

张哲, 罗红艳, 戚友存, 等, 2024. 基于雨滴谱仪和 S 波段雷达的 X 波段相控阵雷达反射率观测质量定量分析[J]. 气象, 50(10): 1187-1200. Zhang Z, Luo H Y, Qi Y C, et al, 2024. Quantitative analysis of reflectivity quality of X-band phased-array radar based on disdrometer and S-band radar[J]. Meteor Mon, 50(10): 1187-1200(in Chinese).

## 基于雨滴谱仪和 S 波段雷达的 X 波段相控阵 雷达反射率观测质量定量分析\*

张 哲<sup>1</sup> 罗红艳<sup>1</sup> 戚友存<sup>2,3</sup> 黎慧琦<sup>4</sup> 罗 鸣<sup>1</sup> 朱自伟<sup>2,3</sup>

1 深圳市国家气候观测台, 深圳 518040

2 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

3 中国科学院大学, 北京 100864

4 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510640

**提 要:** 使用深圳市求雨坛 X 波段相控阵雷达数据, 与深圳市竹子林雨滴谱仪数据和深圳市求雨坛 S 波段雷达数据进行了定量对比, 分析 X 波段相控阵雷达反射率的观测质量。结果表明, 整体而言 X 波段相控阵雷达反射率与雨滴谱仪计算得到的反射率及 S 波段雷达反射率均较为一致, 相关系数均超过 0.75, 相对平均误差接近于 0, 不存在明显偏差, 且在不同强度降水时段表现较为稳定。但 X 波段雷达反射率在不同强度下偏差情况不一致, 小于 25 dBz 时, X 波段相控阵雷达反射率偏强, 大于 25 dBz 时, X 波段相控阵雷达反射率偏弱, 且偏弱程度随反射率强度增加逐渐加大, 在反射率超过 50 dBz 时, 平均偏弱强度可达 8~10 dB。

**关键词:** 相控阵雷达, X 波段雷达, 反射率, 质量分析

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.051001

## Quantitative Analysis of Reflectivity Quality of X-Band Phased-Array Radar Based on Disdrometer and S-Band Radar

ZHANG Zhe<sup>1</sup> LUO Hongyan<sup>1</sup> QI Youcun<sup>2,3</sup> LI Huiqi<sup>4</sup> LUO Ming<sup>1</sup> ZHU Ziwei<sup>2,3</sup>

1 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864

4 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510640

**Abstract:** The observation quality of reflectivity of Shenzhen Qiuyutan X-Band Phased-Array Radar is quantitatively evaluated by comparing it to Shenzhen Zhuzilin Disdrometer data and Shenzhen Qiuyutan S-Band Radar data. The results suggest that the reflectivity of X-band phased-array radar is highly consistent with the reflectivity retrieved by disdrometer and observed by S-band radar, with correlation coefficients greater than 0.75 and relative mean biases close to 0, which indicates minimal deviation. The X-band phased-array radar also shows stable performance under different rain intensity periods. However,

\* 广东省对接国家重大科技项目(广东省重点领域研发计划)(2020B1111200001-09)、深圳市科技计划(JCYJ2023080715440002)、国家重点研发计划(2022YFC3004101)和华南大城市强对流智能观测与快速识别预警试验(SY2022004)共同资助

2023 年 6 月 26 日收稿; 2024 年 5 月 21 日收修定稿

第一作者: 张哲, 主要从事天气雷达降水研究. E-mail: zhangzhe\_ucas@163.com

通讯作者: 戚友存, 主要从事天气雷达降水和水文研究. E-mail: Youcun.Qi@igsrr.ac.cn

the deviation of reflectivity of X-band phased-array radar is different under different reflectivity intensities. The reflectivity of X-band phased-array radar is positively biased when reflectivity is under 25 dBz, and negatively biased otherwise. As reflectivity intensifies, the degree of the negative bias gradually increases, and the average bias of reflectivity can reach 8–10 dB when reflectivity exceeds 50 dBz.

**Key words:** phased-array radar, X-band radar, reflectivity, observational quality analysis

## 引 言

天气雷达可以提供高时空分辨率的监测信息,在灾害性天气的监测和短时临近预报预警方面发挥了重要作用(郑永光等,2015;俞小鼎和郑永光,2020)。尤其是自双偏振雷达投入到气象领域使用以来,利用双偏振雷达开展定量降水估测(Zhang et al,2020;Ryzhkov et al,2022)、水成物识别(Park et al,2009;Bechini and Chandrasekar,2015)、灾害性天气识别与分析(Hubbert et al,1998;Ryzhkov et al,2005;Heinselman and Ryzhkov,2006)、资料同化(Jung et al,2008a;2008b;Zhang et al,2021)等方面的研究得到了全面的开展,有效提高了对灾害性天气的监测和预报预警能力。

目前,中国、美国、法国等许多国家的业务天气雷达监测网均由较长波段(S或C)的雷达组成(Tabary,2007;Zhang et al,2016;Min et al,2019),此类雷达具有探测范围大的特点,在全国范围的降水系统监测方面具有得天独厚的优势。但雷达布站间隔较远,探测距离较远的降水系统时,由于雷达电磁波波束距离地面较高,对降水系统的低层监测能力不足,且低仰角的扫描容易受到地形和建筑物等遮挡,进一步限制了雷达的低层探测能力。此外,由于此类雷达扫描速度较慢、仰角数较少、分辨率较低(如我国业务中常用的VCP21模式可约6分钟完成9个仰角,空间分辨率为数百米),使用此类雷达开展灾害性天气快速识别、精密监测、精准预报预警等工作存在一定限制。

针对这一问题,专家学者们提出了通过布设探测范围较小、成本较低、扫描速度快、空间分辨率高的X波段雷达,以补充现有业务天气雷达监测网的不足。多个国家布设了一定数量的X波段雷达并开展了试验或业务工作。如美国在俄克拉何马、达拉斯、旧金山等地区的城市周边布设了X波段雷达,极大提高了城市的雷达定量降水估测精度和洪水预报能力(Chandrasekar et al,2012;Chen and

Chandrasekar,2015;Cifelli et al,2018);德国在其北部构建了X波段雷达网,Lengfeld et al(2014)指出该雷达网可以作为全国雷达网的有效补充,提供重点区域降水系统的精细化结构信息;法国在阿尔卑斯山地区布设了X波段雷达作为常规业务雷达的补充,弥补常规雷达在山区低层观测信息不足的缺陷,提高了天气雷达网在该地区的气象监测能力(Faure et al,2017)。

近些年来,我国在许多地区如京津冀地区、长三角地区、珠三角地区等城市密集区也布设了X波段雷达监测网,以满足城市灾害性天气精密监测的实际需求。X波段雷达相关科学研究和业务应用工作也得到了开展,包括雷达信号处理如质量控制(马建立等,2019)、非气象回波识别(王超等,2019;夏凡等,2021)、衰减订正(李思腾等,2021;肖柳斯等,2021)、中气旋识别(苏永彦和刘黎平,2022),组网拼图方法构建如反射率拼图(程元慧等,2020;叶开等,2020)、水成物拼图(吴翀等,2021)、定量降水估测产品拼图(张哲等,2021;2023),对典型天气过程进行分析如对流性强降水(于明慧等,2019;潘佳文等,2022;肖靖宇等,2022)、龙卷(傅佩玲等,2020;梅雨菲等,2022)。这些研究工作使得我们对X波段雷达监测网在强对流监测方面的能力有了一定认识。总体而言,X波段雷达监测网可以提供更高时空分辨率的监测信息,在捕捉快速发展的小尺度强对流系统时可能会更有优势。

X波段雷达由于布设时间较短,利用此类雷达进行相关科学研究和应用工作依然有待深入开展。其中,X波段雷达观测信号的质量是开展强对流监测、灾害性天气识别、S波段与X波段雷达拼图产品研发等多方面工作的基础,为此,一些专家学者也对X波段雷达的观测信号质量进行了分析。如田聪聪等(2021)分析了一次层状云降水过程中广州X波段雷达的观测信号质量,指出X波段雷达观测到的回波结构和位置与S波段雷达基本一致,X波段雷达回波强度偏弱;张蔚然等(2021)分析了X波段雷达的观测质量,指出在降水强度较弱时,X波段雷达

