

郭佳, 吴艳锋, 罗丽, 等. 2020. CINRAD-SA 偏振雷达定量降水估测算法改进及应用评估 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 305–319. GUO Jia, WU Yanfeng, LUO Li, et al. 2020. Improvement of the Quantitative Precipitation Estimation Algorithm Based on the CINRAD-SA Polarization Radar and Its Application Evaluation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (3): 305–319. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19012

CINRAD-SA 偏振雷达定量降水估测算法 改进及应用评估

郭佳¹ 吴艳锋¹ 罗丽^{2,3} 肖辉^{2,3}

1 北京敏视雷达有限公司, 北京 100085

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高雷达定量降水估测的精度, 建立一套高精度的双偏振雷达定量降水估测方法, 并对其在业务应用中的表现进行评估。本文利用雨滴谱仪数据使用非球形粒子的散射模型 (T-Matrix 模型) 进行不同偏振量的模拟计算, 根据计算结果对实测雨滴谱数据 (DSD) 进行分类拟合, 实现对 CSU-HIDRO (Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization) 优化降水估测算法的改进。为了评估改进后 CSU-HIDRO 优化算法 (简称 CSU-HIDRO_I) 的应用效果, 本文选取 2016~2017 年两年汛期发生于中国华南地区的 6 次大范围强降水过程为评估对象, 分别采用单偏振雷达定量降水估测的 $R(Z_{\text{H}})$ 关系法 (WSR-88D Precipitation Processing System, 简称 PPS 法) 和 CSU-HIDRO_I 法进行小时降水量估测。按照不同降水率大小以及距离雷达 20~60 km 和 60~100 km 范围分别对两种降水估测方法进行评估, 并将雷达估测的小时降水量同地面雨量计小时降水量资料进行对比, 结果表明: (1) CSU-HIDRO_I 法在应用评估过程中取得了较好的评估效果, 其估测精度及稳定性均较好。(2) PPS 法对小雨 (降水率 $R < 2.5$ mm/h) 存在一定的高估, 对大雨及暴雨 ($R > 8$ mm/h) 存在明显低估, 而 CSU-HIDRO_I 法能够有效的降低强降水的低估情况, 同时提高了小雨的估测精度。与 PPS 法相比, CSU-HIDRO_I 法对小雨、中雨、大雨及暴雨的估测偏差分别降低了 38%、24%、17%、15%。(3) PPS 法在降水估测中对离雷达的距离更为敏感, 相同降水率下不同距离处的相对误差波动较大, CSU-HIDRO_I 法对距离敏感性较弱, 相同降水率强度下, 相对误差随距离的变化波动较小。

关键词 双偏振雷达 T-Matrix 模型 分类拟合 定量降水估测 效果评估

文章编号 1006-9585(2020)03-0305-15

中图分类号 P415.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19012

Improvement of the Quantitative Precipitation Estimation Algorithm Based on the CINRAD-SA Polarization Radar and Its Application Evaluation

GUO Jia¹, WU Yanfeng¹, LUO Li^{2,3}, and XIAO Hui^{2,3}

1 Beijing Metstar Radar Co. Ltd, Beijing 100085

收稿日期 2019-01-22; 网络预出版日期 2020-03-05

作者简介 郭佳, 男, 1986 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事天气雷达数据及资料应用研究。E-mail: jia.guo@metstar.net

通讯作者 吴艳锋, E-mail: yanfeng.wu@metstar.net

资助项目 国家重点研发计划 2018YFC1506104、2018YFC1507501, 气象关键技术集成与应用 (重点) 项目 CMAGJ2013Z21, 华云集团科技项目 HYKJXM-201602

Funded by National Key Research and Development Program (Grants 2018YFC1506104 and 2018YFC1507501), Meteorological Key Technology Integration and Application (Key) Project (Grant CMAGJ2013Z21), Science and Technology Project of Huayun Group (Grant HYKJXM-201602)

2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract To improve the accuracy of radar quantitative precipitation estimation (QPE), a high-precision dual-polarization radar QPE method is established, and its performance in operational application is evaluated. In this study, a nonspherical particle scattering model (i.e., T-matrix model) is used to simulate and calculate different polarization quantities on the basis of the data obtained using an LPA10 disdrometer. On the basis of the calculated results, the measured raindrop spectrum data are classified and fitted to optimize the precipitation estimation algorithm of CSU-HIDRO (Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization). Two rainfall cases occurring in 2016 and 2017 in South China are selected to assess the performance of the modified algorithm (CSU-HIDRO_I). The $R(Z_H)$ method PPS (WSR-88D Precipitation Processing System) and the CSU-HIDRO_I method are used to estimate the hourly precipitation. On the basis of different rainfall intensities and ranges (i.e., 20–60 km and 60–100 km) obtained by radar, the two precipitation estimation methods are evaluated. Moreover, the hourly precipitation estimated by radar is compared with that estimated by rain gauges. The main results are as follows: (1) The CSU-HIDRO_I method achieves good QPE results, and its estimation accuracy and stability are better than that of the $R(Z_H)$ method. (2) The PPS method overestimates during light rainfall ($R < 2.5$ mm/h) and underestimates during heavy rainfall and rainstorm ($R > 8$ mm/h). By contrast, the CSU-HIDRO_I method can effectively reduce the underestimation of heavy rainfall and improve the estimation accuracy during light rainfall. Compared with the PPS method, the estimation deviation of the CSU-HIDRO_I method for light rainfall, moderate rainfall, heavy rainfall, and rainstorm is reduced by 38%, 24%, 17%, and 15%, respectively. (3) The PPS method is more sensitive to the distance from the radar during precipitation estimation than the other methods. Under the same rainfall intensity, the relative error at different distances fluctuates considerably. By contrast, the CSU-HIDRO_I method is less sensitive to the range from the radar than the other methods. Moreover, the variation of its relative error at different distances is smaller than that of the other methods.

Keywords Dual-polarization radar, T-matrix model, Classified fitting, Quantitative precipitation estimation, Effect evaluation

1 引言

天气雷达作为大气、云降水物理研究和探测的重要手段,被广泛地应用于气象科学研究和业务天气预警观测中。不仅可以为中小尺度天气过程提供高时空分辨率的观测资料,还能够很好的反映降水的空间不均匀性。随着双偏振多普勒天气雷达的快速发展及在云降水领域的广泛应用,双偏振雷达的多偏振量极大地提高了降水估测及水凝物分类识别的能力 (Ulbrich et al., 1983)。基于不同偏振量与降水率关系的降水估测算法被大量地提出,不同定量降水估测算法在不同降水类型区域的表现各异 (刘黎平等, 1996; 楚荣忠等, 1997; 尹忠海等, 2002)。因此,使用雨量计评估不同定量降水估测算法从而构建高分辨率、高精度的天气雷达定量降水估测产品是目前双偏振雷达业务升级过程中的重点和焦点。

中外研究机构及学者对天气雷达定量降水估测算法进行了很多研究,包括传统的 $Z-R$ 关系法,概率配对法、卡尔曼滤波校准法和变分校准法等

(张培昌等, 1992a; 张培昌等, 1992b; 张培昌等, 2001) 单偏振定量降水估测方法,其中针对业务应用的系统有基于美国 WSR-88D PPS (Precipitation Processing System) 的 MPE (Multisensor Precipitation Estimation) 系统 (Daniel et al., 2013)。比起传统的单偏振雷达,双偏振雷达可以测量更多的回波参量 Z_H (反射率)、 Z_{DR} (差分反射率)、 K_{DP} (差分相移率)、 ϕ_{DP} (差分相位)、 L_{DR} (退极化比),它能提供更多的关于水凝物类别的信息,并且偏振量 K_{DP} 不受雷达标定、衰减以及部分波束遮挡的影响,有利于提高降水估计的质量 (王建林, 2007)。双偏振雷达定量估测降水,偏振量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的不同组合关系反演降水更有优势,最重要的一点在于组合关系的准确选择,于是出现了根据观测到的雷达参量 (Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP}) 的特征选择组合关系法 (冀春晓等, 2008; 伍静等, 2010),如 JPOLE (Joint Polarization Experiment) 算法 (Ryzhkov et al., 2005; Giangrande and Ryzhkov, 2008)、CSU-ICE 算法 (Cifelli and Coauthors, 2003)、CSU-HIDRO 算法 (Cifelli et al., 2011)。

JPOLE 算法是根据 $R(Z_H)$ (R 表示降水率) 计算出的降水率强度来选择不同的降水估测关系, 而 CSU-ICE 算法则是根据 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的阈值来选择。CSU-HIDRO 优化算法将相态识别算法加入到降水估测中, 采用 HCS-R (Hydrometeor Classification System for Rainfall Estimation) (Lim et al., 2005) 系统进行水凝物的分类识别, 其分类方法使用模糊逻辑法, 再根据 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的阈值来选择降水估测的关系式。相比较而言, 国内也进行了双偏振雷达相态识别方法的研究 (曹俊武等, 2005; 冯亮等, 2018), 但是将其运用到定量降水估测方法中的相对较少。

