

李力,徐芬,刘希,等,2024.雨滴谱数据在 S 波段双偏振天气雷达数据质量评估中的应用[J].气象,50(2):210-220. Li L, Xu F, Liu X, et al, 2024. Application of raindrop disdrometer data in data quality evaluation of S-band dual-polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 50(2):210-220(in Chinese).

雨滴谱数据在 S 波段双偏振天气雷达 数据质量评估中的应用*

李 力¹ 徐 芬^{2,3} 刘 希^{2,3} 陈 刚^{2,3}

1 南京市气象局,南京 210019

2 南京气象科技创新研究院,南京 210019

3 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210019

提 要: 结合 T-Matrix 方法和雨滴谱仪数据反演双偏振参量,设计了一种雨滴谱反演评估方法(雨滴谱法),利用其反演结果可对双偏振天气雷达数据进行评估。将此方法应用于不同类型降水过程的雷达偏振参量数据质量评估,结果表明:满足微雨条件时,雨滴谱法与传统的微雨滴法均能有效监测由雷达系统误差导致的观测偏差,且评估结果十分接近;不满足微雨条件时,雨滴谱法评估的不同类型降水过程的雷达数据质量与满足微雨条件下的评估结果十分接近,客观证明了系统调整后雷达运行良好、数据质量稳定;不同雨强(R)情况下,雨滴谱法的评估结果具有一致性。 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\leq R<20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,雷达观测的数据质量最为稳定。该雨滴谱法适用范围广,可动态评估双偏振雷达偏振参量质量,有助于雷达调整和数据校正。

关键词: 雨滴谱,双偏振天气雷达,质量评估,差分反射率因子

中图分类号: P412, P416

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.122801

Application of Raindrop Disdrometer Data in Data Quality Evaluation of S-Band Dual-Polarization Weather Radar

LI Li¹ XU Fen^{2,3} LIU Xi^{2,3} CHEN Gang^{2,3}

1 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019

2 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210019

3 Key Laboratory of Transportation of Meteorology, CMA, Nanjing 210019

Abstract: This article uses the T-Matrix method and raindrop spectrometer data to invert the dual-polarization parameters, and the inversion result is used to evaluate the dual-polarization weather radar data, which is the raindrop spectrum inversion evaluation method. Then this method is used to evaluate the data quality of polarization parameter in different types of precipitation. The results show that under the conditions of micro-raindrop, the raindrop spectrum inversion evaluation method can effectively monitor the systematic deviation of the polarization parameters caused by the radar systematic error as the same as micro-raindrop method, and the evaluation results of the two methods are basically consistent. When the micro-raindrop condition is not satisfied, the radar polarization parameter quality of different types of precipitation processes evaluated by the raindrop spectrum inversion evaluation method is basically consistent with

* 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2142203)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金项目(2021Z003)、南京市气象自立科研项目(NJ202311)共同资助

2022 年 3 月 14 日收稿; 2023 年 12 月 28 日收修定稿

第一作者:李力,主要从事天气预报预警和新型探测资料的应用研究. E-mail: lilinj163@163.com

通讯作者:徐芬,主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. E-mail: xufen1130@tom.com

the evaluation results under the conditions of micro-raindrop, reflecting the objective fact that the radar operates well and the data quality is stable. The raindrop spectrum inversion evaluation method has consistency in evaluating radar polarization parameters under different rainfall intensities. When the rainfall intensity of precipitation process is $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and $< 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, the data quality of the dual-polarization radar is the most stable. The raindrop spectrum inversion evaluation method has a wide range of applications and can be used for real-time monitoring of dual-polarization radar data quality. The evaluation results can provide timely reference for radar calibration and data correction.

Key words: raindrop spectrum, dual-polarization radar, quality evaluation, differential reflectivity

引言

双偏振天气雷达通过发射水平和垂直两个方向的电磁波,可获取相较常规天气雷达更多的观测信息,除常规观测参量外,还有可表征粒子形状、大小、空间取向等信息的四种双偏振参量:差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)、差传播相位(Φ_{DP})和差分相移率(K_{DP}),因此,可提升雷达观测能力,从而提高降水、强对流天气预警预报服务能力。2016年起,中国气象局在双偏振天气雷达技术升级改造业务试验基础上(邵楠等,2018),逐步在全国开展相关升级工作。升级后的天气雷达相较于之前,对各种天气的监测能力进一步提升:(1)利用双偏振雷达的 Z_{DR} 和CC特征变化可表征冰雹空中翻滚现象及其下落融化过程外包水膜现象, Z_{DR} 柱的出现可指示上升运动,且对降雹单体不同成长阶段也具有指示作用(潘佳文等,2020;高丽等,2021;何清芳等,2022;阮悦等,2022);(2)双偏振参量的使用能有效提升融化层识别准确率(夏凡等,2023),对雷达水凝物相态分类与定量降水估测等气象现代化业务有一定支撑作用;(3)通过 Z_{DR} 估算的降水粒子下落末速度效果更好,可为获取中小尺度天气系统三维风场结构提供参考依据(杨华等,2023);(4)双偏振雷达在超级单体钩状回波的末端处探测到的龙卷碎片特征(TDS),在龙卷监测预警业务中非常有用,尤其在视觉无法确认龙卷是否已经在地面生成的情况下,TDS可以帮助确认龙卷的发生和位置(李昭春等,2021);(5)双偏振参量可以反演天气系统中水成物粒子相态变化,从而能够提升雷达定量降水估测能力和雷暴单体预警能力(李晓敏等,2017;张哲等,2021)。但是,雷达数据质量易受自身硬件、算法以及外部因素(地物遮挡、信号衰减等)影响,也会因此造成观测误差。因此,在使用双偏振雷达数据前,需

首先确认双偏振雷达是否存在系统误差(赵世颖等,2015;李喆等,2016;吕博等,2016;Liu et al,2010;Hu et al,2012)。杜牧云等(2013)通过雷达质量指数算法将影响雷达资料质量的主要因子(如波束展宽、波束遮挡、地物杂波污染、电磁波衰减等),以距离库为单元按0~1的取值范围量化处理,据此对雷达资料质量进行定量评估。胡志群等(2014)还对比了几种常用的系统误差标定方法,包括太阳法、垂直指向法、仰角法、地物法、干雪法、微雨滴法等,认为微雨滴法理论清晰、无需特定扫描模式,只需从常规体扫观测数据中筛选满足信噪比(signal to noise ratio,SNR)、水平反射率因子(Z_{H})等特定阈值条件的数据,即可对 Z_{DR} 进行较为准确的误差分析;李思腾等(2019)基于理论设计了标准差分析法对X波段雷达资料进行质量评估;张林等(2021)则利用雨量计联合SA天气雷达数据定量评估移动X波段双偏振雷达数据质量,在评估基础上提出了一种综合利用多偏振参量的偏正订正方法。

