暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

荆州双偏振天气雷达定量降水估测精度及影响因素分析

程昌玉 徐桂荣 赖晨 高兰 严婧

Analysis of the accuracy and influencing factors of quantitative precipitation estimation using dual-polarization weather radar in Jingzhou

CHENG Changyu，XU Guirong，LAI Chen，GAO Lan，YAN Jing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-127

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于支持向量机的双偏振雷达对流降水类型识别方法研究

Research on hydrometeor classification of convective weather based on SVM by dual linear polarization radar

暴雨灾害. 2019, 38(4): 297-302 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.001

2018年1月初安徽特大暴雪的双偏振雷达观测分析

Analysis on dual polarization radar observations of a heavy snowstorm event in Anhui in the beginning of January 2018

暴雨灾害. 2019, 38(1): 31-40 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.01.004

S波段双线偏振雷达差分相移率自适应计算研究

Adaptive calculation of specific differential phase for S-band dual-polarimetric doppler radar

暴雨灾害. 2019, 38(6): 668-675 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.012

地基微波辐射计探测精度的变化特征分析

Analysis on variation of ground-based microwave radiometer measurement accuracy

暴雨灾害. 2017, 36(4): 373-381 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2017.04.010

利用天气雷达平均散度产品分析短时强降水大气低层辐合特征

Analyzing the low level atmospheric convergence characteristics in the short-time heavy precipitation using average divergence products retrieved from weather radar

暴雨灾害. 2018, 37(4): 319-329 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.004

一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征

Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data

暴雨灾害. 2021, 40(4): 419-429 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.010

关注微信公众号，获得更多资讯信息

程昌玉,徐桂荣,赖晨,等.2025.荆州双偏振天气雷达定量降水估测精度及影响因素分析[J].暴雨灾害,44(5):665−675. CHENG Changyu, XU Guirong, LAI Chen, et al. 2025. Analysis of the accuracy and influencing factors of quantitative precipitation estimation using dual-polarization weather radar in Jingzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):665−675 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−127

荆州双偏振天气雷达定量降水估测精度及影响因素分析

程昌玉[1], 徐桂荣[2], 赖晨[1], 高兰[1], 严婧[1]

(1. 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘　要: 天气雷达反演的定量降水估测 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 产品具有空间覆盖范围广、时间分辨率高的优点, 对降水的监测、预报及灾害预警具有重要作用。针对 2023 年湖北梅雨期降水过程, 以国家级自动气象站雨量计实测小时雨量为标准值, 分析荆州双偏振天气雷达对地面降水的判识性能、QPE 反演精度及其影响因素。结果表明: (1) 雷达 QPE 识别地面降水的命中率为 74.7%, 空报率为 28%, 临界成功指数为 57.9%; 雷达 QPE 识别暴雨的能力较好, 中雨次之, 对大雨和小雨的识别能力较差。(2) 雷达 QPE 和雨量计实测小时雨量具有较好的一致性, 两者的相关系数、平均偏差、相对平均偏差、均方根误差分别为 0.91、−0.27 mm、−13%、1.96 mm, 雷达 QPE 整体低估地面降水; 雷达 QPE 与雨量计小时雨量的平均偏差和均方差随雨强增大而增大, 但两者的相关系数在暴雨级别时高于其他等级降水。(3) 天气雷达波束遮挡会造成雷达反射率因子低估, 导致定量降水估测算法对地面降水的判识性能下降, 部分区域的降水判识性能可下降 20% 左右; 雷达 QPE 反演精度受反射率因子采样高度的影响相对较小, 其中雷达 QPE 与雨量计小时雨量的平均偏差随采样高度变化不大, 但随着采样高度上升, 雷达 QPE 的离散程度和异常值出现较大的波动, 容易低估地面降水。

关键词: 双偏振天气雷达; 定量降水估测; 精度; 影响因素

中图法分类号: P415.2　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−127

Analysis of the accuracy and influencing factors of quantitative precipitation estimation using dual-polarization weather radar in Jingzhou

CHENG Changyu[1], XU Guirong[2], LAI Chen[1], GAO Lan[1], YAN Jing[1]

(1. *Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan* 430074; 2. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205)

Abstract: Quantitative precipitation estimation (QPE) products derived from weather radar have the advantages of wide spatial coverage and high temporal resolution. Accurate and reliable QPE is crucial for precipitation monitoring and forecasting as well as disaster warning. Based on the data from the dual-polarization weather radar at Jingzhou station and hourly precipitation of rain gauge at national automatic weather stations (AWSs) in the Jianghan Plain during the 2023 Meiyu period, the identification performance and accuracy of dual-polarization weather radar QPE including its influencing factors is analyzed. The results are as follows. (1) the hit rate of radar QPE in identifying ground precipitation is 74.7%, the false alarm rate is 28%, and the critical success index is 57.9%. The radar QPE performs well in identifying heavy storm rain, followed by moderate rain, yet its ability to depict heavy and light rains needs to be improved. (2) The radar QPE and rain gauge have good consistency in measuring hourly precipitation, with a correlation coefficient (CORR) of 0.91, a mean error (ME) of -0.27 mm, a relative mean error (RME) of -13%, and a root mean square error (RMSE) of 1.96 mm. As a whole, the radar QPE underestimates ground precipitation. The ME and RMSE of hourly precipitation between radar QPE and rain gauge increase with increasing rainfall intensity, but the CORR between them is higher in heavy storm rain than in other grades of precipitation. (3) Radar

收稿日期: 2024−07−01; **定稿日期**: 2024−11−20

资助项目: 湖北省自然科学基金项目 (2023AFD092, 2023AFD107)

第一作者: 程昌玉, 主要从事天气雷达探测技术研究。E-mail: ccy269@qq.com

通信作者: 徐桂荣, 主要从事大气探测和云降水研究。E-mail: grxu@whihr.com.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

beam blockage can lead to underestimation of radar reflectivity, which in turn reduces the performance of the quantitative precipitation estimation algorithm in detecting surface precipitation, with the identifying performance in some areas decreasing by about 20%. Additionally, the radar QPE accuracy is relatively less affected by the sampling height of the reflectivity factor, and the M_E of hourly precipitation between radar QPE and rain gauge presents little change with varying sampling height. However, as the sampling height increases, the dispersion and outliers of radar QPE fluctuate greatly, making it easy to underestimate ground precipitation.

Key words: dual-polarization weather radar; quantitative precipitation estimation (QPE); accuracy; influencing factors

引 言

天气雷达定量估测降水 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 是现代天气雷达业务系统的核心组成部分, 以其高时空分辨率的特点, 在气象监测与预报、水文研究与应用以及防灾减灾等领域得到广泛研究和应用 (Bringi and Chandrasekar, 2001; 潘旸等, 2018; 李梦迪等, 2022; 段和平等, 2023)。近年来, 双偏振天气雷达凭借其在降水粒子微物理特征识别及水凝物相态分析方面的优势 (Uibrich et al., 1983), 使得雷达的反射率因子 ZH (记为 Z_H)、差分反射率 ZDR (记为 Z_{DR}) 以及比差分传播相移 KDP (记为 K_{DP}) 成为降水估测中的关键特征量, 广泛应用于降水率反演公式 $R(Z_H)$、$R(Z_{DR})$、$R(K_{DP}$、$Z_{DR})$ 中 (殷秀良和张培昌, 2000; 王建林等, 2007)。2005 年美国天气雷达联合偏振试验 (JPOLE) 提出基于双偏振量的降水估测算法, 有效改善了降水估测精度 (Ryzhkov et al., 2005)。美国科罗拉多州立大学引入了粒子相态分类的改进算法 (如 CSU-ICE 和 CSU-HIDRO 算法), 进一步优化了 QPE 的精度, 尤其是在冰粒子或混合相降水环境中的表现 (Cifelli et al., 2003; Cifelli et al., 2011)。然而, 在实际应用中, 尤其是在不同降水类型和降水强度的情况下, QPE 精度仍存在波动问题 (Giangrande and Ryzhkov, 2008)。