反射率强度与 S 波段雷达较为一致, X 波段雷达反射率强度较强, 平均偏差约 0.82 dB; 张羽等(2022)分析了一次短时强降水过程广州 X 波段雷达的观测信号质量, 指出 X 波段雷达与 S 波段雷达回波强度基本一致, X 波段雷达对弱回波的探测能力低于 S 波段雷达; 李哲等(2022)分析了深圳 X 波段雷达在降水强度较弱时的观测质量, 指出 X 波段雷达反射率误差变化范围较大, 且在这样的误差影响下, 基于传统方法识别水凝物相态的结果不可靠。这些研究使得我们对这些新布设的 X 波段雷达的观测质量有了一定认识, 但以上研究也存在一定不足, 如部分文章侧重于定性比较 X 波段雷达与 S 波段雷达回波形态的异同, 并没有给出定量结论; 部分文章通过剔除差分相位变化较大的径向数据, 主要分析的是降水强度较低时的 X 波段雷达观测质量, 而对强降水时的分析较少; 文章多是与 S 波段雷达开展定性或定量比较, 而较少结合其他观测仪器对雷达信号质量进行分析等。而从业务使用方面而言, X 波段雷达布设的业务目的是提升对城市中强对流的精密监测能力, 应加强对 X 波段雷达在强降水中观测质量的分析。

目前, 深圳也布设了两台 X 波段相控阵雷达, 其中求雨坛 X 波段雷达与深圳的业务 S 波段雷达位置基本重合, 这样的雷达布局为减少雷达采样体积等差异导致的误差, 开展 X 波段雷达与 S 波段雷达观测信号比较分析工作提供了得天独厚的优势。此外, 深圳布设有雨滴谱仪, 也为开展 X 波段相控阵雷达的观测质量分析工作提供了另一比较的基准。反射率是天气雷达中最重要、最常用的观测量之一, 定量认识 X 波段雷达反射率整体和不同强度下的观测质量情况具有重要意义。为此, 本文利用深圳求雨坛 X 波段雷达与雨滴谱仪、S 波段天气雷达开展 X 波段雷达反射率观测质量分析, 为进一步利用 X 波段雷达开展科学试验、业务应用和产品研发提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

2022 年 5 月 11—13 日特大暴雨过程是近 20 年来广东 5 月最强的一次降水过程, 具有累计降水量大、短时雨强强、影响范围广等特点。深圳 72 小时

最大累计降水量达 611.1 mm, 突破深圳 72 小时降水量极值, 导致深圳市内涝积水、围墙倒塌、树木倒伏等灾情。在此次强降水过程中, 深圳前期以暖区降水为主, 后期则转变成锋面降水, 且存在降水较弱的层状云降水时段, 这样复杂多样的降水过程有利于较为全面地认识 X 波段雷达在不同情况下的观测信号质量。因此, 选择此次特大暴雨过程开展 X 波段相控阵雷达反射率观测质量的分析工作。

本文使用的资料包括 2022 年 5 月 11—13 日(世界时, 下同)深圳求雨坛 S 波段雷达(以下简称 Z9755 雷达)数据、深圳求雨坛 X 波段相控阵雷达(以下简称 ZSE01 雷达)数据、深圳竹子林 OTT Parsivel<sup>2</sup> 雨滴谱仪的降水粒子谱数据, 及对应时段的深圳竹子林自动气象站观测的小时降水量数据, 以上资料的位置如图 1。

Z9755 雷达为双偏振多普勒天气雷达, 时间分辨率为 6 min, 库长为 250 m, 角度分辨率为 0.95°, 扫描方式为 VCP21 体积扫描, 仰角为 9 个(分别为 0.5°, 1.45°, 2.4°, 3.35°, 4.3°, 6.0°, 9.9°, 14.6°, 19.5°), 最大探测距离为 460 km。

ZSE01 雷达为双偏振相控阵多普勒天气雷达, 时间分辨率为 92 s, 库长为 30 m, 角度分辨率为 0.9°, 扫描方式为体积扫描, 仰角为 12 个(分别为 0.9°, 2.7°, 4.5°, 6.3°, 8.1°, 9.9°, 11.7°, 13.5°, 15.3°, 17.1°, 18.9°, 20.7°), 最大探测距离为 42 km。在日常运维中每年度对反射率和差分反射率进行定标, 方法为金属球定标法(李兆明等, 2018)。此外, 由于 X 波段雷达在强降水中会产生衰减, 因此首先需要对该雷达的衰减进行订正。对该雷达的衰减订正方法为联合衰减订正方法(张羽等, 2022), 其基

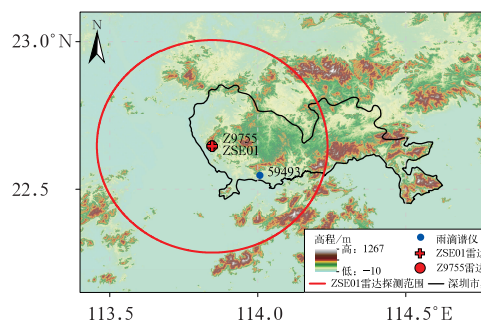


图 1 本文所用仪器分布和地形(填色)

Fig. 1 Terrain (colored) and the meteorological observation instruments used in this paper

本原理是根据差分传播相移率( $K_{DP}$ )不受衰减影响的特点,对反射率和差分反射率进行衰减订正,其中衰减率根据 $K_{DP}$ 的强度,采用不同的方法进行计算。张羽等(2022)还使用一次个例对该衰减订正方法的性能进行了评估。结果表明,该方法能较为有效地订正 X 波段雷达在强降水中反射率偏弱的现象,订正之后 X 波段雷达反射率强度与 S 波段雷达一致性较高,但整体还存在一定的偏低现象。该方法已在 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。

深圳竹子林 OTT Parsivel<sup>2</sup> 雨滴谱仪位于 ZSE01 雷达 125.6° 方位角处,距离 ZSE01 雷达 19770 m。利用其可以获得降水粒子的尺寸、数目和速度信息,对降水粒子的尺寸和速度的记录均分为不等距的 32 档,时间分辨率为 1 min,采样长度为 18 cm,宽度为 3 cm,该类型雨滴谱仪的具体参数可参见 Tokay et al(2013;2014)。

## 1.2 雨滴谱数据质量控制

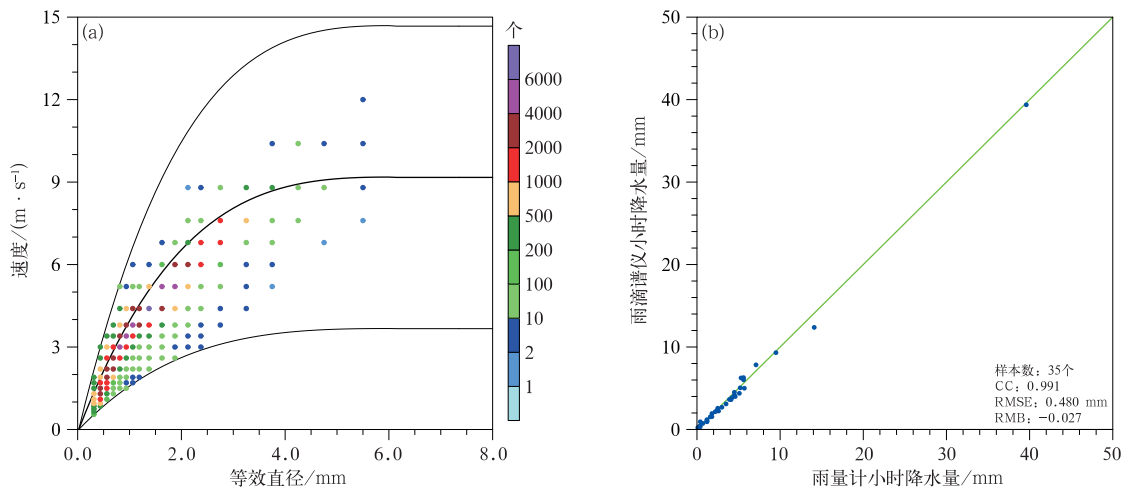
雨滴谱仪观测到的数据不全为降水粒子信息,还有可能受到沙尘、昆虫等非降水粒子的影响以及雨滴的飞溅、风等环境效应的影响从而产生非正常观测(Cao et al,2008;Friedrich et al,2013),这些非正常观测需要去除。本文首先对雨滴谱仪进行质量

控制,使用的质量控制方法参考张哲等(2022),其主要思路为:(1)首先对 1 分钟观测数据中观测粒子总数小于 10 或降水率小于  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的样本整体去除;(2)对通过(1)检验的样本,去除其中观测速度偏离理论速度超过 50% 的观测样本档位数据。

图 2a 为 2022 年 5 月 13 日 09—10 时竹子林雨滴谱仪经过质量控制的雨滴个数、下落速度和直径的频数散点分布,该小时为此次降水过程竹子林雨滴谱仪观测到的最强小时降水时段。可以看到,该小时内降水粒子的直径与下落速度的关系与理论关系曲线(Brandes et al,2002)较为吻合,高频数的档位均分布在该曲线的附近。图 2b 为此次降水过程竹子林雨滴谱仪经过质量控制之后计算得到的小时降水量与自动站观测的小时降水量比较的散点,二者一致性很高,相关系数(CC)达 0.991,均方根误差(RMSE)仅为 0.480 mm,平均相对偏差(RMB)为 -0.027,接近于 0,说明以自动站降水量为基准,雨滴谱仪观测的降水量系统性偏差较小。通过图 2 可知,竹子林雨滴谱仪在此次强降水过程中观测质量较高,可以以其作为基准,开展 X 波段雷达的观测质量分析工作。

