

# 星载雷达和淮河流域X波段地基雷达 反射率因子一致性分析

侯灿<sup>1,2,3</sup>, 施丽娟<sup>4</sup>, 王雨<sup>1</sup>, 吴文玉<sup>2,3</sup>, 卢燕宇<sup>2,3</sup>, 冯妍<sup>2,3</sup>, 杜波<sup>5</sup>

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 安徽省气象科学研究所 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031;

3. 寿县国家气候观象台 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 淮南 232200;

4. 中国气象局气象探测中心 北京 100081;

5. 北京象元气象观测技术研究院 北京 100081

**摘要:** 将全球降水测量卫星GPM (Global Precipitation Measurement) 搭载的Ku/Ka双频测雨雷达DPR (Dual-Frequency Precipitation Radar) 和X波段地基雷达GR (Ground-based Radar) 数据进行对比, 以更好地了解二者的差异性和相似性, 对星地雷达联合应用和X波段地基雷达定标校正有重要意义。本文通过质量控制、时空匹配、频率校正, 获得2023年5—9月淮河流域凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR反射率因子共8483组匹配样本, 评估了凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR反射率因子的一致性以及不同降水强度、类型和相态的影响。结果表明: GR和GPM KuPR探测到的降水回波分布型大体一致, 但GR探测到的降水回波强度比GPM KuPR探测到的大。GR和GPM KuPR反射率因子呈现正相关, 总体相关系数为0.73, GR反射率因子高于GPM KuPR, 总体平均偏差为2.71 dB。GR和GPM KuPR反射率因子在轻度和中度降水时吻合良好, 两种雷达偏差 (GR-KuPR) 均值在±5 dB以内, 在强降水时两种雷达偏差绝对值增大。降水为小粒子时, 两种雷达反射率因子吻合良好, 偏差 (GR-KuPR) 均值在±5 dB以内, 大粒子时偏差绝对值增大。在层状降水和亮带以下液态降水时, GR和GPM KuPR反射率因子一致性更好, 相关系数分别为0.72、0.73, 平均偏差分别为3.28 dB、2.82 dB, 在对流降水和亮带以内混合态降水、亮带以上冰相降水, GR和GPM KuPR反射率因子一致性稍差, 相关系数小于0.65。总体来说, 在层状降水和液态降水时, X波段地基雷达和GPM DPR具有联合应用潜力, 在强降水和复杂的气象条件时需要更进一步的处理。

**关键词:** GPM KuPR, X波段地基雷达, 反射率因子, 一致性分析, 时空匹配, 淮河流域

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 侯灿, 施丽娟, 王雨, 吴文玉, 卢燕宇, 冯妍, 杜波. 2026. 星载雷达和淮河流域X波段地基雷达反射率因子一致性分析. 遥感学报, 30(5): 1464-1478

Hou C, Shi L J, Wang Y, Wu W Y, Lu Y Y, Feng Y and Du B. 2026. Consistency analysis of reflectivity between space-borne radar and X-band ground-based radar in the Huai River Basin. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1464-1478 [DOI: 10.11834/jrs.20265384]

## 1 引言

天气雷达在降雨估算、强天气监测、短时预报以及数值模拟等方面发挥着重要作用 (Zheng等, 2014; Wapler等, 2016)。中国新一代多普勒

天气雷达网CINRAD (China New Generation Doppler Weather Radar) 以S波段、C波段为主, 因其较高的时空分辨率、准确的探测能力成为中尺度灾害性天气有效的监测及预警工具, 但其难以监测低层中小尺度灾害性天气的发生发展过程 (缪应卿

收稿日期: 2025-09-30; 预印本: 2026-01-30

**基金项目:** 安徽省自然科学基金 (编号: 2208085UQ01, 2408055UQ007, 2408055UQ005, 2408055UQ001); 中国气象局科技项目 (编号: CMAJBGS202502); 安徽省重点研究与开发计划 (编号: 202004b11020012); 中国气象局青年创新团队 (编号: CMA2023QN11); 安徽省气象学会青年人才托举计划 (编号: AHMSYSSP202302); 江淮气象联合开放基金 (编号: 2023QXTC03); 安徽省气象局自主创新发展专项 (编号: AHQXZC202203); 中国气象局气象探测中心优质计划、试验计划 (编号: YZJH23-27, GCSYJH23-22)

**第一作者简介:** 侯灿, 研究方向为星地雷达联合校验及应用。E-mail: houcan77@163.com

**通信作者简介:** 施丽娟, 研究方向为多源遥感观测数据质控及应用方法。E-mail: shilj@cma.gov.cn

等, 2025)。X波段天气雷达通过提高雷达观测的时空分辨率, 弥补了新一代多普勒天气雷达观测的不足, 改进了强对流天气的监测和预警能力 (Mahale等, 2014)。研究发现, 定标差异、衰减订正、杂波干扰等会影响地基天气雷达的观测结果 (Yang等, 2024; 鲁德金等, 2024)。通过和其他观测手段对比分析, 有助于更好的了解地基天气雷达观测特性, 验证其数据的准确性和可靠性, 从而校正数据, 提高地基雷达GR (Ground-based Radar) 定量降水监测能力。星载雷达SR (Space-borne Radar) 持续稳定运行多年, 测量数据经过了严格的内外部定标和检验, 是可靠的对比对象 (Kubota等, 2014; Tan等, 2018)。

全球首颗星载测雨雷达为热带降雨测量卫星TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 所搭载的降水雷达PR (Precipitation Radar) (Iguchi等, 2000)。该雷达采用13.6 GHz的Ku波段, 能够实现对全球热带地区 (35°N—35°S) 降水三维垂直结构的观测。随后, 作为其继承者的双频测雨雷达DPR (Dual-Frequency Precipitation Radar), 于2014年2月随全球降水测量卫星GPM (Global Precipitation Measurement) 发射升空 (Hou等, 2014)。该雷达采用13.6 GHz的Ku波段和35.5 GHz的Ka波段, 实现了几乎覆盖全球 (65°N—65°S) 的降水测量。相较TRMM PR单频探测技术, GPM DPR双频探测技术显著提升了对降水粒子尺寸、形态及分布的探测能力, 增大了降水结构的探测精度, 能有效探测弱降水和降雪 (Hamada和Takayabu, 2016; Skofronick-Jackson等, 2017)。TRMM PR测量反射率的灵敏度优于 $\pm 1$  dB (Kawanishi等, 2000; Kozu等, 2001; Takahashi等, 2003), 而GPM KuPR的灵敏度为0.8—0.9 dB, KaPR的灵敏度为0.7—0.9 dB (Kubota等, 2024)。这种高灵敏度为星地雷达对比分析创造了很好的条件。

已有多项研究对比了GPM DPR、TRMM PR与地基雷达观测资料。Kim等 (2014) 评估了朝鲜半岛地区地基雷达测量的可靠性, 发现TRMM PR和地基雷达的平均差异在-2.0到+1.0 dB之间。Li等 (2017) 对比分析了层状降水亮带上下方地基雷达与TRMM PR的反射率因子差异, 发现亮带上地基雷达存在负偏差而下方正偏差。刘晓阳等 (2018) 统计发现常州和泰州地基雷达反射率因子分别较GPM DPR偏高约1.2 dB和1.6 dB。蒋银丰等 (2020)

基于水凝物分类定量分析了GPM DPR和南京信息工程大学C波段双偏振雷达的反射率因子的相似性和差异性。Yang等 (2024) 对比分析了GPM DPR和湘潭S波段地基雷达反射率因子一致性, 两种雷达的反射率因子一致性良好。进一步, 许多学者以星载雷达为参考标准, 开展了地基雷达偏差订正相关研究。朱艺青等 (2016) 利用TRMM PR对南京雷达的反射率因子进行分段线性订正, 将3个时段的回波强度的整体差异减小到0.75 dB以内。楚志刚等 (2018) 以TRMM PR为参照计算并订正了2013年5—9月长江下游7部S波段雷达数据, 订正后7部雷达间平均反射率因子差异从1.8 dB降至0.5 dB。Louf等 (2018) 采用一种由多种校准技术结合的集成方法, 证明地基雷达校准误差小于1 dB。

可以发现, 以往研究更多关注S波段、C波段地基雷达和星载雷达对比, 对X波段地基雷达和星载雷达异同了解较少, 更是缺乏淮河流域的相关研究。淮河流域地处中国南北气候过渡带, 属暖温带半湿润季风气候区, 是我国夏季旱涝灾害最频发的地区, 是梅雨锋降水的代表性区域 (Yin等, 2021)。近年来该地区强降水事件呈现明显增多趋势 (Wu等, 2023), 常引发洪涝灾害、重大经济损失和人员伤亡。开展该地区星地降水雷达对比, 对提高该地区强天气监测预报和数值模拟准确度具有重要意义。相较S波段、C波段地基雷达, X波段地基雷达时空分辨率更高, 在强对流天气的监测和预警更有优势。因此, 本文对2023年5—9月淮河流域的凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR反射率因子进行个例和统计数据对比分析, 分析两种雷达降水资料的异同, 以及不同降水强度、类型和相态的影响, 为后续星地雷达联合应用和X波段地基雷达定标校正提供参考。

## 2 数据和方法

### 2.1 星载雷达数据

搭载DPR的GPM卫星于2014年2月发射, 轨道高度407 km, 接替TRMM成为全球降水测量的核心卫星。本研究使用KuPR探测数据, 即GPM DPR 2AKu产品, 当前版本V07A (2023年5—6月) 和V07B (2023年7—9月) 版本。该产品包括衰减订正前后的反射率因子、亮带、降水类型等参数, 扫描宽度约245 km, 水平方向设有49个波束, 水

分辨率约5 km, 垂直分辨率为125 m (重采样)。本文使用参数为衰减订正后的反射率因子。GPM KuPR的最小可检测反射率因子为15.46 dBZ (Masaki等, 2022)。为减小地基雷达和星载雷达因灵敏度造成的系统误差, 本文选择GPM KuPR反射率因子 $\geq 15$  dBZ的点, 地基雷达反射率因子 $\geq 15$  dBZ的点。星载雷达和地基雷达反射率因子阈值的选择同Chen等(2025)一致。

