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

2023年湖北梅雨期FY-4A/4B小时QPE与地面观测降水的对比分析

严婧 徐桂荣 程昌玉 何菊 赖晨 李滨

Comparative analysis of FY-4A/4B hourly quantitative precipitation estimation and surface precipitation by rain gauge during the 2023 Meiyu period in Hubei province

YAN Jing，XU Guirong，CHENG Changyu，HE Ju，LAI Chen，LI Bin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-154

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

基于随机森林算法优选FY-4B AGRI通道订正雨量产品研究

The study on precipitation products corrected by optimal selection FY-4B AGRI channel based on random forest algorithm

暴雨灾害. 2024, 43(5): 598-606 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-194

FY-4A卫星夜间大雾识别及其在高速公路服务应用中的潜力分析

Night heavy fog identification based on FY-4A satellite and its potential analysis in the service of expressway

暴雨灾害. 2021, 40(2): 190-200 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.011

青藏高原夏季FY-4A卫星对流初生产品的分类识别

Classification and identification of FY-4A convective initiation products in summer on the Qinghai-Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(2): 214-223 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-193

基于一次暴雨过程的风云四号A星三种云参数应用效果对比分析

Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case

暴雨灾害. 2022, 41(4): 396-404 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.004

2020年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析

Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 658-665 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.014

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

严婧,徐桂荣,程昌玉,等.2025. 2023 年湖北梅雨期 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的对比分析[J].暴雨灾害,44(6):835−846.
YAN Jing, XU Guirong, CHENG Changyu, et al. 2025. Comparative analysis of FY-4A/4B hourly quantitative precipitation estimation and surface precipitation by rain gauge during the 2023 Meiyu period in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):835−846 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−154

2023 年湖北梅雨期 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的对比分析

严婧[1], 徐桂荣[2], 程昌玉[1], 何菊[1], 赖晨[1], 李滨[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: 为对比 FY-4A/4B 小时定量降水估计 (QPE) 的反演精度, 针对 2023 年湖北省梅雨过程, 对标地面气象站实测小时降水资料, 分析 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能和反演精度及其空间分布差异。结果表明: (1) FY-4A (FY-4B) 小时 QPE 对地面观测降水的命中率、漏报率、空报率分别为 52% (58%)、48% (42%)、52% (53%), FY-4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能略优于 FY-4A。(2) FY-4A (FY-4B) 小时 QPE 与地面观测降水的相关系数为 0.44 (0.44), 偏差和均方根误差分别为 0.88 mm (0.57 mm) 和 6.09 mm (5.91 mm), 总体上 FY-4A/4B 小时 QPE 高估了地面观测降水, FY-4B 的反演精度略高于 FY-4A; FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度具有白天高、夜间低的日变化特征, 可能与降水量以及暴雨和大雨频次有关。(3) 对不同等级降水而言, FY-4A/4B 小时 QPE 会高估小雨和中雨, 低估大雨和暴雨, 其中高估程度随雨强增大而降低, 低估程度随雨强增大而增加。(4) FY-4A/4B 小时 QPE 将≥20 mm 降水量处理为 20 mm 的方式会对其反演精度产生一定影响; FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能和反演精度具有空间差异, 这可能与 FY-4A/4B 的卫星定点经度不同导致的视差差异和卫星接收的辐射差异有关。

关键词: FY-4A; FY-4B; 定量降水估计; 判识性能; 反演精度; 梅雨期; 湖北

中图法分类号: P412.27　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−154

Comparative analysis of FY-4A/4B hourly quantitative precipitation estimation and surface precipitation by rain gauge during the 2023 Meiyu period in Hubei province

YAN Jing[1], XU Guirong[2], CHENG Changyu[1], HE Ju[1], LAI Chen[1], LI Bin[1]

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

Abstract: To compare the inversion accuracy of FY-4A and FY-4B hourly quantitative precipitation estimation (QPE), this study analyzes the recognition performance, and inversion accuracy, as well as the spatial distribution differences of FY-4A/4B hourly QPE for surface precipitation during the Meiyu process of 2023 in Hubei province. The hourly precipitation data measured by rain gauges are used as the benchmark. The results are as follows. (1) The probability of detection (POD), miss alarm rate (MAR), and false alarm rate (FAR) of FY-4A (FY-4B) hourly QPE for ground precipitation is 52% (58%), 48% (42%), and 52% (53%), respectively, indicating slightly better recognition performance of hourly QPE for FY-4B than FY-4A. (2) The correlation coefficient between the hourly QPE of FY-4A (FY-4B) and surface precipitation is 0.44 (0.44), with a mean error (ME) and root mean square error (RMSE) of 0.88 mm (0.57 mm) and 6.09 mm (5.91 mm), respectively. Overall, the hourly QPE of FY-4A/4B overestimates surface precipitation, and the inversion accuracy of FY-4B is slightly higher than that of FY-4A. Moreover, the inversion accuracy of hourly QPE of FY-4A /4B shows diurnal variations with higher accuracy during the day and lower accuracy at night, which may be related to the amount of precipitation, the frequency of

收稿日期: 2024−08−15; **定稿日期**: 2024−12−06

资助项目: 湖北省自然科学气象创新发展联合基金项目 (2022CFD018, 2023AFD107, 2022CFD133); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2021Z06)

第一作者: 严婧, 主要从事气象信息技术研究。E-mail: 232093961@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

rainstorms, and heavy rain. (3) For different grades of precipitation, FY-4A/4B hourly QPE overestimates light and moderate rains, yet underestimates heavy rain and rainstorms. The degree of overestimation decreases with the increase in rainfall intensity, while the underestimation increases with rain intensity. (4) The method of confining precipitation ⩾20 mm to 20 mm in FY-4A/4B hourly QPE has a certain impact on its inversion accuracy. Additionally, there are spatial differences in the recognition performance and inversion accuracy of FY-4A/4B hourly QPE for surface precipitation, which may be related to the parallax difference caused by the different sub-satellite points of FY-4A and FY-4B and different radiation received by the satellites.

Key words: FY-4A; FY-4B; quantitative precipitation estimation; recognition performance; inversion accuracy; Meiyu period; Hubei

引　言

降水是地球气候系统能量和水循环中的重要过程之一 (谷松岩等, 2023)。自 20 世纪中期以来, 在全球气候变暖背景下, 中纬度地区强降水和极端降水事件的发生频次和强度已显著增加 (徐新创等, 2014; 胡钰玲等, 2017; 王芬等, 2018; 孙颖, 2021), 预估未来几乎全球所有地区的极端降水也将增加 (姜大膀等, 2021)。降水强度、范围、趋势的监测是精准预报预警的基础, 对防灾减灾具有重要意义。

湖北省位于我国降水多发的长江中游, 地势为三面环山, 中间低平, 海拔差超过 3 000 m, 降水的时空分布差异较大。目前气象、水文等部门对降水的监测主要依靠地面雨量站观测和雷达探测。雨量站观测是获取地面降水量最直接的途径, 可提供精确的点尺度降水观测, 但湖北省雨量站呈东密西疏的特点, 同时由于观测站布设位置、维护频次等实际情况, 较难满足局地强对流天气的精细化捕获 (Xie et al., 2007; 李梦迪等, 2022)。湖北省目前布设了 9 部 S 波段天气雷达用于气象监测和预警, 可提供较为准确的降水落区、强度和移动方向等信息 (刘黎平等, 2021; 李巧等, 2021), 同时利用秒级流数据, 可实现对降水的高频监测。但由于雷达探测受地形遮挡、地物杂波干扰、信号发射或接受通道增益下降、天线伺服系统控制偏差、定标误差等影响 (庄薇等, 2013; 石宝灵等, 2018; 柳云雷等, 2020), 部分数据缺乏准确性, 同时基于雷达的定量降水估计 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 产品精度还受站点密度、零度层亮带识别、雨滴谱分布、大气垂直运动等影响 (阮征等, 2017; 王丽荣和王立荣, 2017)。气象卫星具备覆盖范围广、连续观测、参数丰富、观测一致性好等特点, 能提供大范围、多时次、连续性的云微物理信息, 可有效弥补地基观测的不足 (徐小红等, 2018; 王清平等, 2019)。风云四号 (FY-4) 卫星是我国第二代静止轨道气象卫星, 2021 年已有风云四号 A 星 (FY-4A) 和 B 星 (FY-4B) 在轨运行, 形成对亚太地区的双星组网观测 (张志清等, 2017)。FY-4A/4B 搭载了先进静止轨道辐射成像仪 (Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI), 由其反演的 QPE 产品空间分辨率达到 4 km, 时间分辨率为分钟级, 可监测中国区域内高时空分辨率的降水形态和结构, 为天气分析预报、洪涝监测预警提供了新的手段 (钟宇璐, 2021)。

