

多个高时空分辨率降水产品 在珠江三角洲地区的多尺度精度评估*

麦杞莹¹, 谭学志¹, 吴欣欣¹, 刘丙军¹, 杨芳², 张明珠³, 温得平⁴, 马海青⁵

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082
2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611
3. 广州市水务科学研究所, 广东 广州 510220
4. 青海省水旱灾害防御服务中心, 青海 西宁 810001
5. 乌兰察布市水利事业发展中心, 内蒙古 乌兰察布 012000

摘要: 基于2001—2012年珠江三角洲地区28个雨量站逐时实测降水数据, 通过计算6个统计指标和研究不同降水事件的出现频率, 分别在年、月和日3个尺度上评估了3种降水产品CMORPH、GPM和ERA5在珠江三角洲地区的精度。结果发现: ① 对比年、月、日3个时间尺度, 3种降水产品在月尺度上均表现出与实测降水数据存在高度正线性关系, 而在年和日尺度上的相关关系较弱; ② 日尺度下3种降水产品汛期的表现均比非汛期差, 在干燥月份对降水事件的探测准确度较其他月份低, 但误报率却是秋冬季较高, 且沿海附近站点的误报率均较内陆站点高; ③ 相较之下, GPM更能准确地反映出珠江三角洲地区降水量的时空变化趋势和空间分布特征; ④ CMORPH和GPM对各类型降水事件的估计能力均较好, 能较好地反映实测降水数据对不同类降水事件的贡献。总体而言, 3种产品中, GPM最能反映珠江三角洲地区实际降水情况。

关键词: 降水精度评估; CMORPH; GPM; ERA5; 珠江三角洲

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)03-0021-11

Multi-scale accuracy assessment of multiple high spatial and temporal resolution precipitation products in the Pearl River Delta region

MAI Qiying¹, TAN Xuezhi¹, WU Xinxin¹, LIU Bingjun¹, YANG Fang²,
ZHANG Mingzhu³, WEN Deping⁴, MA Haiqing⁵

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China
3. Guangzhou Water Science Institute, Guangzhou 510220, China
4. Qinghai Flood and Drought Disaster Prevention Service Center, Xining 810001, China
5. Ulanqab Water Conservancy Development Center, Ulanqab 012000, China

Abstract: Based on hourly precipitation data from 28 rainfall stations in the Pearl River Delta (PRD) region from 2001 to 2012, the accuracy of CMORPH, GPM and ERA5 is evaluated in the PRD on the annual, monthly and daily time scales by calculating 6 statistical metrics and exploring the frequency

* 收稿日期: 2022-11-10 录用日期: 2023-03-31 网络首发日期: 2024-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3001004); 国家自然科学基金(52179030, 51809295);
广州市科技计划项目(201904010097)

作者简介: 麦杞莹(1998年生), 女; 研究方向: 水文水资源; E-mail: maiqy7@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 谭学志(1987年生), 男; 研究方向: 水文水资源; E-mail: tanxuezhi@mail.sysu.edu.cn

of different precipitation events. The results show that: (1) Compared with the three time scales of year, month and day, three products showed a highly positive correlation with the measured rainfall station on the monthly scale, but the correlation is weak on the annual and daily scales. (2) At the daily scale, all three precipitation products perform worse in the flood season than in the non-flood season. They are less accurate in detecting precipitation events in dry months than in other months, but the false alarm rate is higher in autumn and winter, and they all have a higher false alarm rate for stations near the coast than for inland stations. (3) In contrast, GPM can more accurately reflect the spatio-temporal trend and spatial distribution characteristics of precipitation in the PRD region. (4) Both CMORPH and GPM show high capacity to estimate various types of precipitation events, which can well reflect the contribution of the measured data to different types of precipitation events. Overall, GPM can best reflect the actual situation in the PRD region among the three products.

Key words: precipitation accuracy assessment; CMORPH; GPM; ERA5; the Pearl River Delta

降水是全球和区域水循环系统的重要组成部分, 其在全球和区域水文循环以及维持自然界能量平衡等过程中扮演关键角色(Yong et al., 2015)。降水的空间不均匀性和时间变异性是各类自然灾害发生的直接原因(Maggioni et al., 2016), 随着城市化进程的推进, 城市抵御暴雨灾害的能力下降。研究表明, 小时尺度的降水数据相较于日尺度降水数据来说能够更好地反映降水的实际变化(李建等, 2013), 有助于人们进行不同预见期的降水预报, 从而实现对洪水、内涝、滑坡等自然灾害的监测和预防(Guo et al., 2015)。

目前可以利用地面雨量站、天气雷达和遥感反演技术来获取降水信息。一般来说, 通过雨量站获得的降水数据是最接近于降水真实值, 但部分地区雨量站存在空间分布不均(Kidd et al., 2017)、时间分辨率不高、时间序列较短的问题, 难以获得准确有效的降水信息。天气雷达在局部地区可提供高质量和高时空分辨率的降水时空分布信息, 但其在地形复杂的地区表现欠佳(Mei et al., 2014, Yuan et al., 2019)。如今, 随着遥感技术的发展, 通过遥感信息反演获得的高时空分辨率降水数据已在气象和水文等领域得到了大量的应用(宋子珏等, 2018)。遥感反演降水数据具有空间覆盖面广、时空分辨率高的优点, 且遥感能实现自动获取数据及长时间连续观测, 大大弥补了地面雨量站实测降水数据和天气雷达数据时空不连续的不足(Xie et al., 2017)。具有代表性的遥感反演小时降水产品有气候预报中心变形算法(CMORPH, climate prediction center morphing technique)(Joyce et al., 2004)、热带降水观测计划

(TRMM, tropical rainfall measuring mission)(Simpson et al., 1988)和全球降水观测计划(GPM, global precipitation measurement)(Hou et al., 2014)。另外, 随着数值天气模式和数据同化技术的发展, 出现了精度较高, 时间序列较长的再分析降水数据产品, 这些产品将各种陆面和气候过程模型与多源观测资料(地面站点和卫星数据)融合, 在天气预报和水文应用等方面具有很大的使用价值(Dutra et al., 2008), 如今使用较多的再分析气候数据产品有欧洲中期天气预报中心的ERA-Interim和ERA5(Zhang et al., 2022)。

