提供有关降雨侵蚀力的基本依据^[1]。反映喷头喷洒雨滴特性的参数主要有雨滴直径大小、组成分布、降落速度和动能。其中雨滴直径决定了降落雨滴的质量和速度, 而这两者又决定了雨滴所具有的动能, 因此通过测量、分析雨滴直径的大小和分布, 可以得出雨滴特性的各个参数。

近年来, 国内外许多学者对雨滴特性展开了研究, 并取得较大进展。Best^[2]研究了天然降雨雨滴分布特征, 提出了著名的 Best 雨滴大小分布式; Atlas 等^[3]研究了雨滴垂直下落速度与直径的关系, 得出静止大气中雨滴垂直下落速度与直径的相关方程; Gunn 和 Kinzer^[4]同样研究了雨滴直径和下落速度的关系, 得出了著名的 Gunn - Kinzer 关系; Marshall 和 Palmer^[5]研究了雨滴直径分布的经验公式, 得出 M - P 分布公式; 在国内, 窦葆璋、周佩华、吴光艳等^[6-8]采用色斑法对天然降雨雨滴特征进行了研究, 得出雨滴大小特征符合 Best 分布函数; 徐向舟等^[9]对模拟降雨雨滴运用 AutoCAD 软件描绘雨滴色斑图案并计算色斑面积, 进而运用 Excel 软

件换算出雨滴粒径, 从而能够快速地得出雨滴大小; 刘乃玲等^[10]对螺旋形喷嘴的液滴分布特性和直径经验公式进行了研究, 建立了螺旋型喷嘴液滴直径的准则关系式。但是从现有的资料来看, 目前针对以水为雾化介质的模拟降雨喷头雨滴特性的研究还比较少。喷头是人工模拟降雨系统的关键部件之一, 不仅在农业中被广泛应用, 在消防灭火等方面也有重要应用^[11], 因此对该种喷头进行研究, 不仅具有重要的理论意义, 而且具有较强的现实意义。

在喷头雨滴特性的测量中, 雨滴直径的测量一直是一个难点, 这是由于雨滴降落时运动的形状国内外没有一个比较确定的定量公式来描述它, 而且在雨滴采集测量的过程中有许多不确定的因素, 雨滴的采集处理也具有较强的繁复性^[12]。现有的测量方法主要有色斑法^[13]、面粉法^[14]、高速摄影法^[15-16]、浸入法、雷达观测法^[17-18]、光学雨量计法^[19]等。

但上述各种方法都存在工作冗繁和误差较大的问题, 并且适用于实验室的各种雨滴特性测试方法都不能进行实时测量。奥地利 Joanneum Research 公司与欧洲太空局、欧洲空间技术中心 (European Space Agency/European Space and Technology Centre) 等机构共同研发的 2D 视频雨滴谱仪 (2D-video-distrometer) 能够进行雨滴特性的观测和初步分析, 而且能快速、准确、实时地观测雨滴大小、运动速度、雨滴形状及分布等雨滴特性^[20-22]。

收稿日期: 2014-07-21 修回日期: 2014-07-23

* 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-12-0473)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2011BAD29B08) 和高等学校学科创新引智计划 (111 计划) 资助项目 (B12007)

作者简介: 韩文霆, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: hanwt2000@126.com

本文利用 2D 视频雨滴谱仪, 研究人工模拟降雨系统喷头雨滴特性与工作参数之间的关系, 分析喷嘴直径、工作压力对雨滴平均直径变化趋势的影响, 建立雨滴平均直径与垂直下落速度间的关系模型。

1 材料与方法

1.1 试验环境

试验在陕西省杨凌区中国旱地节水农业研究院国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心的灌溉水力学大厅内进行, 该试验场地长 80 m 宽 30 m, 有提供固定压力 0 ~ 500 kPa 的调频泵及管道组成系统。试验场地平整, 最大坡度小于 1°, 室内无风。由于试验是在无风条件下进行, 风速测量传感器不接入设备, 风速对雨滴形状、速度的影响忽略不计。

