



武汉X波段双偏振相控阵雷达定量降水估测产品质量评估

秦建峰 胡雅超 程昌玉 苟阿宁 徐桂荣

Quality evaluation of quantitative precipitation estimation products from Wuhan's X-band dual-polarization phased-array radar

QIN Jianfeng, HU Yachao, CHENG Changyu, GOU Aning, XU Guirong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-227>

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

X波段双偏振相控阵雷达定量降水估测研究

Analysis of radar quantitative precipitation estimation using X-band polarimetric radar

暴雨灾害. 2023, 42(4): 437–445 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-043>

一种X波段相控阵天气雷达反射率因子订正算法

A reflectivity factor correction algorithm for X-band phased array radars

暴雨灾害. 2023, 42(4): 446–454 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-025>

荆州双偏振天气雷达定量降水估测精度及影响因素分析

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

暴雨灾害. 2025, 44(5): 665–675 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-127>

湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析

Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan

暴雨灾害. 2023, 42(3): 293–302 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-065>

江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析

Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province

暴雨灾害. 2022, 41(6): 621–630 <https://doi.org/10.12406/byzh.2020-242>

高密度雷达网风场反演的优化方法及其应用效果检验

The optimization method for wind field retrieval using high-density radar networks and its application effect verification

暴雨灾害. 2024, 43(6): 713–722 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-209>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

秦建峰,胡雅超,程昌玉,等.2026.武汉 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测产品质量评估[J].暴雨灾害,45(4):564–575. QIN Jianfeng, HU Yachao, CHENG Changyu, et al. 2026. Quality evaluation of quantitative precipitation estimation products from Wuhan's X-band dual-polarization phased-array radar [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(4):564–575 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–227

武汉 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测产品质量评估

秦建峰^{1, 2}, 胡雅超², 程昌玉^{1, 3}, 苟阿宁², 徐桂荣¹

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心, 武汉 430205; 2. 湖北省武汉市气象局, 武汉 430040; 3. 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074)

摘 要: 为提升武汉地区强降水监测与预警能力,以地面观测降水数据为基准,选取 2025 年 5—8 月武汉 8 次典型强降水过程,从降水总体识别能力、雨量等级敏感性、降水类型差异、时空分布特征、S 与 X 波段雷达探测一致性五个方面,对武汉 6 部 X 波段双偏振相控阵雷达 (X-band Dual-polarization Phased Array Radar, XPAR) 组网的定量降水估测 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) (以下简称 XPAP-QPE) 产品质量进行评估,并探讨误差特征及其成因。结果表明:XPAP-QPE 产品能较好识别地面降水,总体相关系数、平均偏差、相对平均偏差、均方根误差分别为 0.93、-0.24%、-6.0%、2.88 mm。其中在小雨和中雨条件下降水识别准确率和估测量值可信度较高,随降水强度增加误差增大,在大雨及暴雨阶段估测误差较大且存在系统性低估。层状云降水误差相对较小,对流云降水和混合型降水误差相对较大,暴雨强度条件下上述表现更为明显。XPAP-QPE 产品与实测降水的空间分布和时序变化的趋势一致,能有效反映降水过程的发生与演变,但降水估测性能表现出空间差异性。XPAP-QPE 在刻画局地强降水细节方面相较于 S 波段雷达具有更高的空间分辨能力。该研究结果可为 XPAP-QPE 产品在武汉地区气象预报业务应用中提供参考依据。

关键词: X 波段; 相控阵雷达; 定量降水估测; 质量评估

中图法分类号: P415.2

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–227

Quality evaluation of quantitative precipitation estimation products from Wuhan's X-band dual-polarization phased-array radar

QIN Jianfeng^{1, 2}, HU Yachao², CHENG Changyu^{1, 3}, GOU Aning², XU Guirong¹

(1. *Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory, Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430205*; 2. *Wuhan Meteorological Bureau of Hubei Province, Wuhan 430040*; 3. *Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan 430074*)

Abstract: To enhance the monitoring and early warning capabilities and provide a scientific basis for an optimized quantitative precipitation estimation (QPE) algorithm and operational application for heavy precipitation in the Wuhan region, this study evaluates the QPE product from a network of six X-band dual-polarization phased array radars (XPAPs) in Wuhan, using rain gauge observations as ground truth. The assessment focuses on eight typical heavy-rainfall events from May to August 2025 and examines five key aspects, including overall precipitation detection capability, sensitivity to rainfall intensity, differences across precipitation types, spatiotemporal distribution characteristics, and consistency between S-band and X-band radar observations. Results show that the QPE product effectively identifies surface precipitation, with an overall correlation coefficient, mean bias, relative mean bias, and root-mean-square error of 0.93, -0.24%, -6.0%, and 2.88 mm, respectively. The QPE product exhibits high accuracy and reliability for light-to-moderate rain, but performance degrades with increasing rain intensity, resulting in substantial errors and a systematic low bias for heavy precipitation events. For stratiform precipitation, the errors are relatively small, but large errors occur for convective and mixed types with more significant errors during rain storm. While the QPE product agrees with rain gauge observations in capturing the spatiotemporal evolution, its

收稿日期: 2025–10–30; 定稿日期: 2026–02–14

资助项目: 全国暴雨研究开放基金重点项目 (BYKJ2024Z04, BYKJ2025Z11); 武汉市气象科技联合项目 (2023020201010575, 2023020201010580, 2025021101030375); 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目 (2023AFD107, 2024AFD205, 2024AFD207); 武汉市气象局强对流短临预报关键技术研究创新团队项目 (WHQX2025ZD01)

第一作者: 秦建峰, 主要从事天气雷达与大气探测技术研究。E-mail: peak1980@163.com

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

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

quantitative estimation performance exhibits spatial variability. The phased-array radar QPE provides finer spatial detail compared to the S-band radar in capturing the structure of localized heavy precipitation. This study demonstrates that the XPAR-network QPE product in Wuhan presents robust performance in depicting precipitation spatial patterns and tracking its temporal evolution, and exhibits significant application value in weather forecasting. However, it remains subject to systematic biases and spatial heterogeneities under varying rainfall intensities and in topographically blocked regions. This study provides an important basis for the application value of X-band phased array radar QPE products in meteorological forecasting operations.

Key words: X-band; phased-array radar; quantitative precipitation estimation (QPE); quality evaluation

引言

天气雷达是实现暴雨、短时强降水等中小尺度降水过程连续跟踪监测的一种最有效的工具(Cocks et al., 2019; 俞小鼎等, 2020)。定量降水估测 QPE (Quantitative Precipitation Estimation) 是天气雷达的重要功能之一,在流域水文预报、城市防汛和精细化气象服务中具有关键作用。随着天气雷达技术的不断发展,双偏振、多参数雷达观测在提高降水反演精度方面取得显著进展,是国内外气象业务和研究的重点方向(王红艳等, 2015; 唐顺仙等, 2017)。近年来,学者们针对不同算法和波段的 QPE 性能进行了大量研究。陈超等(2019)改进了基于水平反射率(Z_H)和差分传播相移率(K_{DP})的降水估测综合法,发现降水率越大,综合法优势越明显;荀爱萍等(2019)分析 S 波段双偏振雷达 5 种测雨方程的测雨效果及误差认为, K_{DP} - R 关系法方程 $R(K_{DP})$ 与 Z_H - R 关系法方程 $R(Z_H, K_{DP}, Z_{DR})$ 的估测降水与实况降水最为接近。郭佳等(2020)基于非球形粒子的散射模型,利用雨滴谱数据(DSD)对降水估测算法参数模型(CSU-HIDRO)进行了优化;程昌玉等(2025)进一步分析了该算法在业务天气雷达的定量降水估测精度与影响因素。李海俊等(2025)对 S 波段双偏振雷达 4 类 QPE 产品评估表明,双偏振产品的估测效果好于单偏振,且降水强度越小、距离越近,估测能力越优。张哲等(2021)利用深圳 S 波段和 X 波段双偏振多普勒雷达探测资料,设计了混合降水反演方法,显著提高了降水反演的稳定性与精度。

