

FY-4B 卫星日降水产品在云南省适用性评估及对比分析

方晓斌¹ 段玮²

1. 云南省楚雄州气象局, 楚雄 675000

2. 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

提 要: 基于云南 126 个国家级气象观测站 2023 年 6 月至 2025 年 6 月逐日降水资料, 采用相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、相对偏差(RB)、命中率(POD)、空报率(FAR)以及临界成功指数(CSI), 评估风云四号 B 星(FY-4B)定量降水估测(QPE)日降水产品在云南省的适用性, 并与全球降水观测计划多卫星集成反演算法(Global Precipitation Measurement Integrated Multi-Satellite Retrievals, GPM IMERG)和气候灾害组融合站点的红外降水(climate hazards group infrared precipitation with station data, CHIRPS)产品对比。结果表明: FY-4B QPE 降水检测能力优于 GPM IMERG 和 CHIRPS, CSI 最高(0.44), FAR 最低(0.44), 但降水存在一定的低估(RB=-0.15); 相比之下, GPM IMERG 的 FAR 最高(0.53), CHIRPS 的 POD 偏低(0.41)。FY-4B QPE 在云南省呈西南高东低分布, 西南部和南部降水检测能力强于中东部, 西南部和南部约占全省面积的 31%, 其平均 CSI 较中东部高 0.14。500~1000 m 海拔为 FY-4B QPE 最佳适用区域。FY-4B QPE 在小雨时表现最优, 强降水时存在明显低估。FY-4B QPE 对季节变化敏感, 夏季检测能力强但易低估, 冬季整体精度有所下降。此评估结果可为 FY-4B QPE 在云南省复杂地形区降水监测科研业务应用提供科学参考。

关键词: 降水, FY-4B, GPM (Global Precipitation Measurement), CHIRPS (climate hazards group infrared precipitation with station data), 卫星资料

中图分类号: P414.4

文献标识码: A

DOI:

Applicability Evaluation and Comparative Analysis of FY-4B Satellite Daily Precipitation Products in Yunnan Province

FANG Xiaobin¹ DUAN Wei²

1. Chuxiong Prefecture Meteorological Office of Yunnan Province, Chuxiong 675000

2. Yunnan Institute of Meteorological Sciences, Kunming 650034

Abstract: Based on daily precipitation data from 126 national meteorological stations in Yunnan Province from June 2023 to June 2025, this article evaluates the applicability of FY-4B quantitative precipitation estimation (QPE) daily precipitation products in Yunnan Province using the correlation coefficient (CC), root mean square error (RMSE), relative bias (RB), probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), and critical success index

资助项目: 国家自然科学基金项目(42365001、42430607)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2026J116、CXFZ2025J130)和云南省气象局科研项目(YZ202655)共同资助

作者简介: 方晓斌, 主要从事卫星遥感应用及气象数据分析处理研究. E-mail: 8955328@qq.com

通讯作者: 段玮, 主要从事山地气象学与灾害研究. E-mail: duanwain@foxmail.com

(CSI). Moreover, it compares FY-4B QPE with the products of Global Precipitation Measurement Integrated Multi-Satellite Retrievals (GPM IMERG) and climate hazards group infrared precipitation with station data (CHIRPS). The results show that the precipitation detection capability of FY-4B QPE is higher than that of GPM IMERG and CHIRPS. FY-4B QPE has the highest CSI (0.44) and the lowest FAR (0.44). However, it exhibits a certain degree of underestimation for precipitation ($RB=-0.15$). In comparison, GPM IMERG has the highest FAR (0.53), and CHIRPS obtains a relatively low POD (0.41). FY-4B QPE presents a distribution pattern of precipitation detection capability higher in the southwest than in the east of Yunnan Province. Its precipitation detection capability in the southwestern and southern parts of Yunnan is superior to that in the central and eastern regions. The southwestern and southern Yunnan covers approximately 31% of the whole province area, but the average CSI of FY-4B QPE is 0.14 higher than that for the central and eastern regions. The 500-1,000 m elevation range is the optimal application area of FY-4B QPE. FY-4B QPE performs the best in light rain, but tends to underestimate heavy precipitation obviously. FY-4B QPE is sensitive to the changes in seasons. It has strong detection capability in summer, but is prone to underestimating precipitation. In winter, however, its overall detection accuracy for precipitation decreases somewhat. These evaluation results can provide a scientific reference for the research and operational applications of FY-4B QPE in precipitation monitoring in complex terrain areas of Yunnan Province.

Key words: precipitation, FY-4B, GPM (Global Precipitation Measurement), CHIRPS (climate hazards group infrared precipitation with station data), satellite data

引言

降水是水循环的关键组成部分之一，降水观测的准确性，对气象和水资源的管理与灾害防御等产生重要影响（Levizzani and Cattani, 2019; 徐柳昕等, 2025）。地面雨量站是最传统的观测手段，但受地理环境制约，在高海拔山区和偏远地区布设不足，难以提供高空间分辨率的降水信息（Shaghaghian and Ghadampour, 2024）。随着卫星遥感技术的发展，大范围、连续的降水监测变为可能（Levizzani and Cattani, 2019）。

FY-4B 于 2021 年 6 月在西昌卫星发射中心成功发射（鲁文强等, 2022），观测资料已应用于数值预报、灾害预警和气象监测等研究中（李秀举等, 2023; 金子琪等, 2024）。针对风云系列 FY-2 和 FY-4A 等卫星降水产品，已有丰富的评估研究。已有研究表明，FY-2 和 FY-4A 降水产品具有一定的估测能力，但其精度存在明显的区域性和降水强度差异（晏良锐等, 2024; 李季等, 2024; 褚萌和吴薇, 2025; 沈哲辉等, 2025）。作为我国新一代静止气象卫星，FY-4B 降水产品的性能及区域适用性仍有待进一步研究。随着 FY-4A 降水产品的停止下发，开展 FY-4B 定量降水估测（QPE）产品评估，具有突出的科研价值和现实业务意义。目前，云南尚未开展相应评估工作。

全球降水观测计划多卫星集成反演算法（Global Precipitation Measurement Integrated Multi-Satellite Retrievals, GPM IMERG）降水产品在国内外已有较多评估研究。国内对中国大陆及华北、江苏、广西、西江流域、四川、西南、横断山区和云南等区域的研究表明，IMERG 产品精度受时间尺度、降水强度、地形及区域气候条件等因素影响，具有明显的区域差异（赵平伟等, 2021; 施丽娟等, 2022; 孙桂凯等, 2022;

杨晓瑞等, 2023; Weng et al, 2023; 李季等, 2024; 张寒博等, 2024; 陈双等, 2025; 丁彦文等, 2025; 段崎燕等, 2025)。国外针对土耳其、埃塞俄比亚和欧洲等地区的研究显示, IMERG 产品的降水估测性能受区域气候、时间尺度及降水特征等因素影响, 同样具有明显的区域差异 (Navarro et al, 2019; Hordofa et al, 2021; Aksu et al, 2023)。相比而言, 专门针对云南省的 GPM IMERG 降水产品评估研究仍相对有限, 对复杂地形和区域气候条件下产品精度及误差特征仍需进一步研究。

气候灾害组融合站点的红外降水 (climate hazards group infrared precipitation with station data, CHIRPS) 降水产品提供 1981 年至今的长时间序列数据。国外, 在菲律宾、哥伦比亚和埃塞俄比亚等地区的研究表明, CHIRPS 产品在不同区域的降水估测性能存在差异 (Alejo and Alejandro, 2021; Hordofa et al, 2021; Arregocés et al, 2023)。国内, 李世禧等 (2024) 发现 CHIRPS 对海南岛极端降水事件的探测能力相对有限; Wu et al (2019) 对云南省 CHIRPS 月降水产品开展评估, 指出基于 CHIRPS 计算的 SPI 与地面观测结果的相关性较高, 可以有效捕捉历史干旱事件, 但未涉及云南省 CHIRPS 日降水产品的验证。

云南省山脉纵横, 峡谷深切, 海拔落差大, 降水时空分布极不均匀。受限于复杂地形, 高海拔地区地面观测网络稀疏, 增加了区域降水监测的难度。不同卫星降水产品反演机制各异, 在复杂地形条件下适用性也存在差异。云南独特的垂直地带与季风气候的交互作用使卫星降水产品的区域适用性检验尤为必要。综上所述, FY-4B QPE 降水产品在云南的适用性仍缺乏系统检验。GPM IMERG 和 CHIRPS 系国际主流卫星降水产品, 其在云南地区的日尺度精度仍有待进一步评估。本研究以 FY-4B QPE 降水产品为主, 并与 GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品进行对比分析, 以评估三种降水产品在云南省复杂地形和气候条件下的适用性与精度差异。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

云南省地势呈现西北高、东南低分布 (图 1)。自北向南呈阶梯状递减, 北部为青藏高原南延部分, 海拔多在 3000~4000 m; 中南部为横断山脉和边境低海拔区, 海拔从 3000 m 逐渐降至 500 m 以下。全省属典型山地高原地形, 山地面积占 88.6%, 平原、丘陵、台地也有所分布。境内海拔差异明显, 高度差超过 6000 m。本文地图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作, 底图无修改。

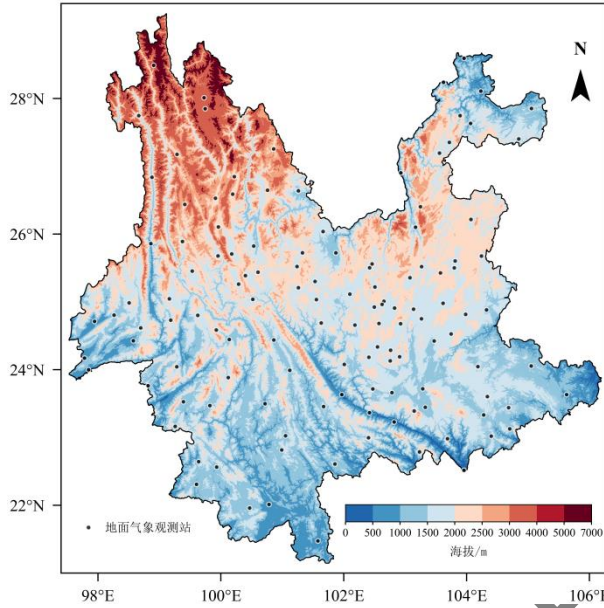


图 1 云南省地形及地面气象观测站分布

Fig. 1 Topography and distribution of meteorological observation stations in Yunnan Province

