

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.021

MSWEP对江苏省太湖流域日降水量和 极值降水量的表征能力解析

杜飞^{1,2}, 胡庆芳^{2,3}, 王银堂^{2,3}, 云兆得^{2,4}

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
4. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:基于1979—2019年江苏省太湖流域雨量站实测降水资料, 综合解析了全球性降水资料MSWEP(multi-source weighted-ensemble precipitation)对日降水量和各历时极值降水量的表征能力。结果表明:MSWEP对研究区日降水量总体上有较强的解释能力,但在山丘区较集中的湖西区和以水域为主的太湖区两个水利分区的精度相对较差,同时MSWEP难以捕捉到暴雨等级的日降水事件;MSWEP可大致反映研究区各历时极值降水量的空间分布格局,但在细节特征上与地面降水场仍有一定差异;随着历时增加,MSWEP极值降水量的精度不断提高,MSWEP对15 d及更长历时极值降水量具有较强的定量表征能力;MSWEP日降水量和极值降水量的误差与降水强度之间均有显著的线性负相关性,存在较明显的“低值高估、高值低估”现象,且MSWEP的精度与空间尺度有关;在研究区面平均尺度上,由于降水量的空间均化效应和尺度不匹配性的消除,MSWEP对日降水量和极值降水量的表征能力明显优于栅格尺度。

关键词:全球性降水数据;MSWEP;精度指标;极值降水量;太湖流域

中图分类号:P426.6;TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0167-09

Validation of MSWEP daily and extreme precipitation of the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province // DU Fei^{1,2}, HU Qingfang^{2,3}, WANG Yintang^{2,3}, YUN Zhaode^{2,4} (1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on precipitation observations from rain gauges in the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province from 1979 to 2019, the ability of MSWEP (multi-source weighted ensemble precipitation) to characterize daily and extreme precipitation with different durations was comprehensively analyzed. Results show that, in general, MSWEP can well reflect daily precipitations in the study area; however, its accuracy is relatively poor in the Huxi and Taihu Lake sub-areas, where hilly area is concentrated and water body is dominated, respectively, and it is difficult for MSWEP to capture rainstorm events on daily scale. MSWEP can roughly reflect the spatial structure of extreme precipitation with different durations in the study area, but there are some differences between MSWEP and gauge observations in details. With the increase of duration, the fitting accuracy of MSWEP extreme precipitation is improved, and MSWEP has a strong ability in characterizing extreme precipitation with a duration of 15 d or even longer. There is a significant linear negative correlation between the errors of MSWEP daily precipitation and extreme precipitation and precipitation intensity, and there are obvious phenomena of “low-value overestimation and high-value underestimation”. Moreover, the accuracy of MSWEP is remarkably correlated with spatial scale. On the mean areal scale of the study area, the ability of MSWEP in characterizing daily precipitation and extreme precipitation is higher than that on the grid scale because of the spatial homogenization effect and the elimination of spatial scale mismatching.

Key words: global precipitation dataset; MSWEP; accuracy index; extreme precipitation; Taihu Lake Basin

基金项目:江苏省水利科技项目(2020034);国家自然科学基金面上项目(51479118)

作者简介:杜飞(1996—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:403897726@qq.com

通信作者:胡庆芳(1981—),男,正高级工程师,博士,主要从事气象水文与水资源规划研究。E-mail:hqf_work@163.com

降水是基本的气象水文要素,具有强烈的时空变异性。近年来,随着遥感技术的进步和气候模式的发展,集成卫星遥感、大气模式和地表雨量站等多源降水信息,研制大范围乃至全球性的栅格化降水数据,成为降水定量估计领域的重要发展方向之一。目前国内外有关研究机构已开发了若干产品化的大气再分析降水数据、多卫星遥感降水数据以及这些数据与地表雨量站等资料的降水融合数据。

MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation)是由 Beck 等^[1]集成卫星遥感、大气再分析和部分地表雨量站等降水资料研制的多源降水融合数据。MSWEP 数据系列自 1979 年延续至今,时间分辨率达到 3 h,空间分辨率达到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。该数据自发布以来受到了国际上的高度关注,在全球范围内已开展了一系列精度验证和评估工作。Nair 等^[2]评估了 MSWEP 对印度日降水的监测能力,认为其适用性较强,但不适合进行极端情况的研究;Bai 等^[3]发现较 CHIRPS、CMOPRH 等卫星遥感反演数据,MSWEP 呈现出的青藏高原降水空间分布格局和定量精度与雨量站观测信息更为接近;Awange 等^[4]指出 MSWEP 与澳大利亚当地雨量站降水资料有较强的吻合性;Alijanian 等^[5]针对伊朗的研究表明,MSWEP 日降水精度高于 CMOPRH 和 TRMM 等资料;Sun 等^[6]发现 MSWEP 在中国广西平塘河流域对日降水事件表现出较高的命中率,但也具有较高误报率,其对日降水事件是否发生的综合判别能力低于 GPM 和 GSMAP。同时,MSWEP 在区域雨量分析和径流模拟等方面已有一定应用。王圆圆等^[7]在融合 MSWEP 数据和局地雨量站降水资料的基础上解析了三峡水库库区降水的变异特征;马放等^[8]采用 MSWEP、TRMM 和 CHIRPS 数据,开展了乐安河流域径流模拟,发现 MSWEP 的适用性强于 TRMM 和 CHIRPS。

国内外针对 MSWEP 在不同气候地理区域开展了大量精度验证和评估工作,并与其他全球性降水资料作了对比,这些工作侧重于对长系列日降水序列分析。但许多地区降水具有强烈的时间不均性,年内降水多以暴雨形式出现,且在全球气候变化背景下暴雨出现了趋多增强态势^[9-12]。解析 MSWEP 对极值降水要素的表征能力,不仅有助于更深入认识 MSWEP 性能,且对于流域防洪治涝减灾和基础设施建设管理具有重要指导作用。一些学者基于 MSWEP 资料研究了区域强降水和极端降水特性。Alvarez-Socorro 等^[13]采用 MSWEP 解析了 1980—2019 年古巴极端降水的时空分布