为进一步改进双偏振定量降水估测算法, 提高降水估测准确性, 国内外开展了对双偏振雷达降水估测不确定性因素的影响分析。Voormansik 等 (2021) 利用长期资料评估了双偏振天气雷达定量降水估测能力, 得出在弱降水条件下使用 Z_H 反演 QPE 低估了降雨量, 在强降水条件下使用 K_{DP} 反演 QPE 高估了降雨量, 利用 Z_H 和 K_{DP} 组合反演 QPE 是当地最优的反演算法。刘黎平等 (1996) 和楚荣忠等 (1997) 研究了不同定量降水估测算法在不同降水类型区域的表现, 发现双偏振雷达在小到中雨的测量中能显著提高精度, 但在大雨情况下可能会出现高估现象。荀爱萍等 (2019) 在厦门 X 波段相控阵雷达组网试验中发现, 使用偏振参量 Z_H 的降水估测关系能够改善雷达的降水估测效果, $R(K_{DP})$、$R(K_{DP}$、$Z_{DR})$ 的 QPE 反演效果优于 $R(Z_H)$、$R(Z_H$、$Z_{DR})$。韦凯华等 (2023) 分析认为 WSR-88D 的双偏振算法在降水分类的基础上, 距离雷达站点 25~100 km 范围内效果较好, 对强降水以及部分可能受地形阻挡和衰减区域的降水估测有一定改进作用。由上可知, 双偏振雷达 QPE 精度受不同的降水系统、区域差异以及复杂地形下波束遮挡造成信号衰减、雷达标定等诸多因素的影响 (Seo et al., 2002; Gourley et al., 2017)。近年来, 我国新一代天气雷达网逐步进行了双偏振技术的升级, 在利用双偏振天气雷达 QPE 产品开展天气监测预警和应用研究前, 对双偏振天气雷达 QPE 产品的反演精度进行评估具有重要意义。

荆州 S 波段天气雷达作为湖北省首批实施双偏振技术升级改造的雷达之一, 于 2019 年 6 月完成升级并正式投入业务应用。该雷达在保留原来单偏振雷达产品的基础上, 新增了差分反射率 Z_{DR}、比差分传播相 K_{DP} 等双偏振参量。荆州天气雷达完成双偏振升级后增强了江汉平原灾害性天气监测能力, 但其实际运行中仍面临一些挑战, 如不同类型降水的反演精度偏差, 尤其是在强降水和复杂天气条件下, 以及天气雷达波束遮挡等问题。本文旨在利用 2023 年湖北梅雨期荆州站双偏振天气雷达的 QPE 产品及雷达覆盖范围内的地面雨量计观测数据, 评估该地区双偏振天气雷达 QPE 对地面降水的识别性能和反演精度, 分析其可能的影响因素, 为后续双偏振天气雷达 QPE 的改进及应用研究提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源与研究区域

本文所用数据来自湖北省气象信息中心天擎系统提供的湖北省荆州天气雷达及其周围 200 km 范围内的地面雨量计 (图 1) 资料, 包括 1 部 S 波段双偏振雷达和 43 个国家级气象观测站的雨量计设备。

荆州天气雷达为 S 波段, 于 2019 年实现了双偏振的升级, 运行模式为双发双收, 其观测数据除反射率因子 Z_H、平均径向速度 V、速度谱宽 W 外, 增加了差分反射率 Z_{DR}、比差分传播相 K_{DP} 等双偏振参量, 距离分辨率由 1 km 提升到了 250 m, 雷达观测覆盖范围为 230 km。为了增加研究的样本量, 增强分析结果的代表性, 以 2023 年 6 月 16 日—7 月 11 日湖北梅雨期雨量计站点的逐小时降水资料为标准值,

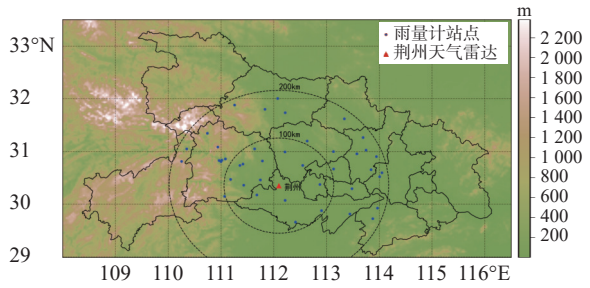


图 1 研究区域内地形高度 (填色)、雷达 (红色三角形) 及雨量计站点 (蓝色圆点) 分布图

Fig. 1 Distribution of topography (shaded), radar (red triangles), and rain gauge stations (blue dots) in the study area

对比评估该期间双偏振天气雷达 QPE 产品对地面降水的识别性能和反演精度。为尽量保证研究资料的可靠性, 仅使用国家级自动气象观测站的雨量计观测资料。研究区域内 43 个雨量计站点逐小时降水数据均经过了实时的质量控制 (任芝花等, 2010)。湖北省 2023 年梅雨期在研究区域内共发生 7 次大范围降雨过程 (表 1), 其中 6 月 16—18 日降水过程最强, 最大小时降雨量达到 65.3 mm。

表 1 2023 年湖北梅雨期在研究区域内 7 次大范围降雨过程概况

Table 1 Overview of 7 large-scale rainfall processes in the study area in Hubei during the 2023 Meiyu period

过程编号	时间	降水站次/次	最大小时雨量/mm
1	6月16—19日	1 708	65.3
2	6月21—22日	634	8.6
3	6月24—25日	112	7.4
4	6月28—30日	495	57.2
5	7月1—4日	259	46.5
6	7月6—8日	264	50.6
7	7月11日	21	11.5

1.2 研究方法

本文首先利用双偏振雷达观测资料进行定量降水估测。随后, 将雷达 QPE 与地面雨量计数据进行时间和空间匹配, 以确保数据的一致性, 建立不同降水等级下的雷达-雨量计匹配数据对。最后, 评估雷达 QPE 产品在地面降水识别性能和反演精度方面的表现。

1.2.1 降水估测方法

本文采用美国科罗拉多州立大学的 CSU-HIDRO 降水估测优化算法进行双偏振雷达定量降水估测, 算法流程图如图 2 所示 (Cifelli et al., 2011)。利用模糊逻辑法将降水类型大致分为液态降水、固态降水、混合型降水等 3 种类型, 再根据 3 个偏振量 (K_{DP}、Z_H、Z_{DR}) 的阈值选择不同组合方式; 最后, 根据公式 (1)—(4) 进行降水率的估计。

$$R(Z_H) = a_1 Z_H^{b_1} \tag{1}$$

$$R(K_{DP}) = a_2 K_{DP}^{b_2} \tag{2}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = a_3 Z_H^{b_3} 10^{c_3 Z_{DR}} \tag{3}$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = a_4 K_{DP}^{b_4} 10^{c_4 Z_{DR}} \tag{4}$$

其中, a_1—a_4、b_1—b_4、c_3—c_4 为拟合参数, 目前采用默认的参数。R 为降水率 (单位: mm·h^{-1}); Z_H 为反射率因子 (单位: mm^6·m^{-3})。

