

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.003

长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估

胡文韬^{1,2}, 余钟波^{1,2}, 陈松峰³, 谷黄河^{1,2}, 鞠 琴^{1,2}, 周 婷^{1,4}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学全球变化与水循环国际合作联合实验室, 江苏 南京 210098;

3. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029; 4. 安徽农业大学工学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 为评估不同降水数据在长江上游的适用性, 基于气象站点观测数据, 采用多种评价指标, 定量评估了卫星反演降水数据(IMERG-Final、GSMaP-Gauge)及再分析降水数据(ERA5-Land)在长江上游的应用精度, 并分析了各降水数据在不同等级降水的误差结构。结果表明: 3套降水数据均能准确捕捉流域降水东高西低的空间格局, 与观测降水有着良好的相关性, 且2015—2019年表现平稳, 有可长期应用的潜力; 各降水数据时间分辨率越高, 误差相对越大, 在流域地形变化剧烈的中部误差更大; 对弱降水易错报高估, 对强降水的低估随降水强度上升而加剧; 两套卫星反演降水数据总体误差较小, 适用性良好, IMERG-Final有更好的误差控制能力, GSMaP-Gauge对降水发生的识别更为准确; ERA5-Land明显高估流域降水, 尤其在西南部地区。

关键词: 卫星反演降水; 再分析降水; 适用性评估; 误差结构分析; 长江上游

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0015-10

Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin

HU Wentao^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}, CHEN Songfeng³, GU Huanghe^{1,2}, JU Qin^{1,2}, ZHOU Ting^{1,4}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Provincial Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China;

4. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to assess the applicability of different precipitation products in the upper Yangtze River Basin, based on meteorological station data, using multiple evaluation indicators, a quantitative assessment was conducted on the application accuracy of satellite retrieval (IMERG-Final and GSMaP-Gauge) and reanalysis (ERA5-Land) precipitation data in the upper Yangtze River Basin, and the error structures of different intensity precipitation in each dataset were analyzed. The results show that all three sets of products are able to accurately capture the spatial pattern of higher precipitation in the east and lower precipitation in the west of the basin, showing good correlation with observed precipitation and stable performance during 2015–2019, which indicates the potential of long-term application. Products with higher temporal resolution perform worse, larger errors occur in the central region with drastic changes in basin topography, and there is a tendency to overestimate weak precipitation and underestimate strong precipitation, with underestimation increasing with precipitation intensity. The overall errors of the two satellite products are small, with good applicability. IMERG-Final demonstrates better error control capability, while GSMaP-Gauge shows more accurate identification of precipitation events and ERA5-Land significantly overestimates basin precipitation, particularly in the southwest.

Key words: satellite retrieval precipitation; reanalysis precipitation; applicability assessment; error structure analysis; upper Yangtze River Basin

降水量信息的获取主要有站点观测(雨量计、地基雷达)、卫星反演和再分析资料3种途径^[1]。雨量计观测数据虽然精度高, 但无法在站网分布稀疏的流域很好地代表面上降水的异质性; 地基雷达观测数据则受

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240217, 42271020); “一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2022491511); 水灾害防御全国重点实验室专项经费资助项目(522012232, 523024812, 521013122)

作者简介: 胡文韬(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律模拟研究。E-mail: getup@hhu.edu.cn

通信作者: 余钟波(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟研究。E-mail: zyu@hhu.edu.cn

引用本文: 胡文韬, 余钟波, 陈松峰, 等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 15–24.

HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 15–24.

到运行环境等限制,在地形复杂地区难以发挥效用^[2]。卫星反演和再分析资料则以其较高的精度和时空连续性以及数据获取方便快捷的优势在近几年得到广泛关注^[3-4],并有国内外学者在全球范围内针对具有不同下垫面特征的流域和地区进行了各类精度评估及应用研究^[5-10]。

1997 年发射的关注热带亚热带海上中至大雨的 TRMM(tropical rainfall measuring mission)卫星的降雨分析数据 TMPA(TRMM multi-satellite precipitation analysis)已在水文领域得到了广泛应用^[11-13]。2014 年发射的全球降水观测(global precipitation measurement,GPM)卫星,为水文领域带来了更为准确、时空分辨率更高的降水数据。最新一代的 GPM 卫星降水数据 IMERG(the integrated multi-satellite retrievals for GPM)和 GSMaP(global satellite mapping of precipitation)在我国有着良好的适用性^[12,14],且经过校正的 IMERG-Final(以下简称 IMERG-F)和 GSMaP-Gauge(以下简称 GSMaP-G)表现优于纯卫星数据^[15]。相较于 TRMM,GPM 卫星对固态降水和微量降水(小于 0.5 mm/h)更为敏感^[11,13]。

欧洲中期天气预报中心在 1979 年开展了大气再分析方面的研究^[16],其中第五代数据 ERA5 于 2018 年发布^[16]。ERA5 再分析降水数据在我国北温带的精度最高,春季和冬季的精度较高^[17]。ERA5-Land(以下简称 ERA5-L)作为 ERA5 陆地部分的改进版,于 2019 年发布,通过 ERA5 的气象强迫场驱动考虑水文过程的陆面模式,具有更高的空间分辨率^[18]。近几年已有相关研究对 2 m 气温、土壤湿度、径流和湖泊相关数据进行了初步评估^[19],结果表明 ERA5-L 比 ERA5 中的陆地数据更为准确^[18]。

