

胡云涛,刘西川,高太长,等. 2018. 联合降水微物理特征测量仪、激光雨滴谱仪和雨量计的降水对比观测分析[J]. 气象与减灾研究,41(2):133-139.

Hu Yuntao, Liu Xichuan, Gao Taichang, et al. 2018. Comparative analysis on precipitation measurement among precipitation micro-physical characteristics sensor, laser raindrop spectrograph and gauge[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 41(2):133-139.

联合降水微物理特征测量仪、激光雨滴谱仪和雨量计的降水对比观测分析

胡云涛¹, 刘西川², 高太长², 许平平¹, 吕苗¹

1. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000

2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101

摘要: 为了对降水微物理特征测量仪(PMCS)的测量性能进行评估,利用 PMCS、激光雨滴谱仪(OTT)和雨量计(Gauge)在南京地区进行了降水对比观测实验,通过分析各仪器所测得的降水强度和累计降水量,研究了 PMCS 和 OTT 在不同降水强度条件下的尺度谱及其谱参数测量的差异性。结果表明:PMCS 所测得的降水强度和累计降水量较 OTT 小,但更接近于 Gauge 所测得标准降水强度和累计降水量,3 种仪器降水强度结果的相关性均在 0.96 以上。PMCS 测得的谱均值、谱方差、雷达回波强度均小于 OTT 所测得结果,数密度均大于 OTT 所测得结果,两者所测得谱参数的变化趋势具有较好的一致性。在相同降水强度范围内,PMCS 和 OTT 所测得的雨滴尺度谱分布趋势具有较好的一致性,在雨滴大尺度段,PMCS 测得的雨滴数较 OTT 偏少,PMCS 和 OTT 对于雨滴的捕获性能随着降水强度增加而增强,并在达到峰值后逐渐减弱。

关键词: 降水,观测仪器,尺度谱,谱参数,对比

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2018)02-0133-07

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-019

Comparative Analysis on Precipitation Measurement among Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor, Laser Raindrop Spectrograph and Gauge

Hu Yuntao¹, Liu Xichuan², Gao Taichang², Xu Pingping¹, Lyu Miao¹

1. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China

2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China

Abstract: The Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor (PMCS), Laser Raindrop Spectrograph (OTT), and Gauge were used for the comparative precipitation experiment in Nanjing area, in order to evaluate the performance of PMCS. Based on the precipitation intensity and accumulate precipitation, the differences between PMCS and OTT were discussed. Results showed that the precipitation intensity and accumulate precipitation measured by PMCS were less than that by OTT, but similar with that by Gauge, and the correlation coefficients of precipitation intensity among three instruments were larger than 0.96. The spectral mean, spectral variance, and radar echo intensity of PMCS were smaller than that of OTT, but the number density was on the contrary, and the trend of spectral parameters of PMCS were in good agreement with that of OTT. The

收稿日期: 2017-11-09; 修订日期: 2018-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41327003).

作者简介: 胡云涛, 硕士, 助理工程师, 主要从事军事大气探测研究, E-mail: 809529411@qq.com.

刘西川(通信作者), 博士, 主要从事军事大气探测研究, E-mail: liuxc85@gmail.com.

raindrop size spectrum distribution of PMCS was consistent with that of OTT under the condition of same rain intensity, but the raindrops at large scale measured by PMCS were less than OTT. The raindrop measurement capability of PMCS and OTT was enhanced with the increasing of precipitation intensity, and weakened after reaching the peak.

Key words: precipitation; observation instrument; size spectrum; spectral parameters; comparison

0 引言

降水是一种自然的天气现象,是水从大气回到地面的主要机制,也是联系气候、天气和全球水文循环的关键物理过程(曾培培等,2016)。降水的宏观物理量主要包括降水量、降水强度、持续时间,微观物理量主要包括降水粒子的相态、形状、尺度、下落末速度、谱分布和轴比等参量。降水物理量的准确描述和细化研究对于数值天气预报(Xue et al, 2000)、天气雷达(Zhang et al, 2011)、微波遥感(刘西川等,2010)和大气污染(Paramonov et al, 2011)等领域研究具有十分重要的意义。由国防科技大学气象海洋学院探测团队研制的降水微物理特征测量仪(PMCS),通过成像法对穿越采样空间的降水粒子进行单帧图像内的二次曝光,可对降水粒子的尺度、尺度谱、降水强度等进行同步测量,并通过曝光间隔内粒子移动距离和曝光时间得到粒子速度(刘西川等,2014)。仪器目前正处于研制阶段,文中通过联合其他降水测量仪器进行降水对比观测研究,以评估其测量性能。