目前, 已有学者对 FY-4A 卫星 QPE 产品开展了评估工作。邵建等 (2023) 分析了 FY-4A 卫星 QPE 等 5 类产品在宁夏短时强降水中的适用性, 认为 FY-4A 卫星 QPE 较雨量计观测值偏小。杜爱军等 (2023) 针对重庆发生的两次区域暴雨过程, 利用区域自动气象站实测降水资料, 分析了 FY-4A 卫星 QPE 产品对强降水过程估测的时空偏差特征, 结果表明估测降水强度、范围均较实况偏大, 估测强降水位置与实况有一定偏差, 估测降水持续时间偏长。Zhu 和 Ma (2022) 提出基于视角降水估计算法 (PECA) 的 FY-4A 小时 QPE 产品 (PECA-FY4A), 并与 FY-4A 业务 QPE 产品 (FY-4A QPE-Official) 对比, 结果显示 FY-4A QPE-Official 高估了赤道附近的降水, 低估台风风眼附近的降水。Ren 等 (2021) 分析了 2020 年 6—8 月 FY-4A 卫星 QPE 在中国西部的精度, 结果显示复杂地形区域 QPE 较观测值偏低较多, 并提出基于云分类法的 QPE 改进算法。夏进一和官莉 (2024) 基于随机森林方法反演了 FY-4B 小时 QPE 产品, 并与 FY-4B 业务 QPE 产品对比, 结果表明降水业务产品高估小雨、低估大雨, 降水强度越强低估越严重。上述研究表明, FY-4A/4B 卫星 QPE 的反演精度具有区域差异, 这种差异或许与降水量级有关。

综上可知, FY-4 卫星 QPE 的评估与改进多聚焦于 FY-4A, 对 FY-4B 卫星 QPE 的评估研究较少。2024 年 3 月 FY-4B 已正式接替 FY-4A, 因此亟需开展 FY-4A/4B 的对比分析和适用性评估。为此, 本文针对 2023 年湖北省梅雨过程, 以地面气象观测站实测降水资料为标准, 对比分析 FY-4A/4B 卫星 QPE 对地面观测降水的判识性能和反演精度, 并探讨其空间分布的区域差异特征, 以期为 FY-4A/4B 卫星 QPE 改进和后续应用提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据说明

FY-4 卫星采用全球规范定义的静止轨道标称投影, 地理坐标基于 WGS84 参考椭圆球计算得到 (翟建华等, 2019)。FY-4 卫星为每小时整点至整点过 15 min 进行一次全圆盘观测, 每 15 min 观测间隙内会进行定位定标观测。FY-4 卫星 QPE 产品采用概率密度匹配方法生成定量降水估计产品, 即通过统计一定时空窗中匹配极轨卫星被动微波降水和 FY-4 卫星红外亮温的直方图和累积直方图, 得到亮温到降水的传递特征参数 (游然, 2024), 其星下点空间分辨率为 4 km, 包括全圆盘和中国区域 2 种类型产品。本文使用 2023 年湖北省梅雨期 (6 月 16 日—7 月 10 日共计 600 时次) 全圆盘小时 QPE 产品, 数据来源于国家气象卫星中心。

本文使用的地面观测逐小时降水数据为湖北区域内对应时段 89 个国家级气象观测站 (以下简称国家站) (图 1a) 雨量计观测值, 来源于中国气象局天擎大数据云平台。所有降水数据均通过气候学界限值、时间一致性、空间一致性等严格质量控制。由于降水空间分布为离散型, 为降低空间插值方法引入的误差, 将距离国家站最近的卫星像元值作为该站对应的 QPE。

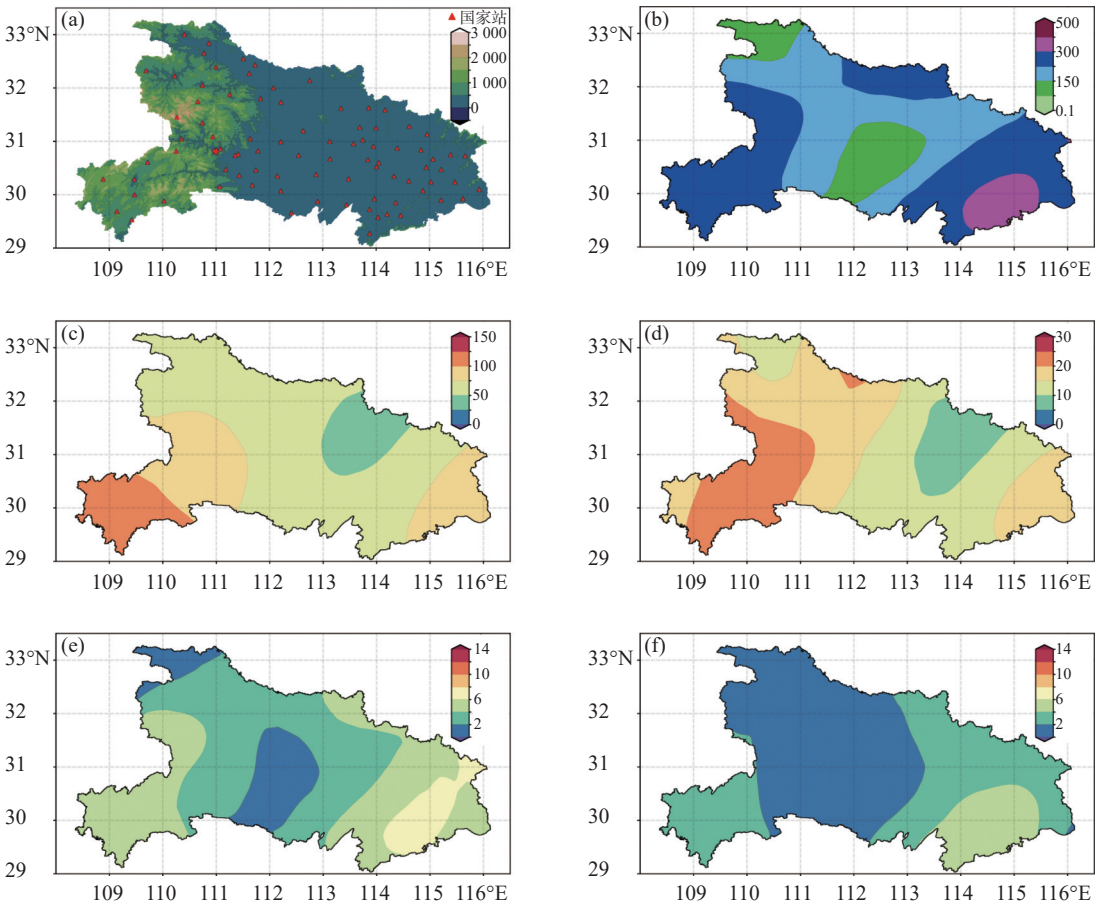


图 1 湖北地形 (填色, 单位: m) 和国家站 (a) 以及 2023 年湖北省梅雨期累积降水量 (b, 单位: mm) 与小雨 (c)、中雨 (d)、大雨 (e)、暴雨 (f) 频次的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of (a) topography (shaded, unit: m), rain gauge stations in Hubei, and (b) accumulated precipitation (unit: mm), frequency of (c) light rain, (d) moderate rain, (e) heavy rain, and (f) rainstorm during the rainy season in Hubei Province in 2023

1.2 研究方法

以国家站雨量计逐小时降水为观测真值, 采用统计分析方法, 从降水命中率、漏报率、空报率的角度来考查 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能, 利用平均偏差、平均绝对偏差、均方根误差和相关系数来分析 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的定量反演精度。

降水命中率 (POD, 记为 P_{OD})、漏报率 (MAR, 记为 R_{MA})、空报率 (FAR, 记为 R_{FA}) 计算公式如下

$$P_{OD}=\frac{N_A}{N_A+N_C} \tag{1}$$

$$R_{MA}=\frac{N_C}{N_A+N_C} \tag{2}$$

$$R_{FA}=\frac{N_B}{N_A+N_B} \tag{3}$$

其中, N_A 定义为 QPE 和国家站观测均有降水的站数, N_B 为空报站数, 即卫星 QPE 有降水但观测无降水的站数, N_C 为漏报站数, 即 QPE 无降水但观测有降水的站数。命中率越大、漏报率越小, 说明 QPE 产品的反演效果越好; 空报率越大, 说明卫星产品误报降水事件越多。