长江流域受灾频繁,易发生非旱即涝、旱涝交替的情况^[20],近年来极端气候事件更是时有发生^[21-23]。长江流域洪水基本都是由暴雨产生,以往的洪水研究着重于受灾严重的中下游,而忽略了水库林立、山洪频发的上游地区,其水库群联合调度、山洪灾害防治相关研究对全流域防洪工作同样具有重要的实践意义^[21]。目前在长江上游流域,已有对多种降水数据集的评估工作,但仍存在缺乏卫星降水与再分析降水之间的对比评估、评估时段较旧等问题。例如:丁光旭等^[24]对比了多种再分析降水数据在长江流域的适用性,但主要基于上一代再分析数据,且评估时段止于 2016 年;郭家力等^[25]虽然在长江流域对比评估了 1999—2019 年的多个卫星反演降水数据,但没有考虑最新一代的 GPM 降水数据。而 ERA5-Land 作为 2019 年最新发布的数据集,更是少有在长江上游评估其降水数据的相关研究。故本文选择长江上游作为研究区域,以中国地面气候资料日值数据集作为参考,使用皮尔逊相关系数、平均误差、均方根误差、探测率、错报率等评价指标和误差分解方法,评估了 2014 年 3 月 2 日至 2019 年 12 月 31 日,来自全球降水计划(GPM)的两个卫星反演数据(IMERG-F、GSMaP-G)以及再分析降水数据 ERA5-L 的精度及其误差结构,以期为将来长江流域的防洪抗旱工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

长江上游段源起唐古拉山脉格拉丹东,终于湖北宜昌,全长 4 504 km,流域面积约 100 万 km²,占全流域面积的 56%^[21]。上游地形复杂,生态丰富,有广泛分布的冻土冰川、受高空西风带控制的高寒山区^[26]、降水充沛且水库林立的四川盆地^[27]等,海拔在 27~6 447 m 间,落差明显,是我国水电开发的要地。流域年降水量 723~1 134 mm,年平均气温 8.6~16.8℃,不同区间水循环过程差距大,水资源时空分布具有很高的异质性^[28]。长江上游高程及选用的气象站点分布如图 1 所示。

1.2 研究资料

1.2.1 站点降水数据

2014—2019 年逐日降水数据来自经过国家气象信息中心质量控制的 中国地面气候资料日值数据集 SURF_CLI_CHN_MUL_DAY V3.0(<http://data.cma.cn/>),日降水数据为北京时间前一日 20 时至当日 20 时的累计降水量。经过严格的质量控制和数据勘误,筛选得到 77 个位于研究区域内的气象站点(图 1)。

1.2.2 卫星反演及再分析降水数据

本文选用了两个卫星反演降水数据及一个再分析降水数据:① 经过全球降水气候学计划(Global Precipitation

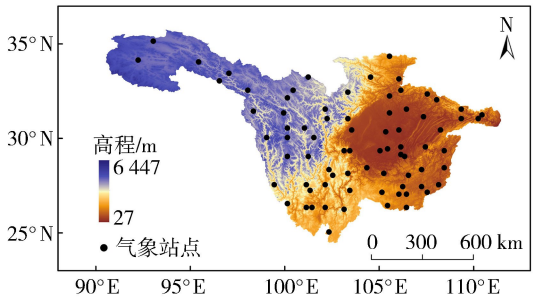


图 1 长江上游高程及气象站点分布

Fig.1 Topography and gauge locations of the upper Yangtze River Basin

Climatology Project, GPCP) 月降水数据修正的半小时数据集 GPM-IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly V06^[29] 中的经过后处理的“precipitationCal”降水数据 (IMERG-F); ②经美国国家海洋和大气管理局气候预测中心 (NOAA Climate Prediction Center) 日降水数据校正后^[30] 的“GPM-GSMaP Gauge-calibrated Rainfall Product V7”^[30] 日降水数据 (GSMaP-G); ③ERA5-L^[31] 再分析数据集提供的小时降水数据。各数据集来源及时空分辨率见表 1。

表 1 数据集来源和时空分辨率
Table 1 Dataset source and spatio-temporal resolution

数据集	数据来源	时间分辨率/h	空间分辨率/(°)	数据获取网址
IMERG-F	美国航空航天局	0.5	0.1	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary?keywords=imerg
GSMaP-G	日本宇宙航空研究开发机构	1	0.1	https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=0
ERA5-L	欧洲中期天气预报中心	1	0.1	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form

IMERG-F 和 ERA5-L 提供的日降水数据均国际协调时间 (UTC) 0—24 时的累计降水量, 与站点日降水量的统计方式 (北京时间前一日 20 时至当日 20 时) 不一致, 故使用更高分辨率的半小时/小时数据参与评估, 而 GSMaP-G 中有对应的日降水数据 (p12 h–11 h) 可以直接使用。受 GPM 卫星发射时间限制, 参与评估的时段为 2014 年 3 月 2 日至 2019 年 12 月 31 日。尽管选用的 IMERG-F 和 GSMaP-G 是经过校正后的数据, 不过校正过程并非直接使用地面站点资料, 而是基于观测数据的分析数据, 并且 IMERG-F 使用的是月尺度数据, 77 个站点中仅有 18 个国际地面交换站, 故本文的评估依然能在一定程度上反映卫星反演降水数据的适用性。

1.3 研究方法

1.3.1 数据预处理

IMERG-F、ERA5-L 降水数据由 UTC 转换为北京时间 (UTC+8h), 进行单位转换后, 经统计得到与站点降水统一的日、月、年降水数据。需要注意的是, ERA5-L 中每日 UTC00—01 时的降水可直接得到, 其余小时的降水由当前时段数据减去前一时段数据得到, 另外, ERA5-L 与卫星降水数据的格网中心点不匹配, 需要使用双线性插值进行统一处理。

由于站点有限, 不足以表达整个流域面上降水的空间特征, 为避免进一步引入代表性误差, 直接在网格尺度上进行各降水数据的评估。选择至少有一个站点的网格, 对于只有一个站点的, 直接使用站点的降水作为网格降水的参考值; 对网格内有多个站点的, 取同期各站的算术平均值作为网格降水的参考值。

1.3.2 统计指标

连续性评价指标包括皮尔逊相关系数 (CC)、平均误差 (ME)、均方根误差 (RMSE)、归一化均方根误差 (NRMSE)、Kling-Gupta 效率系数 (KGE)^[32-34]。KGE 是一个综合考虑相关系数和偏差、变异率的指数, 取值为负无穷至 1, 越大表示效果越好。

