张天宇,桂术,杨若文,等,2020. TRMM 和 CMORPH 卫星资料对三峡库区降水的评估分析[J]. 气象,46(8):1098-1112. Zhang T Y,Gui S, Yang R W, et al,2020. Assessment of precipitation in the Three Gorges Reservoir Area with TRMM and CMORPH satellite data[J]. Meteor Mon,46(8):1098-1112(in Chinese).

TRMM 和 CMORPH 卫星资料对三峡库区 降水的评估分析*

张天宇^{1,2} 桂 术³ 杨若文³ 王 勇² 李永华² 1 重庆市涪陵区气象局,重庆 408000

2 重庆市气候中心,重庆 401147

3 云南大学大气科学系,昆明 650091

提要:利用1998—2016年TRMM和CMORPH两种遥感卫星资料降水和同期三峡库区气象观测站数据,通过比较干、支流和远、近库区气象站点的降水变化和蓄水前后降水量、雨日、降水强度和频率等变化特征,分析评估了基于两种卫星遥感降水和测站降水的三峡库区局地降水变化。结果表明:库区TRMM和CMORPH卫星降水年际变化特征总体上与气象观测站相符,反演效果在日尺度TRMM略逊于CMORPH,在季尺度CMORPH略逊于TRMM;两种卫星资料对冬季降水反演效果都偏弱。三峡库区干流和支流站点的降水变化总体一致,干、支流各站点降水量均具有较强的年际变化特征。TRMM相比CMORPH更能重现干、支流测站降水的年际变化特征,CMORPH降水年际波动振幅总体上比测站偏大。蓄水前后时段(1998—2003年与2004—2016年)对比,从不同等级降水的强度和雨日、季节降水频率和总量等变化反演效果来看,CMORPH资料分布相比TRMM更接近测站的变化趋势,反演效果略优于TRMM;但两种卫星资料的降水频率和降水量分布与测站的误差在蓄水前后变化都不明显。此外,气象测站、TRMM、CMORPH资料都表现出蓄水后三峡远、近库区年降水量的比值呈平稳波动状态,表明三峡水库蓄水后附近地区降水没有明显变化。

关键词:三峡库区,CMORPH,TRMM,局地降水

中图分类号: P414 文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2020. 08. 009

Assessment of Precipitation in the Three Gorges Reservoir Area with TRMM and CMORPH Satellite Data

ZHANG Tianyu^{1,2} GUI Shu³ YANG Ruowen³ WANG Yong² LI Yonghua²

1 Fuling Meteorological Office of Chongqing, Fuling 408000

2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

3 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract: Based on the TRMM and CMORPH remote sensing satellite precipitation data from 1998 to 2016 and the observation data in the Three Gorges Reservoir Area in the same period, this paper evaluates the local precipitation changes in the Three Gorges Reservoir Area by comparing the precipitation changes of the main stream and the branch stream as well as the far and the near meteorological stations, and by comparing the characteristics of precipitation, precipitation days and precipitation intensity before and after impoundment. The results show that the interannual variation characteristics of TRMM and CMORPH satellite

2019 年 5 月 23 日收稿; 2020 年 3 月 2 日收修定稿

第一作者:张天宇,主要从事区域气候变化及其影响评估研究. E-mail:zhangtianyu821227@hotmail.com

^{*} 国家自然科学基金项目(41875111、41861144012 和 41875103)、中国气象局气候变化专项(CCSF-201836)及云南省自然科学基金项目 (2018FY001-018、2018FB081 和 2018BC007)共同资助