## 1.3 基于雨滴谱信息计算雷达反射率

雨滴谱仪可以观测到降水粒子的直径、数目和



注:图 a 中粗实线为雨滴理论下落末速度(Brandes et al,2002),两条细实线分别为下落速度的 1.5 倍和 0.5 倍,填色彩点为雨滴个数。

图 2 2022 年 5 月(a)13 日 09—10 时雨滴谱仪观测的降水粒子速度和等效直径的频数散点图, (b)11—13 日质量控制后的雨滴谱仪与雨量计观测的降水量比较

Fig. 2 (a) Frequency scatter plot of raindrop size and velocity in 09:00—10:00 UTC 13, (b) scatter plot of 1 h rainfall observed by disdrometer and rain gauge during 11—13 May 2022

速度,因此可以利用其观测的雨滴谱数据计算等效的雷达反射率。本文使用的计算雷达反射率的方法为 T 矩阵方法(Waterman,1965),其基本原理为使用 T 矩阵方法计算得到每个直径档位  $D_i$  的水平后向散射振幅  $f_{hh}(180, D_i)$ ,并根据式(1)计算雷达反射率:

$$Z = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \sum_{i=1}^{32} |f_{hh}(180, D_i)|^2 N(D_i) \Delta D_i \tag{1}$$

式中: $K_w$  为水的介电常数(取 0.9639), $\lambda$  为雷达发射电磁波的波长(单位:mm), $N(D_i)$  为每个直径档归一化的粒子个数(单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ):

$$N(D) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_j}{A \Delta t V_j \Delta D} \tag{2}$$

式中: $n_j$  为该档的雨滴个数, $\Delta t$ 、 $V_j$  和  $\Delta D$  分别是采样时间、该档的下落速度和该档的宽度, $A$  是有效采样面积(单位: $\text{m}^2$ ):

$$A = L(W - D_i/2) \tag{3}$$

式中: $L$  和  $W$  分别是雨滴谱仪的采样长度和宽度。

### 1.4 不同波段雷达反射率转换方法

Z9755 雷达与 ZSE01 雷达由于波长不同,对同一个目标物观测的反射率存在差异,不能直接进行定量比较,应该首先进行不同波段雷达反射率的转换。近年来,随着 GPM(Global Precipitation Measurement)卫星的升空,通过星载双频雷达 GPM-DPR (GPM dual-frequency precipitation radar, Iguchi et al,2018)反演可以获得三维的雨滴谱信息。基于 GPM-DPR 的不同波段反射率转换方法也得到了发展(Zhu et al,2021;吴琼等,2023),这些方法的基本原理相似,即利用 GPM-DPR 双频雷达

提供二级产品中的相态分类、雨滴谱参数、降水率等产品,区分固态、混合相态和液态降水,分别计算出在三类相态中的不同波段的雷达反射率,并统计得到各相态不同波段反射率在不同强度下的偏差,建立转换公式或速查表进行不同波段反射率的转换,已有验证表明此类方法的精度较高(Zhu et al,2021;吴琼等,2023)。

采用 Zhu et al(2021)提出的基于雨滴谱信息的不同波段雷达反射率转换方法,把深圳 X 波段雷达反射率转换为 S 波段雷达反射率。由于本文中比较的反射率均处于液态降水区,因此只计算液态降水的转换关系。其要点为,利用 GPM-DPR 星载雷达提供的雨滴谱信息和降水相态信息,挑选出位于液态降水区中的数据,再根据 T 矩阵方法,计算 S 波段与 X 波段雷达反射率理论值[见式(1)],然后,计算 S 波段雷达反射率与 X 波段雷达反射率的差(DFR,单位:dB),并建立 X 波段反射率与 DFR 的多项式拟合关系,如式(4)所示:

$$\text{DFR} = a_0 + a_1 Z_X + a_2 Z_X^2 + a_3 Z_X^3 + a_4 Z_X^4 + a_5 Z_X^5 \tag{4}$$

式中: $Z_X$  为 X 波段雷达反射率;参数  $a_0 \sim a_5$  为转换参数,由统计得到。最后,根据式(5),实现 X 波段雷达反射率到 S 波段雷达反射率的转换:

$$Z_{X-S} = Z_X + \text{DFR} \tag{5}$$

式中: $Z_{X-S}$  为 X 波段雷达观测的经波段转换至 S 波段的雷达反射率。

根据提取出的 2014 年 3 月至 2021 年 12 月深圳区域的 GPM-DPR 数据中的液态降水部分,统计了式(4)中各参数的数值,建立了深圳 X-S 波段雷达反射率在液态降水中的转换关系,各项系数如表 1 所示。

表 1 深圳 X 波段雷达反射率向 S 波段雷达转换的系数(液态降水)

Table 1 Polynomial coefficients of reflectivity conversions from X-band radar to S-band radar for Shenzhen (for liquid precipitation)

参数	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
数值	-9.067	1.354	$-7.211 \times 10^{-2}$	$1.779 \times 10^{-3}$	$-2.154 \times 10^{-5}$	$1.0256 \times 10^{-7}$

图 3 是 X 波段雷达向 S 波段雷达转换的 DFR 随 X 波段雷达反射率的变化。可见,在约 15~25 dBz, X 波段向 S 波段转换的 DFR 呈正值,说明 X 波段雷达反射率转化为 S 波段之后会略微增强;而在 25 dBz 以上,DFR 为负值,且逐渐减小,说明 X 波段雷达反射率转化为 S 波段之后反射率会减弱,且随着反射率强度的增加,减弱的程度逐渐增加;在

60 dBz 时减弱达到 -2.6 dB 左右。

本文在进行 X 波段雷达反射率向 S 波段雷达反射率的频率转换时,使用的雨滴谱信息是基于 GPM-DPR 双频雷达反演的雨滴谱。其具有可以提供三维雨滴谱信息,观测时段较长等优点,但并非是对雨滴谱的直接观测,与雨滴谱仪观测的雨滴谱相比,其精度相对较低。其他地区进行 X 波段雷达反

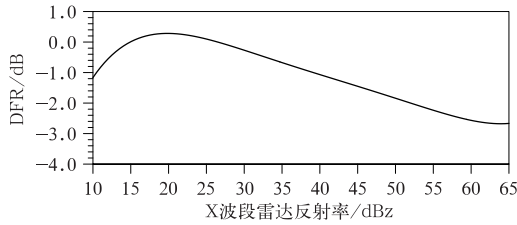


图 3 X 波段雷达向 S 波段雷达转换的反射率的差(DFR)随 X 波段雷达反射率的变化  
Fig. 3 DFR of X-band radar to S-band radar conversion in relation to X-band radar reflectivity

射率向 S 波段雷达反射率的频率转换时,若当地具有长时间序列、多区域的雨滴谱仪观测资料,在进行雨区的反射率频率转换时,可优先使用基于雨滴谱仪的观测资料进行转换,以提高转换精度。

### 1.5 雷达反射率质量评估的指标

为了客观定量评估分析 ZSE01 雷达的反射率观测质量,采用 CC、RMSE、相对平均绝对误差(RMAE)和 RMB,其定义分别如式(6)~式(9):

$$CC = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})(R_k - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})^2 \sum_{k=1}^N (R_k - \bar{R})^2}} \right] \quad (6)$$

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

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

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

式中: $N$  为样本数, $r_k$  和  $R_k$  分别为 ZSE01 雷达反射率及用于比较的反射率(即雨滴谱计算得到的反射率或 Z9755 雷达反射率)。其中,CC 是样本一致性的统计指标,CC 越高,说明 ZSE01 雷达反射率与其比较的反射率一致性越高;RMSE 是体现 ZSE01 雷达反射率与其比较的反射率的离散程度的统计指标,越接近于 0 dB,说明误差越小。RMAE 与 RMSE 相似,也是体现离散程度的统计指标,但是 RMAE 为经过标准化的离散程度指标,为无量纲数,以便于对不同强度的反射率进行横向比较。RMB 是体现平均偏离情况的指标,RMB 为正(负),说明 ZSE01 雷达反射率偏强(弱)。以上四个统计指标均基于双方均存在有效值的数据对来进行计

算,若其中一方无有效数据,则该数据对不被纳入指标的统计范围。

## 2 结果分析

### 2.1 ZSE01 雷达反射率与雨滴谱反射率的比较结果

将 ZSE01 雷达反射率与雨滴谱计算得到的反射率做对比,以评估 ZSE01 雷达的观测质量。首先对 ZSE01 雷达反射率与雨滴谱反射率进行匹配:对某一个时刻的雷达观测,选取与其观测时刻最接近的 1 min 雨滴谱数据,根据 ZSE01 雷达和雨滴谱仪的经纬度信息,使用大圆公式计算雨滴谱仪相对雷达的距离和方位角,将雨滴谱计算的等效雷达反射率与在雨滴谱仪位置库的 ZSE01 雷达观测反射率做匹配。

