

基于 MSWEP 数据的缺资料小流域降水量推求研究

刘 连¹, 胡庆芳^{1,2}, 蒋 宁³, 于兵兵⁴, 陈 钧³, 陈志博³

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 温州市鹿城区水利建设管理中心, 浙江 温州 325005;
4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探索卫星遥感、大气再分析等全球性降水数据在缺资料小尺度流域的应用,以浙江省温州市仰义水库流域为例,开展了基于高分辨率全球性降水数据集——多源加权集合降水(MSWEP)的缺资料小流域长系列降水过程和设计暴雨推求研究。结果表明:在日、月、年 3 种时间尺度上,MSWEP 尽管存在一定误差,但总体上对 1979—2020 年仰义水库流域降水过程具有较强的表征能力;对于设计暴雨,MSWEP 对站点降水量存在一定的低估,其推求的仰义水库流域年最大 1 d、24 h、3 d 设计暴雨在多数情况低于站点移用降水量推求结果,但两者差异均未超过 18%,特别是对于超过 50 年一遇的年最大 1 d 和 24 h 设计暴雨,两者差异基本在 6% 以内;采用 MSWEP 推求的仰义水库流域设计暴雨的可靠性优于暴雨统计参数图集查算结果。

关键词:全球性降水数据;MSWEP;降水量推求;设计暴雨;仰义水库流域

中图分类号:TV11 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0132-07

Study on precipitation estimation for data-scarce small-scale basins based on MSWEP//LIU Lian¹, HU Qingfang^{1,2}, JIANG Ning³, YU Bingbing⁴, CHEN Jun³, CHEN Zhibo³ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Water Conservancy Construction Management Center of Lucheng District of Wenzhou City, Wenzhou 325005, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the application of global precipitation data, such as the data from satellite remote sensing and atmospheric reanalysis, in data-scarce small-scale basins, a case study was conducted in the Yangyi Reservoir Basin in Wenzhou, Zhejiang Province. The study utilized a high-resolution global precipitation product, i. e., multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) to derive long-term precipitation processes and estimate design storms for the data-scarce small basin. The results indicate that, at daily, monthly, and annual time scales, although MSWEP exhibits certain errors, it generally demonstrates strong capability in characterizing precipitation processes in the Yangyi Reservoir Basin from 1979 to 2020. For design storms, MSWEP tends to slightly underestimate observed precipitation, and the annual maximum 1-d, 24-h, and 3-d design storm values for the Yangyi Reservoir Basin derived from MSWEP are generally lower than those obtained from station-based precipitation data. However, the relative differences of the results between the two methods remain within 18%. Particularly, for the annual maximum 1-d and 24-h design storm values with a return period exceeding 50 a, the relative differences are mostly within 6%. For the Yangyi Reservoir Basin, the reliability of design storm estimates derived from MSWEP is superior to that obtained from statistical parameter atlas.

Key words: global precipitation data; MSWEP; precipitation estimation; design storm; the Yangyi Reservoir Basin

降水是最基本的气象水文和生态环境要素之一,其时空变异性极为复杂。定量准确获取降水空间分布对于流域暴雨洪水监测、水文模拟预报、水旱灾害防御、水资源规划管理、水土流失治理、生态环境保护修复等一系列工作均至关重要^[1-2]。地表雨

量站网是定量监测和推求流域降水空间分布的传统方式,局部监测精度较为可靠,但雨量站网只能获取有限离散位置的降水信息,并且雨量站网在站点稀疏或分布不均匀的地区对降水空间异质性的反映能力严重不足^[3]。20 世纪 80 年代以来,天气雷达成

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3002903);国家自然科学基金项目(52279019)
作者简介:刘连(2002—),女,硕士研究生,主要从事遥感水文和水文预报研究。E-mail:2551594160@qq.com
通信作者:蒋宁(1987—),男,高级工程师,主要从事水利工程规划和建设管理研究。E-mail:267308052@qq.com

为获取降水空间分布信息的重要方式,能够根据雷达回波强度反演高时空分辨率的降水信息,但地基雷达空间覆盖范围有限,且雷达探测信号受到地形阻挡或遮蔽等影响,其定量误差比较突出,此外,在许多地区雷达运行时间较短,尚未积累足够降水资料^[4]。而卫星遥感和大气再分析资料因具有全球或准全球覆盖、共享开放程度高等优点,为获取降水时空分布信息提供了新的途径^[5]。目前,国际上已发布了一系列全球性或准全球性卫星遥感反演或再分析降水数据集,国内外学者对这些数据集的性能开展了一系列评估^[6-11]。这些研究证实了卫星反演和大气再分析资料对较大范围的降水空间分布格局具有一定的表征能力,但仍具有较大不确定性^[12]。为有效集成地表雨量监测站网等传统降水资料和雷达、卫星、大气再分析等新型降水资料,提高降水空间分布信息定量获取能力,近年来国际上推动了多源降水融合的研究,这是当前气象水文领域关注的热点^[13-18]。Beck 等^[15]于 2016 年研制并发布了一种全球性多源加权集合降水数据集 (multi-source weighted-ensemble precipitation, MSWEP),该数据集融合了大气再分析、卫星遥感反演数据信息和一定数量的雨量站网观测信息,其时间跨度自 1979 年延续至今,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (约相当于 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$),时间分辨率为 3 h。该数据集发布以来,获得了广泛关注,已有大量研究^[16-18]评估了该数据集在全球及大尺度区域、流域的适用性,并开展了水文应用。

