

深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用*

张 哲¹ 戚友存^{1,2} 朱自伟^{1,2} 李东欢^{1,2} 曾庆锋³ 兰红平³
ZHANG Zhe¹ QI Youcun^{1,2} ZHU Ziwei^{1,2} LI Donghuan^{1,2} ZENG Qingfeng³ LAN Hongping³

1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京, 100101

2. 中国科学院大学, 北京, 100864

3. 深圳市气象局, 深圳, 518040

1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China*

3. *Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China*

2021-02-24 收稿, 2021-04-30 改回。

张哲, 戚友存, 朱自伟, 李东欢, 曾庆锋, 兰红平. 2021. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用. 气象学报, 79(5): 786-803

Zhang Zhe, Qi Youcun, Zhu Ziwei, Li Donghuan, Zeng Qingfeng, Lan Hongping, 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(5):786-803

Abstract One of the important application of polarimetric Doppler weather radar is quantitative precipitation estimation (QPE). Polarimetric radar detects reflectivity (Z_H), differential reflectivity (Z_{DR}) and specific differential phase (K_{dp}), all of which are closely related to precipitation particles. Four commonly used QPE methods include Z_H -based $R(Z_H)$, Z_H - Z_{DR} -based $R(Z_H, Z_{DR})$, K_{dp} -based $R(K_{dp})$ and K_{dp} - Z_{DR} -based $R(K_{dp}, Z_{DR})$ methods. Based on the observations of Shenzhen S-band and X-band polarimetric radars as well as the high-resolution elevation data and the disdrometer data, the QPE method based on polarimetric variables is presented. First, the blockage information of the two radars is analyzed, and the hybrid tilts of the two radars are generated based on the elevation data and locations of the radars. The parameters for the above 4 QPE methods suitable for Shenzhen are then calculated with disdrometer observations using the T-matrix method. Finally, the blend method of QPE is proposed to use different QPE methods based on the intensity of polarimetric signals (i.e. K_{dp} and Z_{DR}). The performance suggests the accuracy and stability of the blend method is better than any of the single QPE method. The QPE products of Shenzhen S-band and X-band radars are generated with the QPE method proposed in this paper, and their performances are evaluated against operational QPE products. Results suggest that the QPE products generated by the method proposed in this paper are better than operational products both in accuracy and stability. Besides, the performance of this method is slightly better for X-band radar than for S-band radar, suggesting that the utilization of high-resolution X-band radar can improve the accuracy of QPE. However, due to the uncertain relationship between polarimetric signals and rain rate in the melting layer and ice region in the radar scan domain, the QPE method proposed here can only be applied to liquid rainfall region of the radar scan domain.

Key words Polarimetric radar, Quantitative precipitation estimation (QPE), Raindrop size distribution

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507505)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA2006040101)和中国科学院百人计划项目。

作者简介: 张哲, 主要从事双偏振雷达定量降水估计研究。E-mail: Zhangzhe@igsnr.ac.cn

通信作者: 戚友存, 主要从事雷达气象、雷达水文和水文气象研究。E-mail: Youcun.Qi@igsnr.ac.cn

摘 要 双偏振多普勒天气雷达的一个重要应用是进行定量降水估计(QPE), 它可以获得反射率(Z_H)、差分反射率(Z_{DR})和差传播相移率(K_{dp})这些与降水粒子有关的信息, 常用的双偏振雷达降水估计方法有基于 Z_H 的 $R(Z_H)$ 、基于 Z_H 和 Z_{DR} 的 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、基于 K_{dp} 的 $R(K_{dp})$ 和基于 K_{dp} 与 Z_{DR} 的 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 这 4 种。文中利用深圳市 S 波段和 X 波段双偏振多普勒雷达探测资料, 结合高精度地形数据和雨滴谱仪观测数据, 设计了基于双偏振量的定量降水估计方法: 首先利用地形数据和雷达地理信息, 分析了雷达的遮挡状况, 形成了这两部雷达的复合平面扫描仰角信息; 随后利用雨滴谱仪观测资料, 使用 T 矩阵方法统计得到了深圳地区的上述 4 种降水反演方法的参数; 最后设计了混合降水反演方法, 基于双偏振信号(即 K_{dp} 和 Z_{DR})的强弱, 使用不同的降水反演方法进行定量降水估计。基于 12 个降水个例, 利用各反演方法产生的定量降水估计结果与雨量计观测资料比较。结果表明, 混合降水反演方法在降水反演的准确度和稳定性上均优于任何一种单一定量降水估计反演方法。基于文中介绍的定量降水估计方法, 使用深圳 S 波段和 X 波段雷达产生了定量降水估计产品, 并与深圳目前业务定量降水估计产品进行对比评估。结果表明, 使用本方法产生的定量降水估计产品在准确度和稳定性上要优于目前的业务产品。此外, X 波段雷达的定量降水估计产品性能要略高于 S 波段雷达的定量降水估计产品, 这说明高时、空分辨率的 X 波段雷达可以提高定量降水估计精度。但由于雷达扫描平面内双偏振雷达对融化层和冰区的偏振量观测与降水的关系尚未明确, 因此, 本方法仅适用于雷达扫描平面内液态降水区。

关键词 双偏振雷达, 定量降水估计, 雨滴谱

中图法分类号 P412.25

1 引 言

天气雷达的一个主要应用是定量降水估计, 与雨量计的单点观测不同, 天气雷达的降水估计可以产生高时、空分辨率的二维降水分布场。传统的单偏振天气雷达只能观测到一个与降水粒子有关的观测量——反射率(Z_H)。因此, 单偏振雷达的定量降水估计主要依赖于 Z_H - R 关系(以下简称 $R(Z_H)$ 关系)进行, 即利用反射率与降水强度的对应关系进行降水估计。 $R(Z_H)$ 关系高度依赖于降水系统的雨滴谱特征, 在不同气候区以及不同降水类型中, 雨滴谱差别较大(Bringi, et al, 2003; Rosenfeld, et al, 2003)。因此, $R(Z_H)$ 关系存在较大的不确定性, 尤其是对强降水的估计, 一致性较低。

而双偏振雷达除了能获得反射率之外, 还能获得差分反射率(Z_{DR}), 差传播相移率(K_{dp})和相关系数(CC)这些与降水粒子的类型、大小等密切相关的观测量, 可以更好地描述降水粒子的雨滴谱特征。自利用雷达双偏振观测量进行定量降水估计的理论被提出以来(Seliga, et al, 1976), 使用双偏振量进行定量降水估计的工作受到了高度重视(Sachidananda, et al, 1986; Ryzhkov, et al, 1995; Brandes, et al, 2002; Chen, et al, 2015; Wang, et al, 2019; 楚荣忠等, 1997; 胡胜等, 2006; 寇蕾蕾等, 2018), 取得了长足的进展, 发展了多种基于双偏振观测量的定量降水估计方法, 如基于 Z_H 和 Z_{DR} 的 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系, 基于 K_{dp} 的 $R(K_{dp})$ 关系, 基于 K_{dp} 和 Z_{DR} 的 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 关系等。双偏振观测量能

获得降水粒子更多的雨滴谱特征信息, 因此对降水估计的准确度比单偏振关系 $R(Z_H)$ 有所提升。如使用 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系可以减少 $R(Z_H)$ 关系由雨滴谱差异带来的不确定性, 提升降水估计性能, 但该关系受到 Z_H 和 Z_{DR} 定标以及衰减的影响。基于 K_{dp} 进行的降水估计, 则不受雷达定标误差和衰减的影响, 且对雨滴谱的变化相对不敏感, 因此对于中到大雨的降水估计准确度较高, 但 K_{dp} 和 Z_{DR} 在弱降水区中信号较弱, 降水估计误差较大。因此, 一些研究综合利用多种雷达降水反演关系进行降水定量估计(Ryzhkov, et al, 2005; Thompson, et al, 2018)。

中国和美国的业务天气雷达网主要以 S 波段和 C 波段的天气雷达为主, 其探测范围较大(单探测距离可超过 400 km)。美国天气业务雷达网已经全部升级为双偏振雷达, 中国的若干个省份如广东、江苏等也已经升级为双偏振雷达。中国基于双偏振雷达进行质量控制和对灾害天气的分析逐步展开, 取得了不少成果(肖艳姣等, 2012; 杜牧云等, 2013; 林文等, 2020; 杨吉等, 2020), 基于双偏振观测量进行的定量降水估计研究工作也取得了一些成果(魏庆等, 2016; 寇蕾蕾等, 2018; Chen, et al, 2017), 但这些研究大多是基于科研院所或高校自有的双偏振雷达探测资料, 且测试个例较少。对于业务使用的双偏振天气雷达, 使用双偏振探测资料进行定量降水估计的研究还相对较少。业务双偏振雷达进行定量降水估计该使用何种方法, 以及定量降水估计的性能如何, 认识有待深入。

随着城市化建设的进展, 大量人口和资源向城

市聚集,强降水及其引发的城市洪水、内涝等灾害对城市造成的损失日益严重。对城市强降水的监测与预警是气象部门和相关行政管理部门关注的一个焦点问题。目前的业务天气雷达网探测范围广,但探测较远距离时,受地球曲率影响,探测高度较高,无法获得低层的降水信息,且空间分辨率相对较低,不能很好地满足城市精细化降水观测的需要。对此,国际上有一些城市进行了一些有益的尝试,如通过在城市及其周边布设若干个探测范围较小、时空分辨率较高的雷达来补充业务雷达在城市精细化降水观测方面的不足(Chen, et al, 2015; Cifelli, et al, 2018)。中国的一些城市及其周边也布设了时、空分辨率较高的小雷达以满足实际业务需求,如深圳近年来布设了X波段双偏振相控阵雷达。与业务雷达相比,这类小雷达探测的时、空分辨率高,可以对城市的降水系统进行快速精细化的观测,为强对流等灾害天气的预警发挥了重要作用。但目前,由于布设时间较短,利用这类小雷达进行的定量降水估计研究工作还很少,这些布设在城市及其周边的小雷达用于定量降水估计应使用什么方法?其性能与业务雷达相比是否有提升?值得深入探究。

针对以上面临的实际问题,利用深圳市S波段业务双偏振雷达和X波段双偏振相控阵雷达,设计了双偏振雷达定量降水估计方法,并对其性能进行评估,为城市降水的精细化估计提供理论和方法支撑,也为未来如何使用这类用于城市降水观测的小雷达提供借鉴。

2 数据和方法

2.1 数据

文中使用到的数据包括广东省地理高程信息数据、深圳市S波段双偏振天气雷达(以下简称Z9755雷达)基数据、深圳市求雨坛X波段双偏振相控阵天气雷达(以下简称ZSE01雷达)基数据、布设于深圳市内的一台雨滴谱仪1 min观测数据和广东省雨量计降水量观测数据。此外,还使用了深圳目前业务使用的雷达定量降水估计产品数据用于比较评估。

广东省地理高程信息数据使用美国航空航天局和美国国防部国家测绘局联合测量的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数字高程模

型,分辨率为30 m,用于计算各雷达站不同仰角受地形遮挡的情况。

Z9755雷达和ZSE01雷达均位于深圳市求雨坛,相距约53 m,位置基本重合,适合进行S波段和X波段雷达降水反演性能的比较,两部雷达主要参数如表1。其中,X波段雷达观测信号在经过强降水区时,会产生衰减,因此需要对其进行衰减订正,即在对差分传播相位进行质量控制的基础上(Giangrande, et al, 2013),利用差分传播相位对反射率和差分反射率进行衰减订正(张培昌等, 2018),该衰减订正方法已在X波段雷达内置软件中进行,ZSE01雷达的基数据为经过衰减订正后的基数据。收集了2020年12个影响深圳的降水个例的Z9755雷达和ZSE01雷达基数据,用于雷达定量降水估计算法设计和性能评估,降水个例为2020年5月11日(个例1)、6月5日(个例2)、6月6日(个例3)、6月7日(个例4)、6月8日(个例5)、8月1日(个例6)、8月5日(个例7)、8月12日(个例8)、8月19日(个例9)、9月12日(个例10)、9月13日(个例11)、9月15日(个例12)。