1 资料和方法

1.1 资料

2015年6月中下旬,PMCS、雨量计(Gauge)与激光雨滴谱仪(OTT)在南京信息工程大学气象观测场开展了联合观测比对试验。此时,南京地区正处于梅雨季节,以对流性降水为主,累计收集了6月16、17、26、27、28、29、30日的降水观测资料。PMCS的降水强度分辨率为0.001 mm/h,时间分辨率为1 min;Gauge的型号为SL-3,其降水量分辨率为0.1 mm,时间分辨率为1 min;OTT激光雨滴谱仪的降水强度分辨率为0.001 mm/h,时间分辨率为10 s。为便于3个仪器之间相互对比,均以1 min样本为基础,分别取PMCS和OTT对应降水强度大于0.1 mm/h的样本,并剔除相关噪声和异常值,最终得到3个仪器均有的降水样本数为3 600 min,计算得到尺度谱、降水强度、累计降水量。

1.1 方法

雨滴谱是用来描述降水粒子数浓度随粒子尺度

变化的函数,是降水最基本的微物理特征量(曾庆伟等,2015),常作为降水微物理特征的重要参量被应用在数值预报模式参数化方案中。雨滴尺度谱分布常满足于Gamma函数(Ulbrich,1983)和MP函数(Marshall and Palmer,1948),Gamma分布:

$$N(D) = N_0 D^m e^{-\lambda D} \quad (1)$$

MP分布:

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (2)$$

其中, $N(D)$ 代表降水粒子的数密度; D 为雨滴直径; N_0 、 m 、 λ 为拟合参量,分别与尺度谱分布的浓度、形状、斜率具有紧密联系。Gamma函数形式的谱分布一般适用于对流性降水等复杂性降水,而MP函数作为简化的Gamma函数形式,常适用于稳定性降水的谱分布,对于对流性降水,MP分布在小尺度段以及大尺度段均存在较大的误差(郑娇恒和陈宝君,2007)。

雨滴尺度谱Gamma分布中的拟合参量 N_0 、 m 、 λ 可通过阶矩法求出,其中谱分布的第 n 阶矩表达式为:

$$M_n = \int_0^{\infty} N(D) D^n dD = \sum_{i=1}^{N_{\text{class}}} N(D_i) D_i^n \Delta D_i \quad (3)$$

其中, N_{class} 代表粒子尺度通道数; ΔD_i 表征粒子尺度通道宽度;此处用的是2、3、4阶矩法,通过谱分布的阶矩,还可求出降水粒子数浓度 N_d 、雷达后反射率因子 Z 、谱均值 D_m 、谱标准差 σ_m 。谱均值 D_m 为降水粒子的质量加权平均直径,即单位体积内雨滴的质量加权直径相对雨滴总质量的平均值;谱标准差 σ_m 为单位体积内雨滴直径与质量加权平均直径的偏差。通过计算得到 D_m 与 σ_m ,可以量化雨滴尺度谱分布的内在特征,即不同尺度雨滴在单位体积内的分布特征。此外,雷达反射率因子 Z 通过 $10\lg Z$ 转化为雷达回波强度,单位为dBz。通过对PMCS和OTT测得的降水粒子数量进行时间和空间积分,可得到一定时间分辨率内的雨滴尺度谱分布,当时间分辨率取1 min时,所得的谱分布为1 min尺度谱。

利用PMCS、OTT、Gauge均能得到降水强度和累计降水量观测资料。由于地面雨滴谱仪测得的降水强度受仪器自身噪声和测量手段的限制,可能

存在一定的误差。通常以雨量计 Gauge 记录的降水强度和累计降水量作为标准,而 PMCS 和 OTT 能得到降水粒子的尺度谱分布,通过时间积分和空间积分,即可求出降水强度和累计降水量,其中降水强度 R 的计算公式:

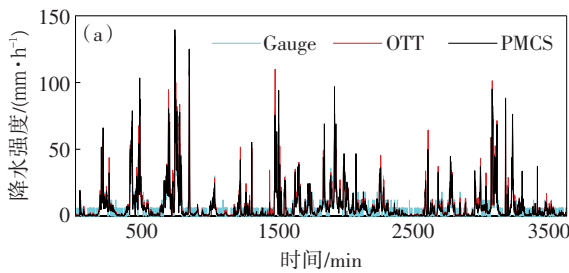
$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) \rho D^3 V(D) dD \quad (4)$$

其中, ρ 为降水粒子密度; $N(D)$ 为尺度谱; $V(D)$ 为速度谱; D 为粒子直径; 通常将 $V(D)$ 取为经验速度,如 Atlas 雨滴速度经验模型等。此处的尺度谱和速度谱的时间分辨率为 1 min,即得到的降水强度时间分辨率为 1 min。

2 结果分析

2.1 降水强度及累计降水量

图 1 为 PMCS、OTT、Gauge 测得的降水强度



和累计降水量的时间序列。分析发现,各观测仪器测得的降水强度和累计降水量具有相同的变化趋势,受仪器自身噪声影响,PMCS 和 OTT 测得的降水强度均存在瞬时峰值且大于 Gauge 所测得的降水强度。Gauge 测得的降水强度变化趋势较为平缓。在多数时间段内,OTT 和 PMCS 测得的降水强度较小,PMCS 测得的降水强度小于 OTT 测得的降水强度,在少量的峰值区域会大于 OTT 所测得的降水强度。PMCS、OTT、Gauge 测得降水强度的平均值分别为 7.1、7.9、6.8 mm/h。PMCS、Gauge、OTT 测得 3 600 min 累计降水量分别为 426.8、412.7、480.8 mm。随着时间积累,PMCS 测得的累计降水量略微大于 Gauge 所测得的结果,OTT 所测得的累计降水量始终大于 PMCS 和 Gauge 所得累计降水量。因此,PMCS 较 OTT 能更加准确地测量降水强度和累计降水量。

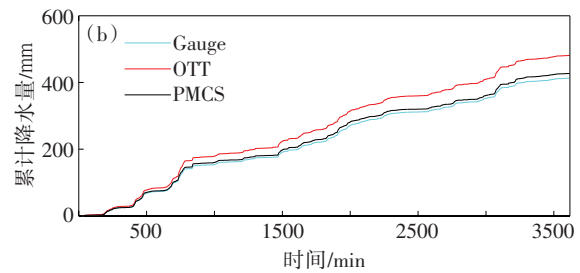


图 1 PMCS、OTT、Gauge 测得的降水强度(a)和累计降水量(b)的时间序列

Fig. 1 Time series of precipitation intensity (a) and rainfall accumulations (b) measured by PMCS, OTT, and Gauge

定义 PMCS、OTT 和 Gauge 测得的降水强度之间的误差表达式 (Tokay et al, 2014):

$$B_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i + y_i)} \quad (5)$$

$$A_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i + y_i)} \quad (6)$$

其中, B_s 为相对偏差; A_s 为绝对偏差,所得结果如表 1 所示。分析可见,PMCS、OTT、Gauge 测得的降水强度之间的相关系数均在 0.96 以上,具有较好的相关性。其中,PMCS 与 Gauge 之间的相对偏差较小,说明 PMCS 所得降水强度更接近于 Gauge 记录的标准降水强度。

表 1 PMCS、OTT、Gauge 测得降水强度之间的相关系数、相对误差、绝对误差

Table 1 The correlation coefficient, relative error, and absolute error of precipitation intensity among PMCS, OTT and Gauge

仪器	r^2	$B_s/\%$	$A_s/\%$
OTT-PMCS	0.98	11.7	17.7
PMCS-Gauge	0.96	3.3	25.0
OTT-Gauge	0.99	15.0	22.7