我国小流域面广量大,是山洪灾害和水土流失防治的重点对象。这些流域内分布着众多中小水库、塘坝等基础设施,在防洪、供水、发电和水土保持等方面具有重要作用,但常缺乏充分的地表降水监测资料。我国东部地区地表雨量站网平均密度较高,不属于降水资料缺乏的地区,但由于地形地貌复杂,加之站网空间分布不均,仍有大量小流域未得到雨量站网有效覆盖,难以直接获取降水监测信息,这对当地水利工程规划设计、洪涝灾害防御、水资源开发利用和水土保持等工作形成了重要制约^[19]。全球性降水资料的出现为破解这一问题提供了重要机遇。然而,有关 MSWEP 等降水数据集的研究主要针对全球、大陆尺度或大中尺度流域^[20],针对小尺度流域的研究不多。本文以我国东南地区浙江省温州市仰义水库流域为例,开展基于 MSWEP 的缺资料小流域降水推求研究,通过与传统方法进行比较,评估 MSWEP 对当地日、月、年 3 种尺度长系列降水过程和设计暴雨的表征能力,以阐明 MSWEP 在小流域降水量推求方面的应用潜力。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

仰义水库距温州市区约 14 km,是温州市鹿城区唯一的中型水库。仰义水库流域 ($28.03^{\circ} \text{N} \sim 28.08^{\circ} \text{N}$, $120.52^{\circ} \text{E} \sim 120.56^{\circ} \text{E}$) 地处浙江省东南沿海南雁荡山延脉,隶属于浙江省第二大水系—瓯江水系。流域属亚热带季风气候区,温暖湿润、四季分明,多年平均降水量为 1 746 mm,降水年内分布不均。春末夏初太平洋副热带高压逐渐加强,与北方冷空气交绥形成静止锋,仰义水库所在地区阴雨连绵,称梅汛期(4 月 15 日至 7 月 15 日);夏秋季节冷空气衰退,在副高压控制下,热带风暴与台风盛行,称台汛期(7 月 16 日至 10 月 15 日)。该流域台风暴雨具有总量大、来势猛、雨强高、历时短等特征,降水年际变化也较大,洪涝和干旱灾害多发^[21-22]。图 1 为仰义水库流域位置及雨量站分布。

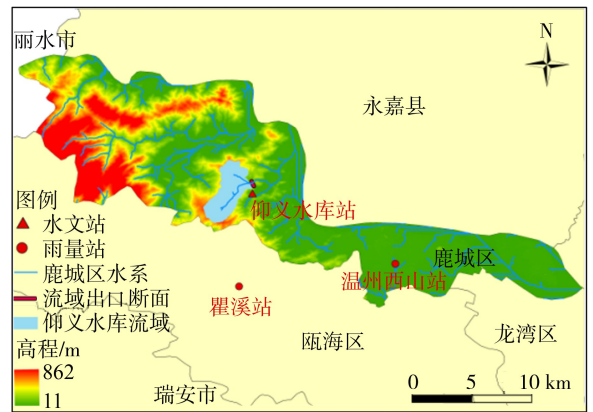


图 1 仰义水库流域位置及雨量站分布

Fig. 1 Location of the Yangyi Reservoir Basin and distribution of rain gauges

仰义水库坝址以上集水面积 11.5 km^2 ,地势较陡;主河道长 5.1 km (至分水岭),河道平均坡降 21.8‰,属典型的山溪性河流,汇流时间短,易形成突发性洪水。水库经加固之后,正常蓄水位 72.20 m,正常蓄水库容 913.3 万 m^3 ,校核洪水位为 75.48 m,总库容为 1 158.3 万 m^3 。水库以防洪、供水为主,兼顾灌溉、生态补水等综合利用功能。

1.2 数据来源

2010 年温州市水利部门在仰义水库坝址处设有 1 处遥测雨量站,收集了 2013 年至今的实测降水数据,但数据未经整编,缺乏可靠性且系列较短,故实际上难以采用。仰义水库南侧相距 8 km 的瞿溪站 ($27^{\circ}59' \text{N}$, $120^{\circ}33' \text{E}$) 具有 1961—1992 年的实测降水资料,且瞿溪站所在位置地貌条件与仰义水库较为相似,但瞿溪站不在仰义水库集水范围内,且 1992 年后停测。浙江省水文管理中心在水库东南

