

风速对雨滴形状及下落速度的影响研究

卢会国, 贾宁, 蒋娟萍

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:为研究风速对雨滴形状和下落速度的影响,忽略其他因素分析雨滴下落过程中的受力情况,通过 Beard 和 Chuang 模型发现雨滴直径大于1 mm时雨滴发生形变,在只考虑水平风应力和空气阻曳力的作用下,通过建立模型观察水平风速影响雨滴水平末速度的变化过程。结果表明,当风速较小时雨滴更圆润,随着风速的增加雨滴形变更大。当风速小的时候平均粒子大小更大,反之随着风速的增加雨滴的直径变小,分析可能是风导致雨滴破裂产生的结果。

关键词:水平风;雨滴;形变;末速度;BC 模型

中图分类号:P426.55

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.03.005

0 引言

气象自动观测站的推广建设,使雨滴谱观测趋向于自动观测,现今最常使用一维激光雨滴谱仪。二维视频雨滴谱仪因价格昂贵,相应使用较少,它可以获得在不同方向上大小、雨滴下落速度、直径和雨滴谱分布,除此之外,还能够显示雨滴的形状,以 HVSD 双线阵降水粒子探测器和二维雨滴谱仪尤为显著^[1-2]。如果在水平风存在的情况下,雨滴会有水平方向运动的状态,外加垂直下落的状态,那么雨滴的运动轨迹就是一条抛物线。现在对雨滴垂直降落速度的研究比较多,在水平方向上产生的速度研究较少,在水平风作用下对雨滴下落速度的研究中雨滴水平速度的研究更少。

早年国外学者就对雨滴谱的测量观测有浓厚的兴趣,由于受测量技术的限制,早期的雨滴谱测量方法主要有滤纸色斑法、动力学法等。近年来主要是激光雨滴谱法^[3]。中国对雨滴谱的研究和观测是在二十世纪中叶左右开始的,有研究所在知名的几座旅游景点山间做过研究观测,发现云降水物理过程的一些成因,让中国在雨滴谱方面的研究更进一步。从二十世纪晚期以后,这项工作接连不断地被展开,获得了一项又一项的突破,特别是近几年,对国外生产发明的用于雨滴谱测量观测的仪器积极引进学习^[4],大量云降水物理特征被发现总结。雨滴是云的动力和微物理过程的结果,雨滴谱是降水的基本物理量,反应雨滴数浓度与雨滴大小的关系,通过对雨滴谱的研究可以促进降水机

制的理论研究。

1 数据来源与研究方法

雨滴谱仪所在观测场位于成都市,亚热带湿润季风气候是成都地区的显著气候^[5]。在2018年夏天成都进入汛期,特别是在2018年7月全市出现明显的降雨过程,所测地区雨量从小雨到大雨不等,为该研究提供了充足的研究数据。该数据主要采用的是2018年7月16日(548877个粒子样本)7月17日(305995个粒子样本)2天的雨滴谱仪数据,测量位置是在成都信息工程大学航空港校区的大气观测场内,仪器名称为2DVD 视频二维雨滴谱仪,如图1所示。



图1 安装在大气观测场内的二维雨滴谱仪

1.1 雨滴直径及计算方法

在重力作用下雨滴自由下降,使更多雨滴独有的特性被展示出来,其中就包括了雨滴的尺寸大小、速度变化及形状变化等。特别是形状,由于受到各种压力、阻力、动力及张力的影响,雨滴的形状不完全等同于圆球形,而是呈现各种不同形状的椭球形,但也不等同于

椭圆形,可能出现下端平整而上端凸起的情形。由此可以看出,如果雨滴直径变化了,雨滴的形状也会有相应的改变,这种改变一般是雨滴越大发生的变化就越大。

Beard 和 Chuang 在研究雨滴形变提出了 Beard 和 Chuang 模型^[6-8],描述了上述情况是因为雨滴受到各种力的作用叠加而成的,这种模型是根据雨滴平均直径的变化来生成的,由二人合力完成,简称为 BC 模型。图 2 在坐标轴中画出的平均直径为 0.2 mm、0.4 mm、0.8 mm、1 mm、1.2 mm 时的雨滴形状。