precipitation data in the Three Gorges Reservoir Area are generally consistent with those of meteo-rological observation stations. The inversion effect of TRMM on the daily scale is slightly lower than that of CMORPH, and that of CMORPH on the seasonal scale is slightly lower than that of TRMM. The inversion effects of both satellite data on winter precipitation are weak. The precipitation variations of the main stream and the branch stream stations in the Three Gorges Reservoir Area are generally the same, having strong interannual variation characteristics. Compared with CMORPH, TRMM can roughly reproduce the interannual variation characteristics of precipitation at the main stream and branch stream stations. The interannual fluctuation amplitude of CMORPH precipitation is generally larger than that of meteorological stations. Compared with the time period before and after water storage (1998-2003 and 2004-2016), the CMORPH distribution is closer to the variation trend of the stations than TRMM in terms of the inversion effect of the precipitation intensity, precipitation days, seasonal precipitation frequency and total amount of precipitation at different grades, and the inversion effect is slightly better than TRMM. However, the precipitation frequency and distribution of the two satellites are similar to observation. The errors of the stations do not change significantly before and after impoundment. In addition, the meteorological stations, TRMM and CMORPH data show that the ratio of annual precipitation in the far and the near reservoir areas of the Three Gorges fluctuates stably after impoundment, which indicates that there is no obvious change in precipitation in the vicinity of the Three Gorges Reservoir after impoundment.

Key words: Three Gorges Reservoir Area, CMORPH, TRMM, local precipitation

引 言

长江三峡工程全称为长江三峡水利枢纽工程, 是当今世界上建成的最大型水利枢纽工程。三峡工 程局地气候影响是一个复杂、长期的气候调节过程, 其对周边气候的影响一直都被关注和研究。Wu et al(2006)研究表明三峡大坝建成后大坝附近的降 水有所减少,而大坝和秦岭山脉之间区域的降水有 所增加。近年来,随着蓄水后气象观测资料序列长 度的增加,不少研究表明蓄水后局地降水没有明显 变化,三峡地区降水变化在很大程度上受到西南区 域大环流气候背景影响(陈鲜艳等,2009;2013;蔡庆 华等,2010;张天宇等,2014)。

也有一些学者利用数值模式来模拟三峡库区的 气候效应(张洪涛等,2004;李强等,2011)。利用 RegCM3 区域气候模式研究三峡库区气候效应表 明,水库对周边区域气温、降水的影响很小(吴佳等, 2011),对附近气候影响范围不超过 20 km(中国气 象局国家气候中心,2011;陈鲜艳等,2013;矫梅燕, 2014);冬季降水的减少很小,在距水面 10 km 以内 的减少程度仅在 1%~2%,夏季稍微大一些,在水 面上为 10%左右,而到 10 km 的地方已经衰减至 5%以下(陈鲜艳等,2013;矫梅燕,2014)。相对气象 台站观测资料和数值模拟,利用卫星资料来研究三 峡库区的气候和气候效应仍然较少,冯茹等(2013) 和高蕾等(2014)利用 MODIS 卫星资料研究三峡库 区地表温度格局和三峡工程对库区地表温度的影 响。李博和唐世浩(2014)利用 TRMM 3B43 卫星 降水产品分析了三峡蓄水前后库区的局地降水变 化。

近年来,卫星遥感数据在不同区域降水的应用 和研究越来越多(王宝鉴等,2017;金晓龙等,2018; 张夕迪和孙军,2018;何爽爽等,2018;桂海林等, 2019),受数据源和反演算法等因素的影响,不同卫 星降水产品的精度表现各异(廖荣伟等,2015);受 气候类型、时间尺度和地形等因素的影响,同一卫星 降水产品在不同区域的精度也存在差异(刘元波等, 2011;郭瑞芳和刘元波,2015)。三峡库区地形复杂, 气象站点分布不均匀,卫星降水数据在该地区的应 用显得更为必要。基于 TRMM 单一卫星有一些研 究,如在川渝地区(杨云川等,2013;嵇涛等,2014; 2015;吴建峰等,2014a)、湖北省(王维琛等,2017)、长 江流域(谷黄河等,2010;金秋等,2017)、三峡库区(李 博和唐世浩,2014)都进行过精度评估或适用性分析, 评估尺度主要集中在日、月和年尺度。而多种卫星降 水数据在三峡库区的对比研究并不多。Li et al (2013) 对 TRMM3B42-V7、TRMM3B42-RT、PER-