特征;慎璐璐等^[14]指出 MSWEP 总体上显著低估了黄河中上游极端降水事件的强度;黄琦等^[15]发现 MSWEP 对祁连山区暴雨等级的日降水事件存在严重漏报。但也有一些研究对 MSWEP 反映强降水甚至极端降水事件的能力给出了积极评价。如 Bhattacharyya 等^[16]指出 MSWEP 可较好反映印度极端降水事件的强度、持续时间和频率;吴成兴等^[17]发现在金沙江流域采用长系列 MSWEP 数据统计得到的可能最大降水量与水文气象方法所得结果较为接近。因此,关于 MSWEP 资料对强降水的表征能力有待开展更广泛深入的研究。鉴于此,本文基于江苏省太湖流域暴雨洪水分析计算和防洪治涝需求,评估不同空间尺度上 MSWEP 对不同历时极值降水量的综合表征能力,为进一步基于 MSWEP 资料开展太湖流域强降水监测和设计暴雨计算奠定基础,也可为其他流域特别是雨量资料短缺流域提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

太湖流域位于长三角核心地带,是著名的江南水乡,地势低洼。受梅雨、台风和局地性强对流性天气影响,汛期暴雨多发,历史洪涝灾害较为频繁。本文研究区为太湖流域的江苏省区域,即“江苏省太湖流域”,面积约 $19\,399\text{ km}^2$,约占整个太湖流域面积的 53%。研究区地形以平原为主,山丘区主要分布在茅山和宜溧山区一带。根据地形和水系特征,研究区又分为湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、太湖区和杭嘉湖区 5 个水利分区,杭嘉湖区仅少部分在江苏省境内,且地理情况与其邻区阳澄淀泖区相似,为便于表述,进行水利分区分析时并入阳澄淀泖区。各水利分区范围及雨量站分布如图 1 所示。

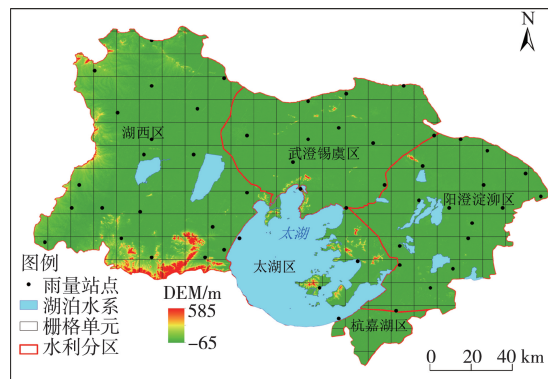


图 1 研究区水利分区、MSWEP 栅格单元和雨量站分布
Fig. 1 Sub-areas, MSWEP grids, and rain gauges in study area

1.2 数据来源

1.2.1 雨量站实测降水资料

地表逐日降水量资料来自水文部门,经过了整编和质量控制,可信度较高。为保证数据质量,对数据连续性较差或日降水资料缺测较多的站点予以剔除,最后筛选了1979—2019年具有较完整日降水量记录的52个雨量站(图1),单站平均控制面积约373 km²。

1.2.2 MSWEP 降水量数据

本文采用的MSWEP降水量数据为2.0版本。该数据时间分辨率为3 h、空间分辨率为0.1°×0.1°。由于地表雨量站观测资料为日降水数据,为统一时间尺度,将MSWEP累加为日降水资料。

2 研究方法

2.1 评价要素与尺度

首先在日尺度上分析MSWEP资料的精度特征;然后,面向太湖流域及各水利分区防洪治涝规划需求,重点针对年最大1、3、7、15、30、45、60、90 d不同历时的极值降水量及汛期降水量进行解析。分析的空间尺度包括0.1°×0.1°的MSWEP栅格单元、水利分区和整个研究区域。MSWEP数据栅格单元、各水利分区与地表雨量站位置的空间对应关系见图1。为便于表述,年最大1 d降水量以P_{max1d}表示,其他极值降水量依此类推。

2.2 评价指标和方法

以地表雨量站观测数据为基础,采用分类指标和定量指标(统称精度指标)评价MSWEP数据的精度。分类指标用于评价MSWEP对日降水事件是否发生的判别能力,定量指标用于评价MSWEP对降水量表征的准确性。采用普通克里金方法(ordinary Kriging, OK)将站点位置处的精度指标或降水量插值

成0.1°×0.1°的栅格单元,评估MSWEP精度的空间分布情况。

分类指标^[18]包括探测率(probability of detection, POD)、误报率(false alarm ratio, FAR)和Heidke技巧指数(Heidke's skill score, HSS)。其中,POD反映MSWEP对日降水事件的捕捉能力,FAR反映MSWEP对日降水事件的误报概率,HSS反映MSWEP对日降水事件综合分类辨识能力。日降水事件的阈值 $P_h = 0.1 \text{ mm/d}$ (若日降水量达到0.1 mm则判定为有雨)。定量指标^[19]包括平均误差(mean error, ME)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、相对偏差(relative bias, RBIAS)、绝对偏差(absolute bias, ARBIAS)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和相关系数(correlation coefficient, CC)。

3 MSWEP 数据精度评价

3.1 日降水量

3.1.1 栅格尺度

图2给出了0.1°×0.1°栅格单元尺度上MSWEP日降水量精度指标的空间分布,表1给出了各精度指标均值。综合图2和表1可知,在栅格单元尺度上,MSWEP对日降水事件的POD为0.58~0.99,FAR为0.28~0.57,HSS为0.12~0.71,表明MSWEP能够成功探测到多数日降水事件,但也有一定漏报和误报,导致综合分类辨识能力不高。栅格单元尺度上MSWEP日降水量的CC为0.17~0.86、研究区域均值为0.70,说明MSWEP降水量与雨量站实测降水量总体上具有较强同步性;MSWEP日降水量的ME为-0.83~0.14 mm,研究区域均值为-0.21 mm,RBIAS为-22%~4%,研究区域均值为-7%,表明MSWEP对地表降水量总体上有一