目前针对于不同类型降水过程的雷达定量降水估测评估及误差分析也有相关的研究, (高晓荣等, 2012) 利用概率配对法 (Probability-Fitting Technique, PFT) 建立 $Z-I$ 关系进行单部雷达降水估测, 并采用最优插值法 (Optimum Interpolation, OI) 对降水估计进行订正评估。(勾亚彬等, 2014) 使用基于雷达组网拼图的定量降水估测算法对 4 次不同降水类型的灾害性天气过程在业务上的应用效果进行了综合评估和分类评估, 其中使用的降水估测算法主要是联合 $R(Z_H)$ 关系法和雨量计的最优插值法。鉴于目前缺乏一套在业务上成熟且有较高估测精度的偏振雷达定量降水估测算法, 以及针对大面积强对流降水过程, 偏振雷达降水估测算法的稳定性及精度缺乏相应的效果评估。本文利用广州地区 3 部雨滴谱仪的数据对 CSU-HIDRO 优化算法进行改进, 为了评估改进后的 CSU-HIDRO_I 法在业务应用中的效果, 选择了 2016~2017 年汛期发生在华南地区的 6 次大范围强对流降水过程, 并结合业务上使用的 PPS 法进行对比, 评估 CSU-HIDRO_I 降水估测算法在强对流灾害性降水过程中的应用效果, 为今后双偏振雷达定量估测降水算法的业务应用及改进提供参考。

2 资料来源

本文选取了广州地区, 2016~2017 年汛期的 6 次大范围强降水过程, 其中 2016 年 6 月 8 日、2017 年 5 月 7 日、2017 年 6 月 2 日、2017 年 6 月 3 日等 4 次过程为华南前汛期大暴雨过程, 主要是由于夏季西南季风开始活跃, 将热带洋面上大量的暖湿气流不断输送到华南上空, 加上北方冷空气频繁南下的影响, 在二者共同作用下产生了这种灾害性较强的暖区强对流过程, 通过对这 4 次降水过程的分析发现, 多个雨量计站点的小时降水量超过 50 mm/h, 灾害性极强。同样是受到北方冷空气的影响, 2016 年 5 月 6 日及 5 月 10 日, 广州地区受到了强对流引起的大暴雨的袭击, 据当地气象部门报道, 从 6 日至 10 日, 新一轮强对流天气正在疯狂影响广州, 雷雨大风等不稳定天气持续, 多地区连续发布橙色预警信号并启动气象灾害 (暴雨) II 级应急响应标准。6 次大范围强降水过程数据包括三部分: 其一是广州番禺 S 波段双线偏振雷达观测数据, 其二是广东省自动雨量站网小时实测雨量数据, 其三是来自敏视达雷达有限公司自主研发的 LPA10 激光雨滴谱仪 (刘强等, 2018; 张建云和张垚, 2018) 的滴谱数据。降水过程信息统计如表 1 所示。

2.1 双线偏振雷达资料

广州 S 波段多普勒天气雷达位于广州市番禺区, 其位置如图 1 所示。它属于中国新一代天气雷达, 并于 2016 年初实现了双偏振的升级, 运行模式为 STSR (双发双收), 在常规雷达观测的基础上增加了 Z_{DR} 、 ρ_{DP} 、 ρ_{hv} 的观测, 距离分辨率由 1 km 提升到了 250 m。广州雷达采用敏视达的信号处理系统, 雷达主要性能参数如表 2 所示。所取资料为最低 4 个仰角, 其中 PPS 法测量降水需要最低 4

表 1 广州地区 2016~2017 年汛期的 6 次大范围强降水过程的信息统计

Table 1 Information statistics of precipitation processes of six large scale heavy precipitation processes in the flood season from 2016 to 2017 in Guangzhou

降水过程日期	降水时间段 (协调世界时)	平均降水率/mm h ⁻¹	过程总时间/h
2016年5月6日	2016年5月6日08:00至14:00	10.5	6
2016年5月10日	2016年5月9日21:00至10日04:00	9.6	7
2016年6月8日	2016年6月8日21:00至9日02:00	9.1	5
2017年5月7日	2017年5月6日18:00至7日04:00	11.9	10
2017年6月2日	2017年6月2日09:00至15:00	9.8	6
2017年6月3日	2017年6月3日09:00至15:00	8.9	6

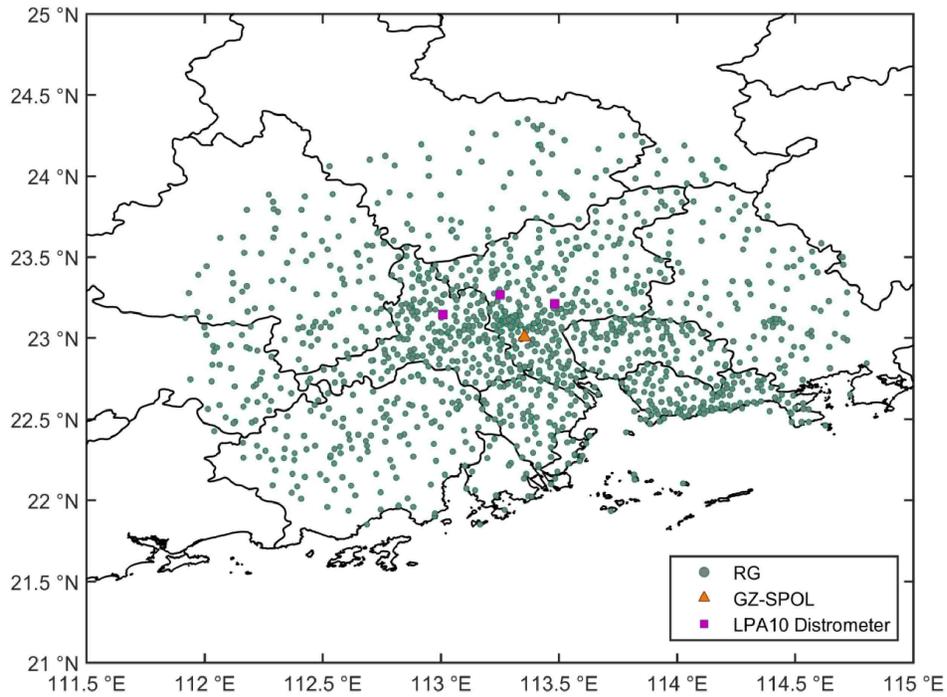


图 1 广州偏振雷达（黄色三角形）、地面雨量计（绿色点）及雨滴谱仪（紫色方形）位置分布

Fig. 1 Geographical distribution of radar stations (yellow triangle), gauges (green dots), and disdrometer (purple square) in Guangzhou

表 2 广州雷达主要性能参数

Table 2 Main technical parameters of Guangzhou radar

雷达构件	主要参量	参数
发射机	波速宽度	0.95°
	工作频率	2885 MHz
	峰值功率	≥650 kW
	脉冲宽度	1.57 μs, 4.7 μs
	脉冲重复频率	322~1304 Hz
接收机	工作模式	STSR
	最小可测功率	≤-109 dBm(1.57 μs)≤-114 dBm(4.7 μs)
	噪声系数	≤4 dB
	动态范围	≥85 dB
	距离分辨率	250 m/1000 m
观测精度	反射率因子Z	≤1 dB
	速度V/谱宽W	≤1 m/s
	差分反射率因子Z _{DR}	≤0.2 dB
	差分传播相移Φ _{DP}	≤2°
	差分传播相移率K _{DP}	≤0.2°/km
	相关系数ρ _{hv} (0)	≤0.001

层的资料，而 CSU-HIDRO_I 法取最低仰角 (0.5°)，查阅探空数据发现零度层的高度大概在 4.7 km 左右，考虑到本次评估过程只需要使用距离雷达 100 km 范围内的数据，所以不必考虑零度层的影响 (庄薇等, 2013)。

2.2 雨滴谱仪及雨量计资料

LPA10 激光雨滴谱仪为北京敏视达雷达有限公司自主研发，其测量原理同 OTT Parsivel² 雨滴谱仪类似。以激光测量为基础，当有降水粒子穿过采样空间时，能够计算降水粒子的尺度、速度及个

数。根据降水粒子的尺度大小及速度大小, 将粒径分为 64 个等级, 速度分为 32 个等级, 降水粒子的直径范围为 0.2~25 mm, 速度范围为 0.2~20 m/s, 其采样间隔为 1 min。

2016 年 3 月, 在广州市萝岗站 (23.21°N, 113.48°E)、广州白云站 (23.27°N, 113.25°E)、广东省佛山站 (23.15°N, 113.01°E) 等 3 个站点安装了 3 台 LPA10 激光雨滴谱仪。3 台雨滴谱仪距离雷达大概在 30~40 km, 垂直上方距离雷达最低仰角的距离库高度在 1 km 以内, 所在雷达径向上无遮挡存在, 属于比较理想的观测位置。本文中使用的雨滴数据均来自以上 3 个站点雨滴谱仪在表 1 中 6 次强降水过程共计 18756 min 的有效观测数据。