## 2.2 地基雷达数据

凤阳X波段雷达位于(32.79°N, 117.66°E), 海拔高度78 m, 观测半径为150 km (图1), 径向分辨率为75 m, 波束宽度0.98°。该雷达采用多仰角体扫模式, 仰角范围为0.5°—19.5°, 体扫运行时间为3.5 min或5 min。低仰角区域有地物遮挡, 将对雷达数据质量造成影响, 因此在与星载雷达对比时剔除了0.5°仰角层地基雷达数据。此外, 近距离处可能残留地物或低仰角旁瓣回波的影响, 而远距离处数据则可能受波束变宽、充塞不足或大气折射的影响, 因此选择距离地基雷达中心点15—115 km的地基雷达数据与星载雷达对比 (He等, 2025)。

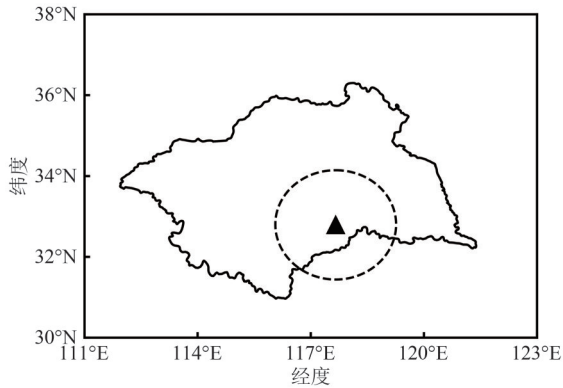


图1 凤阳X波段地基雷达位置及其150 km探测范围  
Fig. 1 The position and 150 km detection range of Fengyang X-band GR

为克服X波段雷达回波衰减明显的问题, 本研究采用 $Z_{Hc}$ - $K_{DP}$ 综合订正法 (胡志群等, 2008)对X波段地基雷达回波强度进行衰减订正, 其中,  $Z_H$ 为雷达反射率因子,  $K_{DP}$ 为差传播相移率。对于该方法, 订正前后雷达反射率因子的关系如下式:

$$Z_{Hc}(r) = Z_{Ha}(r) + 2 \int_0^r A_H(s) ds \quad (1)$$

式中,  $Z_{Ha}(r)$ 、 $Z_{Hc}(r)$ 分别是订正前后的雷达反射率因子,  $r$ 为距离雷达中心的距离,  $A_H$ 为衰减率。选取两个阈值 $\sigma_1 = 0.1$ ,  $\sigma_2 = 3.0$ , 在 $\sigma_1 \leq K_{DP} \leq \sigma_2$

范围内采取 $K_{DP}$ 订正法, 在范围外, 采取 $Z_H$ 订正法。

$$A_H = \begin{cases} a_1 K_{DP}, \sigma_1 \leq K_{DP} \leq \sigma_2 \\ \alpha (Z_H)^\beta, K_{DP} < \sigma_1 \text{ or } K_{DP} > \sigma_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, 系数 $a_1$ 在X波段取值为0.22 dB/deg,  $Z_H = 10^{Z_H/10} (\text{mm}^6/\text{m}^3)$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$ 值基本上不受雨滴形状的影响, 分别取常数 $\alpha = 1.370 \times 10^{-4} \text{ dB/km} \cdot (\text{mm}^6/\text{m}^3)^{-1}$ ,  $\beta = 0.779$ 。

## 2.3 匹配方法

GPM KuPR和X波段地基雷达的有效照射体积、波长、衰减和地物的影响等不同 (表1), 在对比两者的雷达反射率因子前需解决这些不确定性引起的误差。

表1 GPM KuPR和X波段地基雷达主要参数对比  
Table 1 Comparison of the main parameters between GPM KuPR and X-band GR

主要参数	GPM KuPR	X波段地基雷达
频率	13.6 GHz (Ku-band)	9.4 GHz (X-band)
水平/径向分辨率	5 km	75 m
垂直分辨率/波束宽度	0.125 km	0.98°
时间分辨率	90 min	3.5 min或5 min
扫描方式	垂直扫描	体扫
覆盖范围	65°N-65°S	150 km
最小可检测	15.46 dBZ	—
反射率因子	(Masaki等, 2022)	—
衰减影响	严重	严重
地物影响	小	严重

时空匹配是星地雷达反射率因子对比分析的关键技术。时间匹配按就近原则, 根据GPM KuPR过境时间寻找该时间 $\pm 5$  min内邻近的X波段地基雷达体积扫描数据进行匹配 (刘晓阳等, 2018)。空间匹配采用体积匹配方法 (Schwaller和Morris, 2011; Warren等, 2018), 相较网格匹配 (Bolen和Chandrasekar, 2000), 该方法的样本量虽会减少, 但其核心优势在于可以获取独立样本, 无需对地基雷达和星载雷达插值, 显著减少了空间匹配处理量, 降低误差来源。目前, 空间匹配的主流算法为体积匹配, GPM地面雷达验证系统的主流算法也是基于体积匹配开发的。体积匹配方法以有效照射体积为基本单位, 匹配星载雷达和地基雷达相重合的区域, 分别计算重合区域内星载雷达反射率因子空间平均值和地基雷达反射率因子空间平均值。对于每个匹配点, 水平分辨率是GPM KuPR星下点的水平分辨率约5 km, 垂直分辨

率是匹配点的波束厚度(波束垂直覆盖范围)。一般而言,匹配点距地基雷达中心点的距离越远,波束垂直覆盖范围越大。

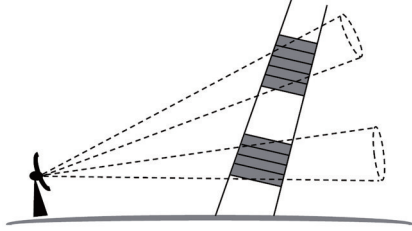


图2 几何匹配法示意图(Schwaller和Morris,2011)  
(实线是星载雷达扫描波束,虚线是地基雷达扫描波束,  
阴影部分是重合区域)

Fig. 2 Schematic program of the geometry-matching method  
(Schwaller and Morris, 2011) (The solid lines represent SR  
scanning beam, and dotted lines represent GR sweeps.  
The shaded area represents overlap area)

不同波长的粒子散射特性不同,对比GPM KuPR和X波段地基雷达反射率因子时,需解决Ku波段和X波段反射率因子因波长不同带来的差异。Das等(2020)利用地面观测获得雨滴谱分布,通过T矩阵计算Ku波段和X波段粒子散射特性,引入双频比DFR,将Ku波段反射率因子转换为X波段的数值。双频比DFR定义如式(3):

$$\text{DFR} = Z(\text{Ku}) - Z(X) \quad (3)$$

式中, $Z$ 单位为dBZ,DFR单位为dB, $Z(\text{Ku})$ 和 $Z(X)$ 分别表示Ku波段和X波段的反射率因子。DFR和 $Z(\text{Ku})$ 的拟合关系式如式(4):

$$\text{DFR} = 18.19 - 2.141Z(\text{Ku}) + 0.08533Z(\text{Ku})^2 - 0.001315Z(\text{Ku})^3 + 0.00006607Z(\text{Ku})^4 \quad (4)$$

将式(4)带入式(3),可以将Ku波段反射率因子转换为X波段的数值。该方法可以避免其他方法基于反射率因子廓线模型转换带来的模型形状误差和相态假设误差(Wen等,2013)。

本文定义每个体积匹配样本中星载雷达反射率因子 $\geq 15$  dBZ的比例为 $f_{\text{KuPR}}$ ,地基雷达反射率因子 $\geq 15$  dBZ的比例为 $f_{\text{GR}}$ ,为减少非均匀波束填充(NUBF)和星载雷达低灵敏度的影响,并保证充足的样本量,同Warren等(2018)一致,采用了 $f_{\text{min}}=0.7$ 的标准,选择 $f_{\text{KuPR}} \geq f_{\text{min}}$ , $f_{\text{GR}} \geq f_{\text{min}}$ 的体积匹配样本用于对比分析。

## 2.4 评估指标

为对比分析GPM KuPR和X波段地基雷达反射率因子匹配样本的异同,采用的统计指标是相关

系数CC、均方根误差RMSE、平均偏差BIAS、标准差STD:

$$\text{CC} = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_{\text{KuPR}}(i) - \overline{Z_{\text{KuPR}}})(Z_{\text{GR}}(i) - \overline{Z_{\text{GR}}})}{\left( \sum_{i=1}^N (Z_{\text{KuPR}}(i) - \overline{Z_{\text{KuPR}}})^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^N (Z_{\text{GR}}(i) - \overline{Z_{\text{GR}}})^2 \right)^{1/2}} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{\text{GR}}(i) - Z_{\text{KuPR}}(i))^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{\text{GR}} - Z_{\text{KuPR}}) \quad (7)$$

$$\text{STD} = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \right)^{1/2}, x = Z_{\text{GR}} - Z_{\text{KuPR}} \quad (8)$$

式中, $N$ 为匹配的样本数量, $i$ 为匹配样本序号, $Z_{\text{KuPR}}$ 和 $Z_{\text{GR}}$ 分别是匹配样本的GPM KuPR和X波段地基雷达的反射率因子数值, $x$ 是二者之差(dB),其平均值分别为 $\overline{Z_{\text{KuPR}}}$ 和 $\overline{Z_{\text{GR}}}$ 。

## 3 结果和讨论

### 3.1 降水个例对比

选择的降水个例发生于2023年9月12日夜,将23:43:36(世界时)凤阳X波段地基雷达资料和23:44:55(世界时)的GPM KuPR资料进行体积匹配,由此分析两种雷达反射率因子的空间吻合程度,并运用统计指标表示体积匹配样本的一致性水平。

图3分别给出该个例的星地观测结果。可以看出,在进行时空匹配和频率校正之前,两种雷达同步观测到了降水回波,回波形态相似,但部分区域GR探测到的回波强度比GPM KuPR大。对于垂直剖面而言,两种雷达显示出良好的一致性,强回波位置对应较好。

图4表示经过前述数据质量控制、时空匹配和频率校正后,在 $1.45^\circ$ 仰角下两种雷达的反射率因子匹配结果对比。图4(a)~(c)分别表示GR反射率因子、GPM KuPR反射率因子、GR和GPM KuPR反射率因子偏差(GR-KuPR)的水平分布。可以看出,匹配后的回波集中分布在GR中心的西南和东北区域,GR和GPM KuPR反射率因子的水平分布相似,反射率因子偏差整体呈现正值,GR回波强度高于GPM KuPR。在垂直剖面方面(图4(d)~(f)),