SIANN、CMORPH等多种卫星降水产品在长江流域的适用性进行评价,表明大多数卫星降水产品不能有效捕捉冬季降水量。

本文以三峡库区为研究对象,将基于气象台站 观测降水和 TRMM、CMORPH 两种卫星降水来分 析三峡库区的局地降水变化,尤其是蓄水前后的降 水变化对比;同时评估 TRMM 和 CMORPH 两种 卫星降水对库区气象测站降水的反演效果,期望利 用多源卫星结合测站降水数据研究得到一些有意义 的结果,进一步提升对三峡库区气候及其影响的认 识。

1 资料和研究区域

三峡工程地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山、南依川鄂高原。三峡库区包含了长江流域因三峡水电站的修建从而被淹没的湖北省和重庆市所辖的部分区县(矫梅燕,2014)。三峡库区地处亚热带湿润季风气候,由于长江以北有大巴山山脉,延伸部分的神农架山地和长江以南的巫山山脉作为屏障,使得西伯利亚冷空气不易侵入,形成了四季分明,冬季温和、夏季炎热、雨量适中、雨热同季、温暖湿润的气候特点。库区年降水量在1000~1300 mm,自西向东呈多一少一多的分布格局,沿江河谷少雨,外围山地逐渐增多(矫梅燕,2014)。

三峡库区分布有 35 个国家基本气象观测站,海 拔在 177.9~786.9 m,包括湖北省 12 个站和重庆 市 23 个站,分布见图 1。本文使用 1998—2016 年 三峡库区 35 个国家气象站观测的逐小时降水资料, 其经过了严格的质量控制(王新华等,2006;任芝花 等,2010)。为了对比分析三峡库区干、支流和远、近 库区降水变化,参照李博和唐世浩(2014)的研究,干 流选择了万州、涪陵、奉节、巴东、巫山、宜昌 6 个气 象站,支流选择了巫溪、兴山、彭水、五峰、恩施、梁平 6 个气象站。参考陈鲜艳等(2009)和张天宇等 (2010)的研究,近库区选取了巫山、巴东 2 个代表气 象站,长江以北远库区选取了巫溪、兴山2个代表气



Fig. 1 Distribution of national meteorological stations in the Three Gorges Reservoir Area

象站,长江以南远库区选取了恩施、建始2个代表气象站。

选取的两种来源的卫星资料分别是 TRMM 和 CMORPH,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率 为3 h,TRMM 使用最新发布的 TRMM3B42_V7 版 本;CMORPH 采用最新发布的 V1.0 版本,即 CMORPH CRT(郭瑞芳和刘元波,2015),具体信息 见表 1。两种卫星降水资料研究时段统一取为 1998—2016年。此外,插值选用克里格插值方法, 与普通的插值方法估计不同,克里格插值方法最大 限度地利用了空间现有所提供的信息,使得这种估 计比其他传统方法更精确更符合实际(高歌等, 2007)。为了便于对比分析,把卫星数据插值到气象 站点上,然后统计各气象站点上的日、月、季、年不同 时间尺度的降水量。

2 二种卫星资料反演降水在库区的时 空变化特征对比分析

基于气象观测站和两种卫星降水资料首先分析 三峡库区各季节气候平均降水的变化及其卫星资料 对测站降水的反演效果。图2表示测站资料与卫星 资料的季节平均日降水量分布。图中 TRMM 和 CMORPH 在春、夏、秋三个季节的降水反演空间分 布和降水量均接近观测资料的特征,冬季在三峡库

表1 使用的两种卫星降水产品的信息简表

	Table 1	Information su	sipitation products used			
卫星降水产品		来源	反演算法	时间分辨率/h	空间分辨率	
	TRMM 3B42_V7	NASA	TMPA	3	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	
	CMORPH V1.0	NOAA	CMORPH	3	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	