1.2 数据

研究数据时间范围为 2023 年 6 月至 2025 年 6 月，包括地面气象观测数据和 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品。

1.2.1 地面气象观测数据

以云南省 126 个国家级地面气象观测站（图 1）24 h 降水数据作为参照标准进行评价，站点降水量及经纬度、海拔数据均来源于天擎平台。

1.2.2 FY-4B QPE 降水产品

FY-4B QPE 降水产品空间分辨率为 4 km，时间分辨率包括 15 min、1 h、3 h、6 h 和 24 h（游然，2024）。本研究采用 24 h 降水产品，数据来源于风云卫星遥感数据服务网（<http://satellite.nsmc.org.cn/>）。

1.2.3 GPM IMERG 降水产品

本研究采用 IMERG Final Run V07 版 Level 3 降水产品，空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ （约 10 km），时间分辨率为 30 min（Huffman et al, 2023），数据从 Google Earth Engine（GEE）平台获取。

1.2.4 CHIRPS 降水产品

CHIRPS 降水产品空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ （约 5.5 km），时间分辨率有日、五日和月三种尺度。本研究使用 CHIRPS 日降水产品，数据来源于 GEE 平台。

2 研究方法

2.1 数据预处理

在空间上,采用目前主流的最近邻法将 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 等不同分辨率降水数据提取到地面观测站点坐标。最近邻法选取离站点最近的网格点数值,不进行空间加权插值。FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 与 126 个站的平均距离分别为 1.42、4.04 和 2.17 km,最大距离分别为 2.46、7.09 和 3.75 km,均在各产品分辨率范围内,不存在距离过远问题(图 2)。经统计,最近邻法提取后三种网格(4 km/10 km/5.5 km)在 126 站的日降水均值差异 <0.3 mm,可忽略分辨率引入的抽样误差。

在时间尺度上,采用 FY-4B QPE 24 h 产品时段(00:00 至次日 00:00,世界时,下同)作为统一标准,对各类降水数据进行了时间匹配与整合,以保证日数据的时间一致。GPM IMERG 使用 30 min 数据,在 00:00 至次日 00:00 将 48 个半小时降水率(单位: mm h^{-1})乘以 0.5 h 后累加获得日降水量。天擎平台提供地面观测站降水数据,将 00:00 至次日 00:00 的逐小时降水量累加得到日降水量,用于验证分析。

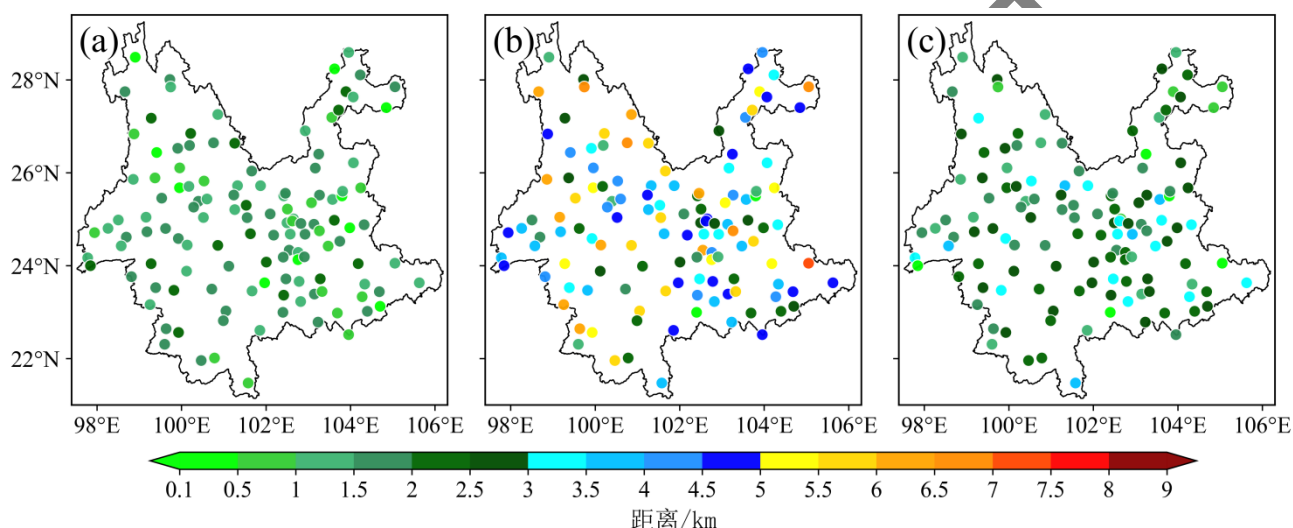


图 2 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 (a) FY-4B QPE, (b) GPM IMERG 和 (c) CHIRPS 降水产品格点与站点距离的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of distances between grid points and stations for (a) FY-4B QPE, (b) GPM IMERG and (c) CHIRPS precipitation products in Yunnan Province from June 2023 to June 2025

为保证三种降水产品在同一时间窗口下比较,本研究以 FY-4B QPE 的可用时段为基准。FY-4B 卫星在 2024 年 2 月 1 日至 3 月 5 日进行轨道调整(由 133 E 漂移至 105 E,完成与 FY-4A 的交接),期间 FY-4B QPE 产品缺测。此外,2024 年 9 月 19—21 日未下发数据,导致这期间的 FY-4B QPE 数据缺失。统计时将以上两个缺测时段的 GPM IMERG 和 CHIRPS 数据剔除,确保三种降水产品的样本数相等。

2.2 评估指标

本研究采用多个统计评估指标对 FY-4B、GPM 和 CHIRPS 三种降水产品在云南省的精度进行定量对比分析,包括相关系数(correlation coefficient, CC)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、相对偏差(relative bias, RB)、命中率(probability of detection, POD)、空报率(false alarm ratio, FAR)以

及临界成功指数（critical success index，CSI）。

3 结果与分析

3.1 总体性能评估

图 3 展示了 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品在云南省总体指标散点图。从 1:1 线可见，三种降水产品在中到大雨级别均出现不同程度的偏离，散点离散度明显增大，表明对较强降水的刻画存在一定不稳定性。从回归线看，GPM IMERG 与地面观测最为接近，FY-4B QPE 次之，CHIRPS 偏离最大；同时回归线整体位于 1:1 线下方，显示三种降水产品在中雨以上级别降水普遍存在低估。CC 显示，GPM IMERG 最高（0.67），FY-4B QPE 居中（0.51），CHIRPS 最低（0.46）。RMSE 显示，FY-4B QPE 为 8.45 mm，低于 CHIRPS（8.84 mm），但高于 GPM IMERG（6.82 mm）。从 RB 看，FY-4B QPE 存在一定低估（-0.15），CHIRPS 偏差最小（0.05），GPM IMERG 稍高估（0.09）。降水事件检测能力上，FY-4B QPE 的 CSI 为 0.44，高于 GPM IMERG（0.43）和 CHIRPS（0.28）；FY-4B QPE 的 FAR 为 0.44，低于 CHIRPS（0.52）和 GPM IMERG（0.53）；FY-4B QPE 的 POD 为 0.67，介于 GPM IMERG（0.85）和 CHIRPS（0.41）之间。采用 bootstrap 方法（ $n=1000$ ）计算各评估指标的 ± 0.05 显著性水平检验区间（confidence interval，CI），以检验各产品性能的稳定性，结果见表 1。

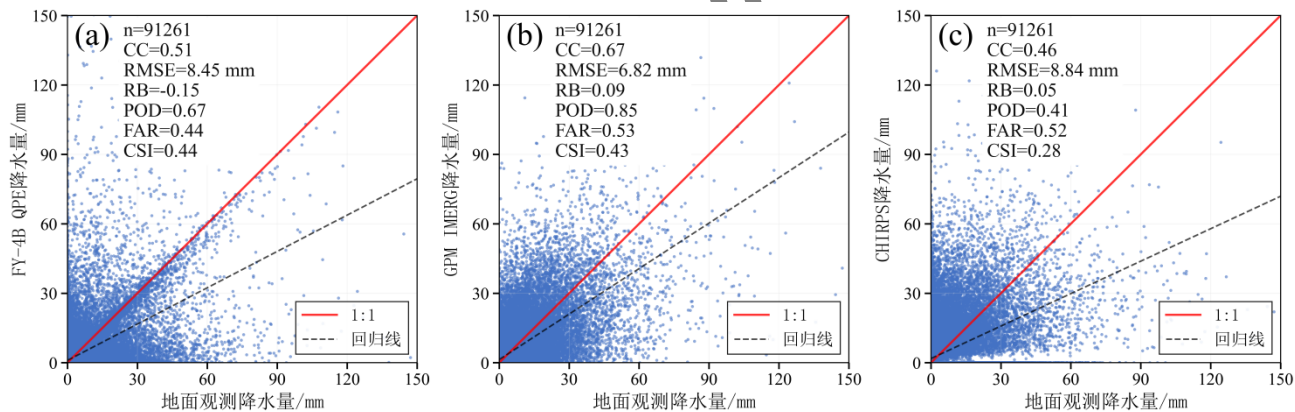


图 3 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省（a）FY-4B QPE，（b）GPM IMERG 和（c）CHIRPS 降水产品总体性能散点图

Fig. 3 Scatter plots of the overall performance of (a) FY-4B QPE, (b) GPM IMERG and (c) CHIRPS precipitation products in

Yunnan Province from June 2023 to June 2025

表 1 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品性能指标 ± 0.05 显著性水平检验区间

Table 1 Significance test intervals at the ± 0.05 level for performance metrics of FY-4B QPE, GPM IMERG and CHIRPS precipitation products in Yunnan Province from June 2023 to June 2025

产品	CC	RMSE/mm	RB	POD	FAR	CSI
FY-4B QPE	[0.497, 0.527]	[8.214, 8.680]	[-0.168, -0.134]	[0.664, 0.673]	[0.436, 0.446]	[0.433, 0.442]
GPM IMERG	[0.660, 0.679]	[6.694, 6.950]	[0.080, 0.110]	[0.845, 0.853]	[0.527, 0.534]	[0.429, 0.437]
CHIRPS	[0.450, 0.473]	[8.690, 8.967]	[0.033, 0.070]	[0.404, 0.414]	[0.518, 0.530]	[0.278, 0.286]

综上所述，三种降水产品在云南省各有优势和不足。GPM IMERG 的 CC 最高但 FAR 偏高，CHIRPS 的 RB 较小但检测能力偏弱，FY-4B QPE 则在定量精度和检测能力之间实现了较好平衡。就云南降水监测业务需求而言，FY-4B QPE 在降水检测可靠性方面的优势使其更具应用价值。