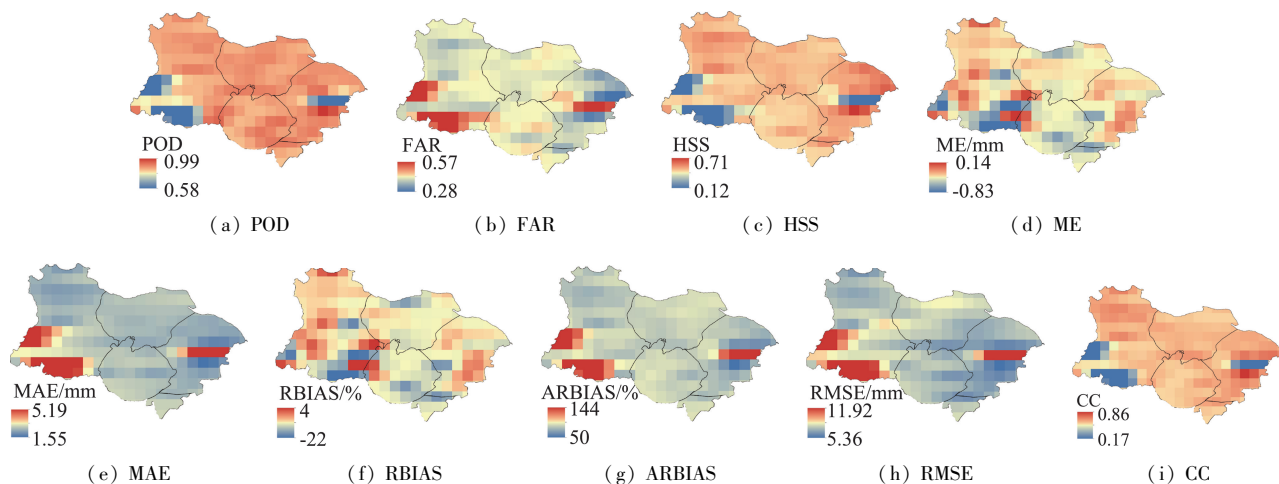


图2 栅格尺度上MSWEP日降水量精度指标空间分布

Fig.2 Spatial distributions of MSWEP daily precipitation accuracy indices on grid scale

表 1 不同区域栅格单元尺度上 MSWEP 日降水量精度指标均值

Table 1 Means of MSWEP daily precipitation accuracy indices on grid scale in different regions

区域	POD	FAR	HSS	ME/mm	MAE/mm	RBIAS/%	ARBIAS/%	RMSE/mm	CC
湖西区	0.90	0.40	0.54	-0.21	2.50	-6	77	7.61	0.67
太湖区	0.86	0.40	0.52	-0.24	2.07	-8	65	6.12	0.76
武澄锡虞区	0.84	0.41	0.49	-0.23	2.07	-7	66	6.72	0.75
阳澄淀泖区	0.88	0.40	0.52	-0.24	2.00	-8	65	6.01	0.76
全流域	0.92	0.37	0.58	-0.21	2.26	-7	71	6.98	0.70

定低估。MSWEP 日降水量的 MAE 为 1.55 ~ 5.19 mm,研究区域均值为 2.26 mm, RMSE 为 5.36 ~ 11.92 mm,研究区域均值为 6.98 mm,表明在栅格单元尺度上 MSWEP 日降水的定量误差仍较明显。

MSWEP 日降水量在流域西南部湖西区 and 太湖区精度相对较低,湖西区是太湖流域山丘区分布较为集中的地区,而太湖区下垫面则主要为大范围水域,MSWEP 日降水量受这两个水利分区下垫面特征影响较明显。相关研究^[20-21]表明,卫星遥感等全球性降水数据在地形起伏较大和有大规模水域分布的地区精度相对较低,本文结果与此相符。

图 3 为研究区域雨量站与 MSWEP 相应栅格单元日降水量及日降水量误差散点图。从图 3 可知,MSWEP 对地表日降水量具有一定解释能力,但误

差也较明显。当地表日降水量超过一定幅度时,MSWEP 日降水量误差与日降水量呈显著负相关性;而当地表日降水量为零时,由于 MSWEP 存在一定的误报,其误差量值可能也较大。相比于全年日降水量,MSWEP 汛期日降水量的精度有所降低,其 ME 和 RBIAS 分别为 -0.26 mm 和 -6%, MAE 和 ARBIAS 分别为 3.72 mm 和 80%, RMSE、确定性系数(R^2)和 CC 分别为 9.84 mm、0.46 和 0.68,表明汛期 MSWEP 日降水量对地表日降水量存在低估且误差更为明显,这与非汛期 MSWEP 和雨量站日降水量均较小有关。MSWEP 日降水量的定量误差既源于数据自身性能不足,也源于 MSWEP 栅格单元降水量和站点降水量空间尺度的不匹配性。

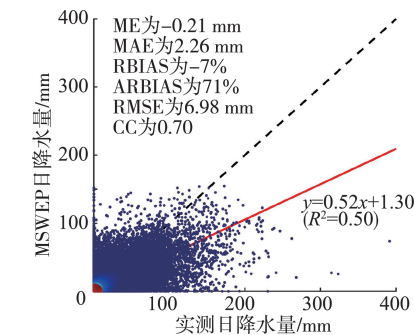
表 2 进一步给出了 MSWEP 对各等级日降水事件的辨识结果。从表 2 可知,MSWEP 对日降水量存在“低值高估、高值低估”现象,其分类辨识能力随着雨量等级增加而降低。MSWEP 低估了无雨事件的比例,高估了小雨(>0.1 ~ 10 mm)和中雨(>10 ~ 25 mm)事件的占比;对日降水量超过 25 mm 的降水事件,MSWEP 存在明显漏报;对日降水量超过 50 mm 的暴雨事件,MSWEP 估计能力尚难以令人满意。

表 2 MSWEP 对各等级日降水事件的辨识结果和分类指标
Table 2 Identification results and classification indices of MSWEP for daily precipitation events with different magnitudes