图 4 展示了 ZSE01 雷达最低三个仰角在雨滴谱仪位置处的反射率与雨滴谱数据计算的反射率的比较散点,其中去除了小于 10 dBz 的散点,以减少杂波的影响。其中雷达这三个仰角在雨滴谱仪位置的探测高度分别位于雨滴谱仪上方约 588、1209 和 1829 m(标准大气情况下)。整体而言,ZSE01 雷达观测的反射率与雨滴谱数据一致性较高,散点高度集中在理论直线的附近,不同仰角的 CC 均较高,分别为 0.876、0.836 和 0.762,而 RMB 均为接近于 0 的负值,RMAE 均在 0.1 左右,说明 ZSE01 雷达反射率质量较好,整体没有明显的系统性偏差。随着仰角的提高,散点图的离散度逐渐增大,体现为 CC 逐渐减小,RMSE 和 RMAE 逐渐增加。此外,RMB 变得更小,说明越高仰角的反射率与雨滴谱数据相比偏低越严重。这与降水的垂直变化有关,雷达观测的反射率为降水粒子在空中的反射率,而雨滴谱计算得到的反射率为降水粒子落到近地面时的反射率,降水粒子在下落过程中会受到蒸发、聚合、碰并、破碎等过程的影响(Cao et al, 2008),引起雨滴谱谱型的变化,使得雷达观测的反射率也随之变化。因此,雷达离地面最低的第一仰角观测反射率与雨滴谱计算得到的反射率一致性最高。对图 4a 进一步分析,可以看到,散点沿理论直线延伸,CC 达 0.876, RMSE 为 3.74 dB, RMB 接近于 0,考虑到雷达与雨滴谱仪采样的位置和采样体积的差异,可以认为 ZSE01 雷达总体观测质量较高。但也可以看到,在不同强度的反射率下,偏差情况不同,对于小于

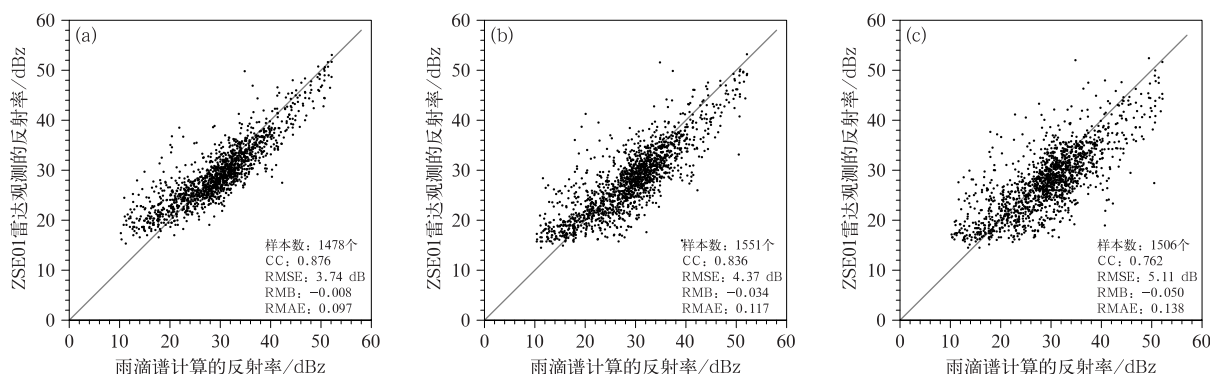


图 4 2022 年 5 月 11—13 日雨滴谱计算的反射率与 ZSE01 雷达不同仰角在雨滴谱仪位置观测的反射率比较散点图  
(a)第一仰角(0.9°), (b)第二仰角(2.7°), (c)第三仰角(4.5°)

Fig. 4 Scatter plot of the reflectivity calculated with raindrop size distribution (DSD, hereinafter) and the reflectivity observed by ZSE01 Radar at different elevations at the location of disdrometer during 11—13 May 2022  
(a) the first elevation (0.9°), (b) the second elevation (2.7°), (c) the third elevation (4.5°)

25 dBz 的部分, ZSE01 雷达观测反射率较雨滴谱数据偏高。说明在小于 25 dBz 时, ZSE01 雷达反射率可能存在偏强的情况, 而在高于 25 dBz 时, 散点偏向于右下侧, 说明高于 25 dBz 时, ZSE01 雷达反射率偏弱。在不同反射率强度下, 偏差情况不同可能是由于衰减订正方法所致, 在弱反射率下可能存在一定的订正过度的现象; 而在强反射率时, 由于衰减程度过大, 即使进行了衰减订正也无法将反射率强度完全补回。

为了评估 ZSE01 雷达反射率观测质量的稳定性, 对此次降水过程 11 日、12 日、13 日各选取了降水较为连续且降水较强的时段, 对 ZSE01 雷达和雨滴谱计算的反射率随时间演变的情况进行分析。图 5 分别是 11 日、12 日、13 日部分时段 ZSE01 雷达最低三个仰角反射率与雨滴谱计算的反射率的时间变化情况, 为了更好地表现变化趋势, 对四条反射率时间曲线均进行了三点平滑。可见, 不同时间段, ZSE01 雷达反射率与雨滴谱计算的反射率变化趋势总体一致, 说明雷达观测质量具有较好的稳定性, 能正确反映降水回波的时间演变强度特征。ZSE01 雷达三个仰角的反射率中, 第一仰角反射率的变化趋势与雨滴谱计算的反射率最接近, 第二仰角、第三仰角与雨滴谱计算的反射率一致性逐渐下降。此外, 可以看到, 三个仰角的反射率绝大部分时间均低于雨滴谱计算的反射率, 这与对图 4 的分析大体一致, 说明雷达在反射率超过 25 dBz 时存在一定的低估现象。但也可看到, 第三、第二、第一仰角反射率依次增加, 说明此次降水过程的低层反射率存在增

长的趋势。因此, 如果考虑到第一仰角反射率离地面仍有一定高度(约 588 m), 在第一仰角到地面之间反射率依然会增长的情况, ZSE01 雷达对超过 25 dBz 反射率实际偏低程度可能比图 5 中体现出来的要小。

通过比较 ZSE01 雷达和雨滴谱计算得到的反射率可知, ZSE01 雷达反射率整体观测性能较好, 与雨滴谱计算得到的反射率一致性较高且稳定, 但对不同强度的反射率, 其偏差情况不同, 表现为对 25 dBz 以下和以上的反射率分别存在偏高和偏低的现象。

## 2.2 ZSE01 雷达反射率与 Z9755 雷达反射率的比较结果

Z9755 雷达为 S 波段雷达业务天气雷达, 在强降水中衰减较小, 且定期开展雷达罩清洗、软硬件更新更换、定标等工作。图 6 是 Z9755 雷达最低仰角反射率与竹子林雨滴谱仪计算得到的反射率比较的散点。由图可见, Z9755 雷达与雨滴谱计算得到的反射率散点集中在理论直线附近, CC 高达 0.939, RMSE 仅为 2.57 dB, RMB 和 RMAE 均接近于 0, 且由散点可知, 该雷达反射率在不同强度下没有存在明显的系统性偏差。说明 Z9755 雷达观测质量较高, 因此, 以其为标准评估 ZSE01 雷达的观测质量。

图 7 展示了两个时次 Z9755 和 ZSE01 雷达观测的反射率。其中图 7b 和 7d 中 ZSE01 雷达的 310°~340°方位角(正北为 0°, 顺时针旋转)观测反