3.2 空间分布

3.2.1 年降水量空间分布对比

从云南省 2024 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的降水量空间分布（图 4）可见，不同的降水产品在降水总量的估算有所不同。地面观测站数据（图 4a）显示，全省 2024 年平均降水量为 985 mm，呈现“南部偏多、中部与西部相对较少”的总体空间分布特点；超过 1000 mm 的降水主要分布于南部地区。FY-4B QPE 的 2024 年平均降水量为 838 mm（图 4b），较地面观测低估约 15%，其空间分布结构与观测数据基本相符，但降水量整体偏低。GPM IMERG 的 2024 年平均降水量达到 1112 mm（图 4c），相对观测高估约 13%，其中东南部区域的高估最为明显。CHIRPS 的 2024 年平均降水量为 1072 mm（图 4d），较观测高估约 9%，空间分布与地面观测最为接近。

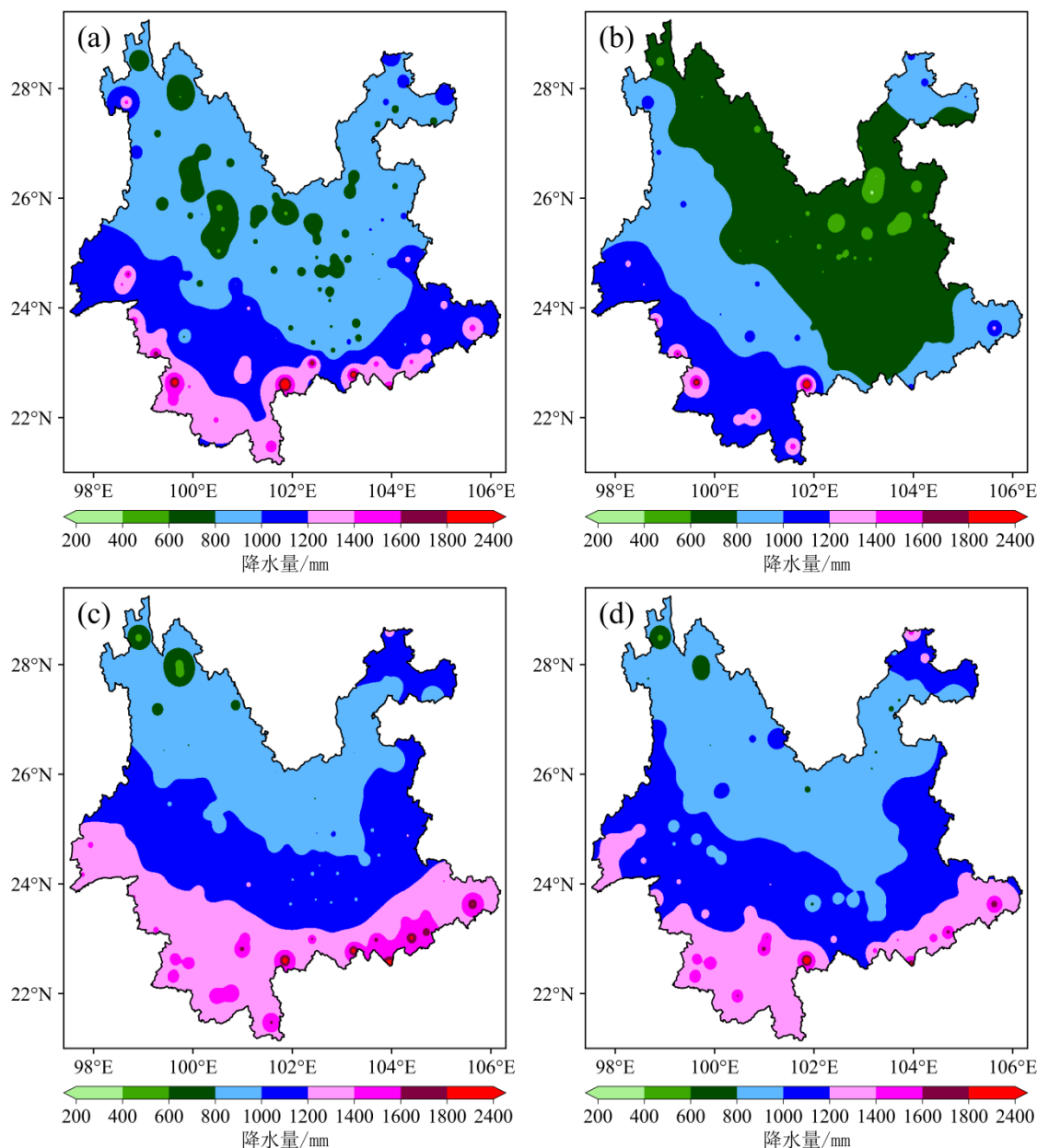


图 4 2024 年云南省 (a) 地面观测站, (b) FY-4B QPE, (c) GPM IMERG 和 (d) CHIRPS

降水量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation in Yunnan Province in 2024 from (a) surface observation stations, (b) FY-4B QPE, (c) GPM IMERG and (d) CHIRPS

3.2.2 日降水量空间分布对比

由图 5 可见, 三种降水产品在云南省存在不同的空间分布特征。FY-4B QPE 区域性差异明显, 整体呈南优东劣的分布特征; GPM IMERG 空间差异较大, 各区域表现有所不同; CHIRPS 空间分布相对均匀, 但整体精度偏低。为进一步分析不同区域的产品性能, 结合云南省地形和降水特征, 对西南部、东南部、中部和西北部 4 个区域进行对比分析。

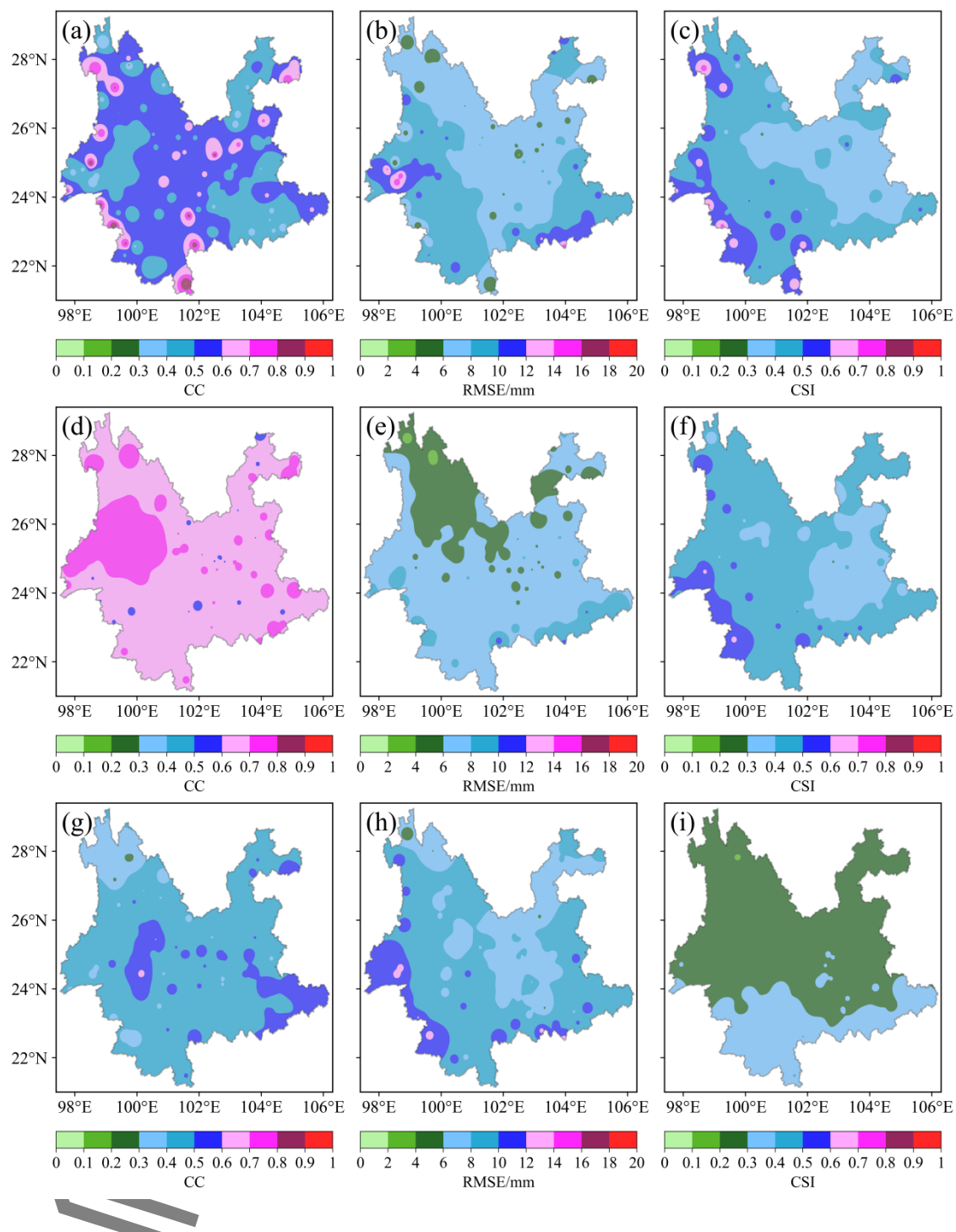


图 5 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 (a~c) FY-4B QPE, (d~f) GPM IMERG 和 (g~i) CHIRPS 降水产品性能的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the performance of (a-c) FY-4B QPE, (d-f) GPM IMERG and (g-i) CHIRPS precipitation products in Yunnan Province from June 2023 to June 2025

3.2.2.1 西南部降水充沛区

FY-4B QPE 在西南部地区精度最高, 该区域年降水量超过 1000 mm, 对流活跃, 红外云顶温度信号明

显。GPM IMERG 的 CC 最高 (0.64)，但稍高估 (RB = 0.1)。CHIRPS 的偏差控制最好 (RB=0.0)，但 CSI 仅为 0.30，POD 为 0.39，其日尺度分辨率对快速变化的对流降水刻画能力有限。FY-4B QPE 的 15 min 时间分辨率与对流降水快速演变特征匹配度最好，适用于实时监测；GPM IMERG 的 CC 虽然高，但需要订正偏差；而 CHIRPS 更适合气候尺度分析。