1.2 喷头试验系统

试验选用的人工模拟降雨系统喷头是美国 Spaying System 公司生产的 Fulljet 旋转下喷式喷头, 有 1 号、2 号、3 号、4 号 4 种规格, 本文选用 1 号喷头, 喷嘴直径分为 2、3、4 mm 3 种, 工作压力在 100 ~ 250 kPa 之间, 降雨半径为 2 ~ 2.5 m。试验程序和方法参照《喷灌工程技术规范》^[23] 和 GB/T 20183.1—2006^[24]。试验喷头安装在水平固定的管道上, 试验时喷嘴安装高度为距地面 2 m。由于人工模拟降雨系统喷头喷射水柱呈锥形, 试验中在喷头垂直下方设置不同角度的辐射线, 测量不同辐射线上雨滴的特性参数, 考虑到室内为无风的测量环境, 选取 0°、45°、90°、135°、180° 5 个位置作为测量点, 放置视频雨滴谱仪, 对 2、3、4 mm 3 种喷嘴直径的喷头在 100、150、200 kPa 工作压力条件下分别进行测试和记录。试验总体结构如图 1 所示, 试验设计方案如图 2 所示。

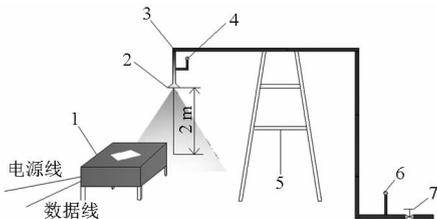


图 1 试验整体结构图

Fig. 1 Overall configuration of experimental tests

1. 视频雨滴谱仪 2. 喷头 3. PVC 管 4. 压力表 5. 支架 6. 流量计 7. 压力控制阀

1.3 2D 视频雨滴谱仪

该设备由奥地利 Joanneum Research 公司与欧洲太空局、欧洲空间技术中心 (European Space Agency/European Space and Technology Centre) 等机

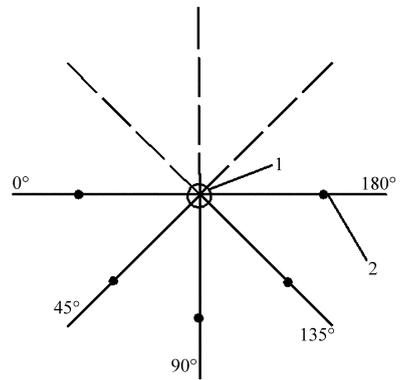


图 2 试验设计方案图

Fig. 2 Design of experimental tests

1. 喷头位置 2. 测量点

构共同研发。视频雨滴谱仪的测量部分主要由 2 个摄像头、2 个背光源组成, 2 个摄像头拍摄角度垂直且存在 5 ~ 6 mm 高度差, 当高速运动的水滴进入测量范围, 摄像头对其进行线形扫描, 定性定量记录降水过程, 这是目前测量雨滴特性的最佳方法。视频雨滴谱仪由传感器单元 (Sensor unit, SU)、室内用户终端 (Indoor user terminal, IUT) 及电源部分 (Power supply unit, PSU) 组成, 其功能结构如图 3 所示。摄像机线扫描频率约为 55 kHz, 可测试范围为 100 mm × 100 mm, 最大可测垂直速度为 10 m/s, 最大可测雨滴直径为 10 mm, 最长可连续工作时间为 2 500 h。用户终端可以实现雨滴形状、降落速度、降雨强度、雨滴个数的记录, 并可以初步计算和分析雨滴平均直径、雨滴大小分布及雨滴直径与垂直降落速度的关系^[20]。

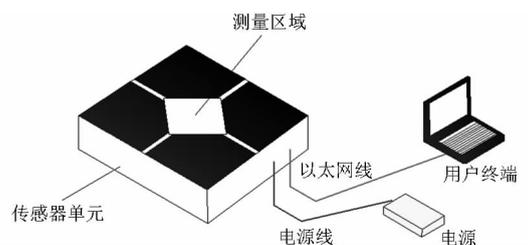


图 3 视频雨滴谱仪功能结构图^[20]