相较于传统雷达, X 波段相控阵雷达具备电子束控、高速指向、快速扫描等显著优势,能够以更高时空分辨率对强对流系统精细结构进行探测,捕捉系统快速演变过程,在短时临近预报和强降水监测中具有独特潜力(吴翀, 2014; 黄兆楚等, 2025)。然而, X 波段雷达易受降水衰减、设备稳定性和数据质量等因素影响,其 QPE 精度仍受限(陈浩然等, 2024; 鲁德金等, 2024)。为此,相关学者对 X 波段相控阵雷达的 QPE 精度进行了深入研究,其结果表明, X 波段相控阵雷达的组网探测可在一定程度上弥补单雷达

的遮挡和衰减问题,但其算法适应性和区域差异性仍需进一步检验,在应用与研究中尤其需要重点关注存在的一些问题(荀爱萍等, 2023; 梅雨菲等, 2023; 余本超等, 2024)。如 K_{DP} 值存在上下波动现象,可能影响定量降水估测的结果;灵敏度较低导致远距离弱回波探测能力有限,同时宽波束将导致平滑效应,使得弱回波面积减小,较强回波面积增大、峰值数值减小; Z_{DR} 数据精度较差,且波动变化大,难以达到定量降水估测所需的精度要求;当降水强度大于 $16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,降水估测误差较大(余本超等, 2024)。

武汉市位于我国中部江汉平原东缘,地形复杂,城市化程度高,属亚热带季风气候区。夏季高温湿润,暴雨、短时强降水等灾害性天气频发,对城市防洪排涝构成严峻挑战。为提升强降水监测与预警能力,2025 年武汉建成由 6 部 X 波段双偏振相控阵天气雷达组成的组网探测系统。该系统在强对流监测中表现良好,但其 QPE 产品在不同降水类型和雨强下仍存在偏差。为此,本文选取 2025 年 5—8 月武汉地区 8 次典型强降水过程,基于地面自动气象站观测资料,针对武汉 X 波段双偏振相控阵雷达(X-band Dual-polarization Phased Array Radar, XPAR)组网 QPE 产品(以下简称 XPAR-QPE 产品),从总体识别性能、雨量等级敏感性、降水类型差异、时空分布特征、S 与 X 波段雷达一致性五个方面对其进行评估,并探讨误差特征及其成因,为后续 XPAR-QPE 产品算法优化和业务应用提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

武汉区域 XPARG 组网观测系统,于 2025 年前建成并投入运行,由分布于黄陂横店、汉南、蔡甸、江夏、东湖高新和新洲的 6 部 XPARG 构成,其空间分布及探测覆盖范围见图 1。XPARG 通过电子扫描实现快速波束指向与灵活控制,在获取高时间分辨率观测资料和刻画中小尺度降水结构方面具有明显优势,主要技术性能参数见表 1。

基于上述雷达观测系统,本文使用的资料包括 XPARG 1 h QPE 产品、武汉市 321 个地面自动气象站

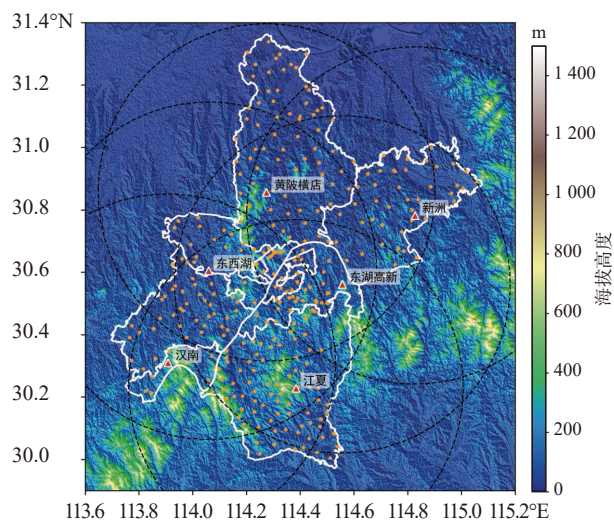


图 1 武汉行政区 (白色边界) 6 部 XPAR (红色三角形)、地面自动气象站 (黄色圆点) 分布和海拔高度 (填色) (虚线圆圈表示雷达探测范围)

Fig. 1 Geographic position (white) and terrain (shaded) of the XPARs (red triangles) and surface rain gauge observation site in Wuhan (black dotted circles indicate the detecting range for a single radar)

表 1 武汉 XPAR 主要性能参数及指标

Table 1 Main performance parameters and indicators of Wuhan XPARs

参数	指标	参数	指标
天线形式	阵列平板	天线扫描	方位机械扫描、俯仰电扫
极化方式	线性水平/垂直极化	工作频率	9.3~9.5 GHz
工作体制	交替发射	峰值功率	≥ 1 kW
水平波束宽度	1.8°	垂直波束宽度	1.8°
波束数量	16	扫描策略	VRHI (40层仰角)
体扫时间	1 min	仰角扫描范围	0.9° ~ 36°
最大探测距离	60 km	最小距离分辨率	30 m
基本数据	Z_H 、 V 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 等		

逐小时雨量观测资料,以及武汉 CINRAD/SAD (以下简称 S 波段) 雷达 1 h QPE 产品。观测雨量数据和 S 波段雷达 QPE 产品来源于湖北省气象大数据云平台,并经过实时质量控制、异常值剔除和一致性检验; XPAR- QPE 产品由广东纳睿雷达科技股份有限公司开发的数据产品生成平台提供。

1.2 XPAR-QPE 产品质控算法

雷达数据质量是影响 QPE 产品性能的重要因素,针对 X 波段雷达在降水条件下易受衰减影响的问题,参考 Ryzhkov 等 (2003) 和肖艳姣等 (2012) 的方法,首先对差分传播相移 (Φ_{DP}) 做 FIR 滤波平滑处

理,然后对 K_{DP} 进行线性拟合反演,并基于 Bringi 等 (2001) 和 Park 等 (2005) 提出的自洽约束算法,结合毕永恒 (2012) 的方案完成反射率衰减订正,相关计算公式、参数含义及取值范围与上述文献保持一致。

在完成反射率衰减订正后,为减小地形遮挡影响,采用基于高分辨率地形数据的混合仰角采样方法用于降水估测 (王红艳和刘黎平, 2015),并对部分遮挡区域的反射率因子按波束遮挡率 (BBF, 记作 B_{BF} , 单位: %) 进行补偿 (Zhang et al., 2013),计算方法如下

$$Z = Z_m - 10 \log(1 - B_{BF}) \quad (1)$$

其中, Z_m 、 Z 为波束遮挡补偿订正前、后的反射率因子 (单位: dBZ)。图 2 给出江夏和黄陂横店雷达等射束高度图,其中,江夏雷达在东南和西北方向存在遮挡,黄陂横店雷达在东北山体方向存在遮挡。

雷达数据质量控制后,采用 Z_H - R 关系法和 K_{DP} - R 关系法进行降水定量估测 (王红艳和刘黎平, 2015; 余本超等, 2024),计算方法如下

$$R = \begin{cases} a_1 Z_H^{b_1} & Z_H < K \\ a_2 K_{DP}^{b_2} & Z_H \geq K \end{cases} \quad (2)$$