3.2.2.2 东南部地形过渡带

东南部复杂地形与较强的降水时空梯度共同作用，使不同降水产品对局地降水特征的刻画能力存在差异。FY-4B QPE 的 CC 降至 0.47，RMSE 为 10.1 mm 高于其他区域，CSI 为 0.41。GPM IMERG 的 CC 为 0.68，RMSE 在三种降水产品中最小 (8.5 mm)，但 RMSE 在该产品各区域中最大，可能是微波散射信号受地表反射和植被覆盖影响，导致算法判别能力下降。CHIRPS 表现相对稳定 (CC=0.53, RMSE=9.4 mm)，可能是由地面观测数据的约束作用所致。GPM IMERG 因融合微波与地面雨量计订正表现相对较好，FY-4B QPE 的 4 km 空间分辨率难以刻画小尺度地形的降水变化。实际应用中可参考 GPM IMERG 的降水估测结果，并结合 FY-4B QPE 较高的时空分辨率开展局地降水监测。

3.2.2.3 中部弱降水区

中部地区降水量相对较少，三种降水产品表现差异较大。FY-4B QPE 的 CC 为 0.56，CSI 仅为 0.39，说明红外方法对弱降水的识别有局限。GPM IMERG 的 POD 为 0.87，但 FAR 为 0.59，是所有区域中最高。CHIRPS 的 CC 为 0.46，CSI 仅为 0.27，可能与该区域地面站点对降水空间分布的约束不足有关。GPM IMERG 检测能力较强但 FAR 也较高，FY-4B QPE 相对保守，CHIRPS 检测能力较弱。需要高检测率的业务应用可选择 GPM IMERG，常规监测建议使用 FY-4B QPE。

3.2.2.4 西北部高海拔区

西北部高海拔区观测站点稀疏，FY-4B QPE 的 CC 为 0.51，RMSE 为 6.1 mm，CSI 为 0.46。GPM IMERG 的 CC 为 0.67，RMSE 为所有区域最低 (5.0 mm)，RB 为 -0.1，CSI 为 0.44。CHIRPS 的 CC (0.36) 和 CSI (0.24) 为各区域中最低，表现出了站点稀疏条件下插值方法的局限性。GPM IMERG 在 CC 与 RMSE 方面表现最好，FY-4B QPE 降水检测能力相对较强，而 CHIRPS 精度最低。

基于以上对比结果，在选择产品时可结合研究区地形和降水类型。FY-4B QPE 适用于西南部对流降水的实时监测，GPM IMERG 可作为西北部山区的观测补充，而 CHIRPS 适用于区域气候长期分析。

3.3 不同海拔区间的性能分析

结合云南省海拔变化特点将研究区划分为 6 个海拔区间 (0~500 m, 500~1000 m, 1000~1500 m, 1500~2000 m, 2000~3000 m, ≥ 3000 m)，区间边界按左闭右开原则处理，并分别对三种降水产品在不同海拔的性能进行对比 (图 6)，地面观测站海拔分布见图 1。CC (图 6a)，FY-4B QPE 呈 M 形分布，

GPM IMERG 在各区间波动不大, CHIRPS 随海拔的升高而降低。FY-4B QPE 在 500~1000 m 和 2000~3000 m 出现两个峰值, 对应不同类型的降水系统, ≥ 3000 m 低谷区处于中云层高度范围 (2000~6000 m), 揭示出云层垂直结构对红外反演性能的制约。张淼等 (2024) 从云顶高度角度得出了类似结论, 证实 FY-4B 对不同高度云层的识别能力存在系统性差异。RMSE (图 6b), 三种降水产品均呈现随海拔升高而递减的趋势, 0~500 m 区间误差最大, ≥ 3000 m 误差最小。RB (图 6c), FY-4B QPE 所有区间均低估, 与 GPM IMERG 都随海拔升高而 RB 降低; GPM IMERG 和 CHIRPS 随海拔的增加由高估转为低估。POD (图 6d), 三种降水产品均呈现相似的倒 V 形分布, GPM IMERG 表现最好。FAR (图 6e), FY-4B QPE 整体最低, 呈倒 V 形分布, GPM IMERG 和 CHIRPS 为 M 形分布。CSI (图 6f), FY-4B QPE 最佳, GPM IMERG 次之, CHIRPS 相对较弱, 其中 FY-4B QPE 在 500~1000 m 性能最好。

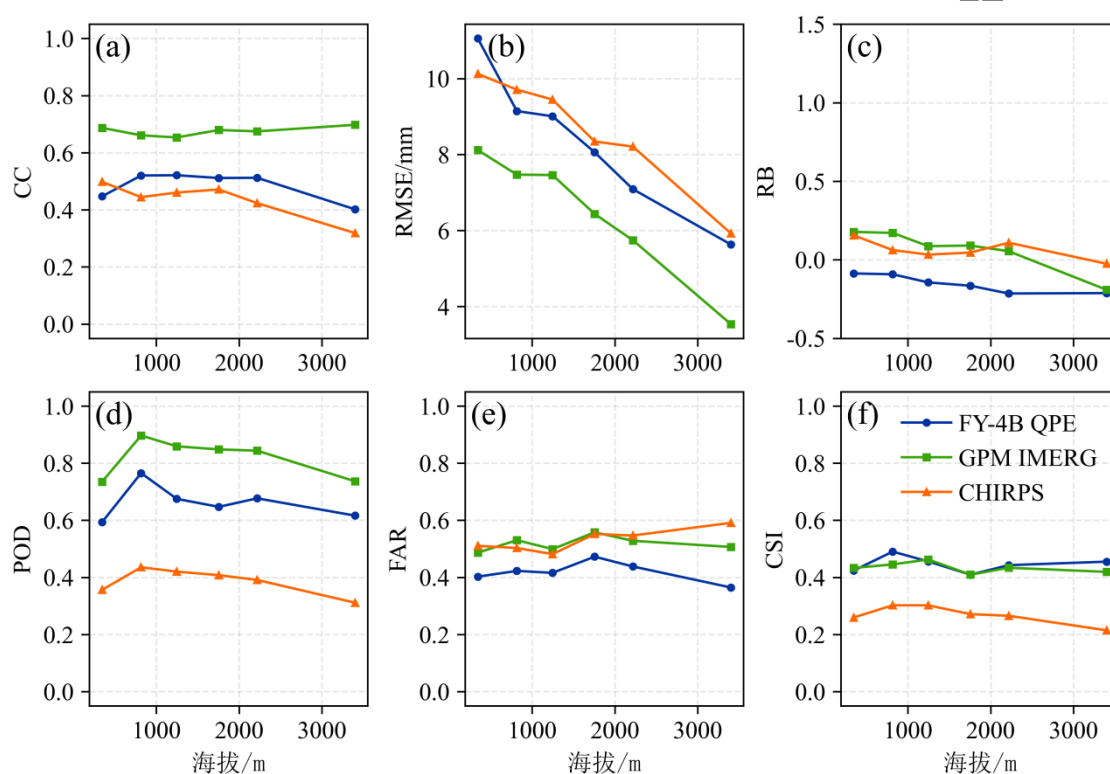


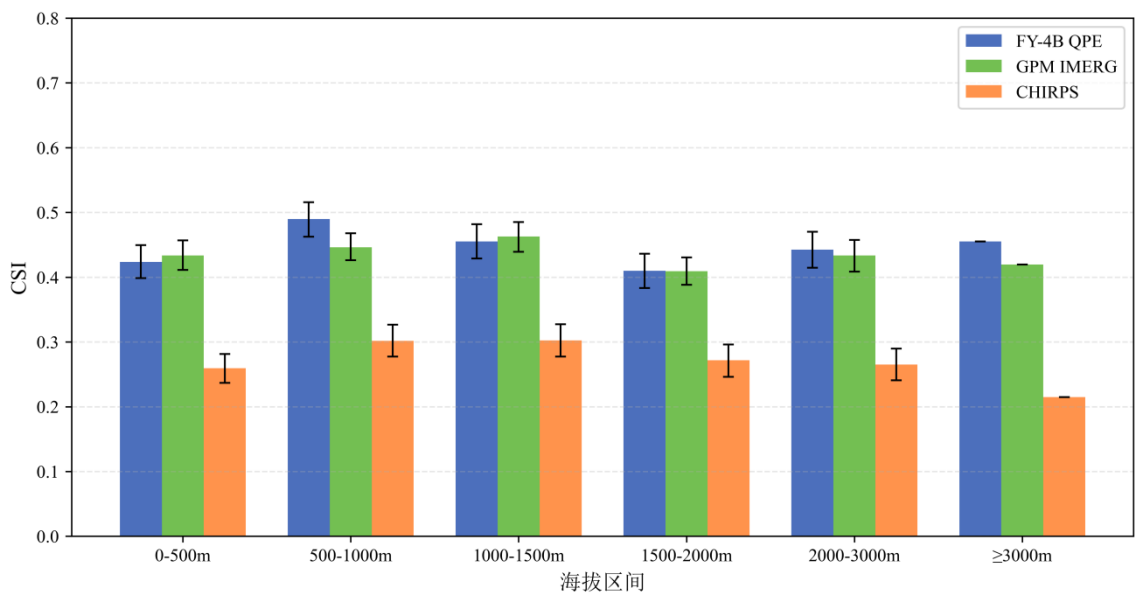
图 6 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品不同海拔性能对比

Fig. 6 Comparison of the performance of FY-4B QPE, GPM IMERG and CHIRPS precipitation products at different elevations in

Yunnan Province from June 2023 to June 2025

以上结果表明, FY-4B QPE 性能在云南省存在海拔差异, 500~1000 m 区间的适用性最好, CC、POD、CSI 均最高, 说明在该区间具有最优的估测性能。依据 bootstrap 重采样的统计检验, FY-4B QPE 在 500~1000 m 的 CSI 显著高于其他区间, FAR 显著低于 GPM IMERG 和 CHIRPS ($p < 0.0001$)。由于 500~1000 m 区间站点仅占全部样本的约 10%, 为减小样本量差异带来的影响, 采用 bootstrap ($n=1000$) 方法对不同

海拔区间 CSI 进行样本数均衡化处理（图 7）。均衡后，在样本量相等的条件下，FY-4B QPE 在 500~1000 m 的 CSI 值仍处于各区间的较高水平，且 ± 0.05 显著水平检验区间未与其他重叠，进一步验证了该区间的适用性最优结论。这一特征可能与该海拔带地形起伏较小、云系结构稳定、降水系统发展平稳等环境背景有关，以上有利于 FY-4B 卫星对降水过程进行持续且稳定的探测与反演，从而提升其在该区间的适用性。