计算累计降水量误差公式为:

$$\Delta A_R = \frac{A_{R1} - A_{R2}}{A_{R1}} \quad (7)$$

其中, A_{R1} 和 A_{R2} 分别代表两个不同仪器所得累计降水量,所得结果如表 2 所示。分析发现,PMCS 和 Gauge 测得累计降水量之间的偏差约为 $\pm 3.3\%$,而 OTT 和 Gauge 测得累计降水量之间偏差为 14.2% (-16.5%),PMCS 和 OTT 测得累计降水量之间偏差为 14.2% (-12.7%)。由此可知,PMCS 较 OTT 测得的累计降水量具有较高的准确性。

表2 PMCS、OTT 和 Gauge 测得累计降水量之间的偏差 (单位:%)

Table 2 Deviation of rainfall accumulations between PMCS, OTT, and Gauge (unit:%)

仪器	PMCS	OTT	Gauge
PMCS	-	-12.7	3.3
OTT	11.2	-	14.2
Gauge	-3.4	-16.5	-

2.2 雨滴尺度谱参数

图2为雨滴尺度谱参数时间序列,主要包括谱均值 D_m 、谱方差 σ_m 、粒子数密度 N_d 、雷达回波强度等。分析可知,OTT 和 PMCS 测得的各谱参数时间序列变化趋势具有较好的一致性。OTT 测得的谱均值最小为 0.49 mm,最大为 4.0 mm;PMCS 测得的谱均值最小为 0.53 mm,最大为 3.0 mm。OTT 测得的谱均值变化范围大于 PMCS 所测得的结果,且其时间序列曲线略微高于 PMCS 所得谱均值时间序列曲线。这表明,OTT 测得的雨滴粒子直径相对于 PMCS 偏大。OTT 测得的谱方差值最小为 0.1 mm,最大为 1.6 mm;PMCS 测得的谱方差值最小为 0.09 mm,最大为 1.5 mm。OTT 测得的谱方差变化范围大于 PMCS 所得结果,且其时间序列曲线略微高于 PMCS 所得谱均值时间序列曲线。这表明,OTT 测得的雨滴尺度谱宽度较 PMCS 偏大。OTT 测得的粒子数密度值最小为 12 m^{-3} ,最

大为 $2.5 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$,平均为 438 m^{-3} ;PMCS 测得的粒子数密度值最小为 4 m^{-3} ,最大为 $7.1 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$,平均为 445 m^{-3} 。OTT 测得的粒子数密度变化范围小于 PMCS 所得结果,但二者粒子数密度平均值相差较小。这表明,不同降水强度条件下 PMCS 和 OTT 对于降水粒子的捕获能力具有一定的差异。在 1 500 min 和 3 000 min 处,PMCS 测得的降水粒子数密度高于 OTT 所测得结果,此时 PMCS 测得的谱均值小于 OTT 所测得结果,而降水强度计算结果显示,此时 PMCS 测得的降水强度小于 OTT 所测得结果,即表明其原因是 PMCS 测得降水粒子直径低于 OTT 测得的粒子直径,而此时 PMCS 测得的降水强度较为接近 Gauge 所测得的标准降水强度,表明 OTT 测量降水强度的误差主要来自对雨滴直径的高估。OTT 测得的雷达回波强度值最小为 6.3 dBz,最大为 57.1 dBz,平均为 30.4 dBz,PMCS 测得的雷达回波强度值最小为 6.7 dBz,最大为 53.1 dBz,平均为 28.1 dBz,即 OTT 测得的雷达回波强度的变化范围和平均值均大于 PMCS 所测得的结果。雷达回波强度主要受粒子直径和数密度影响,由于 PMCS 测得的谱均值低于 OTT 所测得结果,而其平均粒子数密度与 OTT 所测得的结果相差较小。综上,OTT 对于雨滴直径的高估导致其测得雷达回波强度高于 PMCS 所测得结果。