近年来, 许多学者已对上述提到的小时降水产品在中国大陆地区进行了初步评估检验。许时光等(2014)研究发现CMORPH降水数据在中国区域的空报率较大, 且东南沿海和东北地区的空报率比西北和青藏高原地区的要低。成璐等(2014)对CMORPH和TRMM 3B42降水数据进行了检验和评估, 验证发现他们在中国均有较好的精度, 但在部分地区存在较大偏差。金晓龙等(2016)利用GPM、TRMM和CMORPH在天山地区进行适用性分析, 认为GPM的综合表现最佳。李麒麟等(2018)评估了GPM IMAGE和TRMM 3B42降水数据在中国地区的表现, 认为GPM在中国各大流域精度优于TRMM。Zhang et al.(2019)针对中国赣江流域进行研究, 指出GPM在不同时间尺度上与实测降水的一致性比TRMM 3B42要高。Jiang et al.(2021)分析了ERA5降水估计的准确性, 发现其对中国大陆的降水估计有较大的相对偏差, 分别高估和低估了小雨事件和中强降水事件。刘婷婷等(2022)也对ERA5在中国的适用性进行了探讨, 发

现ERA5对暴雨的识别与站点实测数据偏差很大。由于长序列高时空分辨率站点降水数据的匮乏,上述研究大多针对大流域进行,鲜有针对降水产品在小区域的表现进行多时空尺度的精度评估。

因此,本文针对暴雨频发的珠江三角洲地区,以雨量站逐时实测降水数据为基础,评估了广泛使用的高时空分辨率降水产品CMORPH、GPM和ERA5在2001—2012年间的多时空精度,研究这些降水产品在珠江三角洲地区应用的可靠性。本文从年、月、日3个尺度对不同降水产品在珠江三角洲地区的降水特性进行分析,量化了3种降水产品的误差成分,旨在引导相关研究者选择更适合用

于珠江三角洲地区的降水产品,并为改进相应的降水产品生成方法提供参考。

1 研究区域与数据方法

1.1 研究区域

珠江三角洲地区位于 $111.05^{\circ}\sim 116.22^{\circ}\text{E}$ 、 $21.56^{\circ}\sim 23.56^{\circ}\text{N}$ (图1a),包括广州、深圳、珠海、佛山、中山、东莞、肇庆、江门、惠州、清远、云浮、河源、韶关共14个地级行政区(图1b)。珠江三角洲地区位于中国东部季风区的南部,受东亚夏季风的影响,暴雨、洪水、超强台风和热浪等气象灾害频繁发生。

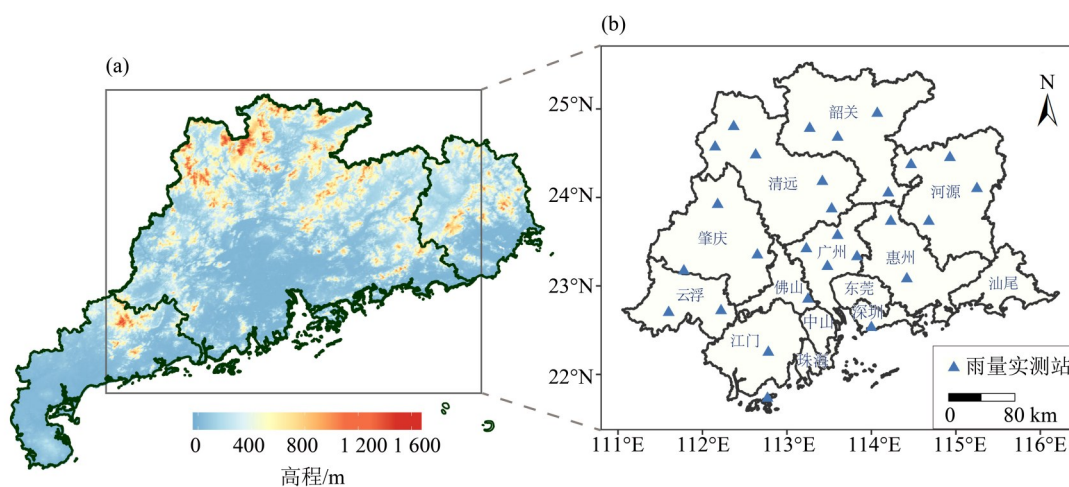


图1 珠江三角洲(PRD)地区雨量实测站的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of rain gauges (triangle) in the Pearl River Delta (PRD) region

1.2 研究数据

本文使用的雨量站逐时实测降水数据由中国气象局广州大气科学联合研究中心提供,并得到广东省气象局的整编和质量校正,时间分辨率为1 h。为保证站点空间分布均匀性,研究对站点进行筛选,最终选择珠江三角洲地区28个雨量站进行研究,站点的空间分布见图1b。

遥感反演降水数据集包括:① CMORPH小时降水数据,来自美国国家海洋和大气管理局气候预测中心网站(<https://www.ncei.noaa.gov/data/cmorph-high-resolution-global-precipitation-estimates/>),其融合了多种低轨道卫星传感器的微波观测估计,区域覆盖范围是全球 $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$,时间分辨率为30 min,空间分辨率高达8 km。② GPM IMERG Final Run产品(简称为GPM),来源于美国国家航天局,通过<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>获取。

GPM搭载了先进的多普勒双频降雨雷达和被动微波辐射计,其不仅继承了TRMM对中强降水事件的探测能力,而且对固态降水和弱降水的探测精度也得到了显著提高。GPM提供时间分辨率为30 min,空间分辨率为 0.1° 的数据,覆盖范围也是全球 $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 。另外,本文还使用了欧洲中期天气预报中心提供的第五代再分析ERA5数据,其水平分辨率为 0.25° ,时间分辨率为1 h,通过<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>获取。

由于珠江三角洲不同地区降水量差异较大,为减小雨量站分布稀疏对评估分析的影响,本文先将CMORPH、GPM和ERA5降水网格数据产品使用双线性内插法插值到地面雨量站所在的经纬度位置上再对他们的性能进行评估。另外,由于地面雨量站观测数据和ERA5再分析数据的时间分

辨率为 1 h, 而 CMORPH 和 GPM 卫星数据的时间分辨率为 30 min, 本文对 CMORPH 和 GPM 卫星数据累加处理为 1 h。最终选取 4 个数据集共有的完整年序列, 即 2001—2012 年进行研究。

1.3 评估方法

本文使用定量误差评估指标和探测能力评估指标进行精度评估(Masood et al., 2020; 李麒嵩等, 2018)。定量误差评估指标包括

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \dot{G})(E_i - \dot{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \dot{G})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \dot{E})^2}}$$

