

降水瞬态微物理特征测量仪的研制及应用

刘西川^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 高太长¹, 赵世军¹

(1.国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2.中国气象局高影响天气重点开放实验室,湖南 长沙 410073)

摘要: 降水粒子尺度、形状、速度等微物理特征是云降水物理研究、人工影响天气等领域的重要基础数据。针对防灾减灾、数值预报等领域对降水微物理资料的迫切需求,发明了一种基于单帧双脉冲成像的降水粒子测量新方法,研制了降水瞬态微物理特征测量仪,实现了对降水粒子的尺度、形状和速度的同步测量,成果纳入世界气象组织最新版《气象仪器与观测方法指南》,在大气科学研究与业务领域得到广泛应用。

关键词 降水; 微物理特征; 雨滴谱; 成像

中图分类号: P414 **文献标识码:** A

Development and application of the precipitation microphysical characteristic sensor

LIU Xichuan^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, GAO Taichang¹, ZHAO Shijun¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2 High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha 410073, China)

Abstract: The size, shape and velocity of precipitation particles are the important basic data in the field of cloud precipitation physics and weather modification. To meet the urgent demand for precipitation microphysical data in the fields of disaster prevention and mitigation, numerical prediction and so on, a new method of measuring precipitation particles based on double-pulse imaging in single-frame is proposed, the Precipitation Microphysical Characteristic Sensor (PMCS) is developed to measure the size, shape and velocity of precipitation particles simultaneously. This instrument was cited by the latest edition of the Guide to Instruments and Methods of Observation of World Meteorological Organization, it also has been widely used in the research and operation of atmospheric science.

Keywords: Precipitation; Microphysical Characteristic; Raindrop size distribution; Imaging

1 引言

降水粒子的尺度、形状、速度等微物理特征资料在大气物理研究^[1]、数值天气预报^[2]、雷达定量估计降水^[3]以及其他应用^[4]方面均有着重要的作用。国外最早在 19 世纪末开始采用滤纸法、面粉法等对雨滴谱开展测量研究^[5]，但是受到当时技术水平的限制，测量大多以手动操作为主、采样分辨率低，仅能进行个例研究^[6]，虽然近年来计算机技术开始用于雨滴图像的自动处理，但是只能根据落到滤纸上的雨滴斑点来估计雨滴大小，并不能反映雨滴在空中的真实形状^[7]。20 世纪 70 年代开始随着光电技术的发展，出现了利用撞击法^[8]、光学法^[9]、线阵成像法^[10]对雨滴谱进行自动测量的仪器，但是无法测量雨滴的真实形状^[11]。虽然高速摄像机可以在实验室内通过高速拍摄获取水滴的形状，但是不适用于自然环境条件^[12, 13]。基于光强衰减法的 OTT 激光雨滴谱仪可以获取雨滴的水平尺度，但是其速度是根据形状经验关系估计得到的，速度误差较大，而且只能测量雨滴，难以测量降雪^[14]；2DVD 通过高速双线阵切片扫描的方式可以重构得到降水粒子的三维剖面信息^[15]，但是降水粒子穿过测量区域时的水平位移会导致粒子图像畸变，从而给形状和速度测量带来误差^[16]。目前在自然环境条件下对降水粒子的尺度、速度和形状等微物理特征的同步准确测量仍然是一个难题。

针对这一现状，本文设计并研制了降水瞬态微物理特征测量仪（Precipitation Microphysical Characteristics Sensor，以下简称 PMCS），利用精密曝光控制的面阵 CMOS 图像传感器对处于自由下落过程中的降水粒子进行实时成像，根据快速曝光的粒子图像得到其大小和形状，根据粒子单帧双曝光图像计算其速度，根据时间积分得到降水粒子的尺度谱分布和速度谱分布，基于此研制了降水瞬态微物理特征测量仪样机，并通过定标试验和外场试验验证了仪器的准确性。

2 仪器组成与测量原理

2.1 PMCS 仪器构成

PMCS 由光学单元、成像单元、采集与控制单元和数据处理单元组成，如图 1 所示。其中，光学单元为成像单元提供稳定而均匀的平行光；成像单元将接收到的光强信号转换为数字图像信号；采集与控制单元进行图像数据的实时采集、预处理与传输控制等；数据处理单元进行图像数据处理、降水信息的提取和存储等，通过终端计算机和应用软件来实现。