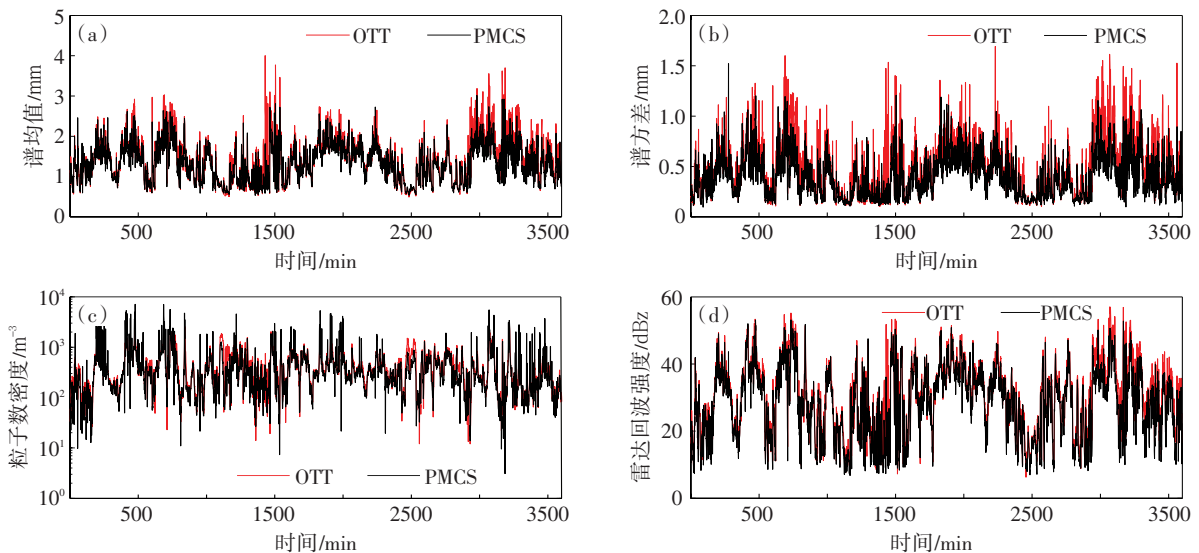


图2 雨滴尺度谱谱均值(a)、谱方差(b)、粒子数密度(c)和雷达回波强度(d)时间序列

Fig. 2 Time series of raindrop size spectral mean (a), spectral variance (b), number density (c), and radar echo intensity (d)

2.3 不同降水强度条件下平均尺度谱

图3为不同降水强度(R)范围的雨滴平均尺度

谱。分析发现,在雨滴直径为 1 mm 处,PMCS、OTT 测得的雨滴数量均达到了峰值,随着雨滴直径

增加,雨滴数量也逐渐减少。在相同降水强度范围内,PMCS、OTT所测得的雨滴尺度谱分布具有较好的一致性,尤其在0.2—3.0 mm尺度范围内,两者测得的尺度谱分布曲线基本重合。而当雨滴直径大于3.0 mm时,PMCS测得的雨滴尺度谱曲线略低于OTT测得的尺度谱曲线,即OTT测得了更多的大尺度雨滴,可能受测量原理的限制,OTT测得的雨滴直径为雨滴的最大直径,而PMCS测得的雨滴直径为等效体积直径,这种差异在小雨滴尺度段并不明显,但随着雨滴直径的增加,差异即显现出来。PMCS是对降水粒子进行成像,其对降水粒子的捕获概率会随着雨滴直径的增加而减小。在

0.1 mm/h < R < 5 mm/h时,PMCS测得的谱宽为3.6 mm,OTT测得的谱宽为4 mm,而在 $R > 20$ mm/h,PMCS测得的谱宽为5.6 mm,OTT测得的谱宽为6 mm,即随着降水强度增大,PMCS、OTT的尺度谱宽均变大,表明雨滴尺度对降水强度具有一定的贡献。此外,随着降水强度增大,PMCS、OTT测得的小雨滴尺度段的雨滴数量峰值也增大,而大尺度段雨滴数量峰值变化较小,表明小雨滴数量的增大对于降水强度增大具有一定的贡献。综上所述,不同降水强度条件下PMCS、OTT对雨滴谱的测量性能较为一致,在大雨滴尺度段,PMCS测得的雨滴数相对OTT较少。