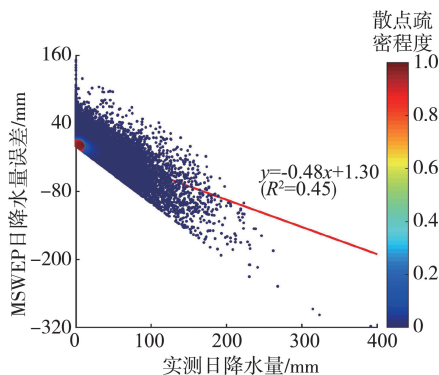
日降水量/ mm	降水事件占比/%		分类指标		
	实测值	MSWEP	POD	FAR	HSS
0 ~ 0.1	66.87	51.12	0.73	0.05	0.58
>0.1 ~ 10	23.36	39.43	0.80	0.53	0.43
>10 ~ 25	6.57	7.32	0.49	0.56	0.42
>25 ~ 50	2.34	1.76	0.28	0.63	0.30
>50 ~ 100	0.73	0.34	0.18	0.60	0.25
>100	0.13	0.03	0.10	0.45	0.17

3.1.2 面平均尺度

MSWEP 日降水量的精度与空间尺度有关。图 4 给出了 MSWEP 和雨量站对应的研究区域及各水利分区面平均日降水量散点图,综合图 2、图 3 和图 4 可知,由于降水的空间均化效应以及尺度不匹配性的消除,在各水利分区和研究区域面平均尺度上



(a) 日降水量



(b) 日降水量误差

图 3 雨量站与 MSWEP 相应栅格单元日降水量及其误差散点图

Fig. 3 Scatter plots of MSWEP daily precipitation and its error on grid scale versus gauge observations

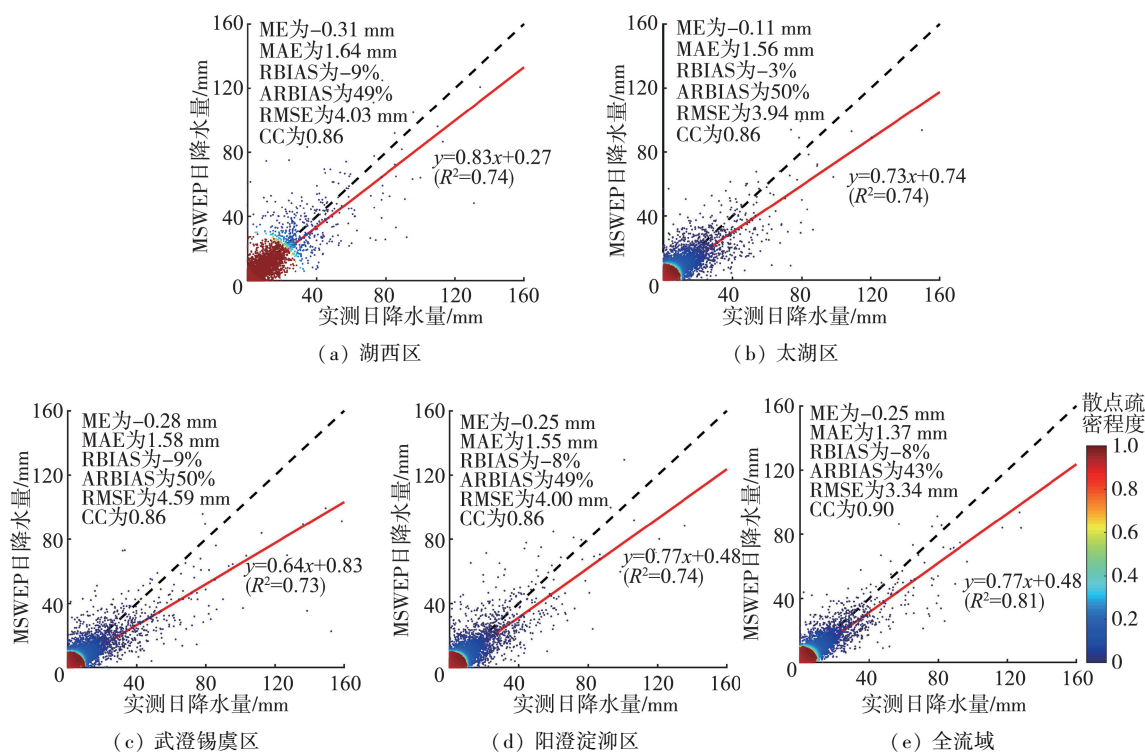


图4 雨量站与MSWEP对应的研究区域及各水利分区面平均日降水量散点图

Fig. 4 Scatter plots of areal mean MSWEP daily precipitation versus gauge observations in study area and its sub-areas

MSWEP对地表日降水量的拟合精度较栅格单元尺度上更高。对于整个研究区域,MSWEP日降水量的MAE为1.37 mm,ARBIAS和RMSE分别为43%和3.34 mm, R^2 和CC分别为0.81和0.90,说明MSWEP对研究区域面平均日降水量具有较强定量表征能力。

3.2 极值降水量

3.2.1 栅格尺度

图5和图6分别给出了1979—2019年地表雨量站和MSWEP 8种历时极值降水量和汛期降水量($P_{\text{汛期}}$)多年均值空间分布。由图5可知,研究区域各历时极值降水量和汛期降水量均具有显著空间异质性。对于历时不超过60 d的各极值降水量,流域西部湖西区、北部武澄锡虞区高于流域中部太湖区和东部阳澄淀泖区;而对于年最大90 d和汛期降水量,湖西区南部明显高于其他地区。由图6可知,在栅格单元尺度上,MSWEP可大致反映研究区域各极值降水量和汛期降水量的空间分布格局,但在细节上与雨量站实测降水资料有一定差异。对于雨量站实测降水资料, P_{max1d} 、 P_{max3d} 和 P_{max7d} 在湖西区西部、武澄锡虞区北部和阳澄淀泖区东北部等存在多个高值区域;但对于MSWEP,武澄锡虞区北部并非 P_{max1d} 、 P_{max3d} 和 P_{max7d} 的高值区域。