1.2.2 样本分级和匹配方法

雷达 QPE 与地面雨量计实测值之间存在时间、空间的不一致性, 这会影响雷达 QPE 反演精度的评估 (高晓荣等, 2012)。为减小雷达和雨量计时间不一致性的影响, 根据雨量计小时降水资料, 选择最邻近时间的雷达 1 h 累积 QPE 产品进行时间匹配。为减少雷达最低高度和地面雨量计之间高度差的影响,

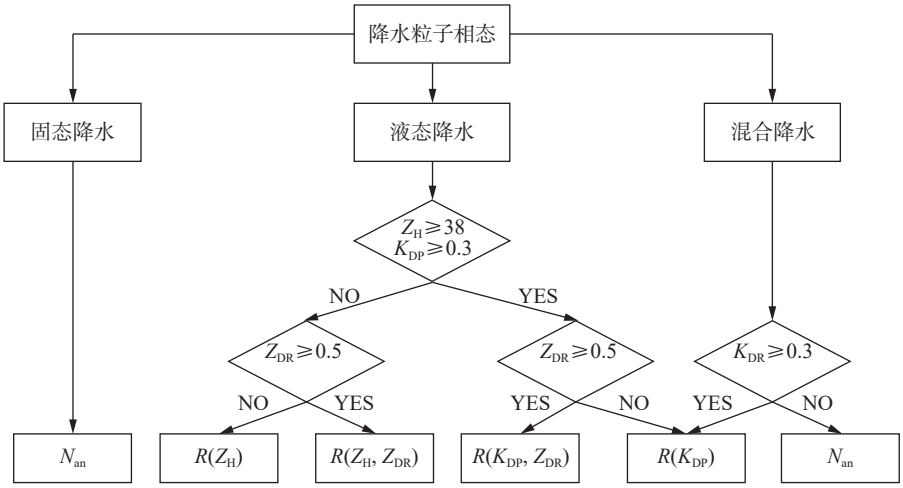


图 2 CSU-HDIRO 定量降水估测算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the CSU-HDIRO quantitative precipitation estimation algorithm

以地面雨量计位置为起点，搜索其上雷达 5X3 距离库窗口内与地面雨量计观测值最接近的雷达 QPE，作为天气雷达-雨量计的匹配数据 (郭佳等, 2020)。

本文选取图 1 中 43 个国家观测站的地面雨量计有效降水数据 (≥0.1 mm) 及匹配 43 个观测站位置的雷达小时 QPE 有效数据 (≥0.1 mm) 作为分析样本，以此依据，在表 1 的 7 次大范围降水过程中，雨量计有效降水数据样本为 3 593 站次，期间荆州双偏振雷达体扫个数 (6 min) 为 3 900 个，匹配雨量计站点的有效 1 h 累积 QPE 样本为 3 730 站次，加上同期漏报、空报站次，得到本研究的分析样本合计为 4 638 站次。在划分雨量等级时，以地面雨量计观测的降水量为基准，根据气象标准规范 (中国气象局, 2003)，1 h 降水量 ≤2.5 mm 为小雨；2.5 mm<1 h 降水量 ≤ 8.0 mm 为中雨；8 mm<1 h 降水量 ≤16 mm 为大雨；1 h 降水量>16 mm 为暴雨。根据该雨量等级划分方法，分别建立不同雨量等级的雷达-雨量计的匹配数据对，用以评估不同雨量等级下双偏振天气雷达 QPE 对地面降水的识别性能和反演精度。

1.2.3 检验方法

本文基于 Witt 等 (1998) 使用的命中率 POD (记为 P_{OD})、漏报率 MAR (记为 R_{MA})、空报率 FAR (记为 R_{FA})、临界成功指数 CSI (记为 I_{CS}) 等四个指标来评估雷达 QPE 产品对地面降水的识别性能。其计算方法如公式 (5)—(8) 所示

$$P_{OD} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\% \tag{5}$$

$$R_{MA} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \times 100\% \tag{6}$$

$$R_{FA} = \frac{N_C}{N_A + N_C} \times 100\% \tag{7}$$

$$I_{CS} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \times 100\% \tag{8}$$

其中，N_A 代表命中的样本数，N_B 代表漏报的样本数，N_C 代表空报的样本数。

另外，参考张哲等 (2021) 和荀爱萍 (2023) 等的做法，选择皮尔逊相关系数 CORR (记为 C_{ORR})、平均误差 ME (记为 E_M)、相对平均误差 RME (记为 E_{RM})、均方根误差 RMSE (记为 E_{RMS}) 作为评估指标对雷达 QPE 产品的反演精度进行检验。公式 (9)—(12) 给出了各评估指标的计算表达式

$$C_{ORR} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})(G_i - \overline{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \overline{G})^2}} \tag{9}$$

$$E_M = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - G_i)}{n} \tag{10}$$

$$E_{RM} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(R_i - G_i)}{G_i} \times 100\% \tag{11}$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_i - G_i)^2} \tag{12}$$

其中，n 为总的样本数，R_i 和 G_i 分别代表雷达 QPE 产品估计的降水量和雨量计观测的降水量，$\overline{R}$表示雷达 QPE 的均值、$\overline{G}$表示雨量计观测值的均值。CORR 反映雷达 QPE 与雨量计观测值之间的线性关系的统计指标，CORR 越高，说明降水估计与实际观测降水量的一致性越高。ME 和 RME 分别表示雷达 QPE 样本整体偏离和相对偏离实况降水的指标，ME 和 RME 为正 (负)，说明 QPE 产品高估 (低估) 了实际观测的降水。RMSE 体现降水估计与实际观测降水量误差的统计指标，反映了估测值偏离实测值的程度，RMSE 越接近 0，说明雷达 QPE 与实况降水之间误差越小，估计的离散度越低。

2 结果分析

2.1 双偏振雷达 QPE 对地面降水的识别性能分析

本文从命中率 POD、漏报率 MAR、空报率 FAR、临界成功指数 CSI 等 4 个评估指标来分析双偏振雷达 QPE 对地面降水的识别性能。表 2 给出了双偏振雷达 QPE 对地面降水的识别性能分析结果，可以看出，总体上双偏振雷达 QPE 识别地面降水的命中率为 74.7%，空报率为 28%，临界成功指数为 57.9%。此外，双偏振雷达 QPE 对不同等级降水的识别性能有差异。其中，双偏振雷达 QPE 识别暴雨的命中率最高为 70.1%，而识别大雨命中率最低为 50.4%；在空报率上，双偏振雷达 QPE 识别暴雨的空报率最低为 14.5%，识别小雨的空报率最高为 40.8%，而识别大雨的空报率为 36.6%，仅低于小雨的空报率。结合

表 2 荆州双偏振雷达 QPE 对地面降水的评估结果

Table 2 Evaluation metrics of dual-polarization radar QPE for ground precipitation in Jingzhou

降水等级	样本量/站次	评估指标			
		POD/%	MAR/%	FAR/%	CSI/%
小雨	2 769	65	35	40.8	44.9
中雨	640	63.4	36.6	24.5	52.6
大雨	117	50.4	49.6	36.6	39.1
暴雨	67	70.1	29.9	14.5	62.7
全部	3 593	74.7	25.3	28	57.9

命中、漏报、空报样本综合分析, 双偏振雷达 QPE 识别暴雨的临界成功指数最高为 62.7%, 识别大雨的临界成功指数最低为 39.1%, 另外, 识别中雨的临界成功指数也超过了 50%, 达到 52.6%。由此可见, 双偏振雷达 QPE 对暴雨的识别性能较好, 中雨次之, 大雨最弱; 双偏振雷达对暴雨的识别有自身的优势, 对大雨和小雨的识别能力需要进一步提升。