由上可知,及时准确地评估出雷达双偏振参量的系统误差,有助于及时校正雷达,为天气预报预警工作提供可靠观测保障。

微雨滴法是目前应用最广泛的双偏振参量质量评估方法之一。其不依赖于雷达硬件,但需保证观测的降水粒子近似为球形,在实际操作中需筛选零度层以下、 $Z_{\text{H}} < 25 \text{ dBz}$ (或更小)、 $\text{CC} \geq 0.95$ 的区域(胡东明等,2019),无法适用于所有降水过程;此外,可能会受到地物、避雷针或强对流降水过程边缘效应等因素影响的数据也要剔除,有一定局限性。

激光雨滴谱仪是以激光为基础的新一代高级光学粒子测量器及气象传感器,可同时直接测量降水所有液体和固体粒子的尺度和速度,并对降水粒子进行分类(李力等,2018),可满足气象、水文的传感探测器需求,并达到了世界气象组织和美国国家气象局相关技术规定的要求。陈刚等(2022)利用雨

滴谱仪和双偏振雷达研究了河南“21·7”特大暴雨过程在 2021 年 7 月 19—21 日期间的降水微物理特征变化。Ding et al(2020)、陈焱等(2022)研究了雨滴谱参量与 C 波段双偏振多参量之间的反演。Zhang et al(2001)使用 T-Matrix 方法对 S 波段双偏振雷达进行了散射反演,得到粒子前向和后向散射幅度,并由此计算 Z_H 、 Z_{DR} 及 K_{DP} 等双偏振参量,得出了一套使用雨滴谱数据求取双偏振参量的方式;吴林林(2014),黄兴友等(2019),Gatidis et al(2022)等也使用该方法开展了研究工作。这些研究为利用各种类型降水过程的雨滴谱数据开展双偏振天气雷达相关数据质量评估工作提供了有益参考。

因此,本文基于雨滴谱数据和 T-Matrix 方法设计了一套双偏振参量(以下简称偏振参量)质量评估方法:首先利用雨滴谱数据反演的偏振参量,与对应雷达偏振参量进行偏差评估,并与采用微雨滴法评估的结果进行比对以确定其可行性;再对不同类型的降水过程 and 不同雨强的降水过程进行雷达偏振参量数据质量评估工作;最终实现一套可用于实时监控雷达偏振参量系统偏差的质量评估技术,为及时标定雷达提供数据支撑。

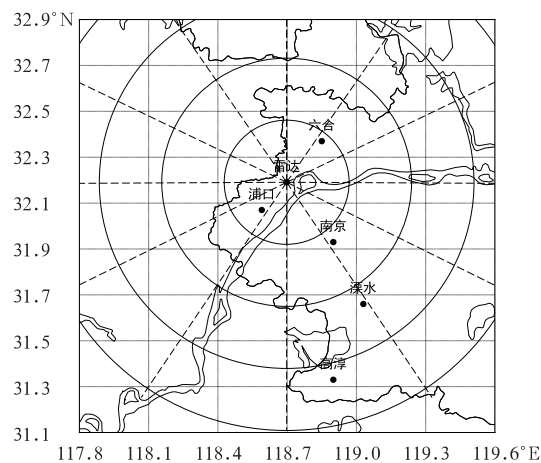
1 数据选取

本文用于开展评估工作的雨滴谱仪分别位于江苏南京的南京、六合、浦口、溧水、高淳共 5 个基本站内,型号为 OTT Parsivel 型(OTT1);S 波段双偏振天气雷达(CINRAD/SAD)架设于南京龙王山;5 部仪器及雷达具体位置如图 1 所示。由该图可见,雨滴谱仪在雷达探测范围内不同距离上均匀分布,其数据可有效应用于质量评估工作。

1.1 雨滴谱数据预处理

5 部 OTT1 雨滴谱仪的数据频率为 1 min,其谱数据分为直径和速度通道各 32 个,本文主要使用直径通道数据。由仪器使用说明书可知,该设备最低两个通道(0.062 mm 和 0.187 mm)的观测数据目前尚缺乏有效的校准手段,所以本文只使用另外 30 个通道的谱数据开展工作。李力等(2018)对这 5 部雨滴谱仪数据进行了评估,认为在降雨过程中雨滴谱仪雨量数据可代替雨量计应用于科研业务中。

通常认为雨滴在直径 ≤ 1 mm 的情况下为球形粒子(张贵付,2018)。为准确评估天气雷达偏振参量对球形粒子的探测偏差,可根据雨滴谱数据反演



注:图中圆圈为天气雷达距离圈,半径为 50 km。

图 1 南京 5 部 OTT1 雨滴谱仪与雷达站点布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the layout of five OTT1 raindrop disdrometers and radar in Nanjing

雨滴的平均直径,本文通过计算质量加权平均直径 D_m (Chen et al,2012)来代表雨滴直径。

当雨量太小时,雨滴谱仪观测的数据质量将无法保证,故在应用雨滴谱数据开展评估工作前,先剔除降水粒子个数小于 10 个或雨强 $< 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 对应时次的数据。

1.2 双偏振天气雷达数据选取

2019 年,南京双偏振天气雷达(以下简称南京雷达)在 3 月完成双偏振功能升级改造,并于 4—9 月(汛期)进行试运行,10 月后针对运行状况进行了系统偏差调整。此后,该部雷达投入业务运行至今。为检验本文评估方法是否能有效监控由雷达系统偏差造成的观测数据偏差,本文将同时使用调整前和调整后的雷达数据开展质量评估工作。Chen et al(2021)研究发现,当雨强 $< 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时(或液态水含量在 $0 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时),基于雷达数据反演的降水粒子分布特征与雨滴谱观测的降水粒子分布特征较为一致。所以本文选取雨强均为 $< 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水过程,包括了积云、积层混合和层云降水,用以检验设计的评估方法是否适用广泛,降水日期、站点和降水类型如表 1 所示,共 7224 个雷达体扫时次和对应的雨滴谱时次进入数据评估。

