

曾广宇,郭泽勇,周钦强,等. 基于激光雨滴谱的双偏振雷达定量降水估测算法应用评估[J]. 气象研究与应用,2021,42(4):95-100.
Zeng Guangyu,Guo Zeyong,Zhou Qinjiang,et al. Application evaluation of dual polarization radar quantitative precipitation estimation algorithm based on laser raindrop spectrum[J].Journal of Meteorological Research and Application,2021,42(4):95-100.

基于激光雨滴谱的双偏振雷达定量降水估测算法应用评估

曾广宇¹, 郭泽勇¹, 周钦强^{2*}, 张弘豪¹, 陈星登¹, 郭佳³

(1.广东省阳江市气象局, 广东 阳江 529500; 2.广东省气象探测数据中心, 广州 510080;

3. 北京敏视达雷达有限公司, 北京 100085)

摘要: 基于 S 波段双线偏振雷达资料、雨量计资料及激光雨滴谱数据,在 CSU-ICE 算法的基础上建立了 CSU-LPA 算法。以华南地区一次季风暴雨过程为评估对象,对 CSU-LPA 算法与传统 PPS(Precipitation Processing System)算法进行了效果对比,评估该算法在业务中的应用效果。结果表明,在绝对值相对误差指标上,CSU-LPA 算法相对于 PPS 算法其估测误差减小了约 16%;PPS 算法在过程累计估测降水分布中存在几个区域的显著高估,且估测散点值分布离散,而 CSU-LPA 算法的估测结果与实况吻合度较高,估测散点值分布集中,说明新算法稳定性良好;单站小时累计估测降水中,CSU-LPA 算法能有效抑制 PPS 算法的高估效应,尤其在累计雨量较大的时候体现得更为明显。

关键词: 雨滴谱;双偏振雷达;CSU-LPA 算法;季风暴雨;定量降水估测

中图分类号: P412

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.17

OSID:

引言

多普勒天气雷达通过获得降水目标的反射率、速度、谱宽等基数据来观测天气^[1],但降雨类型的区分存在明显的不足^[2]。双线偏振雷达能够同时或交替发射水平和垂直两种线偏振波,从而识别降水粒子形态,提高定量降水估测精度^[3]。在单偏振雷达定量降水估测(QPE)的基础上,如何不断提高双偏振天气雷达的定量降水估测精度,并对偏振雷达降水估测算法的稳定性及精度进行效果评估^[4],是当前偏振雷达应用研究中需重点突破的课题。

国内外研究机构及学者对天气雷达定量估测降水算法做了很多研究。对单偏振雷达而言,其定量降水估测方法主要有传统的 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^[5]。美国 WSR-88D PPS (Precipitation Processing System) 的 MPE (Multisensor Precipitation Estimation) 系统将传统的

Z-R 关系法应用于业务,因此 Z-R 关系法又简称为 PPS。与单偏振雷达相比,双偏振雷达特有的偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 Φ_{DP} 、 L_{DR})可以更加微观地监测粒子的微物理特征^[6-8]。利用 K_{DP} 对强降水敏感且不受信号衰减、波束阻挡及雷达标定影响的独特优势^[9],可以更好地建立强降水的估测模型,从而提高强降水的估测精度^[10]。与单偏振雷达相比,双偏振雷达在估测方面的优势不仅仅局限于这些有着独特优势的偏振参量,并且根据这些偏振参量的特征值得到不同的组合算法,进一步体现出双偏振雷达在定量降水估测方面的优势。因此业界提出了许多不同偏振量与降水率关系的降水估测算法,王建林等^[11]指出,在小雨阶段信噪比较低,偏振参量存在比较大的系统误差,因此建议在反射率因子小于 20dBZ 时采用 R (Z_H) 进行估测降水,但没有考虑雨滴谱的变化对降水估测的影响。胡志群等^[12]分析了 X 波段双偏振雷达不同衰减的订正方法的特点,认为 Z_H - K_{DP} 相结