分类评价指标采用探测率 (POD)、错报率 (FAR)、关键成功率 (CSI)^[34]。考虑到雨量计的最小计量单位为 0.1 mm, 设置降水阈值为 0.1 mm, 若某日降水量超过阈值即判定为有降水事件发生, 否则无降水。同一天内, 若卫星反演数据和站点均有降水, 标记为成功探测; 若卫星反演数据有降水而站点无, 标记为错报; 若卫星反演数据无降水而站点有, 标记为漏报。

1.3.3 降水分级与误差分解

为分析各降水数据在不同降水等级下的误差结构, 假设各点的每日降水为独立事件, 按照不同降水量 (0.1 ~ <5、5 ~ <10、10 ~ <15、15 ~ <20、20 ~ <25、25 ~ <50、50 mm 及以上) 共分为 7 级。分类主要参考降水量等级划分标准^[35], 1 ~ 7 级降水大致分别对应小雨、小至中雨、中雨、中至大雨、大雨、大至暴雨、暴雨。

参照成功探测、错报、漏报事件的定义, 将所有降水事件的绝对误差分解为 4 类: 准报高估误差、准报低估误差、错报误差、漏报误差。

2 结果与讨论

2.1 总体表现

2.1.1 2015—2019 年年均降水对比

站点观测以及 3 套降水数据 2015—2019 年各点的平均年降水量分布如图 2 所示, 在空间分布上, 各降水数

据的表现与站点观测一致,降水量自西向东逐渐增加。IMERG-F 和 GSMaP-G 的误差分布相似,在多数点上表现为高估,但大部分误差较小,低估的情况主要发生在降水最为丰富的几处;ERA5-L 则高估了流域降水,尤其在西南一带存在严重的正偏差。结合图 1 的高程数据可知,IMERG-F 和 GSMaP-G 的误差在高程变化较大的中部明显更高,推测是由于卫星反演算法受复杂地形限制。IMERG-F 总体上相对误差程度更低,但在中部 GSMaP-G 的发挥更为稳定。在赣江流域^[36]、四川省^[37]的评估研究同样表明,卫星反演降水数据在地形复杂的山区精度较差。刘俊峰等^[38]在全国对前代卫星反演降水数据 TMPA 进行评估,结果表明卫星反演降水数据在降水丰富的地区效果更好,与本文结论存在差异,是由于新一代卫星反演降水数据已针对弱降水探测能力作出改进^[11]。

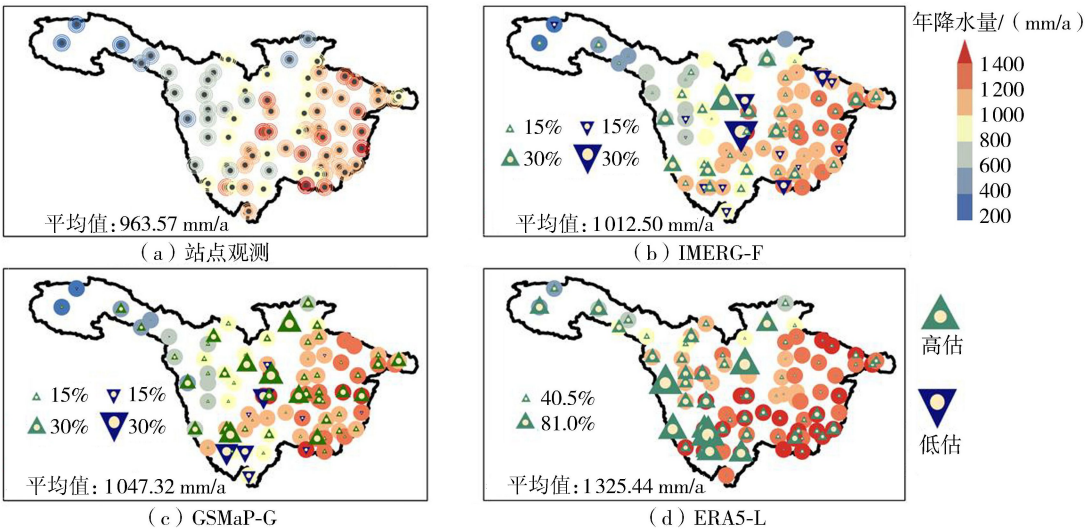


图 2 2015—2019 年站点观测及各降水数据年均降水量

Fig. 2 Average annual precipitation of site observations versus each precipitation product from 2015 to 2019

2.1.2 综合评价指标年际变化

降水数据能否替代站点观测值很重要的一点在于其质量是否稳定,是否随时间而波动^[33]。2014—2019 年各降水数据 KGE、CSI 的各站点均值逐年变化情况表明,各降水产品年际表现相对平稳(图 3)。GSMaP-G 各年 KGE 和 CSI 均最高,基本在 0.6 以上,表现优异;IMERG-F 的 KGE 及 CSI 均低于 GSMaP-G,但也都在 0.5 以上,表现良好;ERA5-L 的 CSI 虽然与 IMERG-F 相近,但 KGE 明显低于两套卫星反演降水数据,表现较差。

2.1.3 各级降水发生频率及降水量分布

由图 4(a)可知,3 套降水数据都有合理的频率分布,与实际分布较为接近,1 级降水占比最大,在 60% 以上,各级降水频率占比逐级递减,但在 6 级频率有小幅上升。对比发现,各降水数据对 1 级降水频率占比均有所高估,且 GSMaP-G 偏