平均偏差 (ME, 记为 E_M)、平均绝对偏差 (MAE, 记为 E_{MA})、均方根误差 (RMSE, 记为 E_{RMS}) 和相关系数 (CC, 记为 C_C) 计算公式如下

$$E_M=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-G_i) \tag{4}$$

$$E_{MA}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i-G_i| \tag{5}$$

$$E_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-G_i)^2} \tag{6}$$

$$C_C=\frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}} \tag{7}$$

其中, n 为命中样本总数, P_i 为 FY-4A/4B 小时 QPE, $\bar{P}$为 QPE 平均值, G_i 为雨量计小时降水量, $\bar{G}$为观测降水平均值。

本文参与统计的总样本为 2023 年湖北省梅雨期雨量计有效降水数据 (小时降水量 ≥0.1 mm) 以及 FY-4A/4B 卫星 QPE 有效降水数据 (小时降水量 ≥0.1 mm)。同时, 为评估 FY-4A/4B 对不同等级降水的反演精度, 以雨量计降水量为基准, 根据小时降水量划分为小雨 (0.1~2.4 mm)、中雨 (2.5~7.9 mm)、大雨 (8.0~15.9 mm)、暴雨(≥16 mm) 等 4 个等级 (钟宇璐, 2021; 官莉和钟宇璐, 2023)。

2 梅雨期降水实况

2023 年湖北省 6 月 16 日入梅, 7 月 10 日出梅, 梅雨期平均降水量 215.3 mm, 最大累计降水量 515.9 mm (鄂州), 最小累计降水量 80.7 mm (沙洋), 6 站累计降水量低于 100.0 mm, 37 站为 100.0~200.0 mm, 32 站为 200.0~300.0 mm, 14 站高于 300.0 mm, 鄂东南累计降水量最高, 江汉平原和鄂西北较低 (图 1b)。

从 2023 年湖北省梅雨期雨量计观测的不同等级小时降水频次分布图 (图 1c—f) 可知, 全省共有 6 278 站次出现小雨, 单站最高频次为 187 次 (鄂西南宜昌大老岭), 最低频次为 26 次 (鄂东北云梦), 鄂西南小雨出现频次较高, 鄂东北较低。全省共有 1 378 站次为中雨, 单站最高频次为 33 次 (鄂西北神农顶), 最低频次为 4 次 (江汉平原仙桃), 鄂西中雨出现频次较高, 鄂东北较低。全省共有 340 站次为大雨, 单站最高频次为 14 次 (鄂西北神农顶、鄂东南鄂州), 有 6 站未出现大雨, 鄂东和鄂西南大雨出现频次较高, 江汉平原和鄂西北较低。全省共有 203 站次为暴雨, 单站最高频次为 13 次 (鄂东南大冶), 有 25 站未出现暴雨, 鄂东南暴雨出现频次较高, 江汉平原和鄂西北较低。总体上, 2023 年梅雨期鄂东南降水量最高, 而江汉平原和鄂西北的降水量较低, 另外大雨、暴雨多出现在鄂东南, 而小雨、中雨多出现在鄂西南。

为对比雨量计观测和 FY-4 卫星反演降水的空间差异, 图 2 给出同期 FY-4A/B 小时 QPE 的累计降水量和各降水等级频次的空间分布, 从中可见 FY-4A 和 FY-4B 累计降水量、中雨至暴雨的降水频次空间分布较一致, FY-4A 小雨频次略低于 FY-4B。与图 1 对比可知, FY-4 累计降水量大部分区域均高于地面观测降水, 小雨频次明显低于地面观测降水, 中雨至暴雨频次则略高于地面观测降水。

3 结果分析

3.1 FY-4A/4B 小时 QPE 对雨量计降水量的判识性能评估

3.1.1 整体性能评估

本节从降水的 POD、MAR、FAR 评估 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能。由评估结果 (表略) 可知, FY-4A 识别降水的 POD 为 52%, 比 FY-4B 低 6%; 有 48% 的降水 FY-4A 未能识别, 有 42% 的降水 FY-4B 未能识别; FY-4A 反演的降水中有 52% 为空报, FY-4B 有 53% 为空报。可见, FY-4B 对降水有较好的识别率, 其识别性能略优于 FY-4A, 然而无论 FY-4A 还是 FY-4B, 其对降水的 MAR 和 FAR 较高, 后续需要进一步改进 FY-4A/4B 的降水反演算法, 降低对降水的漏判和误判。

为细致考查 FY-4A/4B 对地面观测降水的判识性能, 图 3 给出样本中雨量计小时降水量、FY-4A/4B 小时 QPE 的概率密度分布图。从中可见, FY-4A/4B 的小时 QPE 和雨量计小时降水量的概率密度分布形态均表现为准双峰形态, 即弱降水端 (0.1~1.0 mm) 有概率密度主峰区而强降水端 (≥10 mm) 有概率密度次峰区。略有不同的是, FY-4A/4B 小时 QPE 在弱降水主峰区的概率密度值明显低于雨量计小时降水量, 其中 FY-4A 表现尤甚, 而强降水次峰区的概率密度值则明显高于雨量计小时降水量。这说明 FY-

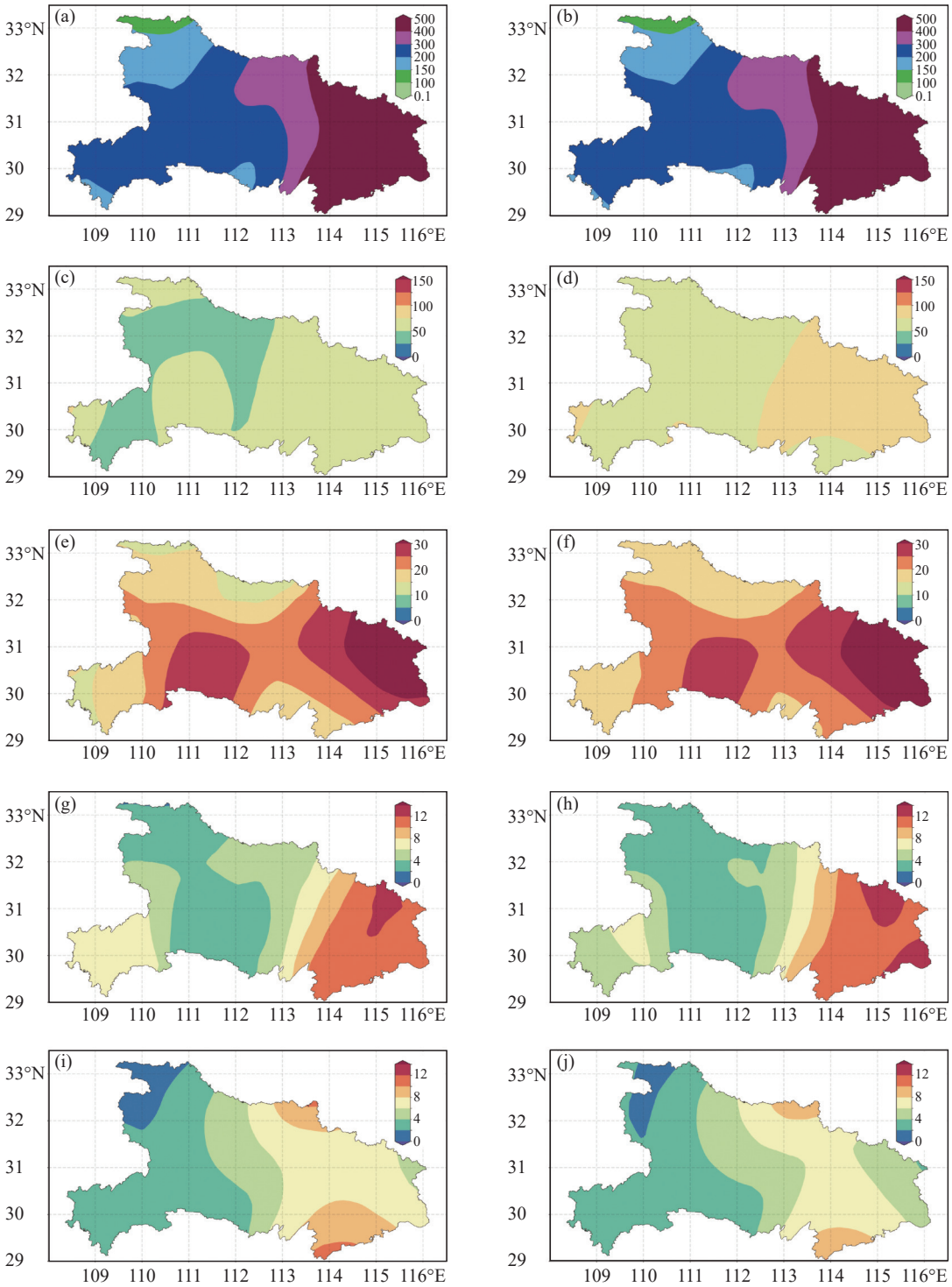


图 2 2023 年湖北省梅雨期 FY-4A (a, c, e, g, i) 与 FY-4B (b, d, f, h, j) 卫星 QPE 累积降水量 (a, b; 单位: mm) 以及小雨 (c, d)、中雨 (e, f)、大雨 (g, h)、暴雨 (i, j) 频次的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a, b) accumulated precipitation (unit: mm), frequency of (c, d) light rain, (e, f) moderate rain, (g, h) heavy rain, and (i, j) rainstorm from (a, c, e, g, i) FY-4A and (b, d, f, h, j) FY-4B quantitative precipitation estimation (QPE) during the Meiyu period of 2023 in Hubei province