2 评估方法

本文设计的评估方法是一种可实时自动化,且

表 1 降水过程一览表
Table 1 List of precipitation processes

阶段	日期(年.月.日)	降水类型	站点,雨量/mm
雷达调整前	2019.4.21	层云降水	南京站,2.8
	2019.5.26	积层混合、层云降水	南京站,26.5
	2019.6.6	积云、积层混合降水	南京站,34.8
	2019.6.12	层云降水	南京站,7.9
	2019.6.18	积层混合降水	南京站,22.6
	2019.6.20	积层混合、层云降水	南京站,13.5
	2019.7.12	积层混合、层云降水	南京站,31.8
	2019.7.13	积层混合、层云降水	高淳站,17.7
	2019.8.10	积云、积层混合降水	溧水站,84.9
	2019.9.2	积层混合降水	溧水站,33.6
雷达调整后	2019.11.17	层云降水	溧水站,6.8
	2020.6.12	层云降水	南京站,7.9
	2020.6.15	积云、积层混合降水	浦口站,63.8
	2020.6.16	积云、积层混合降水	南京站,63.8
	2020.6.17	积层混合降水	浦口站,25.7
	2020.6.23	积层混合、层云降水	六合站,12.9
	2020.6.28	积云、积层混合降水	高淳站,84.7
	2020.6.29	积云、积层混合降水	六合站,64.6
	2020.7.5	积云、积层混合降水	溧水站,78.8
	2020.7.6	积云、积层混合降水	高淳站,78.2
	2020.7.11	积云、积层混合降水	浦口站,62.7
	2020.7.13	积层混合降水	高淳站,69.4
	2020.7.17	积云、积层混合降水	浦口站,89.7
	2020.7.18	积层混合降水	浦口站,30.6
	2020.8.8	积云、积层混合降水	六合站,83.0
	2020.8.9	积云、积层混合降水	六合站,56.3
	2020.8.10	积云、积层混合降水	浦口站,41.6
	2020.8.19	积云降水	浦口站,44.0

不受大部分降水类型约束的双偏振雷达数据质量评估方法。为验证该方法是否能有效评估偏振参量数据质量,首先筛选符合微雨条件的层云降水过程,将该方法的评估结果与受到广泛认可的微雨滴法进行对比;有效性得到验证之后,再对所有类型降水过程的偏振参量数据开展评估工作。

本文所选取的降水个例以移动较慢的大范围层云降水和积层混合云降水为主,以南京雷达体扫时次为基准,选取与其最近时次的雨滴谱数据和雷达数据进行匹配;为保证两种观测仪器观测对象变化的一致性,选取雨滴谱仪和其上空高度 800 m 以下的雷达观测数据进行对比。浦口、南京、六合的 3 个雨滴谱仪所在地距离雷达站较近(分别距雷达站 20、33、37 km),采用 0.5°和 1.5°(800 m 以下)仰角的雷达数据进行评估;而溧水、高淳的 2 个雨滴谱仪所在地距离雷达站略远,只采用 0.5°仰角的雷达数据进行评估。进入评估的数据对共计 7224 个时次。

2.1 雨滴谱反演评估方法

由于 OTT1 雨滴谱仪只能观测雨滴的平均直径分布情况,本文首先采用 Brandes et al(2002)提出的雨滴轴比经验关系式计算表征雨滴形状椭球轴比。再使用雨滴谱数据结合 T-Matrix 方法进行偏振参量求取。T-Matrix 方法可得到后向散射相矩阵(也称 Mueller 矩阵)和前向散射振幅矩阵,其中 Z_H 、 Z_{DR} 和 CC 都基于后向散射(冯亮等,2019)。

结合 Z_H 、 Z_{DR} 和 CC 的计算公式(Zhang et al, 2001;Shao et al,2020),即可根据雨滴谱数据计算得到所需的偏振参量。选取 2020 年 6 月 12 日一次降水过程,根据质量加权平均直径计算公式得到的降水粒子直径结果,选取直径 ≤ 1 mm 的球形粒子进行偏振参量反演,结果如图 2 所示。图 2 表明,在基本满足球形粒子的情况下,由雨滴谱数据计算得到的 Z_{DR} 概率密度分布众数中值为 0.1 dB,CC 为

1,准确反映了双偏振雷达对球形粒子特征观测结果,可将雨滴谱数据反演的偏振参量作为真值,用于双偏振天气雷达数据质量评估。利用雨滴谱数据反演的偏振参量,与对应时次双偏振雷达的观测结果进行比较,可实现对雷达数据的评估,即雨滴谱反演评估方法(以下简称雨滴谱法)。

2.2 微雨滴法

微雨滴法是根据毛毛雨等小的降水粒子近似为球形这一物理特性而发展起来的 Z_{DR} 标定方法。Ryzhkov et al(2005)研究表明小雨和干雪区的 Z_{DR} 近似于 0 dB, CC 近似于 1,因此层状云中的小雨区和融化层以上的干雪区数据可以用来检验雷达的定标效果,目前被广泛应用于我国双偏振雷达数据质量评估工作中。该方法关键之处在于,进入评估的雷达观测数据必须是小雨或者干雪区域,因此需要设计严格的数据筛选准则选取符合要求的数据。胡志群等(2014)在用微雨滴法标定 C 波段偏振雷达数据时,除了采用指标 $Z_H < 15$ dBz 外,还增加了 $SNR > 26$ dB 和 $1 \text{ km} < \text{回波距离} < 30 \text{ km}$ 的指标;胡东明等(2019)在评估广东 CINRAD/SAD 双偏振雷达数据时,遵循如下数据选取原则:(1)高度位于 0°C 层以下, $Z_H < 15$ dBz;(2) $CC \geq 0.95$;(3) $SNR \geq 20$,用于本文评估的雷达型号与胡东明等(2019)的一致,因此也采用同样数据选取原则筛选

用于微雨滴法的雷达偏振参量数据;(4)为了有效去除杂波,进一步增加如下数据选取条件: $Z_H > 10$ dBz。

为增加适用于微雨滴法的评估数据集,部分降水过程还使用了干雪区域,筛选方法参考胡东明等(2019)。

3 评估结果分析

3.1 不同评估方法对比分析

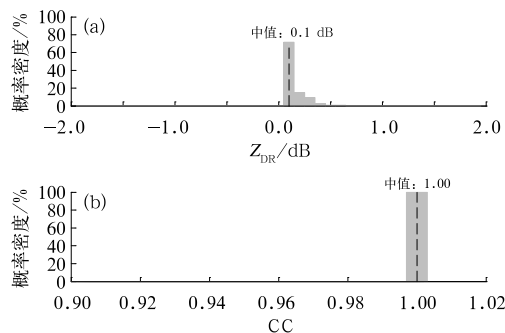
利用南京雷达调整前后的观测数据(表 1 中层状云降水过程),对比微雨滴法和雨滴谱法。微雨滴法的 Z_{DR} 标定误差,调整前在 $-2.0 \sim 1.5$ dB,调整后在 0.2 dB 左右。该结果表明,在满足微雨条件下,微雨滴法有效评估出了雷达调整前后观测数据质量的提升。