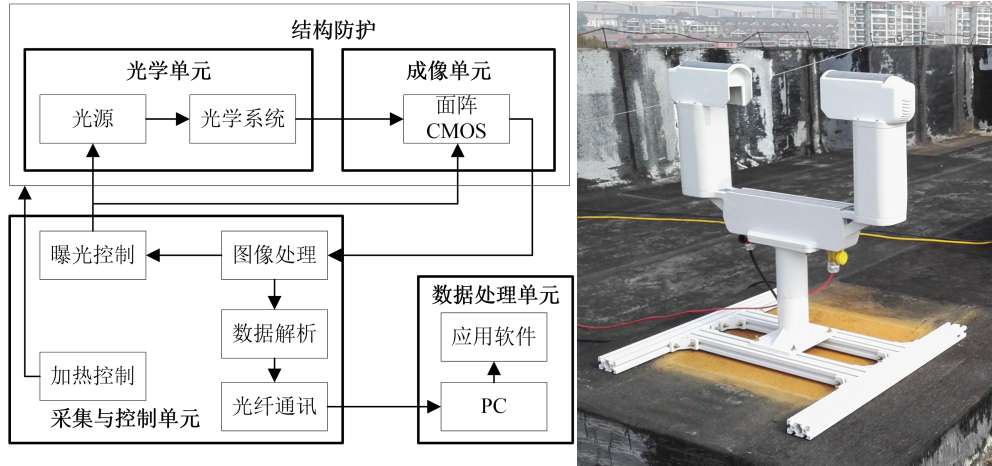


图 1 降水瞬态微物理特征测量仪组成框图及实物图

Fig.1 The Framework and picture of Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor(PMCS)

光学单元由平行光源、扩束透镜组和成像透镜组组成，其作用是为粒子成像提供均匀、一致和稳定的背景场。由于常用的卤素灯、LED、激光光源等不能满足本仪器的平行度要求，本文重新设计了平行光源，采用集束多模光纤的方式提高光照强度和光束宽度，中心波长为460nm，功率为1W；扩束透镜组将平行光源发出的光束宽度放大；成像透镜组将接收到的光束按照一定的倍率缩小后传到成像单元。本仪器的有效采样空间为300mm（长）×40mm（宽）×30mm（高）。具体结构如图2所示。

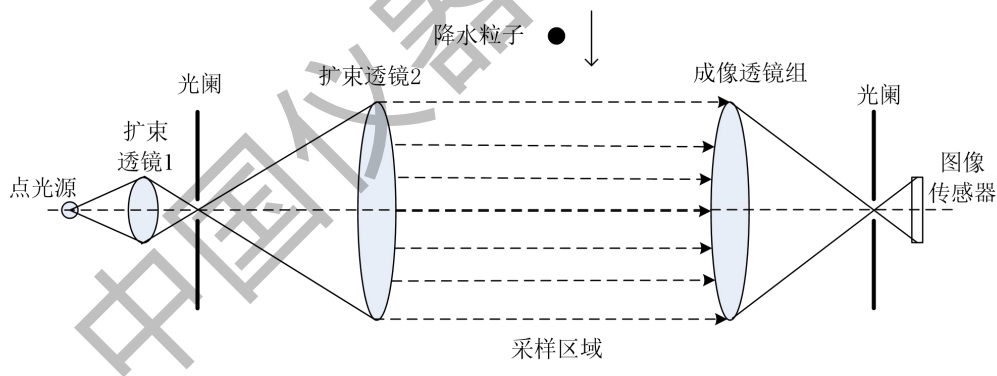


图 2 光学单元结构示意图

Fig.2 The framework of Optical Unit

成像单元由面阵 CMOS 图像传感器及其驱动电路组成，其作用是对穿过采样区域的降水粒子进行快速曝光成像。为了满足降水粒子测量的高灵敏度、高信噪比、大像元尺寸、高采样速度等要求，选用靶面尺寸为 1/3 英寸的 CMOS 面阵图像传感器。扫描频率为 50fps，像素分辨率为 640×480。对应的采样空间为 40mm×30mm，因此单个像素的尺寸分辨率为 0.0625 mm。