收稿日期: 2021-06-30

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B0101130021)、灾害天气国家重点实验室开放基金(2020LASW-B04)、广东省气象局重点项目(GRMC2018Z04)、海南省南海气象防灾减灾重点实验室重点项目(SCSF201904)

作者简介: 曾广宇(1983—),男,学士,工程师,主要从事天气雷达观测及应用。E-mail: zengguangyu@139.com

通讯作者: 周钦强(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事综合气象观测与气象信息处理。E-mail: 41409858@qq.com

合的方法能够提高降水估测的精度;刘黎平、楚荣忠及尹忠海等^[13-15]学者的研究结果都指出,定量降水估测算法不是一成不变的,并且定量降水估测算法受到降水类型和地域影响较大,因此提出了不同偏振量与降水率关系的降水估测算法。Ryzhkov 等^[16]根据 $R(Z_H)$ 计算出的雨强来选择不同的降水估测关系,具体提出 JPOLE 算法。Cifelli 等^[17]通过 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的阈值来选择不同的定量降水估测算法,提出 CSU-ICE 算法;相比较而言,国内也有学者利用 CSU-ICE 算法与传统 PPS 方法的估测误差效果进行了对比和效果检验^[18-19],但在不同雨滴谱基础上拟合的降水估测算法相对较少。

利用珠江三角洲地区的 3 部激光雨滴谱仪 (LPA) 数据对经典 CSU-ICE 算法进行本地化改进,选取 2019 年汛期的 1 次华南季风降水过程,将

CSU-LPA 算法的估测数据与地面雨量计实况数据进行了误差对比,为将来偏振雷达定量估测降水算法的业务化应用提供技术参考。

1 资料来源

1.1 降水过程概况

选取华南地区 2019 年 1 次大范围强降水过程。受季风环流影响,2019 年 5 月 24 日—27 日广东出现大范围暴雨过程,其中粤西地区更是连续 4 日发布红色暴雨预警信号,创造历史之最,是自 1953 年有气象观测记录以来的第一次,多个雨量计站点的小时降水量超过 40mm,最大日雨量超过 350mm(降雨概况如表 1 所示),造成粤西地区出现较大面积内涝灾害。

表 1 季风降水过程信息统计

降水过程日期	降水时间段 (CST 时间)	最大过程雨量 (mm)	最大小时雨量 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
2019 年 5 月 24 日	00:00—15:00	165.4	63.1
2019 年 5 月 25 日	03:00—23:00	196.3	55.3
2019 年 5 月 26 日	09:00—20:00	259.9	60.9
2019 年 5 月 27 日	00:00—16:00	365.4	66.4

1.2 数据选取

针对此次华南季风降水过程,主要选取以下数据作为研究对象:第一部分是广州 S 波段双线偏振雷达基数据与北京敏视达雷达有限公司安装在珠三角地区的激光雨滴谱仪数据,用于降水估测算法的建立;第二部分是广东阳江 S 波段双线偏振雷达基数据与其 100km 范围内的地面雨量计小时数据,用于估测算法的对比评估。

2 数据处理与评估方法

2.1 数据质量控制

(1) 自动站数据质量控制

为避免波束尚未完整形成区域的因素,剔除距离雷达 5km 内的雨量计站点,QPE 采用 9 点平均进行计算^[20]。剔除雷达探测有值-雨量计空值、雨量计有值-雷达探测空值、雨量计故障产生的奇异值及雷达径向上有明显遮挡的数据。

(2) 雨滴谱数据质量控制

对原始分钟数据中降水率小于 $0.1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或者降水粒子数小于 50 的进行剔除^[21]。为减少雨滴谱仪

受附近湍流影响以及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^[22],采用基于粒子下落末速度的过滤方法以消除过度采样误差^[23]。

(3) 雷达数据质量控制

使用距离雷达 100km 内的样本以降低波束展宽和融化层的影响^[24],利用 Φ_{DP} 滑动标准差剔除非气象回波干扰^[25],采用微雨滴法自动标定双偏振雷达双通道幅度一致性系统误差^[26-27],并使用中值滤波和滑动平均减少随机波动,使用信噪比门限以消除 ZDR 在低信噪比情况下的不稳定。通过对 Φ_{DP} 进行线性规划的方法抑制无规律抖动,将 Φ_{DP} 变为平滑的单调递增曲线,满足 Φ_{DP} 通过降水区域单调增加的物理属性,确保 K_{DP} 的非负性^[28-29]。