为考查双偏振雷达 QPE 对地面降水识别性能的空间差异, 图 3 给出了双偏振雷达覆盖范围内各雨量计站点雷达 QPE 对地面降水的命中率、漏报率、空报率、临界成功指数的空间分布情况。从图 3 可以看到, 在距离雷达站 150 km 范围内, 雷达 QPE 具有较高的命中率, 最高命中率超过 80%; 在距离雷达站 150 km 以外的地区, 雷达 QPE 命中率较低, 最低命中率在 30% 左右 (图 3a)。雷达 QPE 漏报率的空间分布特征与命中率相反, 即在距离雷达站 150 km 范围内雷达 QPE 的漏报率低, 而在距离雷达站 150 km 以外的地区雷达 QPE 的漏报率高 (图 3b)。雷达 QPE 空报率的空间分布特征与漏报率相似, 在距离雷达站 150 km 范围内, 雷达 QPE 空报率较低, 最低在 10% 左右; 在距离雷达站 150 km 以外的地区, 雷达 QPE 有着较高的空报率, 其中最大空报率超过 60%, 分布在雷达站东北部 190 km 处 (图 3c)。从公式 (2) 可知, 雷达 QPE 的临界成功指数与其命中率具有正相关, 因此雷达 QPE 临界成功指数的空间分布特征与命中率相似, 即在距离雷达站 150 km 范围内雷达 QPE 的临界成功指数高, 而在距离雷达站 150 km 以外的地区雷达 QPE 的临界成功指数低 (图 3d)。雷达 QPE 对地面降水识别性能的空间差异可能和雷达波束遮挡有关, 高大的地形导致被遮挡区域的降水无法被探测到, 造成总体降水量的低估, 这种情况在山地和丘陵地区尤为常见。此外, 随着雷达波束距离的增加, 波束的横截面积会增大, 波束覆盖的空间体积也增大, 如果波束内的大部分区域没有降水, 而仅有小部分区域有强降水, 整体回波强度会被低估, 这也可能会造成雷达 QPE 对地面降水的识别性能产生空间差异。

2.2 双偏振雷达 QPE 的反演精度分析

本文以雨量计小时雨量为标准值, 对比分析双偏振雷达 QPE 的反演精度。图 4 给出了双偏振雷

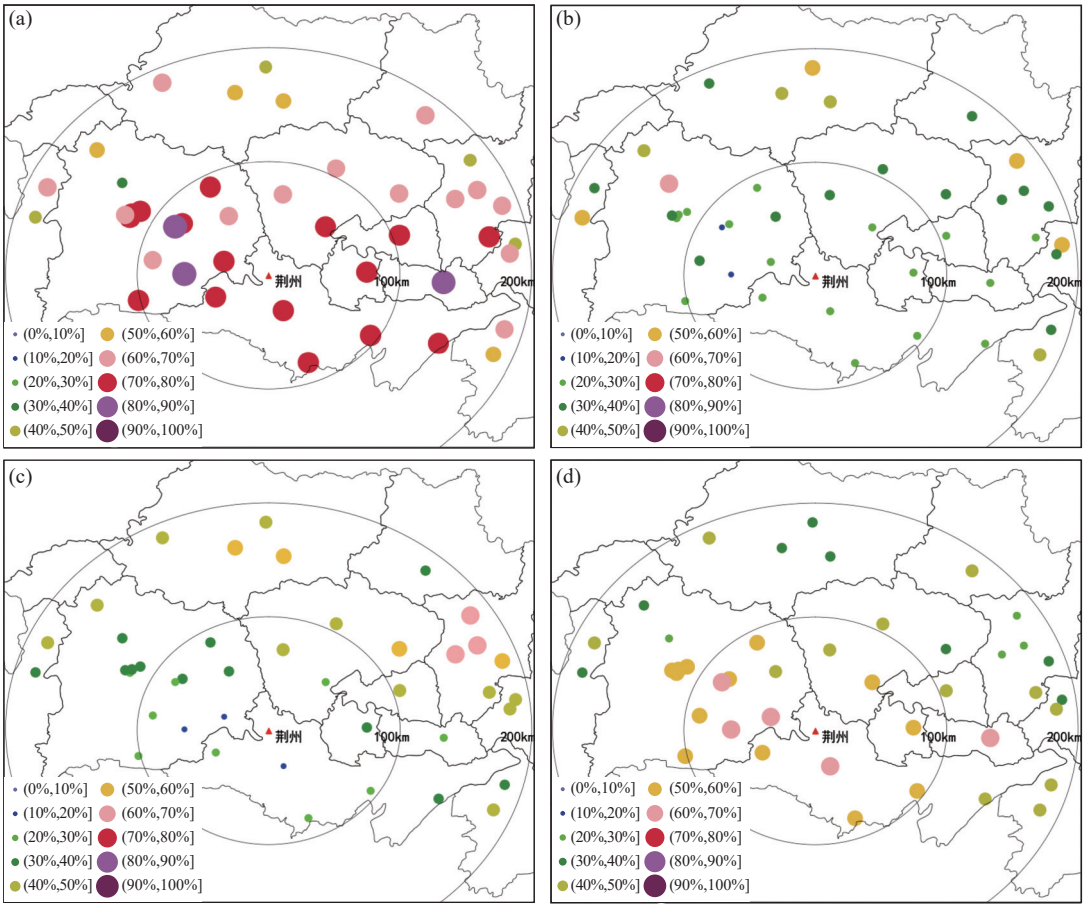


图 3 荆州双偏振天气雷达覆盖范围内各雨量计站点雷达 QPE 的 POD (a)、RMA (b)、FAR (c)、CSI (d) 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of radar QPE metrics (a) POD, (b) RMA, (c) FAR, (d) CSI at rain gauge stations within the coverage area of the dual-polarization weather radar in Jingzhou

达 QPE 与雨量计小时雨量的散点密度图，可以看到，雷达 QPE 与雨量计小时雨量具有很好的相关性，两者的相关系数达到 0.91；另外，雷达 QPE 与雨量计小时雨量具有较好的一致性，两者的平均偏差 ME 和相对平均偏差 RME 分别约为−0.22 mm 和−13%，两者的均方根误差 RMSE 分别约为 1.74 mm。与雨量计小时雨量相比，雷达 QPE 总体上低估约 0.22 mm，这可能与雷达 QPE 的漏报率和空报率有关。前面表 1 显示，除在小雨等级降水时雷达 QPE 对地面降水的漏报率略小于空报率外，在中雨、大雨、暴雨等级降水时雷达 QPE 对地面降水的漏报率均大于空报率，特别是暴雨等级降水时雷达 QPE 对地面降水的漏报率比空报率高出约 1 倍，这便造成雷达 QPE 低估地面实况降水。

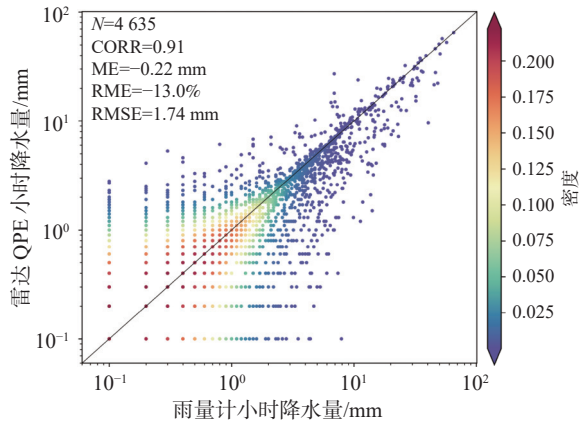


图 4 双偏振雷达 QPE 与雨量计小时雨量的散点密度图

Fig. 4 Scatter plot of hourly precipitation between dual-polarization radar QPE and rain gauge