采集与控制单元由数字信号处理器 DSP 芯片、复杂可编程逻辑器件 CPLD、复位电路、

时钟电路、总线接口及存储芯片等配套电路组成，主要实现大数据量图像的高速、实时采集、处理与传输等功能。DSP 芯片采用 TI 公司 C6000 系列 TMS320DM642，其核心是 C6416 型高性能数字信号处理器；复杂可编程逻辑器件 CPLD 选用 MachX0 系列 LCMX0256，控制单帧图像曝光时间内光源的精密开关；数据传输采用 TCP/IP 方式，接口选用以太网驱动芯片 LXT971ALC。实现曝光时序驱动、图像数据的实时采集、缓存、处理和编码压缩、逻辑控制、传输接口 TCP/IP 协议的移植等功能。

数据处理单元由终端计算机和相关应用软件组成，主要实现图像数据的进一步处理、降水特征量的提取等功能。在经过降水粒子图像的滤波去噪、边缘识别、二值化等预处理后，提取图像中粒子的面积、周长、长轴、短轴等几何特征，通过特征匹配寻找到两次曝光的粒子运动轨迹，实现降水粒子的自相关匹配，并提取单个粒子的尺度、速度、轴比、形状、取向等特征。通过时间积分和统计分析得到降水强度、降水类型、粒子尺度谱分布和速度谱分布等降水信息。

2.2 测量原理

PMCS 采用单帧图像内两次曝光的方法，实现对降水粒子的图像和速度的同步测量。PMCS 的光源为脉冲光源，利用采集与控制单元将脉冲光源时序与 CMOS 曝光时序精密配合，CMOS 的采样频率为 50fps，相应的单次曝光时间为 20ms，在此时间段内脉冲光源连续进行 2 次曝光，如图 5 左图所示。在此成像时序控制下，当降水粒子穿过采样空间时，面阵 CMOS 图像传感器会在单帧图像内得到同一个粒子连续 2 次的曝光图像，如图 3 右图所示。在获取单帧双脉冲图像的基础上，对单个粒子图像进行处理可以得到降水粒子的尺度和形状；根据粒子先后 2 次曝光的位置和曝光间隔时间可以计算降水粒子的运动速度。

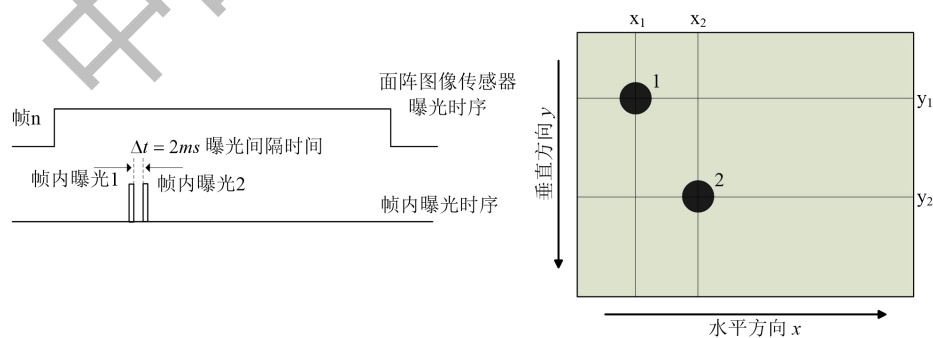


图 3 降水瞬态微物理特征测量仪的工作时序和图像

Fig.3 Working sequence and images of PMCS

降水粒子的水平速度和垂直速度分别为：

$$\begin{cases} v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \\ v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

根据时间积分可以得到降水粒子的尺度谱分布 $N(D)$ 和速度谱分布 $V(D)$ ，据此还可以进行降水强度、降水量的计算以及降水类型、降水性质的判断。

3 数据处理方法

3.1 图像处理方法

本仪器采用图像传感器的分辨率为 640×480 ，采样空间的大小为 $40\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，最小可测粒子 (0.1mm) 在水平方向上对应 1.6 个像素。通过前期试验发现，由于成像质量受到散焦模糊、镜头污染、仪器噪声等多种因素的影响，单个像素点往往难以被精确地识别出来。因此本文设计了如下图像处理方法：