其中, R 为降水率 (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 估测系数 $a_1=0.046$ 、 $b_1=0.608$ 、 $a_2=16.93$ 、 $b_2=0.83$, 参考张培昌等 (2001) 根据雨滴谱资料统计分析和拟合的参数 $K=20$ dBZ 为阈值,当 $Z_H < 20$ dBZ 在小雨阶段时,由于 K_{DP} 容易受到噪声影响,其时空变化较大,降水估测易产生较大的误差,使用 Z_H - R 估测降水更好 (王建林等, 2005)。 Z_H 单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, K_{DP} 单位为 $^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。雷达组网 QPE 基于单站 QPE 产品,采用时空匹配与距离加权融合方法进行计算生成。

1.3 降水过程选取及数据匹配

考虑相控阵雷达高时间分辨率特性,采用加权积分方法将 1 h 内多个时次的 QPE 产品转换为小时累计雨量 (梅雨菲等, 2023),其空间分辨率为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。为实现 XPAR- QPE 与地面雨量观测在统一时间尺度上的对比,选取整点或最邻近时刻的 QPE 产品与地面小时雨量进行时间匹配,并在气象站周围设置 7×7 雷达距离库作为空间匹配区域,选取其中与地面观测值最接近的 QPE 值作为对应站点的匹配结果 (郭佳等, 2020)。

选取 2025 年 5—8 月武汉区域发生的 8 次典型强降水过程作为研究样本,参考张培昌等 (2001)、俞小鼎等 (2006) 和范江琳等 (2014) 的降水分类方法,将回波强度在 15~25 dBZ、25~35 dBZ、35 dBZ 以上分别划分为层状云、混合型和对流云降水类型。基于

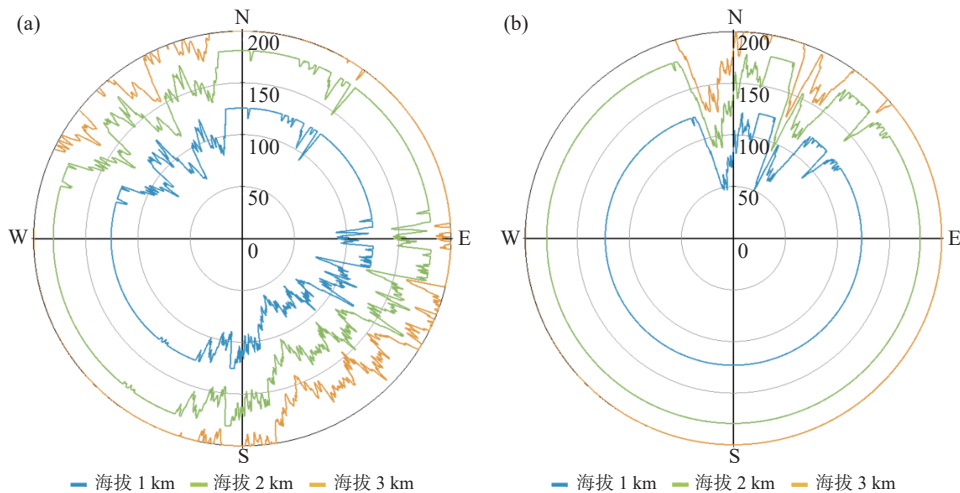


图2 江夏 (a) 和黄陂横店 (b) XPAR 1 km、2 km、3 km 等射束高度图 (图中圆圈和数字表示探测半径距离, 单位: km)

Fig. 2 Radar chart with iso beam height of XPARs at 1 km, 2 km, 3 km of (a) Jiangxia site and (b) Huangpi Hengdian site (Circles and numbers indicate detection radius distances, unit: km)

上述方法, 将 8 次降水过程的组网 QPE 和地面雨量进行时空匹配, 建立雷达-地面雨量站总计 26 876 组匹配数据对。表 2 给出 8 次强降水过程的发生时间、降水类型、数据匹配等信息。在降水强度方面, 8 次过程的最大小时雨量介于 18.8 mm 至 110.1 mm 之间, 涵盖不同降水强度和空间分布特征, 为后续不同类型降水的 QPE 精度评估提供了丰富的样本基础。

表 2 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程概况

Table 2 Eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

过程编号	时间/北京时	降水类型	最大小时雨量/mm	匹配数据对
1	5月4日17时—5日06时	混合	35.6	2 830
2	5月8日00—15时	混合	39.9	3 383
3	5月21日 23时—23日02时	对流	95.4	5 064
4	6月7日 02—20时	对流	110.1	2 910
5	6月14日 19时—15日03时	对流	54.9	1 499
6	6月18日20时—19日14时	层状	18.8	8 840
7	8月12日 04—16时	对流	41.5	474
8	8月30日16时—31日 03时	对流	82.0	1876

1.4 评估指标

基于 Witt 等 (1998) 和程昌玉等 (2025) 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}) 等四个指标评估 XPAR-QPE 产品对地面降水的识别能力。计算公式如下

$$P_{OD} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{MA} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{FA} = \frac{N_C}{N_A + N_C} \times 100\% \quad (5)$$

$$I_{CS} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \times 100\% \quad (6)$$

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, 参考苟爱萍 (2023) 等和程昌玉等 (2025) 使用的皮尔逊相关系数 CC (记为 C_C)、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 XPAR-QPE 产品的反演精度进行检验, 计算公式如下

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(Z_i - \bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}} \quad (7)$$

$$E_M = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Z_i)}{N} \quad (8)$$

$$E_{RM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Q_i - Z_i)}{Z_i} \times 100\% \quad (9)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - Z_i)^2} \quad (10)$$

其中, N 为总的样本数, Q_i 和 Z_i 分别代表 XPAR-QPE 产品估测的雨量和地面气象站观测的雨量, i 为样本序号, $\bar{Q}$ 表示 XPAR-QPE 的平均值, $\bar{Z}$ 表示地面气象站观测值的均值。

2 结果分析

匹配不同降雨等级 XPAR-QPE 和地面雨量观测数据对,从总体识别性能、雨量等级敏感性、降水类型差异、时空分布特征、S 波段与 X 波段雷达一致性五个方面,评估 XPAR-QPE 产品质量。

2.1 XPAR-QPE 总体识别性能评估

使用散点图定量检验 8 次强降水过程 QPE 产品总体估测性能(图 3)。总体 CC、ME、RME、RMSE 分别为 0.93、-0.24%、-6.0%、2.88 mm。散点在对角线附近呈现高密度聚集,表明 XPAR-QPE 产品与小时雨量在 95% 置信水平上呈显著正相关。

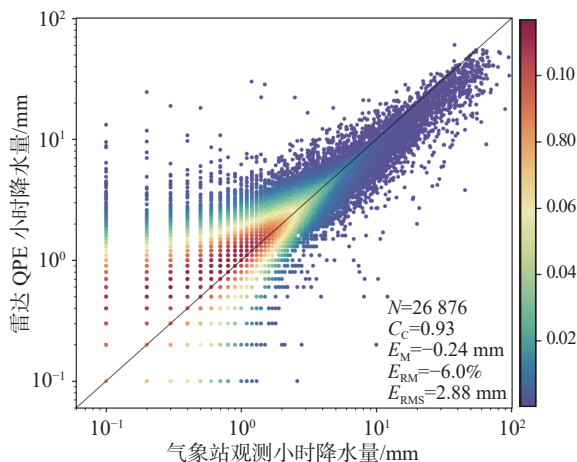


图 3 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程 XPAR 的 QPE 产品与地面小时雨量散点密度(填色)及相关评估指标

Fig. 3 Scatter density (shaded) of the hourly accumulated rainfall from the XPAR QPE product and surface rain gauge observations during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