区西侧降水估计偏低,而 CMORPH 在三峡库区中 部明显高估了降水量。图3给出了相应的季节平均 日降水量散点图,由图可见,四个季节 TRMM 分布 都相比 CMORPH 更接近测站,相关系数相对更高, 均方根误差相对更小,除夏季外相对误差也最小。 两种卫星资料在冬季都有不同程度的降水估计偏少,和图 2 中冬季降水分布一致。



(a,d,g,j)观测值,(b,e,h,k)CMORPH,(c,f,i,l)TRMM

Fig. 2 Distribution of seasonal average daily precipitation (unit: mm) in spring (a, b, c), summer (d, e, f), autumn (g, h, i) and winter (j, k, l) in the Three Gorges Reservoir Area during 1998-2016 (a, d, g, j) observation, (b, e, h, k) CMORPH, (c, f, i, l) TRMM



图 3 1998—2016 年三峡库区春(a,e),夏(b,f),秋(c,g),冬(d,h)季节平均日降水量散点图 (a,b,c,d)CMORPH,(e,f,g,h)TRMM

Fig. 3 Scatter plot of average daily precipitation in spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g) and winter (d, h) in the Three Gorges Reservoir Area during 1998-2016

(a, b, c, d) CMORPH, (e, f, g, h) TRMM

图 4 为卫星日降水与测站资料分布的散点图, 测站降水在 1 mm 以下表现为分离的竖线,原因是 测站资料的降水值最小计量为 0.1 mm,依次累计 得到观测值。由图可见,TRMM 和 CMORPH 都比 较接近观测值的分布,多数点分布在 1:1 的黑色实 线周围。CMORPH 数据在 4~32 mm 区间最优, TRMM 略逊之。它们的相关系数(CC)、均方根误 差(RMSE)和相对误差(BIAS)见表 2,其中 CMOR-PH 的相关系数为 0.86,均方根误差为4.53,相对 误差为-0.20%;TRMM 的相关系数0.84,均方根 误差 4.68,相对误差-3.27%。

综合来看,TRMM和CMORPH卫星降水对三 峡库区气象测站降水的反演效果都较为理想。从日 和季节尺度变化来看,季尺度上CMORPH略逊于 TRMM;日尺度上TRMM略逊于CMORPH。有 研究表明,CMORPH和TRMM的降水反演能力受 地形影响较大(白爱娟等,2011;Fu et al,2006),三 峡库区地形复杂,海拔在34~2854 m(图 1),库区 卫星降水反演能力在一定程度上会受地形影响。此 外,三峡库区大部分地区多云和多大雾天气,尤其在 冬季,如重庆冬季雾日占全年雾日的41%(张天宇 等,2014);高层易被大陆性云所覆盖,因而低层与降 水有关的层云难被卫星探测到(刘俊峰等,2010),这 可能是导致冬季降水反演效果明显低于其他季节的 原因之一。

参照李博和唐世浩(2014)的做法,基于测站和 两种卫星资料的干、支流降水的变化特征进行对比 分析。选取的干流气象站点依次为万州、涪陵、奉 节、巴东、巫山和宜昌站,支流气象站为巫溪、兴山、 彭水、五峰、恩施和梁平站,它们的逐年变化如图 5 所示。由图可见,干流和支流站点的降水变化总体 上是比较一致的,各站点的降水量均具有较强的年 际变化特征,与整个三峡库区年降水量的变化比较 一致(图 5a)。TRMM 卫星资料能大致重现测站降 水的年际变化特征,部分干流和支流站点的波动变 化特征与观测结果有一定差异,例如万州和沙坪分





表 2 1998—2016 年三峡库区测站日降水量与卫星资料的统计结果
包括相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)和相对误差(BIAS)

Table 2	Statistics correlation	tion coefficient (C	CC), root mea	n square error	(RMSE) and rel	ative error (BIAS) of
daily pı	ecipitation data o	of stations and sat	ellite data in t	he Three Gorge	es Reservoir Area	during 1998-2016