(1) 滤波去噪，针对镜头污染、环境等因素给成像带来的叠加噪声，采用中值滤波方法去除图像中的噪点，同时保证粒子图像的边缘轮廓信息；

(2) 图像复原，针对成像系统中散焦、衍射效应所造成图像边缘模糊和图像质量退化，采用高斯函数模型，利用点扩散函数对模糊图像进行复原；

(3) 二值化，主要是将粒子图像和背景图像进行分割，其中阈值的确定是关键，本文采用基于灰度直方图的全局阈值法。

3.2 特征提取方法

由于本仪器是采用间隔曝光的方式对降水粒子进行采集的，并非每一个穿过采样空间内的降水粒子均能够被面阵 CMOS 所采集到，单帧内两次曝光的间隔时间仅占单帧曝光时间的 $1/10$ ，因此面阵 CMOS 对降水粒子存在一定的捕获概率。而且由于不同大小的粒子具有不同的降落末速度，不同的降水粒子具有不同的捕获概率，对于已知大小和速度的粒子，其能够在采样空间内捕获到粒子的两次曝光图像的概率为：

$$Prob(D) = \frac{30\text{mm} - D_v - V(D) \cdot 2\text{ms}}{V(D) \cdot 20\text{ms}} \quad (2)$$

其中， D_v 为粒子在垂直方向上的高度， $V(D)$ 为粒子的垂直运动速度， 20ms 为单帧的曝光时间， 2ms 为单帧内两次曝光的间隔时间。

鉴于面阵 CMOS 对降水粒子存在一定的捕获概率，因此直接采样得到的降水粒子谱分布 $N_{\text{sample}}(D)$ 并非真实谱分布，必须经捕获概率的修正才能得到真实的谱分布：

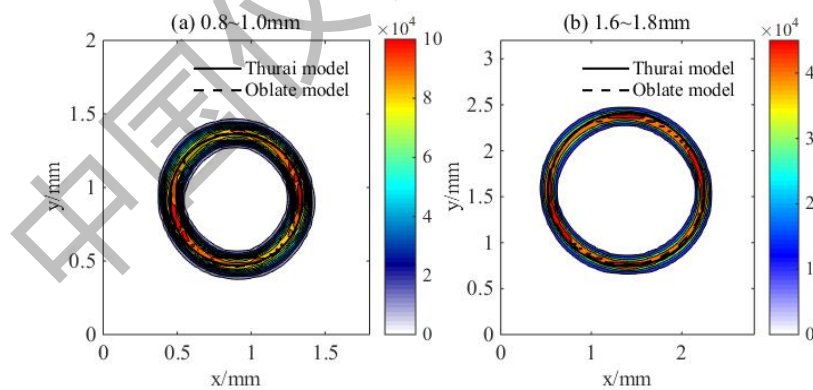
$$N(D) = \frac{N_{sample}(D)}{S \cdot Prob(D)} \quad (3)$$

其中, S 为有效采样空间。根据降水粒子尺度谱分布 $N(D)$ 、速度谱分布 $v(D)$ 、密度 ρ 与直径 D 的积分, 就可以得到降水强度:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) \rho D^3 v(D) dD \quad (4)$$

4 外场实验结果分析

利用该仪器在南京地区进行了外场观测实验, 在 2015 年 6 月 16 日内共采集得到 234093 个有效雨滴图像。以 0.2mm 为间隔的等效直径, 统计出雨滴形状的不同位置出现概率。如图 4 所示, 分别为直径为 0.8~1.0mm, 1.4~1.6mm, 2.4~2.6mm, 3.4~3.6mm 的雨滴统计概率形状, 其中“Thurai model”为 Thurai 利用 2DVD 得到的统计形状[17], “Oblate model”为雨滴的椭球形状模型[18]。图中颜色越红, 代表雨滴形状出现在此处的概率越大, 颜色越蓝, 则出现的概率越小。由图可知, 0.8~1.0mm 的雨滴平均形状呈圆形; 1.4~1.6mm 的雨滴平均形状比椭球形状略扁; 2.4~2.6mm 的雨滴形状与 1.4~1.6mm 的雨滴形状相似, 但其底部比经验分布偏小; 3.4~3.6mm 的雨滴形状呈现显著的顶部凸起、底部扁平形状, 与 Thurai 模型比较接近。总体而言, 直径小于 1mm 的雨滴以圆形为主, 直径在 1.0~3.0mm 之间的雨滴逐渐变扁, 与椭圆形相近, 当直径大于 3.0mm 时, 雨滴呈现明显的顶部凸起, 底部扁平的形状。