GR和GPM KuPR有着相似的回波分布型,但部分区域GR探测到的回波强度同样高于GPM KuPR,这也造成二者的概率分布在较为接近的基础上GR更偏右侧(图4(g))。此外,GR和GPM KuPR的反射率因子靠近1:1线分布,相关系数CC为0.77,标准差STD为2.32 dB,均方根误差RMSE为3.27 dB,表明两种雷达测量结果具有强相关性,但主要位于1:1线上方,平均偏差BIAS为2.30dB,同样表

明GR反射率因子高于GPM KuPR(图4(h))。两种雷达反射率因子偏差概率分布呈现中间高,两边低的情况,且主要集中在-5 dB—8 dB左右,概率峰值位置在3 dB左右(图4(i)),表明两种雷达反射率因子存在系统偏差,且为正值。综上所述,降水个例结果表明凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR反射率因子有强相关性,但凤阳X波段地基雷达反射率因子高于GPM KuPR。

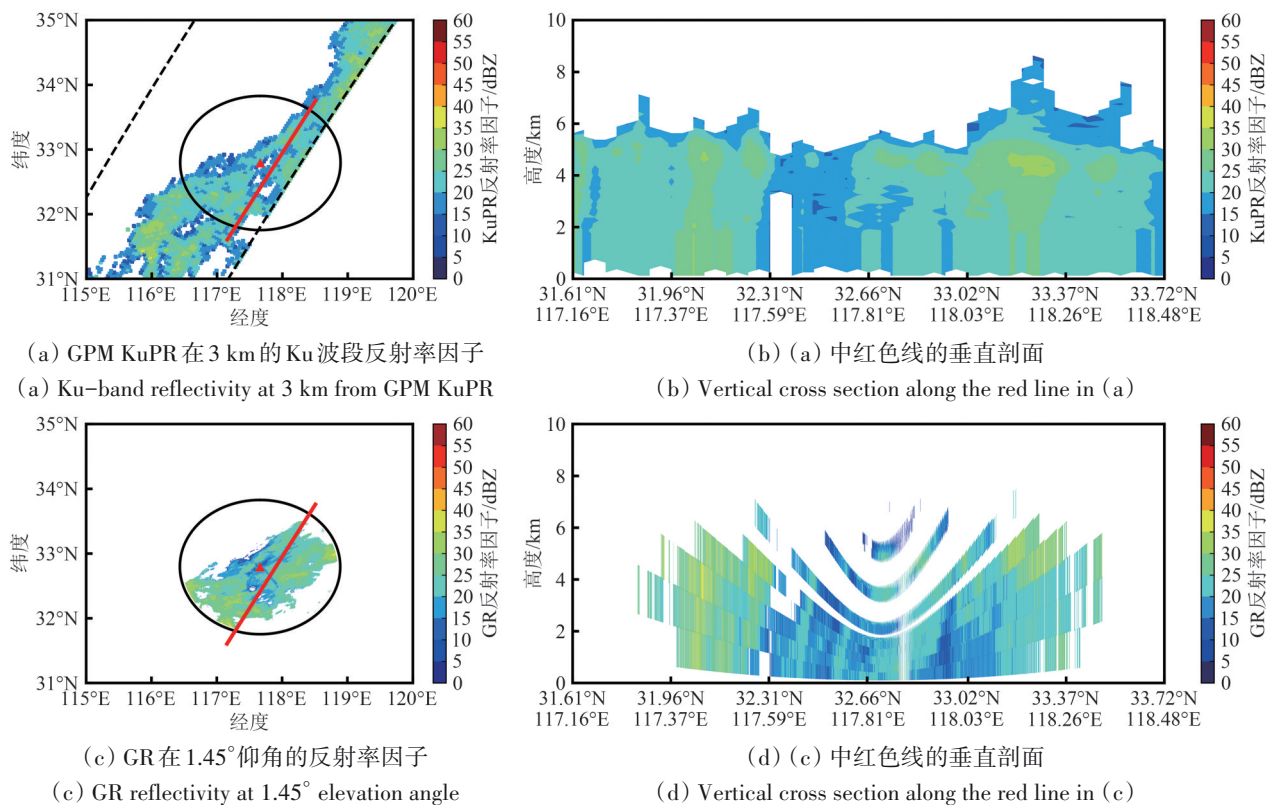
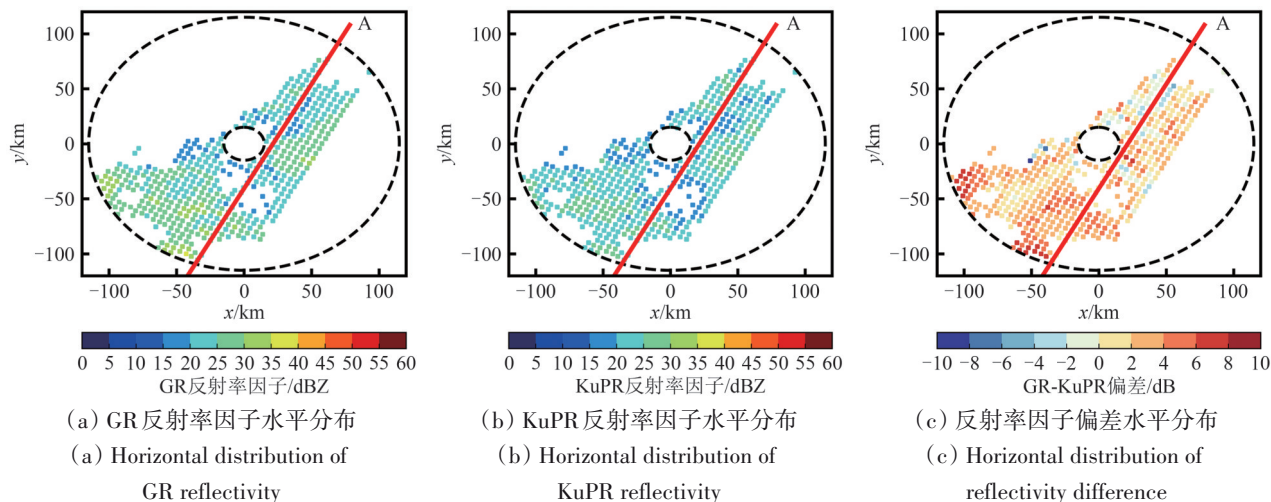


图3 2023年9月12日GR和GPM KuPR反射率因子(其中(a)、(c)中的红色点和黑色圆圈分别表示GR的位置和在115 km的环形区域,(a)中虚线表示GPM KuPR的扫描轨迹)

Fig. 3 Reflectivity for GR and GPM KuPR on 12 September 2023 (The red stars and black circles in (a), (c) indicate the positions and 115 km range rings of GR, respectively. The dotted lines in (a) represent the detection track of GPM KuPR)



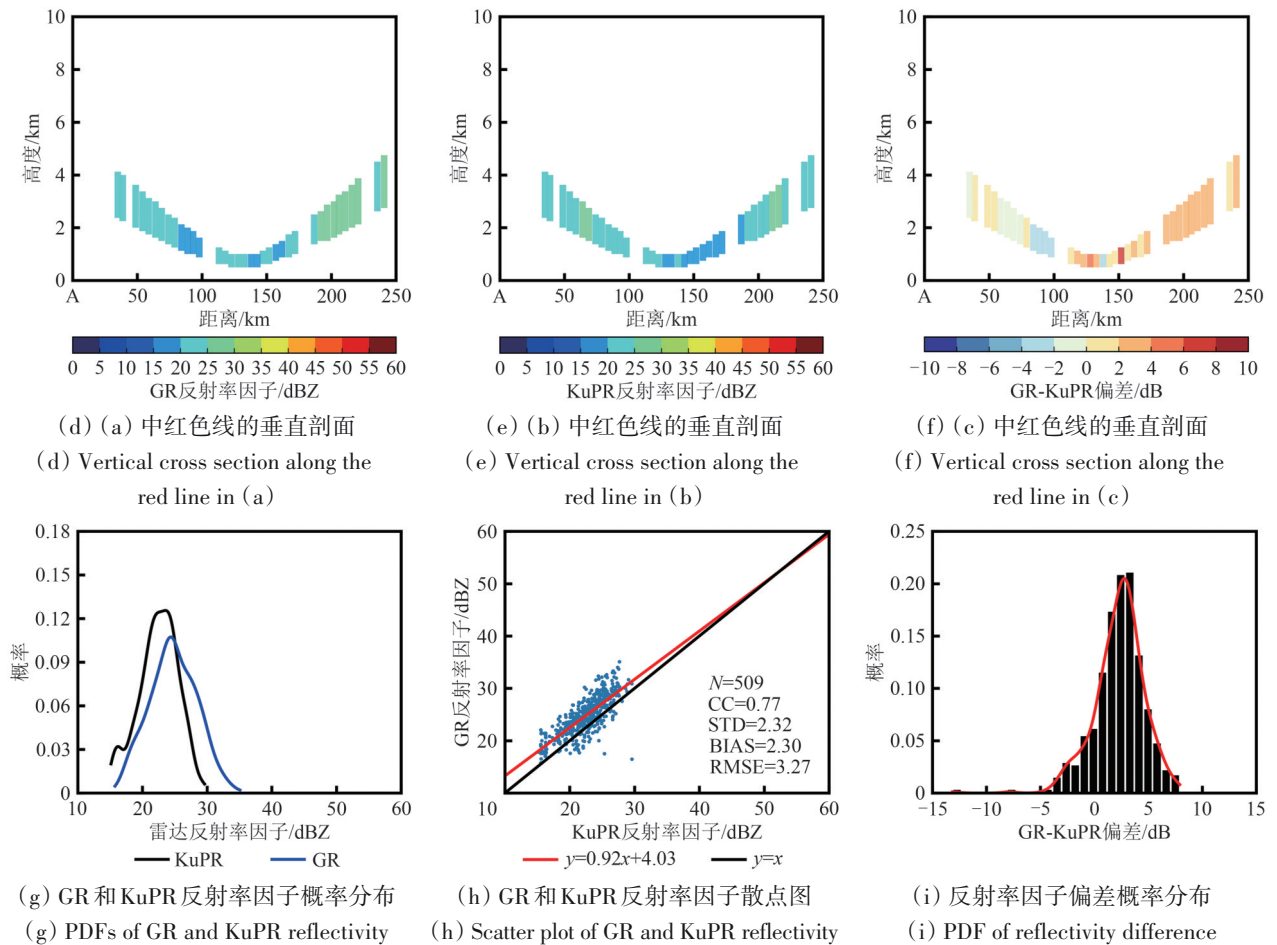


图4 2023年9月12日GR和GPM KuPR在1.45°仰角的反射率因子匹配结果对比(其中(a)—(c)中的黑色圆圈表示GR在15 km和115 km的环形区域)