Fig. 3 Schematic overview of main components of 2D-video-distrometer

传感器工作原理如图 4 所示。传感器部分包括 2 个光路, 每个光路包括 1 个光源 (Illumination A/B) 及其他光学元件, 2 个线扫描相机 (Camera A/B) 分别与光源相对, 2 个光路的横截面重叠部分为测量区域, 雨滴落入测量区域时阻碍光路形成阴影, 线扫描相机扫描其阴影从而形成图像^[21-22]。

1.4 雨滴直径及其计算方法

描述雨滴直径的特征参数通常有 2 种: 平均直径和特征直径。特征直径是指在雨滴尺寸分布曲线中寻找几个特征点进行分析, 特征点所代表的直径

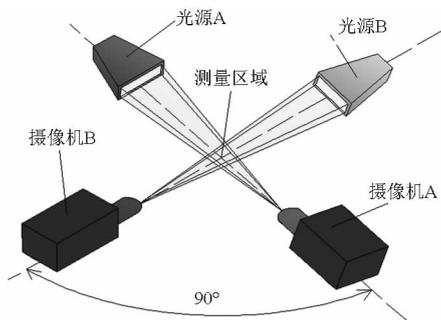
图4 视频雨滴谱仪传感器单元功能结构图^[20]

Fig. 4 Measurement principle of compact 2D-video-distrometer

即是特征直径。平均直径包括长度平均直径、表面积平均直径、体积平均直径、索特平均直径^[10]。

本文采用的平均直径计算方法是根据观测到的雨滴形状,通过已知其长轴、短轴和扁率计算出雨滴在下落过程中的体积,再将该体积换算成规则球体的体积,并计算其直径,计算所得的直径就是该雨滴的平均直径。即

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (1)$$

$$O = \frac{a-b}{a} \quad (2)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (3)$$

式中 V ——椭球体体积(等于规则球体体积)

a ——半长轴长度 b ——半短轴长度

c —— z 轴方向截距

O ——扁率 D ——平均直径

a 、 c 和 O 可以通过图像测量得到,由此可以算得雨滴的平均直径。

1.5 雨滴垂直降落速度测定方法

由于视频雨滴谱仪的2个线扫描摄像机A、B的拍摄光路存在高度差,且该高度固定并已知,因此可以通过测定液滴进入、离开相机A和相机B的拍摄范围的时间,计算雨滴通过测量区域时的平均速度。又因为相机A、B测量光路的高度差约为6mm,可近似认为该平均速度就是雨滴通过测量区域时的速度。速度计算原理如图5所示。即

$$v = \frac{2d}{t_2 - t_0 + t_3 - t_1} \quad (4)$$

式中 v ——垂直下落速度

d ——相机A、B光路的垂直高度差

t_0 ——雨滴进入相机A测试范围的时间

t_1 ——雨滴离开相机A测试范围的时间

t_2 ——雨滴进入相机B测试范围的时间

t_3 ——雨滴离开相机B测试范围的时间

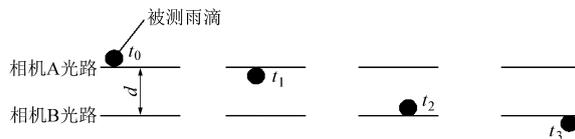


图5 雨滴垂直下落速度计算原理图

Fig. 5 Measurement principle of vertical velocity

1.6 雨滴直径与垂直降落速度拟合关系

现有的常用雨滴直径与垂直降落速度拟合关系有2种,一种是Atlas等^[3]研究得出的静止大气中雨滴垂直下落速度与直径的相关方程;另一种是Gunn和Kinzer^[4]得出的著名的Gunn-Kinzer关系。