小时雨量 ≤ 5 mm 时,散点在对角线两侧呈现较为离散的分布,说明对角线两侧高估的样本偏多。随着小时雨量增加至 5~40 mm 时,大多数散点逐步分布于对角线下方,呈现明显低估特征,且低估程度随雨量增大而增强。当小时雨量 ≥ 80 mm 时,散点几乎位于对角线下方,低估特征最为明显。整体上, XPAR-QPE 产品与地面小时雨量具有较高一致性,在中等降水强度(5~40 mm)范围内表现相对稳定,而在强降水条件下存在系统性低估。

2.2 XPAR-QPE 对雨量等级的敏感性

根据地面气象观测规范(中国气象局, 2003),按地面气象站小时雨量观测值将降水划分为小雨(≤ 2.5 mm)、中雨(2.6—7.9 mm)、大雨(8.0—15.9 mm)、暴雨(≥ 16 mm),并据此对 XPAR-QPE 产品在不同雨量等级下的性能进行统计检验。

表 3 给出 XPAR-QPE 产品对不同雨量等级识别能力评估结果,从中看出, XPAR-QPE 在小雨和中雨

条件下, POD 分别为 87.6% 和 86.7%, 表明其对弱至中等降水具有良好的识别能力。相比之下, 中雨的 FAR 由小雨的 4.4% 骤增到 35.3%, 中雨的 CSI 下降至 58.8%。随着降水强度进一步增强, 大雨和暴雨条件下 POD 分别降至 60.3% 和 63.2%, 漏报率 (MAR) 分别升高至 39.7% 和 36.8%, CSI 降至 48.4% 和 60.7%, 表明对大雨的捕捉能力不足。暴雨条件下虚警率降低至 6.0%, 这可能与强降水的雷达回波特征更加明显或双偏振 K_{DP} 参量在反演算法中的贡献有关。

表 3 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程 XPAR-QPE 产品对不同量级降水的识别能力评估结果

Table 3 Error assessment from XPAR QPE in different precipitation levels during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

量级	样本量/站次	评估指标			
		POD/%	RMA/%	RFA/%	CSI/%
小雨	17 029	87.6	12.4	4.4	84.2
中雨	6 280	86.7	13.3	35.3	58.8
大雨	2 354	60.3	39.7	29.1	48.4
暴雨	1 212	63.2	36.8	6.0	60.7

另外,从表 4 中看到,不同雨量等级下 XPAR-QPE 与地面雨量站观测雨量的 CC 保持在 0.56~0.74 之间,整体表现出较好的线性一致性。小雨的 CC 为 0.63, ME 为 0.523 mm, RME 为 0.66%, 显示 XPAR-QPE 轻微高估, 中雨的 ME 为 -0.184 mm, RME 为 -0.04%, 说明 QPE 估测值较为接近地面自动站实测值。随着雨强增大,大雨和暴雨的估测偏差显著扩大, ME 分别为 -2.04 mm 和 -7.80 mm, RME 为 -0.19% 和 -0.28%, 且 RMSE 分别升至 3.21 mm 和 11.64 mm, 表明在强降水条件下存在明显系统性低估和较大的随机误差。

表 4 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程 XPAR-QPE 产品对不同量级降水的精度评估结果

Table 4 Accuracy assessment from XPAR QPE in different precipitation levels during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

量级	样本量/站次	评估指标			
		CC	ME/mm	RME/%	RMSE/mm
小雨	17 029	0.63	0.523	0.66	1.01
中雨	6 280	0.61	-0.184	-0.04	1.47
大雨	2 354	0.56	-2.038	-0.19	3.21
暴雨	1 212	0.74	-7.802	-0.28	11.64

由图 3 可知, XPAR-QPE 对大雨和暴雨量级的降水总体上存在低估。该特征与表 3 和表 4 中大

雨、暴雨等级下CSI明显降低、漏报率升高以及估测偏差和RMSE显著增大的统计结果具有良好一致性,说明随着降水强度增强,XPAR-QPE对雨量等级的敏感性逐渐减弱,强降水阶段的估测误差成为制约产品性能的主要因素。

2.3 不同降水类型下XPAR-QPE的估测能力

图4给出混合型、层状云和对流云三种降水类型中XPAR-QPE与地面雨量站小时雨量的散点密度分布。整体看,三类降水条件下两者具有较强的一致性和相关性,大部分样本集中在小到中等降水范

围内,且随雨量增加,散点逐渐偏向对角线下方。从统计指标来看,三种类型降水CC较好,且无明显差异,均在0.91~0.94范围,说明三种类型降水XPAR-QPE对小时降水的空间-时间变化趋势均具有较好的捕捉能力。从ME、RME和RMSE来看,XPAR-QPE对层状云降水的估测误差最小,整个过程误差较为一致。其次是混合型和对流云降水,这两种类型降水XPAR-QPE在总体上存在一定的系统性低估。对流云降水RMSE为3.93 mm,反映出在个别时段或较强降水条件下仍存在明显偏差。

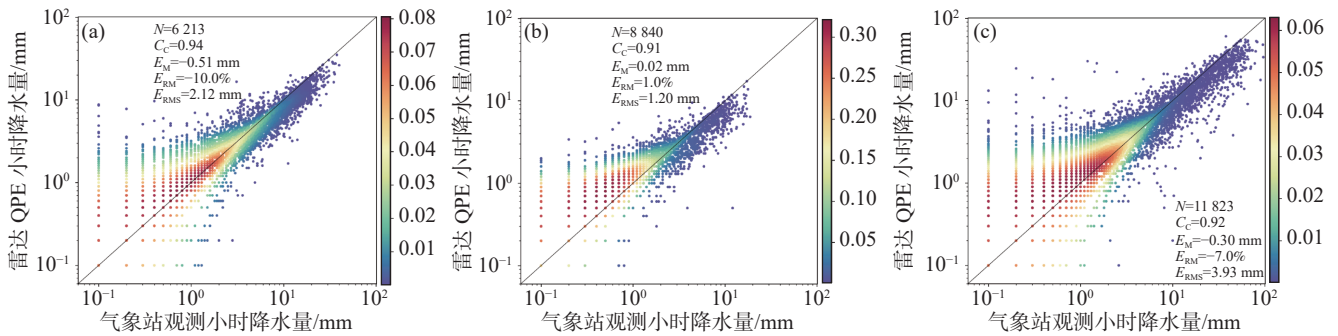


图4 2025年5—8月武汉区域8次强降水过程混合型降水(a)、层状云降水(b)、对流云降水(c)XPAR-QPE与地面小时雨量散点密度(填色)图

Fig. 4 Scatter density (shaded) of hourly accumulated rainfall from XPAR QPE and observations in (a) mixed precipitation, (b) stratiform precipitation and (c) convective precipitation during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

综上可见,XPAR-QPE产品在三类降水的时空分布特征基本一致,在弱到中等降水条件下表现较为可靠。层状云降水XPAR-QPE误差最小,混合型和对流云降水估测误差相对较大,且总体上存在一定的系统性低估。在小时雨量 ≥ 40 mm的强降水条件下,XPAR-QPE低估趋势更加突出,且对流云降水更为明显。层状云降水条件下QPE误差相对较小,可能与其回波分布均匀、垂直结构变化缓慢、反射率场连续性较好有关(刘晓璐等,2023),有利于雷达回波衰减订正及反演参数的稳定应用。相比之下,混合型降水和对流云降水通常伴随较强降水强度和剧

烈的时空变化,回波结构复杂,在强回波区更易受到衰减增强及相位参量不稳定等因素的共同影响,导致反射率和 K_{DP} 反演误差增大,从而使QPE估测偏差明显增加。

表5给出了XPAR-QPE对不同类型和等级地面降水的识别性能检验结果。总体上看,XPAR-QPE产品小雨和中雨的POD较高,均大于80%;大雨和暴雨的POD对流云降水表现最好,混合型降水次之,层状云降水最差。同时,三类降水小雨和暴雨FAR明显高于中雨和大雨,导致CSI出现相应的变化,中雨和大雨均存在一定空报。在层状云降水大雨和暴

