

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.005

基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析

赵 静^{1,2}, 胡庆芳², 王腊春¹, 李伶杰², 陈少颖³

(1. 南京大学地理科学与海洋学院, 江苏 南京 210023; 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. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 基于高密度的地表雨量站网资料生成基准降水量, 采用分类指标、体积分类指标和定量指标, 在 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的栅格尺度上解析了 1979—2016 年汛期 MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation) 日降水数据的误差特征, 并剖析了 MSWEP 对于太湖流域多种特征降水要素的辨识能力。结果表明: MSWEP 对日降水量存在一定程度低估, 且在山丘区和太湖湖区的降水精度相对偏低, 但与地表降水之间总体上具有较强一致性; MSWEP 对太湖流域不同时间段的极值降水量和台风降水量、梅雨量和汛期降水量也具有相当表征能力; MSWEP 既反映了太湖流域西部特别是浙西山丘区地形对降水的强化作用, 还反映了太湖湖区大型水域对降水的抑制作用; MSWEP 也探测到受城市化影响太湖流域年最大 1 d 降水量在平原区东部存在高值地带。

关键词: MSWEP; 降水; 精度评价; 体积分类指标; 地理加权回归; 太湖流域

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)02-0027-07

Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP // ZHAO Jing^{1,2}, HU Qingfang², WANG Lachun¹, LI Lingjie², CHEN Shaoying³ (1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Institute of Water Conservancy, Nanjing 210017, China)

Abstract: Based on the benchmark precipitation generated by high-density surface precipitation network data, the error characteristics of daily precipitation data of MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation) in flood season from 1979 to 2016 were analyzed on the grid scale of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, using the classification index, volume classification index and quantitative index. And the identification ability of MSWEP for various characteristic precipitation elements in Taihu Lake Basin were analyzed. The long series comparison between MSWEP and ground benchmark precipitation shows that MSWEP underestimates the daily precipitation to a certain extent, and the precipitation accuracy in hilly area and Taihu Lake area is relatively low. But there is a strong consistency between MSWEP and ground precipitation overall. MSWEP shows a describing ability for extreme precipitation in different periods, typhoon precipitation, plum precipitation and flood season precipitation of the Taihu Lake Basin. MSWEP can reflect not only the intensification of precipitation in the west of Taihu Lake Basin, especially in the hilly area of Western Zhejiang Province, but also the inhibition of precipitation in large water areas of Taihu Lake. Meanwhile, MSWEP also detected a high value area in the east of the plain where the annual maximum daily precipitation of Taihu Lake Basin is affected by urbanization.

Key words: MSWEP; precipitation; accuracy evaluation; volume classification index; geographically weighted regression; Taihu Lake Basin

降水是最基本的也是具有强烈空间变异性的气象、水文要素之一。获取高质量区域降水分布信息对于气象、水文等众多领域的研究和应用均具有重

要意义^[1-4]。目前, 区域降水信息的获取方式主要有雨量站网观测、天气雷达反演、卫星遥感反演和大气数值模式模拟 4 种^[5]。这 4 种方式在基本原理、计

基金项目: 国家重点研发计划(2108YFC1508201, 2018YFC1508204, 2016YFC0400902); 国家自然科学基金面上项目(51479118); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y519006); 江苏省水利科技项目(2017022)

作者简介: 赵静(1988—), 女, 博士研究生, 研究方向为自然地理和气象水文。E-mail: njuzhaojing_wrr@126.com

通信作者: 胡庆芳, 教授。E-mail: hqf_work@163.com

算方法和适用条件上各不相同,所得到的降水数据的时空分辨率和覆盖范围也存在明显差异,但又具有一定互补性。近年来,充分利用不同降水信息获取方式的优势,融合不同来源的降水空间分布信息,已成为国际上区域性或全球性降水数据研制的重要发展方向。目前国际上已产生了 TRMM (tropical rainfall measuring mission)^[5]、CMORPH (climate prediction center morphing technique)^[6]、ERA5 (climate reanalysis produced by ECMWF)^[7]、GPM IMERGE (integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement)^[8] 等一系列代表性降水融合数据集。

2017 年 Beck 等^[9]集成了 CPC Unified、GPCC、CMORPH、GSMaP-MVK、TMPA 3B42RT、ERA Interim、JRA-55 等各类降水数据,通过与全球雨量站观测数据对比,确定每个栅格单元不同来源降水数据的权重,提出了一种基于权重集合的多源降水融合数据——MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation)。MSWEP 时间和空间分辨率分别达到了 3 h 和 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,数据序列自 1979 年延展至今,下载网址为 <http://www.gloh2o.org/>。MSWEP 集成了雨量计、卫星和大气再分析等降水资料,相较于单一来源的 TMPA、GPM IMERG 和 ERA5 融合降水产品,获取的降水信息更为全面、客观,同时满足高时空分辨率、长时间序列要求,数据自发布以来,就备受研究人员青睐。Alijanian 等^[10]评估了 MSWEP 在拉丁美洲的日降水精度,相较于 TRMM 3B42V7,MSWEP 精度高;Awange 等^[11]对澳大利亚 MSWEP 降水精度进行研究,除季节性强降水外,MSWEP 与区域地面观测降水高度一致;Akhilesh 等^[12]、Alijanian 等^[10]、邓越等^[13]分别在印度、伊朗和中国地区针对日、月、季等不同时间尺度降雨连续序列和不同等级降水事件下的 MSWEP 进行了评价,与地面观测降水相比,MSWEP 日降水精度总体较高,但对于强降水/极端降水的监测能力稍弱,表明 MSWEP 适用于绝大多数区域,可用于极值降水以外的气象、水文研究。MSWEP 因同时具有高时空分辨率和高精度降水估算特征,在分析地面观测资料稀少区域具有显著优势,可用于无资料区域、大型水面等特殊地形条件下的降水研究。目前,在精度评估基础上,MSWEP 数据已被应用于全球及区域气候变化评估^[14-15]、洪涝干旱灾害监测^[16-17]等领域。