表1 深圳S波段双偏振天气雷达(Z9755)和深圳市求雨坛X波段双偏振相控阵天气雷达(ZSE01)的主要参数

Table 1 Key Parameters of S-band polarimetric radar (Z9755) and X-band phase array polarimetric radar (ZSE01) in Shenzhen

雷达名称	Z9755	ZSE01
时间分辨率(min)	6	1.5
空间分辨率(m)	250	30
角度分辨率(°)	0.95	0.9
扫描仰角数	9	12
最低扫描仰角(°)	0.5	0.9
最大探测距离(km)	460	40

本研究使用到的深圳市雨滴谱仪位于ZSE01雷达正东方,距离雷达约5.38 km(图1中白色星星所示位置),型号为OTT Parsivel(Tokay, et al, 2014)。Parsivel是一维激光雨滴谱仪,可以观测降水粒子的尺寸和速度信息。对降水粒子的尺寸和速度的记录均分为32档,时间分辨率为1 min。使用的雨滴谱仪观测数据的时段为2020年5月1日—10月30日。

使用的广东省雨量计降水量观测资料为小时降水量观测数据,用于雷达定量降水估计算法性能

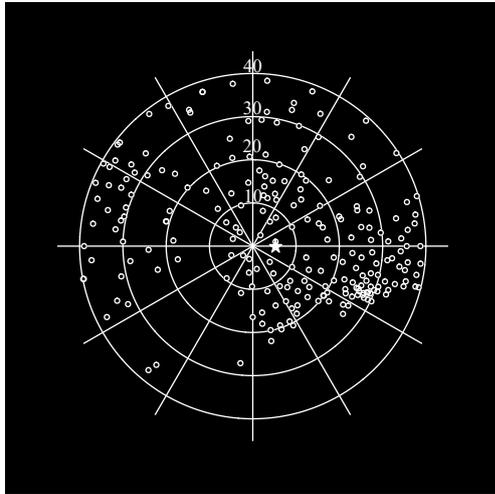


图 1 ZSE01 雷达估测降水区域中的雨量计(白色空心圆圈)与雨滴谱仪(白色星星)分布

Fig. 1 Locations of rain gauges (white hollow circle) and disdrometer (white star) in the ZSE01 radar scan domain

评估。由于 ZSE01 雷达、Z9755 雷达以及业务定量降水估计产品覆盖范围不一致,仅选取三者均覆盖的雨量计资料(即距离 ZSE01 雷达 0—40 km 的雨量计)用于评估,以保证样本的一致性,雨量计在 ZSE01 雷达扫描平面中的分布如图 1。

业务雷达降水数据是格点化的降水数据,其空间分辨率为 0.01° ,时间分辨率为 6 min。它是基于 2500 m 高度的反射率拼图数据,利用 $R(Z_H)$ 关系产生,即该数据为使用单偏振观测量产生的降水产品,并没有使用到双偏振观测量,也并没有使用离地面最近的观测资料。业务雷达降水数据(除个例 1 外)用于雷达定量降水估计算法性能的比较评估。

2.2 双偏振雷达定量降水反演方法

文中设计的双偏振雷达定量降水估计方法流程如图 2。在使用雷达进行定量降水估计之前,首先需要对雷达观测量进行前处理,包括非气象回波去除(马建立等, 2019)和对差分传播相位的质量控制(Giangrande, et al, 2013)。

2.2.1 复合平面扫描仰角

根据遥感探测的基本原理,探测信息离目标物越接近,探测准确度越高。雷达定量降水估计关注的是地面的降水,因此,雷达最低仰角获得的降水信息最为准确,利用雷达进行定量降水估计应尽量使用离地面低的仰角。但雷达观测会受地形、建筑物等阻挡而导致部分角度部分距离信号缺失,因此

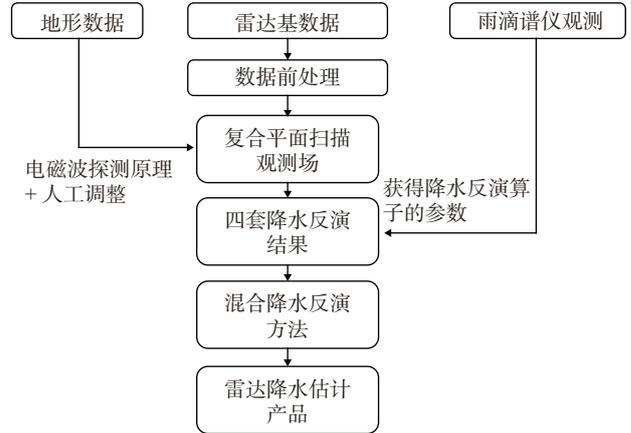


图 2 双偏振雷达定量降水估计流程

Fig. 2 Flow chart of polarimetric radar QPE

不能仅使用最低仰角进行定量降水估计,需要产生复合平面扫描仰角:该雷达观测信息不被遮挡的各个方位角上的最低仰角。

首先,对地形数据重采样至极坐标网格,使之与雷达的扫描方式匹配,对于不同方位角,计算雷达在不同探测距离上波束底部和顶部的高程,并与地面海拔高度比较。如果波束底部超过地面海拔高度,为完全无遮挡;如果波束顶部低于地面海拔高度,为完全遮挡;其他情况为部分遮挡。由于雷达波束在垂直方向上的能量满足一维高斯分布,因此可以由波束在垂直方向上受地物遮挡的高度以及波束的截面半径计算被地物遮挡的电磁波能量占总能量的百分比,即遮挡率。在每个探测距离上计算出的遮挡率与前一个探测距离上的遮挡率进行比较,取两者中的最大值作为该探测距离上的遮挡率。在每个仰角上进行同样的计算,得到不同方位角上雷达不同探测距离各仰角的遮挡率。随后,选择遮挡率 $< 50\%$ 的最低仰角作为复合平面扫描仰角。

由于在城市中,雷达还会受到建筑物等遮挡。建筑物在地形数据上无法体现,因此,还需要人为对雷达的复合平面扫描仰角进行调整。通过人为判定雷达观测信息被遮挡的方位角和仰角,对复合平面扫描仰角信息进行修正和调整。经过人工调整前、后的 Z9755 和 ZSE01 雷达的复合平面扫描仰角信息如图 3。可知, Z9755 雷达在西北方向受到部分遮挡,需要使用到第 3、4 仰角的观测信息,其他方位角受遮挡较少,主要使用第 1 和第 2 仰角

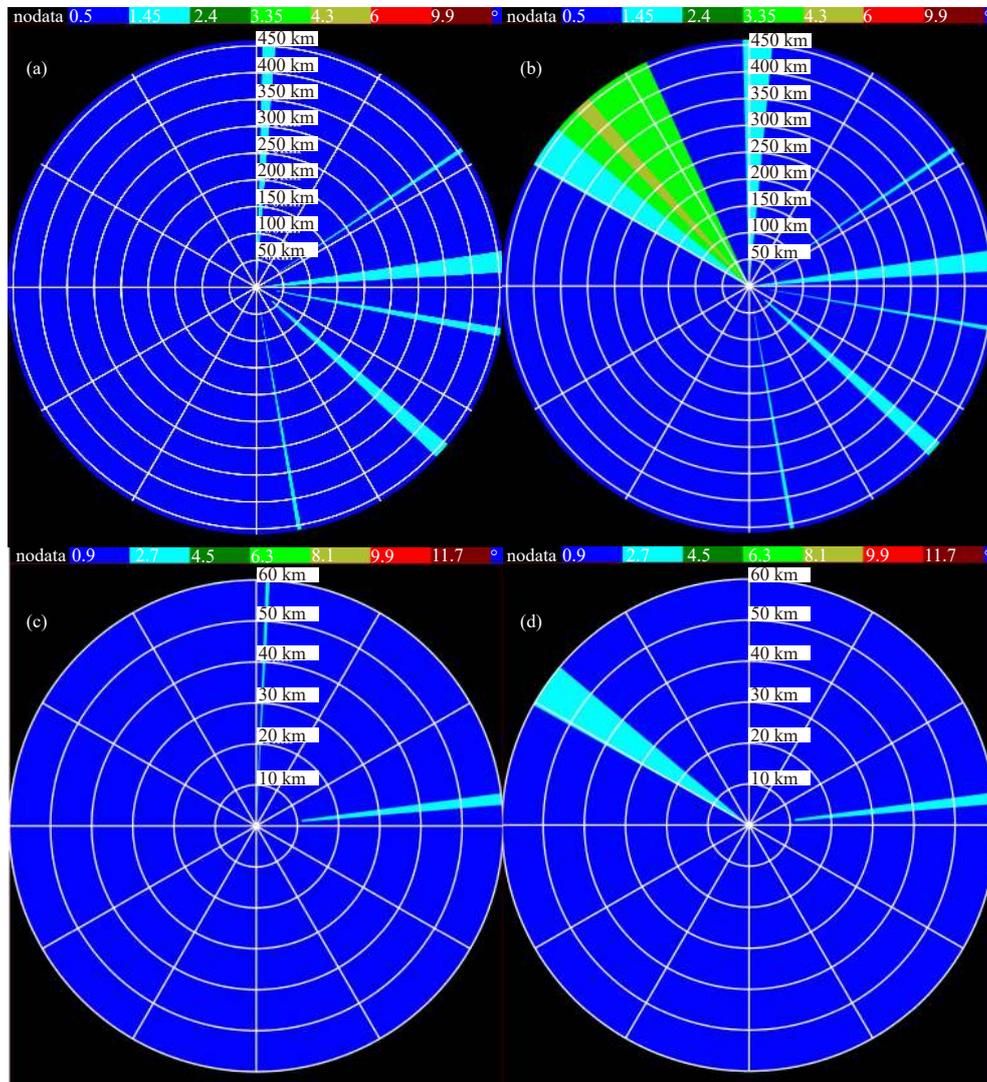


图3 雷达复合平面扫描仰角 (a. Z9755 雷达人工调整前, b. Z9755 雷达人工调整后, c. ZSE01 雷达人工调整前, d. ZSE01 雷达人工调整后)

Fig. 3 Hybrid tilts of radars (a. Z9755 radar, before manual adjustment, b. Z9755 radar, after manual adjustment, c. ZSE01 radar, before manual adjustment, d. ZSE01 radar, after manual adjustment)

的观测信息。ZSE01 雷达受遮挡也较少, 主要使用第 1 和第 2 仰角的观测信息。

根据复合平面扫描仰角信息, 在不同观测方位角使用不同的仰角数据, 即可获得复合平面扫描观测场, 如复合平面扫描反射率、复合平面扫描差分反射率等。这些复合平面扫描观测场是不被遮挡的离地面最近的雷达观测场, 定量降水估计基于复合平面扫描观测场进行。然而, 在仰角变化的方位角, 由于使用的是雷达的不同仰角的观测信息, 会产生观测信号的不连续。因此, 还需要对复合平面扫描观测场在仰角变化的方位角进行平滑, 以消除