平均误差

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - G_i|,$$

均方根误差

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - G_i)^2},$$

式中 n 是地面雨量站的数量; G_i 和 E_i 分别为第 i 个地面雨量站的观测降水量和该点所对应的降水产品栅格点的像元值; \dot{G} 和 \dot{E} 分别是地面雨量站观测降水量和降水产品估计降水量的平均值。当 r 越接近于 1, MAE 和 RMSE 越接近于 0, 则降水产品精度越高。

探测能力评估指标选用探测率

$$\text{POD} = H/(H + M),$$

误报率

$$\text{FAR} = F/(H + F),$$

临界成功指数

$$\text{CSI} = H/(H + M + F),$$

式中 H 为特定阈值下地面雨量站和降水产品同时成功捕捉到的降水事件个数; M 为特定阈值下地面雨量站成功捕捉而降水产品没有探测到的降水事件个数; F 为特定阈值下降水产品同时成功捕捉而地面雨量站没有观测到的降水事件个数。当 POD 和 CSI 越接近于 1, FAR 越接近于 0, 则说明降水产品对降水事件的探测能力越强, 本文选取 0.1 mm 作为日尺度降水事件的阈值。

为了探究不同数据集对珠江三角洲地区不同降水事件的发生频率及其对年降水量的相对贡献, 本文将日降水事件根据降水量 R (单位: mm) 分成

6 个不同的降水事件类型, 分别为: 小雨 ($0.1 \leq R < 10$)、中雨 ($10 \leq R < 25$)、大雨 ($25 \leq R < 50$)、暴雨 ($50 \leq R < 100$)、大暴雨 ($100 \leq R < 250$) 和特大暴雨 ($R \geq 250$)。

2 结果和讨论

2.1 年尺度下 3 种降水产品的精度评估

2001—2012 年间降水产品在珠江三角洲地区对应的年平均降水量的空间分布情况(图 2)显示, 多年平均降水量的空间分布存在较为明显的差异。雨量站实测数据的结果(图 2a)显示, 珠江三角洲降水丰富的地区主要位于广州市以及江门市南部, 年均降水量在 1 800 mm 以上。相对于处在内陆地区的站点, 位于沿海地区站点所记录的多年平均降水量更大。CMORPH 结果(图 2b)所呈现的年降水高值区位于河源市西部以及江门市西南部, 高值区相较于实测结果有所偏离, 且其严重低估了位于珠江入海口地区的年均降水量。珠海、中山、东莞和深圳大部分地区的年均降水量 $< 1\ 300$ mm, 与实测值差别较大。GPM 结果(图 2c)所呈现的年均降水量分布情况是 3 种降水产品中与实际情况最为相符的, 但对许多地区存在一定程度的高估, 最高能达到 19.7%。ERA5 结果(图 2d)呈现出内陆多沿海少的年降水空间分布, 且其年降水高值区位于清远市, 与实际情况有较大的差异, 是 3 种降水产品中表现最差的。

为直观地比较降水产品在珠江三角洲地区与雨量站实测降水数据值间的差异, 绘制了年尺度下它们年降水量随时间变化情况图(图 3)。年降水量变化情况显示, 珠江三角洲地区年降水量呈现出不断波动的状态。2001、2006、2008、2010 和 2012 年是年降水的峰值年份, 3 种降水产品均能准确体现出 2001—2012 年间年降水量的峰值和谷值。对于 CMORPH 来说, 除 2001 年外, 2002—2012 年的年降水值均明显低于实测降水。对于 GPM, 除在 2001—2004 高估了实测年降水值, 此后的年份均与实测年降水呈现出较高的一致性。而 ERA5 除了在个别年份表现较好外, 其余年份均对实测年降水有明显的高估或低估。

年尺度下, 3 种降水产品定量误差评估指标值(表 1)及降水产品估测降水数据与实测降水数据散点图结果(图 4a-c)显示, 所有降水产品与实测年降

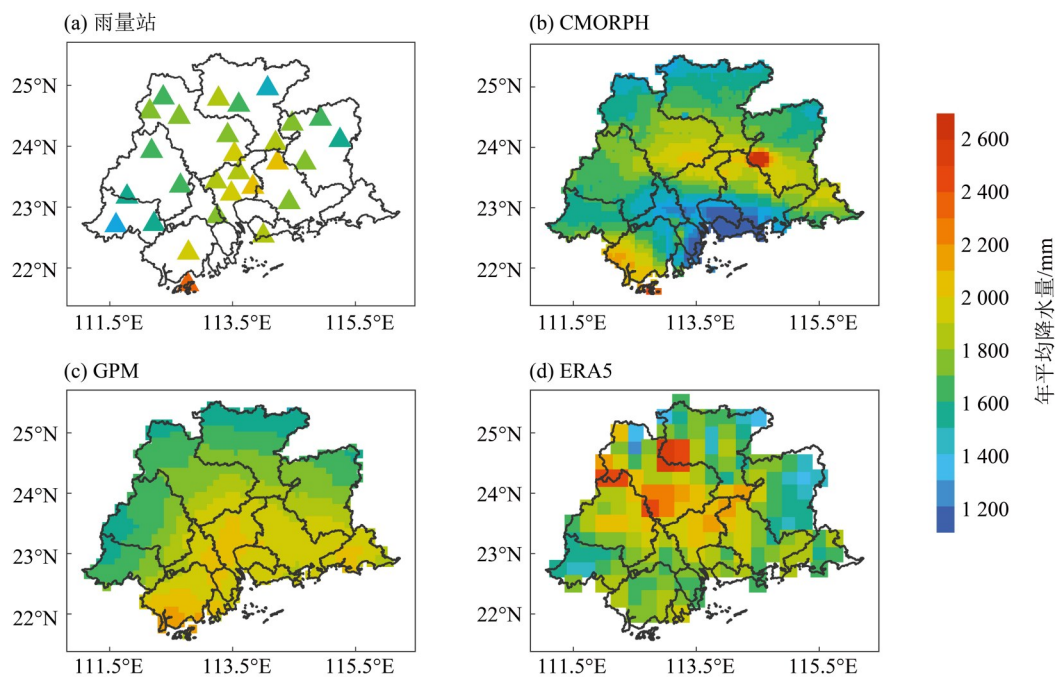


图2 降水产品在珠江三角洲地区(PRD)的年平均降水量分布

Fig. 2 Annual mean precipitation distribution of precipitation products in the PRD region