侧相距 11 km 处设立的温州西山站 (28°00' N, 120°40'E) 具有 1883 年以来连续的日降水观测资料。此外,从 MSWEP 官网 ([http://www. gloh2o. org](http://www.gloh2o.org)) 下载了 1979—2020 年 MSWEP 日降水系列,数据版本为 2.0,存储格式为 NetCDF 文件。根据仰义水库流域中心位置和温州西山站地理位置,提取了对应栅格单元的逐日降水量系列,并由逐日降水量累加得到逐月和年降水量系列。

2 研究方法

2.1 小流域降水量推求方法

本文主要目的是研究利用 MSWEP 推求缺资料小流域降水量的可行性。为此,采用 2 种方法推求缺资料小流域日降水量系列^[23-26]。

a. 方法 1:基于地面降水资料移用的方法。选取距离目标区域较近的站点作为参证站,利用该站与另一具有长期观测资料站点之间的日降水量关系,采用后者日降水量对参证站缺测年份的日降水量进行插补,从而获得参证站完整的长期日降水量序列,并将参证站的日降水量数据移用至目标区域。

b. 方法 2:基于 MSWEP 订正的方法。选取具备长期观测资料的参考站点,建立其日降水量与对应 MSWEP 栅格单元日降水量的回归关系;将该回归关系移用至目标区域,对目标区域 MSWEP 日降水量进行订正,并以订正后的 MSWEP 日降水量代表目标区域实际降水量。

基于上述 2 种方法获取的目标区域长期日降水量序列,分别开展频率分析,得到年最大 1 d、3 d 和 24 h 的 3 种历时设计暴雨值,并通过方法 1 对方法 2 中 MSWEP 订正的效果加以印证。此外,本文还采用了当地暴雨统计参数图集查算目标流域相应设计暴雨,以开展对比分析。

2.2 MSWEP 精度评价方法

以地表雨量站观测数据为基础,采用分类指标和定量指标评价 MSWEP 降水量的精度。分类指标包括探测率 (POD)、误报率 (FAR)、临界成功指数 (CSI);定量指标包括相关系数 (CC)、均方根误差 (RMSE)、相对偏差 (RBIAS)、纳什效率系数 (NSE)、Kling-Gupta 效率系数 (KGE)。各指标含义及计算方法见文献[2,27]。

表 1 温州西山站 MSWEP 日降水量精度评价指标

Table 1 Accuracy metrics of MSWEP daily precipitation sequence at Wenzhou Xishan Gauge

数据版本	POD	FAR	CSI	CC	RBIAS/%	RMSE/mm	NSE	KGE
订正前	0.74	0.19	0.64	0.91	-14.62	5.65	0.82	0.82
订正后	1.00	0.34	0.66	0.91	1.85	5.48	0.83	0.85

3 结果与分析

3.1 MSWEP 精度

图 2 为 1979—2020 年温州西山站日降水量与对应栅格单元 MSWEP 日降水量的散点图,表 1 为温州西山站 MSWEP 日降水量精度评价指标。由图 2 可知,虽然温州西山站日降水量与原始 MSWEP 日降水量之间具有明显差异,MSWEP 对于温州西山站日降水量存在低估现象,但 MSWEP 仍具有较强的方差解释能力,总体上两者一致性较强。订正后 MSWEP 日降水量与站点日降水量之间的一致性进一步提升。根据表 1,从分类指标来看,MSWEP 能够成功探测到温州西山站发生的多数日降水事件,订正后探测率达到 1.00,且误报率较低。从定量指标来看,在日尺度下,温州西山站 MSWEP 日降水量与站点日降水量之间线性相关性显著。订正前 MSWEP 日降水量的系统偏差较为明显,RBIAS 为-14.62%,对地表降水量存在明显低估;订正后系统偏差大幅度降低,RBIAS 为 1.85%,其他定量误差也有一定程度削减,原始 MSWEP 日降水量的 KGE 值为 0.82,订正后提高至 0.85。订正前

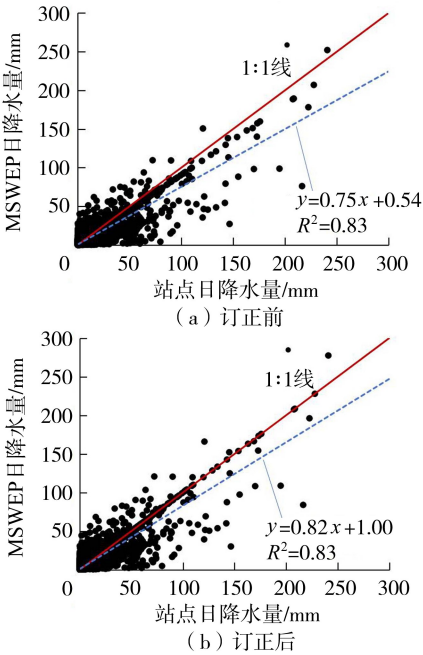


图 2 1979—2020 年温州西山站日降水量与订正前后 MSWEP 日降水量的散点图

Fig. 2 Scatter plots of daily precipitation at Wenzhou Xishan Gauge and MSWEP before and after correction from 1979 to 2020