Fig. 4 Comparison between GR and GPM KuPR reflectivity matching results for 1.45° elevation sweep on September 12, 2023 (The black circles in (a)—(c) indicate the 15 and 115 km range rings around GR)

### 3.2 匹配样本统计对比分析

2023年5—9月，经数据质量控制、时空匹配和频率校正后的凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR的匹配样本共有8483组。这些样本的基本统计特征如图5所示。可以看出，两种雷达的反射率因子范围为15—60 dBZ，其中20—40 dBZ最为集中(图5(a))。反射率因子为15—25 dBZ时，GPM KuPR的概率明显高于GR，25—40 dBZ时则相反。从二者的散点图(图5(b))看，两种雷达的整体相关系数CC为0.73(相关系数通过95%显著性检验)，相较以往，S、C波段地基雷达和GPM KuPR反射率因子的相关系数大于0.8(Keem等，2019; Kou等，2023)，本研究相关系数略有偏低，这可能是由于X波段地基雷达雨区衰减、探测范围小等，数据的质量控制更为复杂(耿飞，2023)。标准差STD为4.89 dB，均方根误差RMSE为5.59 dB，平均偏差BIAS为2.71 dB，此外，较多匹配点落在

1:1等值线上方区域，再次表明GR反射率因子值大于GPM KuPR。GR和GPM KuPR反射率因子偏差(GR-KuPR)范围为-20—20 dB(图5(c))，呈典型高斯分布，概率峰值位置同BIAS数值基本吻合，说明GR和GPM KuPR存在系统偏差。这可能与GPM KuPR衰减订正误差，以及GR的校准精度和系统偏差等因素有关(Zhong等，2017)。

图6给出了GR和GPM KuPR反射率因子偏差(GR-KuPR)随二者各自反射率因子的变化情况。GR和GPM KuPR反射率因子在轻度和中度降水时吻合良好，偏差(GR-KuPR)均值在±5 dB以内，在强降水时偏差绝对值增大。其中，反射率因子偏差随GR回波强度一直稳定在0 dB以上，在15—36 dBZ时偏差随回波强度增大缓慢增加，而强回波时偏差则迅速增加，这可能与强降水区域的GPM KuPR衰减订正不足有关(Meneghini等，2015; Huang等，2022)。以往研究也发现类似现

象, Petracca 等 (2018) 发现 GPM DPR-NS 测量弱降水和中等强度降水时为正偏差 0.01—0.12 mm/h, 测量强降水转为负偏差 8.14 mm/h, GPM 由轻微高估转为明显低估。Gao 等 (2021) 也指出随着降水强度增大, GPM DPR 低估程度和频率上升。与之相反, 反射率因子偏差随 GPM KuPR 回波强度增大而减小, 在 15—36 dBZ 时偏差大于 0 dB, 但

36—60 dBZ 时偏差转为负值且减小趋势加快。这可能与 Ku 波段到 X 波段的频率校正有关, 强回波时双频比 DFR 随 GPM KuPR 回波强度增大而迅速减小, 频率校正不足 (Das 等, 2020)。此外, 从图 6 散点密度分布可知, 反射率因子偏差主要由 GR 和 GPM KuPR 的弱强度回波和中等强度回波的差异决定。

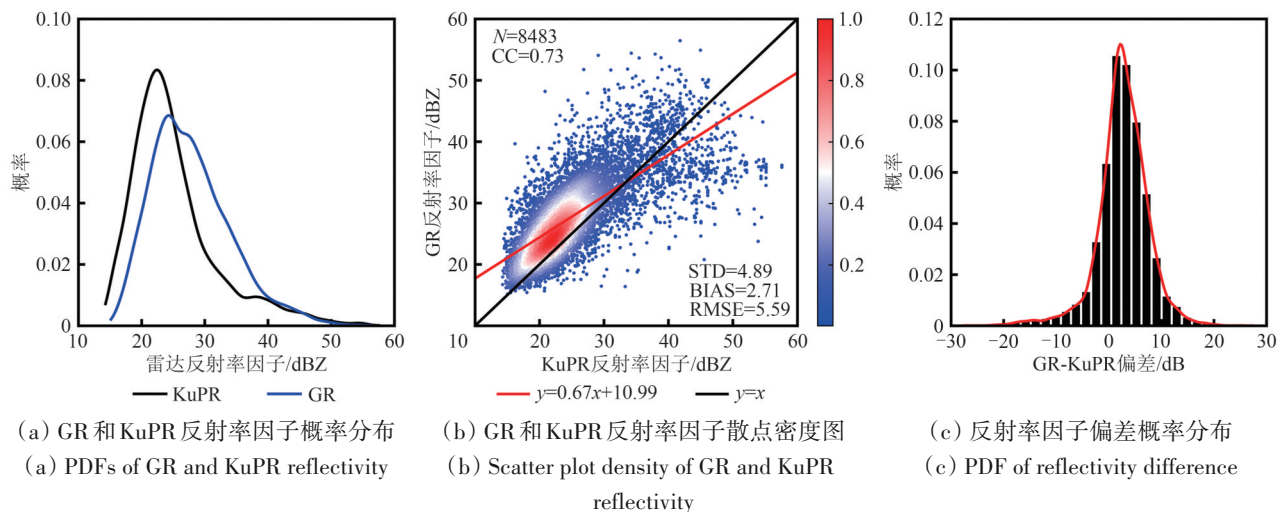


图 5 GR 和 GPM KuPR 反射率因子匹配结果对比

Fig. 5 Comparison between GR and GPM KuPR reflectivity matching results

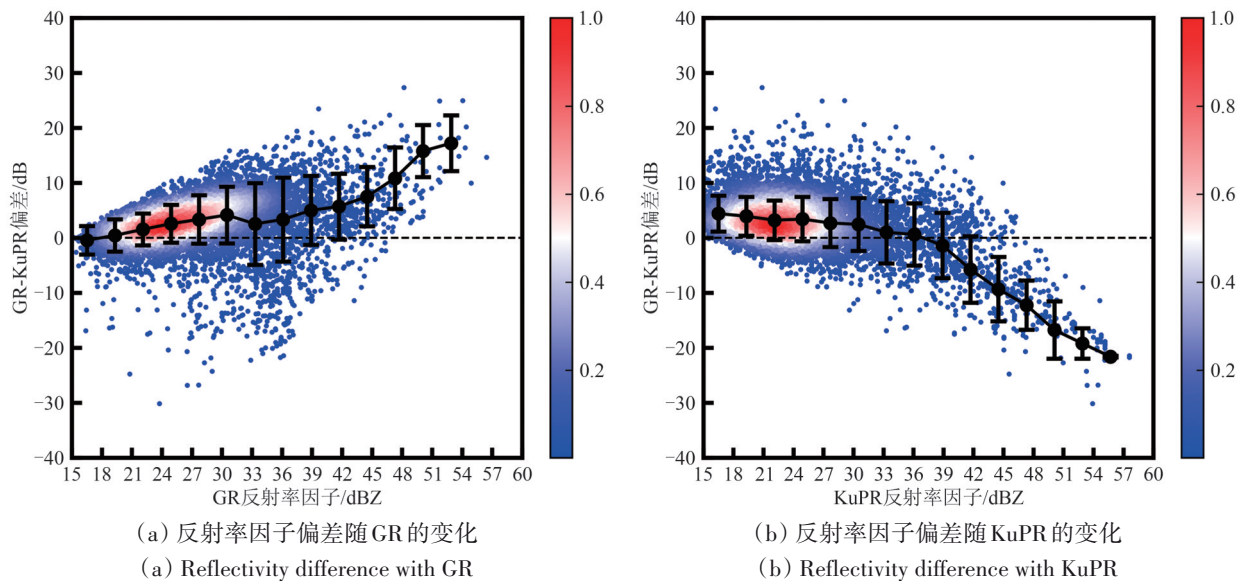


图 6 GR-KuPR 反射率因子偏差随 GR、GPM KuPR 反射率因子的变化(其中黑色点和垂直线分别表示以 3 dBZ 为间隔的反射率因子偏差的平均值和标准差)

Fig. 6 GR-KuPR reflectivity difference as a function of GR and GPM KuPR, respectively ( The black diamonds and vertical lines show, respectively, the mean and standard deviation of the reflectivity difference for each x-axis bin of 3 dBZ)

通过 GPM KuPR 产品中的雨型识别变量将降水分为层状和对流两种类型, 进一步研究两种降水类型中星地雷达的差别 (图 7)。针对层状降水,

共有 6524 组匹配样本。反射率因子集中分布在 20—30 dBZ, 相关系数 CC 为 0.72, 两种雷达反射率因子间存在明显的线性关系, 标准差 STD 为

3.71 dB, 均方根误差 RMSE 为 4.95 dB, 平均偏差 BIAS 为 3.28 dB, 说明 GR 和 GPM KuPR 反射率因子在层状降水时一致性较好, GR 回波强度高于 GPM KuPR。反射率因子偏差随 GR 和 GPM KuPR 反射率因子的变化同图 6 类似, 即偏差随 GR 反射率因子增大而增大, 随 GPM KuPR 反射率因子增大而减小, 但变化幅度更加平缓。针对对流降水, 共有 1394 组匹配样本, 反射率因子集中分布在 27—45 dBZ。与层状降水相比, GR 和 GPM KuPR 的反射率因子分布更分散, 相关系数 CC 为 0.55, 标准差 STD 为 7.45 dB, 均方根误差 RMSE 为 7.52 dB, 平均偏差 BIAS 为 -0.97 dB, 这表明二者在对流降水时一致性较弱, GR 回波强度低于 GPM KuPR。反射率因子偏差 (GR-KuPR) 随 GR 和 GPM KuPR 反射率因子的变化幅度较层状降水更显著, 尤其随 GPM KuPR 反射率因子的变化, 说明在对流降水的测量时存在更高变异性。