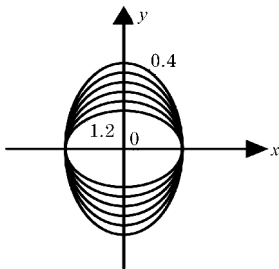


图 2 不同直径对应的雨滴形状

因此,在水平风(不考虑其他因素)作用下,雨滴形状研究需研究水平风对雨滴形变的影响^[1]。研究采用的是二维雨滴谱仪的观测数据,由对雨滴谱测量研究的介绍,能够得到该数据的雨滴长短轴之比,此比值为雨滴扁率,然后也可以知道雨滴降落时垂直方向可测到的距离,即换算出规则的圆球体体积,再计算出雨滴的平均直径。

$$V=\frac{4}{3}\pi abc \tag{1}$$

$$O=\frac{a-b}{a}\left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

$$D=\left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

式中: V 为体积, a 为长半轴, b 为短半轴, c 为垂直方向距离, O 为扁率, D 为平均直径。 a 、 c 和 O 是能够测量图像来得到的,从而能够计算出平均直径。

1.2 雨滴下落速度及计算方法

日常生活中随时都有风,区别仅在于风大风小,故雨滴降落的过程必然受到水平风的作用^[2],那么受到水平风应力和空气阻曳力双重作用的雨滴,出现二者均衡时,根据物理分析可得出此时雨滴的水平速度会达到一个稳定的峰值^[1],称为雨滴的水平末速度。从图 3 可知,把 F 看作是水平风对雨滴的作用力, F' 即是空气阻曳力。

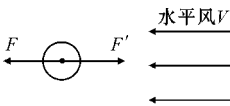


图 3 雨滴在水平方向上的受力

基于水平风作用下,雨滴水平末速度的变化情况,通过分析二维雨滴谱仪的传感器元件可以得出两个摄像机之间的高度差,使用 6 mm 的高度差,再通过记录进入测量区域离开测量区域之间的时间差,通过式(4)计算出雨滴平均速度。因为这个速度的变化不大,且忽略了其他不必要因素的影响,把该平均速度当作雨滴水平末速度来建立模型,即

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

式中: v 为下落水平速度, d 为两个相机间的高度差, t_0 为进入相机 A 的时间, t_1 为离开相机 A 的时间, t_2 为离开相机 B 的时间, t_3 为离开相机 B 的时间。

2 雨滴谱数据特征

2.1 数据样本信息

样本信息如表 1 所示,实验采用 2018 年 7 月 16 日的 548877 个样本数据与 2018 年 7 月 17 日 305995 个样本数据。

表 1 实验样本信息表

时间	2018-07-16	2018-07-17
样本数/个	548877	305995
粒子直径平均值/mm	0.7917	0.7916
平均下降速度/(m/s)	1.771	1.775
扁率水平直径与垂直高度比	1.580	1.367
平均体积/mm ³	0.7423	0.6231
平均水平直径/mm	0.8333	0.8183
平均高度/mm	0.8405	0.8312
下雨的开始时刻	0:03:21	2:50:26
下雨的结束时刻	12:57:14	10:23:12
下雨时段风平均值、最大值/(m/s)	1.25,7.8	1.09,4.1
下雨时段温度平均、最低、最高值/℃	23.64,22.4,27.1	24.06,23.3,26.0
下雨时段气压平均、最低、最高值/hPa	949.10,948.1,949.8	948.49,947.8,949.3

2.2 雨滴谱分布特征

根据尺寸大小的不同,雨滴的分布是多样的,一般

是不同直径的雨滴所占的比例形成的图(表 2、3)。根据这一定义,把所测得的数据按照合理的划分,可以建立如图 4、5 所示的雨滴尺寸分布。

表 2 2018 年 7 月 16 日粒子尺寸分布表		
序号	粒子直径/mm	比例/%
1	>0.2	9.144
2	0.2~0.39	18.444
3	0.4~0.59	16.634
4	0.6~0.79	13.94
5	0.8~0.99	12.60
6	1~1.19	9.52
7	1.2~1.39	6.62
8	1.4~1.59	4.62
9	1.6~1.79	3.25
10	1.8~1.99	2.14
11	2~2.19	1.28
12	2.2~2.39	0.77
13	2.4~2.59	0.48
14	2.6~2.79	0.27
15	2.8~2.99	0.17
16	3~3.19	0.11
17	>3.2	0.18