注：计算时样本数做均衡化处理。

图 7 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品不同海拔区间经 bootstrap 重采样的

CSI

Fig. 7 Bootstrap resampling validation results of the CSI for FY-4B QPE, GPM IMERG and CHIRPS precipitation products across different elevation ranges in Yunnan Province from June 2023 to June 2025

3.4 降水强度对比

本研究从小雨（0.1~9.9 mm）、中雨（10~24.9 mm）、大雨（25~49.9 mm）和暴雨以上（ ≥ 50 mm）4 个降水强度，对三种降水产品在云南省不同降水强度的性能进行对比（图 8），表 2 显示了云南省 2023 年 6 月至 2025 年 6 月各数据源有效降水（ ≥ 0.1 mm）强度等级占比统计。

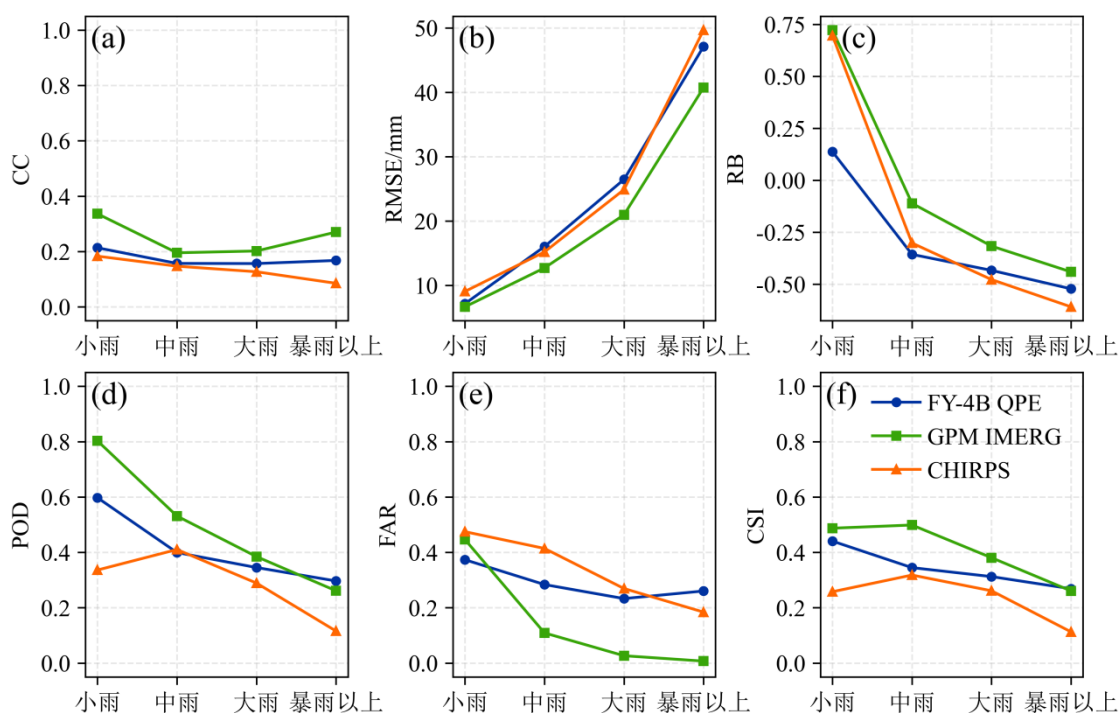


图 8 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品不同降水强度性能对比

Fig. 8 Comparison of the performance of FY-4B QPE, GPM IMERG and CHIRPS precipitation products under different precipitation intensities in Yunnan Province from June 2023 to June 2025

表 2 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省各数据源有效降水 (≥ 0.1 mm) 的不同降水强度等级占比 (单位: %)

Table 2 Proportions of different precipitation intensity grades for effective precipitation (≥ 0.1 mm) from various data sources in Yunnan Province from June 2023 to June 2025 (Unit: %)

数据源	小雨	中雨	大雨	暴雨以上
地面观测站	27.27	6.30	2.50	0.56
FY-4B QPE	27.59	5.18	1.91	0.60
GPM IMERG	39.92	7.25	2.60	0.52
CHIRPS	12.63	7.89	2.97	0.50

注: 表中仅列出 ≥ 0.1 mm 的有效降水日数占总日数的比例, 其余为无有效降水。

CC 分析显示, 三种降水产品都在小雨强度表现最好, FY-4B QPE 和 GPM IMERG 均呈现一个小 U 形特征, 而 CHIRPS 随着降水强度增加一直下降。分析 CC 下降的可能原因: (1) 强降水局地性强, 卫星像元分辨率与站点观测空间代表性差异增大; (2) 强降水样本量小, 表 2 地面观测站暴雨以上仅占 0.56%, 影响统计稳定性; (3) 各产品系统性偏差随降水强度变化, 表 2 中 GPM IMERG 小雨占比 (39.92%) 为地面观测值 (27.27%) 的约 1.5 倍, CHIRPS 小雨占比 (12.63%) 仅为地面观测值的 46%, 削弱了估算值和观测值之间的线性相关关系。为验证 CHIRPS 小雨占比偏低的成因, 计算了 CHIRPS 在 0.1 mm 阈值下

对小雨的检测率。结果显示，25 586 个观测小雨样本中 CHIRPS 检测到 8600 个，POD 为 0.336，漏报 16986 个，FAR 为 0.664。这显示出 CHIRPS 小雨占比低于地面观测值主要是系统性漏报，并非数据处理过程中的质量控制过滤所导致。FY-4B QPE 和 GPM IMERG 在中雨-大雨时 CC 最低，可能与中等强度降水时云顶亮温与地面降水的对应关系不确定性较大有关，而在暴雨以上的回升与深对流系统的强信号特征有关，极低云顶亮温等特征有助于识别强降水的空间分布。随着降水强度的增加，CHIRPS 的 CC 一直下降，说明其在不同降水强度识别能力方面的不足。三种降水产品的 RMSE 均随降水强度增加而升高，小雨时最小，暴雨以上最大。三种降水产品 RB 都随降水强度增加而降低，并由高估转为低估；在小雨时 GPM IMERG 和 CHIRPS 显著高估 ($p < 0.001$)。FY-4B QPE 和 GPM IMERG 的 POD 都随降水强度的增加而降低，小雨时表现最好；CHIRPS 随降水强度的增加先上升再下降，中雨时表现最好。GPM IMERG 和 CHIRPS 的 FAR 随降水强度增强而降低，FY-4B QPE 呈现一个小 V 形特征。随降水强度的增加，FY-4B QPE 的 CSI 呈下降趋势，而 GPM IMERG 和 CHIRPS 表现为先升高再下降。以上分析表明，FY-4B QPE 在小雨检测方面表现最佳，除 FAR 外各指标均优于其他产品。

需说明的是，各降水强度的 CC 均低于其总体值，中雨-大雨 CC 下降最为明显。这样的结果一部分是因为统计学里的范围限制效应 (Sackett and Yang, 2000)，即当数据分析被限定在比较窄的取值范围内时，变量的方差会减小，使得 CC 降低。不过更为关键的是，微波信号在穿透厚重云层时衰减严重，深对流云顶的冰晶会产生散射作用，这使得降水信号的识别变得困难。强降水系统自身空间分布不均以及快速演变的特性也加剧了估测的难度。

3.5 季节变化

图 9 对比了三种降水产品在云南省的季节性能。FY-4B QPE 的 CC 季节差异最为突出，春季最佳（中位数约 0.63），冬季急剧下降且离散度增大；GPM IMERG 四季中位数稳定在 0.6~0.8，冬季出现部分低值异常点；CHIRPS 整体偏弱，四季中位数约在 0.14~0.47 波动。三种降水产品的 RMSE 均呈夏高冬低特征：夏季中位数 CHIRPS 最大（约 11.7 mm）、GPM IMERG 最小（约 9.9 mm），FY-4B QPE 居中（约 10.4 mm）；冬季各产品中位数均低于 3 mm，GPM IMERG 最小。FY-4B QPE 的 RB 夏、冬季低估，冬季尤为突出（中位数约为 -0.54），春、秋季小幅偏高；GPM IMERG 各季节均高估，中位数约在 0.04~0.17，秋季高估最多；CHIRPS 除冬季轻微低估外，其余季节均高估，四季中位数变幅控制在 ± 0.2 以内。CSI 各产品均以夏季最优，FY-4B QPE 与 GPM IMERG 中位数均约为 0.5；冬季降至最低，CHIRPS 仅约为 0.08，FY-4B QPE 异常值明显增多，反映站点间性能差异的扩大。从各指标普遍存在的异常值可提示，除关注产品算法的季节适应性之外，地形条件对卫星降水估计精度的影响同样不可忽视。

季节性评估得出的结果显示，FY-4B QPE 在云南省呈现出明显的季节适应性差异，相较于 GPM IMERG

的稳定性以及 CHIRPS 较小的波动情况，FY-4B QPE 在春季与夏季有较好的检测能力，在冬季其性能却出现了较为突出的下降，这种特征和云南省季节性降水分布以及对流活动强度之间存在着紧密联系，体现出 FY-4B QPE 对本地季节气候特征具有敏感性。

本研究中不同季节的降水样本量差异较大。FY-4B QPE 在夏季样本量最多 14 668 个（45.6%），春季和秋季分别为 8449 个（26.2%）和 7572 个（23.5%），冬季最少，仅 1500 个（4.7%）。GPM IMERG 和 CHIRPS 产品的季节分布特征与此类似。冬季样本量较少导致统计指标的不确定性增大，这也解释了图 9 中冬季各项指标箱线图出现较多异常值的原因。因此，冬季降水产品的评估结果需结合样本特征谨慎解读。延长观测时段可增加冬季样本量，获得可靠性更高的季节性能评估结论。