表3为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 栅格尺度上MSWEP各历时极值降水量和汛期降水量的精度计算结果。对于 P_{max1d} 和 P_{max3d} 两种极值降水量,MSWEP的拟合精度不高,存在较大幅度低估,这与上文中MSWEP对强降水事件定量表征能力不足的结论一致;同时,对于1 d和3 d两种历时,MSWEP和地表极值降水量之间存在较明显的非线性关系。但随着历时增加,MSWEP对极值降水量的拟合精度不断提高,误差的非线性效应降低,反映出MSWEP对长历时极值降水量具有较强的定量表征能力。

表3 栅格单元尺度上MSWEP各历时极值降水量和汛期降水量精度指标值

Table 3 Accuracy indices for MSWEP extreme precipitation and flood season precipitation on grid scale

降水量	ME/ mm	MAE/ mm	RBIAS/ %	ARBIAS/ %	RMSE/ mm	CC
P_{max1d}	-30.62	34.95	-32	36	46.86	0.43
P_{max3d}	-34.16	41.92	-25	31	56.89	0.52
P_{max7d}	-36.64	47.96	-21	27	63.51	0.63
P_{max15d}	-37.29	56.05	-16	23	76.57	0.68
P_{max30d}	-45.19	70.72	-14	22	94.78	0.73
P_{max45d}	-49.01	79.42	-12	20	106.08	0.73
P_{max60d}	-49.57	86.11	-11	19	114.51	0.73
P_{max90d}	-48.58	97.79	-8	17	131.54	0.75
$P_{\text{汛期}}$	-40.18	107.93	-6	15	146.09	0.75

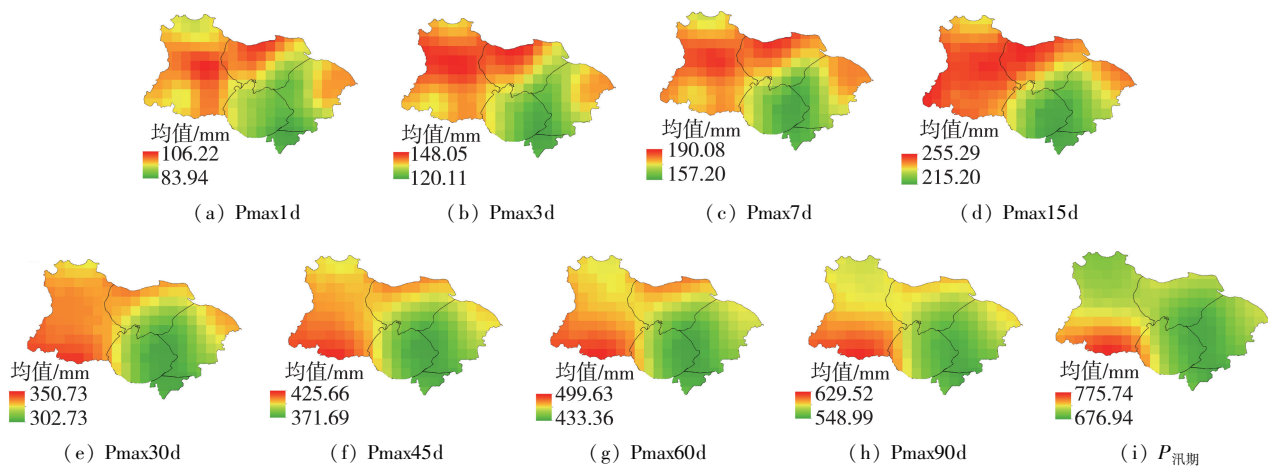


图5 雨量站对应的极值降水量和汛期降水量多年均值空间分布

Fig.5 Spatial distributions of annual means of extreme precipitation and flood season precipitation of gauge observations

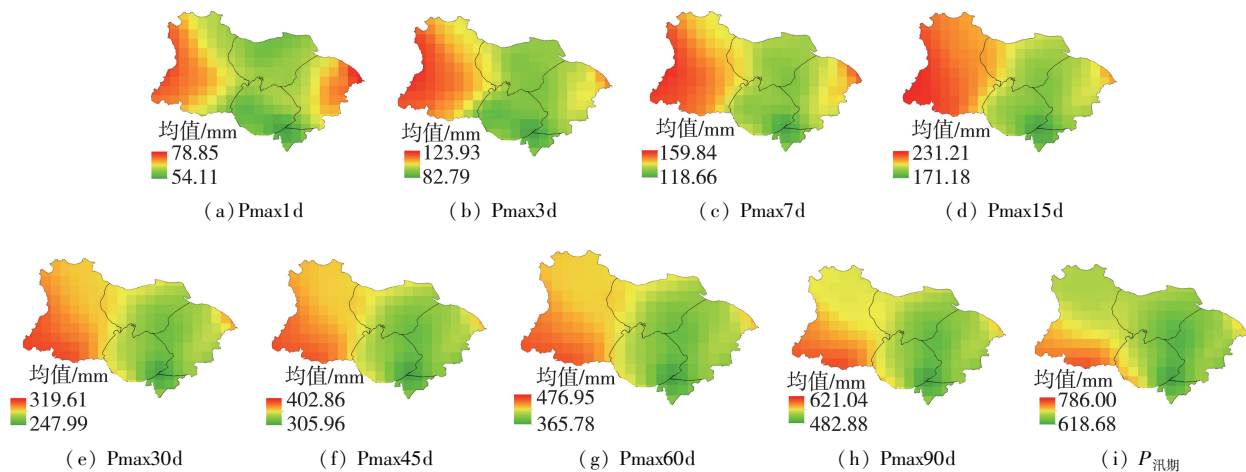


图6 MSWEP 对应的极值降水量和汛期降水量的多年均值空间分布

Fig.6 Spatial distributions of annual means of MSWEP extreme precipitation and flood season precipitation