这些不连续现象。平滑使用 Tang 等(2013)的方法, 即在仰角变化的角度及其左右相邻的数根仰角进行平滑。对于某一方位角 AZ , 其观测量 Z 的平滑方法如式(1)。

$$Z_{AZ} = \sum_{j=-N}^N (W_j \cdot Z_{AZ+j}) / \sum_{j=-N}^N W_j \quad (1)$$

本研究中, N 取 5, 即使用该方位角左右相邻的各 5 根径向信息进行平滑, W_j 为权重: $W_j = N + 1 - |j|$, 即离该方位角越近, 权重越大。图 4 是 ZSE01 一次观测平滑前、后的复合平面扫描反射率场。可以看到平滑之前, 由于 82° 左右 (正北为 0° , 顺时针旋转)

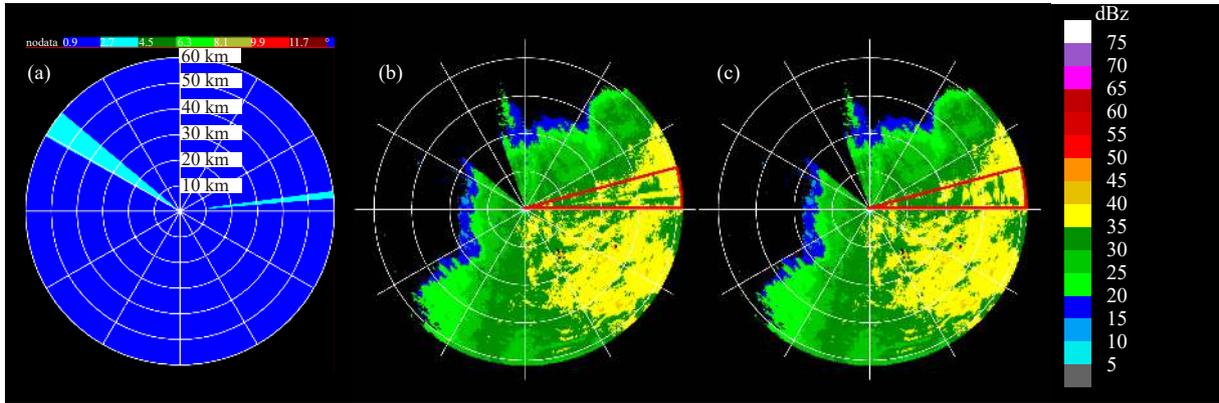


图 4 ZSE01 雷达复合平面扫描仰角 (a) 以及 2020 年 5 月 11 日 15 时 30 分平滑前 (b) 和平滑后 (c) 的复合平面扫描反射率

Fig. 4 Hybrid tilt (a) and hybrid tilt reflectivity (b) before smoothing and (c) after smoothing of ZSE01 radar at 15:30 BT 11 May 2020

使用到了第 2 仰角, 因此和周边方位角产生了不连续, 这种不连续在平滑之后得到了消除。

2.2.2 雷达定量降水估计关系参数的选定

常用的雷达定量降水估计关系有式(2)一(5)共 4 种, 其中式(2)为基于单偏振量的定量降水估计关系, 式(3)一(5)为基于双偏振量的定量降水估计关系。公式中的 a 、 b 和 c 为参数, 在不同地区、不同降水类型中, 由于降水粒子雨滴谱特征的差异, 这些参数的数值不同。

$$R(Z_H) = aZ_H^b \quad (2)$$

$$R(K_{dp}) = aK_{dp}^b \quad (3)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = aZ_H^b Z_{DR}^c \quad (4)$$

$$R(K_{dp}, Z_{DR}) = aK_{dp}^b Z_{DR}^c \quad (5)$$

式中, Z_H 和 Z_{DR} 分别为 Z_h 和 Z_{dr} 的指数形式, 即 $Z_H = 10^{0.1Z_h}$, $Z_{DR} = 10^{0.1Z_{dr}}$, 其中 Z_h 和 Z_{dr} 分别为雷达观测得到的反射率和差分反射率, 单位分别为 dBz 和 dB。

雷达可以进行定量降水估计是由于雷达可以观测到降水粒子的散射信息, 从而可以获得降水率。定量降水估计关系公式中 a 、 b 、 c 的差异, 本质上是由雷达波长和当地降水的雨滴谱特征决定的。因此, 利用深圳市雨滴谱观测数据确定适用于 Z9755 和 ZSE01 雷达的定量降水估计关系参数。

在对雨滴谱数据进行质量控制的基础上 (Tokay, et al, 2013), 利用 T 矩阵方法计算得到雨滴谱观测粒子的散射振幅 (Waterman, 1965), 并进

一步计算雨滴谱观测的 1 min 等效 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{dp} , 并根据雨滴谱仪观测的粒子直径和个数信息, 计算 1 min 降水率。随后, 利用非线性最小二乘法拟合得到适用于 Z9755(S 波段)和 ZSE01(X 波段)雷达的定量降水估计关系参数, 如表 2。

表 2 利用雨滴谱仪观测统计得到的 S 波段和 X 波段雷达的雷达定量降水估计关系参数值
Table 2 Parameters of QPE method for S-band and X-band radars obtained from disdrometer observations

雷达波段	反演关系	a	b	c
S 波段	$R(Z_H)$	0.0055	0.855	-
	$R(K_{dp})$	47.1	0.774	-
	$R(Z_H, Z_{DR})$	0.0085	0.92	-5.24
	$R(K_{dp}, Z_{DR})$	73.07	0.898	-1.366
X 波段	$R(Z_H)$	0.03468	0.5869	-
	$R(K_{dp})$	14.93	0.83	-
	$R(Z_H, Z_{DR})$	0.00614	0.959	-3.671
	$R(K_{dp}, Z_{DR})$	22.56	0.91	-0.859

把统计得到的定量降水估计关系参数代入式(2)一(5), 利用雨滴谱仪观测的 1 min 等效 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{dp} 计算其估计的降水率, 并与雨滴谱仪实际观测的 1 min 降水率进行比较。图 5 是使用 S 波段定量降水估计关系参数和模拟的 S 波段雷达等效 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{dp} 计算得到的各反演结果与雨滴谱仪观测的 1 min 降水率的频数散点。可以看到, 利用单偏振定量降水估计关系 $R(Z_H)$ 进行定量降水反演, 在降水率较大时, 会有较大的不确定性, 离散度

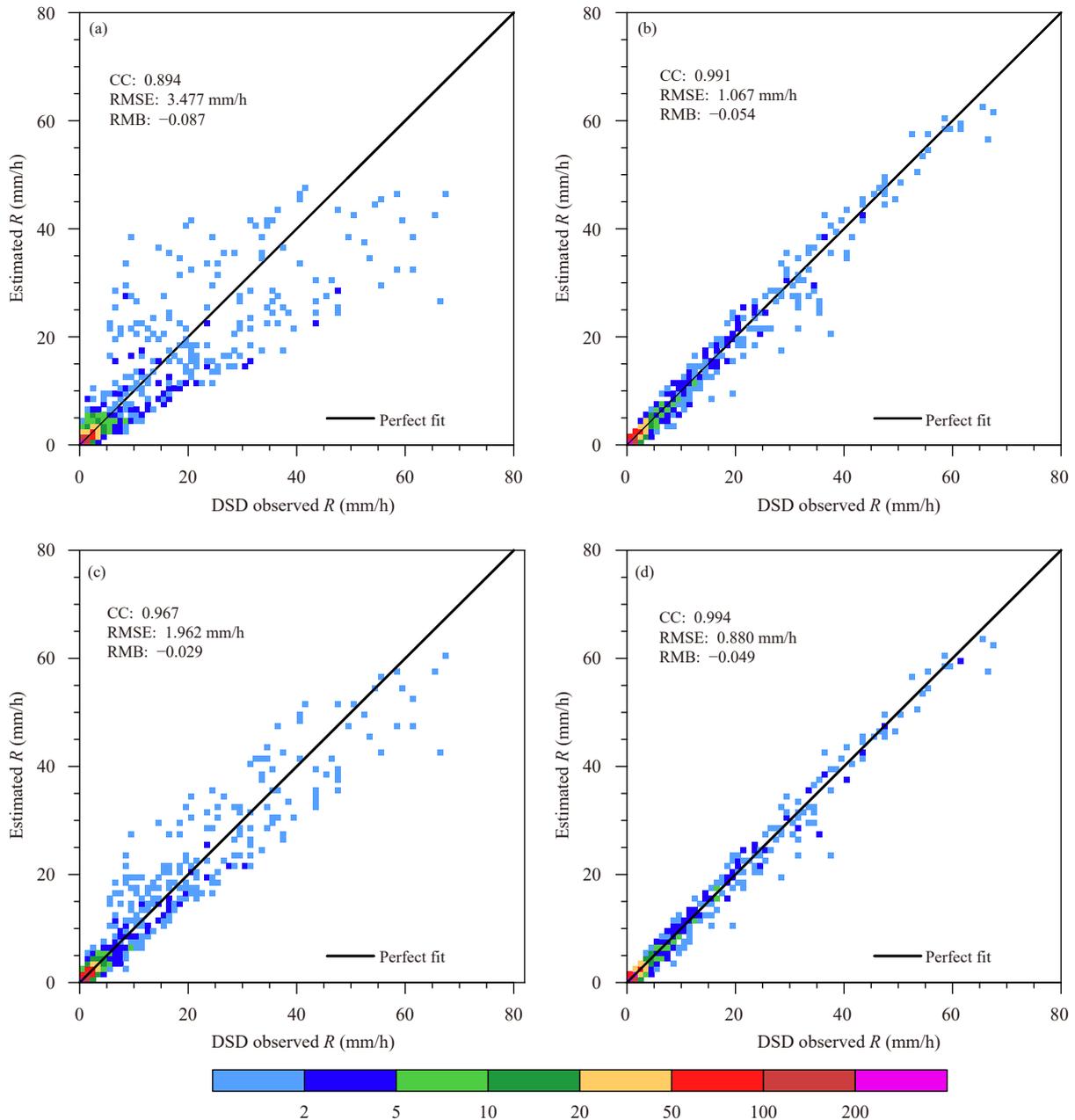


图5 雨滴谱仪使用表2中S波段雷达各套降水反演关系参数和模拟的S波段雷达观测量反演的1 min降水率与雨滴谱仪观测的1 min降水率频数散点 (a. $R(Z_H)$, b. $R(Z_H, Z_{DR})$, c. $R(K_{dp})$, d. $R(K_{dp}, Z_{DR})$)

Fig. 5 Scatter plots of frequencies of 1 min rain rate observed by disdrometer versus different QPE results using the S-band radar observations and parameters listed in Table 2 (a. $R(Z_H)$, b. $R(Z_H, Z_{DR})$, c. $R(K_{dp})$, d. $R(K_{dp}, Z_{DR})$)

较大(图5a),这种较为离散的观测主要出现在实际观测降水率大于5 mm/h时,最大的偏差达到高估约8倍或低估至1/3;而双偏振观测量如 K_{dp} 、 Z_{DR} 可以获得降水粒子的大小信息,因此在降水率较大时,定量降水估计效果相对较好,其离散度较小,线性关系较好。其中使用单一变量的 $R(K_{dp})$ 关系在双偏振量定量降水估计关系中表现最差,但其相关

系数也超过0.96,对大于50 mm/h的极端降水估计偏差不超过50%(图5c),而使用到了两个观测量的 $R(Z_H, Z_{DR})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 关系表现更好(图5b和d),两者的相关系数均超过0.99,对强降水的估计误差很小。这些关系的表现从理论上阐明了在深圳地区使用该种降水反演关系可以达到的理论最佳性能。X波段的结果(图6)与S波段有相似也