	CC		RMSE		BIAS/%	
	CMORPH	TRMM	CMORPH	TRMM	CMORPH	TRMM
春	0.86	0.84	4.07	4.58	0.49	-1.03
夏	0.85	0.86	5.17	4.94	0.90	-5.05
秋	0.84	0.82	4.77	5.13	-0.70	-1.49
冬	0.64	0.63	2.39	2.51	-14.54	-10.84
平均	0.86	0.84	4.53	4.68	-0.20	-3.27

坝站在 2010—2016 年降水量的年际变化较为剧烈, 来凤站在 2001—2008 年波动振幅也明显大于观测 结果(图 5b)。CMORPH 卫星数据的降水年际波动 振幅总体上偏大,沙坪坝和涪陵站在 1998—2010 年 年降水量反演偏少,五峰站年降水量反演偏多,万州 站在 2010 年以后年降水量反演也偏多(图 5c)。 接下来对主要干、支流站点的降水反演效果进行比较,见图 6。对于大多数干流气象站,降水量较高的年份有 2002、2003、2008、2011、2014 和 2016 年,而降水量较低的年份为 2001、2006 和 2012 年。它们的变化特征与整个库区平均降水量的变化相符。两种卫星资料的反演效果在各个干流站点皆有不同,



图 5 1998—2016 年三峡库区干、支流气象站点年降水量变化 (a)观测值,(b)TRMM,(c)CMORPH



(a) observation, (b) TRMM, (c) CMORPH



Fig. 6 Changes of annual accumulated precipitation at the main stream meteorological stations in the Three Gorges Reservoir Area during 1998—2016

(a) Wanzhou, (b) Fuling, (c) Fengjie, (d) Badong, (e) Wushan, (f) Yichang

TRMM资料相对更接近测站值的变化,CMORPH 资料在万州、奉节、巫山站的降水波动曲线明显高于 测站值。在三峡库区蓄水以后,干流气象站的降水 变化差异增大,譬如 2006—2011 年间,万州、巴东、 巫山站的降水年际波动比较明显,而涪陵和宜昌站 的年际波动较弱。相比于测站资料,两种卫星资料 在这个时段的年际变化都比较明显,尤其年际波动 较弱的测站更为显著。实测资料和卫星反演的多年 平均年降水量如表 3 所示,CMORPH 在万州和奉 节站的降水反演较多,TRMM 在巴东和宜昌站的降 水反演较少,与图 6 的结果一致。

支流气象站的降水变化与干流站点存在一定的 差异,不过降水量高低值的年份与干流站点接近,波 动趋势在总体上也较为相似。CMORPH 巫溪和彭 水站都最接近测站值,五峰站明显高于测站值。 TRMM 与 CMORPH 变化趋势相似,不过在梁平和 兴山站都比 CMORPH 更接近测站值。库区蓄水 后,五峰站年降水量变化相对平稳,其他各站都表现 出较为明显的年际波动,波峰波谷间相差可达 600 mm 以上,如彭水和恩施站 2006 年均为波谷, 2008 年到达波峰,年降水量相差 800 mm 左右。对 测站资料的年际波动,CMORPH 资料在巫溪站符 合度较高,彭水站虽然在 2008 年左右反演效果不 错,但在 2013 年出现反位相变化。TRMM 资料在 恩施和梁平站与测站资料的变化较为一致,其他站 点降水波动比测站资料更平稳(图 7)。测站资料和 卫星反演的多年平均年降水量如表 3 所示,CMOR-PH 在五峰站的降水反演较多,TRMM 在恩施站的 降水反演较少,与图 7 的结果一致。

3 蓄水前后局地降水变化对比

图 8 给出了基于测站和两种卫星资料的三峡库 区蓄水前后的季节降水变化差值场。图中测站结果

表 3 1998—2016 年三峡库区干、支流气象站点多年平均的降水量(单位:mm) Table 3 Multi-annual mean precipitation at both main stream and branch stream meteorological stations in the Three Gorges Reservoir Area during 1998—2016 (unit: mm)