其中Atlas静止大气中雨滴垂直下落速度与直径拟合关系式为

$$v(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D} \quad (5)$$

Gunn-Kinzer得出的关系如表1所示。本文实测了人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴直径与垂直降落速度,做出其分布图,并观测所得分布图与已知2种分布是否一致。由于已知的Atlas关系式所得曲线经过多次平移、翻转变换后接近对数函数曲线,因此以对数函数为模型,运用Excel软件对人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴的直径和垂直降落速度关系进行回归分析。

表1 Gunn-Kinzer雨滴直径与垂直降落速度关系

Tab. 1 Vertical velocity versus diameter after

Gunn-Kinzer

| 雨滴直径/mm | 雨滴垂直降落速度/(m·s ⁻¹) |
|---------|-------------------------------|
| 0.1 | 0.27 |
| 0.2 | 0.72 |
| 0.3 | 1.17 |
| 0.4 | 1.62 |
| 0.5 | 2.06 |
| 0.6 | 2.47 |
| 0.7 | 2.87 |
| 0.8 | 3.27 |
| 0.9 | 3.67 |
| 1.0 | 4.03 |
| 1.2 | 4.64 |
| 1.4 | 5.17 |
| 1.6 | 5.65 |
| 1.8 | 6.09 |
| 2.0 | 6.49 |
| 2.4 | 7.27 |
| 2.8 | 7.82 |
| 3.2 | 8.26 |
| 3.6 | 8.60 |
| 4.0 | 8.83 |
| 4.4 | 8.98 |
| 4.8 | 9.07 |
| 5.2 | 9.12 |
| 5.6 | 9.16 |
| 6.0 | 9.17 |
| 6.5 | 9.18 |

2 结果与分析

2.1 喷头喷洒雨滴形状分析

根据现有研究结果可知降落过程中的雨滴不一定是圆球状的,Edgerton^[25]用照相法观测到在无风的空气中下落的大雨滴呈扁平状,而不是人们所想象的流线型;Mutchler^[26]研究发现,当下落的雨滴达到终速时,3 mm 以下的雨滴保持圆球形,3 mm 以上的雨滴呈扁平状。根据任树梅等^[27]对人工模拟降雨技术的研究,具有初速度的下喷式喷头在降雨高度达到 2 m 时,所测定的雨滴直径范围在 0~3 mm 之间,个别超过 4 mm。本研究中测得喷嘴直径 2 mm、工作压力 100 kPa 条件下雨滴尺寸分布如图 6 所示。

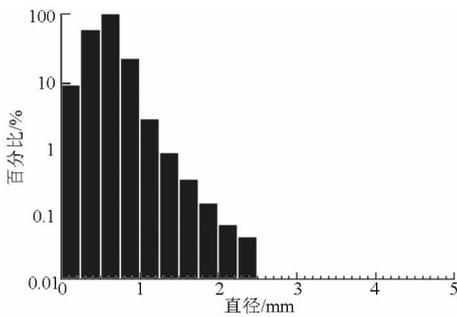
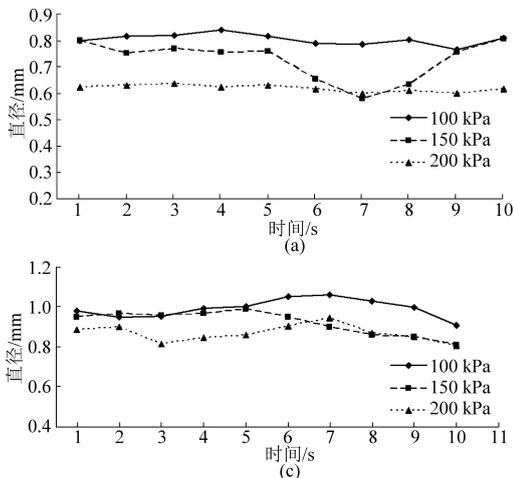


图 6 雨滴尺寸分布

Fig. 6 Drop size distribution

该对数分布图将雨滴直径从最小值到最大值分成 10 类,横坐标为雨滴直径,纵坐标为各类直径的雨滴有效测量面积与所有雨滴最大测量面积之比。由图 6 可知,当喷嘴直径为 2 mm、工作压力为 100 kPa 时喷头喷洒雨滴的直径范围在 0~2.5 mm 之间,且主要集中在 0.7~0.9 mm 之间,与任树梅等^[27]的研究结果一致。