MSWEP 最大 1 d 降水量为 258.8 mm, 订正后为 284.7 mm, 与瞿溪站最大 1 d 降水量 301.8 mm 更为接近。1979—2020 年温州西山站探测到暴雨日数为 231 天, 订正前 MSWEP 探测到 133 天, 说明原始 MSWEP 对于较大量级的日降水事件漏报较多; 但订正后 MSWEP 探测到暴雨日数为 169 天, 探测率有所提高。

3.2 降水量推求结果

3.2.1 日降水量

图 3 为 1979—1988 年温州西山站和瞿溪站日降水量散点图, 两个站点实测日降水量具有较为显著的统计相关性。

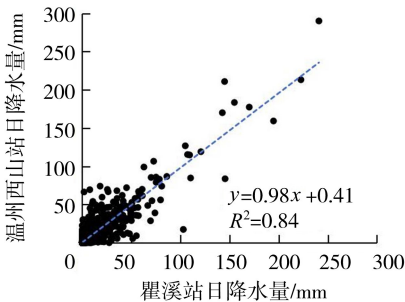
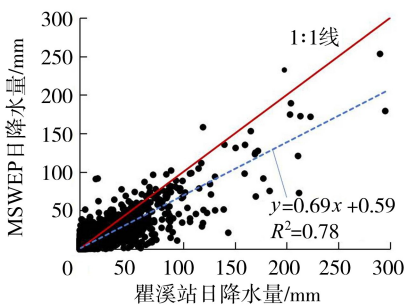


图 3 1979—1988 年瞿溪站与温州西山站日降水量散点图
Fig. 3 Scatter plot of daily precipitation at Quxi Gauge and Wenzhou Xishan Gauge from 1979 to 1988

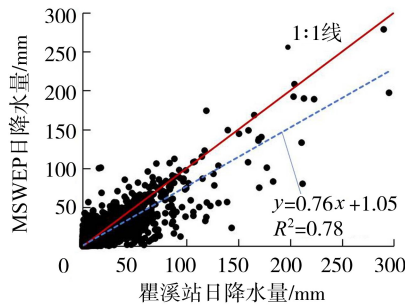
根据图 3 中的回归方程, 利用温州西山站地表实测日降水资料插补瞿溪站 2006—2020 年的日降水量, 进而利用温州西山站 MSWEP 日降水数据插补瞿溪站 1989—2005 年日降水量, 得到瞿溪站 1979—2020 年连续日降水量序列, 将其移用至仰义水库流域, 得到仰义水库流域的移用日降水量序列。同时, 基于图 2(a) 中温州西山站日降水量与订正前 MSWEP 日降水量的回归关系, 得到 1979—2020 年仰义水库流域订正后 MSWEP 日降水量序列。

图 4 为 1979—2020 年仰义水库流域订正前后 MSWEP 日降水量与瞿溪站插补后的日降水量的散点图。由图 4 可知, 原始 MSWEP 与瞿溪站日降水量一致性较好, 且订正后有所提高; MSWEP 对于温州西山站和瞿溪站插补后的日降水量均呈现低值高估、高值低估的现象, 对于大多数情况存在普遍低估。

以瞿溪站插补后的地表降水量为基准, 评估 1979—2020 年仰义水库流域 MSWEP 日降水量的精度, 结果如表 2 所示。从分类指标来看, MSWEP 能够成功探测到瞿溪站多数日降水事件, 订正后 CSI



(a) 订正前



(b) 订正后

图 4 1979—2020 年仰义水库流域订正前后 MSWEP 日降水量与瞿溪站插补后的日降水量散点图
Fig. 4 Scatter plots of MSWEP daily precipitation of the Yangyi Reservoir Basin before and after correction and daily precipitation after interpolation at Quxi Gauge from 1979 to 2020

值有所提升, 且无误报。从定量指标来看, 在日尺度上, 原始 MSWEP 日降水量与瞿溪站日降水量相关性较好, CC 值为 0.89; 但原始 MSWEP 日降水量对瞿溪站日降水量存在小幅低估, 订正后 RBIAS 的绝对值和 RMSE 进一步降低, KGE 值提升至 0.81。因此, MSWEP 的局地订正对于提高数据精度具有重要作用。