有差异,相同点在于使用单偏振定量降水估计关系 $R(Z_H)$ 其表现均最差,离散度最大,在降水增大时,其估计准确度迅速下降。而 3 套双偏振定量降水估计关系表现较好;不同点则在于,对于 X 波段雷达而言, $R(K_{dp})$ 关系表现优于 $R(Z_H, Z_{DR})$ 。

2.2.3 混合降水反演方法

图 5 和图 6 表示的是该雷达使用某套定量降水估计关系理论上可以得到的最优结果,是使用该定

量降水估计方法能得到的最优效果上限。从理论上而言,4 套关系中的双偏振关系表现均较好,尤其是 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系。但利用雷达进行定量降水估计时,由于受到雷达实际观测资料质量的影响,实际反演效果不一定与理论一致。因为在小雨中,降水粒子接近球形,导致 K_{dp} 和 Z_{DR} 信号较弱,接近于 0,噪声较大,在这种情况下使用双偏振降水反演关系就会产生较大误差。相反, $R(Z_H)$ 关

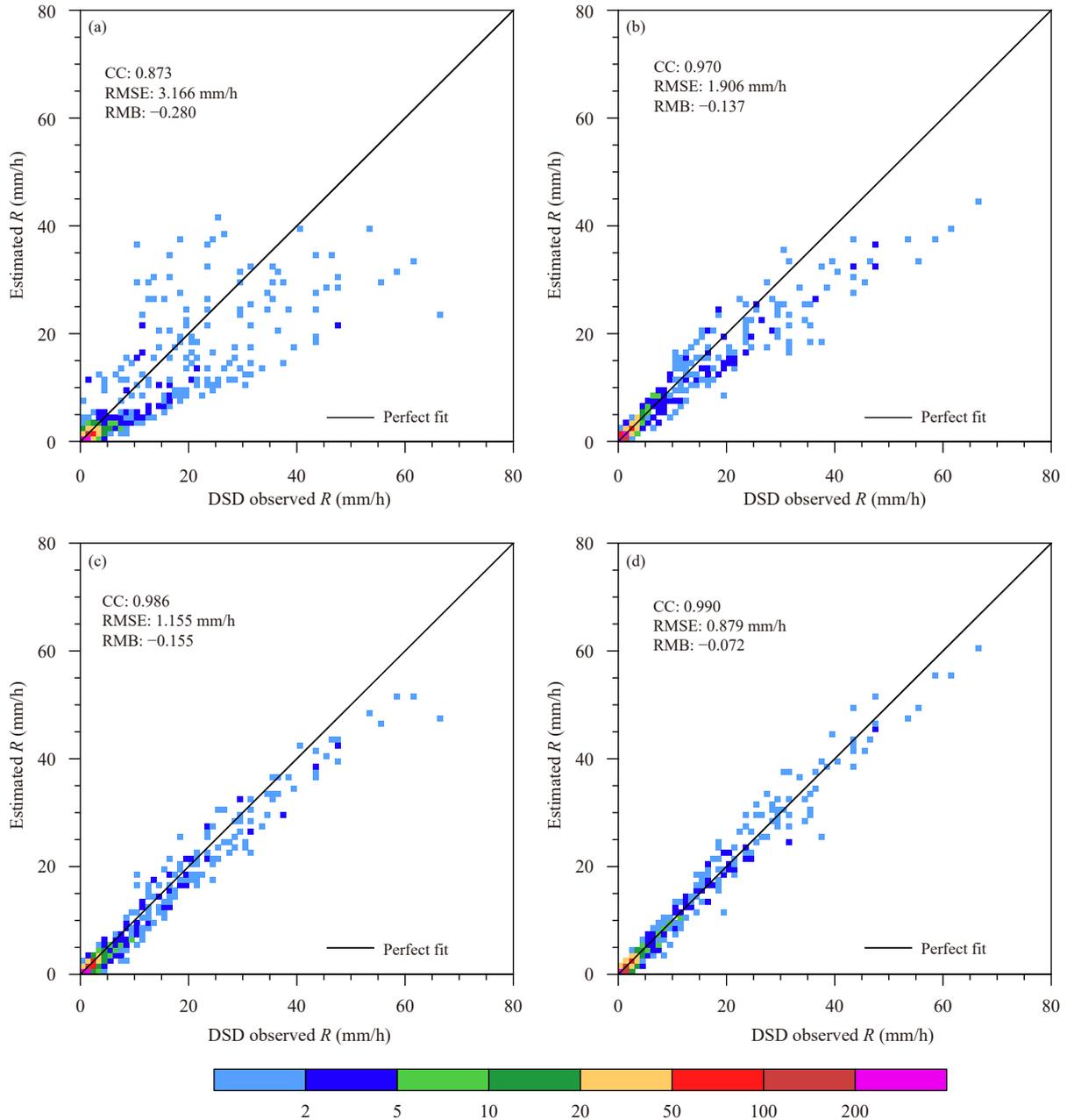


图 6 同图 5, 但为 X 波段雷达
Fig. 6 Same as Fig. 5 but for X-band radar

系由于 Z_h 变化范围大, 在小雨中也不接近 0, 且单偏振雷达技术发展得相对成熟, 对 Z_h 的观测较为准确, 因此 $R(Z_h)$ 关系表现较为稳定。如 Chandrasekar 等 (1988) 指出, 在小雨中, $R(Z_h, Z_{DR})$ 的表现并不比 $R(Z_h)$ 关系更好; $R(K_{dp})$ 关系在中雨和大雨中的表现优于 $R(Z_h)$ 关系, 但在小雨中, $R(K_{dp})$ 关系噪声较大 (Chandrasekar, et al, 1990; Matrosov, et al, 2006); Ryzhkov 等 (1995) 指出, $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 关系的优势主要表现在对中小到大雨的估计准确性高。

基于上述研究可知, 双偏振信号的强度是由降水强度决定的。在双偏振信号较强的情况下, 使用双偏振降水反演关系较好, 而在双偏振信号较弱的情况下, 双偏振降水反演关系会产生较多的噪声, 且观测量接近于 0, 从而产生较大误差; 相反, 单偏振关系表现则较为稳定。因此, 可以通过混合使用不同降水反演方法以结合各种反演关系的优点而避免其缺点, 提高定量降水估计准确性。

图 7 是文中使用的混合降水反演方法流程, 即在雷达观测的每一个库, 通过判断双偏振信号的强弱去确定使用何种关系进行定量降水估计 (Thompson, et al, 2018)。 K_{dp} 和 Z_{dr} 的判断门槛为其噪声的门槛, 超过该门槛则认为其信号较强。在 K_{dp} 较强(弱)时, 使用与 K_{dp} 有关(无关)的定量降水估计关系; 在 Z_{dr} 较强(弱)时, 使用与 Z_{dr} 有关(无关)的定量降水估计关系。这样可以在降水较强时, 使用双偏振关系进行降水反演以提高定量降水估计准确性; 而在降水较弱时, 又能减少双偏振量噪声的影响, 保持定量降水估计的稳定性和准确性。

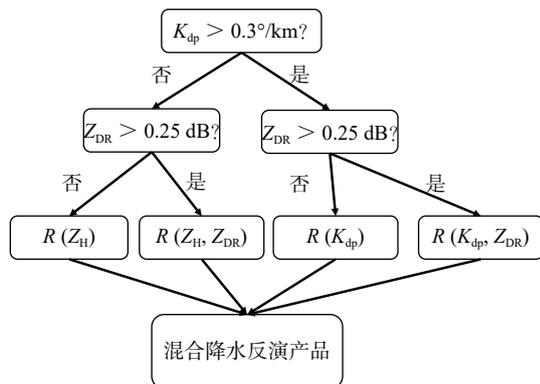


图 7 雷达混合定量降水估计方法流程

Fig. 7 Flow chart of radar blend QPE method

2.3 雷达定量降水估计性能评估方法

以广东省自动站雨量计 1 h 降水量观测为基准, 对雷达定量降水估计产品性能进行评估。首先把定量降水估计产品累计成 1 h 降水量; 随后, 根据雨量计的经纬度信息, 把定量降水估计产品估计的降水量与雨量计观测的降水量进行匹配, 取与雨量计经纬度最接近的定量降水估计产品格点及其周边 8 个格点估计的降水量平均值作为定量降水估计产品在该雨量计位置的降水量估计值; 最后, 选取定量降水估计产品和雨量计 1 h 观测降水量均大于 0.1 mm 的数据进行统计评估。

评估的指标包括相关系数 (CC), 均方根误差 (RMSE), 相对平均绝对误差 (RMAE) 和相对平均误差 (RMB), 其定义分别如式 (6) — (9)。

$$CC = \frac{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})(g_k - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})^2 \cdot \sum_{k=1}^N (g_k - \bar{g})^2}} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (r_k - g_k)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$RMAE = \left(\frac{\sum_{k=1}^N |r_k - g_k|}{\sum_{k=1}^N g_k} \right) \quad (8)$$

$$RMB = \frac{\sum_{k=1}^N (r_k - g_k)}{\sum_{k=1}^N g_k} \quad (9)$$

式中, N 为样本数, r_k 和 g_k 分别为定量降水估计产品估计的降水量和雨量计观测的降水量。其中, CC 是体现线性关系的统计指标, CC 越高, 说明降水估计与实际观测降水量的一致性越高; RMSE 和 RMAE 是体现降水估计与实际观测降水量误差的统计指标, 两者越接近于 0, 说明误差越小, 估计的离散度越低。RMB 是体现平均偏离情况的指标, RMB 为正(负), 说明定量降水估计产品高估(低估)了实际观测的降水。

3 双偏振雷达定量降水估计性能评估结果

3.1 混合降水反演方法性能评估结果

首先, 对混合降水反演方法的性能进行评估。基于式 (2) — (5) 的 4 套定量降水估计方法, 以及混合降水反演方法, 产生了 5 种定量降水估计数据, 通过与雨量计观测降水量比较, 评估混合降水反演

方法的性能。基于表 3 中的所有个例，利用 ZSE01 雷达数据，使用这 5 种定量降水估计方法计算了各自估算的 1 h 降水量，并与雨量计观测的 1 h 降水量做比较，比较的频数密度散点如图 8 所示。可以看出， $R(Z_H)$ 关系显著低估了降水量 (图 8a)，尤其是对强降水的低估很严重。这是因为 $R(Z_H)$ 关系对雨滴谱很敏感，弱降水往往对应于层状云降水，其雨滴直径一般较小；而强降水大多由对流性降水导致，其雨滴直径一般较大，两者的雨滴谱特征差异很大，因此用单一关系无法较好地对各降水强度进行反演。 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系在小雨和中雨表现较好，高频数散点与理论最优曲线吻合较好，而对 20 mm/h 以上的降水总体呈高估状态 (图 8b)。由于使用了

深圳雨滴谱仪统计得到的反演关系参数，因此对 20 mm/h 以上的降水总体高估应该主要是由于 Z_{DR} 的定标偏差所致。 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系中 Z_{DR} 位于分母，该关系对 Z_{DR} 的准确度要求较高，因此在未来的工作中需要对 Z_{DR} 的观测质量进行评估。 $R(K_{dp})$ 关系 (图 8c) 对强降水的估测较为准确，虽然有低估现象，但其离散度较小，说明使用 $R(K_{dp})$ 关系在强降水时相对较稳定，但在弱降水时，其表现不佳，体现在纵轴附近有许多离散点。这是由于弱降水的 K_{dp} 信号较弱，噪声的影响严重，导致降水估计结果不稳定。 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 关系 (图 8d) 总体特征与 $R(K_{dp})$ 类似，对强降水的估测较为准确，且其对强降水的估测优于 $R(K_{dp})$ 关系，与理论直线更加吻合，低估程度更小，而对弱降水的估测不稳定。混合降水反演方法 (图 8e) 则结合了各种单一降水反演关系的优点，在各降雨量级中均表现较好。可以看到，降水强度较大时，混合降水反演方法的特征与 $R(K_{dp})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 相似，表现为离散度和偏差均较小；而当降水强度较小时，混合降水反演方法则与 $R(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 的特征较为相似，表现较为稳定，线性关系较好，高频数散点与理论直线基本重合。使用混合降水方法，虽然在双偏振信号较弱时 (也即降水较弱时) 也使用到了 $R(Z_H)$ 关系的信