	Statio	is in the rinee o	orges reservor	i intea during 1990	2 010 (unit, min)		
干流气象站	观测值	CMORPH	TRMM	支流气象站	观测值	CMORPH	TRMM
万州	1158.3	1 288. 2	1181.0	巫溪	1120.6	1183.9	1048.4
涪陵	1096.4	1025.8	1085.3	兴山	953.8	1038.4	943.5
奉节	1052.2	1236.3	1083.5	彭水	1233.7	1112.7	1143.3
巴东	1100.1	1106.0	1038.2	五峰	1188.5	1335.3	1219.9
巫山	1031.9	1145.7	1047.4	恩施	1389.2	1192.1	1215.4
宜昌	1109.0	1138.0	1048.7	梁平	1213.5	1116.6	1130.6





Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the branch stream meteorological stations

(a) Wuxi, (b) Xingshan, (c) Pengshui, (d) Wufeng, (e) Enshi, (f) Liangping



图 8 三峡库区蓄水前后春(a,b,c),夏(d,e,f),秋(g,h,i)和冬(j,k,l)季节平均日降水量差值变化(单位;mm) (a,d,g,j)观测值,(b,e,h,k)CMORPH,(c,f,i,l)TRMM (以 2004-2016 年平均与 1998-2003 年平均之差表示)

Fig. 8 Deviation variation of average daily precipitation (unit: mm) in spring (a, b, c), summer (d, e, f), autumn (g, h, i) and winter (j, k, l) before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area (a, d, g, j) observation, (b, e, h, k) CMORPH, (c, f, i, l) TRMM
(The biff of the initial back of the second se

(The difference of precipitation between averaged 2004-2016 and averaged 1998-2003)

分布与李博和唐世浩(2014)的研究结果大致相同, 些许差异主要是选取的年份不同。首先分析测站资 料所呈现出的季节降水变化特征,三峡库区春季降 水总体上有所减少,上游个别地区降水增加;夏季降 水也呈现出总体减少的趋势,上游地区和部分中下 游干流区域的雨量减少较为明显;秋季降水总体上 呈增长趋势,下游个别地区降水减少;冬季大部分库 区降水增加,部分中游支流地区降水减少。

接下来比较卫星资料反演的情况。TRMM和 CMORPH 能反映出季节内降水变化的区域特征, 不过 TRMM 在春季没有反映出上游部分支流区域 降水增多的特征,CMORPH 在秋季全场一致降水 增多,没有反映出下游部分区域降水减少的变化。 两种卫星资料对冬季降水反演效果均不理想,降水 变化的高值中心有所偏移。

三峡库区蓄水前后年平均日降水变化的对比, 李博和唐世浩(2014)利用 TRMM 和测站资料研究 表明 31°N 以南的大部分地区降水都是减少的,本 文研究结果(图略)与之一致;但降水增多的区域位 于长江以北地区,本文研究结果显示在库区中游北 部雨量增多。三峡库区蓄水前后的降水差异在重庆 区域与周李磊等(2017)用 1998—2014 年的降水资 料求出的变化趋势相同。TRMM 卫星资料表现出 上游和下游地区降水减少,中游地区降水增多的三极型降水变化,在库区中游北部降水偏多,与测站结果大致相符。CMORPH资料虽然也能体现出三峡库区北侧降水偏多的变化特征,但在三峡库区中上游降水增加,与测站结果不符。

据徐新创等(2014)对中国降水量的变化趋势研 究方法,对三峡库区蓄水前后的雨日变化和降水强 度变化趋势进行比较分析。采用最小二乘法计算不 同等级降水值与相应年份的线性回归系数,得到降 水倾向率 b。按照同样的方法计算得到降水日数变 化趋势 b_f。根据 Karl and Knight (1998)对雨日变 化趋势和雨强变化趋势的计算方法,对不同等级降 水事件计算其雨日变化和平均降水量,求出雨日变 化导致的降水量的变化趋势。由于降水强度的变化 可能会越级改变上一级降水日数的变化,它们对降 水量的变化产生的作用不容易分离,因此暂不继续 研究二者的相对贡献大小。