3.2.2 月降水量

由图 5 可知, 在月尺度上, 仰义水库流域 MSWEP 月降水量与瞿溪站插补后的月降水量的一致性相对日尺度有所提高。根据 1979—2020 年仰义水库流域 MSWEP 与瞿溪站平均月降水过程对比结果, 仰义水库流域 MSWEP 月降水量存在低估现象, 在汛期 7—9 月尤为明显, 订正后得到改善, 在其他月份两者比较吻合。根据表 3, 在月尺度上, 仰义水库流域 MSWEP 与瞿溪站月降水量之间线性相关性显著, 订正前 MSWEP 月降水量 NSE 和 KGE 值分别为 0.80 和 0.72, 订正后分别为 0.89 和 0.88, 说明订正后 MSWEP 月降水量对仰义水库流域的适用性较高。

表 2 仰义水库流域 MSWEP 日降水量精度评价指标

Table 2 Accuracy metrics of MSWEP daily precipitation of the Yangyi Reservoir Basin								
数据版本	POD	FAR	CSI	CC	RBIAS/%	RMSE/mm	NSE	KGE
订正前	0.67	0.06	0.64	0.89	-20.05	6.34	0.77	0.68
订正后	1.00	0.13	0.87	0.89	-4.56	6.11	0.78	0.81

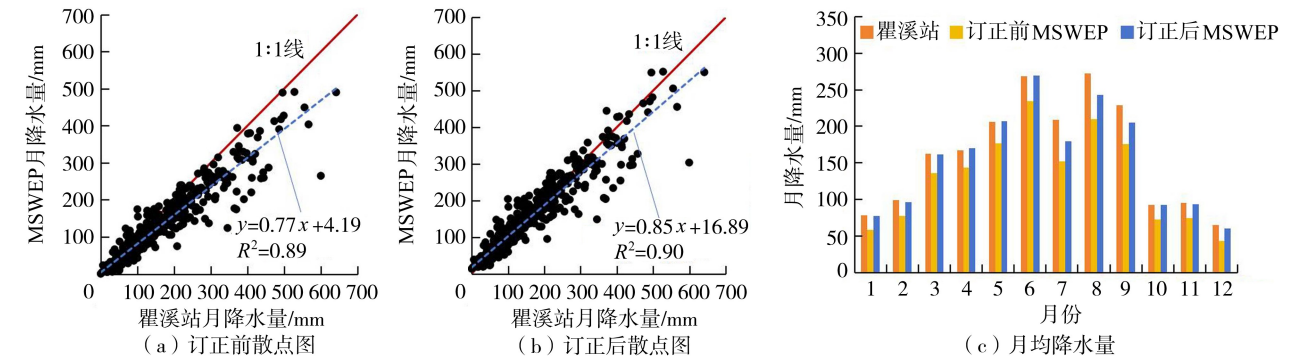


图5 1979—2020年仰义水库流域订正前后MSWEP月降水量与瞿溪站插补后的月降水量对比

Fig. 5 Comparison of MSWEP monthly precipitation of the Yangyi Reservoir Basin before and after correction and monthly precipitation after interpolation at Quxi Gauge from 1979 to 2020

表3 仰义水库流域MSWEP月降水量精度评价指标

Table 3 Accuracy metrics of MSWEP monthly precipitation of the Yangyi Reservoir Basin

数据版本	CC	RBIAS/%	RMSE/mm	NSE	KGE
订正前	0.94	-20.05	51.10	0.80	0.72
订正后	0.95	-4.56	37.76	0.89	0.88

表4 仰义水库流域MSWEP年降水量精度评价指标

Table 4 Accuracy metrics of MSWEP annual precipitation of the Yangyi Reservoir Basin

数据版本	CC	RBIAS/%	RMSE/mm	NSE	KGE
订正前	0.88	-20.05	424.69	-0.52	0.66
订正后	0.88	-4.56	185.02	0.71	0.78

3.2.3 年降水量

图6为1979—2020年仰义水库流域订正前后MSWEP年降水量和瞿溪站插补后的年降水量的对比。从图6可知,订正前MSWEP对于仰义水库流域年降水量的低估十分明显,RBIAS和KGE值分别为-20.05%和0.66,订正后得到明显改善。订正前MSWEP对瞿溪站年降水量的方差解释能力较差,订正后NSE大幅提高至0.71(表4)。经统计,订正后MSWEP推求的多年平均降水量为1946.7mm,与瞿溪站相差4.56%;两者在2010年相对误差的绝对值最大为22.47%,该年份MSWEP明显低估了仰义水库流域年降水量。

3.2.4 设计暴雨

对基于不同降水资料得到的仰义水库流域设计暴雨结果进行比较。表5给出了瞿溪站和仰义水库流域订正后MSWEP年最大1d和3d降水量的P-Ⅲ频率曲线拟合结果,并将不同方法推求的仰义水

表5 年最大1d和3d降水量的P-Ⅲ频率曲线拟合结果

Table 5 Fitting results of P-Ⅲ frequency curves for annual maximum 1-d and 3-d precipitation

数据源	历时	E_x /mm	C_v	C_s
仰义水库流域MSWEP	年最大1d	109.4	0.59	0.17
	年最大3d	167.2	0.55	0.16
瞿溪站	年最大1d	134.5	0.47	0.13
	年最大3d	205.1	0.55	0.16