表 3 ZSE01 雷达各种降水反演关系反演小时降水量与雨量计观测降水量比较的统计指标
Table 3 Statistical indexes of hourly rainfall observed by rain gauges versus different QPE results using the ZSE01 radar

反演关系	CC	RMSE	RMAE	RMB
$R(Z_H)$	0.863	5.161	0.778	-0.633
$R(Z_H, Z_{DR})$	0.848	4.438	0.439	0.043
$R(K_{dp})$	0.836	4.230	0.576	-0.189
$R(K_{dp}, Z_{DR})$	0.830	3.989	0.493	-0.066
混合方法	0.914	3.026	0.364	-0.141

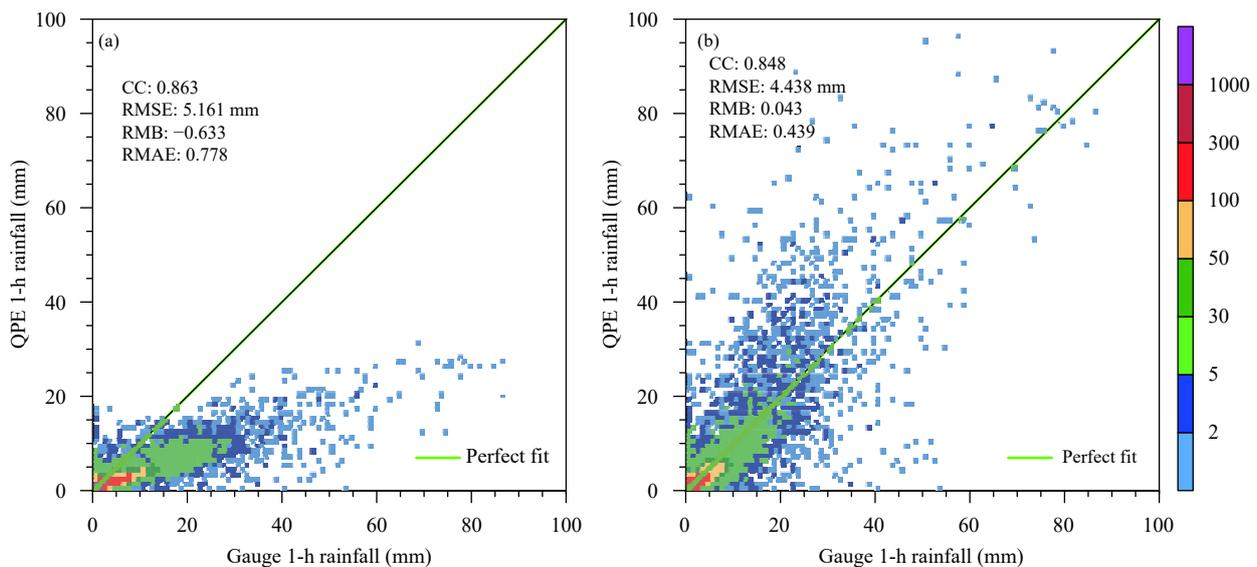
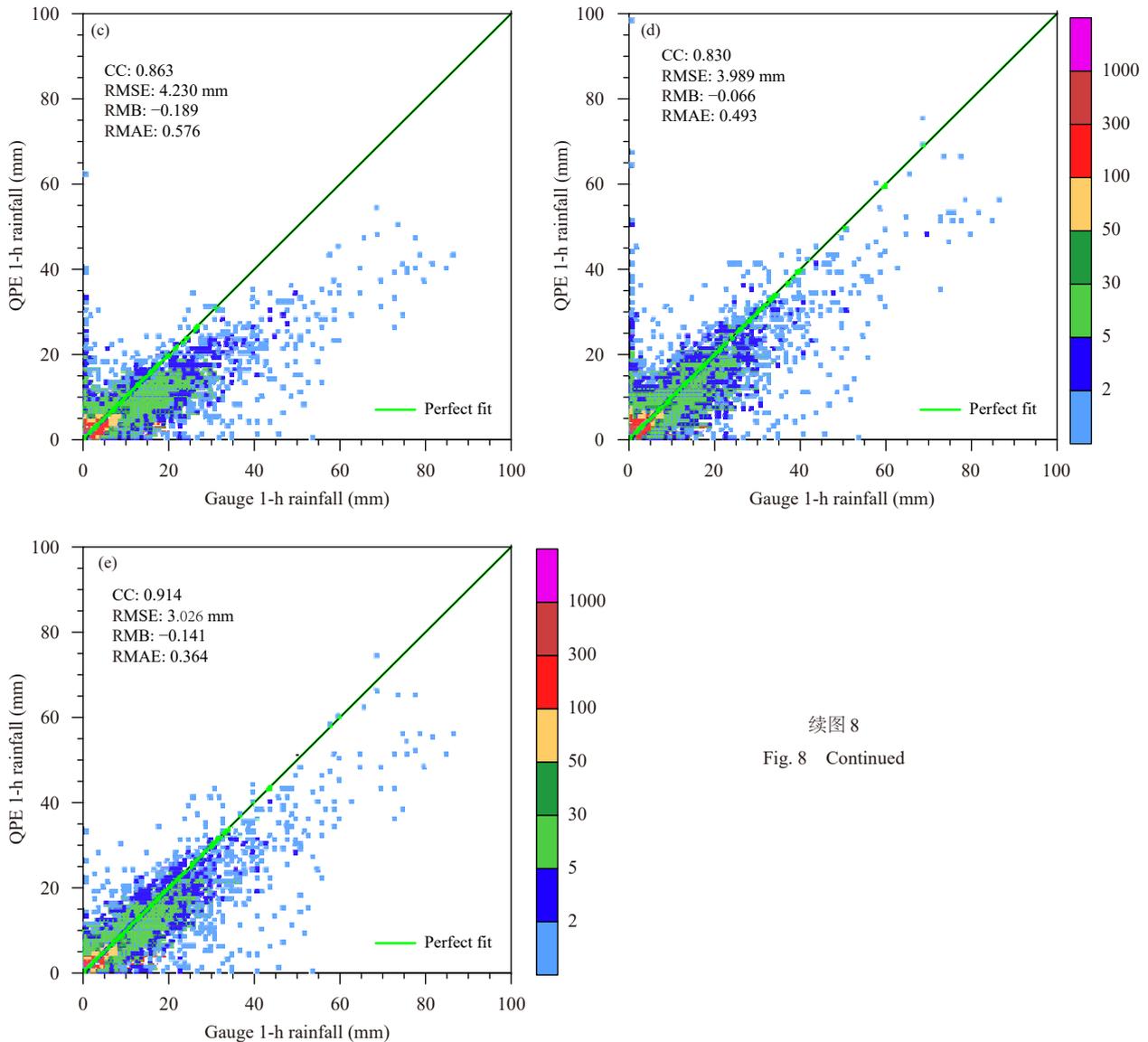


图 8 各种降水反演方法反演的 1 h 降水量与雨量计比较的频数密度散点
(a. $R(Z_H)$, b. $R(Z_H, Z_{DR})$, c. $R(K_{dp})$, d. $R(K_{dp}, Z_{DR})$, e. 混合降水反演方法)

Fig. 8 Scatter plots of frequencies of 1 h rainfall observed by rain gauges versus different QPE results
(a. $R(Z_H)$, b. $R(Z_H, Z_{DR})$, c. $R(K_{dp})$, d. $R(K_{dp}, Z_{DR})$, e. blend method)



续图 8

Fig. 8 Continued

息,但 $R(Z_H)$ 关系的低估并没有对混合降水方法产生显著影响。这是由于混合降水方法只在降水强度较低时使用到了 $R(Z_H)$ 关系,不同参数的 $R(Z_H)$ 关系的差异主要体现在强降水中,在弱降水中,不管使用何种 $R(Z_H)$ 的参数,其导致的偏差均较小。

从评估指标上来看(表 3), $R(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 的 CC 略高于 $R(K_{dp})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$, 这是由于后两者在弱降水时的表现不稳定,使得 CC 较低;而体现离散度的 RMSE 则是 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{dp})$ 、 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 依次减小,这说明引入双偏振量对于提高定量降水估计准确性的作用,同时也可以看到与 K_{dp} 有关的定量降水估计关系其 RMSE 更小,这与其对强降水的估计较为准确有关。而 RMAE 和

RMB 中,则是与 Z_{dr} 有关的反演关系表现最好。混合降水反演方法的 4 个评估指标除了 RMB 不及 $R(Z_H, Z_{DR})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 外,其余指标均优于任何一套单一降水反演关系的结果:体现一致性的 CC 最高,体现离散度的 RMSE 和 RMAE 均最小,说明了混合降水反演方法的性能优于以上这几种单一关系定量降水估计方法。

随后,对不同个例中各定量降水估计方法的各评估指标进行分析,以评估不同反演方法在不同个例的表现情况。图 9 是不同降水个例的各定量降水估计方法统计指标变化曲线。总体而言,各定量降水估计方法在不同个例中的性能表现有起伏,且变化情况大体一致,这与不同个例的雨滴谱特征有

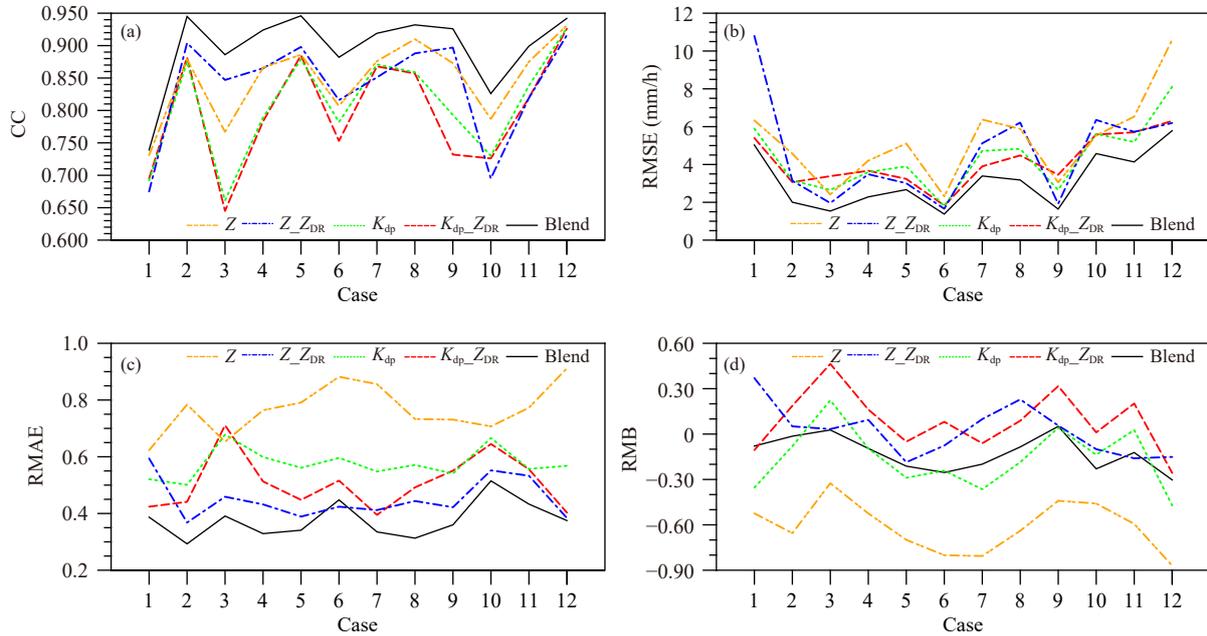


图 9 不同降水个例的各降水反演方法统计指标变化曲线 (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; 黄色线、蓝色线、绿色线、红色线和黑色线分别表示基于 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{dp})$ 、 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 和混合降水方法的统计评分)