综上所述, X 波段地基雷达和 GPM KuPR 在测量层状降水时展现出较高的一致性, 尤其在弱强度和中等强度反射率因子范围内表现突出, 而对流降水时两种雷达一致性显著下降, 变异性增大, 特别是在高反射率因子范围有明显偏差。这种情况可能是由于层状降水分布相对均匀, 而对流降水不稳定, 回波结构相对不均匀, 反射率更多地受到衰减、波束填充不均匀、信号处理等因素的影响。此外, 对流降水可能相对尺度较小, 导致降水单元小于 GPM KuPR 水平分辨率, 产生非均匀波束填充 NUBF 的问题。Shimozuma 和 Seto (2015) 对比了有无考虑 NUBF 时的 GPM KuPR 数据和 TRMM PR 数据差异, 考虑 NUBF 后, GPM KuPR 和 TRMM PR 的降水率相关系数增大 0.01, 其中对流降水增大 0.04, 但对流降水相关系数仍小于层状降水 0.05, NUBF 增加了回波信号的复杂性, 尤其是对流降水。

降水相态变化会使雷达反射率因子测量复杂化, 亮带层下方为液相粒子、亮带层上方为冰相粒子, 亮带层内为冰—水混合, 导致亮带层上下方和亮带层内的反射率因子呈现不同的特征。通过 GPM KuPR 产品中的亮带识别变量将降水分为亮带层下方、亮带层内、亮带层上方三种区域, 并分别与 X 波段地基雷达进行对比分析, 用以研究 X 波段地基雷达和 GPM KuPR 在不同降水相态中的测量结果 (图 8)。亮带层下方共有 1983 组匹配样本。由其散点密度图可知, 二者的相关系数 CC 为

0.73, 标准差 STD 为 3.09 dB, 均方根误差 RMSE 为 4.18 dB, 平均偏差 BIAS 为 2.82 dB。两种雷达反射率因子呈现正相关性, 数据主要分布在 20—30 dBZ, 位于 1:1 等值线上方, 线性拟合线为  $y=0.91x+4.83$ 。这表明亮带层下方, GR 和 GPM DPR 测量结果具有良好的线性一致性, 但 GR 回波强度高于 GPM DPR。相比之下, 亮带层内和上方分别有 608 组和 502 组匹配样本, 两种雷达显示出较弱的相关性, 其相关系数 CC 分别为 0.61 和 0.57, 标准差 STD 分别为 3.76 dB 和 4.06 dB, 均方根误差 RMSE 分别为 5.73 dB 和 6.78 dB, 平均偏差 BIAS 分别为 4.32 dB 和 5.43 dB, 偏差也都大于亮带层下方的数值。这可能是因为亮带层下方液相粒子散射更符合各向同性, 而亮带层内, 冰—水混合对雷达波束会产生衰减和散射, 而在亮带层上方, 冰相粒子会引起非球形散射 (Chen 等, 2025), 造成信号更具不确定性。此外, 无论处于何种相态, 反射率因子偏差 (GR-KuPR) 均随 GR 反射率因子增大而增大 (特别是在强降水区域), 随 GPM KuPR 反射率因子增大而减小, 变化趋势同前述层状降水类似。总体而言, X 波段地基雷达和 GPM KuPR 测量亮带层下方液相粒子反射率因子时具有良好的线性一致性, 而亮带层内、亮带层上方两种雷达测量结果一致性较差, 误差较大, 尤其在强降水区域。

图 9 表示不同高度层 X 波段地基雷达和 GPM KuPR 反射率因子对比的一致性结果, 每层间距 1.0 km。可以看出, 3 km 以下两种雷达反射率因子之间的相关系数 CC 大于 0.75, 3 km 以上相关系数 CC 减小, 同时 3 km 以下均方根误差 RMSE、标准差 STD 和平均偏差 BIAS 整体小于 3 km 以上的数值。造成这种差异的主要原因除了上述粒子相态的不同外, 越往高层, 星地雷达间采样体积大, 波束充塞效应也更明显。值得注意的是, 0—1 km 高度层的均方根误差 RMSE、标准差 STD 较大, 平均偏差 BIAS 为负值, 这可能是低层地物杂波的影响。

图 10 给出了 GR 和 GPM KuPR 反射率因子偏差 (GR-KuPR) 随 GPM KuPR 的质量加权平均直径  $D_m$  的变化情况。反射率因子偏差随  $D_m$  增大而减小,  $D_m$  在 0.5—2.5 mm 时, GR 和 GPM KuPR 反射率因子吻合良好, 偏差 (GR-KuPR) 均值在  $\pm 5$  dB 以内,  $D_m > 2.5$  mm 时偏差绝对值增大, 其中,  $D_m \leq 2$  mm 时偏差大于 0 dB,  $D_m > 2$  mm 时偏差小于 0 dB。造成这种情况的可能原因是非瑞利散射。小粒子时,

满足瑞利散射条件，地基雷达和星载雷达测量到的回波强度大致相等，但随着粒径增大，瑞利近似条件不再满足，米散射效应（张培昌等，2001）

使得两种雷达的等效反射率因子出现一定差异。此外，从散点密度分布可以看出，Dm主要分布在0.5—2.5 mm，降水以小粒子为主。

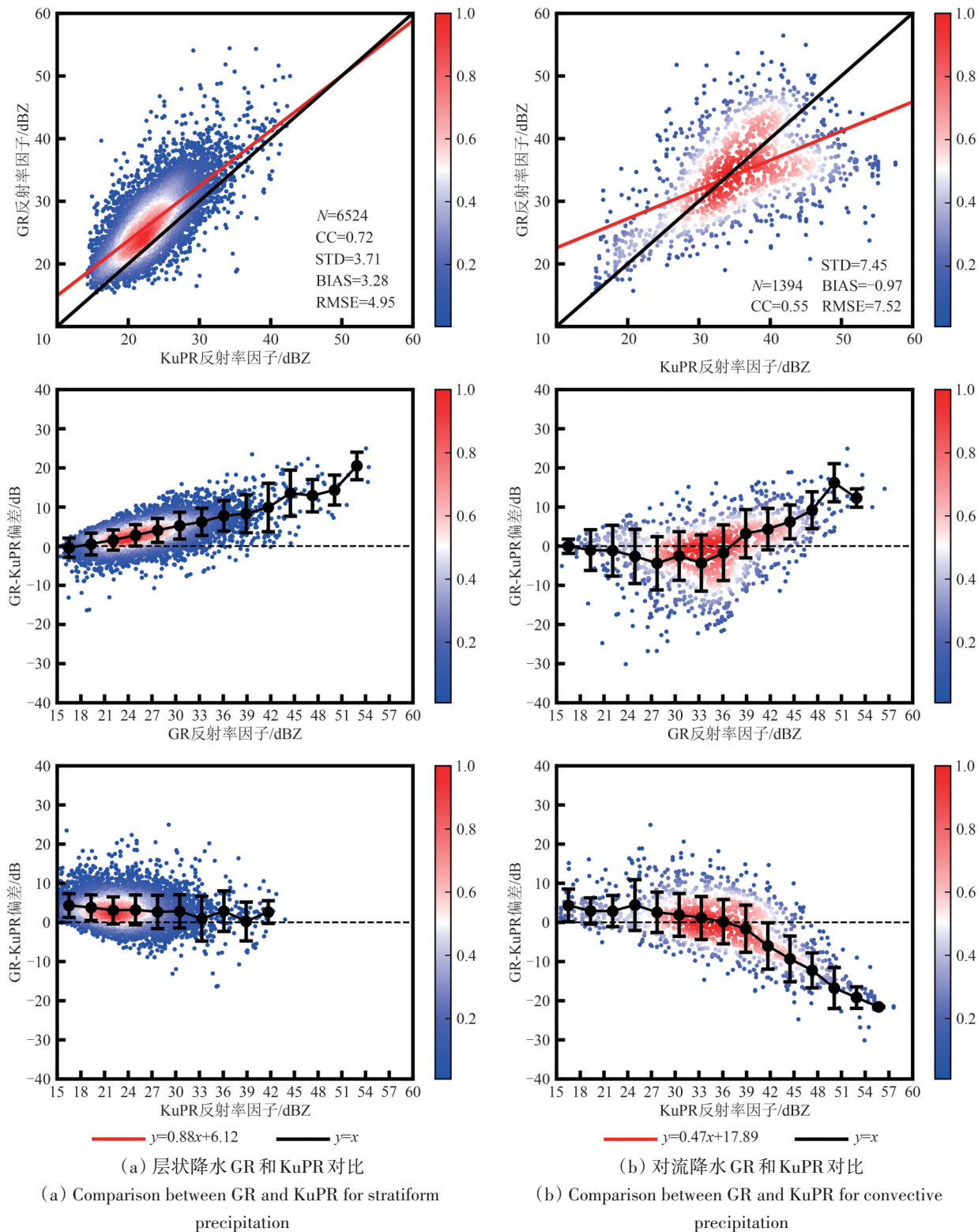


图7 不同降水类型的GR和GPM KuPR反射率因子匹配结果对比(其中黑色点和垂直线分别表示以3 dBZ为间隔的GR-KuPR反射率因子偏差的平均值和标准差)

Fig. 7 Comparison between GR and GPM KuPR reflectivity matching results for different precipitation types (The black diamonds and vertical lines show, respectively, the mean and standard deviation of the GR-KuPR reflectivity difference for each x-axis bin of 3 dBZ)