图 7 为平均直径 0.78 mm 的雨滴形状。由图可知雨滴下落时的形状保持椭球状,但长轴、短轴之比



(a) 喷嘴直径 2 mm

为 1.02,十分接近圆球。在喷嘴直径 2 mm、工作压力 100 kPa 条件下的其余平均直径的雨滴形状与之类似。当喷嘴直径不变,工作压力增大时,雨滴直径略有减小,雨滴形状依然为十分接近圆球的椭球体;当工作压力不变,喷嘴直径变为 3、4 mm 时,雨滴直径增大,但仍在 0~3 mm 范围内,雨滴形状依然为十分接近圆球的椭球体,与 Mutchler^[19]的研究结果一致。

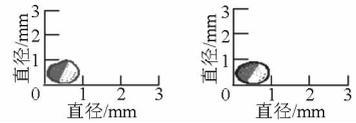


图 7 雨滴形状视图

Fig. 7 Drop view

(a) 前视图 (b) 侧视图

2.2 喷头喷洒雨滴平均直径分布分析

试验中测量了 2、3、4 mm 3 种喷嘴直径的喷头分别在 100、150、200 kPa 工作压力下的雨滴平均直径的变化情况,视频雨滴谱仪平均每毫秒记录并计算一次雨滴的平均直径,每种条件下记录 60 000~70 000 个雨滴的平均直径,由于数据繁多,运用 Excel 软件对每秒内记录雨滴直径求其平均值,分析 10 s 内直径分布的变化,分析结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在喷嘴直径相同的情况下,随着工作压力增大,喷头喷洒雨滴平均直径总体呈变小趋势,且工作压力从 100 kPa 上升到 150 kPa 时雨滴平均直径的减小情况比工作压力从 150 kPa 上升到 200 kPa 时雨滴平均直径的减小情况明显。在工作压力为 100 kPa 的条件下,随着喷嘴直径的增大,喷头喷洒雨滴直径呈增大趋势。

图中个别点变化趋势不符合上述规律可能是由于喷头工作压力不稳定造成的。

2.3 雨滴平均直径与垂直降落速度的回归分析

通过视频雨滴谱仪用户终端对每滴雨滴平均直

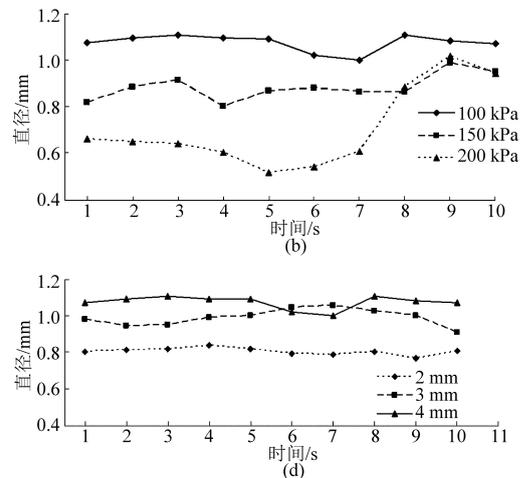


图 8 不同条件下雨滴直径的对比

Fig. 8 Drop diameter comparison of different conditions

(a) 喷嘴直径 2 mm (b) 喷嘴直径 3 mm (c) 喷嘴直径 4 mm (d) 工作压力 100 kPa

径和其对对应下落速度的分布进行观测和分析,并对比其与 Atlas 静止大气中雨滴垂直下落速度与直径的相关方程和 Gunn - Kinzer 关系的一致性。喷嘴直径 2 mm、工作压力 100 kPa 时的雨滴平均直径与垂直速度关系的分布图如图 9 所示,其余情况分布图与之类似。