表 3 进一步给出了不同降水等级下雷达 QPE 与雨量计小时雨量的对比结果。可以看到，雷达 QPE 与地面雨量计小时雨量的相关性随雨强有波动变化，两者的相关系数在小雨时为 0.56，随着雨强增大至中雨，相关系数减小至 0.52，当雨强为大雨时，相关系数骤降至 0.39，当雨强继续增大至暴雨时，相关系数急剧抬升至 0.8，表明雷达 QPE 与地面雨量计小时雨量的相关性在暴雨等级降水优于其它等级降水。另外，与地面雨量计小时雨量相比，雷达 QPE 在不同等级降水上均表现为低估。雷达 QPE 与雨量计小时降水的平均偏差 ME 在小雨时为−0.01 mm，随着雨强增大至中雨，负平均偏差增至−1.03 mm，当雨强为大雨时，负平均偏差为−2.91 mm，当雨强继续增大至暴雨时，负平均偏差增至−5.62 mm。雷达 QPE 与雨量计小时雨量的的相对平均偏差 RME 显示，两者的归一化负偏差在小雨时最小约为−2%，暴雨次之约为−20%，而大雨最大约为−26%。此外，雷达 QPE 与雨量计小时雨量的均方差 RMSE 表现为随着雨强增大而变大，分别由小雨时 0.67 mm 增至暴雨时的 9.49 mm。综上可见，雷达 QPE 与地面观测降水的相关系数在暴雨时高于其他等级降水，而在大雨时明显低于其他等级降水，然而雷达 QPE 会低估地面观测降水，且雷达 QPE 与地面观测降水的负偏差程度随雨强增大而增加，两者的离散度即均方差也随雨强的增大而增大。

表 3 不同降水等级下荆州双偏振雷达 QPE 与雨量计小时雨量的对比结果

Table 3 Comparison results of hourly precipitation between dual-polarization radar QPE and rain gauge under different precipitation levels

降水等级	样本量/站次	评估指标			
		CORR	ME/mm	RME/%	RMSE/mm
小雨	2 769	0.56	−0.01	−2	0.67
中雨	640	0.52	−1.03	−23	2.35
大雨	117	0.39	−2.91	−26	4.98
暴雨	67	0.8	−5.62	−20	9.49

为考查双偏振雷达 QPE 反演精度的空间分布情况，图 5 给出了荆州双偏振雷达覆盖范围内各雨量计站点雷达 QPE 与雨量计小时雨量的对比结果。可见，多数站点雷达 QPE 与雨量计小时雨量的相关系数在 0.80 以上，相关系数最小值 0.68 出现在距离雷达站约 200 km 的较远站点 (图 5a)。雷达 QPE 与雨量计小时雨量的平均偏差分布显示，在 43 个站点中，有 32 站为负偏差而仅有 11 站为正偏差，且负偏差程度随离雷达站距离的增加而增大(图 5b)。另外，雷达 QPE 与雨量计小时雨量的平均绝对偏差和均方差也与离雷达站的距离具有正相关，即雷达 QPE 与雨量计小时雨量的平均绝对偏差和均方差在离雷达站较近时小，然后随着离雷达站距离的增加而增大(图 5c、d)。可见，双偏振雷达 QPE 能够较好地呈现地面观测降水的变化趋势，但雷达 QPE 反演精度随着离雷达站距离的增加而下降。

2.3 双偏振雷达反演 QPE 的影响因素分析

在天气雷达的业务观测中，天气雷达的最低观测仰角为 0.5°，而雷达 QPE 往往是利用最低观测仰角的回波信号来开展定量降水估测，因此，近地层波束遮挡可能会影响雷达 QPE 的反演性能。为考查此问题，本文基于数字高程 (Digital Elevation Model, DEM) 地形和均匀性降水回波统计的遮挡识别方法(勾亚彬，2015；王曙东等，2011；柳云雷等，2020)，给出了荆州双偏振天气雷达的波束遮挡情况如图 6。

图 6a 的 DEM 地形识别结果显示, 荆州雷达站的西北部有雷达波束遮挡, 结合图 1 的地形分布可知该波束遮挡与鄂西山区的山体地形有关。另外, 荆州东部没有山体遮挡, 但通过对晴空回波、降水回波资料的统计分析, 可以看出部分方位上的回波均值存在显著偏低 (图 6b), 这主要和荆州城区城市化发展, 高层建筑引起了雷达波束遮挡有关。结合图 1、图 3、图 6 可见, 荆州双偏振雷达 QPE对地面降水识别性能较弱的站点主要分布在波束遮挡区范围内。雷达 QPE 对遮挡区内部分站点降水的识别性能, 较相邻非遮挡区的雨量计站点显著下降; 如雷达 QPE 汉川观测站 (113.843°E, 30.656°N) 地面降水识别 CSI 为 46.4%, 而对其邻近的武汉观测站 (114.050°E, 30.597°N) 地面降水识别 CSI 仅为 34.7%。

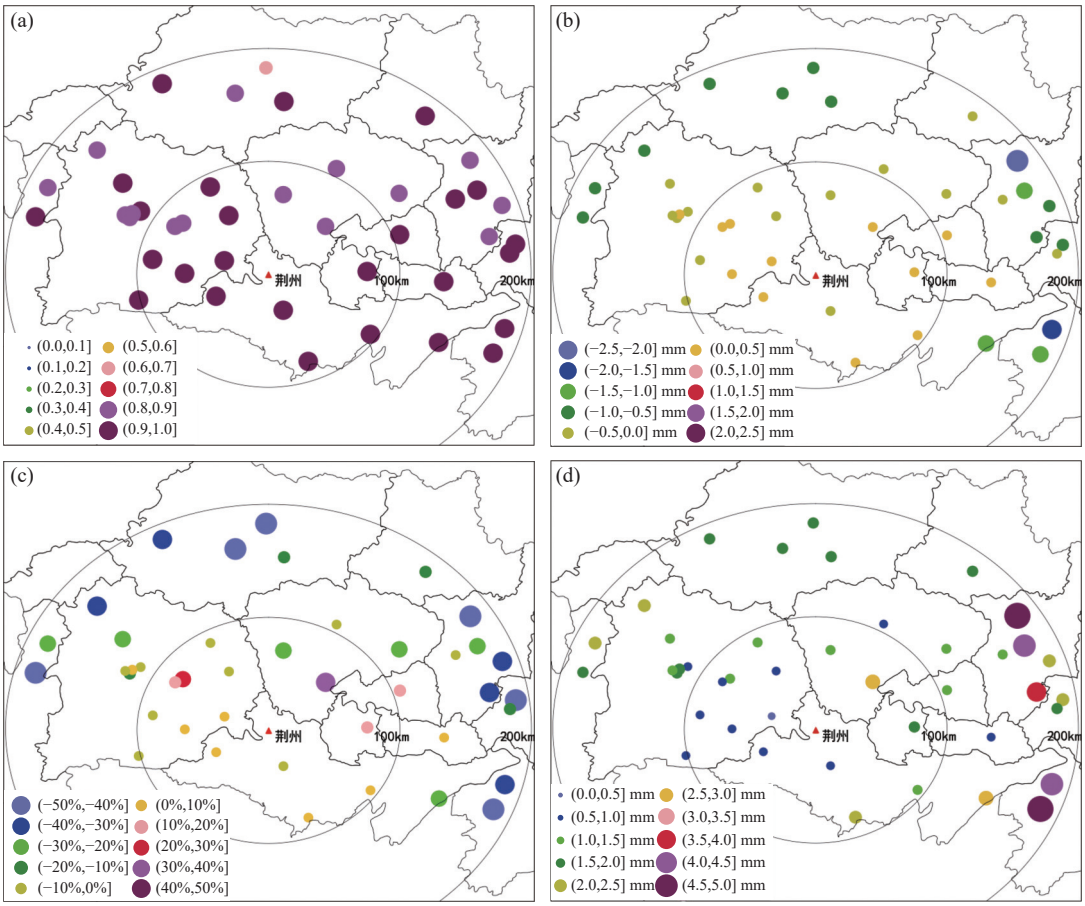


图 5 荆州双偏振天气雷达覆盖范围内各雨量计站点小时雨量与雷达 QPE 的 CORR (a)、ME (b)、RME (c) 以及 RMSE (d) 分布

Fig. 5 The (a) CORR, (b) ME, (c) RME, and (d) RMSE of hourly precipitation between radar QPE and rain gauge at automatic weather stations within the coverage area of Jingzhou dual-polarization weather radar