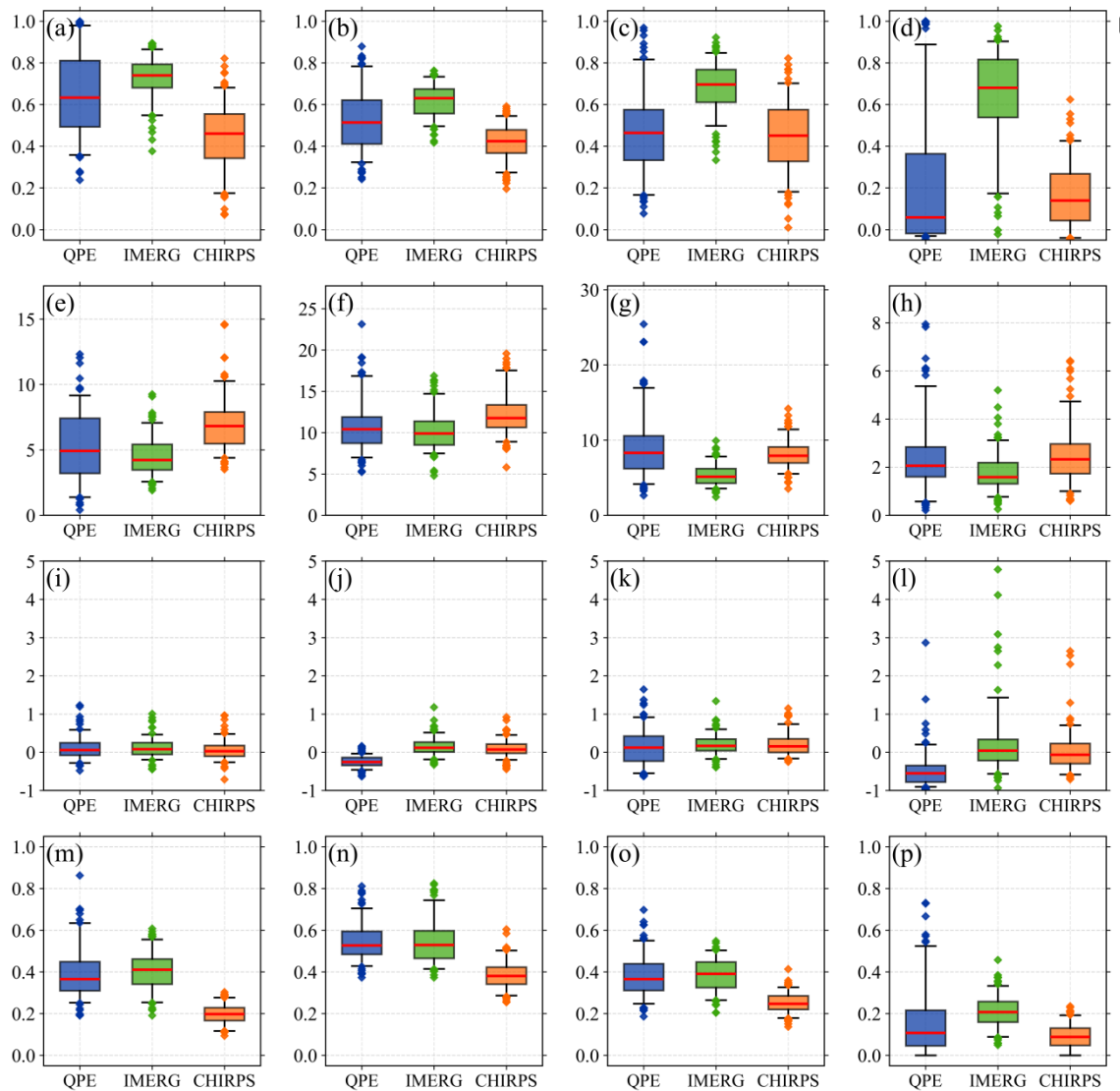


图 9 2023 年 6 月至 2025 年 6 月云南省 FY-4B QPE、GPM IMERG 和 CHIRPS 降水产品各季节性能

Fig. 9 Seasonal performance of FY-4B QPE, GPM IMERG and CHIRPS precipitation products in Yunnan Province from June

2023 to June 2025

4 讨论

4.1 探测原理差异对产品性能的影响

本研究中, FY-4B QPE 总体呈现系统性低估(图 3a), 这一现象在其他地区的研究中也有报道, 可能与红外降水反演方法的局限性有关(Ebert et al, 2007)。FY-4B QPE 主要依据云顶亮温与地面降水的统计关系进行反演, 但二者并非简单对应, 尤其在山区, 复杂地形会增加降水反演的难度(关吉平等, 2024)。因此, 低亮温区域并不一定对应强降水, 高亮温区域也可能存在有效降水。此外, 传感器误差和反演算法误差等因素也会影响产品精度(Aksu et al, 2023)。而微波观测具有较强的云层穿透能力, 可直接响应降水粒子变化, 在降水反演中具有一定优势(Prigent, 2010; Derin et al, 2016)。GPM IMERG 通过融合微波和其他传感器数据进行降水估算, 在山区通常具有较好的稳定性(Ma et al, 2016; Huffman et al, 2020)。CHIRPS 则结合卫星红外观测与地面站点数据的融合估算降水, 精度同样受地形的影响(Funk et al, 2015)。

4.2 海拔分布对产品精度的影响

海拔对三种降水产品的估测性能具有系统影响。海拔变化会影响气温、湿度和气压等气象要素, 同时, 大气密度以及折射率、吸收和散射特性亦随海拔发生变化, 影响电磁波在大气中的传播特性, 从而对卫星探测能力产生作用(Liou, 2002; Ulaby and Long, 2014; Tang et al, 2023)。三种降水产品在 0~500 m 海拔误差相对较大, 在 500~1500 m 海拔均表现较好, 而在 ≥ 3000 m 海拔误差均明显降低, 说明不同海拔条件下三种降水产品的估测性能存在明显差异。已有研究表明, 在中国及其他复杂地形区域, 卫星降水产品误差随海拔变化明显, 并受云体结构、地表背景与局地气象条件等因素影响(Bai et al, 2018; An et al, 2020)。

4.3 降水强度与季节变化的影响

FY-4B QPE 在不同降水强度下表现差异明显。小雨条件下产品表现最佳, 随降水强度增加, 检测能力明显下降。暴雨以上 CC 均低于 0.3(图 8a), 远低于整体水平。强降水条件下的亮温饱和效应削弱了云顶亮温与降水强度的相关性, 导致出现系统性低估(Huang et al, 2024; 夏进一和官莉, 2024)。FY-4B QPE 从高估转为低估的系统性变化, 可能与不同降水条件下云微物理特征的变化及红外亮温与地面降水之间关系的局限性有关(游然, 2024)。

不同降水产品随降水强度变化所呈现的性能差异, 与产品的观测机制和反演方法有关。FY-4B QPE 基于红外观测, 其高时间分辨率(15 min)有利于捕捉对流系统的发展和消散过程(晏良锐等, 2024), 但基于云顶信息反演地面降水的局限性在强降水条件下更为突出(游然, 2024)。GPM IMERG 对中雨-大雨的检测比较敏感, 但多源数据融合和校准带来的误差在极端降水条件下仍可能增大(Tang et al, 2020; Aksu et

al, 2023)。CHIRPS 对日尺度短时强降水的刻画能力相对有限, 且校准过程对高强度降水的代表性不足, 因此在大雨及以上等级中的表现相对较差 (López-Bermeo et al, 2022)。空间分辨率差异同样会影响局地强降水的识别, FY-4B QPE 的 4 km 分辨率在描述小尺度对流系统时具有优势, 而 GPM IMERG 的 10 km 分辨率受空间平滑效应影响, 可能弱化局地降水极值。

GPM IMERG 和 CHIRPS 在小雨时普遍高估, 与强降水低估表现相反。其中, 云南东南部 (CHIRPS RB = 0.90, GPM IMERG RB = 0.86) 和南部 (GPM IMERG RB = 0.90, CHIRPS RB = 0.83) 高估最显著 ($p < 0.001$), 西北部与东北部 RB 相对较小。施丽娟等 (2022) 对中国大陆 GPM 日降水产品的评估也有类似发现, 小雨的 Bias 达 1.64。赵平伟等 (2021) 在云南复杂地形区亦发现 GPM IMERG 存在小雨高估。而 FY-4B QPE 在云南各个区域的小雨 RB 处于 $-0.06 \sim 0.35$, 整体相对偏低, 在弱降水估计方面具有较好的适用性和一定的补充价值。这种区域差异可能与降水特征、复杂地形及产品反演机制有关。GPM IMERG 对暖云降水的探测能力有限, 复杂地形会增加反演不确定性 (Derin et al, 2016; Tang et al, 2023)。CHIRPS 基于红外云信息估算降水, 对浅层暖云识别不足, 可能造成弱降水估计偏高 (Funk et al, 2015)。

不同降水强度下的性能差异还直接受季节变化、天气系统及云物理特征影响。云南季节性降水主要受副热带高压及低涡切变线等环流系统影响 (晏红明和字侯丞, 2021), 西行台风或孟加拉湾风暴等热带气旋系统也是夏秋季强降水的重要影响因素之一 (朱莉等, 2020; 杨倩媛等, 2024)。春季处于干湿季转换阶段, 对流发展适中, 因此 FY-4B QPE 在春季的 CC 最高。夏季水汽输送增强, 强对流活动频发, FY-4B QPE 检测能力最强 (图 9n)。秋季随着水汽输送减弱, 降水也随之减少 (刘扬和刘屹岷, 2016)。冬季性能下降则主要与短波槽活动和昆明准静止锋有关 (陶云等, 2014)。昆明准静止锋一般出现在 11 月至次年 4 月, 由南下冷空气被云贵交界处山脉阻挡后与高原暖气团对峙形成 (段旭等, 2018), 其影响下的降水以弱降水为主 (杨春艳等, 2023)。弱降水云系增加了红外降水反演的难度 (Thies and Bendix, 2011), 进而可能造成 FY-4B QPE 对云南冬季降水系统性低估。

以 2024 年 1 月 21—28 日影响云南地区的一次昆明准静止锋降水过程为例, 对昆明—曲靖附近 $1^\circ \times 1^\circ$ 区域内 FY-4B 相当黑体温度 (TBB)、GPM/GMI 89 GHz 亮温及地面降水进行了时间序列对比 (图 10)。TBB 为风云卫星遥感数据服务网发布的 FY-4B/AGRI L2 级产品, 分辨率为 4 km; GPM/GMI 89 GHz 数据来源于 NASA 官网 (<https://gpm.nasa.gov/data>), 分辨率为 $4 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ (Draper et al, 2015)。分析显示, FY-4B TBB 呈日变化特征, 峰值接近 310 K, 谷值约 255 K, 大多数时段高于 273 K, 说明该区域缺少明显的低温云顶。1 月 21 日、25 日及 27—28 日的降水时段, 尽管记录到地面降水, 但 TBB 并未出现与之对应的低值。GPM/GMI 卫星搭载在非太阳同步轨道, 数据受过境次数限制, 在有数据的时段中, 降水时段的 GMI 89 GHz 亮温处于相对低值 (如 1 月 21 日、27—28 日), 说明微波对降水有响应, 而同期 TBB 仍然较高, 没有指