雨量计小时雨量资料来自于广东省密集的地面雨量计网络资料, 其降水量分辨率为 0.1 mm, 其中能够提供与雷达形成对应降水数据的雨量计数目为 2224。其中雷达、雨量计及雨滴谱仪的分布情况如图 1 所示。

3 数据处理方法

3.1 数据质量控制

雷达数据质量是做降水估测之前必须考虑的问题, 它与雷达的标定及数据质量控制有关, 因此需要对雷达进行相应的标定及雷达基数据的预处理, 其处理过程如下:

(1) 在对雷达准确校准方面, 对于回波强度在 15~20 dBZ 的小雨回波及零度层以上的 15~25 dBZ 的干雪回波的 Z_{DR} 要求在 0 dB 左右, 且 ρ_{hv} 接近于 1, 均要求处于合理范围,

(2) Z_H 和 Z_{DR} 使用中值滤波器以及沿径向

上 5 个距离库的滑动平均值的方法来消除异常值和减少随机波动。

(3) 根据 ρ_{hv} 小于 0.85 的阈值来剔除地物杂波、湍流散射、异常杂波等非气象回波。

(4) 为了准确估测 K_{DP} , 首先根据地物杂波的差分相位均值来标定系统的初始相位, 然后平滑滤波, 最后通过线性编程的方法来计算 K_{DP} (Huang et al., 2016), 线性编程的方法确保 K_{DP} 值的非负性。

覆盖广东省的 2224 个雨量计数据, 时间分辨率为 1 h, 为了评估雷达定量降水估测的精度和稳定性, 生成与雷达小时降水量产品 (OHP) 相对应的小时雨量计产品 (GAGE), 将雷达小时降水量估计值与雨量计的观测值进行配对, 雷达估计值与地面雨量计实测值之间存在空间的不一致性, 将会影响雷达定量降水估测算法精度的评估, 因此, 选择雨量计正上方及周围共 9 个点的雷达估测数据进行算数平均 (高晓荣等, 2012)。由于提供的雨量计站点较多且雨量计数据的可靠性需要得到保证, 以及波束遮挡等原因, 需要对参与评估的雨量计进行筛选, 其中雨量计的筛选原则如下:

(1) 剔除雨量计数据中的奇异值, 剔除一些同周围雨量计站点差异较大的奇异数据。

(2) 剔除雷达小时降水量中有明显遮挡的数据, 如雨量计对应距离库上雷达小时降水量产品数据有明显遮挡则剔除。

按照以上准则对雷达数据及雨量计数据进行质量控制后匹配, 6 次强对流降水过程按照雨量计小时降水量分类匹配并统计, 结果如下表 3 所示。

在雨滴谱数据 (DSD) 的质量控制过程中, 对原始 DSD 分钟数据中降水率小于 0.1 mm/h 或者降水粒子数小于 50 的进行剔除 (Jaffrain and Berne,

表 3 广州地区 2016~2017 年汛期 6 次大范围强降水过程的雷达—雨量计小时降水量匹配样本按降水率强度分类统计

Table 3 The number of matching samples of hourly rainfall of radar-gauge in different rain rates during the six heavy rainfall processes in the flood season from 2016 to 2017 in Guangzhou.

降水过程日期	雷达—雨量计匹配数据点个数			
	$R \leq 2.5$ mm/h	2.5 mm/h < $R \leq 8$ mm/h	$8 < R \leq 16$ mm/h	$R > 16$ mm/h
2016年5月6日	1203	459	334	345
2016年5月10日	973	822	455	521
2016年6月8日	351	334	151	174
2017年5月7日	438	365	231	325
2017年6月2日	262	235	267	156
2017年6月3日	196	170	106	197

2011; Tokay et al., 2013; Tang et al., 2014), 此外, 许多研究 (Kruger and Krajewski, 2002; Jaffrain and Berne, 2011) 指出, 激光雨滴谱仪容易受到附近湍流和仪器周边大雨滴破碎成小雨滴后飞溅造成的小雨滴采样过度的误差影响。Kruger and Krajewski (2002) 提出了一个基于粒子下落末速度的过滤方法, 以消除过采样误差, 其表达式如下:

$$|V_{\text{measured}} - V_{\text{ideal}}| < 0.6V_{\text{ideal}}, \quad (1)$$

其中, V_{measured} 为测量到的粒子下落末速度, V_{ideal} 为 Brandes (2002) 给出的公式推导出的粒子下落末速度, 其表达式如下:

$$V_{\text{ideal}} = -0.1021 + 4.932D - 0.9551D^2 + 0.07934D^3 - 0.002362D^4, \quad (2)$$

式中, D 为粒子直径。

3.2 基于改进的 CSU-HIDRO_I 降水估测法

双偏振雷达定量降水估测 CSU-HIDRO 优化算法是由美国科罗拉多州立大学的 Cifelli et al. (2011) 提出, 该算法主要是在模糊逻辑法水凝物分类的基础上, 根据不同的降水类型, 将降水类型大致分为液态降水、固态降水、混合型降水 3 种类型, 然后再根据 K_{DP} 、 Z_{H} 、 Z_{DR} 的阈值选择不同的降水率计算公式:

$$R(Z_{\text{H}}) = a_1 Z_{\text{H}}^{b_1}, \quad (3)$$

$$R(K_{\text{DP}}) = a_2 K_{\text{DP}}^{b_2}, \quad (4)$$

$$R(Z_{\text{H}}, Z_{\text{DR}}) = a_3 Z_{\text{H}}^{b_3} 10^{c_3 Z_{\text{DR}}}, \quad (5)$$

$$R(K_{\text{DP}}, Z_{\text{DR}}) = a_4 (K_{\text{DP}})^{b_4} 10^{c_4 Z_{\text{DR}}}, \quad (6)$$

其中, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 、 a_4 、 b_4 、 c_4 等为拟合参数, 无量纲; R 为降水率, 单位: mm/h; Z_{H} 为反射率因子, 单位: $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$; Z_{DR} 为差分反射率因子, 单位: dB; K_{DP} 为差分传播相移率, 单位: $(^\circ)/\text{km}$ 。CSU-HIDRO 算法流程如图 2 所示, 图中关系式的编号与公式 (3) - (6) 的对应关系: 编号①对应公式 (6), 编号②对应公式 (4), 编号③对应公式 (5), 编号④对应公式 (3)。使用非球形粒子的散射模型 (T-Matrix) 和观测的 DSD 对 S 波段雷达的偏振量进行模拟 (Zhang et al., 2001), 结合 DSD 信息计算出降水率, 可拟合出各表达式中的参数。

在传统的 CSU-HIDRO 降水估测算法中 $R(Z_{\text{H}})$ 、 Z_{DR} 、 $R(Z_{\text{DR}}, K_{\text{DP}})$ 、 $R(K_{\text{DP}})$ 的各个参数是通过所有观测到的 DSD 进行拟合得到, 每个表达式的参数估计中都包含了所有的滴谱的信息。实际上, 类似于 CSU-HIDRO 这样通过多个降水率计算表达式合成的降水估测方法中, 只有偏振量参数达到相应的阈值时才会使用。比如在 $R(Z_{\text{H}}, Z_{\text{DR}})$ 的参数拟合中, 加入了弱降水的滴谱信息, 可能会因为 Z_{DR} 在低信噪比 (SNR) 下的显著测量偏差而导致较大的拟合参数的偏差。同样, $R(Z_{\text{DR}}, K_{\text{DP}})$ 表达式参数的拟合中也存在类似的问题, 弱降水期间表现出的高噪声可能会使 Z_{DR} 、 K_{DP} 的估计不可信, 造成拟合参数的偏差。同时, 在强降水情况下, 可能会因为 Z_{H} 和 Z_{DR} 存在较大的衰减而产生较大的偏差。