4A/4B 小时 QPE 对弱降水的判识性能有待进一步提升, 而对强降水的判识存在虚高的现象, 其中 FY-4A 对弱降水判识不足的现象比 FY-4B 突出。

3.1.2 判识性能空间分布差异特征

为考查 FY-4A/4B 对地面观测降水判识性能的区域差异特征, 图 4 给出 FY-4A/4B 小时 QPE 的 POD、MAR、FAR 的空间分布。从中可见, FY-4A 在鄂东北西部、鄂西南东部和鄂西北北部具有较高的 POD, 在鄂西南除东部外的大部地区 POD 较低, FY-4B 的 POD 空间分布与 FY-4A 较为一致, 但在鄂西北南部、江汉平原以及鄂东南 POD 略高于 FY-4A。FY-4A/4B 的 MAR 空间形态分布与命中率较为一致, 值域

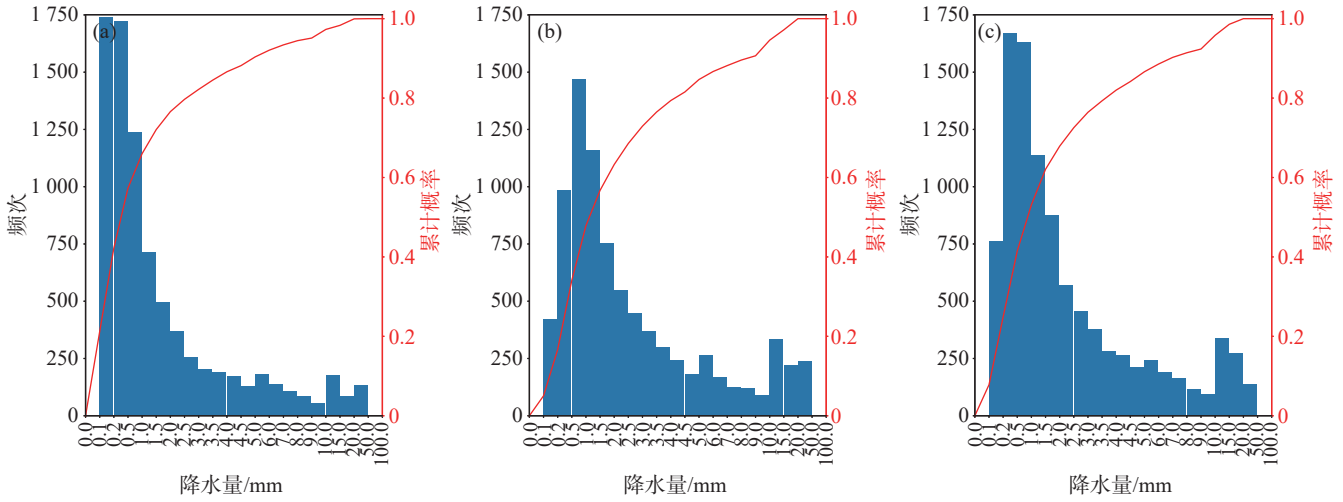


图 3 2023 年湖北省梅雨期雨量计小时降水量 (a) 和 FY-4A (b)、FY-4B (c) 小时 QPE 的概率密度 (柱状) 和累计概率 (红线) 分布图

Fig. 3 Probability density (bar) and cumulative (red line) distribution of (a) rain gauge hourly precipitation, and (b) FY-4A, (c) FY-4B hourly QPE during the Meiyu period of 2023 in Hubei province

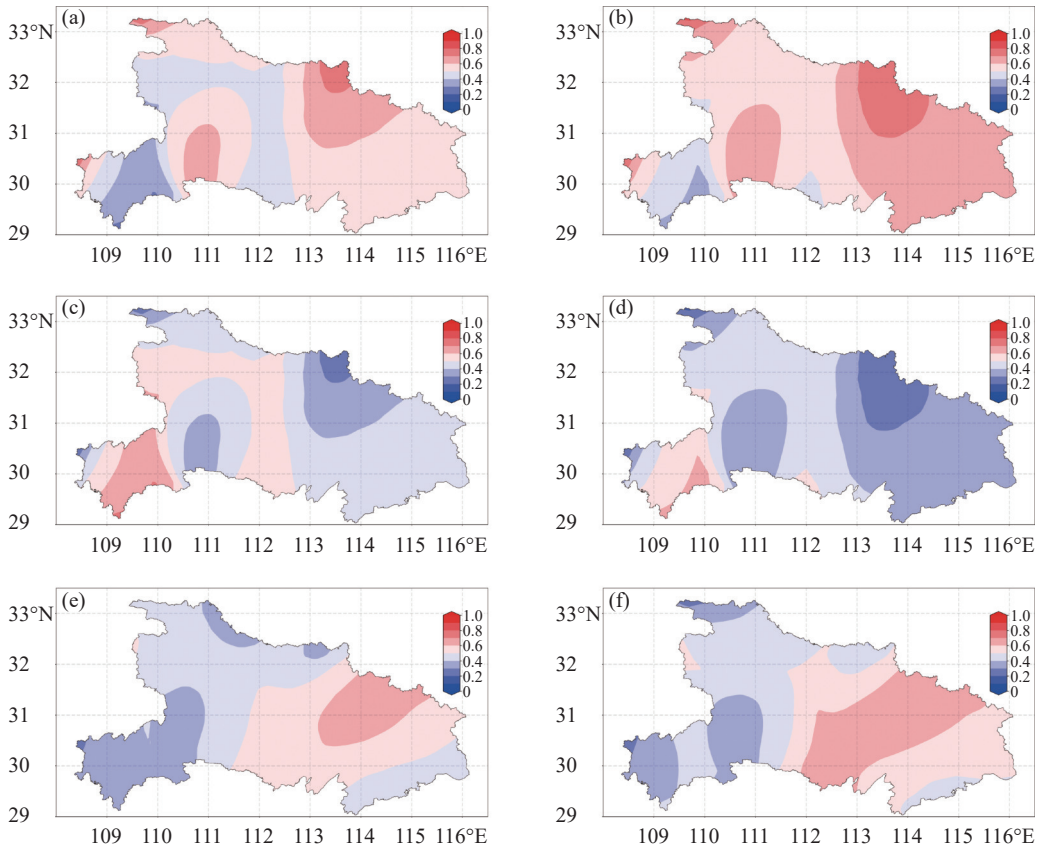


图 4 FY-4A (a, c, e) 与 FY-4B (b, d, f) 小时 QPE 的 POD (a, b)、MAR (c, d)、FAR (e, f) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of (a, b) POD, (c, d) MAR, and (e, f) MAR of (a, c, e) FY-4A and (b, d, f) FY-4B hourly QPE

表现为 POD 高的地区则 MAR 低，而 POD 低的地区则 MAR 则高。FY-4A 和 FY-4B 均在江汉平原和鄂东有较高 FAR，而在鄂西南的 FAR 较低，两者不同的是，在鄂西北北部 FY-4B 的 FAR 较 FY-4A 低，而在江汉平原南部 FY-4B 的 FAR 较 FY-4A 高。可见，FY-4A/4B 对地面观测降水的判识性能在湖北具有空间差异，且 FY-4A 和 FY-4B 空间差异特征表现略有不同。

3.2 FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度评估

3.2.1 整体反演精度评估

为分析 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的反演精度，基于 QPE 命中样本，并以雨量计降水为标准，分析 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的差异。图 5 给出 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的散点密度图，可以明显看到 FY-4A/4B 小时 QPE