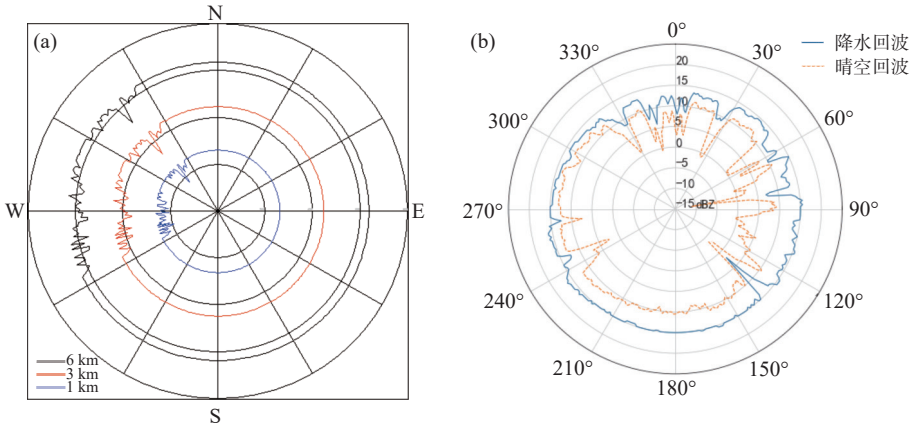


图 6 荆州双偏振天气雷达站基于 DEM 地形 (a) 与基于回波统计 (b) 遮挡识别图

Fig. 6 Obstruction Identification at Jingzhou dual-polarization weather radar station results based on (a) DEM terrain and (b) echo statistics

此外，前面分析发现雷达 QPE 反演精度随着离雷达站距离的增加而下降，而雷达反演 QPE 所用 Z 高度跟目标相对于雷达的距离有关，为了分析雷达距离库采样高度对雷达 QPE 反演精度的影响，图 7 给出了不同高度 Z 雷达 QPE 和地面雨量计小时雨量的偏差箱线图。可以看出，总体上雷达 QPE 与雨量计小时雨量的偏差均集中在 0 mm 附近，随雷达采样高度变化不大。然而，在不同雷达采样高度上，雷达 QPE 与雨量计小时雨量偏差的四分位数、四分位距、异常值等指标存在一定的差异。具体表现为，随着雷达采样高度的增加，雷达 QPE 偏差的下四分位数出现明显下降，雷达 QPE 的低估程度变大，而且雷达 QPE 偏差的箱体长度 (IQR) 在增加，数据的波动范围变大，数据的离散度增强。另外，与雷达低采样高度相比，雷达高采样高度更容易出现雷达 QPE 偏差极值，尤其在 3.5~4.0 km 高度雷达 QPE 异常值分布范围大，并且负向偏差大且频次高，表明雷达 QPE 对地面降水存在明显低估现象。由此可见，随着雷达采样高度增加，雷达 QPE 的反演精度下降，而且会出现低估地面降水的现象。

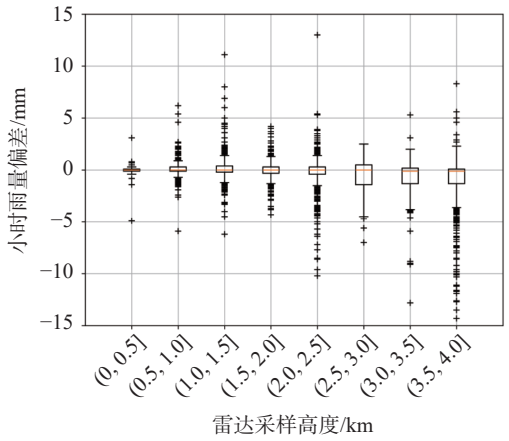


图 7 不同高度雷达 QPE 和地面雨量计小时雨量的偏差箱线图

Fig. 7 Box plot of hourly precipitation deviation between radar QPE at different Z-heights and ground rain gauge

3 讨 论

本文对 2023 年梅雨期荆州双偏振雷达覆盖范围内雷达 QPE 的降水识别性能和反演精度进行了定量评估，并重点分析了雷达 QPE 反演精度在空间上的分布以及探讨地形遮挡对雷达 QPE 精度的影响。现就所得分析结果作进一步讨论。

3.1 雷达 QPE 精度与降水等级的关系

总体上雷达 QPE 对地面降水的命中率和临界成功指数分别为 74.7% 和 57.9%，其中雷达 QPE 对暴雨识别的临界成功指数最高，达到 62.7%，而对大雨识别的临界成功指数最低，约为 39.1%。雷达 QPE 的降水识别性能在不同等级降水上的差异，可能与雷达 QPE 存在低估降水有关，因为雷达 QPE 对于地面微量降水和晴空弱回波存在识别不足 (Zhang 等，2014)。另外，雷达 QPE 和地面雨量计小时雨量之间有着较强的一致性，两者的相关系数为 0.91，平均偏差为-0.39 mm，均方根误差为 1.95 mm。雷达 QPE 的反演精度在不同等级降水上存在明显差异。雷达 QPE 和地面雨量计小时雨量的相关性在暴雨时最好 (0.80)，而在大雨时相关性最差 (0.39)。同时，随着雨强的增加，雷达 QPE 和地面雨量计的负偏差值 ME 及偏差离散度 RMSE 也显著增加，这和郭佳等 (2020) 研究结果较为一致，表明强降水下的雷达 QPE 反演精度仍有待提高。

3.2 雷达 QPE 精度受波束遮挡的影响分析

波束遮挡会导致雷达 QPE 的降水估测误差增加，尤其在强降水时，遮挡效应会导致 QPE 精度显著下降。这主要由于波束遮挡效应会造成雷达回波反射率强度下降 (Lang et al., 2009)，影响实际业务 CSU-HDIRO 估测算法中降水反演公式的选择，无法有效引入 KDP 偏振量采用 R (K_{DP}、Z_{DR})、R (K_{DP}) 组合反演公式进行降水估测，最终造成 QPE 反演性能的下降。为了进一步探讨地形遮挡对雷达 QPE 精度的影响，本文对剔除波束遮挡后的数据进行了对比分析 (表 4)。结果表明，去除波束遮挡样本后，雷达 QPE 的反演精度在大雨和暴雨等级降水时有所改善，尤其是在暴雨期间，雷达 QPE 的相关系数从 0.80 提升至 0.91，均方根误差也显著降低，两者的平均偏差和均方根误差也分别从−5.62 mm 和 9.49 mm 改善为 −2.65 mm 和 5.71 mm。

表 4 剔除波束遮挡样本后不同降水等级下荆州双偏振雷达 QPE 与雨量计小时雨量的对比结果

Table 4 Comparison results of hourly precipitation between dual-polarization radar QPE and rain gauge under different precipitation levels after excluding beam blockage samples in Jingzhou