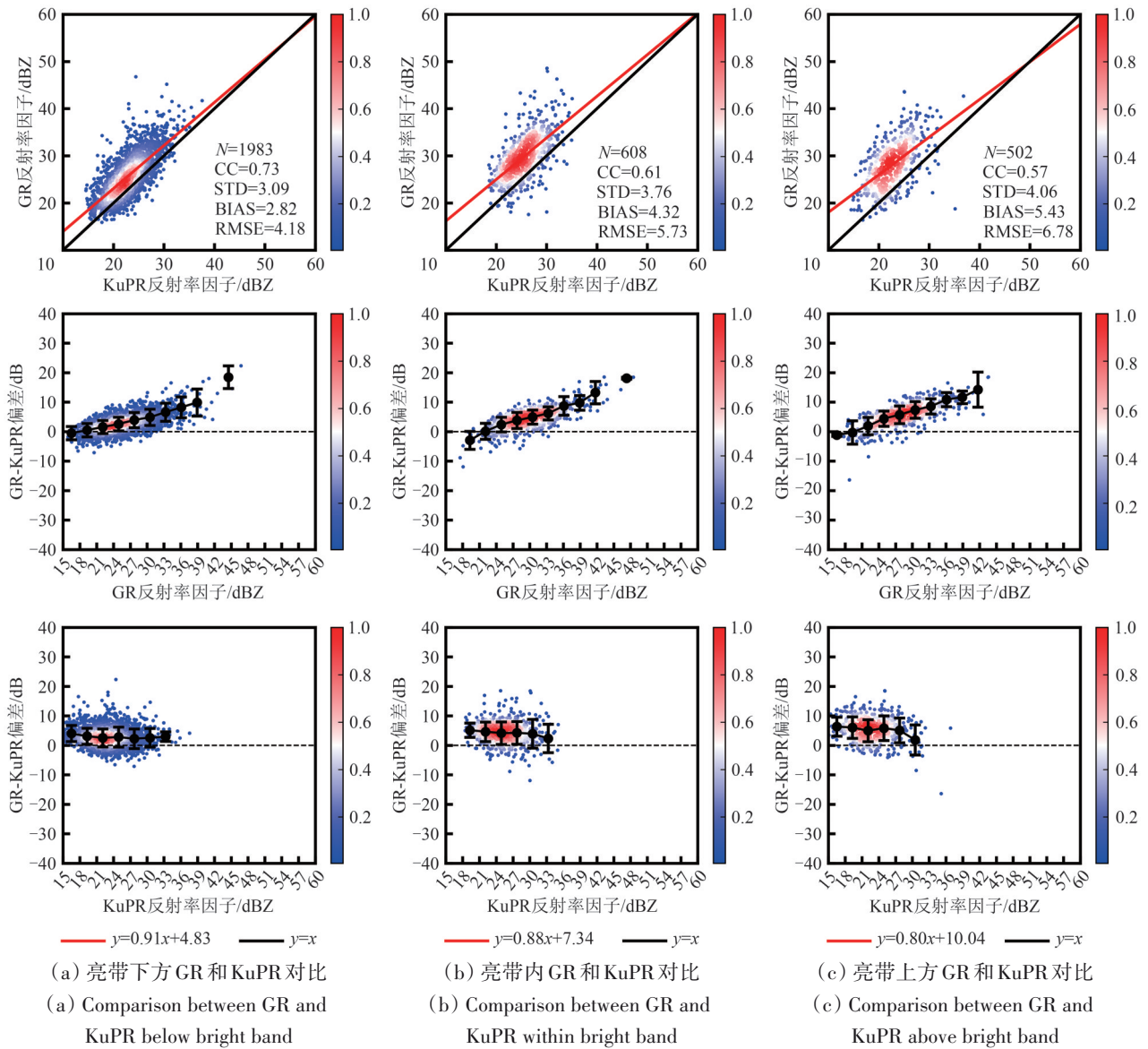


图8 不同降水相态的GR和GPM KuPR反射率因子匹配结果对比(其中黑色点和垂直线分别表示以3 dBZ为间隔的GR-KuPR反射率因子偏差的平均值和标准差)

Fig. 8 Comparison between GR and GPM KuPR reflectivity matching results for different precipitation phases (The black diamonds and vertical lines show, respectively, the mean and standard deviation of the GR-KuPR reflectivity difference for each x-axis bin of 3 dBZ)

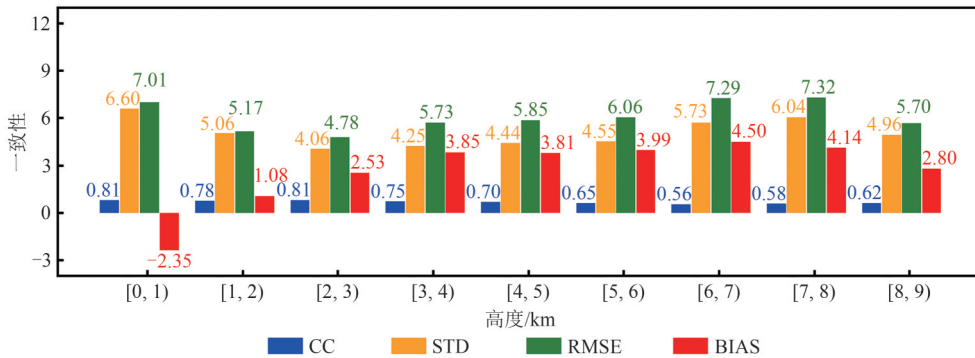


图9 不同高度层GR和GPM KuPR反射率因子匹配结果的统计指标

Fig. 9 Statistics parameters of GR and GPM KuPR reflectivity matching results at different heights

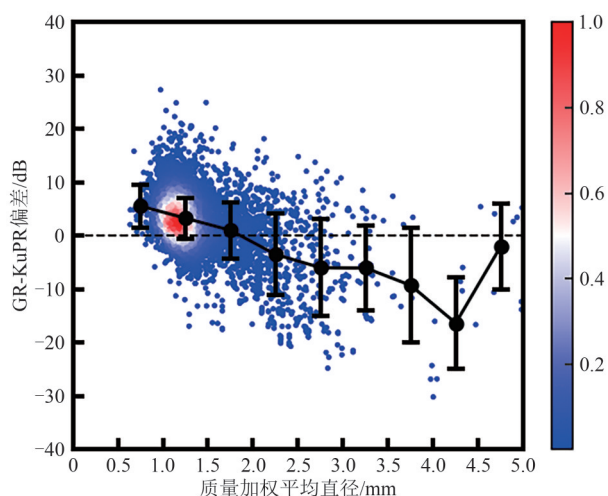


图10 GR-KuPR反射率因子偏差随质量加权平均直径 $D_m$ 的变化(其中黑色点和垂直线分别表示以0.5 mm为间隔的反射率因子偏差的平均值和标准差)

Fig. 10 GR-KuPR reflectivity difference as a function of the mass-weighted mean diameter ( $D_m$ ) (The black diamonds and vertical lines show, respectively, the mean and standard deviation of the reflectivity difference for each x-axis bin of 0.5 mm)

### 3.3 讨论

本研究聚焦X波段地基雷达和GPM DPR数据一致性分析,两种雷达对比结果差异的可能原因有GPM系统误差、匹配空间非均匀波束填充(NUBF)影响、非瑞利散射影响。GPM通过H-D-S方法进行衰减订正,有效缓解了以前H-D方法在强降水时的低估情况(Seto和Iguchi, 2015),但受限于雷达衰减方程的非线性以及路径积分衰减误差,反演结果会受影响(Short等, 2013),在强降水区域仍有衰减订正不足现象,这也是强回波时GR-KuPR偏差迅速增加的原因(图6(a))。GPM KuPR的水平分辨率为5公里,而有些雨团如对流降水尺度通常小于该数值,雷达波束没有完全被降水充满,NUBF会对GPM KuPR的降水回波造成系统性影响。GPM已对NUBF进行校正(Seto等, 2015),降水估算值有所提升,但受限于对流特性影响,对流降水测量仍存在更高变异性(Shimozuma和Seto, 2015),这也是对流降水统计结果比层状降水差的原因(图7)。由于实际测量值未知,量化GPM系统误差对星地雷达对比结果的相对贡献极具挑战性,这也是未来需要考虑的方向。尽管如此,星地雷达对比仍是地基雷达数据评估和定标校正的关键环节,也是目前广泛使用的方法。

本研究为保证充足的样本量,同Warren等(2018)一致,采用了 $f_{\min}=0.7$ 的标准,若选择 $f_{\min}=$

1.0的标准(匹配空间完全充塞),两种雷达的整体相关系数CC会增大0.03,标准差STD减小1.12 dB,均方根误差RMSE减小0.17 dB,平均偏差BIAS增大1.19 dB。相较 $f_{\min}=0.7$ 的标准, $f_{\min}=1.0$ 的标准星地雷达一致性更好,但样本量只有3433组,减小近60%,探讨不同降水强度、类型和相态的影响时,统计结果的随机性增大。若有更多的X波段地基雷达站点或更长时段的观测数据,可通过更严格的标准 $f_{\min}=1.0$ 减小匹配空间非均匀波束填充(NUBF)的影响。另一方面,非瑞利散射时,两种雷达的等效反射率因子会出现一定差异,本研究已采用Das等(2020)方法将Ku波段反射率因子转换为X波段的数据,从而减小因非瑞利散射造成的误差,但不同地区雨滴谱差异也可能带来不确定性。

值得说明的,地基雷达观测数据不一致是常见现象,相邻雷达测量的反射率因子能相差2—4 dB(肖艳姣等, 2007; Zhou, 2013)。通过校正地基雷达,能改进地基雷达网一致性和准确性。不同X波段地基雷达硬件和标定差异会影响星地雷达观测偏差,从而进一步影响地基雷达校正精度,在处理不同站点历史地基雷达数据时,应考虑不同地基雷达硬件和标定差异的影响。此外,未来地基雷达校正时也需考虑自身数据的连续性,一旦硬件更新和重新校准,雷达观测偏差也会发生变化,应考虑雷达维护记录的影响。

## 4 结论

地基天气雷达能够提供高时空分辨率的降水信息,是中小尺度灾害性天气有效的监测及预警工具。然而,其数据会受到定标差异、衰减订正、杂波干扰等影响,通过和星载雷达对比分析,验证其数据的准确性和可靠性,有助于更好的了解地基天气雷达观测特性,从而校正其数据,提高地基天气雷达定量降水监测能力。本文对2023年5—9月淮河流域凤阳X波段地基雷达和GPM KuPR观测结果,在进行质量控制的基础上进行时空匹配和频率校正,共获得8483组匹配样本。随后通过降水个例和统计数据对比,分析了两种雷达降水资料的异同,以及不同降水强度、类型和相态的影响,为星地雷达联合应用和X波段地基雷达定标校正提供参考。结论如下:

(1) GR和GPM KuPR探测到的降水回波分布

型大体一致,总体相关系数为0.73,总体标准差为4.89 dB,总体均方根误差为5.59 dB。但强度存在一定差异,前者的降水回波普遍高于后者,总体平均偏差为2.71 dB。在轻度和中度降水时两种雷达吻合良好,偏差均值在 $\pm 5$  dB以内,在强降水时偏差增大。降水粒子为小粒子时( $D_m$ 在0.5—2.5 mm),两种雷达吻合良好,偏差均值在 $\pm 5$  dB以内,大粒子时偏差增大。

(2)对于层状降水和亮带以下液态降水,GR和GPM KuPR反射率因子一致性更好,相关系数分别为0.72和0.73,标准差分别为3.71 dB和3.09 dB,均方根误差分别为4.95 dB和4.18 dB,平均偏差分别为3.28 dB和2.82 dB。而对于对流降水和亮带以内混合态降水、亮带以上冰相降水,GR和GPM KuPR反射率因子一致性稍差,相关系数小于0.65,标准差大于3.75 dB,均方根误差大于5.50 dB。