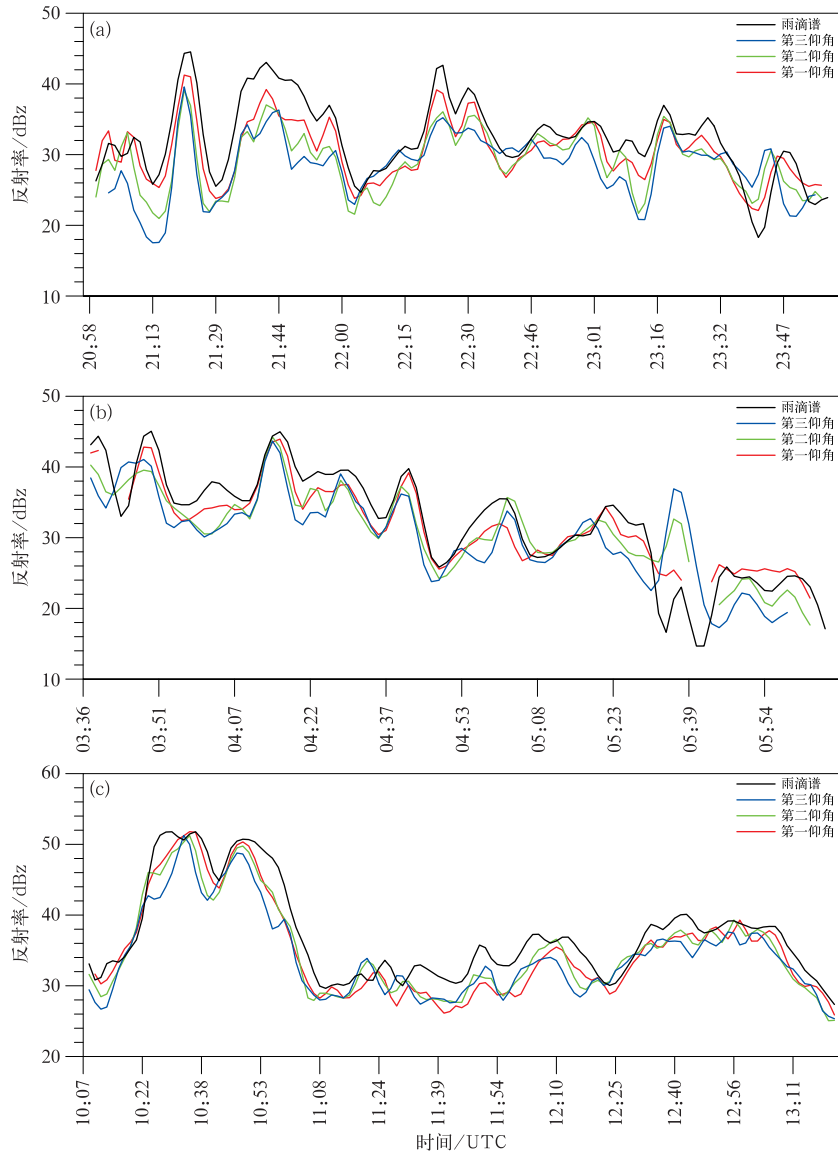


图 5 2022 年 5 月 (a)11 日 20:58—23:59, (b)12 日 03:36—06:08, (c)13 日 10:07—13:23

ZSE01 雷达第一、第二、第三仰角及雨滴谱计算的反射率的时间变化

Fig. 5 Time series of the reflectivity calculated with DSD and the reflectivity observed by ZSE01

Radar at the first, the second and the third elevations at (a) 20:58—23:59 UTC 11,

(b) 03:36—06:08 UTC 12, (c) 10:07—13:23 UTC 13 May 2022

射率完全缺失,这是由于在 ZSE01 雷达附近约 50 m 存在地形导致雷达观测信号被完全遮挡。除此之外,可以看到,ZSE01 雷达与 Z9755 雷达对降水系统总体形态、强降水、弱降水位置等的观测一致性较高。比较图 7a 与 7b,可见雷达北面为低反射率区,而南面为高反射率区,150°~210°存在两个高反射率中心,一个为团状,而另外一个为西南—东北走向的带状。而图 7c 和 7d 均存在三个团状的高反射率中心,分别位于 90°、120°和 210°附近。此外,由于 X 波段雷达波长较短,在探测强降水区时,存在

信号完全衰减的现象,在此情况下反射率信号无法通过衰减订正进行补回,因此在反射率高值区的外侧(即距离雷达更远处),存在观测信号缺失的情况,如图 7b 的 180°附近和图 7d 的 120°附近。从强度上而言,ZSE01 雷达反射率较 Z9755 雷达有一定程度偏低,偏低情况在几个高反射率区较为明显。总体而言,ZSE01 雷达观测的降水系统形态与 Z9755 雷达较为一致,但对强降水区存在反射率强度偏低的情况。

对 ZSE01 和 Z9755 雷达的反射率进行定量比较



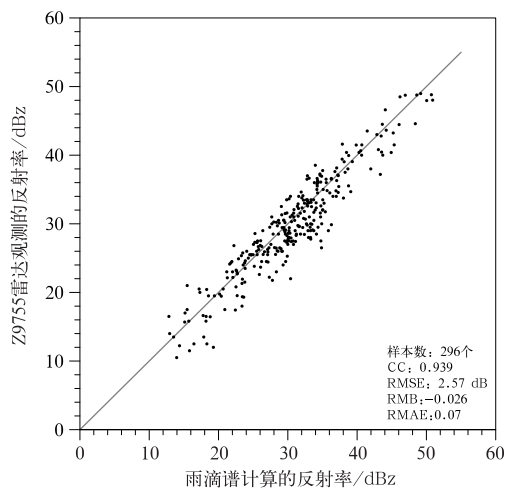


图 6 2022 年 5 月 11—13 日雨滴谱计算的反射率与 Z9755 雷达第一仰角(0.5°)在雨滴谱仪位置观测的反射率比较散点图  
Fig. 6 Scatter plot of the reflectivity calculated with disdrometer and the reflectivity observed by Z9755 Radar at the first elevation (0.5°) at the location of disdrometer during 11—13 May 2022

和评估。首先,将 ZSE01 雷达观测反射率使用 1.4 节的波段转换方法转化为 S 波段雷达反射率;随后,对 ZSE01 和 Z9755 雷达反射率进行匹配,对某一个时刻的 Z9755 雷达数据,选取与其观测时刻最接近的 ZSE01 雷达数据进行匹配,由于 Z9755 的库长比 ZSE01 雷达的库长要长,对 Z9755 雷达的一个距离库的反射率,取位于该距离库内的 ZSE01 雷达所有距离库的反射率平均值与 Z9755 雷达反射率作比较。为了避免杂波的影响,对反射率强度低于 10 dBz 的样本不纳入评估。由于 ZSE01 雷达和 Z9755 雷达扫描的仰角并不完全一致,因此,分别选取了两部雷达两个角度接近的仰角进行比较,即使用 ZSE01 雷达的 0.9°仰角与 Z9755 雷达 0.5°仰角反射率比较,比较的频数密度散点如图 8a;使用 ZSE01 雷达的 4.5°仰角与 Z9755 雷达 4.3°仰角反射率比较,比较的频数密度散点如图 8b。由图 8 可见,ZSE01 雷达和 Z9755 雷达观测总体一致性较高:频数密度散点沿理论直线延伸,且高频数区位于理论直线附近,CC 均超过 0.75, RMSE 均小于 5 dB,

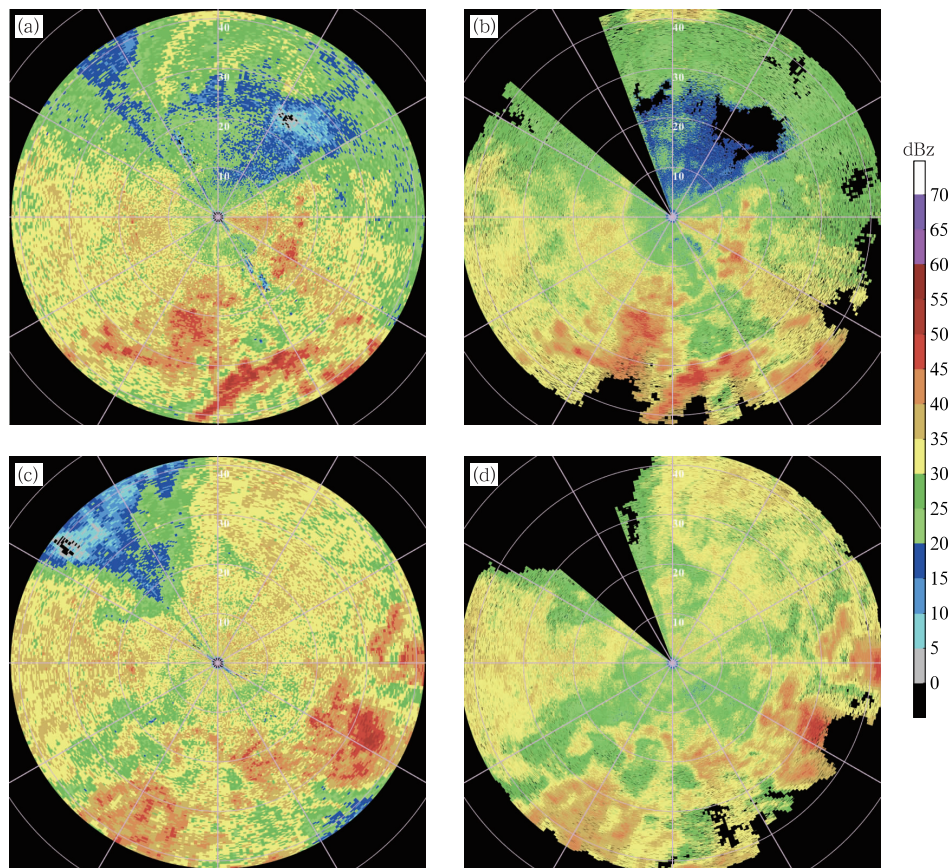


图 7 2022 年 5 月 (a)12 日 10:30:00, (c)13 日 11:06:00 Z9755 雷达 4.3°仰角反射率和 (b)12 日 10:31:10, (d)13 日 11:05:44 ZSE01 雷达 4.5°仰角反射率  
Fig. 7 (a, c) Reflectivity at 4.3° elevation of Z9755 Radar at (a) 10:30:00 UTC 12, (c) 11:06:00 UTC 13, (b, d) reflectivity at 4.5° elevation of ZSE01 Radar at (b) 10:31:10 UTC 12, (d) 11:05:44 UTC 13 May 2022