从图7可知,在栅格尺度上 MSWEP 各历时极值降水量误差与雨量站实测降水量之间呈现出显著线性负相关性,也存在一定的“低值高估、高值低估”现象。随着历时的增加,MSWEP 极值降水量误差更加集中分布在“0”值附近,回归直线斜率的绝对值总体降低,说明 MSWEP 对地表极值降水量的表征能力总体随着历时延长而提高。

图8给出了栅格尺度上 MSWEP 对应的 Pmax1d、Pmax3d 和 Pmax7d 精度指标空间分布。对于3种历时,MSWEP 极值降水量精度在武澄锡虞区北部及湖西区环湖一带相对较低,与 MSWEP 日降水量精度的分布情况有所不同。

3.2.2 面平均尺度

图9给出了研究区域面平均尺度上雨量站与 MSWEP 极值降水量和汛期降水量的散点图。与栅格单元尺度结果相比,对于不同历时,研究区域面平均尺度上 MSWEP 对雨量站数据的拟合精度

普遍有所提高。MSWEP 不同历时极值降水量的 MAE、ARBIAS、RMSE 均有一定幅度降低,CC 均有一定程度提升。还可发现,MSWEP 对极值降水量的表征能力随历时延长而提高。在面平均尺度上,对于年最大15d及更长历时的极值降水量,MSWEP 具有较强的定量表征能力,其相对偏差在-10%以内。

4 结论

a. MSWEP 对江苏省太湖流域 1979—2019 年日降水量总体上具有较强解释能力,但精度具有明显的空间差异性,具体表现为分布着大型水域的太湖区和山丘区较为集中的湖西区精度相对较差,表明 MSWEP 对地表降水的表征能力受研究区域降水特征和下垫面特征影响。同时,MSWEP 对雨量站实测降水量存在一定程度的低估,且 MSWEP 对日降水事件存在较为明显的“低值高估、高值低估”现象,易漏报和低估大雨、暴雨事件。

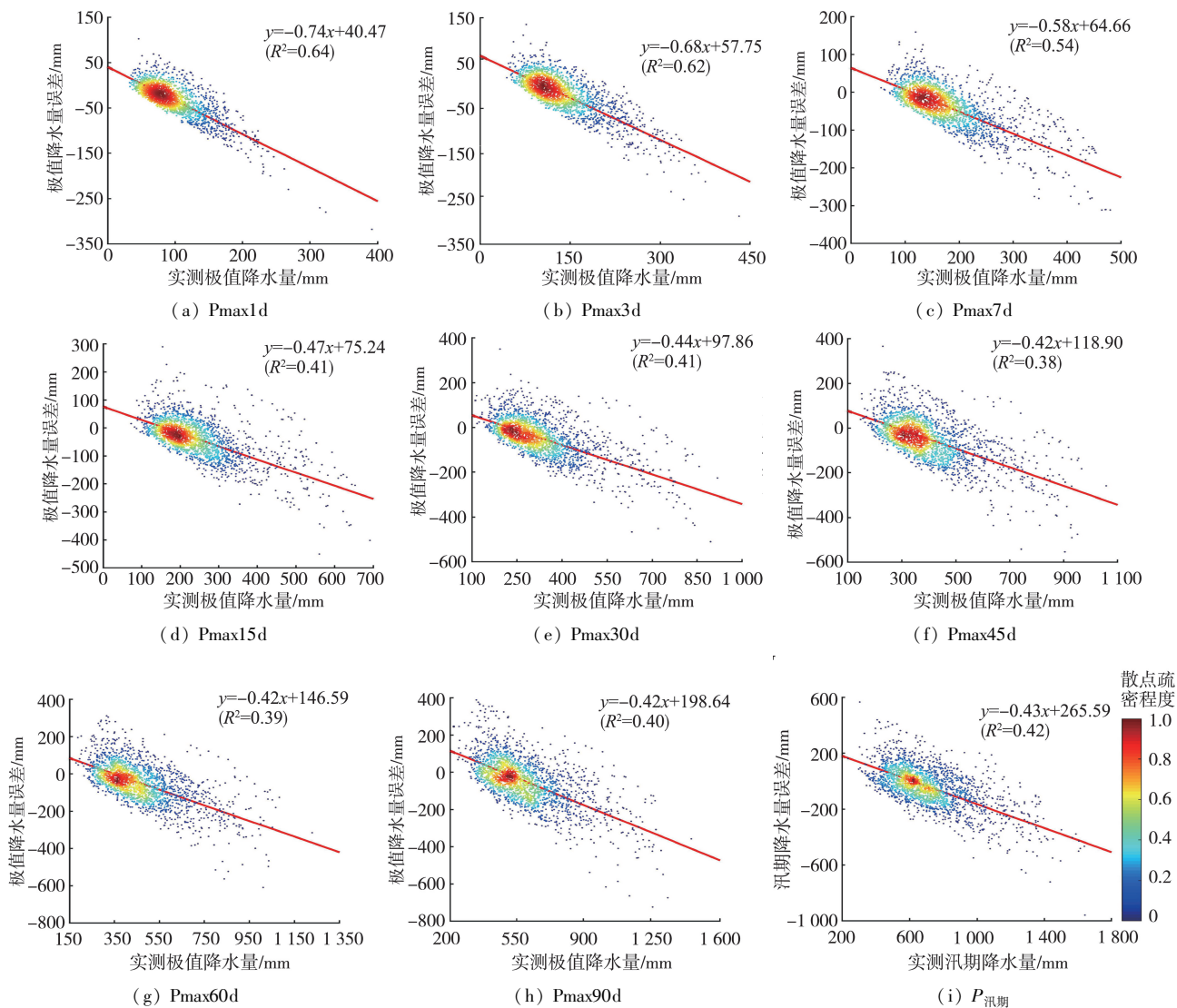


图 7 栅格尺度上 MSWEP 极值降水量和汛期降水量误差与雨量站实测降水量散点图

Fig. 7 Scatter plots of errors of MSWEP extreme precipitation and flood season precipitation on grid scale versus gauge observations