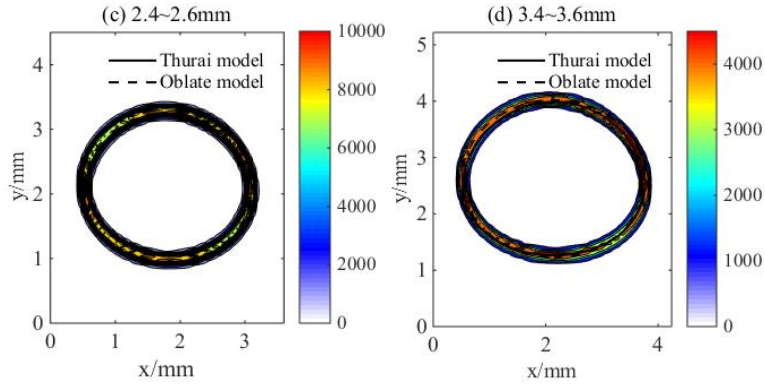


图4 雨滴的平均形状

Fig.4 Average shapes of raindrops

在雨滴图像的基础上计算雨滴的轴比（长轴与短轴之比），轴比分布如图5所示，其中彩色图像代表了雨滴速度的分布概率，颜色越红概率越大，实线为 Beard 经验关系^[19]。由图可知，直径大于 1mm 的雨滴轴比随直径的增大而呈现线性减小趋势，实测数据大多分布在 Beard 经验关系曲线附近。要说明的是，受到仪器分辨率的限制，最小雨滴（0.1mm）图像仅有 1~2 个像素，纵向或横向上 1 个像素的变化就会导致相应的轴比发生很大的变化，因此直径小于 1mm 的雨滴轴比分布比较分散。该分布特征与文献^[20]中的轴比分布特征接近。考虑到实际小雨滴呈现球形，因此并不影响对雨滴轴比分布的测量。

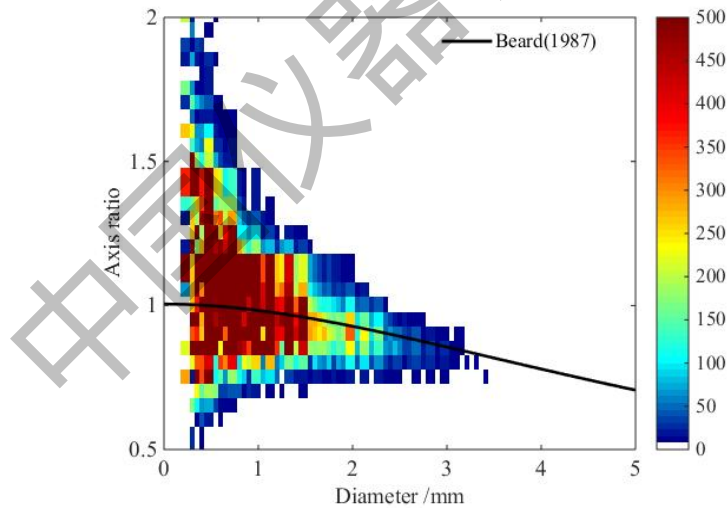


图5 雨滴的轴比

Fig.5 Images of raindrops

雨滴的速度分布如图6所示，其中彩色图像代表了雨滴速度的分布概率，颜色越红概率越大，实线为 Atlas 经验关系^[21]。由图可知，除了少量大雨滴会溅落到仪器外罩上破碎后穿过采样空间，从而导致少量小雨滴的速度偏大之外，大部分雨滴速度均分布在 Atlas 经验关系曲线附近，该分布特征与文献^[22]中的速度分布特征接近。从而检验了本仪器对降水粒子速度测量的有效性。