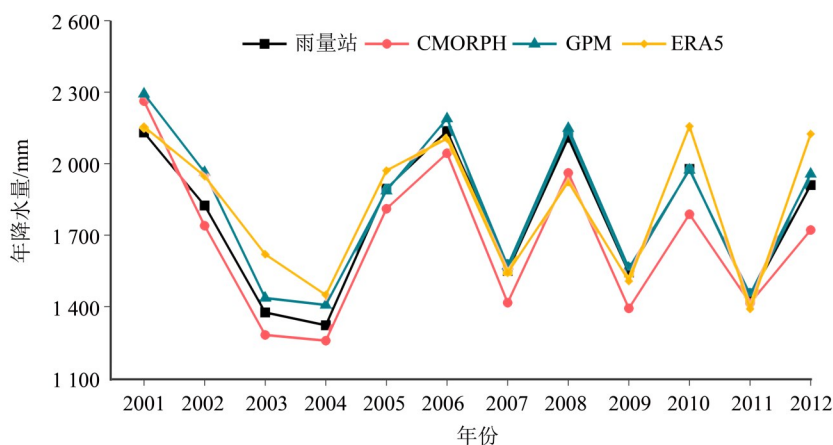


图3 2001—2012年降水产品的年降水时间变化情况

Fig. 3 Time variation of annual precipitation measured by precipitation products during 2001-2012

水之间均存在一定的相关性, 其中GPM与实测数据之间的相关性为强相关($r=0.87$), 明显高于CMORPH($r=0.74$)和ERA5($r=0.75$)。3种降水产品中GPM的MAE和RMSE均最小(MAE=146.66 mm, RMSE=183.76 mm), CMORPH的MAE和RMSE则均最大(MAE=223.47 mm, RMSE=298.47 mm)。总的来说, GPM与实测年降水数据更为接近, 整体表现较好。

2.2 月尺度下3种降水产品的精度评估

月尺度下3种降水产品定量误差评估指标值(表1)及降水产品估测降水数据与实测降水数据散

点图结果(图4d-f)显示, 所有降水产品都与实测降水数据有很强的相关性, 月尺度下GPM与实测降水之间的 r 最高($r=0.94$), ERA5的 r 最低($r=0.88$)。从MAE值来看, GPM的MAE最小(MAE=32.25 mm), 而CMORPH(MAE=43.74 mm)和ERA5(MAE=43.41 mm)的MAE值很接近, 说明CMORPH和ERA5对实测月降水估计的准确度相当。从RMSE值来看, 依旧是GPM的RMSE最小(RMSE=48.65 mm), 而CMORPH(RMSE=63.54 mm)和ERA5(RMSE=61.74 mm)与实测月降水之间的偏离程度则较高。此外, 通过对比可知, 3个卫星降水

表 1 不同时间尺度下 3 种降水产品的定量误差评估指标
Table 1 Statistics of precipitation products at different time scales

时间尺度	评估指标	CMORPH	GPM	ERA5
年尺度	r	0.74	0.87	0.75
	MAE/mm	223.47	146.66	198.68
	RMSE/mm	298.47	183.76	249.50
月尺度	r	0.90	0.94	0.88
	MAE/mm	43.74	32.25	43.41
	RMSE/mm	63.54	48.65	61.74
日尺度	r	0.71	0.74	0.63
	MAE/mm	4.15	4.20	4.26
	RMSE/mm	9.50	9.45	7.75