表 3 2018 年 7 月 17 日粒子尺寸分布表		
序号	粒子直径/mm	比例/%
1	<0.2	5.48
2	0.2~0.39	17.32
3	0.4~0.59	19.16
4	0.6~0.79	15.50
5	0.8~0.99	13.65
6	1~1.19	10.34
7	1.2~1.39	6.92
8	1.4~1.59	4.71
9	1.6~1.79	2.96
10	1.8~1.99	1.82
11	2~2.19	1.04
12	2.2~2.39	0.534
13	2.4~2.59	0.27
14	2.6~2.79	0.12
15	2.8~2.99	0.07
16	3~3.19	0.03
17	>3.2	0.07

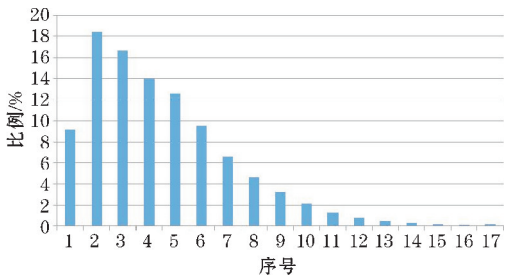


图 4 2018 年 7 月 16 日雨滴尺寸分布图

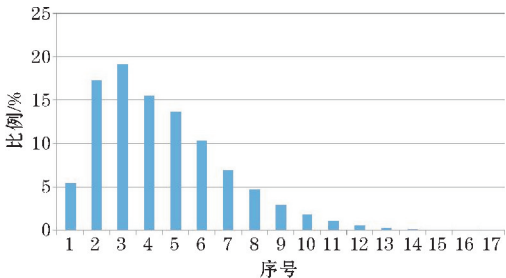


图 5 2018 年 7 月 17 日雨滴尺寸分布图

图 4~5 把雨滴平均直径按照一定的顺序分成了 17 类,雨滴平均直径所占百分比为纵坐标、17 类粒子直径划分的序号为横坐标。由表 2、3 可知,所测粒子直径范围在 0~3.2 mm,数据的聚集范围显著。由图 4、5 可知,直径分布在 0.2~1.4 mm 的粒子所占比例较高。

2.3 平均直径与扁率的对应分布图

平均直径与扁率的对应分布(图 6)体现了整次降水过程中雨滴形状随平均直径的变化特征,可以看出随着雨滴直径的增大,扁率是减小的状态,只是减小得不明显,如果把图 6 的横纵坐标调换,可以发现扁率呈现出正态分布的特征,接近于 Brandes 模型。