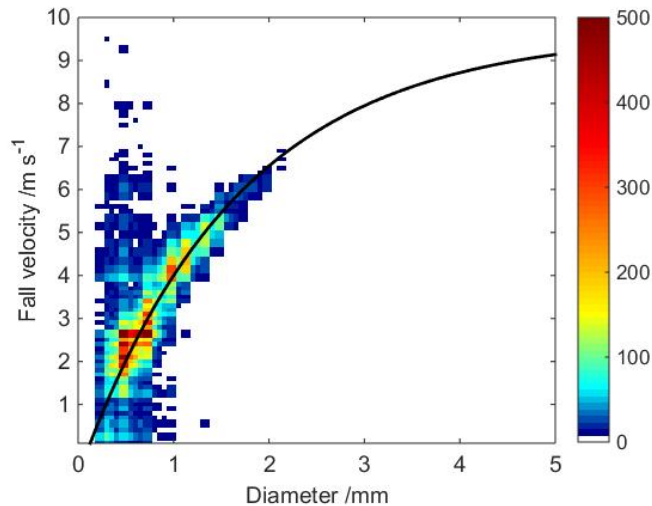


图 6 雨滴的速度分布

Fig.6 Velocity of raindrops

图 7 为 PMCS 和 OTT 雨滴谱仪测量的雨滴尺度谱，由图可知，PMCS 与 OTT 在直径 0.3~3.5mm 范围内的测量结果有良好的一致性，OTT 测量的小雨滴 ($D < 0.3\text{mm}$) 数目比 PMCS 测量的数目略少，其原因可能是小雨滴对激光的衰减不明显，OTT 对此存在漏测，而在图像上则更容易成像； $D > 3.5\text{mm}$ 范围内 OTT 比 PMCS 测量的雨滴数偏多，其原因一是大雨滴并非绝对球形，而 OTT 测量的是雨滴的长轴，致使其测量大雨滴直径偏大，而且雨滴越大，轴比越小，其测量的偏离程度越大，二是 PMCS 对单帧双曝光粒子的完整捕获概率随着雨滴的增大而降低，也会导致大雨滴测量偏少。

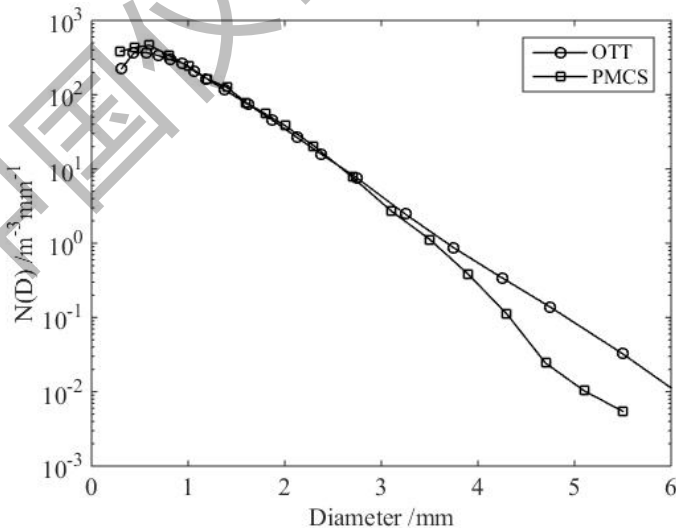


图 7 雨滴的尺度谱分布

Fig.7 Drop size distribution of raindrops

图 8 为 PMCS 与 OTT 雨滴谱仪测量的降雨强度随时间的变化。由图可知，两个仪器在小雨条件下的一致性很好，在个别雨强较大时刻 OTT 比 PMCS 测量值偏大，这与图 7 中大雨滴段 OTT 比 PMCS 数密度偏高是一致的。整个降水时间序列中，PMCS 与 OTT 的平均误

差为 1.57 mm h^{-1} ，相关系数可达 96%。

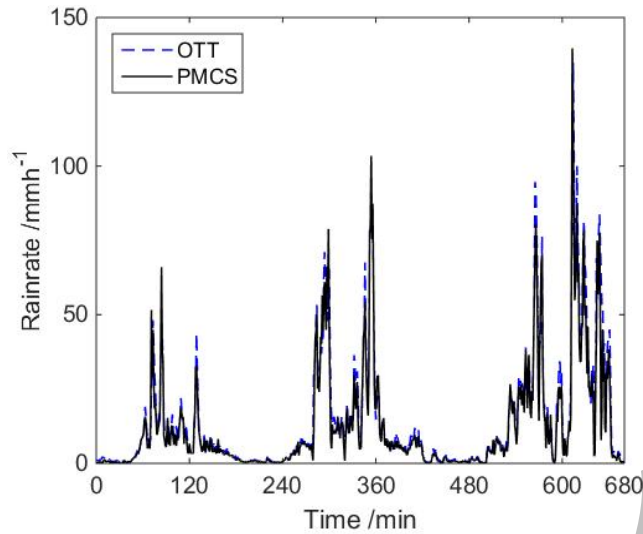


图 8 降雨强度的时间序列

Fig.8 Time series of rainrate

综上所述，PMCS 可以有效测量雨滴的形状、轴比、速度，基于此计算的尺度谱和降雨强度与 OTT 雨滴谱仪具有良好的一致性。从而验证 PMCS 在降水微物理特征测量方面的有效性和准确性。