将所有降水过程的 DSD 用来拟合仅在满足阈值条件下使用的表达式的参数时, 其中一部分的

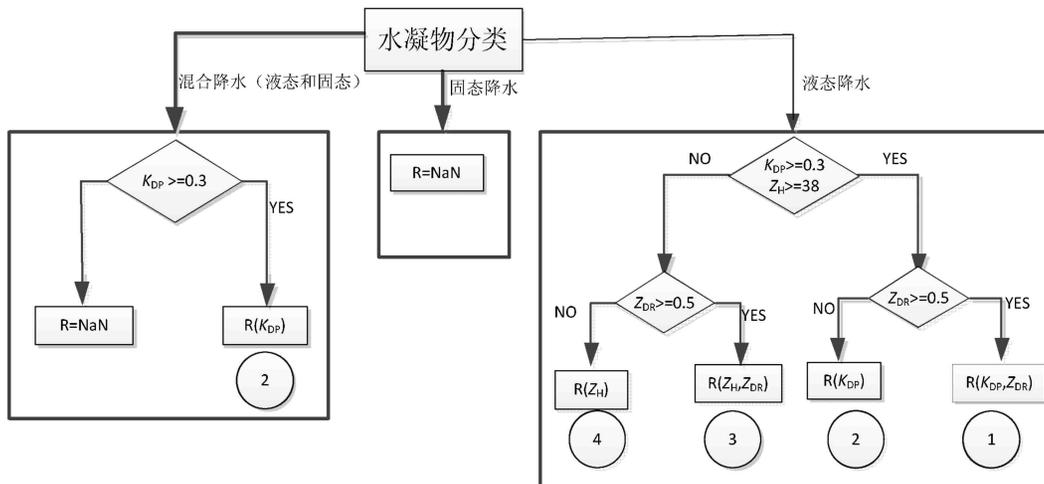


图 2 CSU-HIDRO 算法流程

Fig. 2 Flowchart describing the CSU-HIDRO (Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization) algorithm

DSD 信息将干扰各表达式参数的准确估计。在本文中,提出了一种基于各偏振量信息的分类拟合参数法,该方法利用所有 DSD 信息中各偏振量在阈值范围内的那部分数据进行拟合。这种分类拟合的核心是用于拟合的数据偏振信息特征与用于降水估测的雷达偏振信息特征保持一致。因此,在本次研究中,根据 CSU-HIDRO 算法流程图中(图 2)的各表达式的偏振量阈值进行 DSD 分类拟合,得到不同情况下的拟合参数。

3.3 评估方法

本次评估过程,采用分降水率大小的评估法和距离雷达不同范围的评估法。考虑到雷达附近地物及雷达噪声和零度层对降水的影响,本文选择距离雷达 20~100 km 范围内的区域进行对比评估。按照距离雷达的不同范围分为 2 段,其中距离雷达 20~60 km 范围为近距离段,距离雷达 60~100 km 范围为远距离段。根据气象标准规范,1 h 降水量小于或等于 2.5 mm 为小雨;1 h 降水量为 2.6~8.0 mm 为中雨;1 h 降水量为 8~16 mm 为大雨;1 h 降水量大于 16 mm 为暴雨(中国气象局,2003);因此将降水强度的大小按照上述方法分为小雨类、中雨类、大雨类和暴雨类进行评估。本次主要评估在强对流灾害性天气过程中天气雷达不同定量降水估测算法的表现。

为了对降水估测的误差进行定量评估,本文采用相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)、比率偏差(BIAS)和皮尔逊相关系数(CC)(汪舵等,2017)作为评估指标,对不同降水估测算法进行评估。计算表达式如下:

$$R_E = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_{\text{gage},i} - R_{\text{radar},i}|}{R_{\text{gage}}} \right) 100\%, \quad (7)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{gage},i} - R_{\text{radar},i})^2}{n}}, \quad (8)$$

$$B_{\text{IAS}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{radar},i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{gage},i}}, \quad (9)$$

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{gage},i} - \overline{R_{\text{gage}}})(R_{\text{radar},i} - \overline{R_{\text{radar}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{\text{gage},i} - \overline{R_{\text{gage}}})^2 (R_{\text{radar},i} - \overline{R_{\text{radar}}})^2}}, \quad (10)$$

其中, R_E 、 R_{MSE} 、 B_{IAS} 、 C_C 分别表示相对误差、均方根误差、比率偏差和皮尔逊相关系数, n 为雷达—雨量计匹配数据点个数, $R_{\text{gage},i}$ 表示第 i 组雨量计小时降水量, $R_{\text{radar},i}$ 表示第 i 组雨量计对应雷达估测小时降水量, $\overline{R_{\text{gage}}}$ 表示 n 个雨量计实测小时降水量均值, $\overline{R_{\text{radar}}}$ 表示同 n 个雨量计对应雷达小时降水量估测均值。

相对误差能够较好地反映数据的可信度,相对误差越小,可信度越高。均方根误差能够很好地反映雷达估测值和雨量计实测值之间的离散程度,其反映了估测值偏离实测值的程度,其值越小离散程度越低,表明数据越集中,算法的稳定性越好。比率偏差反映的是雷达估测值和雨量计观测值之间的平均偏差比率,比率偏差越接近 1 则表明估测值和观测值越接近。皮尔逊相关系数表征了估测值样本与实测值样本之间的相关性,相关系数越接近 1,表明估测值与实测值之间的相关性越好。

4 CSU-HIDRO_I 改进效果分析

根据 3.2 中改进后的 CSU-HIDRO_I 降水估测法,使用 2016~2017 年汛期的 6 次强降水过程所观测的 DSD 进行雷达偏振量参数及降水率(R)计算,并分类对 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{\text{DR}})$ 、 $R(Z_{\text{DR}}, K_{\text{DP}})$ 、 $R(K_{\text{DP}})$ 进行参数拟合:

$$R(Z_H) = 0.019Z_H^{0.761}, \quad (11)$$

$$R(K_{\text{DP}}) = 44.84K_{\text{DP}}^{0.763}, \quad (12)$$

$$R(Z_H, Z_{\text{DR}}) = 0.0057Z_H^{0.9698} 10^{-0.4762Z_{\text{DR}}}, \quad (13)$$

$$R(K_{\text{DP}}, Z_{\text{DR}}) = 80.9645(K_{\text{DP}})^{0.9466} 10^{-0.129Z_{\text{DR}}}. \quad (14)$$

$R(Z_H)$ 参数拟合结果如公式(11)所示,同使用 2DVD 雨滴谱仪在中国东部降水过程(Chen et al., 2017)中的最佳拟合结果 $R(Z_H)=0.0171Z_H^{0.746}$ 比较接近。其中对于 $R(Z_H, Z_{\text{DR}})$ 、 $R(Z_{\text{DR}}, K_{\text{DP}})$ 、 $R(K_{\text{DP}})$ 的最佳分类拟合结果分别如下公式所示:

由 DSD 分类反演的 $R(Z_H)-Z_H$ 、 $R(K_{\text{DP}})-K_{\text{DP}}$ 散点和拟合曲线如图 3a、3b 所示,以及 $R(Z_H, Z_{\text{DR}})-Z_H-Z_{\text{DR}}$ 、 $R(Z_{\text{DR}}, K_{\text{DP}})-Z_{\text{DR}}-K_{\text{DP}}$ 散点和拟合

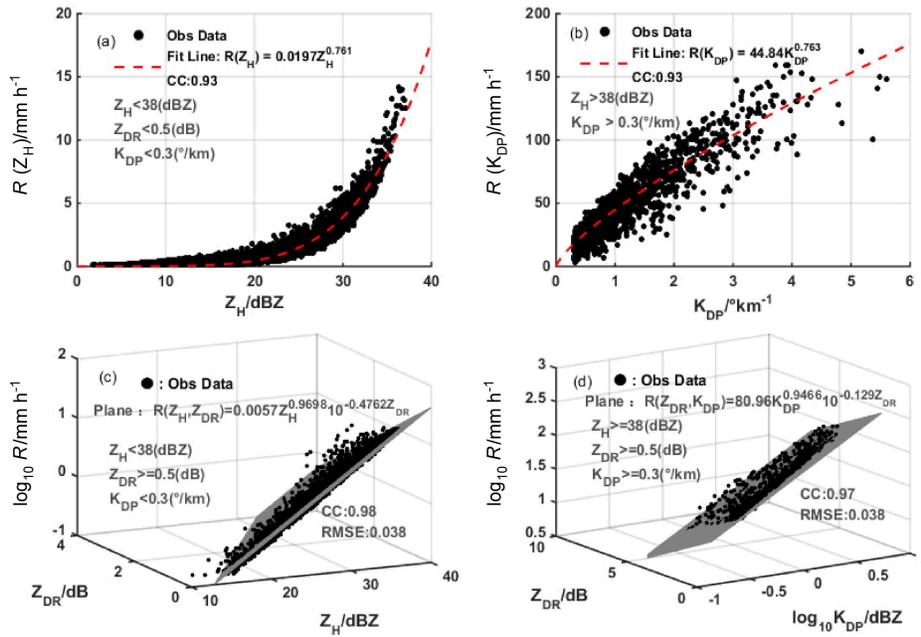


图 3 广州地区 2016~2017 年汛期 6 次强降雨过程所观测雨滴谱数据 (DSD) 分类反演的 (a) $R(Z_H)-Z_H$ 、(b) $R(K_{DP})-K_{DP}$ 、(c) $R(Z_H, Z_{DR})-Z_H-Z_{DR}$ 、(d) $R(Z_{DR}, K_{DP})-Z_{DR}-K_{DP}$ 散点、曲线和曲面