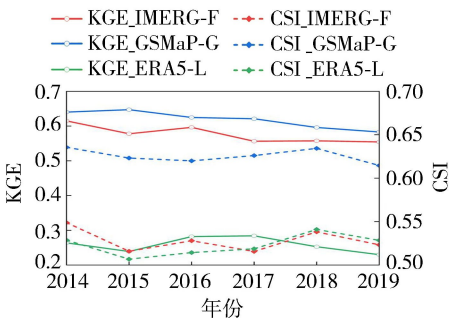


图 3 降水数据逐年评价指标变化

Fig. 3 Year-by-year changes in evaluation indicators of precipitation products

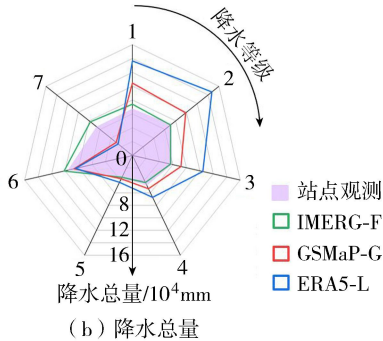
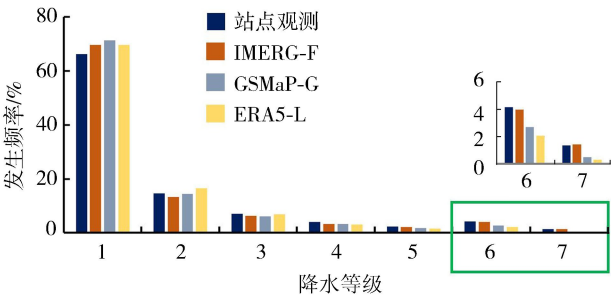


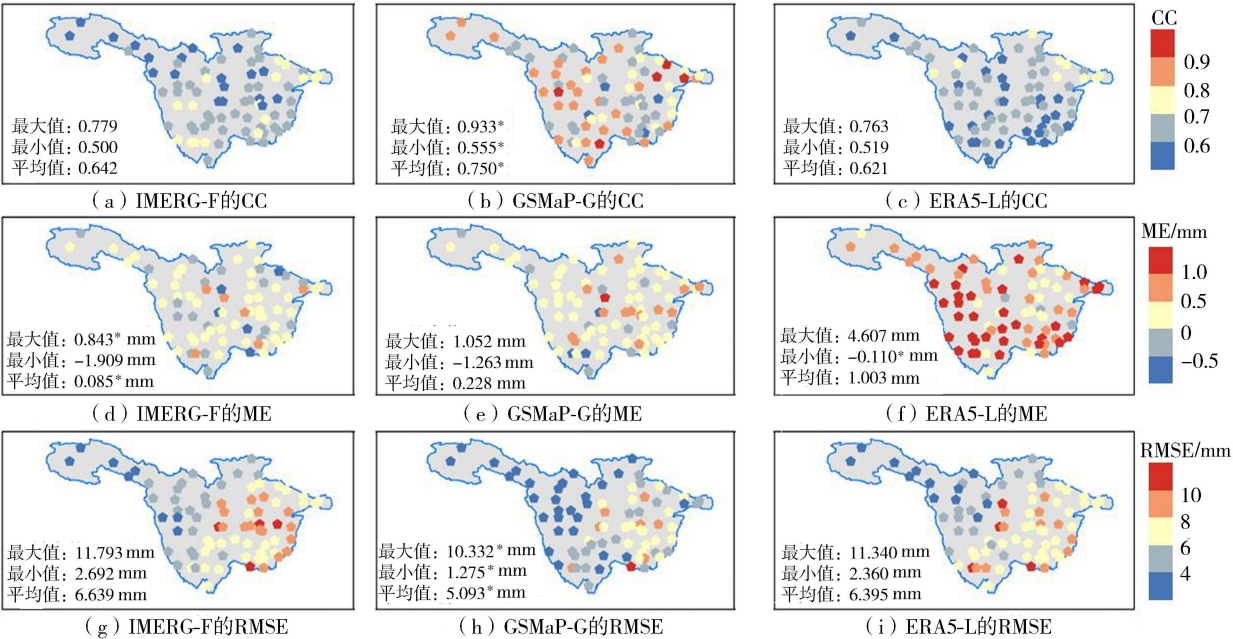
图 4 不同等级降水发生频率和降水总量
Fig. 4 Frequency and total precipitation of different levels of precipitation

多;IMERG-F 频率分布更接近实际,在对强降水的估计上表现突出,GSMaP-G 和 ERA5-L 在 6、7 级降水处都出现明显低估。GSMaP-G 和 ERA5-L 对 4~7 级降水占比的低估程度逐级上升,且 ERA5-L 的低估程度更高。

由图 4(b)可知,在研究时段内,观测得到的各级降水总量分布较为均匀,同样有各级降水总量逐级递减的趋势,且在 6 级处有突增。总体上看,IMERG-F 最符合实际,分布与站点观测基本一致,在 1、6、7 级表现为偏多,且 7 级偏差最高;GSMaP-G 和 ERA5-L 则表现为弱降水偏多,强降水偏少,明显高估了 1~3 级降水总量,而低估了 7 级降水总量,ERA5-L 高估问题尤为严重。

2.2 日尺度评价

由图 5 和图 6 可知,对于连续性评价,卫星反演降水数据总体好于再分析降水数据,且 IMERG-F 和 GSMaP-G 各有优势;对于分类评价,GSMaP-G 表现优异,IMERG-F 和 ERA5-L 则各有不足。



注:其中带“*”的数字分别为对应指标的最优值。下同。

图 5 日尺度降水数据连续性评价指标

Fig.5 Results of continuity evaluation index for precipitation products on daily scale