2.2 定量降水估测算法

本文采用的双偏振雷达定量降水估测 CSU-LPA 算法是在 CSU-ICE 最优化算法基础上进行改进^[30],其算法流程如图 1 所示。使用非球形粒子的散射模型(T-Matrix)和观测的雨滴谱数据(DSD)对 S 波段雷达的偏振量进行模拟^[31],结合广州萝岗站、广州白云站及广东省佛山站三台激光雨滴谱仪滴谱数

据(DSD)计算降水率,与偏振量进行拟合得到降水率参数关系公式(1)—(4)。

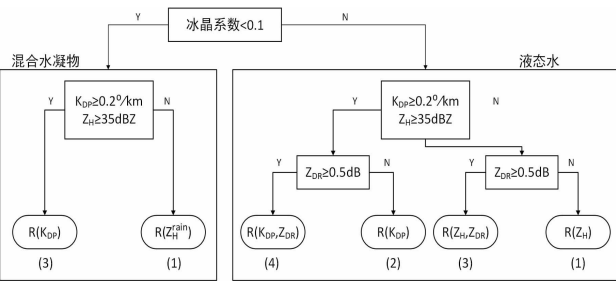


图 1 CSU-LPA 降水估测算法流程

$$R(Z_H)=0.019Z_H^{0.761} \tag{1}$$
$$R(K_{DP})=44.84K_{DP}^{0.763} \tag{2}$$
$$R(Z_H,Z_{DR})=0.0057Z_H^{0.9698}10^{-0.4762Z_{DR}} \tag{3}$$
$$R(K_{DP},Z_{DR})=80.9645K_{DP}^{0.9466}10^{-0.129Z_{DR}} \tag{4}$$

其中 R 为降水率,单位 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, Z_H 为反射率因子,单位 $\text{mm}^6\cdot\text{m}^{-3}$, 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 $^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

2.3 评估方法

为了评估传统 PPS 和基于双偏振雷达的 CSU-LPA 两种降水估测算法的效果,将其降水量反演结果与地面雨量计小时降雨量进行对比分析。分别计算雷达估测值与实测值之间的相对误差 E_1 、绝对值相对误差 E_2 、平均误差 M 、标准差 σ 和皮尔逊相关系数 CORR 对传统 PPS、CSU-LPA 两种算法进行评估^[32]。

3 降水估测误差分析及效果评估

3.1 整体误差评估检验

表 2 以地面雨量计为标准,给出了两种降水估测算法在此次华南季风降水中的误差评估结果,将两种算法估测值与地面降水实况进行评估发现,基于雨滴谱和双偏振雷达的 CSU-LPA 算法可以较大

表 2 整体误差评估检验

估测方法	评估检验指标				
	$E_1(\%)$	$E_2(\%)$	M	σ	CORR
PPS	21.52	39.83	2.788	4.094	0.88652
CSU-LPA	7.61	33.39	2.394	4.057	0.90510

程度上提高双偏振雷达定量降水估测的精度,表现明显优于经典 PPS 算法。具体表现为:从相对误差看,PPS 估测方法存在 21.52% 的高估现象。相比 PPS,CSU-LPA 算法的高估明显减少;从绝对值相对误差看,与 PPS 相比,CSU-LPA 算法减少了约 16% 的误差,说明 CSU-LPA 降水估测算法的准确性和可信度提高了不少;从平均误差 M 和均方差 σ 来看,CSU-LPA 算法得到的估测雨量与雨量计的整体差异更小,同时估测值分布比较集中,说明算法稳定性不错。从皮尔逊相关系数 CORR 看,CSU-LPA 将估测的小时降水与地面检验的雨量计观测相关系数提高到了 0.9 以上,与传统 PPS 算法相比,更能真实的反映降水实况。