表5 2025年5—8月武汉区域8次强降水过程XPAR-QPE对不同类型和不同量级降水的识别能力评估结果

Table 5 Recognition capability assessment from XPAR QPE in different precipitation types and levels during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

量级	样本量/站次			评估指标											
				POD/%			RMA/%			RFA/%			CSI/%		
	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云
小雨	2 773	6 736	7 520	84.4	94.7	82.5	15.6	5.3	17.5	6.7	4.9	2.9	79.5	90.3	80.5
中雨	2 044	1 690	2 546	89.2	80.4	88.9	10.8	19.6	11.1	30.6	31.9	40.3	64.0	58.4	55.5
大雨	1 117	390	847	64.7	28.2	69.3	35.3	71.8	30.7	25.1	15.4	35.3	53.2	26.8	50.3
暴雨	279	24	909	32.6	8.3	74.0	67.4	91.7	26.0	6.2	0.0	6.0	31.9	8.3	70.7

雨条件下, POD 显著下降, 仅为 28.2% 和 8.3%, MAR 升高至 71.8% 和 91.7%, 导致 CSI 降至 26.8% 和 8.3%, 说明其对大雨的捕捉能力不足, 随着雨强增大愈发明显。

表 6 给出了 XPAR-QPE 对不同类型和不同降水等级的精度检验结果。从精度检验指标看, 三类降水中暴雨的 ME 和 RMSE 明显高于小雨和大雨, 且

低估降水, 可能与暴雨衰减更强及衰减订正算法的表现差异有关。

综上所述, 三类降水 XPAR 的 QPE 产品在小雨和中雨条件下具有较好的探测能力, 尤其是对流云降水, 表现最为明显。三类降水小雨和暴雨的 FAR 明显低于中雨和大雨。层状云降水大雨和暴雨的 POD 显著下降, 暴雨的 QPE 明显低估降水。

表 6 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程 XPAR-QPE 对不同类型和不同降水等级的精度检验结果
Table 6 Accuracy assessment from XPAR QPE in different precipitation types and levels during eight heavy rainfall events in Wuhan from May to August in 2025

量级	样本量/站次			评估指标											
				CC			ME/mm			RME/%			RMSE/mm		
	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云	混合型	层状云	对流云
小雨	2 773	6 736	7 520	0.62	0.76	0.60	0.489	0.412	0.635	0.54	0.55	0.81	0.99	0.63	1.25
中雨	2 044	1 690	2 546	0.65	0.70	0.58	-0.270	-0.715	0.238	-0.06	-0.16	0.05	1.38	1.32	1.62
大雨	1 117	390	847	0.62	0.31	0.53	-2.179	-3.168	-1.331	-0.20	-0.32	-0.12	2.95	3.85	3.21
暴雨	279	24	909	0.69	-0.13	0.71	-5.428	-6.625	-8.561	-0.27	-0.39	-0.28	6.43	7.58	12.90

2.4 XPAR-QPE 时空分布特征

为分析武汉 XPAR-QPE 产品在降水空间结构与时间演变特征上的表现, 本文选取典型降水过程进行空间分布与时间序列对比分析。

图 5 给出 2025 年 5—8 月武汉市 8 次强降水过程气象站和 XPAR-QPE 累计降水空间分布对比结果。整体看, XPAR-QPE 能够较好刻画降水带的空间分布, 主雨带的形态和位置与雨量观测结果基本一致, 反映出较高的空间一致性。地面观测显示, 降水中心主要位于北部及东北部地区, 累计雨量普遍超过 200 mm, 局地超过 500 mm, 而南部和东南部地区降水

相对较小, 在 100~200 mm 之间。XPAR-QPE 估测的主降水中心与实测雨量中心位置吻合良好, 但降水强度在多个区域存在明显低估, 尤其是在北部和东北部的强降水中心, 局部地区低估幅度达 15%~25%。

图 6 给出不同雨量等级下 XPAR-QPE 的 CSI 空间分布以及武汉市中心城区建筑密集度分布 (中心城区建筑信息来源于武汉市测绘研究院)。由于暴雨样本数量较少, 其 CSI 空间分布代表性有限, 本文未对暴雨条件下的空间分布特征进行分析。从 CSI 的空间分布看, 不同雨量等级下 XPAR-QPE 对地面降水的识别能力均呈现明显的空间差异。整体上, 武

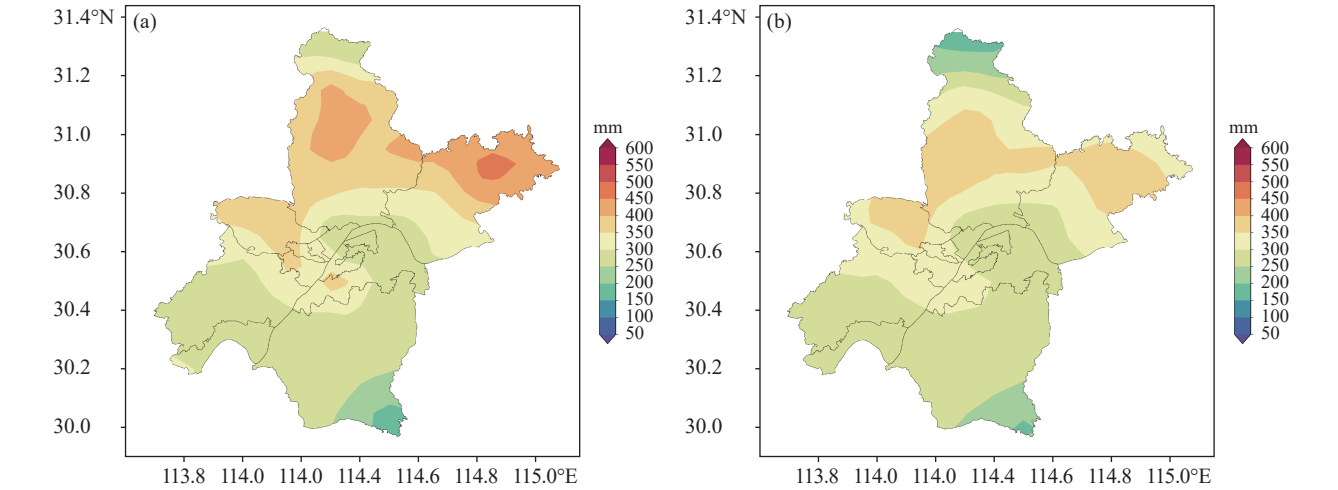


图 5 2025 年 5—8 月武汉区域 8 次强降水过程地面降水 (a) 和 XPAR-QPE (b) 累计雨量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of accumulated rainfall from (a) surface rain gauge observations and (b) XPAR-QPE product during eight typical heavy-rainfall events in Wuhan from May to August 2025