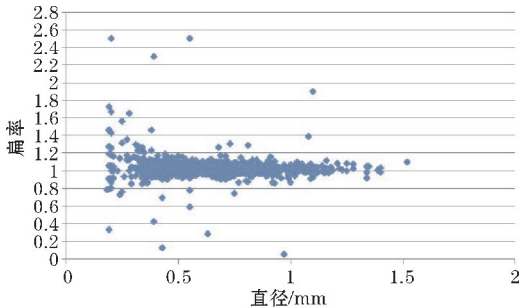


图 6 平均直径与扁率的对应分布图

2.3.1 风对雨滴形状的影响分析

根据 BC 模型^[7]可以得出,若雨滴平均直径大于 1.0 mm,雨滴会发生特别显著的形变,故可根据这一结论研究风速对雨滴形状的影响。

由图 7、8 变化情况分析,当风速较小时雨滴更圆润,随着风速的增加雨滴变形更大。当风速小的时候平均粒子大小更大,反之随着风速的增大雨滴的直径呈下降趋势。

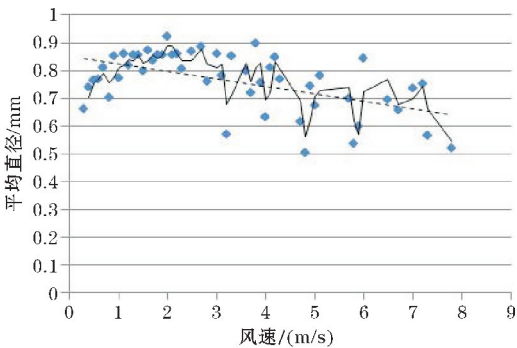


图7 风速影响雨滴直径变化图

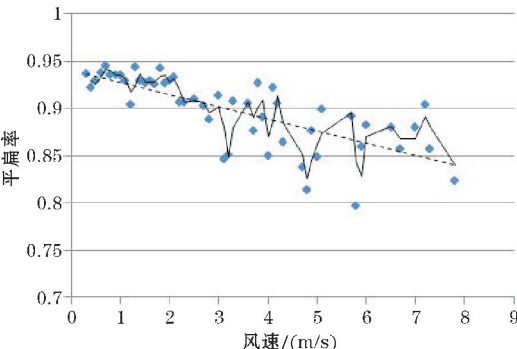


图8 风速影响雨滴扁平率变化图

2.3.2 雨滴形状视图

图9为风速为3.9 m/s时产生的雨滴形状视图,雨滴的平均直径为1.0 mm。通过图9能得到雨滴降落时的形状近似圆球状,有一点偏向于椭球状,其中前视图扁平率为0.94,侧视图为1.06,十分靠近圆球,与BC模型的结论基本一致。

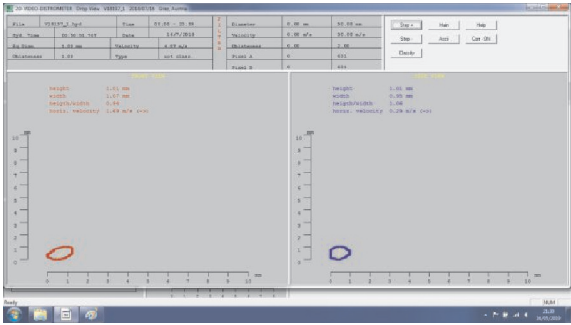


图9 雨滴形状视图

3 风速对雨滴下落速度的影响

3.1 雨滴下落速度

雨滴在下降过程中产生的速度叫雨滴的降落速度,降落速度会因为雨滴尺寸变化而变化。雨滴下落过程中会受到阻力作用,随着雨滴下落速度的增大,受到的阻力随之增大,使得其速度增加的频率变慢,即雨滴下落加速度变小,直到雨滴受到的各种力处于一个

平衡状态,此时雨滴即可维持在一个相对稳定的状态,这个稳定状态产生的末速度称为雨滴下落速度。

实验只考虑水平风应力和空气阻力对雨滴的作用。风应力是基于地表上的或者是建筑物外一块区域,受到来自附近的空气层对这块区域施加的力。阻力是流体对有速度的物体施加的力,这个力与物体的速度方向相反,即为相对运动阻力。

3.2 风速对雨滴下落速度的影响模型

3.2.1 雨滴平均直径与垂直速度关系的分布图

图10横纵坐标分别是雨滴平均直径和雨滴下落的垂直速度,研究数据与Atlas^[9]及Gunn-Kinzer^[10]关系式有一致良好性^[11]。

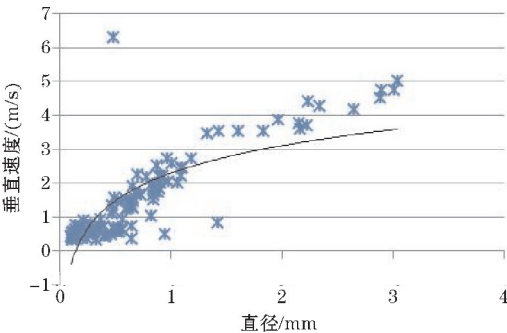


图10 雨滴平均直径与垂直速度的对应分布

3.2.2 风速对水平末速度的影响模型

拟合曲线是利用众多的离散点根据一定的规律组合而成的,通常很多不规则的曲线可以通过曲线拟合的方式来研究其规律。在建立数学模型的过程中,先产生众多的离散点,再采用插值的方法把点连成微小的线段,然后再依次连接这些微小的线段,从而形成相应的曲线,这就是曲线拟合的方法。曲线一般分两种,一种是能够用公式表示的规则曲线,另一种只能由接近于离散点的插值绘制而成的拟合曲线。