降水等级	样本量/站次	评估指标			
		CORR	ME/mm	RME/%	RMSE/mm
小雨	2 339	0.57	−0.01	−2	0.66
中雨	556	0.57	−0.87	−19	2.21
大雨	91	0.56	−1.95	−18	4.02
暴雨	41	0.91	−2.65	−9	5.71

3.3 双偏振雷达对强降水估测的优势

针对天气雷达 QPE 反演精度的改进效果，本文进一步对比了双偏振雷达 QPE 与单偏振雷达 QPE

在强降水中的表现。本文选择荆州雷达东南部, 方位角 125°距离 90 km 处的监利雨量计站点 (图 1) 为例, 进行双偏振雷达 QPE (CSU-HDIRO 算法) 和常规单偏振雷达 QPE (*Z*-*R* 关系法) 的对比分析。图 8 给出了 2023 年 6 月 16—19 日监利雨量计站点出现降水时, 天气雷达单偏振雷达 QPE 和双偏振雷达 QPE 的小时降水时间序列图。此期间, 雨量计共有 28 个时次出现降水, 最大小时降水量为 65.3 mm。从图 8 可见, 小雨时双偏振雷达 QPE 和单偏振雷达 QPE 对地面降水的估测性能比较接近; 随着雨强增加, 双偏振雷达 QPE 的性能优势逐渐显现, 尤其是暴雨时双偏振雷达 QPE 和雨量计观测值的偏差明显低于单偏振雷达 QPE。这说明天气雷达双偏振技术升级可以提高雷达强降水 QPE 质量, 因为 K_{DP} 在表征强降水和粒子浓度方面有着特殊优越性 (Ryzhkov et al., 2005)。

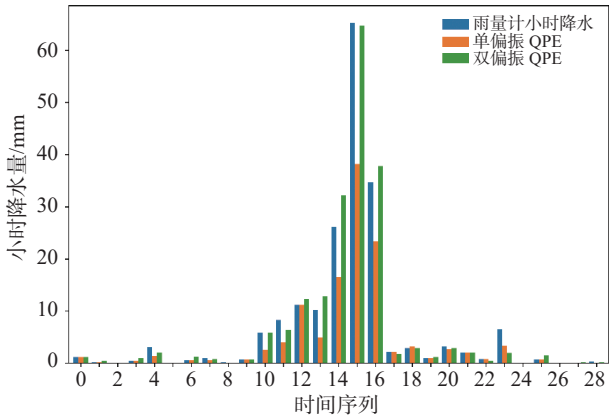


图 8 2023 年 6 月 16—19 日监利雨量计站点出现降水的时次中天气雷达单偏振双偏振 QPE 小时降水时间序列图

Fig. 8 Time series of hourly precipitation measured by the Jianli rain gauge station and weather radar using single polarization and dual polarization QPE from June 16 to June 19, 2023, when precipitation occurred

需要指出的是, 上述分析结果是基于 2023 年梅雨期荆州雷达的资料统计分析得到, 分析过程中雷达 QPE 计算式中均采用默认的参数值, 未进行非降水回波质量控制和遮挡订正, 这可能对雷达反演 QPE 产生一定的影响。另外, 在 CSU-HDIRO 定量降水估测算法中, Z_{DR} 的偏差也是降水估测的重要因素, 本文未对 Z_{DR} 数据质量进行评估, 后续工作中将结合金属球标校试验开展这方面的研究。此外, 本文初步分析了波束遮挡和雷达采样高度对雷达 QPE 的降水识别性能和反演精度的影响, 针对其它影响因素如非气象回波抑制、波束遮挡校正、融化层亮带污染等的分析, 国内外学者也进行了相关的研究。近年来, 中国气象局为更好提升新一代天气雷达反射率因子的一致性, 引入了金属球开展雷达系统标校试验, 利用双偏振雷达观测相关系数、差分反射率等参量统计特征抑制非气象回波和晴空回波, 提高了雷达数据质量 (Oh et al., 2020; 张林等, 2022)。Zhang 等 (2013) 基于极化雷达测量数据进行部分波束遮挡校正的新方法研究, 利用反射率因子 Z_H 和特定差分相位 K_{DP} 及其在降雨中的径向积分之间的一致性来校正波束遮挡引起的偏差。还要学者利用双线偏振天气雷达开展了零度层亮带的识别和订正研究, 提升了雷达数据的准确性和可靠性 (Zhang and Qi, 2010)。这些研究成果有助于深入认识雷达 QPE 反演的不确定性, 也给雷达 QPE 反演算法的改进带来启示。

4 结　论

本文利用湖北省梅雨期 (2023 年 6 月 16 日—7 月 10 日) 国家级自动气象站实测小时雨量资料和荆州站双偏振天气雷达体扫资料, 对荆州双偏振天气雷达 QPE 的降水识别性能、反演精度、影响因素进行分析和讨论, 得到的主要结论如下:

(1) 总体上, 双偏振雷达 QPE 识别地面降水的命中率为 74.7%, 空报率为 28%, 临界成功指数为 57.9%。双偏振雷达 QPE 对不同等级降水的识别性能存在差异, 其中,识别暴雨的性能最好, 中雨次之, 大雨最差, 其对应的临界成功指数分别为 62.7%、52.6%、39.1%。双偏振雷达对大雨和小雨的识别能力需要进一步提升。

(2) 双偏振雷达 QPE 与雨量计小时雨量具有较好的一致性, 两者的相关系数为 0.91, 平均偏差和相对平均偏差分别为-0.22 mm 和-13%, 均方根误差为 1.74 mm。双偏振雷达 QPE 与雨量计小时雨量的相关系数在暴雨时高于其他等级降水, 而在大雨时明显低于其他等级降水, 然而双偏振雷达 QPE 会低估地面观测降水, 且两者的负偏差程度随雨强增大而增加, 两者的离散度也随雨强的增大而增大。

(3) 天气雷达波束遮挡会造成雷达反射率因子低估, 这会降低 CSU-HDIRO 定量降水估测算法对地面降水的判识性能。本文在波束遮挡区内双偏振雷达 QPE 的降水识别性能的下降程度可达 20%。双偏振雷达 QPE 的反演精度受 *Z* 采样高度的影响不大, 其与雨量计小时雨量的偏差稳定在 0 mm 附近; 然而, 随着 *Z* 采样高度的增加, 双偏振雷达 QPE 的离散程度和异常值出现较大的波动, 容易出现低估地面降水的现象。

由于雷达资料限制, 本文仅针对荆州站 S 波段双偏振天气雷达在降水识别性能和反演精度方面进行了分析。对于其他地区使用相同波段或不同波段

的双偏振雷达在降水估算(QPE)中的识别性能和反演精度,仍需做进一步对比研究。此外,后续可开展双偏振雷达的非降水回波质量控制和波束遮挡订正技术研究,还可结合区域特点及雨滴谱特征,对 $R(Z_H)$、$R(Z_{DR})$、$R(K_{DP}、Z_{DR})$、$R(K_{DP})$ 等公式中的参数进行本地化调整,以进一步提高双偏振雷达 QPE 的准确度。

参考文献 (References):

楚荣忠,王致君,刘黎平,等.1997.双线偏振雷达降雨估测分析[J].气象学报,55(1):103−109. Chu R Z, Wang Z J, Liu L P, et al. 1997. Analysis of dual-polarization radar rainfall estimation [J]. Acta Meteorologica Sinica,55(1):103−109 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1997.011