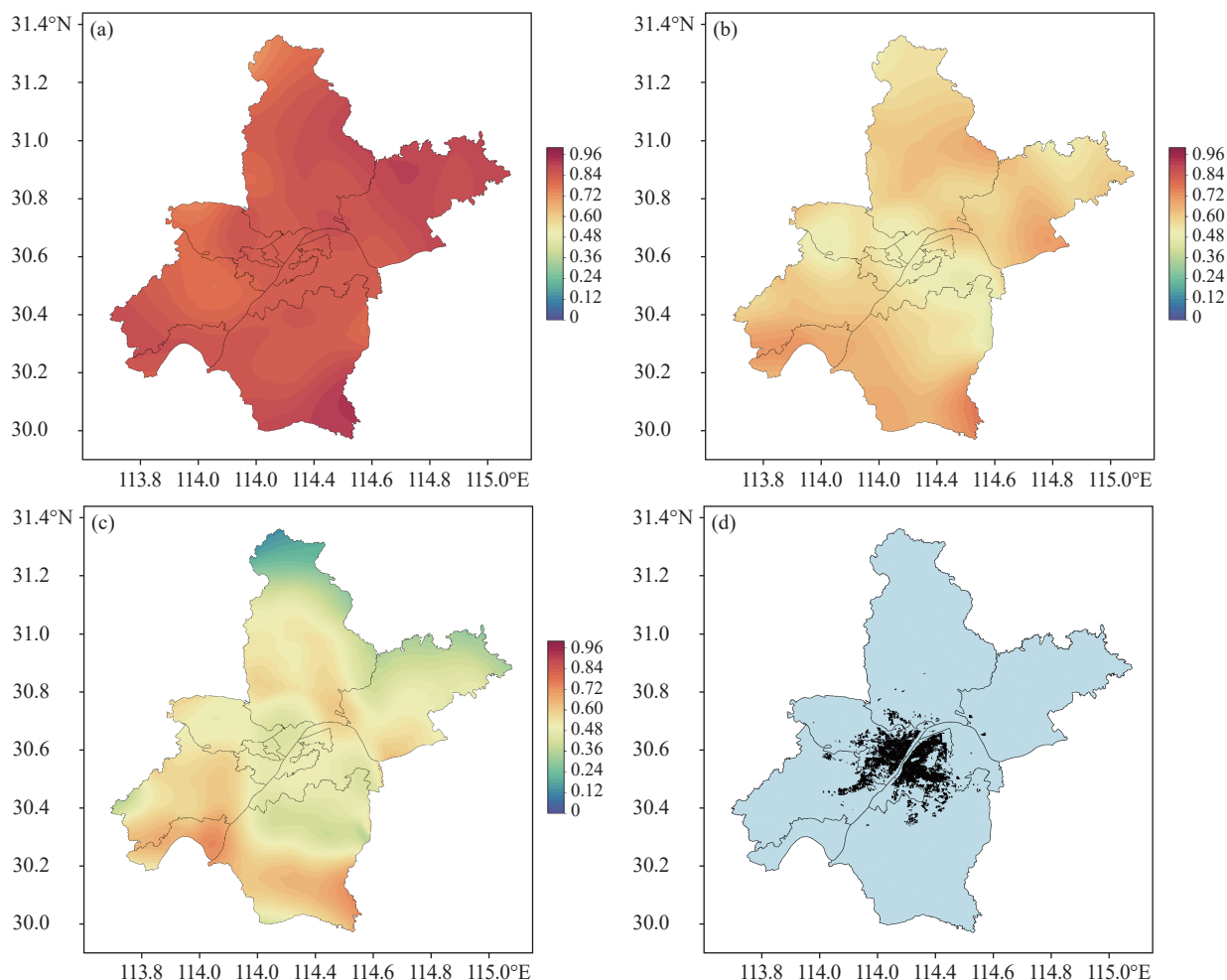


图6 2025年5—8月武汉区域8次强降水过程小雨(a)、中雨(b)、大雨(c)情况时XPAR-QPE的临界成功指数CSI(单位:%)空间分布和(d)武汉市中心城区建筑密集度图(黑点表示建筑)

Fig. 6 Spatial distribution of QPE CSI (unit: %) in (a) light rain, (b) moderate rainfall, (c) heavy rain during eight typical heavy-rainfall events in Wuhan from May to August 2025, and (d) the building density of the Wuhan central urban area (black dots present the buildings)

汉北部区域CSI相对偏低,且该特征在中雨和大雨条件下更为突出,表现为连续的低值分布区;南部及部分周边区域CSI相对较高,空间分布较为连续。武汉中心城区CSI整体低于周边远城区,在不同雨量等级下均表现出一致的低值特征,显示出明显的城区-郊区差异,且随降水强度增强,该低值特征进一步凸显,空间不均匀性随之增强。

总体而言,CSI在空间上呈现出由南向北、由郊区向城区逐渐降低的分布特征,且在较大雨强条件下空间差异更加显著。结合图2和图6d可知,该空间分布差异,可能与雷达波束遮挡有关。北部山区受丘陵及山体地形影响,存在多处明显的雷达波束遮挡现象;中心城区建筑密集区亦存在对低仰角雷达波束的遮挡作用。波束遮挡会削弱雷达回波的有效能量,导致反射率因子出现系统性低估,进而影响降水估测精度。

为分析XPAR-QPE对降水时间演变的刻画能

力,图7给出了黄陂石门站和武汉理工大学站地面雨量站与XPAR-QPE小时雨量时序对比。两站点雨量的时间变化趋势与XPAR-QPE估测结果总体一致,能够较好反映降水的发生时段、峰值时刻及主要演变过程。然而,在降水峰值阶段,XPAR-QPE普遍存在低估现象。黄陂石门站2025年6月7日06时(北京时,下同)、07时和08时地面自动站实测小时雨量分别为57.7 mm、110.1 mm、50 mm,而XPAR-QPE对应估测值仅为32.7 mm、47.5 mm、20.4 mm,最大低估幅度超过50%。相比之下,在中小强度降水阶段,XPAR-QPE在部分时次存在一定程度的高估,高于地面观测值约10%~20%。这种偏高现象可能与弱降水条件下的降水反演参数经验系数偏大或地面杂波回波有关。总体来看,XPAR-QPE能较准确刻画降水的时间演变规律,但在不同降水强度下仍存在系统性偏差,这可能和不同降水阶段电磁波衰减与反演算法有关。