目前有关 MSWEP 数据的相关研究正不断深入,但已有研究以全球或大尺度区域为主,在中小尺度区域的研究尚较少见。有些 MSWEP 降水资

料精度评价的研究还存在地表基准资料质量不高的问题,影响了评价结果的客观性和准确性。本文拟开展 MSWEP 日降水资料在太湖流域降水特性分析中的研究,太湖流域具有长系列、高密度的地表降水观测记录,以此为基础对 MSWEP 精度进行全面评估,并分析该数据对于流域特征降水要素的反映能力,一方面有助于全面深入认识太湖流域降水时空分布规律,另一方面能够更加客观地了解 MSWEP 数据对区域降水要素的反映能力,可为今后在无资料或少资料地区合理应用该数据提供依据。

1 研究区域概况

太湖流域位于我国长江三角洲地区(图 1),北抵长江,南濒钱塘江,东临大海,西以天目山、茅山为界,地跨江苏、浙江、安徽和上海三省一市,流域总面积 36869 km²。多年平均降水量 1185 mm,其中汛期(5—9 月)降水量为 726 mm^[18]。境内河网密布、湖泊众多,太湖是我国第三大淡水湖泊,水域面积接近 2338 km²。地势中间低、四周高,洪水易涨难消。太湖流域人口密集,大中城市众多,是我国经济最发达的地区之一。

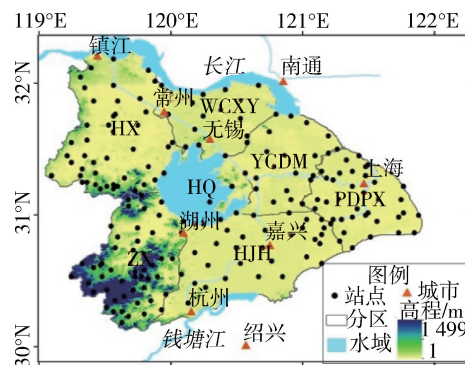


图 1 太湖流域位置及雨量站点分布

Fig.1 Site of Taihu Basin and distribution of rainfall stations

根据流域地形地貌和河湖水系结构,太湖流域 (THB) 可分为湖西区 (HX)、杭嘉湖区 (HJH)、太湖湖区 (HQ)、武澄锡虞区 (WCXY)、阳澄淀泖区 (YCDM)、浦东浦西区 (PDPX)、浙西区 (ZX) 7 个水利分区。浙西区 (ZX)、湖西区 (HX) 位于太湖流域上游,年平均降水分别为 1131 mm 和 1439 mm。太湖湖区 (HQ) 位于流域中心,连接其他各水利分区,多年平均降水 1161 mm。武澄锡虞区 (WCXY)、阳澄淀泖区 (YCDM) 分布在流域北部,北抵长江,南与太湖为邻,多年平均降水分别为 1075 mm 和 1096 mm。杭嘉湖区 (HJH) 和浦东浦西区 (PDPX) 东邻大海,年降水总量分别为 1228 mm 和 1106 mm^[16]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

太湖流域 MSWEP 降水资料采用欧盟联合研究中心(EU/JRC)最新发布的第2版数据,数据的时空分辨率分别为3h和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。本文研究时段为1979—2016年,根据3h时次的降水量,累加得到同期5—9月逐日降水量。

太湖流域地表日降水观测资料主要来源于流域水文年鉴,相关资料经过了整编和质量控制。太湖流域雨量站网密度较高,站点的空间分布如图1所示。1979—2016年不同年份可用的雨量站点数量有所不同,其中1979—1988年为175个站点,1989—2005年为139个站点,2006—2016年为196个站点。

2.2 研究方法

2.2.1 基准降水量生成方法

基于地表雨量站观测资料,采用空间插值方法生成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率的地表基准降水量,作为在栅格尺度上评价 MSWEP 数据精度的依据。浙西区主要为山丘区,而其他分区主要为平原区或湖区。为合理考虑地形对降水的影响,对浙西区,日降水量空间插值算法以经纬度和高程为自变量采用地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)。GWR是Brunsdone等^[19]在空间变系数回归模型基础上利用局部光滑思想提出的一种空间回归模型,该模型适用于变量间非平稳性空间关系的定量模拟。对除浙西区以外的其他区域,降水空间插值采用距离反比平方方法(inverse distance weighted, IDW)。IDW是一种加权平均插值方法^[20],以待估点与观测样点间的距离倒数为权重进行插值,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。