均低于 20 mm, 两种 QPE 与地面观测降水具有正相关, FY-4A 和 FY-4B 的 CC 均为 0.44, 但两种 QPE 的拟合趋势线均低于 1:1 对角线, 截距均为 2.8 mm 左右。总体上, FY-4A/4B 高估了地面观测降水, 与地面观测降水相比, FY-4A/4B 的 ME 分别为 0.88 mm 和 0.57 mm, FY-4A 的 ME 略高于 FY-4B。另外, FY-4A 的 MAE、RMSE 分别为 3.39 mm、6.09 mm, 均略高于 FY-4B 的 3.23 mm 和 5.91 mm。由此可见, 虽然 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水具有正相关, 但 CC 不高, 均为 0.44, 且 FY-4A/4B 小时 QPE 总体上高估了地面观测降水, 其中 FY-4B 的反演精度略高于 FY-4A。

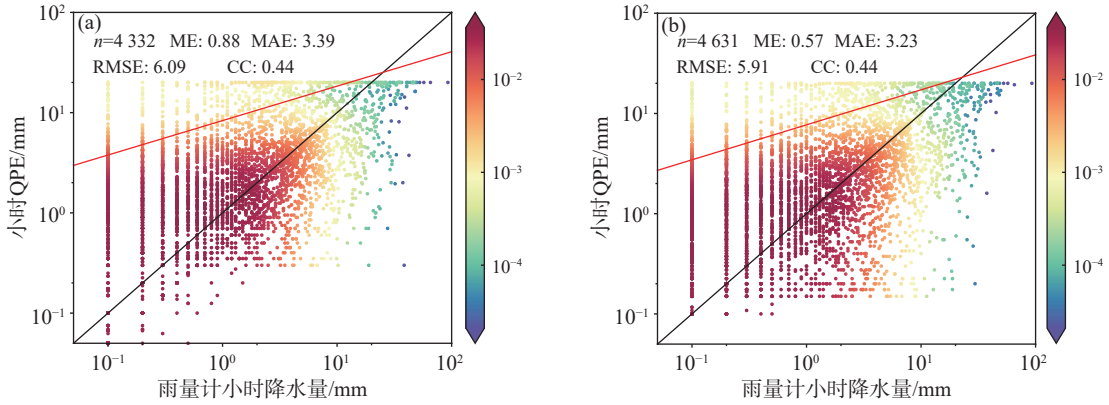


图 5 FY-4A (a) 和 FY-4B (b) 的小时 QPE 与雨量计小时降水量的散点密度 (填色) 图 (红色为趋势线, 黑色为 1:1 参考线)

Fig. 5 Scatter density (shaded) plots of (a) FY-4A and (b) FY-4B hourly QPE vs rain gauge hourly precipitation (Red line represents the linear trend line and black line represents the 1:1 reference line)

3.2.2 反演精度的日变化

为考查 FY-4A/4B 小时 QPE 反演精度的日变化特征, 图 6 给出 FY-4A/4B 小时 QPE 命中时各偏差统计值的日变化, 从中可见 FY-4A/4B 各偏差统计值均呈现夜间高、白天低的特征。FY-4A 的 ME 在 05—16 时 (北京时, 下同) 均低于 0.5 mm, 自 20 时起明显增大, 22 时达到峰值 2.9 mm, 至 05 时后开始逐渐降低; FY-4A 的 MAE 与 RMSE 变化较为一致, 17 时开始逐渐增大, 21—01 时显著增大至峰值后逐渐降低。FY-4B 的 ME 高值集中在 22—02 时, 其中峰值 2.5 mm 出现在 01—02 时; FY-4B 的 MAE 与 RMSE 总体上也呈现夜间高、白天低的特征, 且具有双峰波动形态, 主峰出现在夜间 21—00 时, MAE 均高于 5 mm, RMSE 均高于 7.4 mm, 次峰出现在白天 06—08 时, MAE 均高于 2.6 mm, RMSE 均高于 5.0 mm。以上分析表明, FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度白天高于夜间。

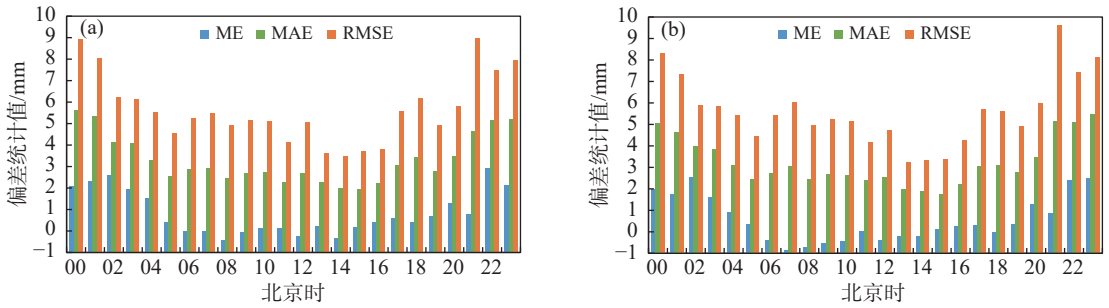


图 6 FY-4A (a) 和 FY-4B (b) 命中时小时 QPE 与雨量计小时降水量的偏差统计量的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of deviation statistics of (a) FY-4A and (b) FY-4B hourly QPE at hit time against rain gauge hourly precipitation

为探讨 FY-4A/4B 小时 QPE 产品反演精度白天与夜间存在差异的原因, 统计了 FY-4A/4B 小时 QPE 命中时雨量计累计降水量及各等级降水频次的日变化 (图 7)。从中看出命中时梅雨期夜间的累计降水量明显高于白天, 尤其是 21—01 时累计降水量较白天偏多 200~300 mm, 此时段的暴雨频次明显高于白天, 大雨频次则略高于白天, 而中雨和小雨频次白天则高于夜间。综上可知, FY-4A/4B 小时 QPE 反演精度的日变化可能与降水等级有关, 即降水量越大、暴雨和大雨频次越多, QPE 的偏差会相应偏大。

3.2.3 不同等级降水的反演精度差异

为进一步考查 FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度与雨强的关系, 对比分析 FY-4A/4B 小时 QPE 与雨量计观测不同等级降水的精度 (表 1)。从表 1 可见,

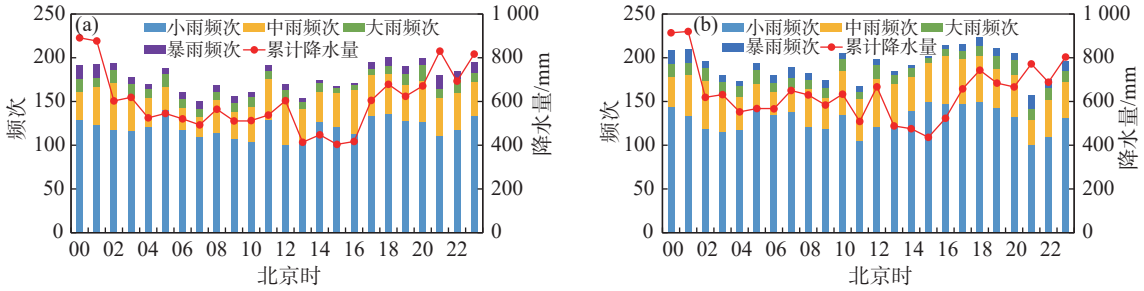


图 7 FY-4A (a) 和 FY-4B (b) QPE 命中时雨量计累计降水量及各等级降水频次的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of accumulated precipitation and different grades of precipitation frequency by rain gauge during (a) FY-4A and (b) FY-4B hourly QPE hits

表 1 FY-4A/4B 小时 QPE 与雨量计观测不同等级降水的偏差评估指标

Table 1 Indicators for assessing the deviation of FY-4A/4B hourly QPE from rain gauge observations of different grades of precipitation

降水等级	FY-4A					FY-4B				
	n/站次	评估指标				*n*/站次	评估指标			
		ME/mm	MAE/mm	RMSE/mm	CC		ME/mm	MAE/mm	RMSE/mm	CC
小雨	2 923	2.12	2.33	4.53	0.18	3 122	1.89	2.11	4.2	0.19
中雨	952	1.18	3.58	5.45	0.1	1 021	0.73	3.39	5.05	0.11
大雨	274	−2.94	6.22	7.16	0.1	294	−3.42	6.39	7.32	0.15
暴雨	183	−14.86	15.02	17.89	0.42	194	−15.53	15.65	18.28	0.43