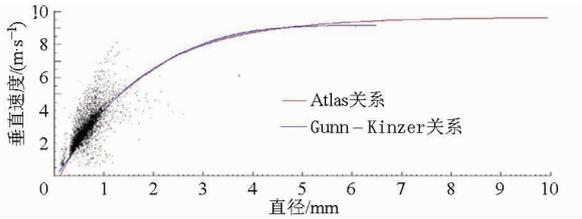


图9 雨滴平均直径与垂直速度的对应分布

Fig.9 Distribution of diameter versus vertical velocity

由图 9 可知本文研究结果与 Atlas 及 Gunn - Kinzer 关系式的一致性良好,部分点与上述关系不一致可能是由于雨滴飞溅、工作压力及喷头本身参数等因素的影响。

运用 Excel 软件对不同喷嘴直径的喷头分别在不同工作压力下测得的雨滴平均直径和垂直下落速度的关系进行回归分析,得出其关系模型和决定系数 R^2 。由于视频雨滴谱仪记录的数据繁多,对测得的数据每 200 ms 进行一次采样取点,共取出 10 s 内 50 个点的值进行回归分析,拟合方程如表 2 所示。

由表 2 可知该模型的相关性较好,可以对不同工作条件下的喷头喷洒雨滴的垂直降落速度进行预测,从而得出雨滴的打击动能。

3 结论

(1) 在人工模拟降雨系统中,垂直下喷式喷头

表 2 不同工作条件下试验数据的回归方程

Tab.2 Regression equation of experimental data under different working conditions

| 工作条件 | | 回归方程 | R^2 |
|-------------|--------------|-----------------------------|--------|
| 喷嘴直径 /mm | 工作压力 /kPa | | |
| 2 | 100 | $y = 1.9311 \ln x + 3.8084$ | 0.8305 |
| 2 | 150 | $y = 2.6927 \ln x + 3.7752$ | 0.8361 |
| 2 | 200 | $y = 1.6720 \ln x + 3.5593$ | 0.8704 |
| 3 | 100 | $y = 2.1110 \ln x + 4.1147$ | 0.8668 |
| 3 | 150 | $y = 1.8375 \ln x + 3.9266$ | 0.8656 |
| 3 | 200 | $y = 1.8171 \ln x + 4.0264$ | 0.9174 |
| 4 | 100 | $y = 1.6375 \ln x + 3.9992$ | 0.8185 |
| 4 | 150 | $y = 2.1534 \ln x + 3.9599$ | 0.8111 |
| 4 | 200 | $y = 1.3655 \ln x + 3.6150$ | 0.8789 |

喷洒雨滴的直径范围在 0 ~ 3 mm 以内,其下落雨滴形状为近似于圆球的椭球体。

(2) 在喷头喷嘴直径相同的情况下,随着工作压力增大,喷头喷洒雨滴平均直径呈变小趋势,且随着压力的增大这种变化趋势变缓。在工作压力相同的条件下,随着喷嘴直径的增大,喷头喷洒雨滴直径呈增大趋势。

(3) 对不同喷嘴直径的喷头在不同工作压力下的雨滴平均直径和雨滴垂直下落速度的关系进行回归分析,建立拟合模型,其决定系数 R^2 均大于 0.81,模型能够较好地预测不同喷嘴直径的喷头在不同工作压力下喷洒雨滴的垂直降落速度。

(4) 对喷头雨滴直径、分布、下落速度等特性的分析,及对雨滴平均直径和垂直降落速度关系模型的建立,能够为计算雨滴动能,建立侵蚀量预报数学模式提供有关降雨侵蚀力的依据。