2.2.2 降水精度评价方法

采用分类指标、体积分类指标和定量指标评价1979—2016年5—9月MSWEP日降水数据的精度。分类指标主要反映MSWEP对日降水事件发生情况的辨识能力(即判断降水事件的有和无,而不考虑降水事件强度)。本文采用了探测率(probability of detection, POD)、空报率(false alarm ratio, FAR)、Heidke技巧评分指数(Heidke's skill score, HSS)3项分类指标。POD用于判断MSWEP对日降水事件的漏报程度;FAR用于衡量MSWEP误报降水事件的概率;HSS则综合表达MSWEP对降水事件发生情况的估计能力^[21]。POD和HSS属于越高越优型指标,FAR属于越低越优型指标,计算公式分别为

$$I_{\text{POD}} = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{01}} \quad (1)$$

$$I_{\text{FAR}} = \frac{n_{10}}{n_{11} + n_{10}} \quad (2)$$

$$I_{\text{HSS}} = \frac{2(n_{11}n_{00} - n_{10}n_{01})}{(n_{11} + n_{01})(n_{01} + n_{00}) + (n_{11} + n_{10})(n_{10} + n_{00})} \quad (3)$$

式中: I_{POD} 为POD值; I_{FAR} 为FAR值; I_{HSS} 为HSS值; n_{11} 为基准降水数据和MSWEP均探测到日降水事件的频次; n_{01} 为基准降水数据探测到而MSWEP未探测到日降水事件的频次; n_{10} 为基准降水数据未探测到而MSWEP探测到日降水的事件频次; n_{00} 为基准降水数据和MSWEP均探测为无降水事件的频次。

体积分类指标是分类指标的拓展。该类指标不仅判断降水事件的有和无,而且考虑降水事件强度的影响。对于同样的降水事件,降水事件强度越大,则在指标计算中所占的权重越大。因此,体积分类指标强化了对强降水事件的辨识能力,在一定程度上克服了传统分类指标的不足。本文采用的两项体积分类指标为体积探测指数(VHI)和体积误报指数(VFAR),分别是POD和FAR的拓展,其值介于 $[0, 1]$ 。VHI属于越大越优型指标,而VFAR属于越小越优型指标。VHI和VFAR的计算公式为

$$I_{\text{VHI}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{i1}}{\sum S_{i1} + \sum S_{i2}} \quad (4)$$

$$I_{\text{VFAR}} = \frac{\sum S_{i3}}{\sum S_{i1} + \sum S_{i3}} \quad (5)$$

$$\text{其中 } S_i = \begin{cases} S_{i1} & S_i \geq P_t \text{ 且 } G_i \geq P_t \\ S_{i2} & S_i < P_t \text{ 且 } G_i \geq P_t \\ S_{i3} & S_i \geq P_t \text{ 且 } G_i < P_t \end{cases}$$

式中: I_{VHI} 为VHI值; I_{VFAR} 为VFAR值; S_i 、 G_i 分别为第*i*天基准数据日降水量和MSWEP数据日降水量; P_t 为日降水事件阈值,本文以0.1mm作为划分有雨无雨的阈值

定量精度指标用于反映MSWEP对日降水量描述的准确性。本文同时采用平均偏差(mean bias, MB)、相对偏差(relative bias, RB)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和标准均方根误差(standardized root mean square error, SRMSE)和相关系数(correlation coefficient, CC)定量评估MSWEP数据在栅格尺度上的精度。

3 MSWEP 日降水数据精度评价

图2为1979—2016年栅格单元上太湖流域及各水利分区MSWEP日降水量与基准值散点图。由图2可知,在日时间尺度上,尽管MSWEP资料总体上存在低

估,但 MSWEP 日降水与基准降水的变化趋势一致。全流域和各水利分区 R^2 介于 0.69 ~ 0.74,说明 MSWEP 数据对地表日降水量变化具有较强解释能力。