风速对水平末速度的影响拟合曲线如图11所示。忽略其他因素的影响,只考虑水平风的影响,根据拟合曲线可以看出水平风速对雨滴水平末速度的产生起促进作用。

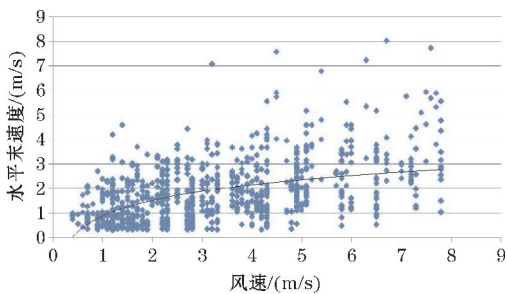


图11 风速对水平末速度的影响

4 结论

为研究不同风速对雨滴形状和下落速度的影响,在不考虑其他因素的情况下,研究了不同风速对雨滴形状的影响,并在只考虑水平风应力和空气阻曳力的作用下,雨滴的水平末速度的变化情况,得出如下结论:

(1)雨滴粒子直径分布在0.2~1.4 mm的粒子所占比例较高;雨滴曲率基本维持在0.8~1 mm,所占比例为70%左右。

(2)雨滴下落速度与雨滴大小有关,主要取决于雨滴扁平率。

(3)在水平风的作用下,水平末速度起促进作用。

(4)当风速较小时雨滴更圆润,随着风速的增加雨滴变形更大。当风速小的时候平均粒子大小更大,反之随着风速的增加雨滴的直径下降,分析可能是风导致雨滴的破裂产生的结果。

参考文献:

- [1] 苏小勇,高太长,刘西川,等.水平风作用下雨滴水平速度的数值仿真[J].气象科学,2013,33(3):282-288.
- [2] Beard K V, Brangi V N, Thurai M. A new understanding of raindrop shape[J]. Atmos Res, 2010, 97:396-415.

- [3] 陈博文.低矮房屋表面风雨压力 CFD 数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [4] 冯雷,陈宝君.利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定 Z-R 关系[J].气象科学,2009,29(2):2192-2198.
- [5] 段玲燕.输电导线降雨模型及雨荷载效应研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.
- [6] 舒小健,高太长,刘西川,等.基于降水微物理特征测量仪的雨滴形状观测与分析[J].气象,2017,44(7):313-322.
- [7] Beard K V, Chuang C. A new model for the equilibrium shape of raindrops [J]. Atmos. Oceanic Tech., 1987, 44(11):150-524
- [8] Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. J Appl Meteor, 2002, 41(6):674-684.
- [9] 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.
- [10] Gunn R, Kinzer G D. Terminal velocity of water droplets in stagnant air[J]. Journal of Meteorology, 1949, 6(4):243-248.
- [11] 韩文霆,曹培,刘文帅.人工模拟降雨系统喷头喷洒雨滴特性测试[J].农业机械学报,2014,45(12):56-61.

Effects of Wind Speed on Shape and Fall Velocity of Raindrops

LU Huiguo, JIA Ning, JIANG Juanping

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the influence of wind speed on the shape and fall velocity of raindrops, the other factors to analyze the force in the process of raindrops falling were first ignored, which is found that the raindrops deformation occurs when the diameter of raindrops is larger than 1mm by Beard and Chuang models. Under the effect of horizontal wind stress and air drag force only, a model is established to observe the process by which the horizontal wind speed affects the final horizontal velocity of raindrops. The results show that when the wind speed is small, the raindrops are more rounded, and the shape of the raindrops changes greatly with the increase of wind speed. When the wind speed is small, the average particle size is larger. On the contrary, the diameter of the raindrops becomes smaller as the wind speed increases. Through analysis, it may be the result of the breakage of the raindrops caused by the wind.

Keywords: the level of the wind; raindrops; deformation; the end of the speed; BC model