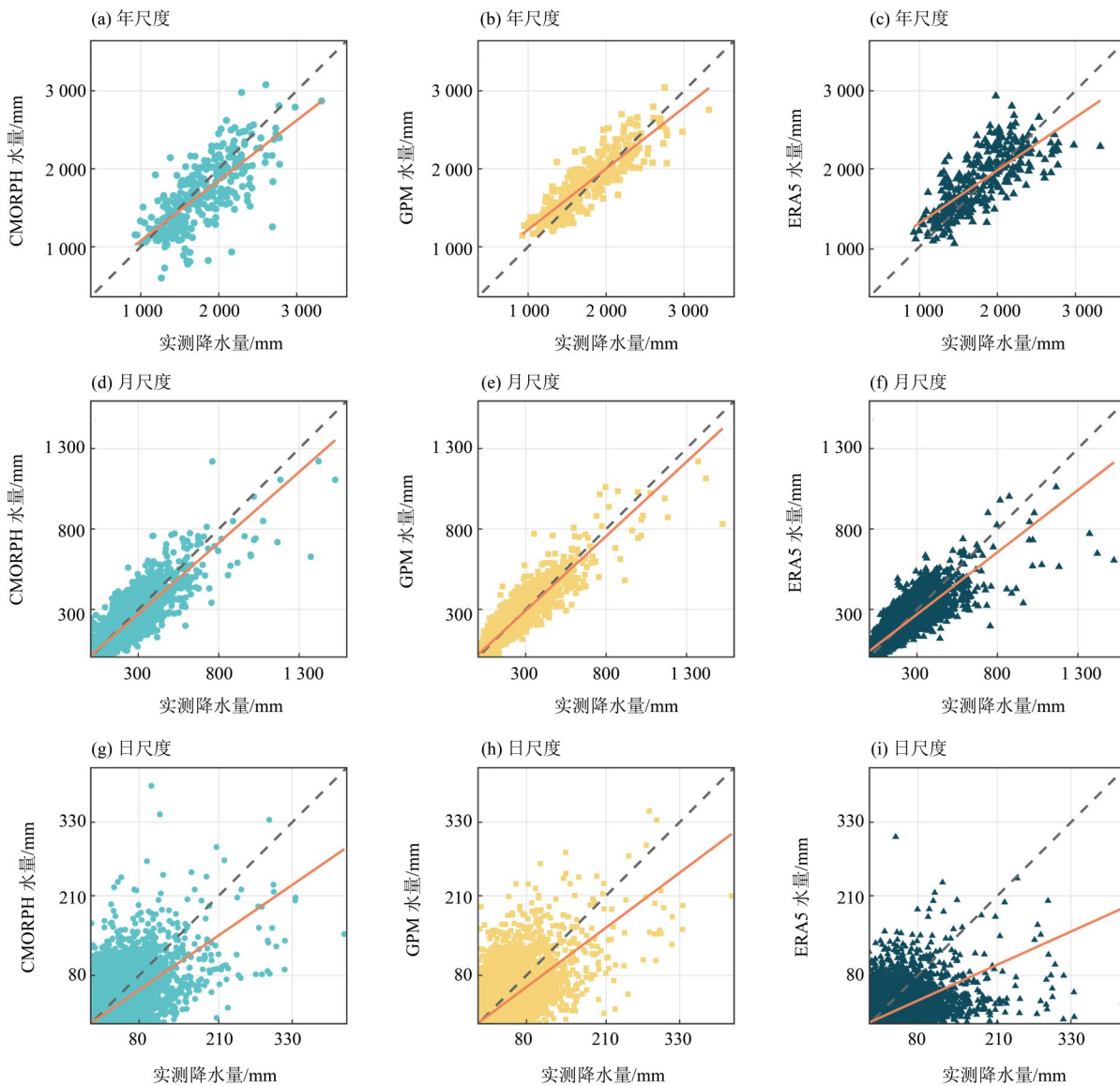


图 4 不同时间尺度下降水产品估测降水数据与实测降水数据散点图

Fig. 4 Scatter plots of estimated precipitation and measured precipitation at different time scales

产品的精度在月尺度下的表现明显优于年尺度。

不同降水产品月平均降水量随时间发生的变化情况(图5)显示, 3种产品均能呈现出珠江三角洲地区的双峰降雨模式, 即4~9月是广东地区的汛期, 降水主峰值在6月, 而10月到次年2月为少雨的月份。具体来看, CMORPH(图5a)低估了基本

所有月份的月降水量(除5月外)。GPM(图5b)与实测降水在非汛期的偏差较小, 但高估了汛期的月降水量, 尤其在6月, 被高估的总平均降水量为72.50 mm。ERA5在7~12月表现较好, 但对1~6月的降水量表现出不同程度的低估与高估。

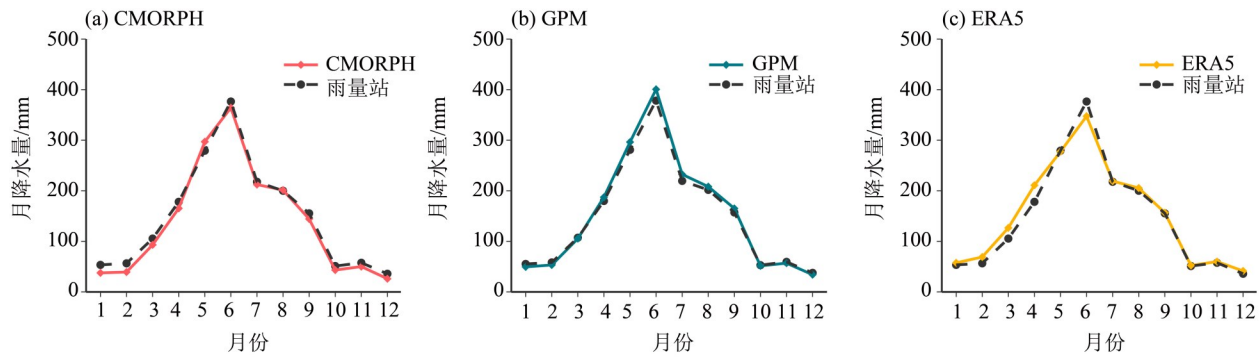


图5 不同降水产品的多年月平均降水量比较

Fig. 5 The comparison of mean monthly precipitations under different precipitation products

为进一步了解不同降水产品在月尺度下的空间表现情况, 本文分别计算了研究区域内28个站点的3个定量误差评估指标(图6)。从 r 的分布结果(图6a-c)来看, CMORPH和GPM的 r 值均较高且具有相似的空间分布情况(图6a和b), 位于云浮、肇庆和韶关的站点 r 值较其他地区来说要小, 但GPM绝大部分站点的 r 值均大于CMORPH。ERA5(图6c) r 的高值区在广州附近, 但对于相同站点来说, 广州外站点的 r 值基本都比CMORPH的要小。对比发现, 对于同一降水产品, 其MAE值和RMSE的空间分布情况相似, 因此这两个指标的空间分布情况可以一起讨论。对于CMORPH和ERA5来说, 除了个别站点外, 他们MAE和RMSE的空间分布结果是相似的。而GPM基本所有站点的MAE值和RMSE值均是3种产品中最小的, 且GPM沿海站点的MAE值和RMSE值均普遍大于内陆站点。综上, 无论是从时间还是空间的角度进行对比, 3种降水产品在月尺度下的精度均较年尺度有显著提升, 且依旧是GPM的表现优于CMORPH和ERA5。

2.3 日尺度下3种降水产品的精度评估

日尺度下3种降水产品定量误差评估指标值(表1)及降水产品估测降水数据与实测降水数据散点图结果(图4g-i)显示, 日尺度下ERA5与实测降水数据的相关性最差($r=0.63$), 而CMORPH和

GPM与实测降水数据的相关性相当。另外, 3种产品的回归线均在1:1线之下, 说明这3种降水产品均普遍低估了日降水。从MAE和RMSE来看, 3种降水产品的MAE值差别不大, 但CMORPH和GPM的RMSE值均 >9 , 明显比ERA5(RMSE=7.75)的大, 这说明CMORPH和GPM数据中异常偏离值的数量比ERA5的要多。在定量误差评估指标方面, CMORPH和GPM的表现相当, 并认为他们的表现是优于ERA5的。尽管ERA5的RMSE值为三者之中最小, 但其在 r 和MAE方面表现略差。

从月尺度的结果可知, 除受地理空间的影响外, 降水产品的月降水值与实测降水值间的偏差会随月份而波动。因此, 为探索日尺度下降水产品精度在不同月份的表现, 计算了CMORPH、GPM和ERA5在各月份的6个评估指标, 并绘制了雷达图(图7)。结果表明, ①对于 r 值而言, CMORPH在1月和12月的 r 值明显低于其他月份, ERA5在1月和12月的 r 值是3种产品中最高。GPM的 r 值随月份波动不大, 且一般来说是3种降水产品中最高, 但在12月份明显减小并低于ERA5在该月的 r 值。②对MAE而言, 3种产品在各月结果相近, 但CMORPH和GPM在6月的MAE值明显大于ERA5。3种产品非汛期(10月~次年3月)的MAE值均较低, 进入汛期(4~9月)后则显著增加。③对于RMSE来说, 其与MAE值随月份不