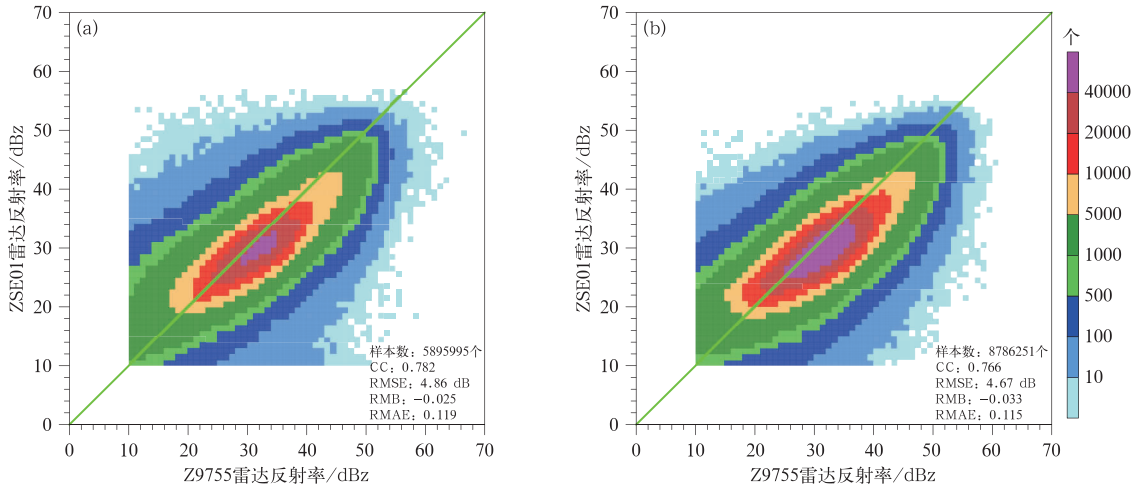


图 8 2022 年 5 月 11—13 日 ZSE01 雷达与 Z9755 雷达比较的反射率频数密度散点图

(a)ZSE01 雷达 0.9°仰角与 Z9755 雷达 0.5°仰角,(b)ZSE01 雷达 4.5°仰角与 Z9755 雷达 4.3°仰角

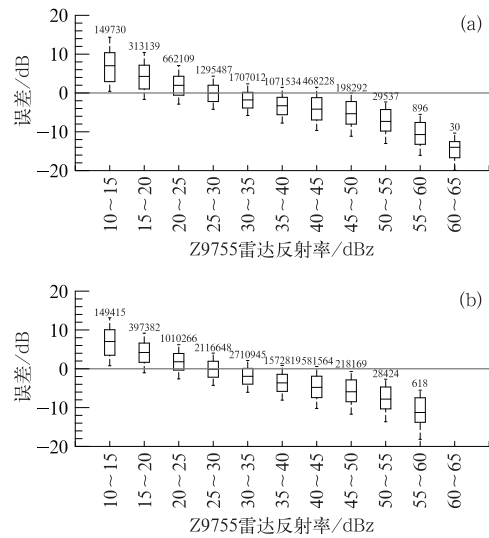
Fig. 8 Frequency scatter plot of reflectivity of ZSE01 Radar versus Z9755 Radar during 11—13 May 2022

(a) 0.9° elevation of ZSE01 Radar versus 0.5° elevation of Z9755 Radar,

(b) 4.5° elevation of ZSE01 Radar versus 4.3° elevation of Z9755 Radar

RMAE 约 0.1,RMB 均为接近于 0 的负值,整体偏低 3%左右。说明 ZSE01 雷达整体反射率与 Z9755 雷达反射率强度接近,ZSE01 雷达反射率偏低,但偏低程度较小。但从不同强度的反射率而言,ZSE01 雷达不同反射率强度偏差情况不同。其中在 Z9755 雷达反射率小于 25 dBz 时,高频数散点区位于理论直线上方,即 ZSE01 雷达反射率较 Z9755 雷达反射率偏强,而随着反射率强度增加,高频数散点逐渐向理论直线下方偏移,说明 ZSE01 雷达较 Z9755 雷达反射率偏弱。这样的结果与图 4 中将 ZSE01 雷达反射率与雨滴谱计算得到的反射率比较结果相似,即在 25 dBz 以下时,ZSE01 雷达反射率偏强,而大于 25 dBz 时,ZSE01 雷达反射率偏弱。

随后,分析 ZSE01 雷达不同强度反射率的偏差情况。根据 Z9755 雷达反射率强度,以 5 dBz 作为一个档位,将所有样本按照反射率强度进行分档,并比较每个档位 ZSE01 雷达和 Z9755 雷达反射率误差情况(图 9),由图可知,ZSE01 雷达与 Z9755 雷达的反射率偏差随着反射率强度的增加总体呈由正变负的趋势,在 25~30 dBz 档位以下,偏差为正,在 25~30 dBz 档位以上,偏差为负,且逐渐下降。这说明在 25~30 dBz 以下,ZSE01 雷达反射率较 Z9755 雷达反射率强,且随着反射率强度的减弱,偏强程度逐渐加剧;而在 25~30 dBz 以上,ZSE01 雷达反射率较 Z9755 雷达反射率弱,且随着反射率强



注:箱体的上、中、下横分别表示上 25%分位值,平均值和下 25%分位值,箱体上、下虚线两端分别表示上 10%分位值和下 10%分位值;箱体上方数字为该档位的样本数,单位:个;灰色粗实线为误差为 0 dB 的参考线。

图 9 (a)ZSE01 雷达 0.9°仰角与 Z9755 雷达 0.5°仰角,(b)ZSE01 雷达 4.5°仰角与 Z9755 雷达 4.3°仰角反射率的差随 Z9755 反射率强度变化的箱线图

Fig. 9 Box plots of difference between reflectivity at (a) 0.9° elevation of ZSE01 Radar versus 0.5° elevation of Z9755 Radar, (b) 4.5° elevation of ZSE01 Radar versus 4.3° elevation of Z9755 Radar in relation to Z9755 Radar reflectivity

度的增加,偏弱的程度逐渐加剧,尤其是在超过 50 dBz 以上时,偏弱程度严重,如在 55~60 dBz 档位,平均偏弱的强度达到了 10 dB 左右。以 Z9755 雷达为标准,则 ZSE01 雷达反射率质量较高的区间在 20~40 dBz,在这几个档位中,两部雷达的平均观测偏差比较小,观测误差的平均值在 0 附近,且这些档位的箱体较短,说明误差的离散度小,ZSE01 雷达观测的反射率与 Z9755 雷达的反射率一致性高。

进一步地,分析 ZSE01 雷达反射率在不同距离的性能。以雷达站位置为起点,按照每 10 km 分为一个区域,计算得到不同距离的 ZSE01 雷达反射率与 Z9755 雷达反射率的统计指标,如表 2。在不同距离内各统计指标均保持较为稳定,CC 维持在

0.78 左右, RMSE、RMAE 随着距离增加逐渐下降,其中 RMSE 从 5.5 dB 左右逐渐下降至约 4.1 dB,而 RMAE 从 0.137 逐渐下降到 0.101。RMB 处于 0 附近,且随着距离增加逐渐由负值变为正值。由此可知,ZSE01 雷达的反射率在距离雷达站位置不同距离的性能稳定性较高,在不同距离其反射率偏差基本相同,不存在随着距离增加而反射率偏差逐渐变大的现象,在距离雷达稍远的距离甚至偏差反而较小。结合表 2 和图 9,也说明了该雷达采用的衰减订正方法以订正不足为主,尤其是对强反射率的订正不足,但在不同距离的整体订正效果比较稳定,不存在对不同距离的反射率时而订正过度时而订正不足的现象。

表 2 X 波段雷达 4.5°仰角反射率与 S 波段雷达 4.3°仰角反射率在距雷达站不同距离的统计指标  
Table 2 Statistical scores of the 4.5° elevation reflectivity of X-band radar versus the 4.3° elevation reflectivity of S-band radar at different distances from the radar sites