FY-4A 小时 QPE 的 ME 在小雨时为 2.12 mm, 随着雨强增大至中雨, ME 减小至 1.18 mm, 当雨强为大雨时, ME 由正转负变为-2.94 mm, 当雨强继续增大至暴雨时, ME 骤增至-14.86 mm。此外, FY-4A 小时 QPE 的 MAE 和 RMSE 均表现为随着雨强增大而变大, 分别由小雨时的 2.33 mm 和 4.53 mm 增至暴雨时的 15.02 mm 和 17.89 mm, 尤其是暴雨时的 MAE 明显高于其他雨强等级。值得注意的是, 虽然暴雨时 FY-4A 小时 QPE 的反演精度逊于其他雨强, 但暴雨时 FY-4A 小时 QPE 与地面观测降水的 CC(0.42) 却高于小雨到大雨时的 CC(均小于 0.20)。FY-4B 小时 QPE 和地面观测不同等级降水的对比结果与 FY-4A 的对比结果相似, 但 FY-4B 在小雨和中雨时的精度均略高于 FY-4A, 而在大雨和暴雨时的精度略低于 FY-4A, FY-4B 各雨强 CC 均略高于 FY-4A。由此可见, 当 FY-4 卫星和雨量计均捕获降水时, FY-4A/4B 小时 QPE 会高估小雨和中雨, 低估大雨和暴雨, 其中高估程度随雨强增大而降低, 低估程度随雨强增大而增加, 此外 FY-4A 高估程度大于 FY-4B, FY-4B 低估程度大于 FY-4A。

考虑到 FY-4A/4B 卫星 QPE 反演方法会将 QPE≥20 mm 的数据均处理为 20.0 mm (游然等, 2023)。为考查该处理方式给 FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水对比结果可能带来的影响, 参照 FY-4 卫星 QPE 产品处理 20 mm 以上反演降水的方式, 对地面观测降水做同样的截断处理后, 再次分析 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的反演精度。图 8 给出 FY-4A/4B 小时 QPE 与截断处理后的地面观测降水的散点图, 可见相较未处理的地面观测降水 (图 5), FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的散点均呈矩形分布, FY-4A/4B 的 ME 分别增加了 0.31 mm 和 0.30 mm, 而 MAE 分别降低了 0.31 mm 和 0.30 mm, RMSE 分别降低了 0.81 mm 和 0.85 mm, FY-4A 小时 QPE 与地面观测降水的 CC 略有提高, 但 FY-4B 的 CC 则无变化。这说明将地面观测降水≥20 mm 的数据截断为 20 mm 后, 减弱了 QPE 的低估效果, 改善了 QPE 和地面观测降水之间的相关性和离散程度。表 2 分别给出 FY-4A/4B 小时 QPE 与截断处理后的地面观测不同等级降水的对比结果, 对比未截断处理的分析结果 (表 1), 可以看到, 截断处理仅对暴雨等级的对比结果产生影响, FY-4A/4B 小时 QPE 的 ME 较处理前分别降低了 50% 和 46%, MAE 分别降低了 49% 和 46%, RMSE 分别降低了 44% 和 42%, CC 分别降低了 29% 和 47%。由上可知, 在 FY-4 卫星 QPE 反演方法中将 QPE≥20 mm 的数据截断处理为 20.0 mm, 会在一定程度上影响 FY-4 卫星反演强降水的精度, 因此, 如何改进 FY-4 卫星 QPE 反演算法来提高强降水的反演精度是未来值得探讨的工作。

3.2.4 反演精度的空间分布差异特征

为考查 FY-4A/4B 小时 QPE 反演精度在湖北省内的空间差异, 本文以图 8 数据为对象, 分析 FY-4A/4B 小时 QPE 的 ME、MAE、RMSE 的空间分布特征。由图 9a、c、e 可见, FY-4A 小时 QPE 的偏差在湖北省均为正值, QPE 偏差大值出现在鄂东南且偏

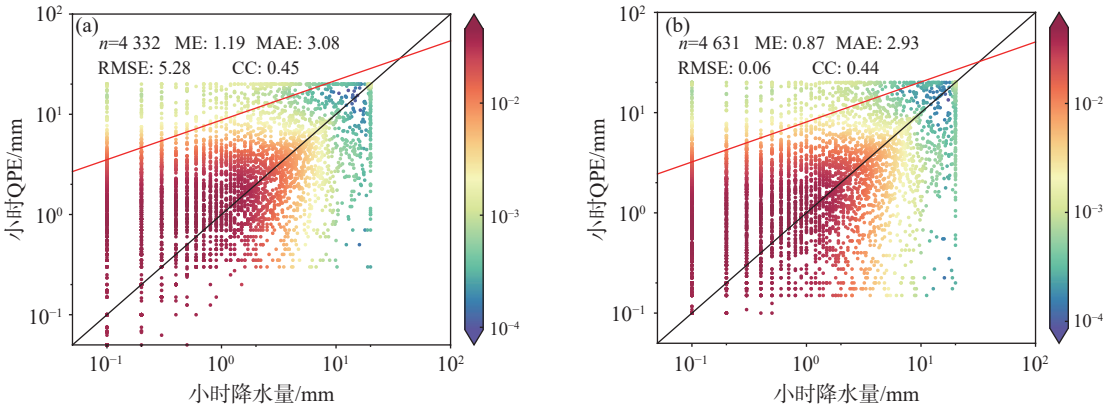


图 8 FY-4A (a) 和 FY-4B (b) 小时 QPE 与截断处理后雨量计小时降水量的散点密度 (填色) 图 (红色为趋势线, 黑色为 1:1 参考线)

Fig. 8 Scatter density (shaded) plots of (a) FY-4A and (b) FY-4B hourly QPE vs the truncated rain gauge hourly precipitation (Red line represents the linear trend line and black line represents the 1:1 reference line)

表 2 FY-4A/4B 小时 QPE 与截断处理后的雨量计观测不同等级降水的偏差评估指标

Table 2 Indicators for assessing the deviation of FY-4A/4B hourly QPE from truncated rain gauge observations of different grades of precipitation

降水等级	FY-4A					FY-4B				
	n/站次	评估指标				*n*/站次	评估指标			
		ME/mm	MAE/mm	RMSE/mm	CC		ME/mm	MAE/mm	RMSE/mm	CC
小雨	2 923	2.12	2.33	4.53	0.18	3 122	1.89	2.11	4.2	0.19
中雨	952	1.18	3.58	5.45	0.1	1 021	0.73	3.39	5.05	0.11
大雨	274	−2.94	6.22	7.16	0.1	294	−3.42	6.39	7.32	0.15
暴雨	183	−7.43	7.62	9.99	0.3	194	−8.34	8.46	10.52	0.23

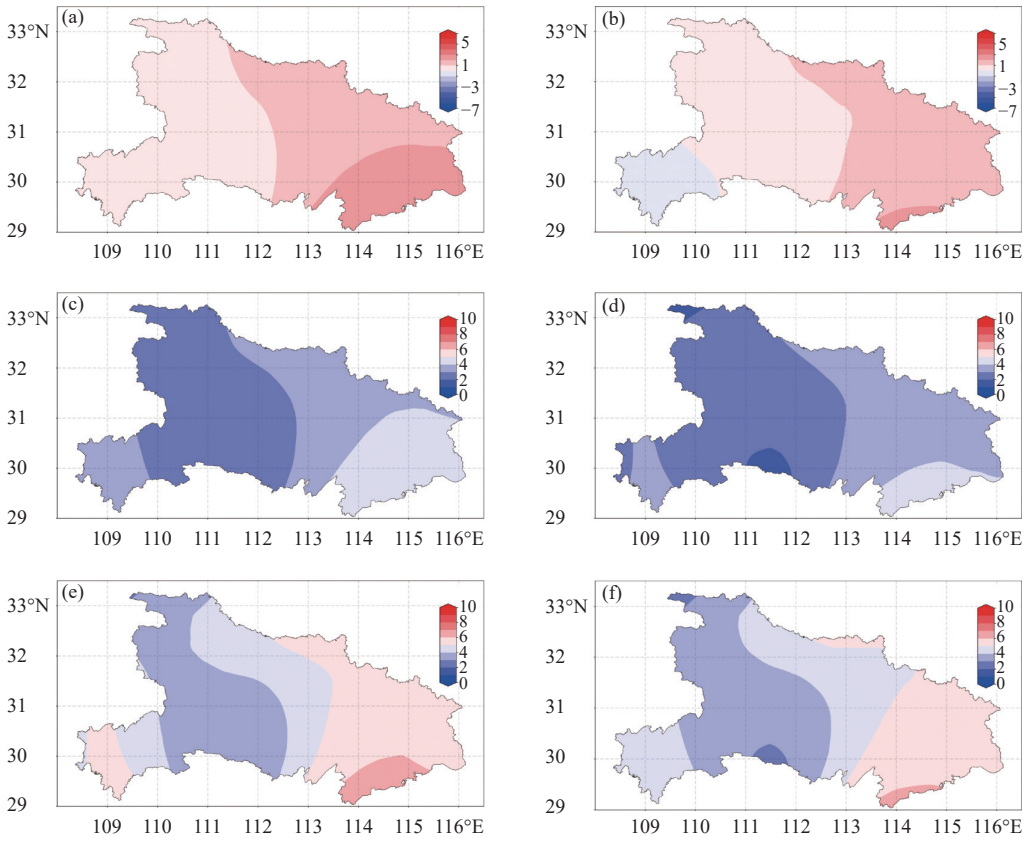


图 9 FY-4A (a, c, e) 与 FY-4B (b, d, f) 小时 QPE 与雨量计小时降水量的 ME (a, b)、MAE (c, d)、RMSE (e, f) 的空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of (a, b) mean error (ME), (c, d) mean absolute error (MAE), and (e, f) root mean square error (RMSE) between (a, c, e) FY-4A, (b, d, f) FY-4B hourly QPE and rain gauge hourly precipitation