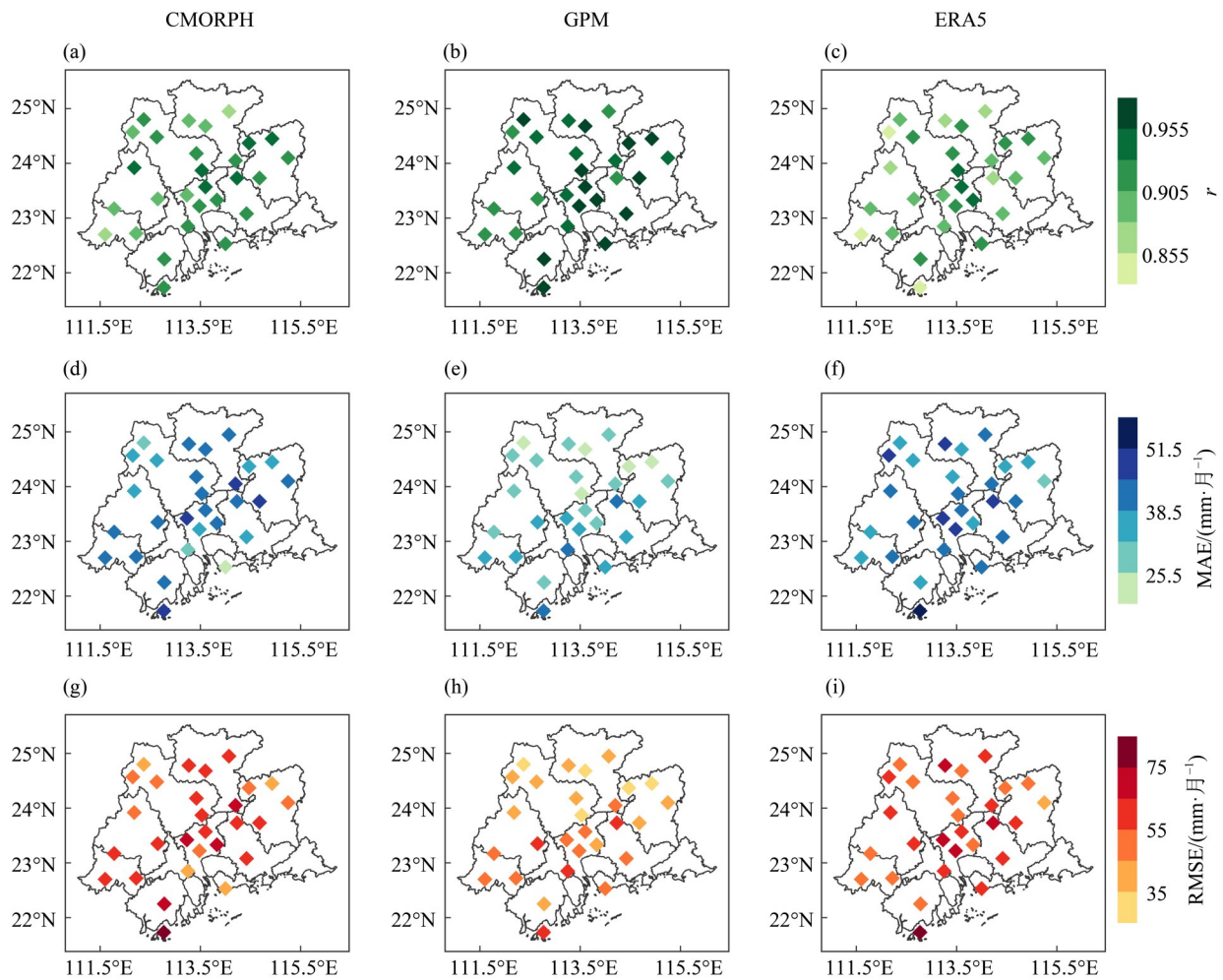


图6 月尺度下不同降水产品的定量误差评估指标空间分布

Fig. 6 Distribution of quantitative error evaluation metrics for different precipitation products at monthly scale

同呈现相同的变化趋势。但与MAE结果不同的是, ERA5在大部分月份的RMSE值均低于CMORPH和GPM的, 尤其对于5~7月而言。④ 由POD结果可知, ERA5在所有月份的POD值均接近1, 在3种产品中表现最优。CMORPH和GPM的POD值在12月、1月和2月明显低于其他月份, 说明这2种产品在干燥月份对降水事件的探测准确度较差, 但GPM在各月份的POD值均高于CMORPH。⑤ 对于FAR, 在大多数月份, ERA5的FAR值为最高, CMORPH为最低, 3种降水产品4~6月对降水事件的误报率是低于其他月份的。⑥ 就CSI值而言, CMORPH和GPM的CSI值在4~10月相近, 且均高于ERA5。而11月至次年3月期间, ERA5的CSI值最高, CMORPH的最低, 3种产品在多雨月份的表现均优于少雨月份, 相对而言GPM是3种降水产品中综合表现最好的。

本文还评估了降水产品在日尺度上对不同种

类降水事件的捕捉情况(图8)。由于大暴雨和特大暴雨发生的频率相对较少, 因此合并至 >100 mm的降水事件进行展示。结果表明, 就实测数据而言, 非雨天的发生频率是所有类型降水事件中最高。3种产品中CMORPH与实测数据的差异最小, GPM估计的非雨天发生频率与实测数据相差将近20%, ERA5则严重低估了非雨天的发生频率, 比实测数据低49.5%。对于小雨事件来说, 实测和CMORPH的小雨日发生频率相当, GPM和ERA5则高估了小雨日的发生频率, 尤其是ERA5, 比实测结果高了46.8%。对于中雨事件, 实测数据、CMORPH和GPM的结果相近, 而ERA5则再一次高估了中雨日的发生频率, 比实测结果高了4.4%。对于大雨事件和暴雨事件, 实测数据、CMORPH和GPM的结果差异较小, 而ERA5均低估了这两种类型降水事件的发生频率, 与实测数据相比分别低估了0.6%和0.8%。对于日降雨量 >100 mm的