3.2 过程累计降水对比检验

图 2 给出了此次华南季风降水过程的实况降雨量分布和两种降水估测算法得到的估测降水分布,图 3 给出了对应两种降水估测方法和雨量计小时降水量的散点分布。与雨量计观测到的降水实况(图 2a)相比,PPS 方法得到的估测降水分布(图 2b)存在几个区域的显著高估,同时从 PPS 方法和雨量计小时降水量散点分布(图 3a)可以看出,处于对角线上方的数据点离散程度较大,与表 2 的数据互为印证;CSU-LPA 方法(图 2c)与降水实况更为接近,高估情况得到明显改善,从 CSU-LPA 降水估测方法和雨量计小时降水量的散点分布(图 3b)来看,其散点分布明显要比 PPS 方法更为集中,也与表 2 反映的均方差 σ 和皮尔逊 CORR 相关系数吻合。

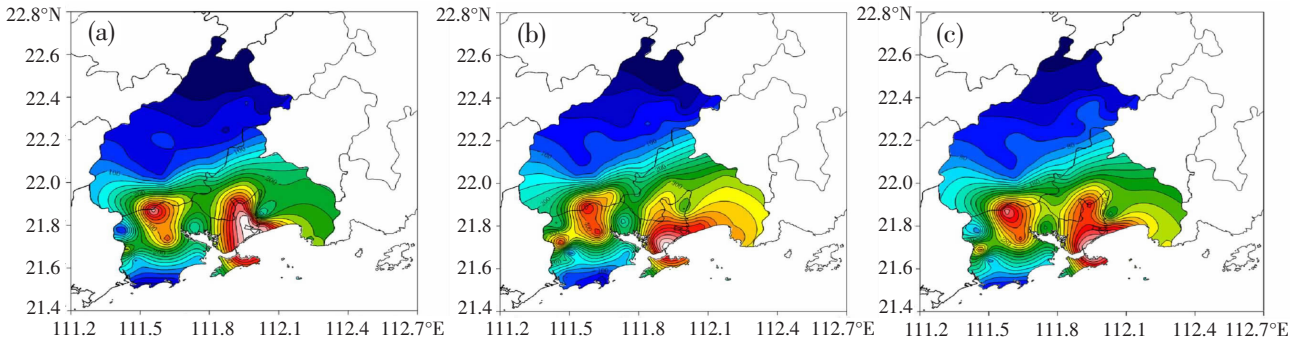


图 2 过程累计雨量实况图(a)及两种 QPE 方法雨量累积图(b:PPS,c:CSU-LPA)