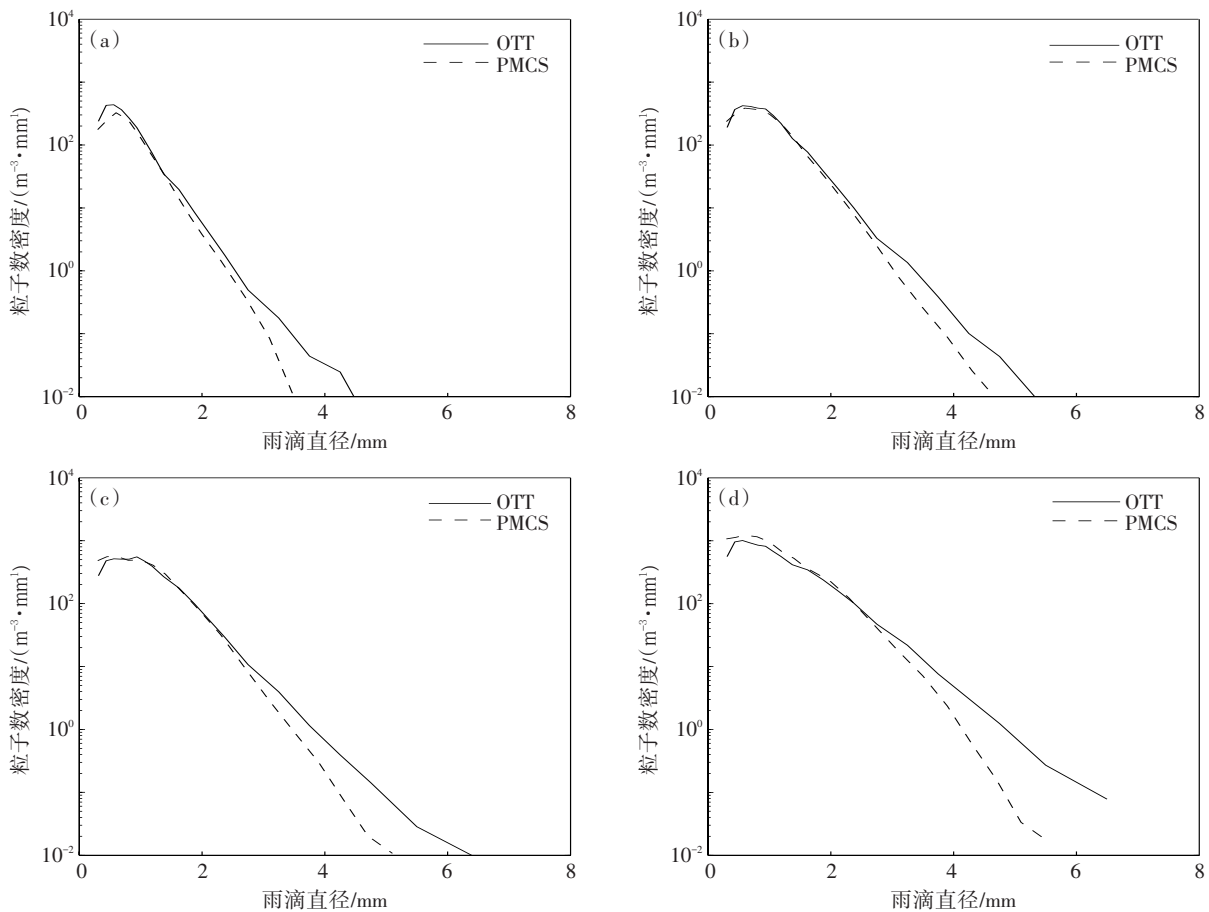


图3 降水强度 R 分别为 $0.1 \text{ mm/h} < R < 5 \text{ mm/h}$ (a)、 $5 \text{ mm/h} < R < 10 \text{ mm/h}$ (b)、 $10 \text{ mm/h} < R < 20 \text{ mm/h}$ (c)、 $R > 20 \text{ mm/h}$ (d)条件下PMCS、OTT测得的雨滴每分钟平均尺度谱

Fig. 3 Average DSDs measured by PMCS and OTT under the conditions of $0.1 \text{ mm/h} < R < 5 \text{ mm/h}$ (a), $5 \text{ mm/h} < R < 10 \text{ mm/h}$ (b), $10 \text{ mm/h} < R < 20 \text{ mm/h}$ (c), $R > 20 \text{ mm/h}$ (d)