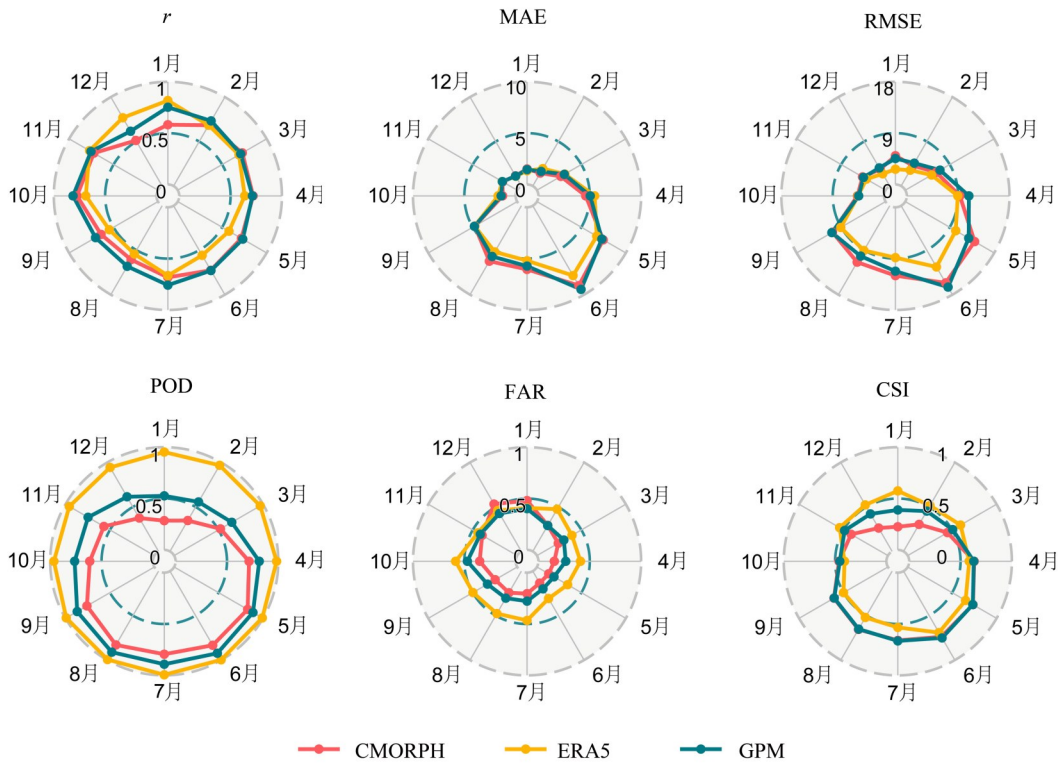


图 7 日尺度下不同降水产品在珠江三角洲地区逐月精度评估

Fig. 7 Monthly statistical metrics of different precipitation products in the PRD region at daily scale

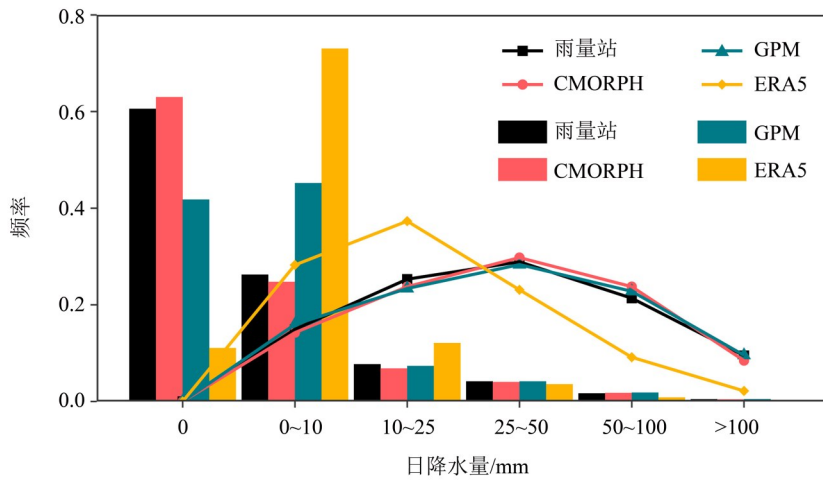


图 8 珠江三角洲地区不同降水事件的发生频率及其对年降水量的相对贡献

Fig. 8 Frequency of different precipitation events and their relative contribution to annual precipitation in the PRD

大暴雨事件, 实测数据、CMORPH 和 GPM 的结果均为 0.3% 左右, 而 ERA5 的结果则为 0.08%, 发生频率极低。从上述结果可知, CMORPH 对不同类型降水事件发生频率的估计是最准确的。而 GPM 对小雨和无雨日的估计与实测结果差别较大, 对中雨及强降雨事件的估计却较好, 说明其对中强降水有较好的探测能力。从 ERA5 对不同类型降水

事件的估计可看出, 其与实际降水情况差别较大, 并不能很好地反映真实事件。

从不同降水事件对年降水量相对贡献的角度进行分析发现, 实测数据、CMORPH 和 GPM 对年降水具有相同的相对贡献趋势, 且三者在具体数值上亦接近。日降水量 < 25 mm 的降水事件对 CMORPH 和 GPM 降水的贡献率分别为 38% 和

39.3%，对实测降水的贡献率为 40.2%；日降水量 < 50 mm 的降水事件对 CMORPH 和 GPM 降水的贡献率分别为 67.8% 和 67.6%，对实测降水的贡献率为 69.2%；日降水量 < 100 mm 的降水事件对实测数据、CMORPH 和 GPM 降水的贡献率分别为 90.5%、91.5% 和 90.4%。由此可见，虽然大雨事件和暴雨事件的发生频率不高(频率约为 5.5%)，但对珠江三角洲地区总降水量的贡献程度很大，贡献率超过 50%。对于大暴雨和特大暴雨事件，其对实测数据、CMORPH 和 GPM 降水的贡献率分别为 9.5%、8.5% 和 9.6%，但发生频率均不到 0.5%。上述结果值得我们注意，尽管大雨及其以上级别降水事件在珠江三角洲地区的发生频率很低，但他们所导致的降水占这个地区总降水量相当大的一部分。

综上所述，CMORPH 对不同类型降水事件的表征能力最好，GPM 次之，而 ERA5 则无法很好地再现珠江三角洲地区降水的实际情况。

3 结 论

本研究通过计算 6 个统计指标和探究不同降水事件的出现频率，在年、月、日 3 个时间尺度上评估了 CMORPH、GPM 和 ERA5 降水产品在珠江三角洲地区的适用性，主要研究结论如下：