总体来说,X波段地基雷达和GPM DPR反射率因子一致性良好,尤其在层状降水和液态降水时,具有联合应用的潜力,而在强降水和复杂的气象条件时需要进一步的处理。GPM系统误差、匹配空间非均匀波束填充(NUBF)影响、非瑞利散射影响是两种雷达对比结果差异的可能原因,后续研究将考虑进一步量化和减小这些原因的影响,如采用更长序列的观测数据和采用一种基于星载雷达雨滴谱数据的新型频率校正方法(吴琼等,2023)。此外,下一步将研究星地雷达对比结果如何用于X波段地基雷达的定标校正,旨在提高地基雷达数据质量。2023年4月中国首颗低倾角轨道降水测量卫星—风云三号G星(FY-3G)成功发射,其上搭载的降水测量雷达PMR(Precipitation Measurement Radar)可以获得降水系统内部的三维结构信息(谷松岩等,2023;Zhang等,2023),这是后续星地雷达联合应用的重要研究对象。结合更多观测手段(如极化变量或地面雨量计)交叉验证,也是我们未来工作的重要方向。

**志 谢** 衷心感谢凤阳县气象局武金祥工程师在X波段地基雷达维护检修和数据收集提供的帮助,感谢NASA提供GPM DPR资料的在线下载服务。

## 参考文献(References)

Bolen S M and Chandrasekar V. 2000. Quantitative cross validation of

space-based and ground-based radar observations. *Journal of Applied Meteorology*, 39(12): 2071-2079 [DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<2071:qcvosb>2.0.co;2]

Chen P, Chen L, Wang G, Wu Q, Wang H Y and Zhang P. 2025. Comparison of reflectivity consistency between spaceborne precipitation radar and ground-based weather radar in China and the United States. *Advances in Atmospheric Sciences*, 42(7): 1376-1394 [DOI: 10.1007/s00376-024-3361-1]

Chu Z G, Xu D, Wang Z H, Han J and Fei H Y. 2018. Consistent correction to ground-based radars in the lower reaches of the Yangtze based on TRMM/PR observations. *Journal of Applied Meteorological Science*, 29(3): 296-306 (楚志刚, 许丹, 王振会, 韩静, 费海燕. 2018. 基于TRMM/PR的长江下游地基雷达一致性订正. *应用气象学报*, 29(3): 296-306) [DOI: 10.11898/1001-7313.20180304]

Das S K, Krishna U V M, Kolte Y K, Deshpande S M and Pandithurai G. 2020. Assessment of ground-based X-band radar reflectivity: attenuation correction and its comparison with space-borne radars over the Western Ghats, India. *Earth and Space Science*, 7(11): e2019EA000861 [DOI: 10.1029/2019EA000861]

Gao Y, Wu T W, Wang J and Tang S H. 2021. Evaluation of GPM Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR) rainfall products using the rain gauge network over China. *Journal of Hydrometeorology*, 22(3): 547-559 [DOI: 10.1175/jhm-d-20-0156.1]

Geng F. 2023. Study on quality control of X-band dual-polarization phased array weather Radar and its network mosaic method with S-band weather Radar. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (耿飞. 2023. X波段双偏振相控阵天气雷达数据质控及其与S波段天气雷达组网拼图方法研究. 南京: 南京信息工程大学) [DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.001773]

Gu S Y, Zhang P, Chen L, Shang J, Zhang H W, Lin M Y, Zhu A J, Jia S Z, Yin H G, Sun F L, Xu H L, Wang H F, Li L, Wu Q, Guo Y, Dou F L and Wu S L. 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G. *Torrential Rain and Disasters*, 42(5): 489-498 (谷松岩, 张鹏, 陈林, 商建, 张宏伟, 林曼筠, 朱爱军, 贾树泽, 尹红刚, 孙逢林, 徐寒列, 王皓飞, 李路, 吴琼, 郭杨, 窦芳丽, 武胜利. 2023. 中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)的探测能力概述与展望. *暴雨灾害*, 42(5): 489-498) [DOI: 10.12406/byzh.2023-106]

Hamada A and Takayabu Y N. 2016. Improvements in detection of light precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-frequency Precipitation Radar (GPM DPR). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(4): 653-667 [DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0097.1]

He R, Li H, Luo J Y, Huang H and Zhu Y J. 2025. Comparison of the reflectivities from Precipitation Measurement Radar onboard the FY-3G satellite and ground-based S-band dual-polarization radars. *Remote Sensing*, 17(7): 1117 [DOI: 10.3390/rs17071117]

Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, Azarbarzin A A, Kummerow C D, Kojima M, Oki R, Nakamura K and Iguchi T. 2014. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(1): 1-12

- logical Society, 95(5): 701-722 [DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00164.1]
- Hu Z Q, Liu L P, Chu R Z and Jin R H. 2008. Comparison of different attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using X-band dual linear polarimetric radar. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(2): 251-261 (胡志群, 刘黎平, 楚荣忠, 金荣花. 2008. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. *气象学报*, 66(2): 251-261) [DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.02.011]
- Huang H, Zhao K, Fu P L, Chen H N, Chen G and Zhang Y. 2022. Validation of precipitation measurements from the Dual-Frequency Precipitation Radar onboard the GPM Core Observatory using a polarimetric radar in South China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4104216 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3118601]
- Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, Awaka J and Okamoto K. 2000. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *Journal of Applied Meteorology*, 39(12): 2038-2052 [DOI: 10.1175/1520-0450(2001)0402.0.CO;2]
- Jiang Y F, Kou L L, Chen A J, Wang Z H, Chu Z G and Hu H F. 2020. Comparison of reflectivity factor of dual polarization radar and dual-frequency precipitation radar. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(5): 608-619 (蒋银丰, 寇蕾蕾, 陈爱军, 王振会, 楚志刚, 胡汉峰. 2020. 双偏振雷达和双频测雨雷达反射率因子对比. *应用气象学报*, 31(5): 608-619) [DOI: 10.11898/1001-7313.20200508]
- Kawanishi T, Kuroiwa H, Kojima M, Oikawa K, Kozu T, Kumagai H, Okamoto K, Okumura M, Nakatsuka H and Nishikawa K. 2000. TRMM precipitation radar. *Advances in Space Research*, 25(5): 969-972 [DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00932-1]
- Keem M, Seo B C, Krajewski W F and Morris K R. 2019. Inter-comparison of reflectivity measurements between GPM DPR and NEXRAD radars. *Atmospheric Research*, 226: 49-65 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.04.010]
- Kim J H, Ou M L, Park J D, Morris K R, Schwaller M R and Wolff D B. 2014. Global precipitation measurement (GPM) ground validation (GV) prototype in the Korean Peninsula. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(9): 1902-1921 [DOI: 10.1175/jtech-d-13-00193.1]
- Kou L L, Mao Y, Wang Z X, Lin Z J, Chen Y, Gao H Y, Chu Z G and Chen A J. 2023. Comparisons of three-dimensional reflectivity and precipitation rate from GPM dual-frequency precipitation radar and ground dual-polarization radar. *Atmospheric Research*, 282: 106521 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106521]
- Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, Kojima M, Oikawa K, Kumagai H, Okamoto K, Okumura M, Nakatsuka H and Nishikawa K. 2001. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 102-116 [DOI: 10.1109/36.898669]
- Kubota T, Masaki T, Kikuchi G, Ito M, Higashiawatoko T, Kanemaru K, Takahashi N, Yamamoto K, Furukawa K and Nio T. 2024. Evaluation of effects on dual-frequency precipitation radar observations due to the orbit boost of the GPM core observatory//Proceedings of 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 709-712 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641066]
- Kubota T, Yoshida N, Urita S, Iguchi T, Seto S, Meneghini R, Awaka J, Hanado H, Kida S and Oki R. 2014. Evaluation of precipitation estimates by at-launch codes of GPM/DPR algorithms using synthetic data from TRMM/PR observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9): 3931-3944 [DOI: 10.1109/jstars.2014.2320960]
- Li N, Wang Z H, Xu F, Chu Z G, Zhu Y Q and Han J. 2017. The assessment of ground-based weather radar data by comparison with TRMM PR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(1): 72-76 [DOI: 10.1109/lgrs.2016.2626320]
- Liu X Y, Li H, He P, Li D Y and Zheng Y Y. 2018. Comparison on the precipitation measurement between GPM/DPR and CINRAD radars. *Journal of Applied Meteorological Science*, 29(6): 667-679 (刘晓阳, 李郝, 何平, 李丹杨, 郑媛媛. 2018. GPM/DPR雷达与CINRAD雷达降水探测对比. *应用气象学报*, 29(6): 667-679) [DOI: 10.11898/1001-7313.20180603]
- Louf V, Protat A, Warren R A, Collis S M, Wolff D B, Raunyar S, Jakob C and Petersen W A. 2018. An integrated approach to weather radar calibration and monitoring using ground clutter and satellite comparisons. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(1): 17-39 [DOI: 10.1175/JTECH-D-18-0007.1]
- Lu D J, Hu H, Wu L, Liu Y L, Li R Y, Wu L L and Yuan Y. 2024. Influence factors analysis and improvement of consistency evaluation algorithm between weather radars. *Meteorological Monthly*, 50(4): 475-487 (鲁德金, 胡姮, 吴蕾, 柳云雷, 李瑞义, 吴林林, 袁野. 2024. 天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进. *气象*, 50(4): 475-487) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.121201]
- Mahale V N, Brotzge J A and Bluestein H B. 2014. The advantages of a mixed-band radar network for severe weather operations: a case study of 13 May 2009. *Weather and Forecasting*, 29(1): 78-98 [DOI: 10.1175/WAF-D-13-00024.1]
- Masaki T, Iguchi T, Kanemaru K, Furukawa K, Yoshida N, Kubota T and Oki R. 2022. Calibration of the dual-frequency precipitation radar onboard the global precipitation measurement core observatory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5100116 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3039978]
- Meneghini R, Kim H, Liao L, Jones J A and Kwiatkowski J M. 2015. An initial assessment of the surface reference technique applied to data from the Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR) on the GPM Satellite. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(12): 2281-2296 [DOI: 10.1175/jtech-d-15-0044.1]
- Miao Y Q, Shu B, He Q, Wang W M, Zhao Q and Zhang T. 2025. Comparative analysis of echo intensity between adjacent C-band weather radar and X-band weather radar in Yunnan. *Meteorological Science and Technology*, 53(3): 314-326 (缪应卿, 舒斌, 何倩, 王卫民, 赵庆, 张涛. 2025. 云南相邻C波段天气雷达与X波段天气雷达回波强度对比分析. *气象科技*, 53(3): 314-326) [DOI: 10.19517/j.1671-6345.20240253]