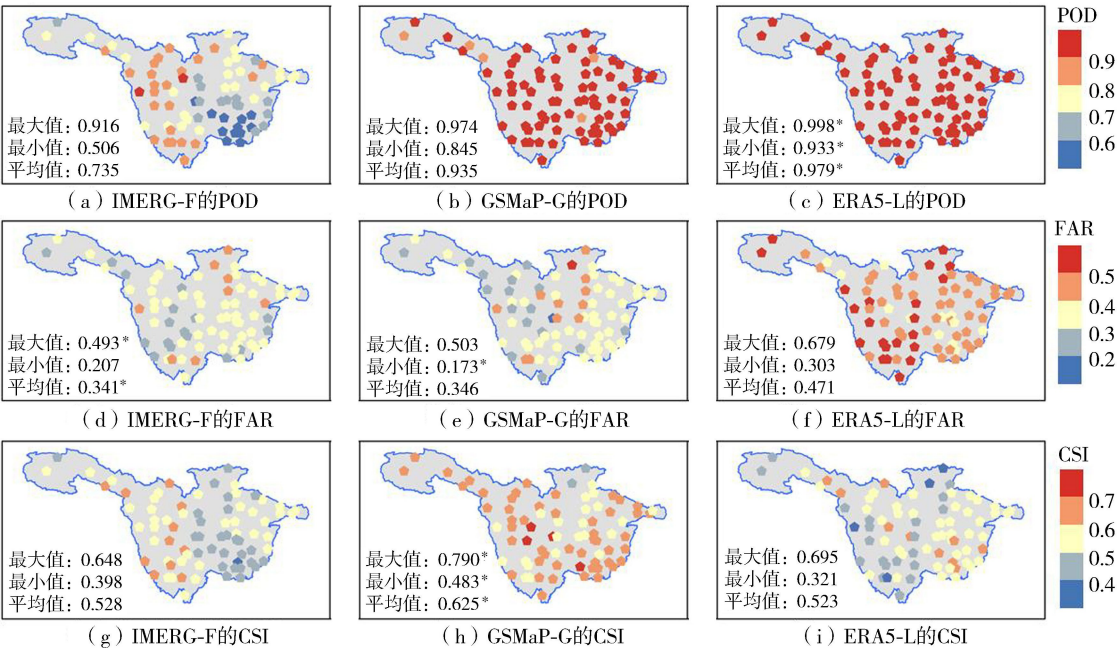


图 6 日尺度降水数据分类评价指标

Fig.6 Results of classification evaluation index for precipitation products on daily scale

在相关性方面,GSMaP-G 整体表现最好,相关系数均值为 0.750,而其他两套降水数据均在 0.6 左右;IMERG-F 总体相关程度略高于 ERA5-L,前者的相关性空间分布表现为南高北低,后者则恰好相反。在平均误差方面,总体上 3 套降水数据均为正偏差占主导地位;IMERG-F 的表现最好,负偏差的点相较更多且 ME 普遍较低,ME 均值接近 0,表现出了较好的误差控制能力;GSMaP-G 表现稍次,但大多处的 ME 不高,均值仅有 0.228;ERA5-L 则存在明显的正偏差,ME 均值超过 1,且各站点处都相对较高,最大值高达 4.607;GSMaP-G、IMERG-F 的 ME 分布无明显空间分布规律,ERA5-L 在西南区明显更高。在均方根误差方面,GSMaP-G 表现更好,整体低于其他降水数据;IMERG-F 和 ERA5-L 表现相近,且前者更高;结合图 2 可知,3 套降水数据的 RMSE 空间分布特征与平均年降水量一致,都表现为东高西低,说明流域降水越丰富的地区,误差水平越高。

在探测率方面,GSMaP-G 和 ERA5-L 全流域上表现出一致的高水平,平均值均在 0.9 以上,ERA5-L 的最小值更是高达 0.933;IMERG-F 整体表现良好,平均值在 0.7 以上,但在东南区表现较差,基本低于 0.7。在错报率方面,两套卫星反演降水数据表现良好,平均值均在 0.3 左右,ERA5-L 表现较差,平均值高达 0.471;IMERG-F 和 GSMaP-G 在东部的错报率更高,而 ERA5-L 在西南区更高。在关键成功率方面,GSMaP-G 整体高于其余两套降水数据,最大、最小、平均值均更高;IMERG-F 和 ERA5-L 水平相近,但在西南部 IMERG-F 表现更好,东南部 ERA5-L 表现更好。

为进一步了解各降水数据在不同降水强度下的表现,统计了各级降水下的 POD 及 FAR(表 2)。各降水数据的 POD 随降水强度逐级上升,FAR 则逐级下降。就 1 级降水而言,IMERG-F 的 POD 仅有 0.623,明显低于其他降水数据,且 3 套降水数据的 FAR 均较高,超过 0.4,但这两种情况随着降水强度的增大都得到了极大改善。

整体而言,IMERG-F 表现出更强的总体误差控制能力,但 GSMaP-G 的稳定性、与实测的相关性更高。这是因为 IMERG-F 由月数据校正,能体现出更强的降水总量控制能力,而 GSMaP-G 的日数据校正使得其相关性更高。3 套降水数据都倾向于高估流域降水,且 ERA5-L 尤为突出,GSMaP-G 和 IMERG-F 误差在降水较丰富的东部更高,ERA5-L 则在西南部更高。GSMaP-G 对降水事件发生的探测能力更强,有着高水平探测率的同时,有相对较低的错报率;IMERG-F 表现得较为“保守”,探测率相对较低,尤其在东南部;ERA5-L 则表现得较为“激进”,探测率最高的同时,也有着更高的错报率。各降水数据探测能力随降水等级上升而上升。各降水数据都存在易错报弱降水的问题,ERA5-L 的高错报和 IMERG-F 的低探测问题更为严重。曾岁康等^[37]在四川省的评估研究中提出,IMERG-F 的探测能力要优于 GSMaP-G,由图 6 可见流域中部 GSMaP-G 的错报情况确实较多,但从长江上游整体来看,GSMaP-G 的错报率并没有明显高于 IMERG-F。

根据不同降水数据在长江上游的适用性评估结果,GSMaP-G 在流域中心的误差相对较小,对降水发生的识别更为准确;IMERG-F 对降水总量的控制更好,建议使用 GSMaP-G 和 IMERG-F 这两套卫星反演降水数据,相对而言,ERA5-L 的适用性较差。

2.3 多时间尺度评价

图 7 为多时间尺度下(1、5、10、15、20、30 d)各降水数据 CC、NRMSE、KGE 的箱线图。考虑到缺乏 2014 年 3 月 2 日之前的数据,其中月数据不包括 2014 年 3 月。