参 考 文 献

- 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983, 11(3): 34 - 38.
- Best A C. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76(16): 16 - 36.
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1 - 35.
- Gunn R, Kinzer G D. Terminal velocity of water droplets in stagnant air[J]. Journal of Meteorology, 1949, 6(4): 243 - 248.
- Peters G, Fischer B. Profiles of raindrop size distribution as retrieved by micro rain radars[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(12): 1930 - 1949.
- 窦葆璋,周佩华. 雨滴的观测和计算方法[J]. 水土保持通报, 1982, 2(1): 44 - 47.
- 周佩华,窦葆璋,孙清芳,等. 降雨能量的试验研究初报[J]. 水土保持通报, 1981, 1(1): 50 - 60.
- 吴光艳,吴发启,尹武君,等. 陕西杨凌天然降雨雨滴特性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 48 - 51.
Wu Guangyan, Wu Faqi, Yin Wujun, et al. Study on characteristic of natural rainfall in Yangling, Shannixi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 48 - 51. (in Chinese)
- 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(2): 22 - 24.
- 刘乃玲,张旭. 螺旋型喷嘴液滴分布特性及液滴直径经验公式的拟合[J]. 实验流体力学, 2006, 20(3): 8 - 12.
- 刘文帅,韩文霆,姚小敏,等. 弹性喷嘴变量喷头结构设计及参数模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 80 - 86.
Liu Wenshuai, Han Wenting, Yao Xiaomin, et al. Configuration design and parameter model for flexible nozzle of variable-rate sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 80 - 86. (in Chinese)
- 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)
- 13 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)
- 14 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.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Montero J, Tarjuelo J M, Carrión P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer[J]. Irrigation Science, 2003, 22(2): 47 – 56.
- 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 陈振宇, 叶全民, 赵美香, 等. 喷雾雾滴滤纸率定法研究初探[J]. 山西农业大学学报, 1996, 16(4): 422 – 425.
Chen Zhenyu, Ye Quanmin, Zhao Meixiang, et al. The elementary study of spraying droplets with filter paper ratio-assumed methods[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1996, 16(4): 422 – 425. (in Chinese)
- 20 Joanneum Research Company. User manual[S]. 2013.
- 21 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 基于 2DVD 的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 128 – 133.
Gong Xinghui, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Drop size distribution of fixed spray-plate sprinklers with two-dimensional video disdrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 128 – 133. (in Chinese)
- 22 Kruger A, Witold F Krajewski. Two-dimensional video disdrometer: a description[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602 – 617.
- 23 GB/T50085—2007 喷灌工程技术规范[S]. 2007.
- 24 GB/T 20183.1—2006 植物保护机械 喷雾设备 第 1 部分: 喷雾机喷头试验方法[S]. 2006.
- 25 Edgerton H E, Killian J R. Flash: seeing the unseen by ultra high-speed photography[M]. Cambridge: MIT Press, 1939.
- 26 Mutchler C K. Parameters for describing raindrop splash[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1967, 22: 22 – 91.
- 27 任树梅, 刘洪禄, 顾涛. 人工模拟降雨技术研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2003(3): 73 – 75.

Raindrop Characteristics of Sprinklers for Artificial Rainfall System

Han Wenting^{1,2} Cao Pei¹ Liu Wenshuai¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the water-saving irrigation, the characteristics of sprinklered raindrops is an important standard of nozzles hydraulic performance. The parameters which can reflect the characteristics of raindrops mainly contain drop diameter, drop size distribution, drop velocity and raindrop kinetic energy, in all of this parameters, the raindrop diameter is the basis of other parameters studies. This paper makes accurate measurements of drop view, drop size distribution, equi-volumetric diameter and vertical velocity of raindrops by using 2D-video-distrometer. It also analyses the trend on raindrop equi-volumetric diameter affected by nozzle size and working stress, and establishes a model based on the relationship of raindrop equi-volumetric diameter and the vertical velocity. The results show that the equi-volumetric diameter of artificial rainfall sprinklers raindrop is ranged from 0 to 3mm and when the working pressure increased, the equi-volumetric diameter of raindrops decreased as the sprinklers size is not changed; on the contrary, when the working pressure is changeless, the equi-volumetric diameter of raindrops increased as the sprinklers size increased. According to the relationship model of equi-volumetric diameter versus vertical velocity of raindrops, it can get of good prediction of the vertical velocity which may provide a fundamental basis for kinetic energy calculation and establishing the mathematical models of erosion forecasting.

Key words: Raindrop characteristics Artificial rainfall system 2D-video-distrometer Equi-volumetric diameter