差总体上自东向西逐渐降低; FY-4A 小时 QPE 的 MAE 和 RMSE 的空间分布与 ME 的空间分布基本相似, 即大值出现在鄂东南且自东向西逐渐变小, 但在鄂西南 QPE 的 MAE 和 RMSE 稍有变大。与 FY-4A 略有不同, FY-4B 小时 QPE 的 ME 在鄂西南为负值、在湖北其他地区为正值, 正偏差大值出现在鄂东南南部, 自东南向西南逐渐变小, 至鄂西南逐渐过渡为负偏差 (图 9b); FY-4B 小时 QPE 的 MAE (图 9d) 和 RMSE (图 9f) 的空间分布相似, MAE 和 RMSE 大值均出现在江汉平原南部, 且基本自鄂东南向鄂西北变小, 不同之处在于 RMSE 在鄂西东北部出现高值区。综上, FY-4A/4B 小时 QPE的反演精度在湖北具有区域差异, 总体上, FY-4A/4B小时 QPE 的反演精度在鄂西、江汉平原南部较高而在鄂东较低。

4 讨 论

FY-4A/4B 的双星组网可获取高频次的地气目标观测数据, 对强对流等灾害天气的监测预警有着重大作用。本文分析了 2023 年湖北省梅雨期 FY-4A/4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能和反演精度及其区域差异特征。研究发现, 总体上 FY-4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能略优于 FY-4A, 但 FY-4A/4B 对地面观测降水的漏报率和空报率均较高, 漏报多集中于弱降水而空报多集中于强降水。另外, FY-4A/4B 小时 QPE 命中时与地面观测降水的 ME 分别为 0.88 mm 和 0.57 mm, RMSE 分别为 6.09 mm 和 5.91 mm, CC 均为 0.44, 展现出 FY-4B 小时 QPE 的反演精度略高于 FY-4A。究其原因, 可能是 FY-4B 小时 QPE 在利用红外通道基础上, 还结合了微波降水资料与雨量计两种资料来进一步提高数据集的精度 (游然, 2024)。此外考虑到 FY-4A 和 FY-4B 的定点经度分别 104.7°E 和 133.0°E (http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/operation/status.html#FY-GEO), 因此 FY-4A/4B 对地面观测降水的判识性能及反演精度差异可能还与 FY-4A/4B 星下点位置不同有关。一方面, 星下点不同导致卫星观测同一地点的天顶角和方位角不同, 会产生视差差异, 导致卫星 QPE 格点与国家站雨量计空间对应位置不同有关; 另一方面, 星下点不同还会导致卫星接收的是来自不同大气传输路径的辐射, 这也是后续值得探讨的工作。

本文结果还显示, FY-4A/4B 均表现为高估小雨和中雨, 低估大雨和暴雨, 其中低估强降水与邵建等 (2023) 对比分析 FY-4A 小时 QPE 与宁夏地面观测短时强降水得到负偏差相一致。需要指出的是, FY-4A/4B 小时 QPE 会在 20 mm 处截断, 因此分析中发现 FY-4A/4B 小时 QPE 无法有效反映 20 mm 以上强降水, 这与钟宇璐 (2021) 利用 FY-4A 评估我国 2018—2019 年降水以及 Zhu 和 Ma (2022)、Huang 等 (2024) 改进 FY-4A、FY-4B 小时 QPE 时的评估结果基本一致。本文参照 FY-4 小时 QPE 产品处理方式, 将国家站雨量计观测高于 20 mm 以上降水量均处理为 20 mm 后再次进行评估, 结果显示降水等级为暴雨时 FY-4A/4B 小时 QPE 质量有一定提高, ME 较处理前分别降低了 50% 和 46%, RMSE 降低了 44% 和 42%, 说明 FY-4 卫星 QPE 产品对 20 mm 以上降水量的截断处理会在一定程度上影响其与地面观测降水的对比结果。此外, 本文还发现 FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度具有日变化特征, FY-4A/4B 小时 QPE 在白天的反演精度高于夜间, 这与官莉和钟宇璐 (2023) 利用白天、夜间观测降水评估 FY-4A 结果基本一致, 可能原因是夜间降水量大、暴雨和大雨频次高于白天。上述对比一方面证明了本文研究结果的合理性, 另一方面也说明 FY-4A/4B 小时 QPE 质量还有较大提升空间。

FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度除具有日变化特征外, 在湖北地区还具有区域差异, 总体上 FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度在鄂西较高而在鄂东较低, 且偏差自东向西逐渐变小。Li 等 (2021) 指出强降水时 FY-4 卫星 QPE 的偏差会增大, 这说明 FY-4A/4B 小时 QPE 在鄂东南偏差较高的原因可能与该地区梅雨期降水偏多偏强有较大关系。此外, FY-4A/4B 的定位经度不同, 这是否也会对 FY-4A/4B 小时 QPE 反演精度的空间差异产生影响, 需要利用长期历史数据作进一步探讨。

5 结 论

本文以 2023 年湖北省梅雨期 (6 月 16 日—7 月 10 日) 国家站雨量计实测小时降水资料为标准, 分析了同时间段该地区 FY-4A/B 卫星小时 QPE 对地面观测降水的判识性能和反演精度及其地区差异, 得出主要结论如下:

(1) FY-4B 小时 QPE 对地面观测降水的判识性能略优于 FY-4B, FY-4A (FY-4B) 小时 QPE 对地面观测降水的命中率、漏报率、空报率分别为 52% (58%)、48% (42%)、52% (53%)。另外, FY-4A/4B 对地面降水的判识性能在湖北具有空间差异, 总体上 FY-4A/4B 的命中率均在鄂东北较高而在鄂西南较低, FY-4A/4B 的空报率均在江汉平原和鄂东较高, 而在鄂西南的空报率较低。

(2) 当 FY-4A/4B 命中地面观测降水时, FY-4A(FY-

4B) 小时 QPE 与地面观测降水的 CC 为 0.44 (0.44), ME 和 RMSE 分别为 0.88 mm (0.57 mm) 和 6.09 mm (5.91 mm), FY-4A/4B 小时 QPE 总体上高估了地面观测降水, FY-4B 的反演精度略高于 FY-4A。FY-4A/4B 小时 QPE 反演精度的日变化特征表现为白天较高、夜间较低。此外, FY-4A/4B 小时 QPE 的反演精度还存在区域差异, 总体上其反演精度在鄂西和江汉平原南部较高而在鄂东较低。

(3) FY-4A/4B 小时 QPE 会高估小雨和中雨, 低估大雨和暴雨, 其中高估程度随雨强增大而降低, 低估程度随雨强增大而增加, 且 FY-4A 高估程度大于 FY-4B, FY-4B 低估程度大于 FY-4A。另外, FY-4A/4B 小时 QPE 与地面观测降水的 CC 在暴雨时高于其他等级降水。

(4) FY-4A/4B 小时 QPE 将≥20 mm 降水量处理为 20 mm 的方式会对其反演精度产生一定影响, 如将地面观测降水做同样处理, 则暴雨时 FY-4A (FY-4B) 小时 QPE 的 ME 和 RMSE 较处理前分别降低了 50% (44%) 和 46% (42%), 但 CC 较处理前的 0.42 (0.43) 分别降低至 0.30 (0.23)。

参考文献 (References):