图 3 为 2019 年 4 月 21 日降水过程(雷达调整前,层云降水)的南京雷达 0.5° 仰角观测结果。如图 3a 所示,此次降水过程中, Z_{DR} 值几乎都小于 0 dB,大多数位于 $-2 \sim -1$ dB,说明南京雷达观测 Z_{DR} 存在明显低估,具有较明显的系统性偏差。图 4 为同一降水过程和探测仰角下,南京雷达观测的 Z_{DR} 和 CC 在微雨区域和干雪区域的概率密度分布。结果显示,微雨和干雪区 Z_{DR} 的众数中值为 -1.5 dB,可认为标定误差均约为 -1.5 dB;CC 的众数中值为 0.99,可认为标定误差均约为 0.99。

图 5、图 6 为 2019 年 11 月 17 日降水过程(雷达调整后,层云降水)的南京雷达 0.5° 仰角观测结果和 Z_{DR} 、CC 在微雨区域、干雪区域的概率密度分布。图 5a 显示 Z_{DR} 主要位于 $-0.5 \sim 1.5$ dB。图 6 表明,南京雷达在微雨和干雪区观测的 Z_{DR} 的标定误差均约为 0.2 dB,CC 的标定误差均约为 1。

上述结果既反映了微雨滴法评估出了南京雷达调整前后观测数据质量的提升,表明其在由雷达系统偏差导致的数据质量监测方面是行之有效的,也说明了经过系统调整,南京雷达观测的 Z_{DR} 和 CC 可较为真实地反映降水的微物理特征。

同样的观测数据,利用雨滴谱法进行质量评估(表略)。结果表明调整前 Z_{DR} 均方根误差约为 1.9 dB,平均偏差约为 -1.9 dB(雷达观测数据小于雨滴谱反演数据), Z_{DR} 系统偏差为 1.9 dB;调整后 Z_{DR} 均方根误差约为 0.5 dB,平均偏差约为 0.1 dB(雷达观测数据大于雨滴谱反演数据), Z_{DR} 系统偏差为 0.2 dB,



注:虚线为概率密度分布众数中值。

图 2 雨滴谱数据反演的 2020 年 6 月 12 日层云降水过程偏振参量概率密度分布

(a) Z_{DR} , (b) CC

Fig. 2 Probability density distribution of polarization parameter inversion from raindrop spectral data during the stratiform precipitation on 12 June 2020

(a) Z_{DR} , (b) CC

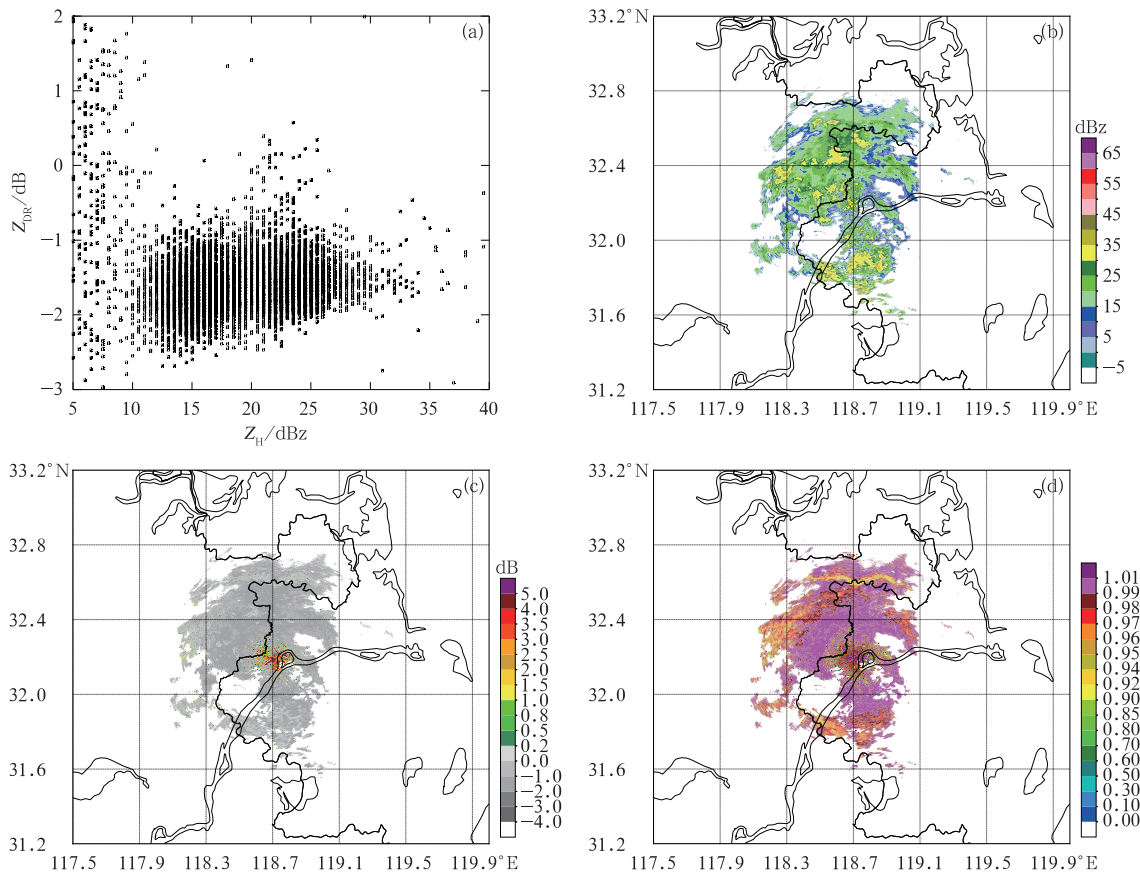
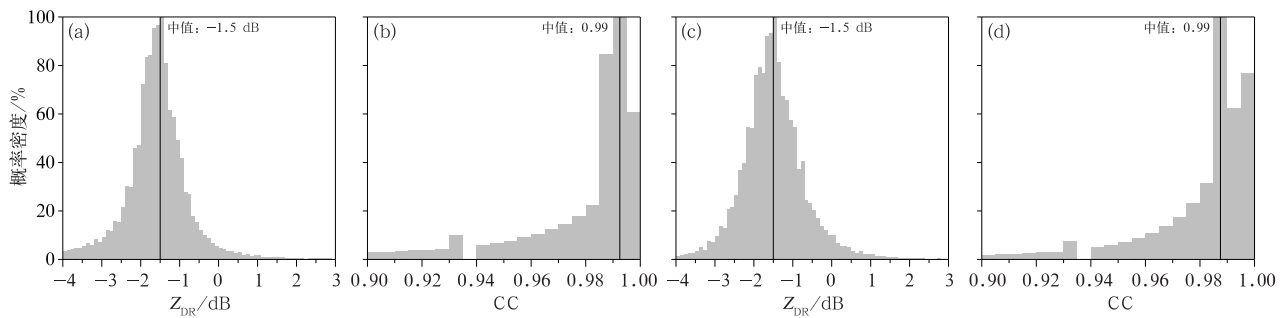