示降水的发生。这一差异反映了红外和微波在降水探测能力上的差异（Kidd and Levizzani, 2011）。GPM IMERG 依靠微波穿透云层（Hou et al, 2014），四季表现相对稳定；CHIRPS 借助融合地面站点数据校正偏差（Funk et al, 2015），季节差异较小。上述对比说明，FY-4B QPE 对不同天气系统的云物理特征响应较为敏感，在不同季节的适用性存在较大差异。

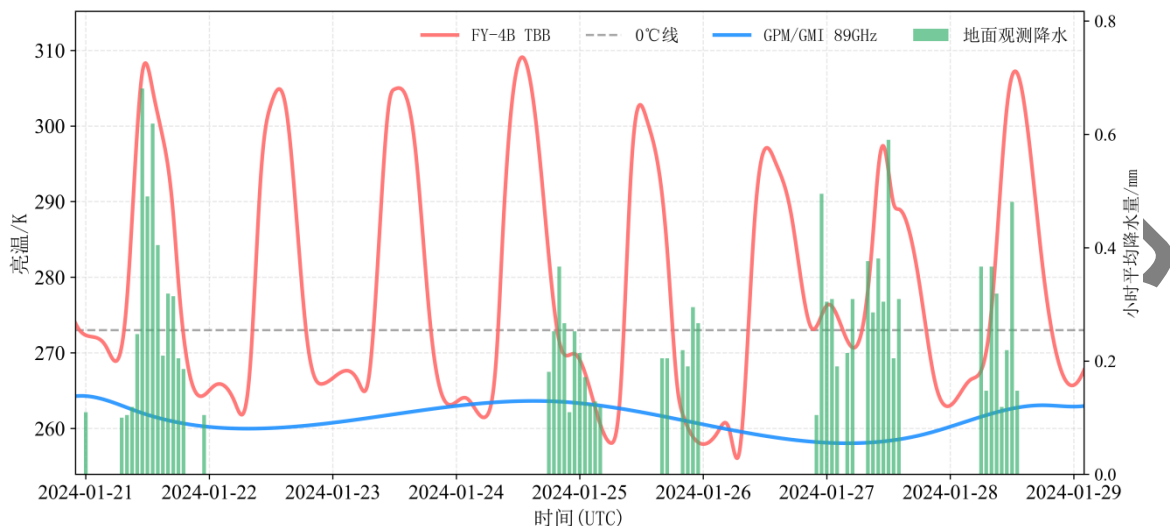


图 10 2024 年 1 月 21—28 日昆明—曲靖地区昆明准静止锋过程中 FY-4B TBB、GPM/GMI 89 GHz 亮温及地面观测小时降水

Fig. 10 FY-4B TBB, GPM/GMI 89 GHz brightness temperature, and observed hourly precipitation during the Kunming quasi-stationary front event in the Kunming-Qijing region from 21 to 28 January 2024

5 结论

本研究利用云南省 126 个国家级地面气象观测站 2023 年 6 月至 2025 年 6 月的降水资料,对 FY-4B QPE 日降水产品进行精度评估,并与 GPM IMERG 和 CHIRPS 开展对比分析,主要结论如下:

- (1) FY-4B QPE 在云南省的 CSI 为 0.44, 高于 GPM IMERG 和 CHIRPS 产品, 存在系统性低估, FAR (0.44) 为最低。相比之下, GPM IMERG 的 FAR 最高 (0.53), CHIRPS 的 POD 偏低 (0.41)。
- (2) FY-4B QPE 在云南省呈西南高东低分布, 西南部和南部降水检测能力强于中东部。FY-4B QPE 在定量精度和检测能力间平衡较好, 更适用于云南省降水监测, 西南部和南部地区效果更优。
- (3) 海拔对 FY-4B QPE 性能影响明显, 500~1000 m 为最佳适用海拔。FY-4B QPE 在不同降水强度下产品性能存在差异, 小雨时表现最好, 而在小雨-中雨区间检测能力下降并存在不同程度的低估。FY-4B QPE 对季节变化敏感。夏季检测能力强但易低估, 冬季检测能力偏弱。

本研究基于地面气象观测站点的评估有一定局限性。云南受地形影响, 气象站点分布不均, 高海拔地

区站点相对较少，可能会削弱评估结果的区域代表性。在今后的研究中，需将雷达观测、数值模式同化等多源数据结合完善评估体系，着重开展基于深度学习的卫星降水产品订正以及融合算法方面的研究。随着云南新一代天气雷达网的布网完成，届时将能够获取雷达全覆盖的体扫数据，综合地形地貌、气象要素等信息，提升产品在云南复杂地形条件下的适用性，为区域气象业务应用提供技术支撑。

参考文献

- 陈双, 陈涛, 符娇兰, 等, 2025. 卫星反演降水在华北极端降水监测中的适用性评估[J]. 大气科学, 49 (3): 873-891. Chen S, Chen T, Fu J L, et al, 2025. Evaluation of the applicability of satellite-derived precipitation in monitoring extreme precipitation in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 49(3): 873-891 (in Chinese).
- 褚萌, 吴薇, 2025. FY-4A 与 FY-4B 定量降水估计产品在四川的精度评估[J]. 气象与环境学报, 41 (3): 76-84. Chu M, Wu W, 2025. Accuracy assessment of FY-4A and FY-4B quantitative precipitation estimation in Sichuan[J]. J Meteor Environ, 41(3): 76-84 (in Chinese).
- 丁彦文, 胡宜娜, 李婧, 等, 2025. GPM IMERG 卫星降水产品在江苏省的适用性评价[J]. 水电能源科学, 43 (9): 11-14. Ding Y W, Hu Y N, Li J, et al, 2025. Applicability evaluation of GPM IMERG satellite precipitation products in Jiangsu Province[J]. Water Resour Power, 43(9): 11-14 (in Chinese).
- 段崎燕, 陈国坤, 冯俊鑫, 等, 2025. GPM 和 TRMM 降水产品在横断山区降雨侵蚀力估算中的应用[J]. 测绘通报, (6): 30-36, 77. Duan Q Y, Chen G K, Feng J X, et al, 2025. Application of GPM and TRMM precipitation products in estimating rainfall erosivity in Hengduan Mountain [J]. Bull Surv Map, (6): 30-36, 77 (in Chinese).
- 段旭, 段玮, 邢冬, 等, 2018. 冬春季昆明准静止锋与云贵高原地形的关系[J]. 高原气象, 37 (1): 137-147. Duan X, Duan W, Xing D, et al, 2018. The relationship between Kunming quasi-stationary front and Yunnan-Guizhou Plateau terrain[J]. Plateau Meteor, 37(1): 137-147 (in Chinese).
- 关吉平, 高延波, 黄从雷, 等, 2024. 基于 Attention-Unet 网络的 FY-4A 卫星降水估计[J]. 气象学报, 82 (3): 398-410. Guan J P, Gao Y B, Huang C L, et al, 2024. Estimating FY-4A satellite precipitation based on a deep learning model Attention-Unet[J]. Acta Meteor Sin, 82(3): 398-410 (in Chinese).
- 金子琪, 余贞寿, 郝世峰, 等, 2024. 基于探空的 FY-4B/GIIRS 温湿廓线检验和订正[J]. 应用气象学报, 35 (5): 538-550. Jin Z Q, Yu Z S, Hao S F, et al, 2024. Validation and correction of FY-4B/GIIRS temperature and humidity profiles based on radiosonde data[J]. J Appl Meteor Sci, 35(5): 538-550 (in Chinese).
- 李季, 雍斌, 吴昊, 2024. FY4A 与 GPM 反演降水产品在中国大陆的误差解析[J]. 遥感技术与应用, 39 (5): 1223-1236. Li J, Yong B, Wu H, 2024. Error evaluation of FY4A and GPM satellite precipitation estimates over Chinese mainland[J]. Remote Sens Technol Appl, 39(5): 1223-1236 (in Chinese).
- 李秀举, 曹琦, 周树添, 等, 2023. FY-4B GHI 长波红外波段的发射前辐射表征和定标[J]. 光学学报, 43 (12): 1212005. Li X J, Cao Q, Zhou S T, et al, 2023. Prelaunch radiometric characterization and calibration for long wave infrared band of FY-4B GHI[J]. Acta Opt Sin, 43(12): 12

12005 (in Chinese).

李世禧, 廖玮杰, 尚明, 等, 2024. 多套降水产品在海南岛的适用性评估[J]. 热带地理, 44 (9): 1588-1601. Li S X, Liao W J, Shang M, et al, 2

024. Evaluation of multiple precipitation products in the Hainan island[J]. Trop Geogr, 44(9): 1588-1601 (in Chinese).

刘扬, 刘屹岷, 2016. 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因[J]. 大气科学, 40 (6): 1215-1226. Liu Y, Liu Y M, 2016. Spatial pat

tern and causes of interannual variability of autumn rainfall in Southwest China[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6): 1215-1226 (in Chinese).

鲁文强, 裘奕, 杨磊, 等, 2022. 风云四号地球静止轨道卫星测距系统误差标校及其定轨影响分析[J]. 仪器仪表学报, 43 (2): 73-83. Lu W Q, Qi

u Y, Yang L, et al, 2022. Analysis of the ranging systematic error of the FY-4 geostationary satellite and its influence on orbit determination[J].

Chin J Sci Instrum, 43(2): 73-83 (in Chinese).

沈哲辉, 雍斌, 徐辉, 等, 2025. 风云二号与 GPM 卫星降水反演的误差组分定量解析[J]. 遥感学报, 29 (3): 633-648. Shen Z H, Yong B, Xu H,

et al, 2025. Quantitative analysis of error components in satellite precipitation retrievals on the basis of FY-2 and GPM[J]. Natl Remote Sens

Bull, 29(3): 633-648 (in Chinese).

施丽娟, 冯婉悦, 雷勇, 等, 2022. GPM 日降水产品在中国大陆的准确性评估[J]. 气象, 48 (11): 1428-1438. Shi L J, Feng W Y, Lei Y, et al,

2022. Accuracy evaluation of daily GPM precipitation product over mainland China[J]. Meteor Mon, 48(11):1428-1438 (in Chinese).