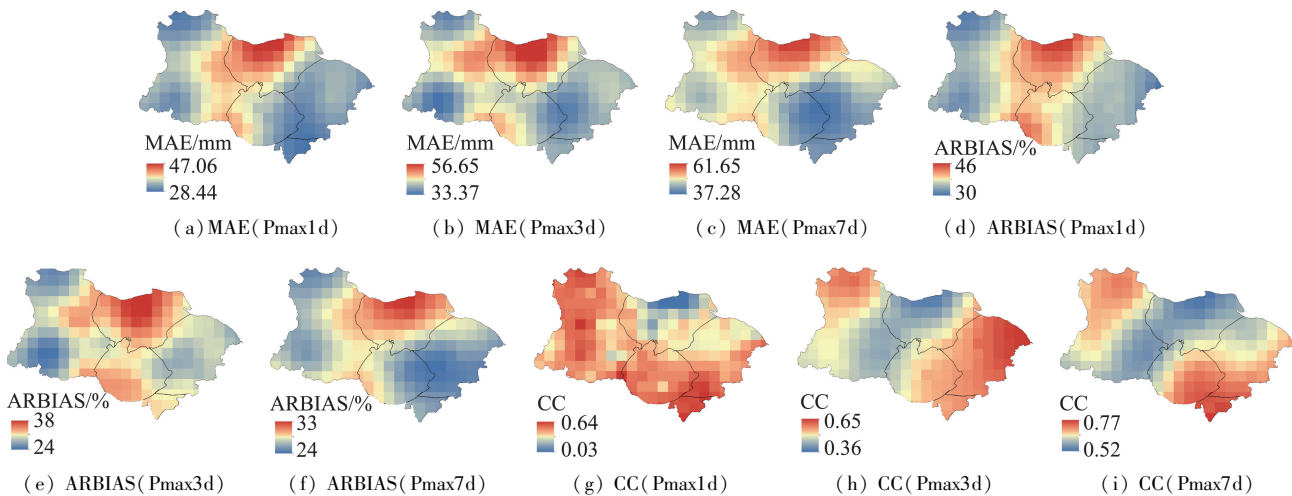


图 8 栅格尺度上 MSWEP 极值降水量精度指标的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of accuracy indices for MSWEP extreme precipitation on grid scale

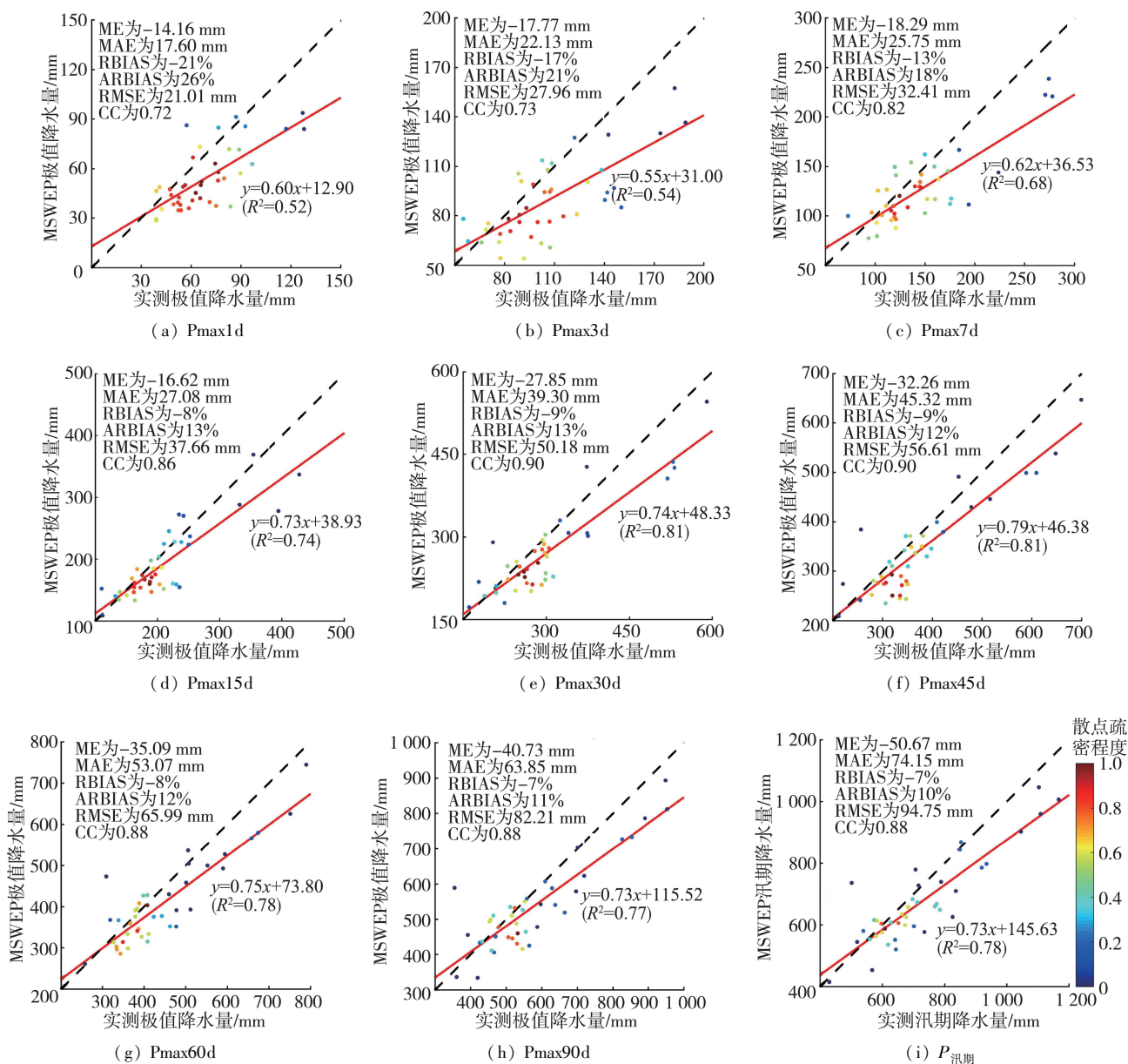


图9 面平均尺度上 MSWEP 极值降水量和汛期降水量与雨量站实测降水量散点图

Fig.9 Scatter plots of MSWEP extreme precipitation and flood season precipitation versus gauge observations on areal mean scale