图 3 为栅格尺度上 MSWEP 日降水精度指标的空间分布,各精度指标显示 MSWEP 降水量与基准降水在时序变化上具有较强同步性。栅格单元 MB

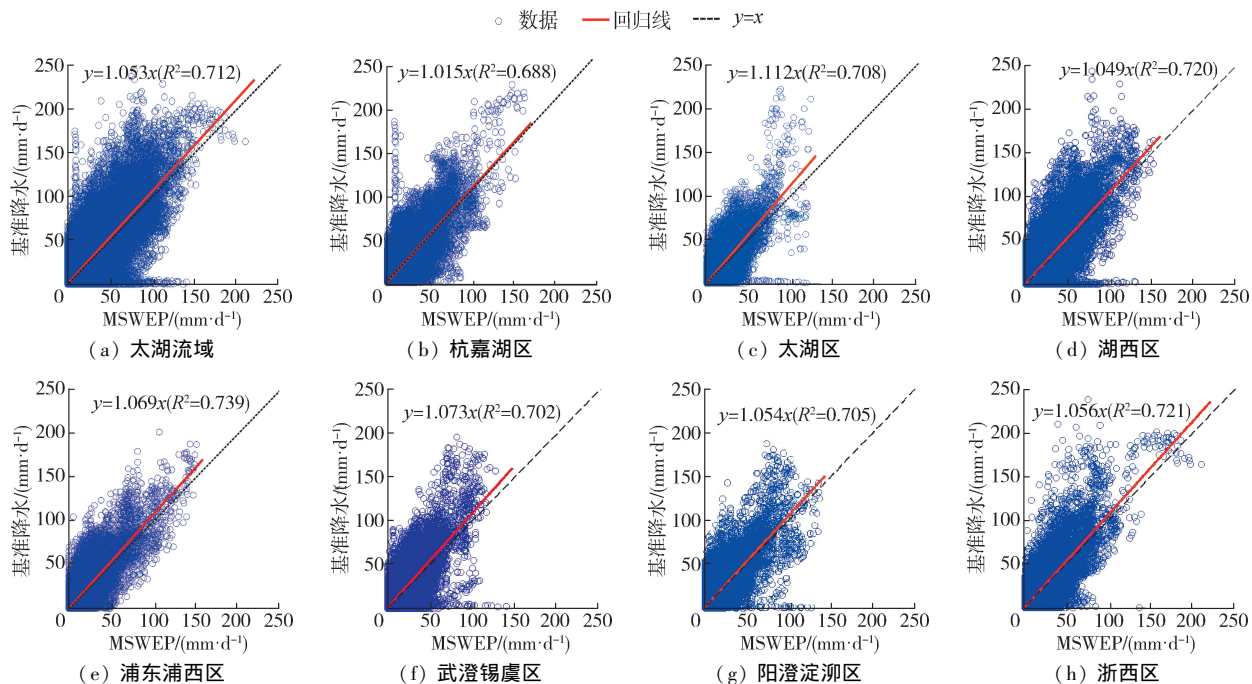


图 2 栅格尺度上基准降水与 MSWEP 散点图

Fig. 2 Scatter map of reference precipitation and MSWEP on grid scale

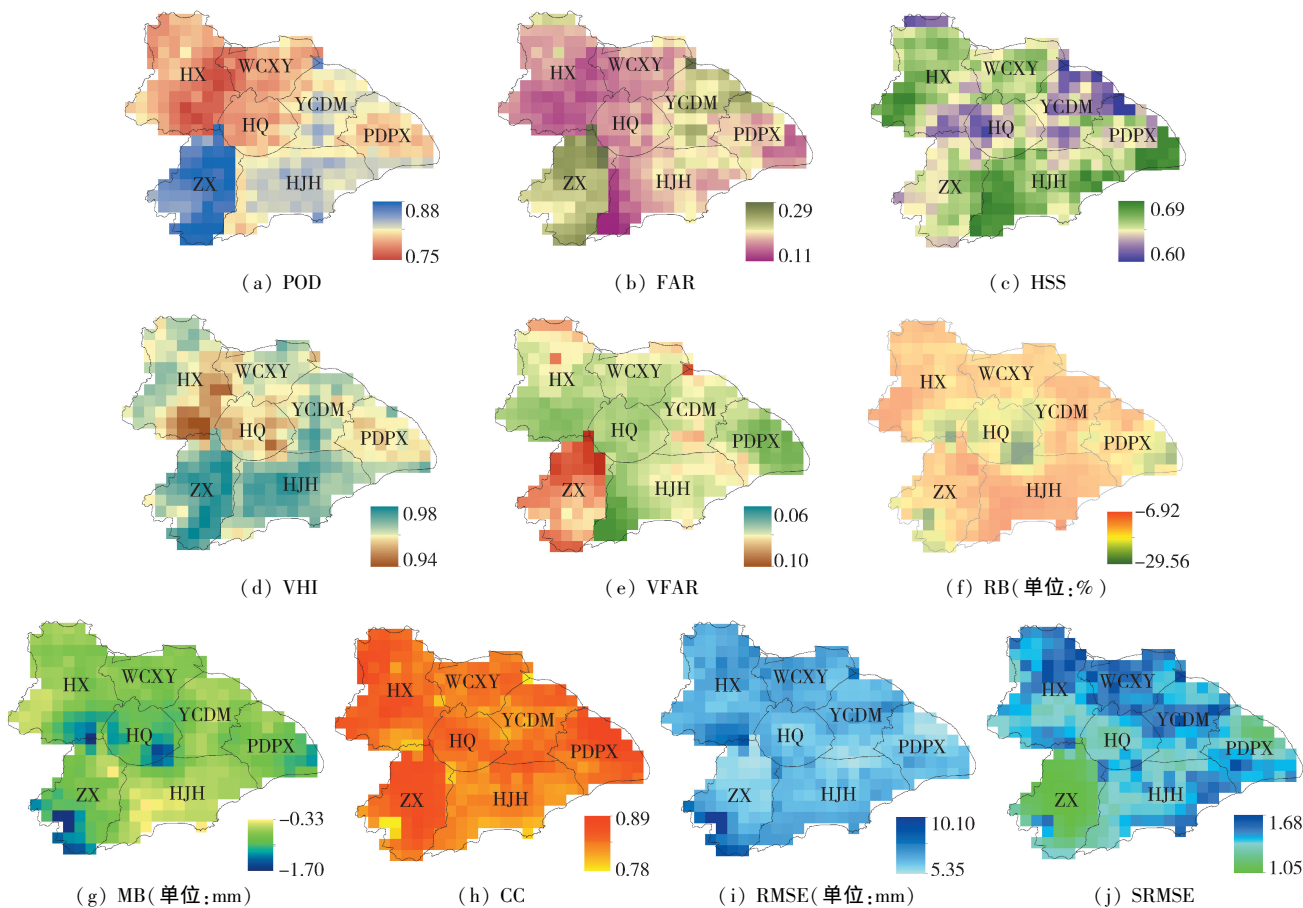


图 3 栅格尺度上 MSWEP 日降水精度指标空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of daily precipitation precision index of MSWEP on grid scale