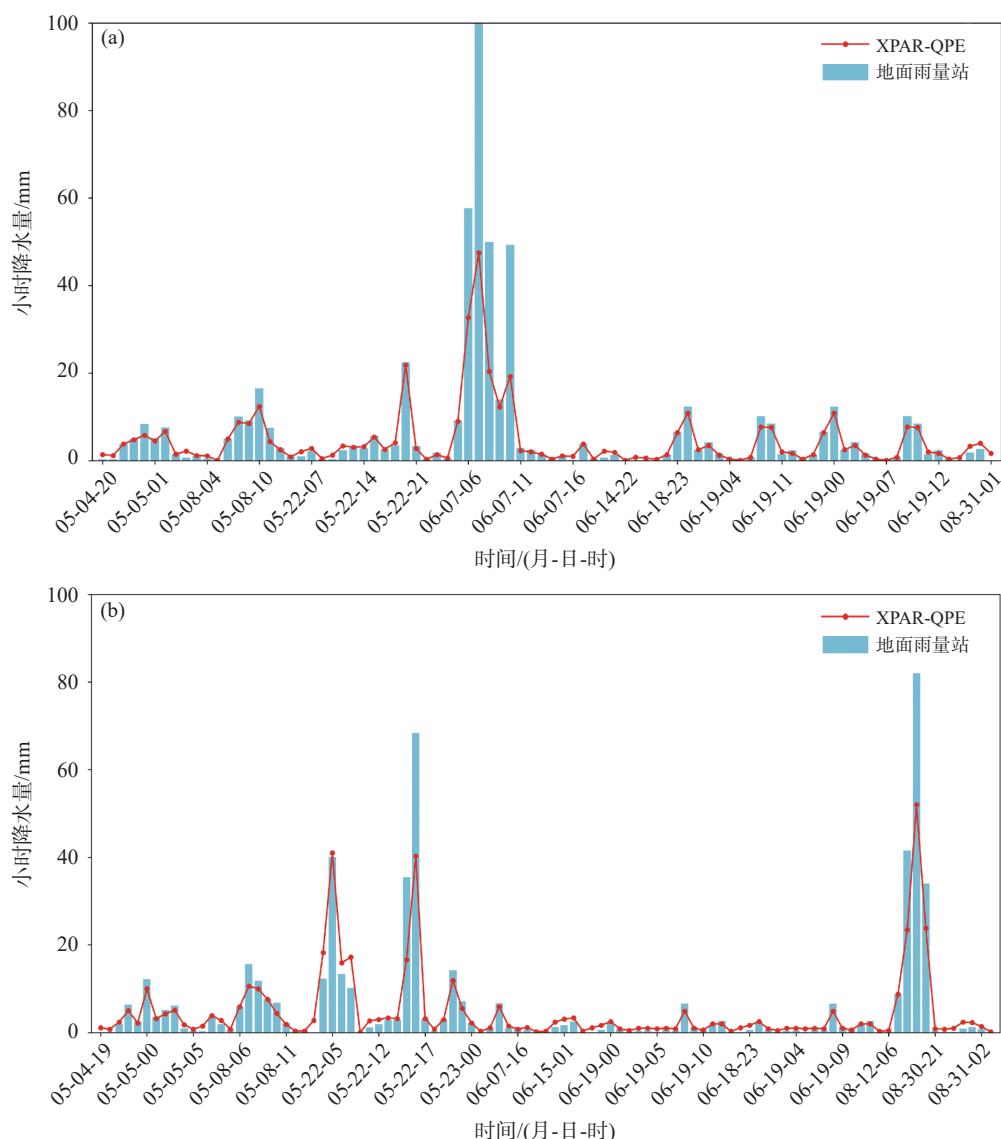


图 7 2025 年 5—8 月部分时段黄陂石门站 (a)、武汉理工大学站 (b) 的地面雨量站及其对应 XPAR-QPE 的小时雨量时序对比图
Fig. 7 Comparison of hourly accumulated rainfall from surface rain gauge observations in (a) Huangpi Shimen and (b) Wuhan University of Technology site and the corresponding XPAR QPE product from May to August 2025

2.5 XPAR-QPE 与 S 波段雷达 QPE 的对比

为了解两种雷达 QPE 的差异, 图 8 给出 2025 年 8 月 30 日 19 时武汉 S 波段雷达和 XPAR-QPE 的小时累计雨量对比。两种雷达在总体降水覆盖范围和主要降水带形态方面具有较高一致性, 但在降水结构细节及强降水中心的刻画方面仍存在显著差异。S 波段雷达 QPE 的降水场整体上较为连续、平滑, 能够在主要降水带内部形成连贯的中到大雨区域, 并稳定识别 19.1~44.5 mm 及以上等级的降水中心。XPAR-QPE 则显示出更明显的局地化特征, 其降水结构相对破碎。在多数区域中, XPAR-QPE 所给出的强降水区 (≥ 31.8 mm) 面积偏小, 中小尺度降水单元之间的梯度更为陡峭, 局地强降水中心表现得更加集中。进一步比较强降水中心位置可知, 两种雷

达对主要强降水核心的空间判识方向基本一致, 但在 63.5 mm 以上降水中, XPAR 相较 S 波段雷达 QPE 强降水覆盖范围明显缩小。

上述差异在一定程度上与两种雷达体制特性的差异有关。S 波段雷达具有波长长、衰减弱、反射率探测稳定等优势, 使其获取的降水场具有更好的连续性和空间平滑性。相控阵雷达则依托其高时空分辨率, 能够解析更多中小尺度降水结构, 从而强化局地降水细节的刻画; 此外, 在强降水路径上可能出现反射率削弱效应, 进而在强降水区域的定量估计中引入一定的低估倾向。综合来看, S 波段雷达 QPE 更适合作为区域尺度连续且稳健的降水背景场, 而相控阵雷达 QPE 在刻画局地尺度降水细节与短时变化方面具有更显著的优势, 两者在时空结构刻画上

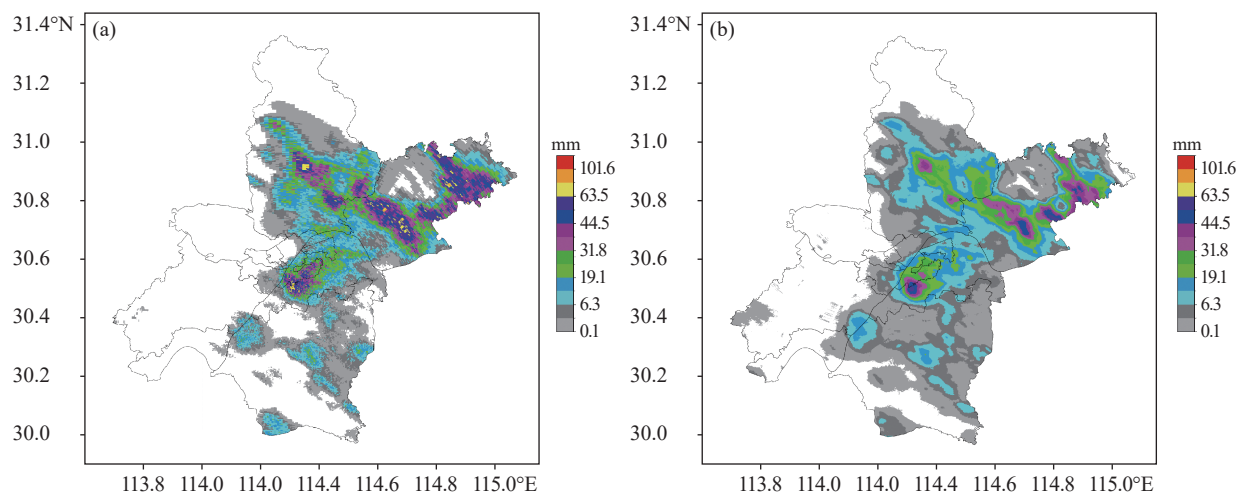


图8 2025年8月30日19时武汉地区S波段雷达(a)和XPAR(b)QPE的小时累计雨量(阴影)对比图

Fig. 8 Comparison of hourly accumulated rainfall (shaded, unit: mm) from (a) CINRAD/SAD radar and (b) XPAR QPE product at 19:00 BT on August 30, 2025 in Wuhan area

的互补性将有助于在强对流天气过程中进一步提升QPE的精度。

3 结论与讨论

本文利用武汉区域2025年5—8月8个强降水过程地面自动气象站雨量资料和XPAR组网观测数据,从降水总体识别能力、雨量等级敏感性、降水类型差异、时空分布特征、S与X波段雷达一致性五个方面,对6部XPAR-QPE产品质量进行评估,得出以下主要结论:

(1) XPAR-QPE产品总体相关系数、平均偏差、相对平均偏差、均方根误差分别为0.93、-0.24%、-6.0%、2.88 mm,能够较好反映降水时空分布特征,尤其在弱到中等降水条件下表现较为可靠,但在强降水情形下存在明显的低估偏差。

(2) XPAR-QPE产品在小雨和中雨条件下估测性能较为稳定,误差幅度较小。误差随降水强度增加呈显著正相关关系,随着降水强度增强XPAR-QPE对雨量等级的敏感性逐渐减弱,表明在强降水阶段X波段回波的衰减效应是影响估测精度的重要因素。XPAR-QPE算法在高反射率区域的适应性相对不足,易导致强降雨量值的系统性低估。

(3) XPAR-QPE产品在层状云、对流云和混合型三类降水情况下的时空分布特征基本一致,其中在弱到中等降水条件下表现较为可靠。层状云降水QPE误差最小,混合型和对流云降水误差相对较大,且总体上存在系统性低估。小雨和暴雨虚警率明显好于中雨和大雨。大雨和暴雨时,XPAR-QPE对层状云降水的探测能力显著下降,尤其在暴雨条件下明显低估降水。