图3 2019年4月21日层云降水过程南京双偏振天气雷达0.5°仰角观测

(a) Z_{DR} - Z_H 散点图, (b) Z_H , (c) Z_{DR} , (d) CC

Fig. 3 Observation of Nanjing Dual-Polarization Weather Radar at 0.5° elevation during the stratiform precipitation on 21 April 2019

(a) scatter of Z_{DR} - Z_H , (b) Z_H , (c) Z_{DR} , (d) CC



注:实线为概率密度分布众数中值。

图4 南京双偏振雷达2019年4月21日层云降水过程的偏振参量概率密度分布

(a)微雨区 Z_{DR} , (b)微雨区 CC, (c)干雪区 Z_{DR} , (d)干雪区 CC

Fig. 4 Probability density distribution of Nanjing Dual-Polarization Weather Radar polarization parameter during the stratiform precipitation on 21 April 2019

(a) Z_{DR} in the micro rain area, (b) CC in the micro rain area, (c) Z_{DR} in dry snow area, (d) CC in dry snow area

此结果与微雨滴法相似。

3.2 不同降水类型的雷达数据质量评估

3.1节证明了雨滴谱法在微雨条件下的可行

性。为验证其较之微雨滴法的适用范围广泛性,本节选取同样层云降水过程,首先选取粒子直径分别 $>1\text{ mm}$ 和 $\leq 1\text{ mm}$ 的雷达观测数据,再选取不同类型降水过程观测数据,分别对偏振参量进行质量评估。

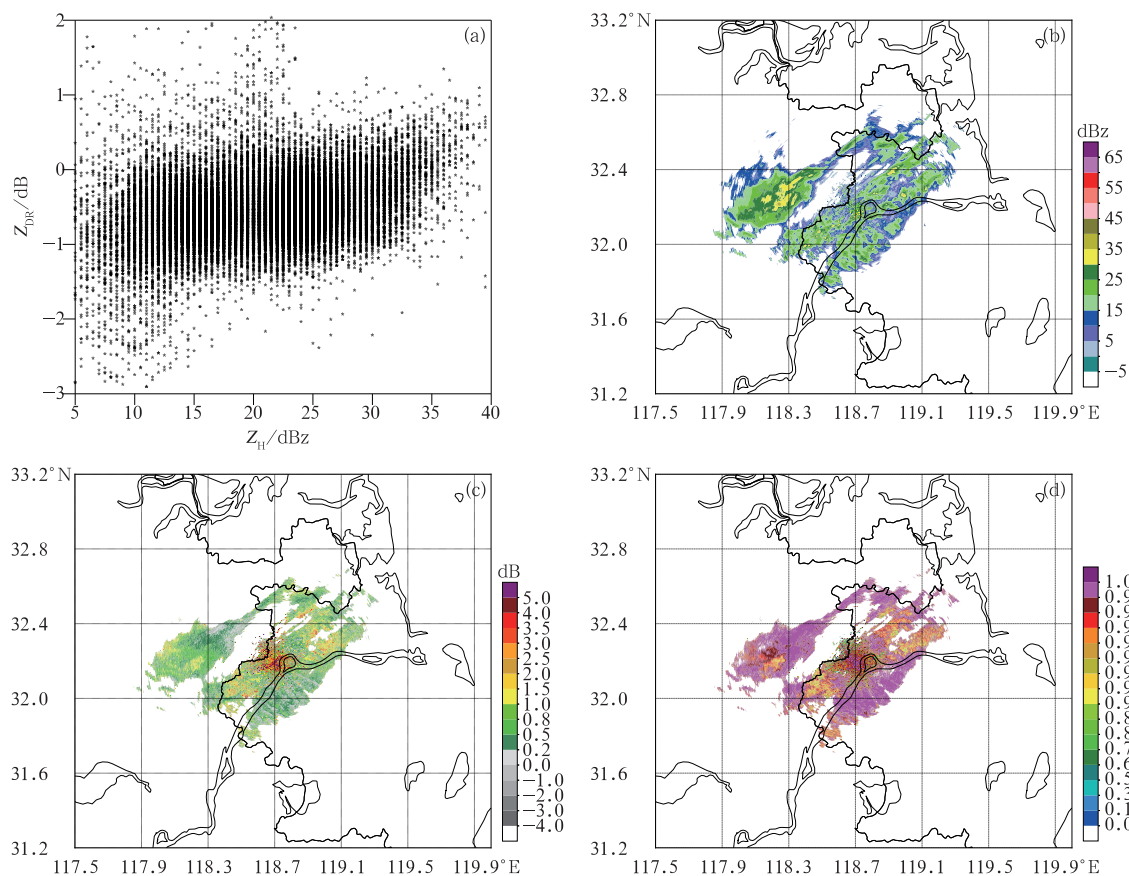
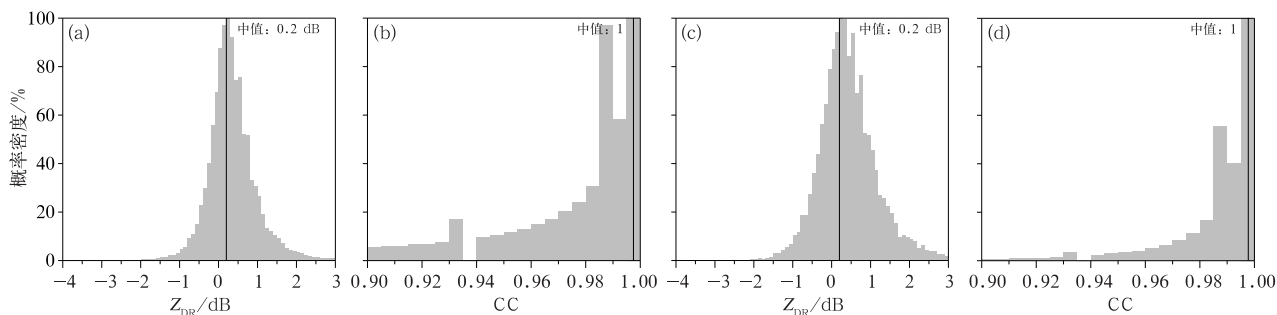


图 5 2019 年 11 月 17 日层云降水过程南京双偏振天气雷达 0.5°仰角观测

(a) $Z_{DR}-Z_H$ 散点图, (b) Z_H , (c) Z_{DR} , (d) CC

Fig. 5 Observation of Nanjing Dual-Polarization Weather Radar at 0.5° elevation during the stratiform precipitation on 17 November 2019