和RB值均为负值,平均MB值低于1 mm, RB值介于-11% ~ -20%,这说明在多年平均意义上,流域MSWEP数据对于地表降水量存在一定程度的低估。各栅格单元HSS值均高于0.6,最高接近0.7,表明MSWEP数据对于太湖流域日降水事件已具有较强分类辨识能力。分类指标POD值介于0.75 ~ 0.88, FAR值介于0.11 ~ 0.29, MSWEP数据仍具有一定漏报和误报,但VHI值介于0.95 ~ 0.98, VFAR值低于0.06,说明若考虑日降水强度的差异,MSWEP数据的分类探测能力将进一步提高。综合各项指标可知,MSWEP在太湖流域对于日降水事件的辨识能力总体较高。MSWEP数据在不同水利分区精度有所不同。HSS、RB、MB表现为浙西、湖西区南部及太湖湖区降水精度低于其他区域,POD、VHI也显示湖区、湖西区降水探测率低,但这两个区域的SRMSE不突出。浙西区和湖西区南部为山丘区,降水探测

难度较高,这是诸多全球性降水数据的共同特点;而湖区地表雨量站网分布较为稀疏,可能也是造成该区域基准降水与MSWEP降水匹配性相对较低的原因之一。

4 太湖流域特征降水要素分析

在日降水长系列比对的基础上,进一步分析了MSWEP降水资料对太湖流域年最大1 d、3 d、7 d、15 d、30 d降水量、台风性降水量、梅雨量和汛期降水量8种特征降水要素的描述能力。其中,台风性降水量根据《太湖流域防汛防台年报》《西北太平洋台风基本资料集》《热带气旋年鉴》等资料和王咏梅^[22]提出的台风降水分离客观方法得到,梅雨量根据历年太湖流域梅雨期起止时间计算得到。