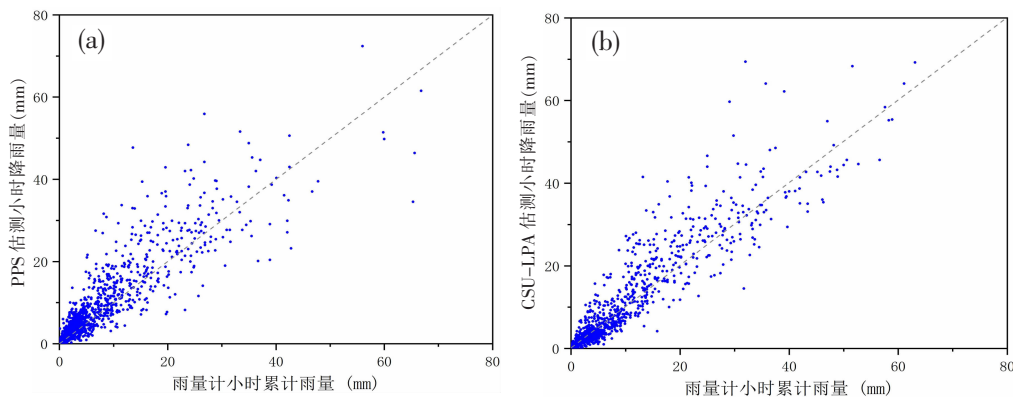


图3 两种 QPE 方法和雨量计小时降水量散点分布

(a)PPS; (b)CSU-LPA

3.3 单站小时累计降水对比检验

对 PPS 和 CSU-LPA 两种定量降水估测算法得到的降水量与雨量计的累计雨量进行了比较,反映了在 96h 内的 6 个雨量计站点实况累积降水、估测累计降水与时间的对应关系。6 个站点 PPS 算法估测值始终位于地面雨量计实测值上方,随着累计雨量的增大,PPS 算法的高估愈发明显。从降水的不同阶段来看,降水开始的初期(0~25h),两种算法的估测雨量较为接近,可能与降水初期的偏稳定性降水形态有关;降水发展阶段(25~96h),整体上 CSU-LPA 双偏振雷达的估测算法与实况雨量的吻合程度远高于基于单偏振雷达的 PPS 算法,可见 CSU-LPA 算法能有效抑制 PPS 算法的高估效应,尤其在累计雨量较大的时候体现得更为明显。

4 结论

本文利用 S 波段双线偏振雷达资料、雨量计资料及激光雨滴谱数据,建立 CSU-LPA 算法并进行应用评估。小时累计降水评估结果表明,PPS 算法估测值几乎始终位于地面雨量计实测值上方,普遍存在高估,并且随着累计雨量的增大,PPS 算法的高估愈发明显,且估测散点值分布比较离散,相关性表现一般;CSU-LPA 算法相关系数达到 0.9 以上,降水估测误差相对于 PPS 减少约 16%,并能有效抑制 PPS 方法的高估效应,尤其在累计雨量较大的时候优势体现得更为明显。总体而言,整体误差、过程累计降水及单站小时累计降水三方面的评估数据互为印证,数据可信度高。

参考文献:

[1] Seliga T A, Bring V N. Potential Use of Radar Differential

Reflectivity Measurements Atorthogonal Polarizations for Measuring Precipitation [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 15(15):69-76.

[2] Ryzhkov A V, Zrnice D S. Assessment of Rainfall Measurement that Use Specific Differential Phase [J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(35):2080-2090.

[3] Ulbrich C W. Natural Variations in the Analytical form of the Raindrop Size Distribution [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983(22):1764-1775.

[4] 梁维亮,屈梅芳,何珊珊.两种雷达定量降水估测产品在广西区域的误差对比分析[J].气象研究与应用,2020,41(3):1-7.

[5] 邵月红,张万昌,刘永和,等.沂沭河流域不同多普勒雷达降水量估算方法的效果评估[J].大气科学,2009,33(5):971-980.

[6] Ryzhkov A, Zrnice D, Brandes E, et al. Characteristics of Hydrometeor Orientation Obtained from Radar Polarimetric Measurements in a Linear Polarization Basis [C] //IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 1999.

[7] Liu H, Chandrasekar V. Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(2):140-164.

[8] Straka J M, Zrnice D S, Ryzhkov A V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(8):1341-1372.

[9] 吕博,杨士恩,王俊,等.X波段双线偏振多普勒雷达资料质量评估[J].干旱气象,2016,34(6):10.

[10] 王建林.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.