箱体的长短代表着降水数据各站点评价指标的集中程度,能在一定程度上反映空间上降水数据性能的稳定性。3 套降水数据中,IMERG-F 各指标各时间尺度下的箱体长度都相对较短,说明在流域范围内不同点 IMERG-F 的发挥要更加稳定。对于 CC,GSMaP-G 的箱体明显较其他两套降水数据更长,说明其 CC 在空间上不确定性相对较高。对于 KGE,箱体都普遍较长,长度无明显变化规律,说明该综合评价指标在不同时间尺度都能很好地展示出降水数据在不同点上性能的差异性。箱体位置的高低代表着各点评价指标总体水平。可见对于 3 套降水数据,时间分辨率越低,总体相关性越高,归一化均方根误差越低,降水数据性能更

表 2 不同等级降水下的探测率及错报率
Table 2 Probability of detection and false alarm rate under different levels of precipitation

降水等级	POD			FAR		
	IMERG-F	GSMaP-G	ERA5-L	IMERG-F	GSMaP-G	ERA5-L
1	0.623	0.905	0.969	0.456	0.434	0.552
2	0.871	0.987	0.997	0.143	0.138	0.277
3	0.937	0.991	0.997	0.076	0.074	0.157
4	0.957	0.990	0.998	0.050	0.048	0.100
5	0.970	0.996	0.998	0.027	0.031	0.066
6	0.974	0.994	0.999	0.023	0.019	0.029
7	0.987	0.995	1.000	0.009	0.013	0.011

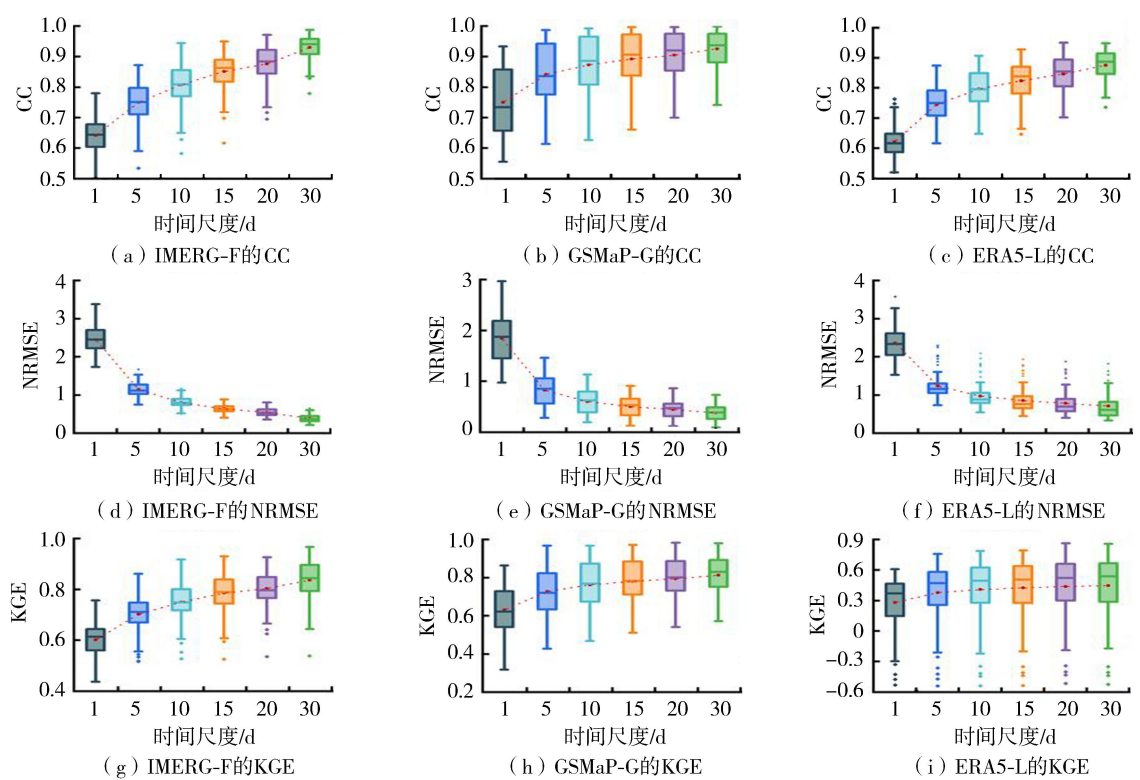


图7 不同时间尺度下评价指标变化情况

Fig.7 Changes of evaluation indexes at different time scales

好,与 Francesco 等^[4,34]的研究结论一致。

综上可知,IMERG-F 多时间尺度总体发挥更为稳定;KGE 能够在不同时间尺度下有效区分降水数据性能高低;流域内各降水数据时间分辨率越低,适用性越高。

2.4 误差分解

由表 3 可知,3 套降水数据的误差结构表现一致,1 级降水误差占比最大,占总体误差 30% 以上,ERA5-L 中更是达到 46%。总体上误差占比有逐级减小的趋势,但都在 6 级处有突增,6 级降水误差占比仅次于 1、2 级。

由图 8 可知,3 套降水数据的总体绝对误差中,准报误差均占主要地位。IMERG-F 的漏报误差和错报误差占比相近,GSMaP-G 与 ERA5-L 的漏报误差占比都非常低;IMERG-F 和 GSMaP-G 的准报高估及低估误差占比相近,而 ERA5-L 的高估误差占比要比低估误差略高。高玥等^[39]的研究同样表明,卫星反演降水数据的误差组成中,准报误差占比最大。

就不同等级降水的各类误差占比而言,1 级降水中准报高估误差约占 60%,占主导地位,随着降水等级增大,高估误差占比逐渐变小,而低估误差逐渐占据主导。IMERG-F 的各级误差中,错报误差和漏报误差占比都相差不大,且两者的占比都随降水等级的上升而下降;GSMaP-G 和 ERA5-L 中错报误差占比也基本随降水等级增加而下降,漏报误差则在各级降水中占比都很小。同时,1~3 级降水误差中还有相当一部分为错报误差和漏报误差。