孙桂凯, 魏义熊, 王国帅, 等, 2022. GPM IMERG 卫星降水数据在广西地区适用性分析[J]. 人民长江, 53 (7): 98-106. Sun G K, Wei Y X, Wa

ng G S, et al, 2022. Application of GPM IMERG satellite precipitation data in Guangxi[J]. Yangtze River, 53(7): 98-106 (in Chinese).

陶云, 黄玮, 郑建萌, 等, 2014. 云南冬季降水的演变特征及成因分析[J]. 高原气象, 33 (1): 130-139. Tao Y, Huang W, Zheng J M, et al, 201

4. Evolutive features and its causes of the wintertime precipitation in Yunnan Province[J]. Plateau Meteor, 33(1): 130-139 (in Chinese).

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]. Torr Rain Dis, 43(5):

598-606 (in Chinese).

徐柳昕, 王文雨, 王晓燕, 等, 2025. 多源降水产品在高寒内陆河流域的适用性和误差组分[J]. 干旱区研究, 42 (1): 51-62. Xu L X, Wang W Y,

Wang X Y, et al, 2025. Evaluation and error decomposition of multisource precipitation data in an alpine and endorheic river watershed[J]. Ari

d Zone Res, 42(1): 51-62 (in Chinese).

杨春艳, 白慧, 孔德璇, 等, 2023. 贵州冬季云贵准静止锋及其锋面降雨的气候特征研究[J]. 高原气象, 42 (5): 1207-1217. Yang C Y, Bai H, K

ong D X, et al, 2023. Study on the climatic characteristics of the quasi-stationary front in Yunnan and Guizhou and its frontal rainfall in winte

r in Guizhou[J]. Plateau Meteor, 42(5): 1207-1217 (in Chinese).

杨倩媛, 张万诚, 闵颖, 等, 2024. 高原低涡切变影响云南强降水分布及水汽特征[J]. 大气科学, 48 (4): 1565-1583. Yang Q Y, Zhang W C, Mi

n Y, et al, 2024. The effect of plateau vortex shear on the heavy precipitation distribution and water vapor characteristics in Yunnan[J]. Chin J

Atmos Sci, 48(4): 1565-1583 (in Chinese).

杨晓瑞, 曾岁康, 林志鹏, 2023. GPM 卫星降水数据对四川极端降水的监测能力评估[J]. 遥感技术与应用, 38 (6): 1496-1508. Yang X R, Zeng

-
- S K, Lin Z P, 2023. Evaluation of monitoring ability of GPM satellite precipitation products for extreme precipitation over Sichuan Province[J]. *Remote Sens Technol Appl*, 38(6): 1496-1508 (in Chinese).
- 晏红明, 字保丞, 2021. 夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系[J]. *大气科学*, 45 (1): 1-20. Yan H M, Zi Y C, 2021. Characteristics of the subseasonal-scale zonal movement of subtropical high in summer and its relationship with precipitation in Southwest China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(1): 1-20 (in Chinese).
- 晏良锐, 李琦, 周毓荃, 2024. 基于 FY-4A 和 GPM 的定量降水估测[J]. *气象科学*, 44 (6): 1111-1121. Yan L R, Li Q, Zhou Y Q, 2024. Quantitative precipitation estimation based on FY-4A and GPM[J]. *J Meteor Sci*, 44(6): 1111-1121 (in Chinese).
- 游然. (2024-03)[2025-05-28]. 风云四号 B 星定量降水估计产品使用说明文档[EB/OL]. https://img.nsmc.org.cn/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/OperatingGuide/FY4B/FY-4B_Product_Instruction_AGRI_QPE.pdf. You R. (2024-03)[2025-05-28]. User manual for FY-4B quantitative precipitation estimation product[EB/OL]. https://img.nsmc.org.cn/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/OperatingGuide/FY4B/FY-4B_Product_Instruction_AGRI_QPE.pdf (in Chinese).
- 张寒博, 窦世卿, 温颖, 2024. 基于遥感降水产品的西南地区降水时空动态分析[J]. *水土保持研究*, 31 (5): 265-278. Zhang H B, Dou S Q, Wen Y, 2024. Analysis of spatiotemporal dynamics of precipitation in Southwest China based on remote sensing precipitation products[J]. *Res Soil Water Conserv*, 31(5): 265-278 (in Chinese).
- 张淼, 徐娜, 陈林, 等, 2024. FY-4B 与 FY-4A 云顶性质产品精度的一致性评估[J]. *热带气象学报*, 40 (3): 389-396. Zhang M, Xu N, Chen L, et al, 2024. Consistency of the accuracy of FY-4B and FY-4A cloud top products[J]. *J Trop Meteor*, 40(3): 389-396 (in Chinese).
- 朱莉, 王治国, 李华宏, 等, 2020. 西行台风背景下云南一次短时强降水过程的成因分析[J]. *热带气象学报*, 36 (6): 744-758. Zhu L, Wang Z G, Li H H, et al, 2020. Casual analysis of a short-term heavy rain event in Yunnan Province under the background of westward moving typhoon [J]. *J Trop Meteor*, 36(6): 744-758 (in Chinese).
- 赵平伟, 李斌, 王佳妮, 等, 2021. GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度在云南复杂地形区域的评估检验[J]. *气象科技*, 49 (1): 114-123. Zhao P W, Li B, Wang J N, et al, 2021. Accuracy evaluation and comparison of GPM IMERG and ERA5 precipitation products over complex terrain of Yunnan[J]. *Meteor Sci Technol*, 49(1): 114-123 (in Chinese).
- Aksu H, Taflan G Y, Yaldiz S G, et al, 2023. Evaluation of IMERG for GPM satellite-based precipitation products for extreme precipitation indices over Turkiye[J]. *Atmos Res*, 291: 106826.
- Alejo L A, Alejandro A S, 2021. Validating CHIRPS ability to estimate rainfall amount and detect rainfall occurrences in the Philippines[J]. *Theor Appl Climatol*, 145(3-4): 967-977.
- An Y M, Zhao W W, Li C J, et al, 2020. Evaluation of six satellite and reanalysis precipitation products using gauge observations over the Yellow River Basin, China[J]. *Atmosphere*, 11(11): 1223.
- Arregocés H A, Rojano R, Pérez J, 2023. Validation of the CHIRPS dataset in a coastal region with extensive plains and complex topography[J]. *Case Stud Chem Environ Eng*, 8: 100452. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100452>.

-
- Bai L, Shi C X, Li L H, et al, 2018. Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over mainland China[J]. *Remote Sens*, 10(3): 362. <https://doi.org/10.3390/rs10030362>.
- Derin Y, Anagnostou E, Berne A, et al, 2016. Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain[J]. *J Hydrometeorol*, 17(6): 1817-1836.
- Draper D W, Newell D A, Wentz F J, et al, 2015. The global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI): instrument overview and early on-orbit performance[J]. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 8(7): 3452-3462.
- Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C, 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(1): 47-64.
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, et al, 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes[J]. *Sci Data*, 2: 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Hordofa A T, Leta O T, Alamirew T, et al, 2021. Performance evaluation and comparison of satellite-derived rainfall datasets over the Ziway Lake Basin, Ethiopia[J]. *Climate*, 9(7): 113. <https://doi.org/10.3390/cli9070113>.
- Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al, 2014. The global precipitation measurement mission[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(5): 701-722.
- Huang Y, Bao Y S, Petropoulos G P, et al, 2024. Precipitation estimation using FY-4B/AGRI satellite data based on random forest[J]. *Remote Sens*, 16(7): 1267. <https://doi.org/10.3390/rs16071267>.
- Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al, 2020. Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG) [M]//Levizzani V, Kidd C, Kirschbaum D B, et al. *Satellite Precipitation Measurement*. Cham: Springer International Publishing, 343-353.
- Huffman G J, Bolvin D T, Joyce R, et al. (2023-07-12)[2025-05-28]. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Version 07[EB/OL]. https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2023-07/IMERG_V07_ATBD_final_230712.pdf.
- Kidd C, Levizzani V, 2011. Status of satellite precipitation retrievals[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 15(4): 1109-1116.
- López-Bermeo C, Montoya R D, Caro-Lopera F J, et al, 2022. Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America[J]. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 127: 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>.
- Levizzani V, Cattani E, 2019. Satellite remote sensing of precipitation and the terrestrial water cycle in a changing climate[J]. *Remote Sens*, 11(19): 2301.
- Liou K N, 2002. *An introduction to atmospheric radiation*[M]. Amsterdam: Academic Press.
- Ma Y Z, Tang G Q, Long D, et al, 2016. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sens*, 8(7): 569. <https://doi.org/10.3390/rs8070569>.
- Navarro A, García-Ortega E, Merino A, et al, 2019. Assessment of IMERG precipitation estimates over Europe[J]. *Remote Sens*, 11(21): 2470.
- Prigent C, 2010. Precipitation retrieval from space: an overview[J]. *C R Geosci*, 342(4-5): 380-389.

Sackett P R, Yang H, 2000. Correction for range restriction: an expanded typology[J]. *J Appl Psychol*, 85(1): 112-118.

Shaghaghian M R, Ghadampour Z, 2024. Designing a rain gauge network: utilizing satellite-derived precipitation data with geostatistical multivariate techniques[J]. *Paddy Water Environ*, 22(3): 449-466.

Tang G Q, Clark M P, Papalexiou S M, et al, 2020. Have satellite precipitation products improved over last two decades? a comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets[J]. *Remote Sens Environ*, 240: 111697. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>.

Tang X, Li H X, Qin G H, et al, 2023. Evaluation of satellite-based precipitation products over complex topography in mountainous Southwestern China[J]. *Remote Sens*, 15(2): 473. <https://doi.org/10.3390/rs15020473>.

Thies B, Bendix J, 2011. Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives[J]. *Meteor Appl*, 18(3): 262-295.

Ulaby F T, Long D G, 2014. Microwave radar and radiometric remote sensing[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Weng P Y, Tian Y, Jiang Y Z, et al, 2023. Assessment of GPM IMERG and GSMaP daily precipitation products and their utility in droughts and floods monitoring across Xijiang River Basin[J]. *Atmos Res*, 286: 106673. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106673>.

Wu W Q, Li Y G, Luo X, et al, 2019. Performance evaluation of the CHIRPS precipitation dataset and its utility in drought monitoring over Yunnan Province, China[J]. *Geomat Nat Hazards Risk*, 10(1): 2145-2162.