Fig. 3 Scatter plots, fitting curves, and the fitting surfaces of (a) $R(Z_H)-Z_H$, (b) $R(K_{DP})-K_{DP}$, (c) $R(Z_H, Z_{DR})-Z_H-Z_{DR}$, and (d) $R(Z_{DR}, K_{DP})-Z_{DR}-K_{DP}$ obtained from the raindrop spectrum (DSD) data during the six heavy rainfall events from 2016 to 2017 in Guangzhou

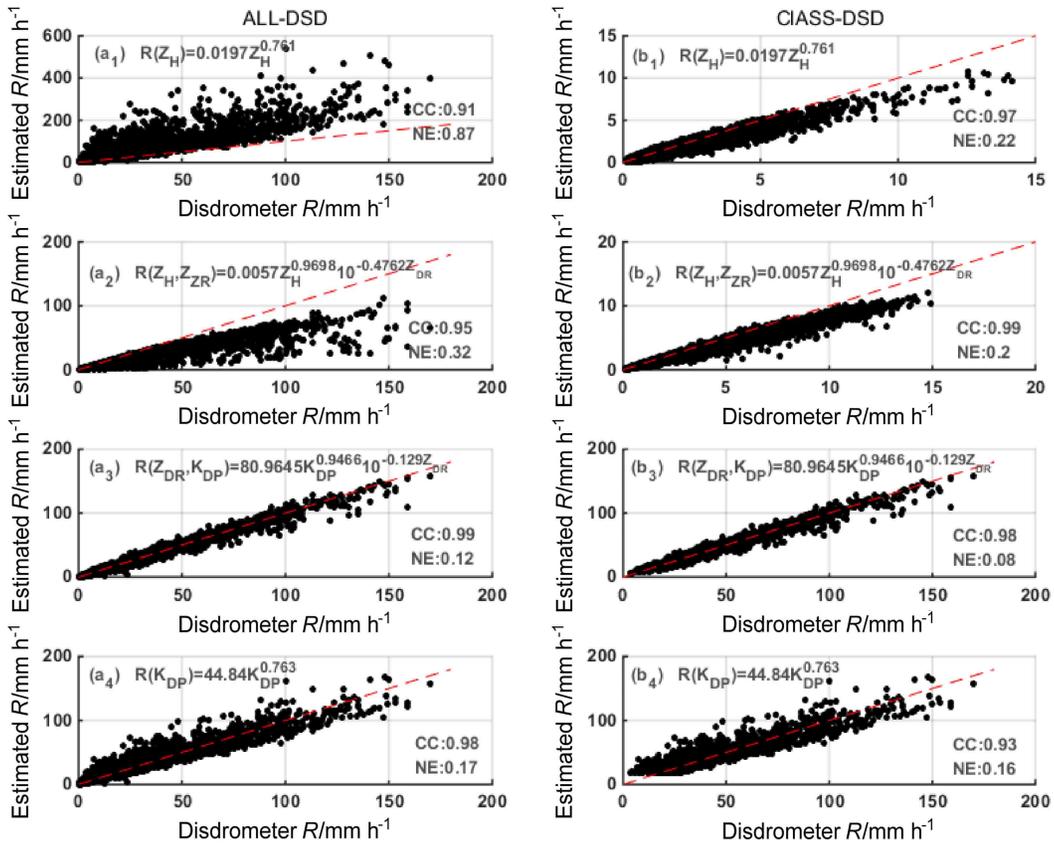


图 4 基于广州地区 2016~2017 年汛期 6 次强降雨过程所观测所有 DSD 数据 (左列) 和分类 DSD 数据 (右列) 使用 4 种拟合公式计算得到降水率与对应观测的降水率散点对比图

Fig. 4 Scatter plots of the rain rate retrieved from the relationships fitted using all DSD samples (left column) and the classified DSD (right column) vs. the direct rainfall rate from the distromet dataset in the six heavy rainfall events from 2016 to 2017 in Guangzhou

曲面如图 3c 和 3d 所示, 图 3 中均已标注各拟合关系式中使用数据的偏振量筛选门限。

图 4 显示了利用 DSD 计算得到的偏振量并使用公式 (11) - (14) 中 4 种降水率公式计算得到降水率同 DSD 直接计算降水率的散点对比图, 其主要展示了算法在“理想状态”下的性能。其中左列图是不分类直接将所有 DSD 分别按照公式 (11) - (14) 进行估算的对比结果, 右列的图是将 DSD 根据模拟计算的偏振量及阈值进行分类后使用 (11) - (14) 的计算公式进行分类估算的对比图。可以看出, 如果不使用分类合成的降水估测算法, 传统的 $R(Z_H)$ 法对强降水的估测偏差较大, 同样, $R(Z_H, Z_{DR})$ 对强降水的估测也存在一定的偏差, 而 $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 、 $R(K_{DP})$ 的表现相对较好, 可能是本次选用降水过程的强降水数据较多, 同时, $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 、 $R(K_{DP})$ 对强降水的表现相对较好。从分类合成算法的结果可以发现, $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 更多的在弱降水时使用且表现较好, $R(Z_{DR}, K_{DP})$ 、 $R(K_{DP})$ 则更多的在强降水时使用。其结果与 Bringi et al. (2003) 及 Chen G et al. (2017) 的结果比较类似。

5 效果评估及误差分析

5.1 分降水率的评估

使用传统的 PPS 法和 CSU-HIDRO_I 法对 6 次降水过程进行小时降水量估算, 利用得到的雷达—雨量计匹配数据 (雨量计小时降水量—雷达小时降水量估测值) 进行小雨类 ($R < 2.5$ mm/h)、中雨类 (2.5 mm/h $< R \leq 8$ mm/h)、大雨类 (8 mm/h $< R \leq 16$ mm/h) 以及暴雨类 ($R > 16$ mm/h) 的相对误差、均方根误差、相关系数和比率偏差的误差信息统计,

表 4 给出了 6 次降水过程数据匹配后的评估结果。

根据分降水率的误差统计结果, 由相对误差可以看出, 针对不同的降水率, 两种降水估测方法得到的相对误差的趋势较为一致, 随着降水率的增大, 相对误差逐渐减小, 但是 CSU-HIDRO_I 法相对误差更小, 数据可信度更高; 同时, 两种降水估测方法对于弱降水的估测精度都有待提高。对于均方根误差而言, 随着降水率的增加其均方根误差逐渐增大, 可能是随着降水率的增大其数据的绝对偏差变大所致, 但是总体而言, CSU-HIDRO_I 法的均方根误差更小, 数据的集中度更高, 稳定性更强。由相关系数的统计结果可以看出, 在小雨到大雨阶段的相关系数均较低, 在暴雨段的相关系数更接近于 1, 可能是由于小到大雨段的范围宽度小, 在加上数据趋势性相对较弱造成, 在暴雨段虽然低估较为明显, 但是趋势性较好, 因此相关系数较高。由比率偏差的统计结果发现, 随着降水率的增大, PPS 法的比率偏差呈逐渐减小的趋势, 说明在小雨和中雨段, 雷达降水估测较雨量计高估, 在大雨及暴雨段, 雷达降水估测较雨量计低估, 而 CSU-HIDRO_I 法的比率偏差对降水率几乎不敏感且在 0.95 到 1 之间较为稳定, 说明 CSU-HIDRO_I 法在弱降水段 ($R \leq 8$ mm/h) 能有效抑制雷达降水估测的高估效应, 同时, 在强降水段 ($R > 8$ mm/h), 又能较好的抑制雷达降水估测的低估效应。结合图 5 也可以看出, 随着降水率的增大, PPS 法在弱降水时存在一定程度的高估, 在强降水段存在明显的低估, 而 CSU-HIDRO_I 法较为明显地改进了 PPS 法的高估和低估现象。

5.2 分距离雷达不同范围的评估

根据距离雷达不同范围的评估方法, 首先, 按照距离雷达不同范围分为近距离段和远距离段, 其

表 4 使用 PPS 法和 CSU-HIDRO_I 法对广州地区 2016~2017 年汛期的 6 次强降水过程不同降水率估算的小时降水量误差统计结果
Table 4 Error statistics of different rainfall rates obtained from the six heavy rainfall events from 2016 to 2017 in Guangzhou using PPS (WSR-88D Precipitation Processing System) and CSU-HIDRO_I (Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization_I) methods

降水率 $R/\text{mm h}^{-1}$	PPS 法				CSU-HIDRO_I 法			
	相对误差	均方根误差/mm	相关系数	比率偏差	相对误差	均方根误差/mm	相关系数	比率偏差
$R < 2.5$	70.3%	1.8	0.33	1.4	31.5%	0.6	0.66	0.95
$2.5 \leq R < 8$	51.3%	3.9	0.4	1.17	27.3%	1.96	0.62	0.97
$8 \leq R < 16$	39%	6.2	0.3	1.03	21.6%	3.7	0.51	0.99
$R \geq 16$	30.5%	12.3	0.7	0.82	15.3%	7.6	0.88	0.92