图4为太湖流域MSWEP多年平均特征降水要素空间分布。从图4可知,尽管在具体数值上有不

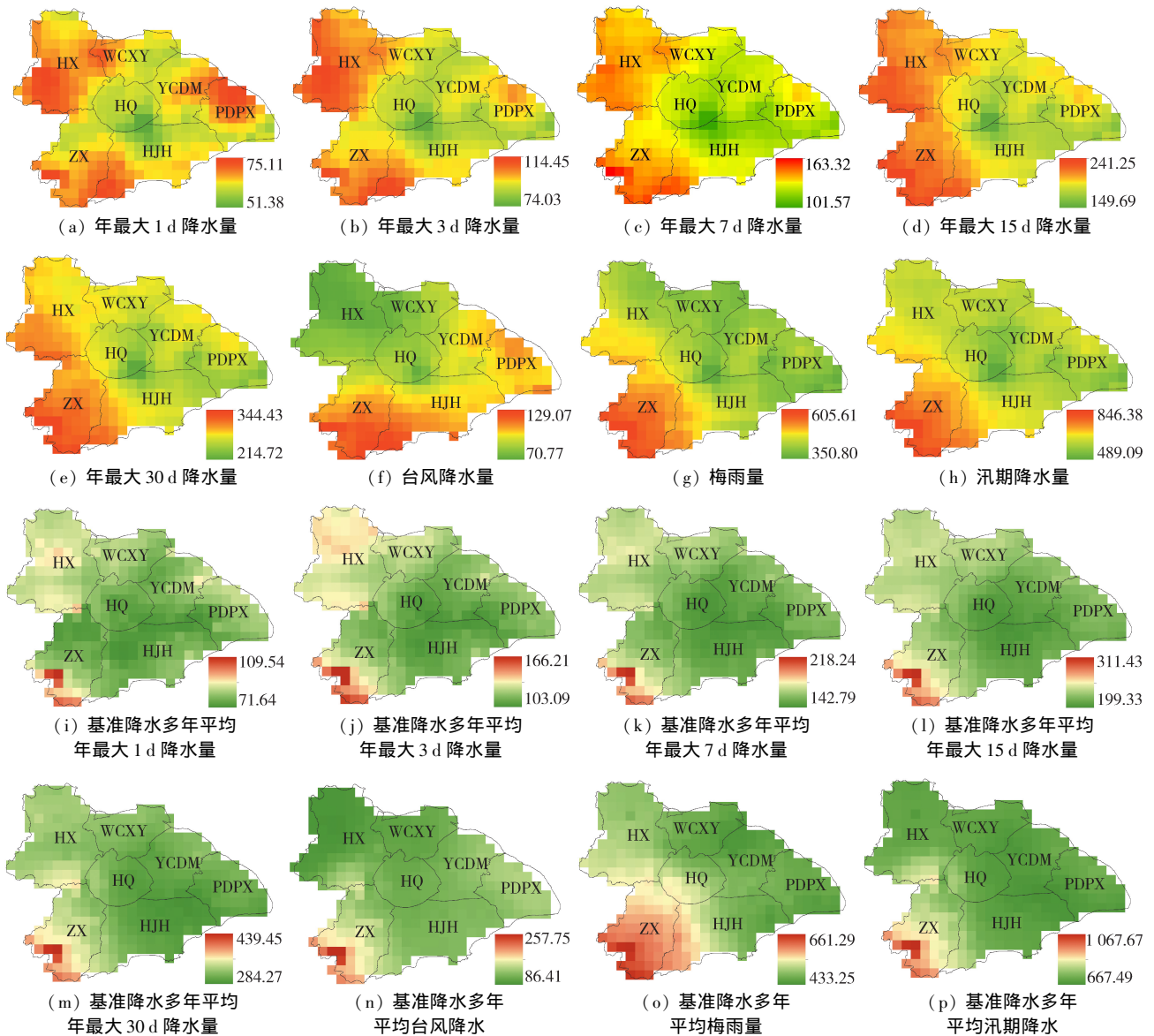


图4 太湖流域MSWEP多年平均特征降水要素空间分布(单位:mm)

Fig. 4 Spatial distribution of annual average of MSWEP characteristic precipitation elements in Taihu Basin (unit: mm)

同程度差异,但 MSWEP 与基准降水数据反映的太湖流域各特征降水要素的空间分布格局基本吻合。一是流域西部,特别是浙西区降水强度高,这是由于浙西区属于山丘区,地形对降水具有强化作用;二是流域中部,特别是太湖湖区降水强度相对较低。已有研究表明^[22-23]大型湖区降水在湖-陆温差效应下,夏季降水强度显著低于周围陆地降水强度。

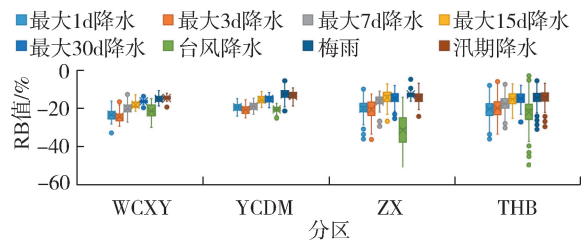
值得注意的是,太湖流域年最大 1 d 降水量存在多个高值地带,除浙西区和湖西区外,在平原区东部还存在一个高值地带,这一情况从 MSWEP 数据体现尤其明显。该高值地带位于上海市西北部,是太湖流域人口密度最高、社会经济最发达的地区,其形成可能与城市化对降雨的影响机制有关。

图 5 为 RB 在太湖流域及各水利分区的统计分布,表 1 为基于 MSWEP 数据获取的各特征降水要素的精度统计。可见,MSWEP 对太湖流域各特征降水要素总体上均表现为低估。MSWEP 对年最大 1 d、3 d、7 d 降水量的低估程度最大可超过 30%,但多数栅格单元不超过 20%。同时,对于年最大 1 d、3 d、7 d 降水量而言,MSWEP 与基准降水量之间的 CC 值总体上要低于逐日降水量,但在多数区域达到了 0.9,仅在少数区域低于 0.6。各特征降水要素对应的 SRMSE 值较日降水量序列普遍低,最高不超过 0.67。随着特征降水要素时段的增加,CC 值增大、SRMSE 值相应减小,因此 MSWEP 数据对最大 15 d 和 30 d 降水量的表征能力要优于短时段的最大 1 d、3 d、7 d 降水量。采用 MSWEP 分析台风性降水量,特别是湖西、浙西区台风性降水量具有较大的误差。MSWEP 对台风性降水量的平均低估程度达到了 20% 以上,最多可能会超过 50%。但从 CC 值来看,MSWEP 能在相当程度上反映台风性降水量的年际变化过程。对于年梅雨量和汛期降水量,MSWEP 的最大低估程度在 30% 左右,平均低估程度低于 15%;SRMSE 值不超过 0.35,CC 值均在 0.8 以上。因此,在栅格尺度上,MSWEP 对太湖流域梅雨量和汛期降水量具有较强表征能力。

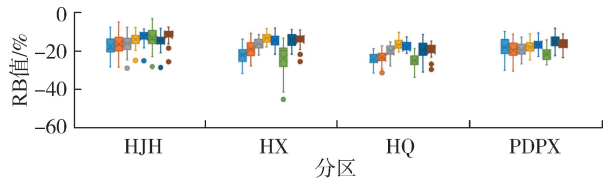
表 1 栅格尺度不同特征降水要素 MSWEP 精度统计

Table 1 Precision statistics of MSWEP of different precipitation characteristic elements on grid scale

指标	RB 值/%			CC 值			SRMSE 值		
	最大值	中值	最小值	最大值	中值	最小值	最大值	中值	最小值
最大 1 d 降水	-7.55	-20.42	-36.02	0.90	0.69	0.28	0.63	0.35	0.21
最大 3 d 降水	-4.94	-19.94	-36.25	0.93	0.77	0.34	0.56	0.31	0.20
最大 7 d 降水	-7.49	-17.65	-30.20	0.95	0.86	0.47	0.47	0.28	0.19
最大 15 d 降水	-7.33	-15.23	-26.79	0.93	0.87	0.66	0.38	0.24	0.18
最大 30 d 降水	-8.03	-14.93	-27.12	0.96	0.88	0.60	0.35	0.23	0.14
台风降水	-3.06	-22.09	-51.82	0.97	0.94	0.86	0.67	0.37	0.23
梅雨量	-4.90	-14.60	-30.96	0.98	0.96	0.86	0.33	0.18	0.09
汛期降水	-6.92	-14.37	-29.56	0.95	0.92	0.81	0.32	0.18	0.13