(4) XPAR-QPE产品在空间分布格局上与自动站雨量观测保持较高一致性,能够较好刻画主要降水带的位置;在时序变化趋势上也与地面观测吻合,能有效反映降水过程的发生与演变。两站点均表现出XPAR-QPE的雨量级系统性低估特征。临界成功指数与雨强等级呈负相关。临界成功指数呈现区域性差异,表明雨强、站址布局、地形遮挡、多雷达探测重叠等因素都可能影响QPE的精度。总体而言,XPAR-QPE产品对于地面降水时空分布及动态变化趋势监测、量值估计具有较高的应用价值。

尽管XPAR-QPE在降水过程表征方面表现出了较高的可靠性,但定量估测性能在强降水条件下仍受到明显制约。XPAR-QPE误差呈现多因素耦合特征,可能与雷达设备特性与观测环境、偏振量数据可靠性,以及降水反演算法的适用性等因素密切相关。未来研究将针对强降水条件下QPE的关键误差来源开展系统分析,重点加强后向散射相移(δ)的定量识别与 K_{DP} 稳健反演方法研究,并结合多雷达组网观测特性优化衰减校正与协同反演策略,以提升强降水条件下QPE的定量精度与业务应用可靠性。

参考文献(References):

- 毕永恒,刘锦丽,段树,等.2012. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J]. *大气科学*,36(3):495-506. Bi Y H, Liu J L, Duan S, et al. 2012. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual-polarization radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,36(3):495-506 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11075
- 陈超,胡志群,胡胜,等.2019. CINRAD-SA 双偏振雷达资料在降水估测中的应用初探[J]. *气象*,45(1):113-125. Chen C, Hu Z Q, Hu S, et al. 2019. Preliminary study on the application of CINRAD-SA dual-polarization radar data in precipitation estimation [J]. *Meteorological*

- Monthly,45(1):113–125 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.01.010
- 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):61–623. Cheng C Y, Xu G R, Lai C, 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):61–623 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–127
- 陈浩然,耿飞,刘黎平,等.2024.西藏墨脱复杂地形 X 波段相控阵偏振天气雷达降水观测和反演方法研究[J].高原气象,43(1):99–113. Chen H R, Geng F, Liu L P, et al. 2024. Study on precipitation observation and retrieval methods using X-band phased array polarimetric weather radar in complex terrain of Medog, Tibet [J]. *Plateau Meteorology*, 43(1):99–113 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2023.00039
- 范江琳,青泉,马力.2014.基于不同海拔高度的雷达降水估测试验[J].气象科学,34(1):66–71. Fan J L, Qing Q, Ma L. 2014. Radar precipitation estimation experiment based on different altitudes [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*,34(1):66–71 (in Chinese). doi:10.3969/2012jms.0142
- 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
- 黄兆楚,印佳楠,杨洋,等.2025.石家庄 S 波段和 X 波段双偏振雷达定量降水估测应用研究[J].高原气象,44(1):253–264. Huang Z C, Yin J N, Yang Y, et al. 2025. Application study of quantitative precipitation estimation using S-band and X-band dual-polarization radars in Shijiazhuang [J]. *Plateau Meteorology*,44(1):253–264 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2024.00047
- 鲁德金,胡姮,吴蕾,等.2024.天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进[J].气象,50(4):475–487. Lu D J, Hu H, Wu L, et al. Analysis of influencing factors and improvement of weather radar consistency evaluation algorithm [J]. *Meteorology*,2024,50(4):475–487 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2023.121201
- 李海俊,吴静,李婕,等.2025. ROSE2.1 南昌雷达 2021—2023 年定量降水估测产品检验评估[J].沙漠与绿洲气象,19(3):147–156. Li H J, Wu J, Li J, et al. 2025. Assessment of ROSE2.1 quantitative precipitation estimation product from Nanchang radar during 2021 — 2023 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,19(3):147–156 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2402.04001
- 刘晓璐,郭善云,郑飒飒,等.2023.安宁河谷雨季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].高原山地气象研究,43(3):32–39. Liu X L, Guo S Y, Zheng S S, et al. 2023. Raindrop size distribution characteristics of stratiform and convective Precipitation during rainy season in Anning River Valley [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 43(3):32–39 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2023.03.004
- 梅雨菲,陈生,刘陈帅,等.2023.珠海 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测产品质量评估[J].热带气象学报,39(4):614–621. Mei Y F, Chen S, Liu C S, et al. 2023. Quality evaluation of quantitative precipitation estimation products from Zhuhai X-band dual-polarization phased array radar [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,39(4):614–621 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2023.053
- 唐顺仙,吕达仁,何建新,等.2017.天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用[J].遥感技术与应用,32(1):1–13. Tang S X, Lv D R, He J X, et al. 2017. Advances in weather radar technology and its application in weather detection in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*,32(1):1–13 (in Chinese). doi:10.11873/j.issn.1004–0323.2017.1.0001
- 吴翀.2014.相控阵天气雷达观测强对流过程数据分析方法研究[D].成都:成都信息工程学院. Wu C. 2014. Research on data analysis methods for strong convective processes observed by phased array weather radar [D]. Chengdu:Chengdu University of Information Technology (in Chinese)
- 王红艳,刘黎平.2015.新一代天气雷达降水估算的区域覆盖能力评估[J].高原气象,34(6):1772–1784. Wang H Y, Liu L P. 2015. Assessment of CINAD regional coverage for quantitative precipitation estimation [J]. *Plateau Meteorology*,34(6):1772–1784 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2014.00122
- 王红艳,王改利,刘黎平,等.2015.利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究[J].大气科学,39(01):59–67. Wang H Y, Wang G L, Liu L P, et al. 2015. Research on real-time quality control methods for automatic rain gauges using radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,39(01):59–67 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1403.13295
- 王建林.2005.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. Wan J L. 2005. Study of quantitative detection of precipitation intensity using dual-linear polarimetric doppler radar [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)
- 荀爱萍,张伟,黄惠谕,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
- 余本超,郑佳锋,张扬,等.2024.深圳 X 波段双偏振相控阵雷达降水估测算法效果评估[J].成都信息工程大学学报,39(1):61–71. Yu B C, Zheng J F, Zhang Y, et al. 2024. Evaluation of precipitation estimation algorithm for Shenzhen X-band dual-polarization phased array radar [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 39(1):61–71 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.01.011
- 肖艳姣,王斌,陈晓辉,等.2012.移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差

- 分相位数据质量控制[J].高原气象,31(1):223–230. Xiao Y J, Wang B, Chen X H, et al. 2012. Differential phase data quality control of mobile X-band dual-polarimetric doppler weather radar [J]. Plateau Meteorology,31(1):223–230 (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. Research and operational advances in contemporary severe convective weather in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(3):391–418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035
- 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
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:314. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing:Meteorological Press:314 (in Chinese)
- 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:Meteorological Press:190 (in Chinese)
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.2001.雷达气象学[M].北京:气象出版社:499. Zhang P C, Du B Y, Dai T P. 2001. Radar Meteorology [M]. Beijing:Meteorology Press:499 (in Chinese)
- Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,39(9):1906–1915. doi:10.1109/36.951081
- Cocks S B, Tang L, Zhang L, et al. 2019. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part II: Performance verification and case study analysis [J]. Journal of Hydrometeorology,20(5):999–1014. doi:10.1175/JHM-D-18-0071.1
- Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. 2005. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,22(11):1621–1632. doi:10.1175/JTECH1803.1
- Zhang P, Zrnic D, Ryzhkov A. 2013. Partial beam blockage correction using polarimetric radar measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,30:861–872. doi:10.1175/JTECH-D-12-00075.1
- Ryzhkov A V, Zrnic D S, Burgess D, et al. 2003. Observation and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar [R]. Norman, Oklahoma: National Severe Storms Laboratory
- 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

(责任编辑 杨 浩)