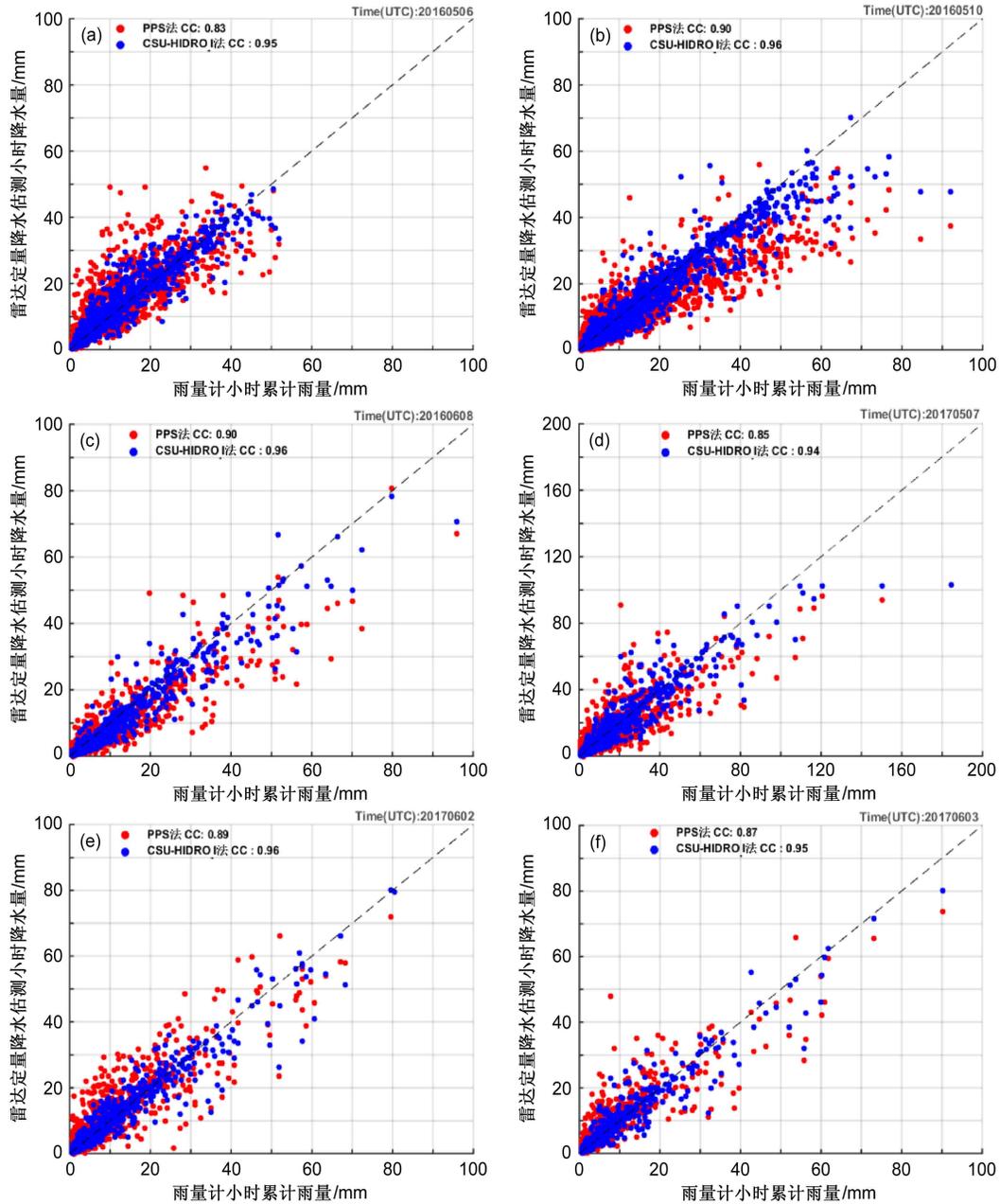


图5 广州地区 2016~2017 年汛期 6 次强降水过程 PPS 法和 CSU-HIDRO_I 法估算的定量降水估算小时降水量和雨量计小时降水量散点分布: (a) 2016 年 5 月 6 日; (b) 2016 年 5 月 10 日; (c) 2016 年 6 月 8 日; (d) 2017 年 5 月 7 日; (e) 2017 年 6 月 2 日; (f) 2017 年 6 月 3 日

Fig. 5 Scatterplots of the hourly rainfall from QPE (Quantitative Precipitation Estimation) vs. rainfall obtained directly from the rain gauges for the six rainfall events in Guanzhou on (a) 6 May 2016, (b) 10 May 2016, (c) 8 June 2016, (d) 7 May 2017, (e) 2 June 2017, and (f) 3 June 2017 using PPS and CSU-HIDRO_I methods

中 20~60 km 为近距离段, 60~100 km 为远距离段。然后, 使用 PPS 法和 CSU-HIDRO_I 法对 6 次降水过程进行降水估测, 最后, 利用得到的雷达—雨量计匹配数据 (雨量计小时降水量—雷达小时降水量估测值) 对小于 ($R \leq 2.5$ mm/h)、中雨 (2.5 mm/h $< R \leq 8$ mm/h)、大雨 (8 mm/h $< R \leq 16$ mm/h)

及暴雨 ($R > 16$ mm/h) 进行相对误差、均方根误差、相关系数和比率偏差的误差信息统计。表 5 给出了 6 次过程的综合评估结果。

根据距离雷达不同范围的评估结果, 不论在近距离范围段还是在远距离范围段, 随着降水率的增大, 其变化规律同分降水率的评估结果类似。在相

表 5 使用 PPS 法和 CSU-HIDRO_I 法对广州地区 2016-2017 年汛期 6 次强降水过程距离雷达不同范围的降水率估算误差统计结果

Table 5 Error statistics of different ranges from the radar in the six heavy rainfall events from 2016 to 2017 in Guangzhou using PPS and CSU-HIDRO_I methods

距离范围/km	降水率 $R/\text{mm h}^{-1}$	PPS法				CSU-HIDRO_I法			
		相对误差	均方根误差/mm	相关系数	比率偏差	相对误差	均方根误差/mm	相关系数	比率偏差
20~60	$R \leq 2.5$	80.6%	2.08	0.28	1.49	31.4%	0.64	0.68	0.94
	$2.5 < R \leq 8$	56.8%	4.4	0.37	1.22	28.5%	2.1	0.59	0.99
	$8 < R \leq 16$	40.4%	6.5	0.29	1.04	21.7%	3.74	0.51	0.98
	$R > 16$	30.4%	12.9	0.7	0.83	15.5%	8.1	0.88	0.93
60~100	$R \leq 2.5$	60.5%	0.62	0.4	1.33	31.6%	1.47	0.4	0.95
	$2.5 < R \leq 8$	43.7%	3.24	0.45	1.1	25.5%	3.23	0.66	0.96
	$8 < R \leq 16$	36.8%	5.7	0.3	1.0	21.3%	3.64	0.5	1.01
	$R > 16$	28.7%	10.96	0.64	0.78	14.8%	10.96	0.87	0.91

同降水率下, 距离雷达不同范围, 两种降水估测方法的表现结果差异较大, 对于 PPS 法而言, 随着距离范围的增大其相对误差有明显减小的趋势, 同样在均方根误差及比率偏差上也有类似表现, 但是在相关系数上的规律不明显。对于 CSU-HIDRO_I 法而言, 随着距离范围的增大其相对误差也有减小趋势但幅度很小, 同样在均方根误差上也有类似的现象, 但是在相关系数及比率偏差上不具有规律性。因此, 说明 PPS 法相较于 CSU-HIDRO_I 法而言, 对距离的敏感性更强, 受距离的影响更大。

图 6 分别给出了 6 次降水过程的 6 个时次的小时累积降水分布。对比分析两种降水估测方法在各时次的表现, 较直观地发现 PPS 法及 CSU-HIDRO_I 法在局地都有不同程度的低估现象, PPS 法的低估更为严重。

综上所述可以看出, 对于分降水率的评估结果和分距离雷达不同范围的评估结果, CSU-HIDRO_I 法的估测精度明显好于 PPS 法。但是 CSU-HIDRO_I 法对 6 次降水过程中的强降水时次也存在一定程度的低估, 这可能是 CSU-HIDRO_I 法采用的合成的降水估测公式的不连续性所导致, 也可能是 CSU-HIDRO_I 法的合成公式中的参数是基于 DSD 模拟偏振量拟合得到, 地面 DSD 模拟偏振量同雷达的观测值之间存在一定的时空差异造成, 这些还需要进一步地分析研究。