(a) 太湖全流域及武澄锡虞、阳澄淀泖、浙西等分区



(b) 杭嘉湖、湖西、湖区及浦东浦西等分区

图 5 栅格尺度 MSWEP 数据 RB 值箱线图

Fig. 5 RB box chart of MSWEP data on grid scale

5 结论

a. 在 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 栅格尺度上,MSWEP 数据对 1979—2016 年太湖流域日降水总体上具有较强解释能力。MSWEP 数据虽在一定程度上低估日降水量,但其平均低估程度不超过 20%,且其反映的日降水量变化过程与基准降水量基本一致。

b. MSWEP 日降水数据的精度存在区域差异。受地形地貌等因素影响,MSWEP 日降水资料在山丘区的浙西区、湖西山区和大型水域的太湖湖区的综合精度相对较低。

c. MSWEP 对太湖流域各特征降水要素总体上均表现为低估,但仍具有辨识能力。随着降水时段的增加,MSWEP 的精度有所提高。采用 MSWEP 分析台风性降水量具有较大误差,但仍能够反映台风性降水量的年际变化过程。MSWEP 资料对太湖流域梅雨量和汛期降水量具有较强表征能力。

d. MSWEP 与基准降水数据反映的太湖流域各特征降水要素的空间分布格局基本吻合。MSWEP 降水数据反映出太湖流域西部特别是浙西区地形对于降水的强化作用和太湖湖区大型水域对降水的抑制作用。此外,MSWEP 还检测到太湖流域年最大

1 d 降水量在平原区东部还存在一个高值地带,其形成可能与城市化对降雨的影响机制有关。

参考文献:

- [1] HU Q F, LI Z, WANG L Z, et al. Rainfall spatial estimations: a review from spatial interpolation to multi-source data merging[J]. *Water*, 2019, 11(579): 1-30.
- [2] 方国华, 张钰, 闻昕, 等. 基于质心分析的淮河流域降水时空分布特征[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 384-389. (FANG Guohua, ZHANG Yu, WEN Xin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of precipitation in the Huaihe River Basin based on centroid analysis[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(5): 384-389. (in Chinese))
- [3] 王珂, 王娜, 雍斌. 青藏高原羌塘内流区降水时空特征[J]. *水资源保护*, 2019, 35(3): 25-32. (WANG Ke, WANG Na, YONG Bin. Analysis of spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 25-32. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, NELKIN E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 38-55.
- [6] JOYCE R J, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 487-503.
- [7] OLAUSON J. ERA5: the new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 322-331.
- [8] TANG G Q, MA Y Z, LONG D. Evaluation of GPM day-1 IMERG and TMPA version-7 legacy products over mainland China at multiple spatiotemporal scales [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 152-167.
- [9] BECK H E, VAN D A I J M, VINCENZO L, et al. MSWEP: 3-hourly 0.25°deg; global gridded precipitation (1979—2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1): 589-615.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] AKHILESH N, INDU J. Performance assessment of multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) product over India [J]. *Climate*, 2017, 5(1): 2-20.
- [13] 邓越, 蒋卫国, 王晓雅, 等. MSWEP 降水产品在中国大陆区域的精度评估[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 455-464. (DENG Yue, JIANG Weiguo, WANG Xiaoya, et al. Accuracy assessment of MSWEP over mainland China [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 455-464 (in Chinese))
- [14] BAEZ-VILLANUEVA O M, ZAMBRANO-BIGIARINI M, RIBBE L, et al. Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 34-50.
- [15] 任正果, 强芳, 朱小凡, 等. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 640-649. (REN Zhengguo, QIANG Fang, ZHU Xiaofan, et al. Changes in precipitation extremes in South China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 640-649. (in Chinese))
- [16] XIAO M, ZHANG Q, SINGH V P. Spatiotemporal variations of extreme precipitation regimes during 1961—2010 and possible teleconnections with climate indices across China [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 468-479.
- [17] AGHAKOUCHAK A, FARAHMAND A, MELTON F S, et al. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 452-480.
- [18] 太湖流域管理局水文局(信息中心). 太湖流域片水情年报[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2016.
- [19] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. et al. Geographically weighted regression [J]. *Journal of the Royal Statistic Society: Series D (The Statistician)*, 1998, 47(3): 431-443.
- [20] SHEPARD D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data [J]. *Acm National Conference*, 1968, 16: 517-524.
- [21] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. 赣江流域 TRMM 降解数据的误差特征与成因[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 794-800. (HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Validation and error interpretation for daily TRMM rainfall over the Ganjiang River Basin in China [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 794-800. (in Chinese))

(下转第 40 页)