Fig. 9 Time series of statistical indexes of different cases using different QPE methods (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; the yellow, blue, green, red and black lines indicate the performances of $R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(K_{dp})$, $R(K_{dp}, Z_{DR})$ and the blend method, respectively)

关, 如果统计得到的各套降水反演参数能够(不能)代表此次降水个例的雨滴谱特征, 则降水反演准确性较高(较低)。但是不同方法的表现稳定性是不同的, 就 CC 而言, $R(Z_H)$ 的表现最为平稳, 其次是 $R(Z_H, Z_{DR})$ 关系, 而 $R(K_{dp})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 则较不稳定, 在不同个例间起伏较大。RMSE 则正好相反, $R(K_{dp})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 的表现较为稳定, 而 $R(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 则波动较大, 这与 $R(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 对强降水的估计性能较低有关。RMAE 则是 $R(Z_H)$ 表现最差, $R(K_{dp})$ 、 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 依次提升。由于 $R(Z_H)$ 总体低估了降水, 因此 RMB 为较大的负值, 而其他几种方法均在 0 附近波动。这一时间变化曲线体现了混合降水反演方法的优点, 可以看到混合降水反演方法的各统计参数指标不仅基本均处于最优, 且其在不同个例之间波动最小, 对不同个例的表现比较平稳。

进一步, 对单一降水个例的不同发展演变过程进行分析, 以评估不同定量降水估计反演方法在降水个例的不同演变过程的表现情况。图 10 是 2020 年 6 月 7 日个例各降水反演方法统计指标变化曲线。由于在降水系统的不同发展演变时段, 其

雨滴谱特征和降水强度有较大的差异, 因此, 单一的定量降水估计方法均表现出较大的波动性, 但其波动的变化趋势不一致。对于 $R(Z_H)$ 而言, 其表现较差的时刻位于 01 时和 21 时(世界时, 下同), CC 较低, RMSE 和 RMAE 较高, RMB 为负, 说明降水估计与实际降水的离散程度较大, 且严重低估了降水, 使用了双偏振量的其他三种方法则表现较好, 这是因为这两个时次降水强度较大, 雨量计观测的最大小时降水量分别达到了 46.8 和 36 mm, 雷达观测的双偏振信号较强, 因此使用基于双偏振量的定量降水估计方法比较准确。而 $R(K_{dp})$ 和 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 表现最差的时次为 12、15 和 18 时, CC 很低, RMSE 和 RMAE 很高, RMB 为正, 说明估计准确性很低, 且严重高估了降水。这几个时次都是降水较弱的时次, 雨量计观测的最大小时降水量仅分别为 1.5、0.5 和 1.1 mm, 弱降水的双偏振信号很弱, 雷达观测到的双偏振信号受到噪声影响严重, 因此使用双偏振量进行降水估计误差较大, 相反, 使用 $R(Z_H)$ 关系的表现最优。这也说明了对不同降水强度, 各降水反演方法的性能是不同的。混合降水反演方法则结合了各降水反演方法的优势,

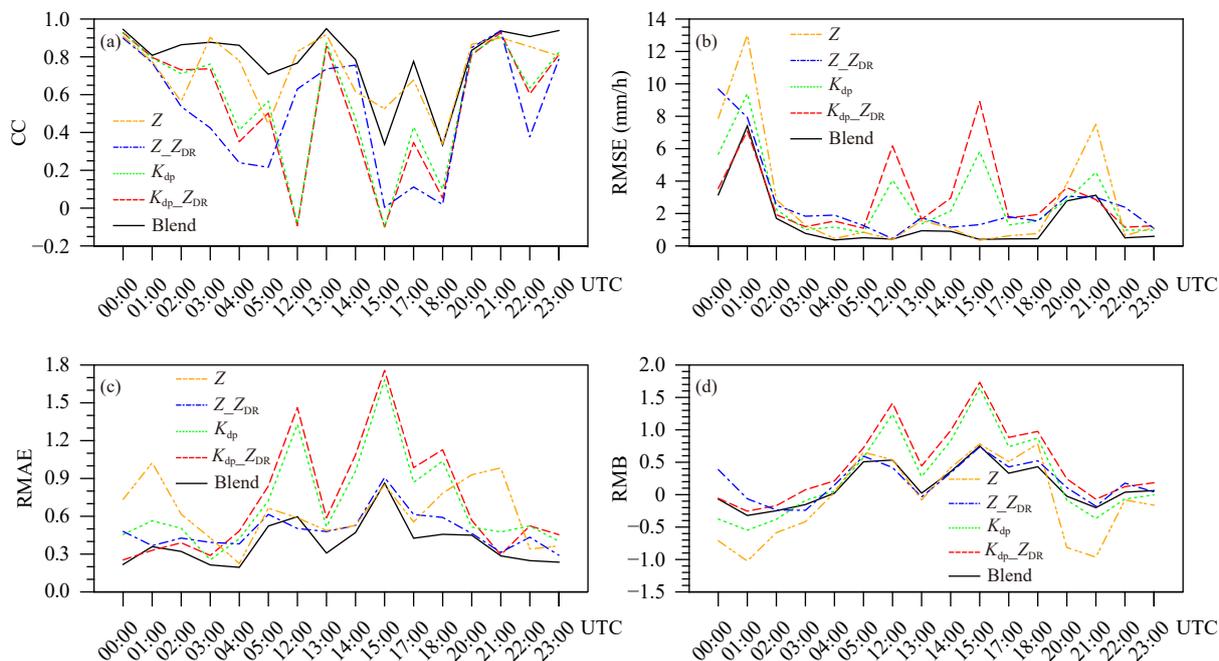


图 10 2020 年 6 月 7 日降水过程的各降水反演方法统计指标变化曲线 (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; 黄色线、蓝色线、绿色线、红色线和黑色线分别表示基于 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{dp})$ 、 $R(K_{dp}, Z_{DR})$ 和混合降水方法的统计评分)

Fig. 10 Time series of statistical indexes of case on 7 June 2020 using different QPE methods (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; the yellow, blue, green, red and black lines indicate performances of $R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(K_{dp}, Z_{DR})$ and the blend method, respectively)

各统计参数基本均处于最优, 且其在该个例中不同时段波动小, 表现稳定。

对混合降水反演方法在 Z9755 雷达的表现也进行了评估, 评估选用的雨量计范围为距离 Z9755 雷达 0—150 km 雨量计。结果表明, 混合降水反演方法在 Z9755 雷达的表现也均优于单独的降水反演方法(表 4), 在此不再赘述。总而言之, 混合降水反演方法不仅性能优于基于单一定量降水估计关系的降水反演方法, 且其稳定性较强, 适合在业务中使用。

3.2 双偏振定量降水估计产品性能评估

对 ZSE01 雷达和 Z9755 雷达基于本文定量降水估计方法产生的定量降水估计产品, 以及深圳现有业务定量降水估计产品性能进行评估, 以比较这几套降水估计产品的性能。由于 ZSE01 雷达、Z9755 雷达以及业务定量降水估计产品覆盖范围不一致, 选取三者均覆盖的雨量计资料(即距离 ZSE01 雷达 0—40 km 雨量计)用于评估, 以保证样本的一致性。

图 11 是业务定量降水估计产品(以下简称业

表 4 同表 3, 但为 Z9755 雷达

Table 4 Same as Table 3 but for the Z9755 radar

反演关系	CC	RMSE	RMAE	RMB
$R(Z_H)$	0.773	5.029	0.573	-0.246
$R(Z_H, Z_{DR})$	0.796	6.184	0.852	-0.794
$R(K_{dp})$	0.639	6.305	0.760	0.363
$R(K_{dp}, Z_{DR})$	0.633	6.412	0.732	0.290
混合方法	0.825	4.558	0.550	-0.320

务产品)、Z9755 雷达定量降水估计产品(以下简称 Z9755 产品)和 ZSE01 雷达定量降水估计产品(以下简称 ZSE01 产品)1 h 估测降水量与雨量计观测降水量的频数密度散点, 表 5 展示了这 3 套产品的各项统计指标。可以看到, 业务产品线性关系不明显, CC 不到 0.6; 离散度较大, RMSE 达 7.1 mm/h; 高频数区向纵轴延伸, 严重偏离理论直线, 说明降水估计总体呈高估状态, 尤其是对小雨的高估较为严重, 产品对实际降水过程的描述偏差较大。Z9755 产品要优于业务产品, 线性关系明显, 高频数区沿着理论直线伸展, CC 接近 0.9, 说明降水估计对实际降水过程有较好的描述, 一致性和稳定性较高;