综上可知,在降水总量上,IMERG-F 最为接近真实情况,但其漏报误差较大,不利于防洪计算,而 GSMaP-G 和 ERA5-L 都存在明显的高估情况,GSMaP-G 的高估水量主要来源于错报事件,ERA5-L 则还有较大一部分来自准报事件中偏向高估的水量。针对不同强度的降水,随着降水强度的增大,各降水数据逐渐从高估转为严重低估,错报问题逐渐减轻。各降水数据对弱降水事件的捕捉还有很大的不确定性,易错报高估,对中等降水的捕捉能力较好,对强降水则存在低估程度随降水强度上升而加剧的问题。

表 3 降水数据不同降水等级误差占比

Table 3 Errors percentage of different precipitation intensities for precipitation products

降水等级	误差占比/%		
	IMERG-F	GSMaP-G	ERA5-L
1	33	39	46
2	18	16	16
3	12	10	8
4	8	7	6
5	6	5	4
6	14	13	11
7	9	10	9

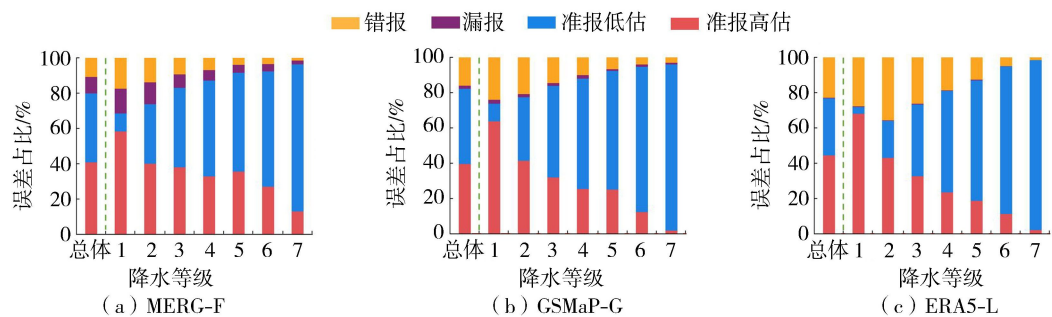


图8 降水数据的误差结构

Fig.8 Error structures of precipitation products

3 结 论

- a. 3套降水数据均能准确捕捉降水空间上东高西低的分布格局,2014—2019年表现平稳,有可长期应用的潜力;各降水数据在流域中部地形变化大的区域误差偏大,IMERG-F和GSMaP-G在降水更丰富的东部误差总体较西部更大;IMERG-F不同强度降水的发生频率及总量分布都十分接近观测资料,GSMaP-G和ERA5-L则都存在低估强降水的发生频率、降水总量以及高估弱降水的降水总量的问题,且ERA5-L更为严重。
- b. GSMaP-G与观测降水的相关性最高,均方根误差最小,对降水事件的探测能力最强;IMERG-F则有良好的误差控制能力,但对降水事件的探测能力较弱,尤其在东南部,且弱降水漏报较多;ERA5-L明显高估流域降水,尤其在西南部,虽然探测率较高,但错报率也较高;各降水数据对强降水事件发生的探测能力更好,但都存在易错报弱降水的问题;时间分辨率越低,各降水数据在流域的表现越好。
- c. 3套降水数据的误差结构高度一致,总体上各强度降水的误差占比有随强度上升而减少的趋势,但25~<50mm的日降水误差占比有明显上升;GSMaP-G和ERA5-L漏报误差占比极少,IMERG-F漏报误差相对较大,与错报误差占比相近,且随着降水强度的增大,错报和漏报误差占比都有所下降;各降水数据对弱降水事件的捕捉还有很大的不确定性,易错报高估,对中等降水的捕捉能力较好,对强降水则存在低估程度随降水强度上升而上升的问题。
- d. 根据不同降水数据在长江上游的适用性评估结果,GSMaP-G在流域中心的误差相对较小,对降水发生的识别更为准确;IMERG-F的对降水总量的控制更好,建议使用GSMaP-G和IMERG-F这两套卫星反演数据,相对而言,ERA5-L的适用性较差。

参考文献:

[1] HONG Yi, DO Hongxuan, KESSLER J, et al. Evaluation of gridded precipitation datasets over international basins and large lakes [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127507.

[2] 唐国强,李哲,薛显武,等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 340-346. (TANG Guoqiang, LI Zhe, XUE Xianwu, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River Basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 340-346. (in Chinese))

[3] LI Zhe, YANG Dawen, HONG Yang. Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2013, 500: 157-169.

[4] FRANCESCO C, LUCA B, ANTONIO P, et al. Assessment of GPM and SM2RAIN-ASCAT rainfall products over complex terrain in southern Italy [J]. Atmospheric Research, 2018, 206: 64-74.

[5] 陈汉清,鹿德凯,周泽慧,等. GPM 降水产品评估研究综述[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 27-34. (CHEN Hanqing, LU Dekai, ZHOU Zehui, et al. An overview of assessments on global precipitation measurement (GPM) precipitation products [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 27-34. (in Chinese))

[6] 徐高洪,汪青静. 多卫星遥感降水产品在柬埔寨的应用比较分析[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 74-82. (XU Gaohong, WANG Qingjing. Application analysis on remote sensing precipitation datasets in Cambodia [J]. Yangtze River, 2018, 49(22): 74-82. (in Chinese))

[7] BECK E H, VERGOPOLAN N, PAN M, et al. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6201-6217.

[8] 贾玉雪, 张奇, 曾冰茹, 等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 8-16. (JIA Yuxue, ZHANG Qi, ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 8-16. (in Chinese))

[9] 王皓, 罗静, 叶金印, 等. CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料估算淮河流域面雨量对比分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 189-194. (WANG Hao, LUO Jing, YE Jinyin, et al. Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(3): 189-194. (in Chinese))

[10] 晁丽君, 张珂, 陈新宇, 等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 55-64. (in Chinese))

[11] ANDREY S. README Document for the GPM Data[EB/OL]. (2022-11-27). https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/doc.