- [20] 李继红,王洪江,江珊,等. 综合指数和 H 系列指数测评期刊核心作者的比较研究:以《编辑学报》为例[J]. 中国科技期刊研究,2017,28(3):266-270. (LI Jihong, WANG Hongjiang, JIANG Shan, et al. Comparison of the evaluation of core authors by comprehensive index and H series index;taking Acta Editologica as an example[J]. Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals, 2017,28(3):266-270. (in Chinese))
- [21] 北京建筑大学官网. 北京建筑大学学校简介[EB/OL]. (2018-05-01) [2019-05-04]. <http://www.bucea.edu.cn/xxgk/xxjj/index.htm>.
- [22] 教育部,财政部,国家发改委. 教育部、财政部、国家发展改革委员会关于公布世界一流大学和一流学科建设高校及建设学科名单的通知[EB/OL]. (2017-09-20) [2019-05-04]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_843/201709/t20170921_314942.html.
- [23] 俞孔坚,李雷. 缓解内涝需营造“海绵城市”[J]. 中国经济报告,2016(8):52-55. (YU Kongjian, LI Lei. Building “Sponge City” to alleviate waterlogging[J]. China Policy Review,2016(8):52-55. (in Chinese))
- [24] 安芷生,刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率[J]. 科学通报,2000(3):238-249. (AN Zhisheng, LIU Xiaodong. History and variability of the East Asian monsoon climate [J]. Chinese Science Bulletin, 2000(3):238-249. (in Chinese))
- [25] 周元,孙新章. 中国城镇化道路的反思与对策[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(4):56-59. (ZHOU Yuan, SUN Xinzhang. Rethinking and countermeasures on China's urbanization road[J]. China Population Resources and Environment,2012,22(4):56-59. (in Chinese))
- [26] HOU J W, MAO H X, LI J P, et al. Spatial simulation of the ecological processes of stormwater for sponge cities [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232(4):574-583.
- [27] 唐双成. 海绵城市建设中小型绿色基础设施对雨洪径流的调控作用研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [28] 杜尚泽. 习近平出席二〇一九年中国北京世界园艺博览会开幕式并发表重要讲话[N]. 人民日报,2019-04-29(001).
- [29] 李俊奇,任艳芝,聂爱华,等. 海绵城市:跨界规划的思考[J]. 规划师,2016,32(5):5-9. (LI Junqi, REN Yanzhi, NIE Aihua, et al. Sponge city: cross-disciplinary planning[J]. Planners,2016,32(5):5-9. (in Chinese))
- [30] 王小丽,王卓甫,丁继勇. 海绵城市 PPP 项目运营维护服务契约设计[J]. 软科学,2019,33(3):127-132. (WANG Xiaoli, WANG Zhuofu, DING Jiyong. Design for operation and maintenance service contract in sponge-city PPP project[J]. Soft Science,2019,33(3):127-132. (in Chinese))
- [31] 贺志康,郑友强,谢爱军. 从中学地理视角浅谈海绵城市建设[J]. 地理教学,2016(12):58-60. (HE Zhikang, ZHENG Youqiang, XIE Aijun. The viewpoint of middle school geography construction on sponge city [J]. Geography Teaching,2016(12):58-60. (in Chinese))
- [32] 翟慧敏,张迁,郭艳平,等. 考虑光伏发电的海绵城市优化模型研究[J]. 可再生能源,2017,35(7):1022-1026. (ZHAI Huimin, ZHANG Qian, GUO Yanping, et al. Study on optimization model for city considering PV generate [J]. Renewable Energy Resources,2017,35(7):1022-1026. (in Chinese))
- [33] 胡庆芳,王银堂,李伶杰,等. 水生态文明城市与海绵城市的初步比较[J]. 水资源保护,2017,33(5):13-18. (HU Qingfang, WANG Yintang, LI Lingjie, et al. Preliminary comparison between water-ecological civilization city and sponge city [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):13-18. (in Chinese))
- [34] 杨青娟,罗斯·艾伦,梅瑞狄斯·多比. 风景园林学在海绵城市构建中的角色研究:以澳大利亚墨尔本为例[J]. 中国园林,2016,32(4):74-78. (YANG Qingjuan, ALLEN Ross, DOBBIE Meredith. The role of landscape architecture in sponge city: case study of Melbourne, Australia[J]. Chinese Landscape Architecture,2016,32(4):74-78. (in Chinese))
- [35] 雷维群,徐姗,周勇,等. “城市双修”的理论阐释与实践探索[J]. 城市发展研究,2018,25(11):156-160. (LEI Weiqun, XU Shan, ZHOU Yong, et al. Theoretical explanation and practical exploration of urban betterment and ecological restoration [J]. Urban Development Studies,2018,25(11):156-160. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-07 编辑:王芳)

(上接第 33 页)

- [22] 王咏梅,任福民,王小玲,等. 中国台风降水分离客观方法的改进研究[J]. 气象,2006,32(3):6-10. (WANG Yongmei, REN Fumin, WANG Xiaoling, et al. The study on the objective technique for partitioning tropical cyclone precipitation in China[J]. Meteorological Monthly,2006,32(3):6-10. (in Chinese))
- [23] 刘熙明,傅敏宁,邹海波. 湖泊对降水的影响研究回顾[J]. 气象与减灾研究,2012,35(1):1-6. (LIU Ximing, FU Minning, ZOU Haibo. Review of the lake-effect precipitation study [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,2012,35(1):1-6. (in Chinese))
- [24] DAI Y, YAO T, LI X, et al. The impact of lake effects on the temporal and spatial distribution of precipitation in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau [J]. Quaternary International,2016,475:63-69.

(收稿日期:2019-06-21 编辑:王芳)