三峡库区蓄水前后降水强度的变化引起的降水 量变化趋势如图 9 和图 10 所示。由于库区蓄水前 降水强度的计算涉及年份较少(1998—2003 年),降 水强度影响降水变化的趋势相对较大。库区蓄水前 小雨和中雨的降水强度在中下游地区有明显的上升 趋势,而在上游地区呈现出下降趋势。大雨量级的 降水强度在中上游地区有所增加,但在下游地区又 有所减小。暴雨量级的降水强度在上游和下游地区 都有所增加,但在中游地区有所减弱。两种卫星资 料的降水强度变化总体来看都有一定的误差, CMORPH分布相比 TRMM 更接近测站资料的变化 趋势。CMORPH卫星资料的小雨强度变化不明显, 中雨和大雨的强度贡献都比较接近测站结果,暴雨贡 献在中游地区偏大而在下游地区偏小。TRMM 卫星 资料在四个量级降水事件中反演效果较好的是大 雨,降水强度在中上游地区有所增加,但在下游地区 又有所减小,强度贡献偏大,与测站资料结果略有偏 差。小雨的强度贡献与观测资料相比,在中下游强



图 9 观测值(a,d,g,j),CMORPH(b,e,h,k)和 TRMM(c,f,i,l)资料三峡库区蓄水前不同等级降水强度的空间分布 (单位:mm·a⁻¹)(a,b,c)小雨,(d,e,f)中雨,(g,h,i)大雨,(j,k,l)暴雨

Fig. 9 Spatial distribution of precipitation intensity at different grads before impoundment (unit: mm • a⁻¹)
(a, b, c) small rain, (d, e, f) moderate rain, (g, h, i) heavy rain, (j, k, l) rainstorm in the Three Gorges Reservoir Area (a, d, g, j) observation, (b, e, h, k) CMORPH, (c, f, i, l) TRMM



图 10 同图 9,但为蓄水后 Fig. 10 Same as Fig. 9, but for after impoundment

度贡献偏小,而上游强度贡献偏大。中雨在下游的 强度贡献与观测资料较为一致,但对中上游反演效 果较差。暴雨贡献在中游地区偏大而在下游地区偏 小。

三峡库区蓄水后降水强度对降水量的贡献相对 减弱,主要原因是涉及年份较多,变化趋势减缓 (图 10)。卫星资料反演效果与三峡库区蓄水前的 反演效果相似,两种卫星资料的降水强度变化总体 来看都有一定的误差。同样,CMORPH 资料分布 相比 TRMM 更接近测站资料的变化趋势。

从三峡库区蓄水前后雨日变化对降水的贡献来 看(图略),两种卫星资料的雨日贡献总体来看都有 一定的误差,CMORPH资料分布相比TRMM更接 近测站资料的变化趋势。库区蓄水后上游地区的降 水日数贡献有明显增加(中雨量级到暴雨以上),且 降水日数的贡献分布较为均匀。对比测站资料,两 种卫星资料反演的中雨和大雨的降水日数贡献偏 低,而对小雨的反演则出现中游明显偏高。总体反 演效果比较则与蓄水前一致,CMORPH表现比 TRMM略好些。