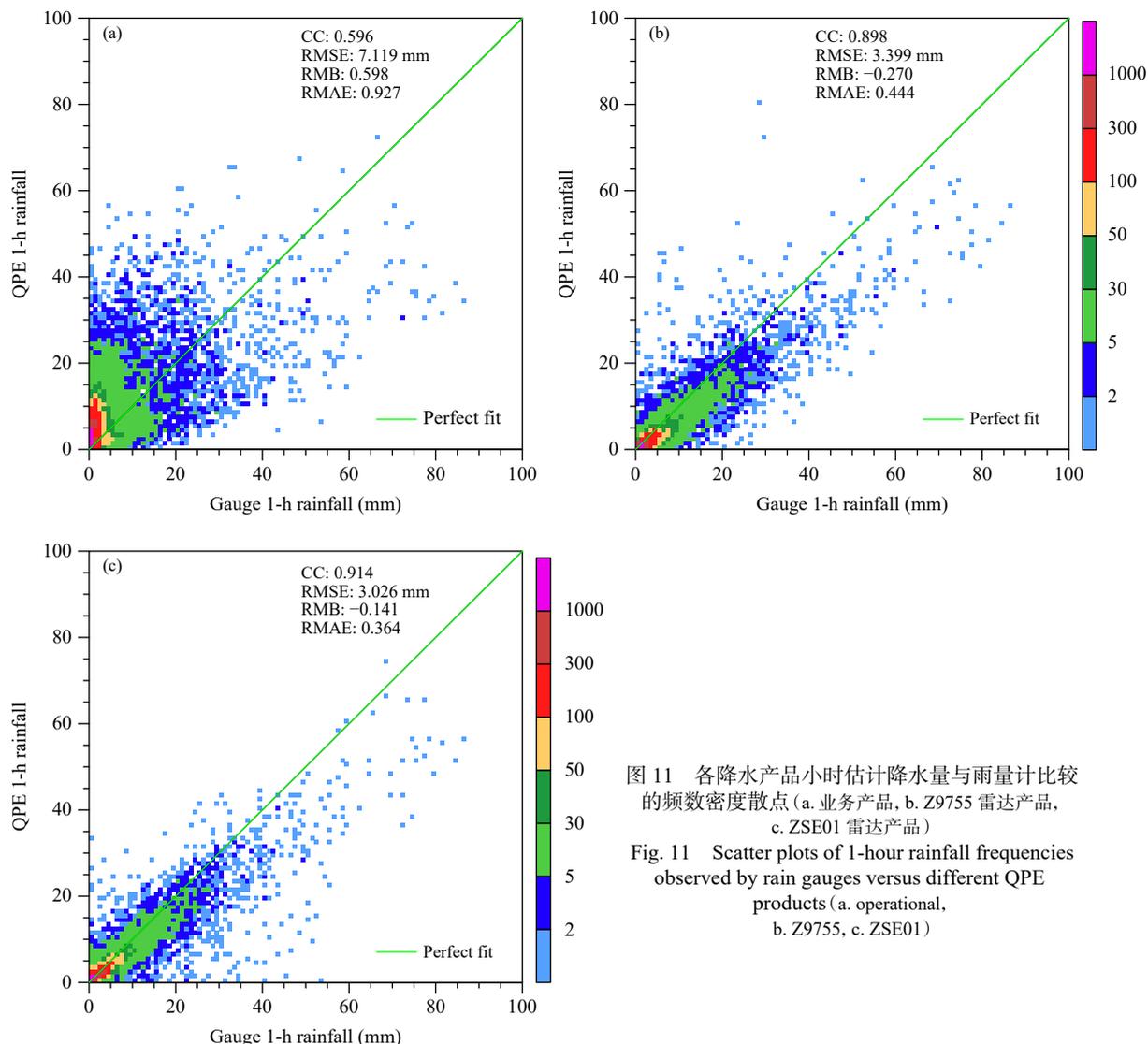


图 11 各降水产品小时估计降水量与雨量计比较的频数密度散点 (a. 业务产品, b. Z9755 雷达产品, c. ZSE01 雷达产品)
 Fig. 11 Scatter plots of 1-hour rainfall frequencies observed by rain gauges versus different QPE products (a. operational, b. Z9755, c. ZSE01)

表 5 业务、ZSE01 和 Z9755 产品小时降水量与雨量计观测降水量比较的统计指标

Table 5 Statistical indexes of hourly rainfall observed by rain gauges versus operational, ZSE01 and Z9755 QPE products

产品名称	CC	RMSE	RMAE	RMB
业务	0.596	7.119	0.927	0.598
Z9755	0.898	3.399	0.444	-0.270
ZSE01	0.914	3.026	0.364	-0.141

离散度较小, RMSE 约为 3.4 mm/h, 显著优于业务产品, 说明降水估计的准确性得到了较大提升; 该产品的降水估计总体呈低估状态。通过 Z9755 产品和业务产品的比较可知, 使用本文的双偏振雷达定量降水估计方法, 可以提高雷达定量降水估计的准确性。ZSE01 产品的表现比 Z9755 产品有进一

步提高, 线性关系更加明显, 高频数区沿着理论直线伸展, CC 达 0.91 以上, 说明产品能够很好地反映实际降水过程, 有较好的一致性和稳定性; 离散度也更小, RMSE 接近 3.0 mm/h, 降水估计准确性优于 Z9755 产品; 该产品的降水估计总体也呈低估状态, 但偏差小于 Z9755 产品。

随后比较 3 套产品在不同个例中的表现情况。图 12 是不同降水个例的 3 套产品统计指标的变化曲线。从具体指标而言, 业务产品在所有个例中表现均最差, 体现为较低的 CC, 较大的 RMSE 和 RMAE, 且其波动幅度较大, 说明其准确性和稳定性不佳。Z9755 和 ZSE01 产品统计指标的 CC 和 RMSE 较为接近, 其中 ZSE01 产品占优的个例更多。至于 RMAE 和 RMB, ZSE01 产品也更好, 体现

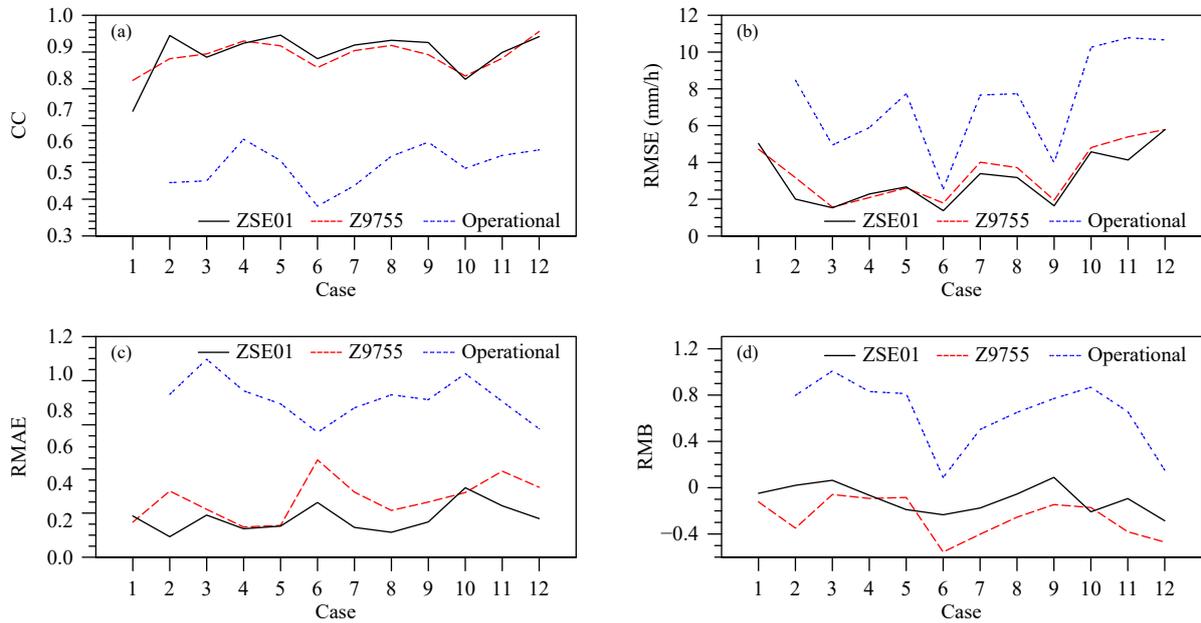


图 12 不同降水个例的各降水估计产品统计指标变化曲线

(a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; 黑色线、红色线和蓝色分别表示 ZSE01、Z9755 和业务产品的统计评分)

Fig. 12 Time series of statistical indexes of different cases (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; the black, red, and blue lines indicate performances of QPE products for ZSE01 radar, Z9755 radar and operational, respectively)

为更小的 RMAE 以及更接近于 0 的 RMB, 这说明 ZSE01 产品降水估计的准确度更佳, 系统性偏差更小。此外, 可以看到 3 套产品的 CC、RMSE 和 RMB 指标在不同个例中的波动趋势大体一致, 但 RMAE 并不完全一致, 主要表现为 8 月 1 日个例是 ZSE01 产品和 Z9755 产品的高值, 却是业务产品的低值。这是因为这次过程降水量较小, 最大小时降水量不超过 20 mm。从图 12b 中可以看出, 这次过程业务产品的 RMSE 是最接近 ZSE01 和 Z9755 产品的, 且从图 12d 中可以看出, 这次过程业务产品的 RMB 十分接近 0, 导致其 RMAE 较小, 为其低值。而 ZSE01 和 Z9755 产品由于在此次过程中有系统性的低估, 因此 RMAE 较大, 为其高值。

进一步比较 3 套产品在同一个例中不同时段的表现情况。图 13 是 2020 年 6 月 7 日个例不同时段 3 套产品统计指标随时间变化情况。对于 CC 而言, 业务产品波动较大, Z9755 和 ZSE01 产品波动相对较小, 说明 Z9755 和 ZSE01 产品的稳定性更强。对于其他几个指标而言, Z9755 和 ZSE01 产品均优于业务产品, 且波动较小, 说明其性能和稳定性较好, 对于降水系统的不同发展演变过程估计的准确性相对较高; Z9755 和 ZSE01 产品统计指标基

本一致, 在本个例中 Z9755 统计指标略优于 ZSE01, 且变化更稳定。

图 14 展示了一个时次的各产品估计的小时降水量与雨量计观测的平面分布。可见, 业务产品(图 14a)主要存在两个问题, 一是有大面积的实际无降水区域被估计为了弱降水, 如 280° — 330° 方向, 雨量计观测均为无降水, 而业务产品估计为了弱降水, 可能与业务产品使用的是特定层次的反射率进行估计, 把云砧的信息进行了定量降水估计导致; 此外, 其对降水中心的捕捉较差, 270° 方向 20—30 km 处有两个雨量计观测小时降水量大于 15 mm, 但业务产品没有抓住, 估计仅为 4—8 mm。Z9755 产品(图 14b)较好地反演了降水的强度和位置, 对强降水中心捕捉较好, 对西北方向的实际无降水区也能正确反映。ZSE01 产品(图 14c)总体形态与 Z9755 类似, 对降水中心的位置和强度反映较好, 与雨量计观测较为接近, 其弱降水区面积要略大于 Z9755 产品, 如对雷达 120° 方向的弱降水区有较好反映, 而 Z9755 雷达则显示为了无降水。

综上可知, 利用 S 波段或者 X 波段雷达数据, 使用文中的双偏振雷达定量降水估计方法产生的定量降水估计产品, 均能有效提高雷达定量降水估

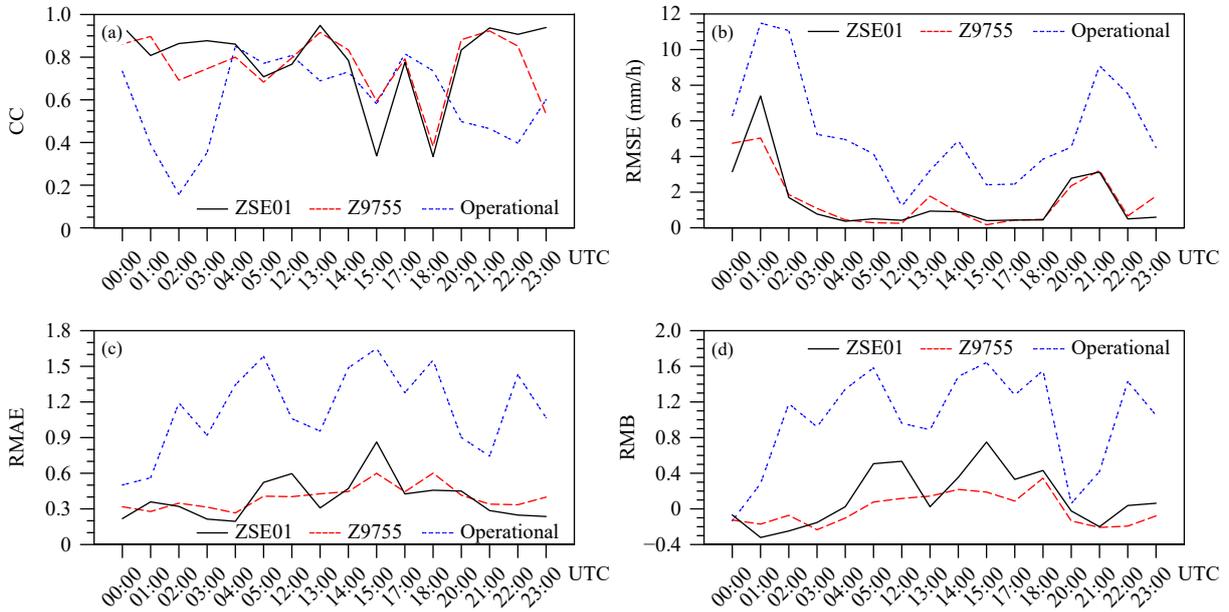


图 13 2020 年 6 月 7 日降水过程的各降水产品统计指标变化曲线
(a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; 黑色线、红色线和蓝色分别表示 ZSE01、Z9755 和业务产品的统计评分)