[11] 王建林,刘黎平,曹俊武.双线偏振多普勒雷达估算降

- 水方法的比较研究[J]. 气象, 2005, 31(8):25-30.
- [12] 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J]. 气象学报, 2008, 66(2):251-261.
- [13] 刘黎平,钱永甫,王致君,等. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J]. 大气科学, 1996, 20(5):615-619.
- [14] 楚荣忠,王致君,刘黎平,等. 双线偏振雷达降水估测分析[J]. 气象学报, 1997, 55(1):103-109.
- [15] 尹忠海,胡绍萍,张沛源. 双线偏振多普勒雷达测量降水[J]. 气象科技, 2002, 30(4):204-213.
- [16] Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of wsr-88d [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(4): 502-515.
- [17] Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2011, 28(3):352-364.
- [18] 董振贤,李妙英. 双偏振多普勒天气雷达的偏振参量及其应用[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2004, (3):100-104.
- [19] 张羽,田聪聪,罗聪. 广州双偏振天气雷达在定量降水估测中的初步分析[J]. 广东气象, 2017, 39(3):73-76.
- [20] 高晓荣,梁建茵,李春晖. 雷达定量降水估计技术及效果评估[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1):77-88.
- [21] Tang Q, Xiao H, Guo C, et al. Characteristics of the Rain-drop Size Distributions and Their Retrieved Polarimetric radar Parameters in Northern and Southern China[J]. Atmospheric Research, 2014, 135-136(Jan.): 59-75.
- [22] Jaffrain J, Berne A. Experimental Quantification of the Sampling Uncertainty Associated with Measurements from PARSIVEL Disdrometers [J]. Journal of Hydrometeorology, 2011(12):352-370.
- [23] Kruger A, and Krajewski W F. Two-dimensional Video Disdrometer: A description [J]. Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5):602-617.
- [24] 庄薇,刘黎平,胡志群,等. 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, 2013, 39(8):1004-1013.
- [25] 黄浩. 基于最优化理论的双偏振雷达降雨参数反演研究[D]. 南京大学, 2018.
- [26] Liu X T, Wan Q L, Wang H, et al. Raindrop Size Distribution Parameters Retrieved from Guang-zhou S-band Polarimetric Radar Observations[J]. Meteor. Res., 2018, 32(4), 571-583.
- [27] Guo Z, Sun Z, Guo J, et al. A Method for Calibrating Zdr by Using Light Rain Echo in Volume Scan Data[C]//2019 International Conference on Meteorology Observations (IC-MO). IEEE, 2020.
- [28] 马建立,陈明轩,李思腾,等. 线性规划在 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分传播相移质量控制中的应用[J]. 气象学报, 2019(3):516-528.
- [29] 周聪,闵锦忠,戚友存,等. 基于线性规划方法处理 C 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位 ϕ_C 数据[J]. 气象科学, 2019, 39(5):9.
- [30] 王洪,万齐林,尹金方,等. 双线偏振雷达资料在数值模式中的应用:模拟器的构建[J]. 气象学报, 2016, 74(2): 15.
- [31] Zhang, G., Vivekanandan, J., Brandes, E. A Method for Estimating Rain Rate and Drop Size Distribution from Polarimetric Radar Measurements[J]. Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions on, 2001, 39(4): 830-841.
- [32] 汪舵,刘黎平,吴翀. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J]. 气象, 2017, 43(9):1041-1051.

Application evaluation of dual polarization radar quantitative precipitation estimation algorithm based on laser raindrop spectrum

Zeng Guangyu¹, Guo Zeyong¹, Zhou Qinjiang^{2*}, Zhang Honghao¹, Chen Xingdeng¹, Guo Jia³

(1. Yangjiang Meteorological Bureau, Yangjiang Guangdong 529500, China;

2. Guangdong Meteorological Observation Data Center, Guangzhou 510080, China;

3. Beijing Minshida Radar Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Based on S-band dual polarization radar data, rain gauge data, and laser raindrop spectrum data, this paper established CSU-LPA algorithm based on CSU-ICE algorithm. Taking a monsoon rainstorm process in South China as the evaluation object, the effects of CSU-LPA algorithm and traditional PPS (precision processing system) algorithm were compared to evaluate the application effect of the algorithm in business. The results show that CSU-LPA algorithm reduces the estimation error by about 16% compared with PPS algorithm. PPS algorithm has significant overestimation in several areas in the process cumulative estimation of precipitation distribution, and the estimated scatter value distribution is discrete. However, the estimation results of CSU-LPA algorithm are in good agreement with the actual situation, and the estimated scatter value distribution is concentrated, indicating that the new algorithm has good stability. The results of hourly cumulative precipitation estimation at a single station show that CSU-LPA algorithm can effectively suppress the overestimation effect of PPS algorithm, especially when the cumulative rainfall is large.

Key words: raindrop spectrum; dual polarization radar; CSU-LPA algorithm; monsoon rainstorm; quantitative precipitation estimation