杜爱军,杨世琦,聂灿齐,等.2023.重庆强降水过程 QPE/FY-4A 估测降水精度研究[J].高原山地气象研究,43(2):36−43. Du A J, Yang S Q, Nie C Q, et al. 2023. Study on the QPE / FY-4A precipitation estimation during heavy rainfall in Chongqing [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(2):36−43 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.02.005

谷松岩,张鹏,陈林,等.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[J].暴雨灾害,42(5):489−498. Gu S Y, Zhang P, Chen L, et al. 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):489−498 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−106

官莉,钟宇璐.2023.基于 FY-4A AGRI 观测用随机森林算法反演地面雨量[J].地球物理学进展,38(5):1931−1938. Guan L, Zhong Y L. 2023. Retrieval of surface rainfall using random forest algorithm based on FY-4A AGRI observations [J]. Progress in Geophysics,38(5):1931−1938 (in Chinese). doi:10.6038/pg2023GG0514

胡钰玲,张莹,朱安豹,等.2017.中国大陆中纬度带不同等级降水的变化特征[J].中国沙漠,37(2):332−342. Hu Y L, Zhang Y, Zhu A B, et al. 2017. Variation of precipitation in different classes in mid-latitude belt of Chinese mainland [J]. Journal of Desert Research,37(2):332−342 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−694X.2015.00208

姜大膀,王娜.2021.IPCC AR6 报告解读: 水循环变化[J].气候变化研究进展,17(6):699−704. Jiang D B, Wang N. 2021. Water cycle changes: interpretation of IPCC AR6 [J]. Climate Change Research,17(6):699−704 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2021.160

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

李巧,戚友存,朱自伟,等.2021.复杂地形下 C 波段雷达定量降水估计算法[J].气象学报,79(4):689−702. Li Q, Qi Y C, Zhu Z W, et al. 2021. Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar situated in complex topographical regions [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(4):689−702 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.038

刘黎平,张扬,丁晗.2021. Ka/Ku 双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用[J].大气科学,45(5):1099−1113. Liu L P, Zhang Y, Ding H. 2021. Vertical air motion and raindrop size distribution retrieval using a Ka/Ku dual-wavelength cloud radar and its preliminary application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(5):1099−1113 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.20200

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

阮征,李淘,金龙,等.2017.大气垂直运动对雷达估测降水的影响[J].应用气象学报,28(2):200−208. Ruan Z, Li T, Jin L, et al. 2017. Influence of vertical air motion on the radar quantitative precipitation estimation [J]. Journal of Applied Meteorological Science,28(2):200−208 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20170207

石宝灵,王红艳,刘黎平.2018.云南多普勒天气雷达网探测冰雹的覆盖能力[J].应用气象学报,29(3):270−281. Shi B L, Wang H Y, Liu L P. 2018. Coverage capacity of hail detection for Yunnan doppler weather radar network [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(3):270−281 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.210180302

孙颖.2021.人类活动对气候系统的影响—解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J].大气科学学报,44(5):654−657. Sun Y. 2021. Impact of humanactivities on climate system: an interpretation of Chapter Ⅲ of WG Ⅰ report of IPCC AR6 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,44(5):654−657 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210816009

邵建,张肃诏,陈敏,等.2023.FY-4A 卫星在宁夏短时强降水中的适用性研究[J].干旱区研究,40(2):163−172. Shao J, Zhang S Z, Chen M, et al. 2023. Application of FY-4A satellite data in short-time severe precipitation of Ningxia [J]. Zrid Zone Research,40(2):163−172 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2023.02.01

王芬,王文勇,李阳.2018.黔西南短时强降水时空特征分析[J].沙漠与绿洲气象,12(4):45−51. Wang F, Wang W Y, Li Y. 2018. Multi-scale characteristics of short-time heavy rainfall and its relationship with rainstorm in southwest Guizhou [J]. Desert and Oasis Meteorology,12(4):45−51 (in Chinese). doi:10.12057/j/issn.1002−0799.2018.04.007

王丽荣,王立荣.2017.水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正[J].气象,43(9):1152−1159. Wang L R, Wang L R. 2017. Influence of horizontal distance and altitude on radar rainfall estimation and its

correction [J]. Meteorological Monthly,43(9):1152−1159 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.09.012

王清平,吴晓京,陈阳权,等.2019.FY-4A 卫星数据可视化及应用[J].气象科技,47(3):502−507. Wang Q P, Wu X J, Chen Y Q, et al. 2019. Visualization and application of FY-4A satellite data [J]. Meteorological Science and Technology,47(3):502−507 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20180336

夏进一,官莉.2024.基于随机森林算法优选 FY-4B AGRI 通道订正雨量产品研究[J].暴雨灾害,43(5):598−606. Xia J Y, Guan L. 2024. The study on precipitation products corrected by optimal selection FY-4B AGRI channel based on random forest algorithm [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):598−606 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−194

徐小红,余兴,朱延年,等.2018. “6·23”龙卷 FY-2G 卫星云微物理特征分析[J].高原气象,37(6):1737−1748. Xu X H, Yu X, Zhu Y N, et al. 2018. Cloud microphysical properties of a tornado revealed by FY-2G geostationary satellite [J]. Plateau Meteorology,37(6):1737−1748 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00041

徐新创,张学珍,戴尔阜,等.2014.1961-2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理研究,33(7):1335−1347. Xu X C, Zhang X Z, Dai E F, et al. 2014. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010 [J]. Geographical Research,33(7):1335−1347 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj201407013

游然.2024.风云四号 B 星定量降水估计产品使用说明文档[EB/OL]. 国家卫星气象中心. You R. 2024. User guide of the quantitative precipitation estimation product of FY-4B satellite [EB/OL]. National Satellite Meteorological Centre (in Chinese) https://img.nsmc.org.cn/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/OperatingGuide/FY4B/FY-4B_Product_Instruction_AGRI_QPE.pdf

游然,寿亦萱,李博,等.2023.定量降水估计产品特性卡[EB/OL]. 国家卫星气象中心. You R, Shou Y X, Li B, et al. 2023. Characteristic card of Quantitative precipitation estimation product [EB/OL]. National Satellite Meteorological Centre (in Chinese). https://img.nsmc.org.cn/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/DataFormat/FY4A/Data/Format

翟建华,张娘,陆其峰,等.2019.基于 ERA5 的快速辐射传输模式与 FY-4A 成像仪观测结果的偏差分析[J].气象学报,77(5):911−922. Zhai J H, Zhang L, Lu Q F, et al. 2019. Characterization of bias in FY-4A advanced geostationary radiation imager observations from ERA5 background simulations using RTTOV [J]. Acta Meteorologica Sinica,77(5):911−922 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.049

张志清,陆风,方翔,等.2017. FY-4 卫星应用和发展[J].上海航天,34(4):8−19. Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al. 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite [J]. Aerospace Shanghai,34(4):8−19 (in Chinese). doi:10.19328/j.cnki.1006−1630.2017.04.002

钟宇璐.2021.风云四号卫星定量降水估计产品的检验评估. 农业灾害研究[J].农业灾害研究,11(3):96−98. Zhong Y L. 2021. Evaluation and verification of FY-4A satellite quantitative precipitation estimation product [J]. Journal of Agricultural Catastropholgy,11(3):96−98 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−3305.2021.03.041

庄薇,刘黎平,王改利,等.2013.青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究[J].高原气象,32(5):1224−1235. Zhuang W, Liu L P, Wang G L, et al. 2013. Radar-derived quantitative precipitation estimation in complex terrain area in Qinghai-Xizang plateau [J]. Plateau Meteorology,32(5):1224−1235 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00118

Huang Y, Bao Y S, Petropoulos, et al. 2024. Precipitation Estimation Using FY-4B/AGRI Satellite Data Based on Random Forest [J]. Remote Sensing,16:1267. doi:10.3390/rs16071267

Li X Y, Yang Y J, Mi J Q, et al. 2021. Leveraging machine learning for quantitative precipitation estimation from Fengyun-4 geostationary observations and ground meteorological measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques,14:7007−7023. doi:10.5194/amt−14−7007−2021

Ren J, Xu G R, Zhang W G, et al. 2021. Evaluation and improvement of FY-4A AGRI quantitative precipitation estimation for summer precipitation over complex topography of western China [J]. Remote Sensing,13:4366. doi:10.3390/rs13214366

Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. Journal of Hydrometeorology, 8(3):607−626. doi:10.1175/JHM583.1

Zhu S Y, Ma Z Q. 2022. PECA-FY4A: Precipitation Estimation using Chromatographic Analysis methodology for full-disc multispectral observations from FengYun-4A/AGRI [J]. Remote Sensing of Environment,282:113234. doi:10.1016/j.rse.2022.113234

(责任编辑 唐永兰)