b. MSWEP 基本可反映研究区域各历时极值降水量和汛期降水量的空间分布格局,但在具体细节上与地面降水场有一定差异。MSWEP 对最大 1 d 和 3 d 极值降水量的定量表征能力不足,但随着历时增加,MSWEP 对雨量站实测降水量的拟合精度不断提高,MSWEP 对 15 d 及更长历时极值降水量具有较强定量表征能力。

c. MSWEP 日降水量和极值降水量的误差与降水强度之间存在显著的线性负相关性,MSWEP 的精度与空间尺度有关。在研究区域面平均尺度上,由于降水的空间均化效应和尺度不匹配性的消除,MSWEP 对日降水量和极值降水量的表征能力明显优于栅格尺度。

参考文献:

- [1] BECK H E, VAN DIJK A I J M, LEVIZZANI V, et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21 (1): 589-615.
- [2] NAIR A S, INDU J. Performance assessment of multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) product over India[J]. Climate, 2017, 5(1): 2.
- [3] BAI Peng, LIU Xiaomang. Evaluation of five satellite-based precipitation products in two gauge-scarce basins on the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2018, 10 (8): 1316.
- [4] AWANGE J L, HU K X, KHAKI M. The newly merged satellite remotely sensed, gauge and reanalysis-based

- multi-source weighted-ensemble precipitation; evaluation over Australia and Africa(1981-2016) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 670:448-465.
- [5] ALJANIAN M, RAKHSHANDEHROO G R, MISHRA A K, et al. Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(14):4896-4914.
- [6] SUN Guikai, WEI Yixiong, WANG Guoshuai, et al. Downscaling correction and hydrological applicability of the three latest high-resolution satellite precipitation products (GPM, GSMAP, and MSWEP) in the Pingtang Catchment, China [J]. Advances in Meteorology, 2022, 2022:6507109.
- [7] 王圆圆, 郭微, 李贵才, 等. 基于广义加性模型估算 1979—2014 年三峡库区降水及其特征分析[J]. 地理学报, 2017, 72(7):1207-1220. (WANG Yuanyuan, GUO Zheng, LI Guicai, et al. Precipitation estimation and analysis of the Three Gorges Dam region (1979-2014) by combining gauge measurements and MSWEP with generalized additive model[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7):1207-1220. (in Chinese))
- [8] 马放, 李国芳, 高倩雨, 等. 三种卫星降水产品在乐安河流域径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12):21-24. (MA Fang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Application of three satellite precipitation products in simulating streamflow of the Le'an River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12):21-24. (in Chinese))
- [9] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):17-22. (in Chinese))
- [10] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 (2021) [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [11] DENG Pengxin, ZHANG Mingyue, HU Qingfang, et al. Pattern of spatio-temporal variability of extreme precipitation and flood-waterlogging process in Hanjiang River Basin [J]. Atmospheric Research, 2022, 276:106258.
- [12] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):100-105. (LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):100-105. (in Chinese))
- [13] ALVAREZ-SOCORRO G, FERNÁNDEZ-ALVAREZ J C, SORÍ R, et al. Space-time assessment of extreme precipitation in Cuba between 1980 and 2019 from multi-source weighted-ensemble precipitation dataset [J]. Atmosphere, 2021, 12(8):995.
- [14] 慎璐璐, 杨艳芬, 白磊, 等. 黄河中上游多源降水数据精度评估[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2):1-5. (SHEN Lulu, YANG Yanfen, BAI Lei, et al. Accuracy evaluation of multi-source precipitation data in the middle and upper reaches of the Yellow River [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(2):1-5. (in Chinese))
- [15] 黄琦, 覃光华, 王瑞敏, 等. 基于 MSWEP 的祁连山地区降水空间分布特性解析[J]. 水利学报, 2020, 51(2):232-244. (HUANG Qi, QIN Guanghua, WANG Ruimin, et al. Analysis of spatial distribution characteristics of precipitation in Qilian Mountains based on MSWEP [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(2):232-244. (in Chinese))
- [16] BHATTACHARYYA S, SREEKESH S, KING A. Characteristics of extreme rainfall in different gridded datasets over India during 1983-2015 [J]. Atmospheric Research, 2022, 267:105930.
- [17] 吴成兴, 李国芳, 杨百银, 等. 基于卫星降水数据的金沙江流域可能最大降水量计算方法[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2):5-8. (WU Chengxing, LI Guofang, YANG Baiyin, et al. Calculation method of probable maximum precipitation in Jinshajiang River Basin based on satellite precipitation data [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2):5-8. (in Chinese))
- [18] 熊立华, 刘成凯, 陈石磊, 等. 遥感降水资料后处理研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(4):627-637. (XIONG Lihua, LIU Chengkai, CHEN Shilei, et al. Review of post-processing research for remote-sensing precipitation products [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4):627-637. (in Chinese))
- [19] SUN Xiaona, WANG Jingcheng, ZHANG Lunwu, et al. Spatial downscaling model combined with the geographically weighted regression and multifractal models for monthly GPM/IMERG precipitation in Hubei Province, China [J]. Atmosphere, 2022, 13(3):476.
- [20] 赵静, 胡庆芳, 王腊春, 等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):27-33. (ZHAO Jing, HU Qingfang, WANG Lachun, et al. Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):27-33. (in Chinese))
- [21] 丁明泽, 雍斌, 杨泽康. 全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的极端降水监测潜力研究[J]. 遥感学报, 2022, 26(4):657-671. (DING Mingze, YONG Bin, YANG Zekang, et al. Extreme precipitation monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of global precipitation measurement (GPM) mission [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(4):657-671. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-21 编辑:施业)