1) CMORPH、GPM 和 ERA5 在估计珠江三角洲的年降水和日降水方面表现不佳，而在月时间尺度上，3 种降水产品和雨量站实测降水之间的相关系数(r)较高，这表明实测降水和估计降水之间有很强的正线性关系。此外，由于月尺度和年尺度的降水数据是由日尺度累加得到的，在累加的过程中日尺度的误差在一定程度上被抵消，所以年尺度和月尺度下降水产品的精度比日尺度要高。而月尺度下降水产品的精度高于年尺度是由于月尺度下的误差几乎是呈相同的正或负偏差，因此月尺度误差累加后导致年尺度误差较大^[23]。就定量误差评估指标而言，GPM 在 3 个时间尺度上表

现均优于 CMORPH 和 ERA5， r 值较高、平均误差(MAE)及均方根误差(RMSE)较低。

2) 日尺度下 6 个评估指标在各月的结果显示，与 CMORPH 和 ERA5 相比，GPM 在各月均表现出与实测降水较强的一致性。就定量误差评估指标而言，3 种降水产品汛期的表现均比非汛期差，汛期的 MAE 值与 RMSE 值远大于非汛期。就探测能力评估指标而言，ERA5 对降水事件的探测准确度及误报率是 3 种产品中最高，3 种产品在干燥月份对降水事件的探测准确度较其他月份逊色，但误报率却是秋冬季较高，且他们对沿海附近站点的误报率均较内陆站点高。

3) 3 种降水产品年降水量的时空分布情况显示 GPM 能够比较准确地反映珠江三角洲地区降水的特征，CMORPH 虽然在时空分辨率上占据优势，但其严重低估了珠江入海口附近地区的年均降水量，而 ERA5 无论是在时间趋势或是空间分布的表现均与实际情况有较大差异。

4) 从对不同类型降水事件的表征这方面来看，ERA5 严重高估小雨和中雨事件的发生频率且低估大雨和暴雨事件的发生频率。CMORPH 和 GPM 对各类型降水事件的估计能力均较好，尤其是 CMORPH 和 GPM 相较于 CMORPH 的不足之处在于其高估了小雨事件的发生频率。就他们的相对贡献而言，CMORPH 和 GPM 都能很好地反映实测数据对不同类型降水事件的贡献。

就本研究中进行的分析而言，GPM 是 3 种产品中最能反映珠江三角洲地区的实际情况的，其次是 CMORPH，但在使用 CMORPH 进行研究时需特别注意其对珠江入海口地区降水的严重低估情况。对于这一小区域而言，尽量避免使用 ERA5 再分析数据进行研究。总的来说，本研究深化了对 CMORPH、GPM 和 ERA5 数据性能的认识，为后续研究完善产品反演算法提供重要指引，给选择合适的高时空分辨率降水产品在珠江三角洲地区进行研究提供参考。

参考文献：

成璐, 沈润平, 师春香, 等, 2014. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象, 40(11): 1372-1379.
金晓龙, 邵华, 张弛, 等, 2016. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报, 31(12): 2074-

2085.

李建, 宇如聪, 孙激, 2013. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J]. 气象学报, 71(4), 652-659.

- 李麒崙,张万昌,易锐,等,2018. GPM与TRMM降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展,29(3): 303-313.
- 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等,2022. ERA5再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. 干旱区地理,45(1): 66-79.
- 宋子珏,何建新,李学华,等,2018. 星载降水测量雷达降水产品研究进展[J]. 气象科技,46(4): 631-637.
- 许时光,牛铮,沈艳,等,2014. CMORPH卫星降水数据在中国区域的误差特征研究[J]. 遥感技术与应用,29(2): 189-194.
- DEMBÉLÉ M,ZWART S J, 2016. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa[J]. *Int J Remote Sens*,37(17):3995-4014.
- DUTRA E,VITERBO P,MIRANDA P M A, 2008. ERA-40 reanalysis hydrological applications in the characterization of regional drought[J].*Geophys Res Lett*, 35(19):116-122.
- GUO H,CHEN S,BAO A M,et al, 2015. Inter-comparison of high-resolution satellite precipitation products over Central Asia[J]. *Remote Sens*, 7(6):7181-7211.
- 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.
- JIANG Q,LI W Y,FAN Z D, et al, 2021. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland[J]. *J Hydrol*,595:125660.
- JOYCE R J, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al, 2004. CMORPH:A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. *J Hydrometeorol*, 5(3): 487-503.
- KIDD C, BECKER A, HUFFMAN G J, et al, 2017. So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges?[J] *Bull Am Meteorol Soc*, 98(1):69-78.
- MAGGIONI V,MEYERS P C,ROBINSON M D 2016. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the tropical rainfall measuring mission (TRMM) era[J]. *J Hydrometeorol*, 17(4): 1101-1117.
- MASOOD M,SHAKIR A S,AZHAR A H,et al, 2020. Assessment of real time,multi-satellite precipitation products under diverse climatic and topographic conditions[J]. *Asia Pac J Atmos Sci*,56(4):577-591.
- MEI Y W,ANAGNOSTOU E N,NIKOLOPOULOS E I,et al, 2014. Error analysis of satellite precipitation products in mountainous basins[J]. *J Hydrometeorol*, 15(5): 1778-1793.
- SIMPSON J,ADLER R F,NORTH G R 1988. A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite[J]. *Bull Am Meteorol Soc*,69(2):278-295.
- XIE P P,JOYCE R,WU S R,et al, 2017. Reprocessed,bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998[J]. *J Hydrometeorol*,18(6):1617-1641.
- YONG B,LIU D,GOURLEY J J,et al, 2015. Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis implications for its successor global precipitation measurement mission[J]. *Bull Am Meteorol Soc*,96(2):283-296.
- YUAN F,ZHANG L M,SOE K M W,et al, 2019. Applications of TRMM- and GPM-era multiple-satellite precipitation products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Myanmar[J]. *Remote Sens*, 11(2):140.
- ZHANG Z X,TIAN J X,HUANG Y H,et al, 2019. Hydrologic Evaluation of TRMM and GPM IMERG Satellite-Based Precipitation in a Humid Basin of China[J]. *Remote Sens*, 11(4):431.
- ZHANG Z Y,LOU Y D,ZHANG W X,et al, 2022. Assessment of ERA-Interim and ERA5 reanalysis data on atmospheric corrections for InSAR[J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*,111:102822.

(责任编辑 秦社彩)