(a) scatter of $Z_{DR}-Z_H$, (b) Z_H , (c) Z_{DR} , (d) CC



注:实线为概率密度分布众数中值。

图 6 南京双偏振雷达 2019 年 11 月 17 日层云降水过程的偏振参量概率密度分布

(a) 微雨区 Z_{DR} , (b) 微雨区 CC, (c) 干雪区 Z_{DR} , (d) 干雪区 CC

Fig. 6 Probability density distribution of Nanjing Dual-Polarization Weather Radar polarization parameter during the stratiform precipitation on 17 November 2019

(a) Z_{DR} in the micro rain area, (b) CC in the micro rain area,

(c) Z_{DR} in dry snow area, (d) CC in dry snow area

根据两次层云降水过程不同粒径下的质量评估结果(表 2),层云降水过程中最大平均粒子直径都

<1.8 mm。结果表明,雨滴谱法对不同粒径降水的 Z_{DR} 的评估结果十分接近,南京雷达调整前后的平均

偏差分别为 1.8~1.9 dB 和 0.0~0.2 dB,说明调整之后南京雷达数据质量有较大改进。

图 7 为采用雨滴谱法对南京雷达观测的一次积层混合云降水过程的双偏振参量的评估结果。2020 年 7 月 13 日,受到副热带高压 588 dagpm 线和 850 hPa 切变线的影响,南京市高淳地区出现暴雨,00—23 时,13 个自动站累计降水量超过 50 mm,高淳站达 69.4 mm。图 7 显示,雨滴谱数据反演的 Z_H 和 CC 与南京雷达的观测结果较为一致。计算雨滴谱反演结果和雷达观测的平均偏差,3 个偏振参量均为雨滴谱反演结果略大: Z_H 约 1.2 dBz, Z_{DR} 约 0.2 dB, CC 约 0.004。说明调整后南京雷达的数据质量基本稳定。

为进一步检验雨滴谱法的有效性,本文将表 1 中 2020 年所有降水过程按雨强 R 的不同,分为四种情况($R \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 20 \text{ mm} \cdot$

h^{-1} 、 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)分别计算 Z_{DR} 的平均系统偏差,以验证雨滴谱法在不同雨强下的评估结果是否一致,结果如图 8 所示。

需要说明的是,由 1.2 节可知,本文选取的均为 $R < 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水过程,所以图 8a 是 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间段的 Z_{DR} 平均系统偏差,结果约为 0.40 dB;当 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时(图 8b),结果约 0.05 dB; $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时(图 8c),结果约为 0.09 dB;当 $0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时(图 8d),结果约为 0.18 dB。综上所述,2020 年南京雷达在大部分降水过程中观测所得偏振参量的数据质量较为稳定,并且,雨滴谱法在不同雨强的情况下对南京雷达偏振参量的评估结果具有一致性。

表 2 基于雨滴谱法不同粒径 Z_{DR} 质量评估

Table 2 Quality evaluation results of Z_{DR} with different particle sizes based on raindrop spectrum inversion evaluation method

粒径大小	降水过程	雷达观测结果(Z_{DR}/dB)	OTT 反演结果(Z_{DR}/dB)	平均偏差/ dB
微雨	2019 年 4 月 21 日	-1.7	0.1	1.8
($d \leq 1 \text{ mm}$)	2019 年 11 月 17 日	0.1	0.1	0
其他	2019 年 4 月 21 日	-1.6	0.3	1.9
($d > 1 \text{ mm}$)	2019 年 11 月 17 日	0.3	0.5	0.2

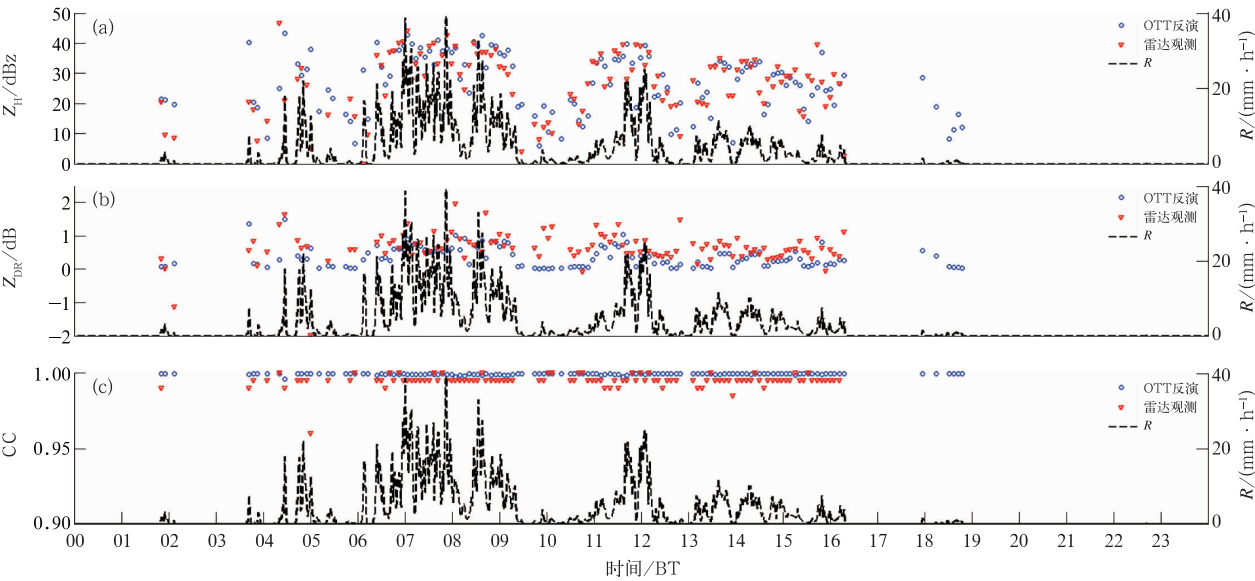


图 7 2020 年 7 月 13 日积层混合云降水过程雷达观测的双偏振参量和高淳站雨滴谱数据反演时间演变
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC

Fig. 7 Time variation of dual-polarization parameters observed by weather radar and retrieved from raindrop spectrum data at Gaochun Station during the embedded convective cloud precipitation on 13 July 2020
(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC

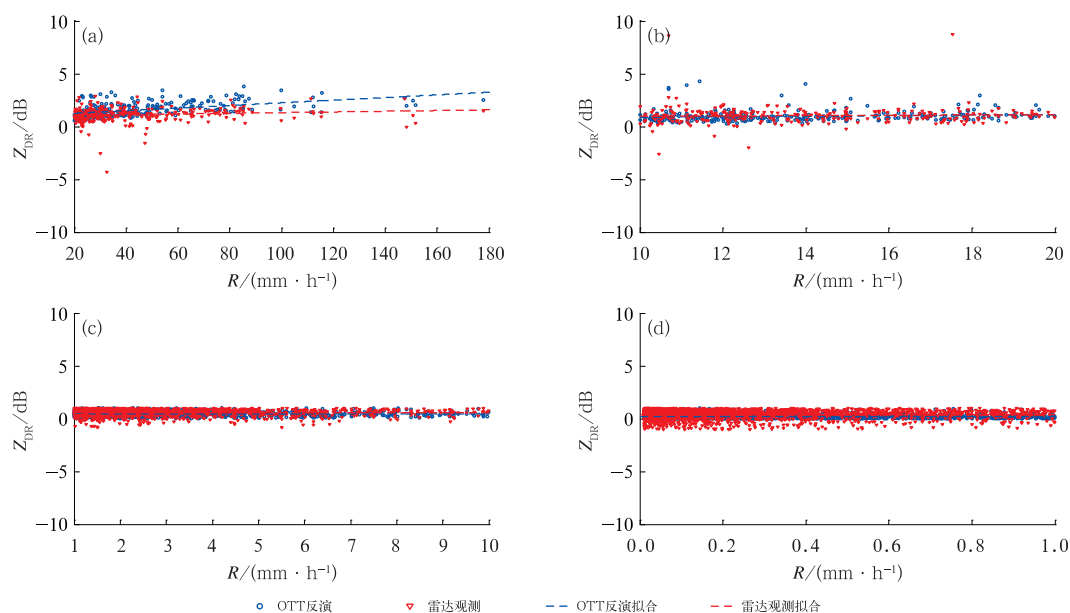


图 8 基于雨滴谱数据反演评估方法的 2020 年南京不同雨强下雷达 Z_{DR} 偏差评估

(a) $R \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,

(c) $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (d) $0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 8 Bias evaluation of Nanjing Weather Radar Z_{DR} in 2020 based on raindrop spectrum data inversion evaluation method for different rain-intensities

(a) $R \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,

(c) $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (d) $0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R < 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

4 结论与讨论

目前气象业务中采用的同发同收技术体制的 CIRAD/SAD 型号双偏振天气雷达,受自身硬件、算法以及外部因素(地物遮挡、信号衰减等)影响,容易造成偏振参量的系统偏差。及时准确地评估出雷达偏振参量的系统误差,有助于及时校正雷达,为天气预报预警工作提供可靠观测保障。本文以 2019—2020 年的南京雷达数据为例,采用了一种基于雨滴谱数据的评估方法对偏振参量数据质量进行评估,得到以下结论。

(1)在满足微雨条件下,本文采用的雨滴谱法与微雨滴法均能有效监测由雷达系统误差导致的雷达观测偏振参量的系统偏差。评估结果表明,南京双偏振天气雷达调整后, Z_{DR} 测量偏差在 0.2 dB 左右,满足系统设计指标要求。

(2)在不满足微雨条件下,利用雨滴谱法对不同类型降水过程的南京雷达偏振参量的评估结果与微雨条件下十分接近,雨滴谱数据反演的 Z_{DR} 和 CC 与

南京雷达的观测结果较为一致,两者偏振参量的平均偏差: Z_{DR} 约为 0.2 dB,CC 约为 0.004,说明调整后南京雷达的数据质量一直比较稳定,雨滴谱法可用于实时监控雷达数据质量。

(3)对不同雨强等级的降水过程雷达 Z_{DR} 数据质量进行评估发现:2020 年南京雷达在大部分降水过程中观测所得偏振参量的数据质量较为稳定,且雨滴谱法在不同雨强情况下,对南京雷达偏振参量的评估结果具有一致性;当 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, Z_{DR} 平均系统偏差约为 0.05 dB,即双偏振雷达在该雨强下观测质量最为稳定。

综上,本文采用的雨滴谱法初步将雨滴谱数据应用于雷达数据质量评估工作中。比起微雨滴法,雨滴谱法适用范围更广,可动态评估双偏振雷达偏振参量质量,有助于雷达调整和数据校正。最后需要说明的是,本文的研究基于 2019—2020 年南京天气雷达观测数据,评估结果并不代表该站雷达长期的数据质量,且观测的极端强降水过程较少,无法说明雨滴谱法在强降水过程中的适用能力。尚需今后持续收集不同类型的降水过程数据(尤其是极端强