注: E_x 为降水量均值; C_v 、 C_s 分别为变差系数和偏态系数。

库流域设计暴雨与《浙江省短历时暴雨图集》查算(下文简称“图集查算”)结果进行比较,结果如表6所示。除年最大1d和3d的设计暴雨外,根据年最大1d与24h设计暴雨间的折算关系,给出了年最大24h设计暴雨结果^[28]。

由表5可知,仰义水库流域MSWEP年最大1d和3d降水量的均值低于瞿溪站,MSWEP总体上低估了站点暴雨。由表6可知,对于年最大1d和24h设计暴雨,在重现期为2000a和1000a两种情

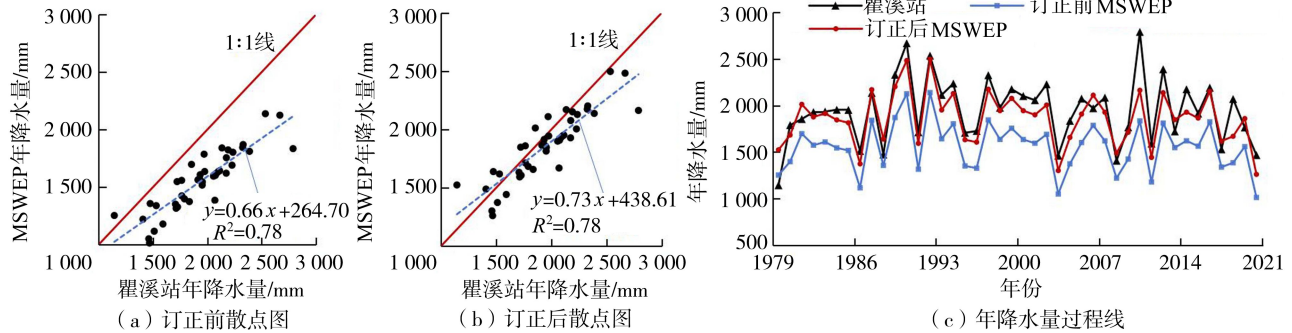


图6 1979—2020年仰义水库流域订正前后MSWEP年降水量与瞿溪站插补后的年降水量对比

Fig. 6 Comparison of MSWEP annual precipitation of the Yangyi Reservoir Basin before and after correction and annual precipitation after interpolation at Quxi Gauge from 1979 to 2020

表 6 不同方法推求的仰义水库流域设计暴雨值对比

Table 6 Comparison of design storm values in the Yangyi Reservoir Basin obtained by different methods

数据源	历时	设计暴雨值/mm						
		$T=2\,000\text{ a}$	$T=1\,000\text{ a}$	$T=100\text{ a}$	$T=50\text{ a}$	$T=20\text{ a}$	$T=10\text{ a}$	$T=5\text{ a}$
瞿溪站	年最大 1 d	516.0	478.0	350.3	311.3	258.9	218.4	176.8
	年最大 24 h	583.1	540.1	395.9	351.7	292.5	246.8	199.7
	年最大 3 d	822.8	760.6	552.1	488.5	403.4	338.1	271.2
仰义水库流域 MSWEP	年最大 1 d	542.1	496.2	344.2	298.6	238.4	193.1	148.0
	年最大 24 h	612.5	560.7	389.0	337.4	269.4	218.2	167.2
	年最大 3 d	763.3	701.3	495.1	432.9	350.3	287.6	224.4
图集查算	年最大 24 h	776.1	713.1	503.4	440.1	356.2	292.4	228.2
	年最大 3 d	1 039.1	955.2	675.9	591.4	479.4	394.3	308.4

注： T 为重现期；年最大 24 h 设计暴雨参考浙江省推理公式，取值为年最大 1 d 设计暴雨的 1.13 倍^[28]。

况下,仰义水库流域 MSWEP 设计暴雨高于瞿溪站,而在其他重现期,前者均低于后者。值得注意的是,对于重现期超过 50 a 的年最大 1 d 和 24 h 设计值,两者差异基本在 6% 以内。对于年最大 3 d 暴雨而言,在各种重现期,MSWEP 设计暴雨均低于瞿溪站设计值,但两种方法得到的设计暴雨差异均未超过 18%。

图集查算得到的仰义水库流域年最大 24 h 和 3 d 降水量的均值和设计值均明显高于瞿溪站和 MSWEP 结果。与图集查算结果相比,MSWEP 推求的设计暴雨与瞿溪站更为接近。相对图集查算方式,MSWEP 提高了仰义水库流域年最大 1 d、24 h、3 d 设计暴雨分析计算的可靠性。