Fig. 13 Time series of statistical indexes for the case on 7 June 2020 (a. CC, b. RMSE, c. RMAE, d. RMB; the black, red, and blue lines indicate performances of QPE products for ZSE01 radar, Z9755 radar and operational, respectively)

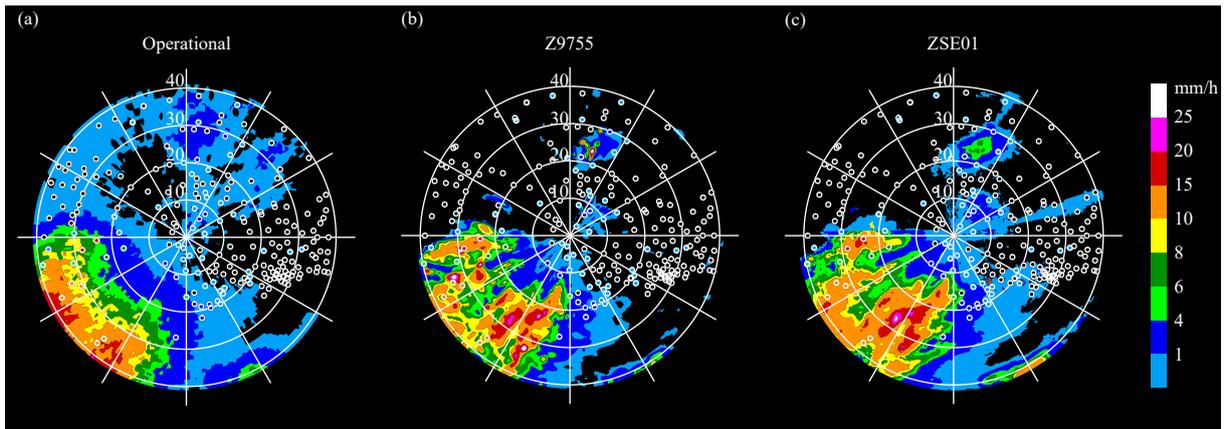


图 14 2020 年 6 月 5 日 15—16 时(世界时)定量降水估计产品估计的小时降水量
(a. 业务产品, b. Z9755 产品, c. ZSE01 产品; 图中圆圈为雨量站的位置, 圆圈的填色为雨量站观测的小时降水量)

Fig. 14 Estimated hourly rainfall during 15: 00—16: 00 UTC 5 June 2020 (a. operational product, b. Z9755 product, c. ZSE01 product; Locations of rain gauges (circles) and hourly rainfall observations of rain gauges (color-filled circles) are superposed)

计的准确度和稳定性。此外, X 波段雷达产生的定量降水估计产品性能要优于 S 波段雷达产生的产品, 这也说明通过在城市及其周边布设 X 波段小雷达, 可以提高对城市定量降水估计的准确度和稳定性。但需要指出的是, 虽然 X 波段雷达定量降水估计产品总体表现优于 S 波段雷达定量降水估计产品, 但通过本研究尚不能明确这一提升是何种原因导致的, 可能有以下几种原因均会带来定量降水估计性能的

提升: X 波段和 S 波段雷达观测信号的准确性, 这与雷达自身设计的硬件以及电磁波信号处理的方法有关; X 波段和 S 波段雷达时间分辨率的差异, X 波段雷达由于是相控阵雷达, 时间分辨率均较高, 对于快速移动和演变的降水系统, 信号捕捉更好; X 波段和 S 波段雷达空间分辨率的差异, X 波段雷达空间分辨率更高, 对于降水系统信号的捕捉更为精细。

4 总结与讨论

文中设计了基于双偏振量的雷达定量降水估计方法。通过雷达经纬度坐标、雷达探测原理和高精度地形数据,分析了雷达的遮挡情况,并在人工校正的基础上,形成了复合平面扫描仰角;利用雨滴谱仪,基于T矩阵方法,统计得到了适用于深圳地区的S波段和X波段雷达各降水反演关系的参数;基于复合平面扫描雷达观测量和各降水反演关系的参数,通过混合降水反演方法进行雷达定量降水估计。该方法结合了各降水反演关系的优点,利用12个降水个例,通过统计分析表明,混合降水反演方法准确性和稳定性均优于单一降水反演关系得到的结果。

利用该方法,基于深圳S波段的双偏振Z9755雷达以及X波段的双偏振相控阵ZSE01雷达,产生了S波段和X波段雷达定量降水估计产品。使用12个个例与现有业务定量降水估计产品进行比较评估。结果表明,使用该方法产生的Z9755和ZSE01雷达定量降水估计产品其准确性和稳定性均优于现有业务定量降水估计产品,表明使用文中的双偏振雷达定量降水估计方法能够稳定有效地提高定量降水估计的准确度。此外,ZSE01产品性能要略优于Z9755性能,说明利用X波段雷达进行定量降水估计,可能可以提升对城市降水估计的准确度。但由于本研究只使用了一部X波段雷达和一部S波段雷达,这一结论是否具有普适性,且X波段雷达带来的定量降水估计性能提升是由于观测信号质量较高,抑或是其高时、空分辨率所导致尚不明确,需要进一步进行分析。此外,在雷达扫描平面内,由于对冰区和融化层中降水粒子双偏振量与降水率的关系尚不明确,所以本方法仅适用于在雷达扫描平面内的液态降水区进行定量降水估计。

双偏振雷达所观测到的双偏振量与降水粒子的类型、大小等密切相关,利用双偏振雷达进行定量降水估计能够提高降水估计的准确度。近年来,中国双偏振雷达的升级正在逐步开展,主要采取了对原有业务单偏振雷达进行升级改造,以及布设用于城市精细化降水观测的X波段双偏振小雷达两种方式。本研究工作可以为中国双偏振天气雷达应用于定量降水估计提供方法依据和借鉴。

参考文献

- 楚荣忠,王致君,刘黎平等. 1997. 双线偏振雷达降雨估测分析. 气象学报, 55(1): 103-109. Chu R Z, Wang Z J, Liu L P, et al. 1997. Preliminary analysis of rainfall estimate utilizing dual linear polarization radar. Acta Meteor Sinica, 55(1): 103-109 (in Chinese)
- 杜牧云,刘黎平,胡志群等. 2013. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析. 气象学报, 71(1): 146-158. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al. 2013. An analysis of dual-linear polarimetric Doppler radar data quality. Acta Meteor Sinica, 71(1): 146-158 (in Chinese)
- 胡胜,胡东明,汪瑛等. 2006. 双线偏振多普勒雷达及其探测技术的应用. 广东气象, (4): 12-16. Hu S, Hu D M, Wang Y, et al. 2006. Dual linear polarimetric Doppler radar and the applications of the detection technology. Guangdong Meteor, (4): 12-16 (in Chinese)
- 寇蕾蕾,李应超,楚志刚等. 2018. C波段双偏振多普勒天气雷达资料分析及在定量估计降水中的应用研究. 热带气象学报, 34(4): 460-471. Kou L L, Li Y C, Chu Z G, et al. 2018. C-band dual-polarization Doppler weather radar data analysis and its application in quantitative precipitation estimation. J Trop Meteor, 34(4): 460-471 (in Chinese)
- 林文,张深寿,罗昌荣等. 2020. 不同强度对流云系S波段双偏振雷达观测分析. 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al. 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar. Meteor Mon, 46(1): 63-72 (in Chinese)
- 马建立,陈明轩,李思腾等. 2019. 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. 气象学报, 77(3): 516-528. Ma Jianli, Chen Mingxuan, Li Siteng, et al. 2019. Application of linear programming on quality control of differential propagation phase shift data for X-band dual linear polarimetric Doppler weather radar. Acta Meteor Sinica, 77(3): 516-528 (in Chinese)
- 魏庆,胡志群,刘黎平等. 2016. C波段偏振雷达数据预处理及在降水估计中的应用. 高原气象, 35(1): 231-243. Wei Q, Hu Z Q, Liu L P, et al. 2016. C-band polarization radar data preprocessing and its application to rainfall estimation. Plateau Meteor, 35(1): 231-243 (in Chinese)
- 肖艳姣,王斌,陈晓辉等. 2012. 移动X波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制. 高原气象, 31(1): 223-230. Xiao Y J, Wang B, Chen X H, et al. 2012. Differential phase data quality control of mobile X-band dual-polarimetric Doppler weather radar. Plateau Meteor, 31(1): 223-230 (in Chinese)
- 杨吉,郑媛媛,徐芬. 2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析. 气象学报, 78(4): 568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F. 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations. Acta Meteor Sinica, 78(4): 568-579 (in Chinese)
- 张培昌,魏鸣,黄兴友等. 2018. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X Y, et al. 2018. Dual Polarization Doppler Weather Radar Detection Principle and Application. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J. 2002. Experiments in rainfall

- estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. *J Appl Meteor Climatol*, 41(6): 674-685
- 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 Atmos Sci*, 60(2): 354-365
- Chandrasekar V, Bringi V N. 1988. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall Part I : Differential reflectivity. *J Atmos Ocean Technol*, 5(6): 783-795
- Chandrasekar V, Bringi V N, Balakrishnan N, et al. 1990. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III : Specific differential phase. *J Atmos Ocean Technol*, 7(5): 621-629
- 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 Hydrometeorol*, 18(5): 1375-1391
- Chen H N, Chandrasekar V. 2015. The quantitative precipitation estimation system for Dallas-Fort Worth (DFW) urban remote sensing network. *J Hydrol*, 531: 259-271
- Cifelli R, Chandrasekar V, Chen H N, Johnson L E. 2018. High resolution radar quantitative precipitation estimation in the San Francisco Bay Area: Rainfall monitoring for the urban environment. *J Meteor Soc Japan*, 96A: 141-155
- Giangrande S E, McGraw R, Lei L. 2013. An application of linear programming to polarimetric radar differential phase processing. *J Atmos Ocean Technol*, 30(8): 1716-1729
- Matrosov S Y, Cifelli R, Kennedy P C, Nesbitt S W, Rutledge S A, Bringi V, Martner B E. 2006. A comparative study of rainfall retrievals based on specific differential phase shifts at X-and S-band radar frequencies *J Atmos Ocean Technol*, 23(7): 952-963
- Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities//Wakimoto R M, Srivastava R. Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas. Boston: American Meteorological Society, 237-258
- Ryzhkov A V, Zrníc D S. 1995. Comparison of dual-polarization radar estimators of rain. *J Atmos Ocean Technol*, 12(2): 249-256
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. 2005. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(6): 809-824
- Sachidananda M, Zrníc D S. 1986. Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation. *Radio Sci*, 21(2): 235-247
- Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *J Appl Meteor Climatol*, 15(1): 69-76
- Tang L, Zhang J, Qi Y, et al. 2013. Non-standard blockage mitigation for national radar QPE products//36th Conference on Radar Meteorology. Colorado Ballroom Foyer: American Meteorological Society
- Thompson E J, Rutledge S A, Dolan B, et al. 2018. Dual-polarization radar rainfall estimation over tropical oceans. *J Appl Meteor Climatol*, 57(3): 755-775
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers. *J Atmos Ocean Technol*, 30(8): 1672-1690
- Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel. *J Atmos Ocean Technol*, 31(6): 1276-1288
- Wang Y D, Cocks S, Tang L, et al. 2019. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part I : Algorithm description. *J Hydrometeorol*, 20(5): 985-997
- Waterman P C. 1965. Matrix formulation of electromagnetic scattering. *Proc IEEE*, 53(8): 805-812