2.4 不同降水强度条件下尺度谱参数

表3为不同降水强度条件下OTT和PMCS实测平均尺度谱计算得到的谱参数,主要包括二阶矩 M_2 、三阶矩 M_3 、四阶矩 M_4 、浓度参数 N_0 、形状参

数 m 、斜率参数 λ 、谱均值 D_m 、谱相对标准差 σ_m 、粒子数密度 N_d 和雷达回波强度等对数值预报模式具有重要意义。分析可知,PMCS和OTT测得 M_2 、 M_3 、 M_4 随着降水强度的增大而增大,在不

同降水强度条件下,PMCS 测得 M_2 、 M_3 、 M_4 小于 OTT 测得结果。在 $10 \text{ mm/h} < R < 20 \text{ mm/h}$ 时,PMCS 尺度谱 Gamma 函数拟合参量 N_0 、 m 、 λ 最大值分别为 $1.46 \times 10^5 \text{ mm/m}^3$ 、 $2.89 \text{ mm}^{-1-m} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 3.99 mm^{-1} ,且在降水强度条件下均大于 OTT 所测得结果。在各降水强度条件下 PMCS 测得的谱均值和谱标准差均小于 OTT 所测得的结果。这表明,OTT 测得雨滴谱的粒子直径以及变化范围较 PMCS 所测得结果偏大,两种仪器所得谱均值及谱标准差均随着降水强度的增大而增大。当 $0.1 \text{ mm/h} < R < 5 \text{ mm/h}$ 和 $5 \text{ mm/h} < R < 10 \text{ mm/h}$ 时,PMCS 测得粒子数密度均小于 OTT 测得结果,当 $10 \text{ mm/h} < R < 20 \text{ mm/h}$ 和 $R > 20 \text{ mm/h}$ 时,PMCS 测得粒子数密度大于 OTT 所测得结果,说明在不同降水强度条件下,PMCS 和

OTT 对于雨滴的捕获能力不同,降水强度较小时 PMCS 捕获粒子能力较 OTT 差,降水强度较大时 PMCS 捕获粒子的能力较 OTT 好,两者所得数密度均在 $10 \text{ mm/h} < R < 20 \text{ mm/h}$ 时取得最大值,说明 PMCS 和 OTT 对于雨滴的捕获性能随着降水强度增加而增强并在达到峰值后逐渐减弱。PMCS 和 OTT 测得的雷达回波强度在 $0.1 \text{ mm/h} < R < 5 \text{ mm/h}$ 时较小,分别为 26.8、29.6 dBz,在 $R > 20 \text{ mm/h}$ 时最大,分别为 45.9、48.8 dBz,两者测得的雷达回波强度均随降水强度增大而增大,4 种降水强度条件下的平均值分别为 37.5、40.2 dBz。由于 OTT 会高估雨滴粒子直径,导致计算所得雷达回波强度偏大,因此 PMCS 所测得雷达回波强度在各降水强度条件下都略低于 OTT 所测得结果。

表 3 OTT、PMCS 在不同降水强度条件下谱分布的相关参数

Table 3 The DSD parameters obtained by OTT and PMCS with different precipitation intensity

降水强度 R	仪器	M_2	M_3	M_4	N_0	m	λ	D_m	σ_m	N_d	$10\lg Z$
$0.1 < R < 5$	OTT	0.171	0.183	0.252	0.490	0.91	3.65	1.35	0.69	0.282	29.6
	PMCS	0.144	0.155	0.184	3.751	2.12	4.91	1.25	0.54	0.226	26.8
$5 < R < 10$	OTT	0.412	0.571	0.968	0.950	1.51	3.25	1.71	0.78	0.404	36.9
	PMCS	0.383	0.524	0.778	5.853	2.48	4.15	1.56	0.63	0.392	34.7
$10 < R < 20$	OTT	0.811	1.272	2.421	1.621	1.81	3.06	1.91	0.84	0.628	41.7
	PMCS	0.792	1.173	2.021	14.644	2.89	3.99	1.72	0.65	0.695	39.5
$R > 20$	OTT	1.834	3.492	8.265	0.743	1.23	2.21	2.36	1.04	1.150	48.8
	PMCS	1.941	3.274	6.594	4.631	2.14	3.05	2.01	0.77	1.490	45.9
均值	OTT	0.473	0.736	1.432	0.244	0.64	2.35	1.97	0.97	0.440	40.2
	PMCS	0.454	0.651	1.154	1.093	1.67	3.22	1.76	0.74	0.450	37.5