6 结论

本文利用安装在广州萝岗、白云、佛山的 3 台雨滴谱仪的数据资料, 使用雨滴谱数据 (DSD) 模

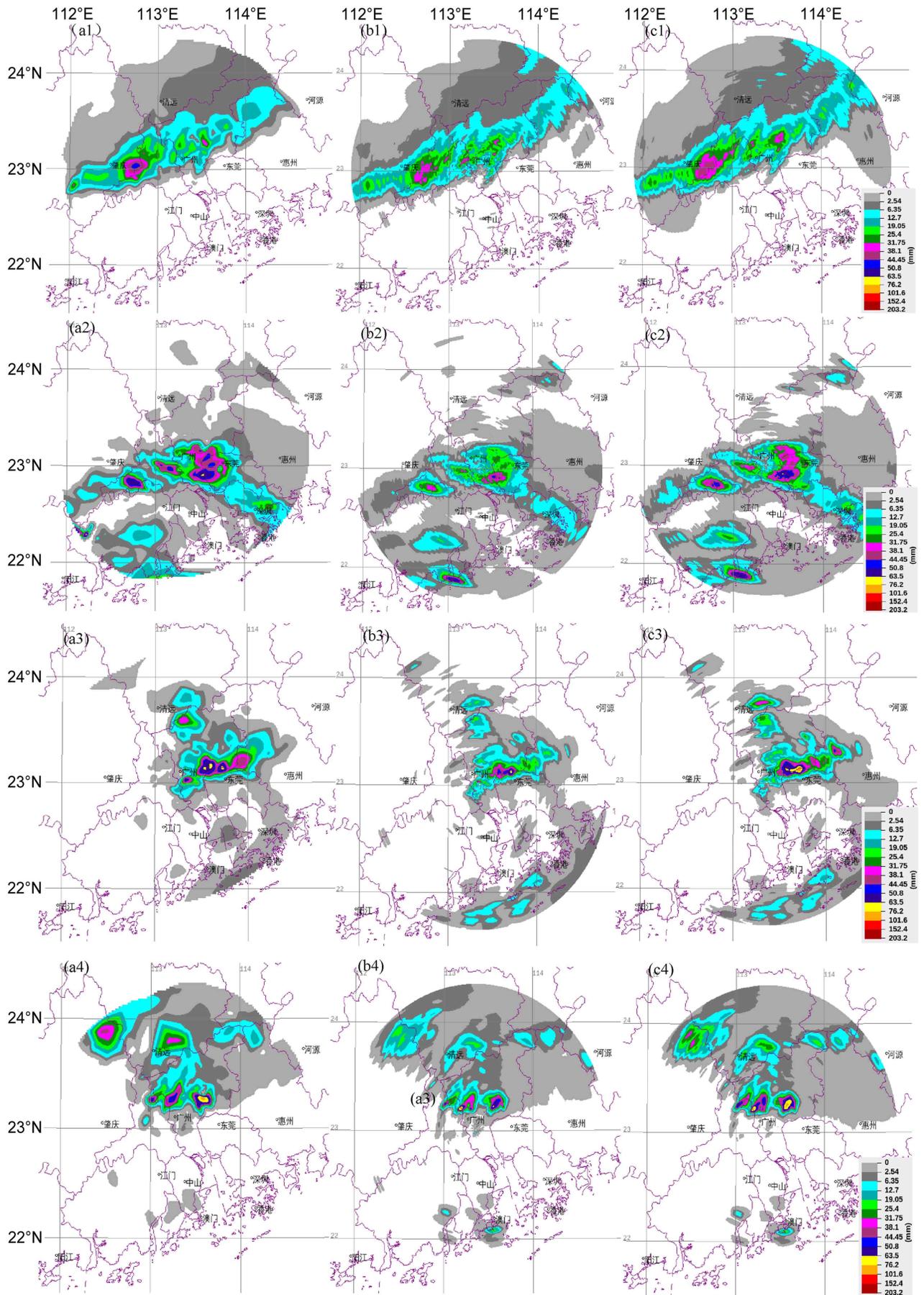
拟计算得到的偏振量信息对 CSU-HIDRO 降水估测法进行改进, 通过分类拟合的方法得到改进后 CSU-HIDRO_I 法中各降水率计算公式的相关参数。结合广州业务应用的 S 波段双线偏振雷达资料以及广东省自动站网络雨量资料, 使用 6 次降水过程对 2 种雷达定量降水估测算法 (PPS 法、CSU-HIDRO_I 法) 的业务应用进行效果评估, 并分别讨论了 2 种降水估测方法在不同降水率大小和距离雷达不同范围中的表现。评估过程主要采用相对误差、均方根误差、相关系数及比率偏差等评估指标, 得到以下主要结论:

(1) 使用 T 矩阵法模拟计算的偏振量, 经过分类拟合得到的 CSU-HIDRO_I 降水估测法中各降水率公式的参数, 分类拟合的参数具有较高的拟合度, 且分类拟合法在“理想状态”(估测值同 DSD 计算的降水率进行比较) 下的性能较好, 同时也展现了合成降水估测法 (CSU-HIDRO_I 法) 对单一降水估测法 (PPS 法) 具有较大优势。

(2) PPS 法对弱降水存在一定的高估以及在强降水存在明显低估, CSU-HIDRO_I 法在弱降水段的高估不明显, 在强降水段有一定的低估, 但是相较于 PPS 法有一定的改善。

(3) CSU-HIDRO_I 法相对于 PPS 法对大雨及暴雨的估测偏差显著降低, 同时提高了对小雨的估测精度。与 PPS 法相比, CSU-HIDRO_I 法对小雨、中雨、大雨及暴雨的估测偏差分别降低了 38%、24%、17%、15%。评估效果较好。

(4) 距离雷达不同范围, 两种降水估测算法表现出来的效果差异也较为明显, PPS 法随距离雷



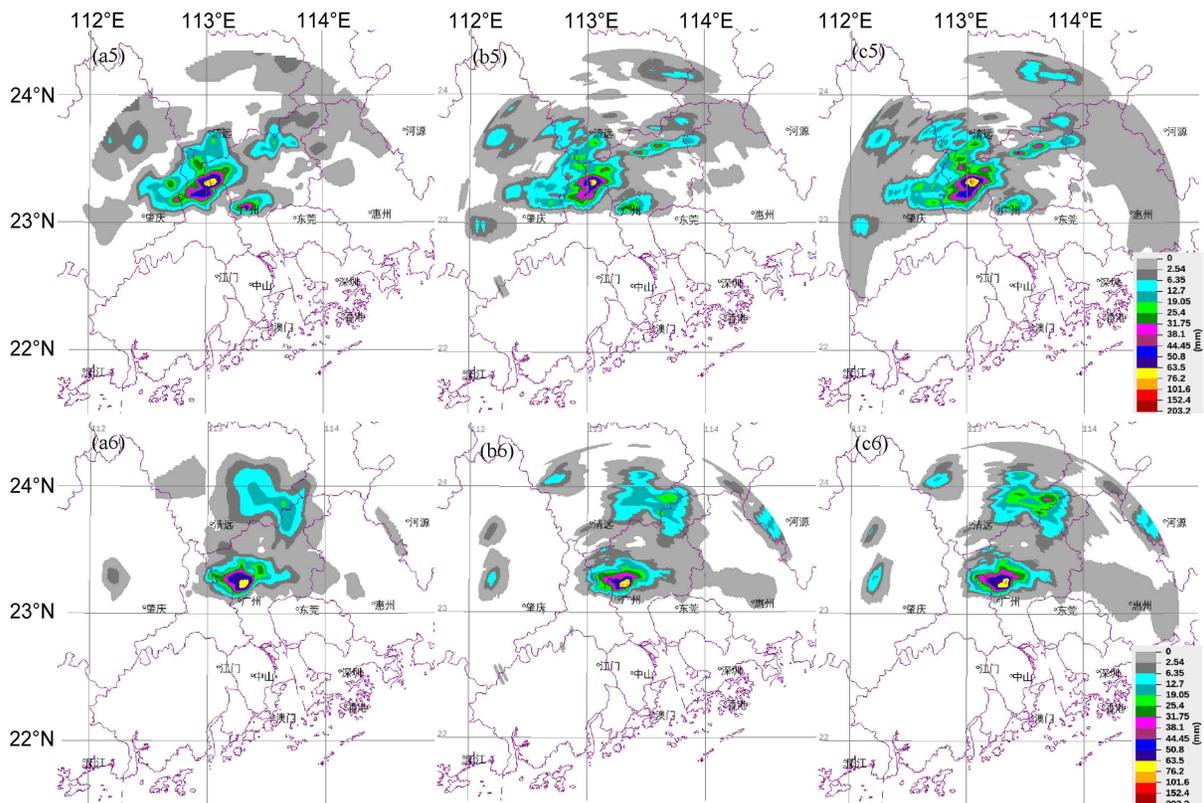


图 6 广州地区 2016~2017 年汛期 6 次强降水过程中的 6 个时次小时雨量实况 (第一列) 及使用 PPS 法 (第二列) 和 CSU-HIDRO_I 法 (第三列) 估算的小时累积雨量: (a1、b1、c1) 2016 年 5 月 6 日 18:00 至 19:00; (a2、b2、c2) 2016 年 5 月 10 日 08:00 至 09:00; (a3、b3、c3) 2016 年 6 月 8 日 06:00 至 07:00; (a4、b4、c4) 2017 年 5 月 7 日 07:00 至 08:00; (a5、b5、c5) 2017 年 6 月 2 日 20:00 至 21:00; (a6、b6、c6) 2017 年 6 月 3 日 20:00 至 21:00