降水过程),并继续改进方法。

参考文献

- 陈刚,赵坤,吕迎辉,等,2022.河南“21·7”特大暴雨过程微物理特征变化分析[J].中国科学:地球科学,52(10):1887-1904. Chen G, Zhao K, Lv Y H, et al, 2022. Variability of microphysical characteristics in the “21·7” Henan extremely heavy rainfall event [J]. Sci China Earth Sci, 52(10):1887-1904(in Chinese).
- 陈垚,寇蕾蕾,蒋银丰,等,2022.基于新型观测算子的双偏振雷达雨滴谱变分反演[J].热带气象学报,38(6):854-869. Chen Y, Kou L L, Jiang Y F, et al, 2022. Variational raindrop size distribution retrieval from dual-polarimetric radar based on a new observation operator[J]. J Trop Meteor, 38(6):854-869(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的定量评估[J].气象学报,71(4):754-768. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al, 2013. A quantitative evaluation of the data quality of dual linear polarimetric Doppler radar[J]. Acta Meteor Sin, 71(4):754-768(in Chinese).
- 冯亮,肖辉,罗丽,2019. T矩阵散射模拟双偏振测雨雷达偏振及衰减特性[J].计算物理,36(2):189-202. Feng L, Xiao H, Luo L, 2019. Simulation of polarization characteristics and attenuation of dual-polarization rain-measuring radar with T-Matrix methods[J]. Chin J Comput Phys, 36(2):189-202(in Chinese).
- 高丽,潘佳文,蒋璐璐,等,2021.一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J].气象,47(2):170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell [J]. Meteor Mon, 47(2):170-182(in Chinese).
- 何清芳,林文,张深寿,等,2022.闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J].气象,48(7):856-867. He Q F, Lin W, Zhang S S, et al, 2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian[J]. Meteor Mon, 48(7):856-867(in Chinese).
- 胡东明,张羽,傅佩玲,等,2019. CINRAD/SA 雷达双偏振升级数据质量分析评估[J].气象科技,47(2):207-213. Hu D M, Zhang Y, Fu P L, et al, 2019. Quality evaluation about dual-polarimetric upgrading data of CINRAD/SA radar[J]. Meteor Sci Technol, 47(2):207-213(in Chinese).
- 胡志群,刘黎平,吴林林,2014. C波段偏振雷达几种系统误差标定方法对比分析[J].高原气象,33(1):221-231. Hu Z Q, Liu L P, Wu L L, 2014. Comparison among several system biases calibration methods on C-band polarimetric radar[J]. Plateau Meteor, 33(1):221-231(in Chinese).
- 黄兴友,印佳楠,马雷,等,2019.南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用[J].大气科学,43(3):691-704. Huang X Y, Yin J N, Ma L, et al, 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):691-704(in Chinese).
- 李力,姜有山,蔡凝昊,等,2018. Parsivel 降水粒子谱仪与观测站雨量计的对比分析[J].气象,44(3):434-441. Li L, Jiang Y S, Cai N H, et al, 2018. Contrastive analysis of parsivel precipitation particle spectrometer data and pluviometer data [J]. Meteor Mon, 44(3):434-441(in Chinese).
- 李思腾,仰美霖,李林,等,2019.基于标准差分析法的X波段双偏振天气雷达资料质量评估[J].干旱气象,37(3):467-476. Li S T, Yang M L, Li L, et al, 2019. Evaluation on data quality of X-band dual polarization weather radar based on standard deviation analysis[J]. J Arid Meteor, 37(3):467-476(in Chinese).
- 李晓敏,周筠珩,肖辉,等,2017.基于X波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究[J].大气科学,41(6):1246-1263. Li X M, Zhou Y J, Xiao H, et al, 2017. Research on the evolution characteristics of hydrometeors in a thunderstorm cell with X-band dual-polarimetric radar [J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1246-1263(in Chinese).
- 李昭春,朱君鉴,张持岸,等,2021.海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J].气象,47(9):1086-1098. Li Z C, Zhu J J, Zhang C A, et al, 2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province [J]. Meteor Mon, 47(9):1086-1098(in Chinese).
- 李喆,李柏,赵坤,等,2016.国产双偏振天气雷达差分反射率测量性能分析[J].气象科技,44(6):855-859, 895. Li Z, Li B, Zhao K, et al, 2016. Measurement performance analysis of differential reflectivity for dual-polarization weather radar made in China[J]. Meteor Sci Technol, 44(6):855-859, 895(in Chinese).
- 吕博,杨士恩,王俊,等,2016. X波段双线偏振多普勒雷达资料质量评估[J].干旱气象,34(6):1054-1063. Lv B, Yang S E, Wang J, et al, 2016. Evaluation on data quality of X-band dual linear polarization Doppler weather radar [J]. J Arid Meteor, 34(6):1054-1063(in Chinese).
- 潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020.闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J].气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian [J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 阮悦,黄慧琳,魏鸣,等,2022.福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J].气象,48(4):442-451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian [J]. Meteor Mon, 48(4):442-451(in Chinese).
- 邵楠,步志超,李柏,等,2018.清远连州 CINRAD/SA-D 型业务试验双偏振天气雷达技术评估[J].北京理工大学学报,38(9):953-958. Shao N, Bu Z C, Li B, et al, 2018. The technology evaluation of S-band business test dual polarization radar(CINRAD/SA-D) [J]. Trans Beijing Inst Technol, 38(9):953-958(in Chinese).
- 吴林林,2014.利用雨滴谱对移动双偏振雷达进行质量控制及降水估测[D].南京:南京信息工程大学. Wu L L, 2014. Application study of mobile C-band dual-polarization radar quality control

- and QPE using raindrop size distribution[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 夏凡, 吴伟, 张乐坚, 等, 2023. 基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J]. 气象, 49(2): 146-156. Xia F, Wu W, Zhang L J, et al, 2023. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 49(2): 146-156(in Chinese).
- 杨华, 李瑞义, 刘黎平, 等, 2023. 利用双偏振参量估计降水粒子下落末速度及三维风场反演的应用[J]. 气象, 49(7): 855-867. Yang H, Li R Y, Liu L P, et al, 2023. Estimating the final falling velocity of precipitation particles using dual-polarization parameters and application of 3D wind field retrieval in precipitation system[J]. Meteor Mon, 49(7): 855-867(in Chinese).
- 张贵付, 2018. 双偏振雷达气象学[M]. 闵锦忠, 戚友存, 王世璋, 等译. 北京: 气象出版社: 1-304. Zhang G F, 2018. Weather Radar Polarimetry[M]. Min J Z, Qi Y C, Wang S Z, et al, trans. Beijing: China Meteorological Press: 1-304(in Chinese).
- 张林, 李峰, 冯婉悦, 等, 2021. 移动 X 波段双线偏振雷达数据质量分析及偏差订正[J]. 气象, 47(3): 337-347. Zhang L, Li F, Feng W Y, et al, 2021. Research of data quality analysis and bias correction on mobile X-band dual-polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 47(3): 337-347(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 Meteorologica Sin, 79(5): 786-803(in Chinese).
- 赵世颖, 李柏, 陈晓辉, 等, 2015. 基于交叉-平行法的双偏振雷达差分反射率硬件定标[J]. 气象科技, 43(5): 775-782. Zhao S Y, Li B, Chen X H, et al, 2015. System bias calibration of differential reflectivity for dual polarization radar based on cross and straight measurements[J]. Meteor Sci Technol, 43(5): 775-782(in Chinese).
- 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.
- Chen B J, Wang Y, Ming J, 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in Typhoon Morakot (2009) [J]. J Trop Meteor, 18(2): 162-171.
- Chen G, Zhao K, Huang H, et al, 2021. Evaluating simulated raindrop size distributions and ice microphysical processes with polarimetric radar observations in a Meiyu front event over eastern China [J]. J Geophys Res: Atmos, 126(22): e2020JD034511.
- Chen G, Zhao K, Lv Y H, et al, 2022. Variability of microphysical characteristics in the "21 · 7" Henan extremely heavy rainfall event[J]. Sci China Earth Sci, 65(10): 1861-1878.
- Ding Y, Wan Q L, Yang L, et al, 2020. Raindrop size distribution parameters retrieved from Xinfeng C-band polarimetric radar observations[J]. J Trop Meteor, 26(3): 275-285.
- Gatidis C, Schleiss M, Unal C, 2022. Sensitivity analysis of DSD retrievals from polarimetric radar in stratiform rain based on the μ - Λ relationship[J]. Atmos Meas Tech, 15(16): 4951-4969.
- Hu Z Q, Liu L P, Wang L R, 2012. A quality assurance procedure and evaluation of rainfall estimates for C-band polarimetric radar [J]. Adv Atmos Sci, 29(1): 144-156.
- Liu L P, Hu Z Q, Fang W G, et al, 2010. Calibration and data quality analysis with mobile C-band polarimetric radar [J]. J Meteor Res, 24(4): 501-509.
- Ryzhkov A V, Giangrande S E, Melnikov V M, et al, 2005. Calibration issues of dual-polarization radar measurements[J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(8): 1138-1155.
- Shao S Q, Zhao K, Chen H N, et al, 2020. Validation of a multilag estimator on NJU-CPOL and a hybrid approach for improving polarimetric radar data quality[J]. Remote Sens, 12(1): 180.
- 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.

(本文责编: 戴洋)