3.3 讨论

本文初步验证了 MSWEP 降水产品作为一种替代性数据,在缺资料小流域长序列降水过程重建及设计暴雨推算中的适用性,揭示了直接利用 MSWEP 进行小流域设计暴雨计算存在一定的不确定性,需进行局地订正。研究结果表明,基于同场次暴雨相关关系的校正方法虽具有可行性,但难以全面反映区域降水特征的时空异质性。未来研究建议:①系统分析 MSWEP 精度的影响机制,重点探讨地形、气候和下垫面等因素对降水估算的影响;②采用基于物理机制的降尺度方法和高分辨率区域气候模式,提升 MSWEP 降水数据在小流域尺度的适用性;③建立考虑区域特征的多元校正模型,提高设计暴雨计算结果的可靠性和精度;④将研究拓展至不同气候区、不同地形地貌特征的小流域,以验证研究结论的普适性,为缺资料地区设计暴雨计算提供更为可靠的技术支撑。

4 结 论

a. MSWEP 对于温州西山站和瞿溪站日降水量呈现低值高估、高值低估的现象,易漏估暴雨事件,但仍具有较强方差解释能力,并且在采用线性回归

方法修正后,MSWEP 日降水量对站点日降水量的低估现象明显改善,系统偏差大幅度降低。

b. 在月尺度上,MSWEP 对于仰义水库流域降水量的表征能力较日时间尺度有所改善。从年内过程来看,MSWEP 主要在汛期 7—9 月对月降水量具有比较明显的低估,但订正后 MSWEP 月降水量与瞿溪站月降水量较为接近。

c. 在年尺度上,订正前 MSWEP 对于仰义水库流域年降水量的低估较明显,RBIAS 为-20.05%,但订正后 RBIAS 仅为-4.56%,且其他精度评价指标的提升也较为明显。

d. 在多数重现期下,基于 MSWEP 推求的仰义水库流域年最大 1 d、24 h、3 d 设计暴雨均低于瞿溪站点移用降水量推求结果,但两种方法所得设计暴雨的差异均未超过 18%,特别是对于重现期超过 50 a 的年最大 1 d 和 24 h 设计暴雨,两者差异基本在 6% 以内。并且对于仰义水库流域,MSWEP 推求的设计暴雨精度明显优于图集查算结果。

参考文献:

[1] CHAO Lijun,ZHANG Ke,LI Zhijia,et al. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation[J]. Journal of Hydrology,2018,558:275-289.

[2] 班春广,左德鹏,徐宗学,等. 高寒区多源降水产品精度与水文模拟效果评估:以雅鲁藏布江流域和拉萨河流域为例[J]. 水土保持学报,2023,37(2): 159-168. (BAN Chunguang,ZUO Depeng,XU Zongxue,et al. Assessment on the accuracy and hydrological simulation effect of multi-source precipitation products in the high cold alpine region:case study in the Yarlung Zangbo River Basin and the Lhasa River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2): 159-168. (in Chinese))

[3] 宋蕾玥,张珂,晁丽君,等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护,

- 2024, 40 (3): 125-132. (SONG Leiyue, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 125-132. (in Chinese))
- [4] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95 (5): 701-722.
- [5] KIDD C, HUFFMAN G. Global precipitation measurement [J]. Meteorological Applications, 2011, 18 (3): 334-353.
- [6] 孙彤, 李艳忠, 陈力, 等. 长序列遥感降水产品在黄河流域干旱监测中的适用性评估 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2024, 60 (1): 99-105. (SUN Tong, LI Yanzhong, CHEN Li, et al. Long series remote sensing of precipitation products in drought monitoring of the Yellow River Basin: applicability assessment [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60 (1): 99-105. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: Spatiotemporal patterns and extremes [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16 (1): 45-56.
- [9] ARSHAD M, MA Xieyao, YIN Jun, et al. Evaluation of GPM-IMERG and TRMM-3B42 precipitation products over Pakistan [J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105-341.
- [10] OUABA M, SAIDI M E, BIN ALAM M J. Flood modeling through remote sensing datasets such as LPRM soil moisture and GPM-IMERG precipitation: a case study of ungauged basins across Morocco [J]. Earth Science Informatics, 2023, 16 (1): 653-674.
- [11] 郭禹含, 王中根, 伍玉良. 多源再分析降水数据在拉萨河流域应用对比研究 [J]. 地理科学进展, 2017, 36 (8): 1033-1039. (GUO Yuhan, WANG Zhonggen, WU Yuliang. Comparison of applications of different reanalyzed precipitation data in the Lhasa River Basin based on HIMS model [J]. Progress in Geography, 2017, 36 (8): 1033-1039. (in Chinese))
- [12] 肖渝, 孙若辰, 王倩, 等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (2): 43-52. (XIAO Yu, SUN Ruochen, WANG Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (2): 43-52. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 雍斌, 周振杨, 陶新, 等. 黄河源区多源融合降水产品综合评价及其水文效应评估 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 47-57. (YONG Bing, ZHOU Zhenyang, TAO Xin, et al. Comprehensive evaluation and hydrological effect evaluation of multi-source fusion precipitation product in the Yellow River source area [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 47-57. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] LUO Min, LIU Yuzhi, GAO Jie, et al. A new merged product reveals precipitation features over drylands in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2024, 41 (10): 2079-2091.
- [17] 杜飞, 胡庆芳, 王银堂, 等. 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 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (4): 167-175. (DU Fei, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Validation of MSWEP daily and extreme precipitation of the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 167-175. (in Chinese))
- [18] 尹俊凯, 李国芳, 王路, 等. MSWEP 降水数据在信江流域极端降水估算中的应用 [J]. 水电能源科学, 2022, 40 (7): 1-4. (YIN Junkai, LI Guofang, WANG Lu, et al. Application of MSWEP data in extreme precipitation estimation in Xinjiang River Basin [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (7): 1-4. (in Chinese))
- [19] 李红霞, 张新华, 张永强, 等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展 [J]. 水文, 2011, 31 (3): 13-17. (LI Hongxia, ZHANG Xinhua, ZHANG Yongqiang, et al. Review of hydrological model parameter regionalization for ungauged catchments [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31 (3): 13-17. (in Chinese))
- [20] 刘昌明, 白鹏, 王中根等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例 [J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 272-282. (LIU Changming, BAI Peng, WANG Zhonggen, et al. Study on prediction of ungauged basins: a case study on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 272-282. (in Chinese))