距离/km	CC	RMSE/dB	RMB	RMAE	样本/个
0~10	0.783	5.529	-0.088	0.137	1 732 721
10~20	0.788	4.872	-0.054	0.121	2 168 647
20~30	0.777	4.339	-0.015	0.109	2 517 807
30~40	0.772	4.106	0.010	0.101	2 367 076

最后,分析 ZSE01 雷达在降水过程中的稳定性。选取 Z9755 雷达与 ZSE01 雷达匹配时次中样本数超过 10000 个的时次,计算该时次的统计指标。图 10 为 ZSE01 雷达 0.9°仰角反射率与 Z9755 雷达 0.5°仰角反射率比较的每个时次 RMAE 和 RMB 随时间变化的情况,叠加了该时次 ZSE01 雷达的平均反射率强度。RMAE 总体呈随机波动的状态,但

变化幅度较小,均小于 0.2,说明在不同时刻 ZSE01 雷达反射率质量较为稳定。RMB 则在 -0.12~0.04 波动,以负值居多,说明 ZSE01 雷达反射率总体偏弱,最低偏弱约 12%。此外可见 RMB 与平均反射率强度变化呈相反趋势,即平均反射率强度较强时,RMB 为负值。ZSE01 雷达反射率总体偏弱,而平均反射率强度较弱时,RMB 接近于 0 或为

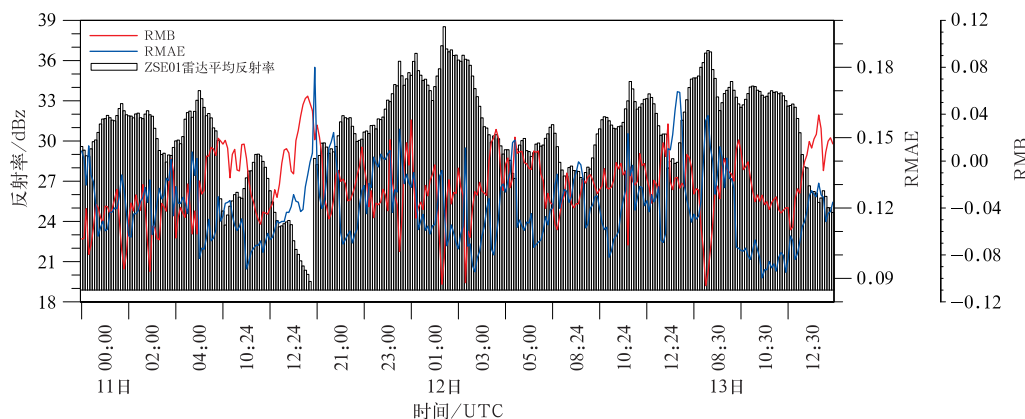


图 10 2022 年 5 月 11—13 日统计指标随时间变化的曲线  
Fig. 10 Time series of statistical indexes during 11—13 May 2022

较小的正值, ZSE01 雷达反射率总体偏差较小, 这与 ZSE01 雷达反射率在强回波中的衰减订正不足有关。

通过比较 ZSE01 雷达和 Z9755 雷达的反射率, 可知, 总体 ZSE01 雷达反射率观测性能较好, 与 Z9755 雷达反射率一致性较高且稳定。但在不同强度的反射率条件下, ZSE01 雷达的偏差情况不同, 小于 25 dBz 时, ZSE01 雷达反射率偏强; 而大于 30 dBz 时, ZSE01 雷达反射率偏弱, 且随着反射率强度的增加, 偏弱程度逐渐加大; 在超过 50 dBz 时偏弱可达 8~10 dB。ZSE01 雷达反射率观测质量较好的反射率区间为 20~40 dBz, 在这一区间内, ZSE01 雷达与 Z9755 雷达反射率偏差较小, 且离散程度较小。

### 3 结论与讨论

本文以深圳市竹子林雨滴谱仪和求雨坛 S 波段雷达作为基准, 对深圳市求雨坛 X 波段雷达反射率质量进行了定量分析, 主要结论如下:

(1) 求雨坛 X 波段雷达整体观测质量较高, 与雨滴谱仪计算得到的反射率和 S 波段雷达反射率均较为一致, CC 较高, 均超过 0.75, RMSE 和 RMB 较小, RMB 为接近于 0 的负值, 反射率整体系统性偏差较小。

(2) X 波段雷达反射率在不同强度下偏差情况不一致, 在小于 25 dBz 时, X 波段雷达反射率偏强, 而大于 25 dBz 时, X 波段雷达反射率偏弱, 且偏弱程度随反射率增加逐渐加大, 在反射率超过 50 dBz 时, 平均偏弱强度可达 8~10 dB。偏差较小的反射率区间在 20~40 dBz。

(3) X 波段雷达在不同强度降水时段表现较为稳定, 反射率变化趋势与雨滴谱计算得到的反射率变化趋势一致, 统计参数的变化幅度较小, RMAE 均在 0.2 以下波动, 而 RMB 在 0 附近波动, 以负值居多。

通过对求雨坛 X 波段雷达反射率的定量分析可知, X 波段雷达反射率整体观测质量和稳定性较高, 但在不同强度下偏差情况不一致是其存在的一个明显问题。这一问题产生的原因可能与衰减订正有关, 在弱反射率时可能存在过度订正的情况, 而在强反射率时, 尤其是对超过 50 dBz 的反射率明显订正不足, 这可能与 X 波段雷达衰减程度过大有关。

在这种情况下, 由于信号较弱, 即使通过衰减订正也难以较为准确还原反射率强度, 从而导致订正不足。在未来工作中, 需要对衰减订正的方法进行调整或重新设计, 当衰减程度较大时, 使用基于单雷达的衰减订正可能会存在较大偏差, 而完全衰减时, 则无法基于单雷达进行衰减订正, 可以尝试使用多雷达进行互相订正, 或进行长波段(S 或 C)雷达与 X 波段雷达的融合, 以结合长波段雷达探测范围大、衰减小和 X 波段雷达时空分辨率高的优点。

此外, 除了反射率的质量之外, X 波段相控阵雷达的双偏振量如差分反射率( $Z_{DR}$ )和差分传播相移率( $K_{DP}$ )也十分重要。高质量的双偏振量是开展灾害性天气识别、定量降水估测等方面研究和业务应用的重要前提。基于一维雨滴谱仪观测资料, 使用 T 矩阵方法亦可计算得到  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$ , 但因一维雨滴谱仪无法观测轴比信息, 需要对雨滴轴比进行假设, 导致计算得到的  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  不准确, 因此目前尚未开展双偏振量的观测质量定量评估分析工作。深圳近期将布设二维雨滴谱仪, 基于一维和二维雨滴谱仪评估分析 X 波段雷达双偏振量观测质量将是下一步工作的重点。

### 参考文献

- 程元慧, 傅佩玲, 胡东明, 等, 2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象, 46(6): 823-836. Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al, 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon, 46(6): 823-836(in Chinese).
- 傅佩玲, 胡东明, 黄浩, 等, 2020. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征[J]. 应用气象学报, 31(6): 706-718. Fu P L, Hu D M, Huang H, et al, 2020. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric phased array radar in 2018[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6): 706-718(in Chinese).
- 李思腾, 马建立, 陈明轩, 等, 2021. 网络化衰减订正方法在北京 X 波段网络化雷达中的应用[J]. 气象学报, 79(5): 804-816. Li S T, Ma J L, Chen M X, et al, 2021. The application of network attenuation correction method on the X-band network radar in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 804-816(in Chinese).
- 李兆明, 陈洪滨, 毕永恒, 等, 2018. 使用金属球定标 X 波段固态天气雷达[J]. 遥感技术与应用, 33(2): 259-266. Li Z M, Chen H B, Bi Y H, et al, 2018. Calibration for X-band solid-state weather radar with metal sphere[J]. Remote Sens Technol Appl, 33(2): 259-266(in Chinese).
- 李哲, 吴翀, 刘黎平, 等, 2022. 双偏振相控阵雷达误差评估与相态识别方法[J]. 应用气象学报, 33(1): 16-28. Li Z, Wu C, Liu L P, et al, 2022. Error evaluation and hydrometeor classification