段和平,马中元,陈鲍发,等.2023.江西两次强降雹过程的雷达回波特征对比分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):137−145 Duan H P, Ma Z Y, Chen B F, et al. 2023. Comparative analysis of radar echo characteristics of two severe hails in Jiangxi Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):137−145 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.018

高晓荣,梁建茵,李春晖.2012.雷达定量降水估计技术及效果评估[J].热带气象学报,28(1):77−88. Gao X R, Liang J Y, Li C H. 2012. Radar quantitative precipitation estimation techniques and effect evaluation [J]. Journal of Tropical Meteorology,28(1):77−88 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2012.01.009

勾亚彬,刘黎平,李瑞义,等.2015.基于雷达回波概率特征的雷达部分遮挡区域识别算法[J].高原气象,34(2):556−567. Gou Y B, Liu L P, Li R Y, et al. 2015. Radar partial shielding region identification algorithm based on the probability characteristics of radar echoes [J]. Plateau Meteorology,78(4):705−720 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2013.00192

郭佳,吴艳锋,罗丽,等.2020. CINRAD-SA 偏振雷达定量降水估测算法改进及应用评估[J].气候与环境研究,25(3):305−319. Guo J, Wu Y F, Luo L, et al. 2020. Improvement of the quantitative precipitation estimation algorithm based on the CINRAD-SA polarization radar and its application evaluation [J]. Climatic and Environmental Research,25(3):305−319 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2020.19012

李梦迪,戚友存,张哲,等.2022.基于雷达—雨量计降水融合方法提高极端降水监测能力[J].大气科学,46(6):1523−1542. Li M D, Qi Y C, Zhang Z, et al. 2022. Improving the detection performance of extreme precipitation observations using a radar-gauge merging algorithm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(6):1523−1542 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21201

刘黎平,钱永甫,王致君,等.1996.双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J].大气科学,20(5):615−619. Liu L P, Qian Y P, Wang Z J, et al. 1996. Comparative study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,20(5):615−619 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1996.05.13

柳云雷,李昌兴,张乐坚,等.2020.基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响[J].气象学报,78(4):705−720. Liu Y L, Li C X, Zhang L J, et al. 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(4):705−720 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.037

潘旸,谷军霞,宇婧婧,等.2018.中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J].气象学报,76(5):755−766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al. 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(5):755−766 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.034

任芝花,赵平,张强,等.2010.适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J].气象,36(7):123−132. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. Meteorological Monthly,36(7):123−132 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.7.019

王建林.2007.双线偏振多普勒雷达定量探测降水强度方法的研究[D].北京: 中国气象科学研究院. Wang J L. 2007. Study on quantitative detection method of precipitation intensity using dual-polarization doppler radar [D].Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

王曙东,裴翀,郭志梅,等.2011.基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J].气候与环境研究,16(4):459−468. Wang S D, Pei C, Guo Z M, et al. 2011. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain block age based on SRTM data [J]. Climatic and Environmental Research,16(4):459−468 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2011.04.06

韦凯华,张录青,黄晓莹.2023. ROSE2.0 定量降水估测产品在广东地区的适用性检验[J].广东气象,45(2):44−47. Wei K H, Zhang L Q, Huang X Y. 2023. Assessment of the applicability of the ROSE 2.0 quantitative precipitation estimation product in Guangdong region [J]. Guangdong Meteorology,45(2):44−47 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−6190.2023.02.011

荀爱萍,张伟,黄惠镕,等.2019.厦门市 S 波段双偏振雷达测雨效果分析[J].气象与环境科学,42(4):103−110. Xun A P, Zhang W, Huang H R, et al. 2019. Analysis of rainfall measuring errors of S-band dual polarization weather radar in Xiamen [J]. Meteorological and Environmental Sciences,42(4):103−110 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2019.04.015

荀爱萍,赵玉春,李菲,等.2023. X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测研究[J].暴雨灾害,42(4):437−445. Xun A P, Zhao Y C, Li F, et al. 2023. Analysis of radar quantitative precipitation estimation using X-band polarimetric radar [J]. Torrential Rain and Disasters,42(4):437−445 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−043

殷秀良,张培昌.2000.双线偏振雷达测雨公式的对比分析[J].南京气象学院学报,23(3):428−434. Yin X L, Zhang P C. 2000. Comparative analysis of dual-polarization radar rainfall estimation formulas [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,23(3):428−434 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−7097.2000.03.018

张林,李峰,吴蕾,等.2022. CINRAD/SAD 双偏振雷达非降水回波识别技术[J].应用气象学报,33(6):724−735. Zhang L, Li F, Wu L, et al. 2022. Non-precipitation identification technique for CINRAD/SAD dual polarimetric weather radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(6):724−735 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220607

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 Sinica,79(5):786−803 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.042

中国气象局.2003.地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社:190. China Meteorological Administration. 2003. Specifications for surface meteorological observations [M]. Beijing:China Meteorological Press:190

Bringi V N, Chandrasekar V. 2001. Polarimetric doppler weather radar: principles and applications [M]. Cambridge:Cambridge University Press

Cifelli R, Barjenbruch D, Brunkow D, et al. 2003. Evaluation of an operational polarimetric rainfall algorithm [C]. In Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle, WA: American Meteorological Society, P2B. 14

Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S. 2011. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: application in Colorado precipitation events [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,28(3):352−364. doi:10.1175/2010JTECHA1488.1

Giangrande S E, Ryzhkov A V. 2008. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,47(9):2445−2462. doi:10.1175/2008JAMC1753.1

Gourley J J, Kirstetter P E, Hong Y, et al. 2017. The value of dual-polarization radar for improving the accuracy of urban flood warnings [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,98(8):1663−1680. doi:10.1175/BAMS−D−15−00247.1

Lang T J, Nesbitt S W, Carey L D. 2009. On the correction of partial beam blockage in polarimetric radar data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,26(5):943−957. doi:10.1175/2008JTECHA1133.1

Oh Y A, Kim H L, Suk M K. 2020. Clutter elimination algorithm for non-precipitation echo of radar data considering meteorological and observational properties in polarimetric measurements [J]. Remote Sensing,12(22):1−17. doi:10.3390/rs12223790

Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. 2005. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D [J]. Journal of Applied Meteorology,44(4):502−515. doi:10.1175/JAM2213.1

Seo D J, Breidenbach J P. 2002. Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements [J]. Journal of Hydrometeorology,3(2):93−111. doi:10.1175/1525−7541(2002)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2

UIbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,22(10):1764−1775. doi:10.1175/1520−0450(1983)022<1764:nvitaf>2.0.co;2

Voormansik T, Cremonini R, Post P, et al. 2021. Evaluation of the dual-polarization weather radar quantitative precipitation estimation using long-term datasets [J]. Hydrology and Earth System Sciences,25(3):1245−1258. doi:10.5194/hess−25−1245−2021

Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D [J]. Weather and Forecasting,13(2):286−303. doi:10.1175/1520−0434(1998)013<0286:aehdaf>2.0.co;2

Zhang J, Qi Y C. 2010. A real-time algorithm for the correction of bright-band effects in radar-derived QPE [J]. Journal of Hydrometeorology,11(5):1157−1171. doi:10.1175/2010jhm1201.1

Zhang J, Qi Y C, Carrie L, et al. 2014. A real-time algorithm for merging radar QPEs with rain gauge observations and orographic precipitation climatology [J]. Journal of Hydrometeorology,15(5):1794-1809. doi:10.1175/JHM−D−13−0163.1

Zhang P, Zrnić D, Ryzhkov A. 2013. Partial beam blockage correction using polarimetric radar measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,30(5):861−872. doi:10.1175/JTECH−D−12−00075.1

(责任编辑　闵爱荣)