(下转第 185 页)

Multiobjective optimization of a reservoir based on NSGA2 [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese))

[40] 刘美钰,张雷,栾清华,等. 人工鱼群算法在河间市水资源优化配置中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 74-83. (LIU Meiyu, ZHANG Lei, LUAN Qinghua, et al. Application of artificial fish swarm algorithm in optimal allocation of water resources in Hejian County, China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3): 74-83. (in Chinese))

[41] 刘霞,刘辉,苏丽娟,等. 基于 AHP—熵值综合赋权法的煤炭资源型城市生态-经济-社会协调发展分析:以鄂尔多斯市为例[J]. 生态科学, 2023, 42(3): 213-224. (LIU Xia, LIU Hui, SU Lijuan, et al. Analysis on the coordinated development of ecology-economy-society based on AHP-entropy weight method in coal resource cities: a case study of Ordos City[J]. Ecological Science, 2023, 42(3): 213-224. (in Chinese))

[42] 梁士奎,左其亨. 基于人水和谐和“三条红线”的水资源配置研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7): 1-4. (LIANG Shikui, ZUO Qiting. Study on water resources allocation based on human-water harmony and “Three Red Lines” [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(7): 1-4. (in Chinese))

[43] 黄曼丽,张健,丁大发,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 29-32. (HUANG Manli, ZHANG Jian, DING Dafa, et al. Research on optimal allocation of regional water resources based on genetic algorithm [J]. Yangtze River, 2008, 39(6): 29-32. (in Chinese))

[44] 栾清华,高昊悦,刘红亮,等. 基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an City based on GWAS model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 32-42. (in Chinese))

[45] SHI Qiwei, DUAN Limin, CUI Caiqi, et al. Optimal allocation of water resources in Ordos City based on the general water allocation and simulation model[J]. Water, 2024, 16(12): 1711.

(收稿日期:2025-01-09 编辑:施业)

+++++

(上接第 138 页)

[21] 陈浮,朱新华. 全球气候变化语境下水安全的维度与治理[J/OL]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 1-11 (2024-11-27). <https://link.cnki.net/urlid/32.1521.C.20241126.1537.004>. (CHEN Fu, ZHU Xinhua. Dimensions and governance of water security in the context of global climate change [J/OL]. Journal of Hohai University(Philosophy and social sciences), 1-11 (2024-11-27). <https://link.cnki.net/urlid/32.1521.C.20241126.1537.004>. (in Chinese))

[22] 张姣,胡庆芳,黄璟胜,等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22. (in Chinese))

[23] 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))

[24] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料小流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8. (WU Yongtuo, LI Zhijia, QI Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 1-8. (in Chinese))

[25] 华家鹏. 小流域设计洪水的计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26(2): 100-104. (HUA Jiapeng. Calculation method of design flood for small watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1998, 26(2): 100-104. (in Chinese))

[26] 何向东. 无资料地区小流域设计暴雨计算方法[J]. 地下水, 2017, 39(3): 120-122. (HE Xiangdong. Calculation method of designed rainstorm in small watershed with no data [J]. Groundwater, 2017, 39(3): 120-122. (in Chinese))

[27] 尹瑞琪,李琼芳,陈启慧,等. 伊犁河上游流域三种日尺度降水产品性能评估[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 540-549. (YIN Ruiqi, LI Qiongfang, CHEN Qihui, et al. Performance evaluation of three daily precipitation products in the upper reaches of the Ili River [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 540-549. (in Chinese))

[28] 段树萍,郭飞,梁学和. 水文分析与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2022: 209.

(收稿日期:2024-11-24 编辑:施业)