[12] 李麒麟, 张万昌, 易路, 等. 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*, 2018, 29(3): 303-313. (LI Qilun, ZHANG Wanchang, YI Lu, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over Mainland China[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 303-313. (in Chinese))

[13] YONG B, LIU D, GOURLEY J J, et al. Global view of real-time trmm multisatellite precipitation analysis: implications for its successor global precipitation measurement mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(2): 283-296.

[14] 陈家琳, 雍斌. GPM-GSMaP 卫星降水在中国大陆的误差解析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2020, 15(4): 76-85. (CHEN Jialin, YONG Bin. Error analysis of global satellite mapping of precipitation for GPM-GSMaP in Mainland China[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2020, 15(4): 76-85. (in Chinese))

[15] 张茹, 雍斌, 曾岁康. GPM 卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J]. *人民长江*, 2021, 52(5): 50-59. (ZHANG Ru, YONG Bin, ZENG Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over Mainland China[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(5): 50-59. (in Chinese))

[16] HANS H, BILL B, PAUL B, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.

[17] 刘婷婷, 朱秀芳, 郭锐, 等. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 66-79. (LIU Tingting, ZHU Xiufang, GUO Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 66-79. (in Chinese))

[18] MUÑOZ S J, DUTRA E, AGUSTÍ P A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(9): 4349-4383.

[19] WANG Youren, HESSEN D O, SAMSET B H, et al. Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113181.

[20] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

[21] 夏军, 陈进, 王纲胜, 等. 从 2020 年长江上游洪水看流域防洪对策[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(1): 1-8. (XIA Jun, CHEN Jin, WANG Gangsheng, et al. Flood control strategies for the river basin enlightened by the 2020 upper yangtze river floods[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 1-8. (in Chinese))

[22] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))

[23] 黄晶, 吴星妍, 李梦晗. 不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络舆情演化研究[J]. *水利经济*, 2023, 41(4): 94-106. (HUANG Jing, WU Xingyan, LI Menghan. Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(4): 94-106. (in Chinese))

[24] 丁光旭, 郭家力, 汤正阳, 等. 多种降水再分析数据在长江流域的适用性对比[J]. *人民长江*, 2022, 53(9): 72-79. (DING Guangxu, GUO Jiali, TANG Zhengyang, et al. Evaluation on applicability of various reanalysis datasets of precipitation in

Changjiang River Basin[J]. Yangtze River,2022,53(9):72-79. (in Chinese))

[25] 郭家力,丁光旭,杨旭,等. 多源卫星降水产品在长江流域的时空精度对比[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):230-242. (GUO Jiali, DING Guangxu, YANG Xu, et al. Comparison of temporal and spatial accuracy of precipitation products from multi-source satellites in the Yangtze River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):230-242. (in Chinese))

[26] 罗玉,秦宁生,庞轶舒,等. 气候变暖对长江源径流变化的影响分析:以沱沱河为例[J]. 冰川冻土,2020,42(3):952-964. (LUO Yu, QIN Ningsheng, PANG Yishu, et al. Effect of climate warming on the runoff of source regions of the Yangtze River: take Tuotuo River basin as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2020,42(3):952-964. (in Chinese))

[27] 戴明龙. 长江上游巨型水库群运行对流域水文情势影响研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[28] 秦鹏程,刘敏,杜良敏,等. 气候变化对长江上游径流影响预估[J]. 气候变化研究进展,2019,15(4):405-415. (QIN Pengcheng, LIU Min, DU Liangmin, et al. Climate change impacts on runoff in the upper Yangtze River basin[J]. Climate Change Research,2019,15(4):405-415. (in Chinese))

[29] HUFFMAN G J,STOCKER E F,BOLVIN D T,et al. GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06 [EB/OL]. (2022-10-22). https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary?keywords=imerg.

[30] VINCENZO L,CHRISTOPHER K,DALIA B K,et al. Satellite Precipitation Measurement[M]. Berlin:Springer,2020.

[31] MUÑOZ S J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus climate change service (C3S) climate data store. [EB/OL]. (2022-11-03). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>.

[32] 申同庆. 根系影响下农田土壤干缩开裂实验与数值模拟[D]. 银川:宁夏大学,2021.

[33] TANG Guoqiang,CLARK M P,PAPALEXIOUS M,et al. Have satellite precipitation products improved over last two decades? a comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets[J]. Remote Sensing of Environment,2020,240:111697.

[34] MENG C,MO X,LIU S,et al. Extensive evaluation of IMERG precipitation for both liquid and solid in Yellow River source region [J]. Atmospheric Research,2021,256:105570.

[35] 国家气象中心. 降水量等级:GB/T 28592-2012[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2012.

[36] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. 赣江流域高分辨率卫星降水数据的精度特征与时空变化规律[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(4):447-459. (HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. The accuracy characteristics and spatial-temporal variation of high-resolution satellite precipitation data in Ganjiang River Basin[J]. Scientia Sinica(Technologica),2013,43(4):447-459. (in Chinese))

[37] 曾岁康,雍斌. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估[J]. 地理学报,2019,74(7):1305-1318. (ZENG Suikang, YONG Bin. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region [J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(7):1305-1318. (in Chinese))

[38] 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展,2010,21(3):343-348. (LIU Junfeng, CHEN Rensheng, HAN Chuntan, et al. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products[J]. Advances in Water Science,2010,21(3):343-348. (in Chinese))

[39] 高玥,徐慧,刘国. GSMaP 遥感降水产品对典型极端降水事件监测能力评估[J]. 遥感技术与应用,2019,34(5):1121-1132. (GAO Yue, XU Hui, LIU Guo. Evaluation of the GSMaP estimates on monitoring extreme precipitation events[J]. Remote Sensing Technology and Application,2019,34(5):1121-1132. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-21 编辑:刘晓艳)