注:各参数单位分别为 $R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ 、 $M_2/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ 、 $M_3/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ 、 $M_4/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ 、 $N_0/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$ 、 $m/(\text{mm}^{-1-m} \cdot \text{m}^{-3})$ 、 λ/mm^{-1} 、 D_m/mm 、 σ_m/mm 、 $N_d/(\text{mm}^{-3})$ 、 $10\lg Z/\text{dBz}$ 。

3 结论

文中基于 PMCS、OTT 和 Gauge 的野外联合观测实验,对比了 3 种仪器对雨滴尺度谱及其分布参数、降水强度和累计降水量的测量性能,并讨论了不同降水强度条件下 PMCS 对于雨滴尺度谱及其分布参数测量的影响,得到如下结论:

1) PMCS 测得降水强度以及累计降水量较 OTT 测得结果偏小,但更接近于 Gauge 测得的标准降水强度和累计降水量,且 PMCS 与 Gauge 之间降水强度具有较小的相对误差;PMCS 测得的谱均值、谱方差和雷达回波强度均小于 OTT 所测得结果,粒子数密度大于 OTT 所测得结果,两者所得谱参数变化趋势具有较好的一致性,OTT 对降水强度的高估是由于其对雨滴直径的高估。

2) 在相同降水强度条件下,PMCS 与 OTT 所

测得雨滴尺度谱总体分布趋势具有较好的一致性,在大雨滴尺度段,PMCS 测得的雨滴数相对 OTT 较少,PMCS 和 OTT 对于雨滴的捕获性能随着降水强度增加而增强并在达到峰值后逐渐减弱。

参考文献 (References)

- 刘西川,高太长,刘磊,等. 2010. 降雨对微波传输特性的影响分析[J]. 物理学报,59(3):2156-2162. Liu X C, Gao T C, Liu L. 2010. Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 59(3):2156-2162. (in chinese)
- 刘西川,高太长,刘磊. 2014. 基于粒子成像测速技术的雨滴微物理特性研究[J]. 物理学报,63(2):1-7. Liu X C, Gao T C, Liu L. 2014. Research on microphysical property of raindrops based on particle imaging velocimetry technology[J]. Acta Physica Sinica, 63(2):1-7. (in chinese)
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops with size[J]. J Meteor, 5(4):165-166.

- Paramonov M, Gronholm T, Virkkula A. 2011. Below-cloud scavenging of aerosol particles by snow at an urban site in Finland. *Boreal Environ*[J]. *Boreal Environ Res*,16:304-320.
- Tokay A, David B, Walter A P. 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel2[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(6): 1276-1288.
- Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. *J Climate Appl Meteor*,22:1764-1775.
- Xue M, Droegemeier K, Wong V. 2000. The advanced regional prediction system (ARPS); a multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: model dynamics and verification [J]. *Meteorog Atmos Phys*,75(3-4):161-193.
- Zhang G, Luchs S, Ryzhkov A, et al. 2011. Winter precipitation microphysics characterized by polarimetric radar and video disdrometer observations in central Oklahoma[J]. *J Appl Meteorol Clim*,50(7): 1558-1570.
- 曾培培,高太长,刘西川,等. 2016. 2014—2015年南京春夏两季降水微物理特征分析[J]. *气象与减灾研究*,39(4): 277-282. Zeng P P, Gao T C, Liu X C, et al. 2016. Microphysical characteristics of the spring and summer rainfall in Nanjing during 2014 – 2015[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 39(4):277-282. (in chinese)
- 曾庆伟,何宏让,张云,等. 2015. 雨滴谱参数化及其在降水估计中的应用[J]. *气象与减灾研究*,38(4):46-53. Zeng Q W, He H R, Zhang Y, et al. 2015. Parameterizations for the raindrop size distribution and its application in radar rainfall estimation[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*,38(4):46-53.(in chinese)
- 郑娇恒,陈宝君. 2007. 雨滴谱分布函数的选择:M-P和Gamma分布的对比研究[J]. *气象科学*,27(1): 17-25. Zheng J H, Chen B J. 2007. Comparative study of exponential and gamma function fits to observed raindrop size distribution[J]. *J Meteor Sci*,27(1): 17-25.(in chinese)