- Petracca M, D'Adderio L P, Porcù F, Vulpiani G, Sebastianelli S and Puca S. 2018. Validation of GPM dual-frequency precipitation radar (DPR) rainfall products over Italy. *Journal of Hydrometeorology*, 19(5): 907-925 [DOI: 10.1175/jhm-d-17-0144.1]
- Schwaller M R and Morris K R. 2011. A ground validation network for the Global Precipitation Measurement mission. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(3): 301-319 [DOI: 10.1175/2010JTECHA1403.1]
- Seto S and Iguchi T. 2015. Intercomparison of attenuation correction methods for the GPM Dual-Frequency Precipitation Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(5): 915-926 [DOI: 10.1175/JTECH-D-14-00065.1]
- Seto S, Iguchi T, Shimozuma T and Hayashi S. 2015. NUBF correction methods for the GPM/DPR level-2 algorithms//Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326347]
- Shimozuma T and Seto S. 2015. Evaluation of KUPR algorithm in matchup cases of GPM and TRMM//Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326989]
- Short D, Nakagawa K and Iguchi T. 2013. Reduction of nonuniform beam filling effects by vertical decorrelation: Theory and simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 91(4): 539-543 [DOI: 10.2151/jmsj.2013-408]
- Skofronick-Jackson G, Petersen W A, Berg W, Kidd C, Stocker E F, Kirschbaum D B, Kakar R, Braun S A, Huffman G J, Iguchi T, Kirstetter P E, Kummerow C, Meneghini R, Oki R, Olson W S, Takayabu Y N, Furukawa K and Wilheit T. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1679-1695 [DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00306.1]
- Takahashi N, Kuroiwa H and Kawanishi T. 2003. Four-year result of external calibration for precipitation radar (PR) of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10): 2398-2403 [DOI: 10.1109/tgrs.2003.817180]
- Tan J, Petersen W A, Kirchengast G, Goodrich D C and Wolff D B. 2018. Evaluation of global precipitation measurement rainfall estimates against three dense gauge networks. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3): 517-532 [DOI: 10.1175/jhm-d-17-0174.1]
- Wapler K, Hengstebeck T and Groenemeijer P. 2016. Mesocyclones in central Europe as seen by radar. *Atmospheric Research*, 168: 112-120 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.08.023]
- Warren R A, Protat A, Siems S T, Ramsay H A, Louf V, Manton M J and Kane T A. 2018. Calibrating ground-based radars against TRMM and GPM. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(2): 323-346 [DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0128.1]
- Wen Y X, Cao Q, Kirstetter P E, Hong Y, Gourley J J, Zhang J, Zhang G and Yong B. 2013. Incorporating NASA spaceborne radar data into NOAA National Mosaic QPE system for improved precipitation measurement: a physically based VPR identification and enhancement method. *Journal of Hydrometeorology*, 14(4): 1293-1307 [DOI: 10.1175/JHM-D-12-0106.1]
- Wu Q, Yang M L, Chen L, Yin H G, Shang J and Gu S Y. 2023. A frequency correction algorithm for spaceborne precipitation measurement radar and ground-based weather radar. *Acta Meteorologica Sinica*, 81(2): 353-360 (吴琼, 仰美霖, 陈林, 尹红刚, 商建, 谷松岩. 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. *气象学报*, 81(2): 353-360) [DOI: 10.11676/qxxb2023.20220093]
- Wu X J, Wang L C, Niu Z G, Jiang W X and Cao Q. 2023. More extreme precipitation over the Yangtze River Basin, China: insights from historical and projected perspectives. *Atmospheric Research*, 292: 106883 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106883]
- Xiao Y J, Liu L P and Yang H P. 2007. A contrast analysis of synchronous observations from regional radar network. *Acta Meteorologica Sinica*, 65(6): 919-927 (肖艳皎, 刘黎平, 杨洪平. 2007. 区域雷达网同步观测对比分析. *气象学报*, 65(6): 919-927) [DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2007.06.009]
- Yang Q, Feng Y, Guan L, Wu W Y, Wang S C and Li Q Y. 2023. X-band radar attenuation correction method based on LightGBM algorithm. *Remote Sensing*, 15(3): 864 [DOI: 10.3390/rs15030864]
- Yang Q, Ye F, Shi L X, She W, Li L, He J, Yin J Z, Huang Z H and Fu Y Y. 2024. Comparative analysis of reflectivity factors between GPM spaceborne dual-frequency precipitation radar and S-band radar. *IET International Radar Conference*, 2023(47): 4050-4054 [DOI: 10.1049/icp.2024.1761]
- Yin Y X, Chen H S, Wang G J, Xu W C, Wang S M and Yu W J. 2021. Characteristics of the precipitation concentration and their relationship with the precipitation structure: a case study in the Huai River basin, China. *Atmospheric Research*, 253: 105484 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105484]
- Zhang P, Gu S Y, Chen L, Shang J, Lin M Y, Zhu A J, Yin H G, Wu Q, Shou Y X, Sun F L, Xu H L, Yang G L, Wang H F, Li L, Zhang H W, Chen S J and Lu N M. 2023. FY-3G satellite instruments and precipitation products: First report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit. *Journal of Remote Sensing*, 3: 0097 [DOI: 10.34133/remotesensing.0097]
- Zhang P C, Du B Y and Dai T P. 2001. *Radar Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press: 499 (张培昌, 杜秉玉, 戴铁丞. 2001. *雷达气象学*. 北京: 气象出版社: 499)
- Zheng J F, Zhang J, Zhu Y K, Liu L P and Liu Y X. 2014. Gust front statistical characteristics and automatic identification algorithm for CINRAD. *Journal of Meteorological Research*, 28(4): 607-623 [DOI: 10.1007/s13351-014-3240-2]
- Zhong L Z, Yang R F, Wen Y X, Chen L, Gou Y B, Li R Y, Zhou Q and Hong Y. 2017. Cross-evaluation of reflectivity from the spaceborne precipitation radar and multi-type ground-based weather radar network in China. *Atmospheric Research*, 196: 200-210 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.06.016]
- Zhou H G. 2013. Data comparison software system for new generation Doppler weather radar network. *Journal of Computer Applications*, 33(1): 270-275 [DOI: 10.3724/sp.j.1087.2013.00270]
- Zhu Y Q, Wang Z H, Li N, Xu F, Han J, Chu Z G, Zhang H Y and Jiao P C. 2016. Consistency analysis and correction for observations

from the radar at Nanjing. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(2): 298-308 (朱艺青, 王振会, 李南, 徐芬, 韩静, 楚志刚, 张晗昀, 焦鹏

程. 2016. 南京雷达数据的一致性分析和订正. *气象学报*, 74(2): 298-308 [DOI: 10.11676/qxxb2016.022]

## Consistency analysis of reflectivity between space-borne radar and X-band ground-based radar in the Huai River Basin

HOU Can<sup>1,2,3</sup>, SHI Lijuan<sup>4</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, WU Wenyu<sup>2,3</sup>, LU Yanyu<sup>2,3</sup>, FENG Yan<sup>2,3</sup>, DU Bo<sup>5</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China;

3. Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Huainan 232200, China;

4. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China;

5. Beijing Xiangyuan Academy of Meteorological Observing Technology, Beijing 100081, China

**Abstract:** The Ku/Ka Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR) aboard the Global Precipitation Measurement (GPM) satellite provides valuable data for studying precipitation characteristics. Comparing DPR data with X-band ground-based radar (GR) data is essential for understanding their similarities and differences, which in turn supports the integrated application of space-borne and ground-based radar systems and facilitates the calibration and correction of X-band ground-based radar.

In this study, a total of 8,483 matched samples of reflectivities from Fengyang X-band ground-based radar located in the Huai River Basin and GPM KuPR were collected, from May to September 2023. These samples were obtained after undergoing rigorous quality control, spatio-temporal matching, and frequency calibration. Based on these samples, the consistency of reflectivities between the Fengyang X-band radar and GPM KuPR was conducted. Furthermore, the impact of varying precipitation intensities, precipitation types, and precipitation phases on the consistency between the two instruments was analyzed.

Results indicate that the precipitation echo patterns detected by GR and GPM KuPR are generally consistent, although GR tends to detect stronger echo intensities. The reflectivities of GR and GPM KuPR show a positive correlation, with an overall correlation coefficient of 0.73. The reflectivities of GR are higher than that of GPM KuPR, and the overall average deviation is 2.71 dB. During light and moderate precipitation, the reflectivities of GR and GPM KuPR agree well, with average deviations (GR - KuPR) within  $\pm 5$  dB. However, during heavy precipitation, the absolute deviation increases significantly. When precipitation consists of small particles, the reflectivities measured by the two radars exhibit good agreement, with average deviations (GR - KuPR) within  $\pm 5$  dB. In the case of large precipitation particles, the absolute deviation increases significantly. In stratiform precipitation and liquid precipitation below the bright band, the consistency between GR and GPM KuPR is relatively high, with correlation coefficients of 0.72 and 0.73, and average deviations of 3.28 dB and 2.82 dB, respectively. Conversely, in convective precipitation, mixed precipitation within the bright band, and ice-phase precipitation above the bright band, the consistency is relatively lower, with correlation coefficients below 0.65.

Overall, X-band ground-based radar and GPM DPR demonstrate potential for combined application in stratiform and liquid precipitation, but further calibration and processing are required for heavy precipitation and complex meteorological conditions.

**Key words:** GPM KuPR, X-band ground-based radar, Reflectivity, Consistency analysis, Spatio-temporal matching, Huai River Basin

**Supported by** Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 2208085UQ01, 2408055UQ007, 2408055UQ005, 2408055UQ001), China Meteorological Administration (No. CMAJBGS202502), Key Research and Development Program of Anhui Province (No. 202004b11020012), Innovation Team of the China Meteorological Administration (No. CMA2023QN11), Anhui Meteorological Society Youth Talent Support Program (No. AHMSYSSP202302), The Yangtze River-Huai River Meteorological Joint Open Fund Project (No. 2023QXTC03), Independent Innovation and Development Project of the Anhui Meteorological Service (No. AHQXZC202203), and High-Quality Program and Experimental Program of CMA Meteorological Observation Centre (No. YZJH23-27, GCSYJH23-22)