5 结论

本文针对大气物理研究、数值天气预报等对降水粒子微物理特征的测量要求，提出了一种基于面阵图像传感器和单帧双脉冲成像的降水粒子形状、尺度和速度等微物理特征测量新方法，研制了具有自主知识产权的降水瞬态微物理特征测量仪（PMCS）。外场实验结果表明，PMCS 可以有效测量雨滴的形状、轴比、速度与尺度等微物理特征，与经验关系具有良好的一致性，从而验证了该仪器的测量准确性；与 OTT 雨滴谱仪的雨滴谱分布和降雨强度有很好的 consistency，二者测量降雨强度的标准偏差为 1.57 mm h^{-1} ，相关系数可达 96%。这一结果很好的验证了 PMCS 在降水微物理特征测量方面的有效性和准确性，在揭示降水粒子微物理特征、修正天气雷达 Z-R 关系等方面有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 高太长. 降水测量技术现状与展望[J]. 气象水文装备, 2012, 23(6): 1-7.
- [2] 杨艳蓉, 曾明剑. 雷达资料同化对暴雨预报影响的数值模拟研究[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 145-152.

- [3] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388-395.
- [4] 汪亭玉, 陈家璧. 雨滴在船舶大气激光通信中的遮挡作用[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(10): 2652-2658.
- [5] Jones, D M A, The Shape of Raindrops[J]. *Journal of Meteorology*, 1959, 16(4): 504-510.
- [6] 余东升, 徐青山, 徐赤东, 等. 雨滴谱测量技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(6): 403-408.
- [7] 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1217-1226.
- [8] Joss, J, Waldvogel A. A raindrop spectrograph with automatic analysis[J]. *Pure Applied Geophysics*, 1967, 68(1): 240-246.
- [9] Löffler-Mang M, Joss J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometers[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(2): 130-139.
- [10] 高太长, 江志东, 刘西川, 等. 线阵光学降水现象自动测量系统[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2184-2191.
- [11] Kathiravelu G, Lucke T, Nichols P. Rain Drop Measurement Techniques: A Review[J]. *Water*, 2016, 8(1): 29.
- [12] Szakall M, Diehl K, Mitra S K, et al. A Wind Tunnel Study on the Shape, Oscillation, and Internal Circulation of Large Raindrops with Sizes between 2.5 and 7.5 mm[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 66(3): 755-765.
- [13] Yu C K, Hsieh P R, Yüter S E, et al. Measuring droplet fall speed with a high-speed camera: indoor accuracy and potential outdoor applications[J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016(9): 1755-1766.
- [14] Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. PARSIVEL Snow Observations: A Critical Assessment[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(2): 333-344.
- [15] Schuur T J, Ryzhkov A V, Zrníc D S, et al. Drop Size Distributions Measured by a 2D Video Disdrometer: Comparison with Dual-Polarization Radar Data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(6): 1019-1034.
- [16] Wood N B, Ecuyer T S L, Bliven F L, et al. Characterization of video disdrometer uncertainties and impacts on estimates of snowfall rate and radar reflectivity[J]. *Atmospheric*

Measurement Techniques, 2013, 6: 3635-3648.

- [17] Thurai M, Bringi V N, Petersen W A, et al. Drop axis ratio distributions in stratiform and convective rain[C]//The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, September 6, 2010, Bell Aurora, Antonescu Bogdan, 20100040499.
- [18] Beard, K V, Bringi V N, Thurai M. A new understanding of raindrop shape[J]. Atmospheric Research, 2010, 97: 396-415.
- [19] Thurai, M., Szakall M, Bringi V N, et al. Drop Shapes and Axis Ratio Distributions: Comparison between 2D Video Disdrometer and Wind-Tunnel Measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7): 1427-1432.
- [20] Thurai M, Bringi V N. Drop Axis Ratios from a 2D Video Disdrometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(7): 966-978.
- [21] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Rev. Geophys. Space Phys., 1973, 11(1): 1-35.
- [22] Marzuki W, Randeu L, Kozu T, et al. Raindrop axis ratios, fall velocities and size distribution over Sumatra from 2D-Video Disdrometer measurement[J]. Atmospheric Research, 2013, 119: 23-37.