- method of dual polarization phased array radar[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(1):16-28(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[J]. *气象学报*, 77(3):516-528. Ma J L, Chen M X, Li S T, 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[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3):516-528(in Chinese).
- 梅雨菲, 陈生, 刘陈帅, 等, 2022. 基于雷达观测的 2021 年 6 月珠江口一次水龙卷过程分析[J]. *热带气象学报*, 38(6):825-832. Mei Y F, Chen S, Liu C S, et al, 2022. Analysis of a June 2021 waterspout in the Pearl River Estuary based on two dual polarization radars[J]. *J Trop Meteor*, 38(6):825-832(in Chinese).
- 潘佳文, 彭婕, 魏鸣, 等, 2022. 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析[J]. *气象学报*, 80(5):748-764. Pan J W, Peng J, Wei M, et al, 2022. Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(5):748-764(in Chinese).
- 苏永彦, 刘黎平, 2022. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. *气象*, 48(2):229-244. Su Y Y, Liu L P, 2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. *Meteor Mon*, 48(2):229-244(in Chinese).
- 田聪聪, 张羽, 曾琳, 等, 2021. X 波段相控阵雷达与 S 波段雷达的对比分析[J]. *广东气象*, 43(3):55-59. Tian C C, Zhang Y, Zeng L, et al, 2021. Comparative analysis of X-band phased-array radar and S-band radar[J]. *Guangdong Meteor*, 43(3):55-59(in Chinese).
- 王超, 吴翀, 刘黎平, 2019. X 波段双线偏振雷达数据质量分析及控制方法[J]. *高原气象*, 38(3):636-649. Wang C, Wu C, Liu L P, 2019. Data quality analysis and control method of X-band dual polarization radar[J]. *Plateau Meteor*, 38(3):636-649(in Chinese).
- 吴翀, 刘黎平, 仰美霖, 等, 2021. X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J]. *应用气象学报*, 32(2):200-216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al, 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(2):200-216(in Chinese).
- 吴琼, 仰美霖, 陈林, 等, 2023. 一种星载降水测量雷达和地基天气雷达的频率修正方法[J]. *气象学报*, 81(2):353-360. Wu Q, Yang M L, Chen L, et al, 2023. A frequency correction algorithm for spaceborne precipitation measurement radar and ground-based weather radar[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(2):353-360(in Chinese).
- 夏凡, 张乐坚, 张林, 2021. 基于双线偏振参量对北京 X 波段雷达非降水回波识别方法的研究[J]. *气象*, 47(5):561-572. Xia F, Zhang L J, Zhang L, 2021. Study of recognition algorithm of non-precipitation echo for Beijing X-band radar based on dual polarization parameter[J]. *Meteor Mon*, 47(5):561-572(in Chinese).
- 肖靖宇, 杨玲, 俞小鼎, 等, 2022. 佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降水天气过程的分析[J]. *气象*, 48(7):826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. *Meteor Mon*, 48(7):826-839(in Chinese).
- 肖柳斯, 胡东明, 陈生, 等, 2021. X 波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J]. *气象*, 47(6):703-716. Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al, 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar[J]. *Meteor Mon*, 47(6):703-716(in Chinese).
- 叶开, 杨玲, 马舒庆, 等, 2020. 阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法研究[J]. *气象*, 46(8):1065-1073. Ye K, Yang L, Ma S Q, et al, 2020. Research on high-resolution intensity field fusion method of array weather radar[J]. *Meteor Mon*, 46(8):1065-1073(in Chinese).
- 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等, 2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. *气象*, 45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. *Meteor Mon*, 45(3):330-344(in Chinese).
- 俞小鼎, 郑永光, 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*, 78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3):391-418(in Chinese).
- 张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 等, 2021. 双偏振相控阵雷达与业务雷达的定量对比及观测精度研究[J]. *高原气象*, 40(2):424-435. Zhang W R, Wu C, Liu L P, et al, 2021. Research on quantitative comparison and observation precision of dual polarization phased array radar and operational radar[J]. *Plateau Meteor*, 40(2):424-435(in Chinese).
- 张羽, 吴少峰, 李浩文, 等, 2022. 广州 X 波段双偏振相控阵天气雷达数据质量初步分析及应用[J]. *热带气象学报*, 38(1):23-34. Zhang Y, Wu S F, Li H W, et al, 2022. Data quality analysis and application of Guangzhou X-band dual-polarization phased array radars[J]. *J Trop Meteor*, 38(1):23-34(in Chinese).
- 张哲, 戚友存, 兰红平, 等, 2023. 深圳 S 波段双偏振和 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测组网拼图系统介绍[J]. *气象学报*, 81(3):506-519. Zhang Z, Qi Y C, Lan H P, et al, 2023. Introduction to a radar mosaicking system for quantitative precipitation estimation based on the S-band and X-band phase-array polarimetric radars in Shenzhen[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(3):506-519(in Chinese).
- 张哲, 戚友存, 李东欢, 等, 2022. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. *大气科学*, 46(4):1002-1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al, 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(4):1002-1016(in Chinese).

- 张哲, 戚友存, 朱自伟, 等, 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[J]. 气象学报, 79(5): 786-803. Zhang Z, Qi Y C, Zhu Z W, et al, 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 786-803(in Chinese).
- 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等, 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6): 641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657(in Chinese).
- Bechini R, Chandrasekar V, 2015. A semisupervised robust hydrometeor classification method for dual-polarization radar applications[J]. J Atmos Ocean Technol, 32(1): 22-47.
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. J Appl Meteor, 41(6): 674-685.
- Cao Q, Zhang G F, Brandes E, et al, 2008. Analysis of video disdrometer and polarimetric radar data to characterize rain microphysics in Oklahoma[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(8): 2238-2255.
- Chandrasekar V, Wang Y, Chen H, 2012. The CASA quantitative precipitation estimation system; a five year validation study[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 12(9): 2811-2820.
- Chen H N, Chandrasekar V, 2015. The quantitative precipitation estimation system for Dallas-Fort Worth (DFW) urban remote sensing network[J]. J Hydrol, 531: 259-271.
- Cifelli R, Chandrasekar V, Chen H N, et al, 2018. High resolution radar quantitative precipitation estimation in the San Francisco Bay Area; rainfall monitoring for the urban environment[J]. J Meteor Soc Japan Ser II, 96A: 141-155.
- Faure D, Gaussiat N, Dupuy P, et al, 2017. Quality analysis of the 2016 quantitative precipitation estimates in the French ALPS [C]//Proceedings of the 38th Conference on Radar Meteorology. Chicago: AMS.
- Friedrich K, Higgins S, Masters F J, et al, 2013. Articulating and stationary PARSIVEL disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall[J]. J Atmos Oceanic Technol, 30(9): 2063-2080.
- Heinselman P L, Ryzhkov A V, 2006. Validation of polarimetric hail detection[J]. Wea Forecasting, 21(5): 839-850.
- Hubbert J, Bringi V N, Carey L D, et al, 1998. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in eastern Colorado[J]. J Appl Meteor, 37(8): 749-775.
- Iguchi T, Seto S, Meneghini R, et al, 2018. GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document[R/OL]. NASA Goddard Space Flight Center. [https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2019-05/ATBD\\_DPR\\_201811\\_with\\_Appendix3b.pdf](https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2019-05/ATBD_DPR_201811_with_Appendix3b.pdf).
- Jung Y, Xue M, Zhang G F, et al, 2008a. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part II: impact of polarimetric data on storm analysis[J]. Mon Wea Rev, 136(6): 2246-2260.
- Jung Y, Zhang G F, Xue M, 2008b. Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part I: observation operators for reflectivity and polarimetric variables[J]. Mon Wea Rev, 136(6): 2228-2245.
- Lengfeld K, Clemens M, Münster H, et al, 2014. Performance of high-resolution X-band weather radar networks-the PATTERN example[J]. Atmos Meas Tech, 7(12): 4151-4166.
- Min C, Chen S, Gourley J J, et al, 2019. Coverage of China new generation weather radar network[J]. Adv Meteor, 2019: 5789358.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D; description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3): 730-748.
- Ryzhkov A, Zhang P F, Bukovčić P, et al, 2022. Polarimetric radar quantitative precipitation estimation [J]. Remote Sensing, 14(7): 1695.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(5): 557-570.
- Tabary P, 2007. The new French operational radar rainfall product. Part I: methodology[J]. Wea Forecasting, 22(3): 393-408.
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al, 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. 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<sup>2</sup> [J]. J Atmos Ocean Technol, 31(6): 1276-1288.
- Waterman P C, 1965. Matrix formulation of electromagnetic scattering[J]. Proc IEEE, 53(8): 805-812.
- Zhang G F, Gao J D, Du M Y, 2021. Parameterized forward operators for simulation and assimilation of polarimetric radar data with numerical weather predictions[J]. Adv Atmos Sci, 38(5): 737-754.
- Zhang J, Howard K, Langston C, et al, 2016. Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation; initial operating capabilities[J]. Bull Amer Meteor Soc, 97(4): 621-638.
- Zhang J, Tang L, Cocks S, et al, 2020. A dual-polarization radar synthetic QPE for operations[J]. J Hydrometeorol, 21(11): 2507-2521.
- Zhu Z W, Qi Y C, Cao Q, et al, 2021. Conversion of the vertical profile of reflectivity from Ku-band to C-band based on the drop size distribution measurements of the global precipitation measurement mission dual-frequency precipitation radar [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 59(7): 5630-5641.

(本文责编: 俞卫平)