Fig. 6 Observed hourly rainfall (the first column) and retrieved hourly rainfall using PPS method (the second column) and the CSU-HIDRO_I method (the third column) (a1, b1, c1) from 1800 UTC to 1900 UTC 6 May 2016, (a2, b2, c2) from 0800 UTC to 0900 UTC 10 May 2016, (a3, b3, c3) from 0600 UTC to 0700 UTC 8 June 2016, (a4, b4, c4) from 0700 UTC to 0800 UTC 7 May 2017, (a5, b5, c5) from 2000 UTC to 2100 UTC 2 June 2017, and (a6, b6, c6) from 2000 UTC to 2100 UTC 3 June 2017 in Guanzhou, respectively

达范围的增加其不同降水率的相对误差有明显减小的趋势, 说明距离变化对估测精度的影响较大, 对距离变化较为敏感; CSU-HIDRO_I 法随距离雷达范围的不同, 相同降水率下的相对误差变化较小, 距离变化对估测精度的影响较小, 对距离变化不敏感。

参考文献 (References)

曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 2005. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究 [J]. *大气科学*, 29(5): 827-836. Cao Junwu, Liu Liping, Ge Runsheng. 2005. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on Polarimetric radar measurement [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(5): 827-836. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.15
Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 41(6): 674-685. doi:10.1175/

1520-0450(2002)041<0674:EIREWA>2.0.CO;2
Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60: 354-365. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2
Chen G, Zhao K, Zhang G F, et al. 2017. Improving Polarimetric C-band radar rainfall estimation with two-dimensional video Disdrometer observations in eastern China [J]. *J. Hydrometeorol.*, 18(5): 1375-1391. doi:10.1175/JHM-D-16-0215.1
楚荣忠, 王致君, 刘黎平等. 1997. 双线偏振雷达降雨估测分析 [J]. *气象学报*, 55(1): 103-109. Chu Rongzhong, Wang Zhijun, Liu Liping, et al. 1997. Estimation and analysis of precipitation by dual linear polarization radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 55(1): 103-109.
Cifelli R, Coauthors. 2003. Evaluation of an operational polarimetric rainfall algorithm [C]/Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorolog. Seattle, WA: Amer. Meteor. Soc., P2B.14.
Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al. 2011. A new dual-polarization

- radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28(3): 352–364. doi:10.1175/2010JTECHA1488.1
- Daniel S B, Schultz J A, Vasiloff S, et al. 2013. Status of dual pol QPE in the WSR-88D network [C]//Proceedings of the 93th AMS, 27th Conference on Hydrology. Austin, TX: AMS.
- 冯亮, 肖辉, 孙跃. 2018. X波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究 [J]. *气候与环境研究*, 23(3): 366–386. Feng Liang, Xiao Hui, Sun Yue. 2018. A study on hydrometeor classification and application based on X-band dual-polarization radar measurements [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 23(3): 366–386.
- 高晓荣, 梁建茵, 李春晖. 2012. 雷达定量降水估计技术及效果评估 [J]. *热带气象学报*, 28(1): 77–88. Gao Xiaorong, Liang Jianyin, Li Chunhui. 2012. Radar quantitative precipitation estimation techniques and effect evaluation [J]. *Journal of Tropical Meteorology(inChinese)*28(1):77–88doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.01.009
- Giangrande S E, Ryzhkov A V. 2008. Estimation of rainfall based on the results of Polarimetric echo classification [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47(9): 2445–2462. doi:10.1175/2008JAMC1753.1
- 勾亚彬, 刘黎平, 杨杰, 等. 2014. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估 [J]. *气象学报*, 72(4): 731–748. Gou Yabin, Liu Liping, Yang Jie, et al. 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(4): 731–748.
- Huang H, Zhao K, Zhang G et al. 2016. A hybrid method to estimate specific differential phase and rainfall with linear programming and physics constraints [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54: 1–16. doi:10.1109/TGRS.2015.2471975
- Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers [J]. *J. Hydrometeorol.*, 12(2): 352–370.
- 冀春晓, 陈联寿, 徐祥瑞, 等. 2008. 多普勒雷达资料动态定量估测台风小时降水量的研究 [J]. *热带气象学报*, 24(2): 147–155. Ji Chunxiao, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2008. A study on variable quantitative precipitation estimation using Doppler radar data [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24(2): 147–155. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.02.006
- Kruger A, Krajewski W F. 2002. Two-dimensional video disdrometer: A description [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19(5): 602–617. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0602:TDVDAD>2.0.CO;2
- Lim S, Chandrasekar V, Bringi V N. 2005. Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements and in situ verification [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43(4): 792–801. doi:10.1109/TGRS.2004.843077
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君, 等. 1996. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析 [J]. *大气科学*, 20(5): 615–619. Liu Liping, Qian Yongfu, Wang Zhijun, et al. 1996. Comparative study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 20(5): 615–619. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.13
- 刘强, 陈赛, 张垚. 2018. 激光雨滴谱仪尺度测量精度的设计与应用 [J]. *气象科技*, 46(6): 1087–1092. Liu Qiang, Chen Sai, Zhang Yao. 2018. Design and application of size measurement accuracy of laser-optical Disdrometer [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 46(6): 1087–1092.
- Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. 2005. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44(4): 502–515. doi:10.1175/JAM2213.1
- Tang Q, Xiao H, Guo C W, et al. 2014. Characteristics of the raindrop size distributions and their retrieved polarimetric radar parameters in northern and southern China [J]. *Atmos. Res.*, 135–136: 59–75.
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30(8): 1672–1690. doi:10.1175/JTECH-D-12-00163.1
- Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22(10): 1764–1775. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1764:NVITAF>2.0.CO;2
- 汪舵, 刘黎平, 吴翀. 2017. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优定量降水估测方法研究 [J]. *气象*, 43(9): 1041–1051. Wang Duo, Liu Liping, Wu Chong. 2017. An optimization rainfall algorithm of S band dual polarization radar based on hydrometeor identification [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 43(9): 1041–1051. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.002
- 王建林. 2007. 双线偏振多普勒雷达定量探测降水强度方法的研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Wang Jianlin. 2007. Study on quantitative detection of precipitation intensity by dual polarization Doppler radar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 伍静, 刘黎平, 尤卫红, 等. 2010. 应用雷达拼图数据估测降水试验 [J]. *气象科技*, 38(2): 175–181. Wu Jing, Liu Liping, You Weihong, et al. 2010. Application experiment on quantitative rainfall estimation with radar mosaic data [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 38(2): 175–181. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.02.006
- 尹忠海, 胡绍萍, 张沛源. 2002. 双线偏振多普勒雷达测量降水 [J]. *气象科技*, 30(4): 204–213. Yin Zhonghai, Hu Shaoping, Zhang Peiyuan. 2002. Precipitation measurement by dual linear polarization Doppler radar [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 30(4): 204–213. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2002.04.002
- Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E. 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(4): 830–841. doi:10.1109/36.917906
- 张建云, 张垚. 2018. LPA10 激光雨滴谱仪的定标及观测对比 [J]. *气象科技进展*, 8(6): 62–70. Zhang Jianyun, Zhang Yao. 2018. Calibration and comparative observation of LPA10 laser-optical Disdrometer [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 8(6): 62–70.
- 张培昌, 戴铁丕, 伍志芳, 等. 1992a. 用变分方法校准数字化天气雷达

- 测定区域降水量基本原理和精度 [J]. 大气科学, 16(2): 248–256. Zhang Peichang, Dai Tiepi, Wu Zhifang, et al. 1992a. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through Variational method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 16(2): 248–256.
- 张培昌, 戴铁丕, 王登炎, 等. 1992b. 最优化法求 Z—I 关系及其在测定降水量中的精度 [J]. 气象科学, 12(3): 333–338. Zhang Peichang, Dai Tiepi, Wang Dengyan, et al. 1992b. Derivation of the Z-I relationship by optimization and the accuracy in the quantitative rainfall measurement [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 12(3): 333–338.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 499pp. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Teipi, 2001. Radar Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 499pp.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 190pp. China Meteorological Administration. 2003. Rules for Ground Meteorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 190pp.
- 庄薇, 刘黎平, 胡志群. 2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用 [J]. 气象, 39(8): 1004–1013. ZHUANG Wei, LIU Liping, HU Zhiqun. 2013. Application of Bright Band Identification and Correction in Radar Based QPE over Tibetan Plateau [J]. Meteor Mon, 39(8): 1004–1013. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.007