参考 Dyrrdal et al (2018) 对夏季降水频率 (SWF)和夏季总降水量(SWT)的定义,降水频率采 用3h资料进行计算,当降水量超过0.5 mm 时记 为一次降水事件,这些降水事件的雨量之和即为总 降水量。本文利用该方法对四个季节的降水反演效 果进行比较。三峡库区蓄水前后卫星资料的各季节 3h降水频率反演误差如图11 所示。总体来说,三 峡蓄水前后卫星资料在春、秋季的反演效果差别不 明显(图 11a,11c),夏季降水频率的卫星反演误差 在库区蓄水后有所增大(图 11b),冬季降水频率的 卫星反演效果变化各不相同(图 11d)。具体来说, 库区蓄水后 CMORPH 资料在春季的降水频次误差 分布范围有所收敛, TRMM 资料则有所增大; CMORPH 和 TRMM 资料在夏季的误差中值和分 布范围都有所增大;秋季 CMORPH 资料误差分布 范围有所增大,TRMM 资料误差中值和分布范围蓄 水前后变化不明显;冬季 TRMM 资料的误差中值 在库区蓄水后明显减少,同期 CMORPH 资料的误 差分布范围也有所收敛。在两种卫星资料对三峡库 区蓄水前后各季节降水频率的反演中,CMORPH 反演效果要略优于 TRMM。TRMM 资料一般容易 高估降水频率;对冬季降水频率反演效果不稳定,误 差浮动范围较大。

三峡库区蓄水前后卫星资料的各季节3h降水 量反演误差如图12所示。对比蓄水前,蓄水后春季 和夏季两种卫星资料反演误差增大,主要表现为误 差中值增大(图12a,12b);秋、冬季 TRMM资料反演 效果有所改善,误差的中值和误差分布范围均变小; CMORPH资料在秋、冬季节的反演误差增大,主要表 现为误差中值的绝对值增大。对比两种卫星资料对 三峡库区蓄水前后3h降水的反演效果,CMORPH 反演效果要优于 TRMM。TRMM 在四个季节中一 般容易高估降水量,降水频次也偏多(图11)。



(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 11 Inversion error of precipitation frequency in different seasons before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir Area(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter



图 12 同图 11,但为总降水量 Fig. 12 Same as Fig. 11, but for total precipitation

从三峡库区季节降水频率分布来看(图略),蓄 水前后略有差别,可能与库区蓄水前降水频率的计 算涉及年份相对较少(1998—2003年)有关。两种 卫星资料中,CMORPH资料的四个季节的降水频 率分布都与测站资料比较接近,仅在冬季略高于测 站降水频率,同样 TRMM 资料在冬季的反演也易 高估降水频率,且程度大于 CMORPH。两种卫星 资料的降水频率分布总体来看都有一定的误差,但 这种误差在蓄水前后变化不明显。从三峡库区季节 降水量分布来看(图略),与降水频率相似,总降水量 在蓄水前后也略微有所差别,CMORPH 资料反演 效果相对 TRMM 好,其四个季节的分布情况与测 站资料都较为接近。TRMM 资料对春季、秋季和冬 季的降水量都有高估的情况,这样的误差同样几乎 不因库区蓄水而改变。 三峡库区蓄水前后测站资料和卫星反演的年平 均累计降水量在干、支流站点的变化如表 4 和表 5 所示。CMORPH资料对于干流站点在蓄水前的降 水反演效果总体上与测站结果一致,但蓄水以后降水 反演偏多,其中最典型的是万州站和奉节站:其 2004—2016年的年平均降水量的测站值分别为 1125.8和967.1mm,但卫星反演数据显示为1334.7 和1221.2mm。TRMM资料对干流站点的降水反演 平均值在蓄水前偏少,例如涪陵站的测站值为 1184.3mm,而TRMM反演值为1084.3mm。蓄 水后TRMM反演误差降低,比CMORPH更接近 测站结果。卫星资料对支流站点的年平均降水量的 反演效果有一定差异。在蓄水前CMORPH容易低 估降水量,例如彭水站的测站均值为1324.1mm, 而CMORPH数据仅为1112.6mm。TRMM资料虽

表 4 三峡库区蓄水前后干流气象站点的多年平均累计降水量(单位:mm) Table 4 Multi-annual mean accumulated precipitation at main stream meteorological stations before

	and arte	er impounding in u	le Three Gorges I	Acservoir Area (1	mit: mm)		
中十 6几		1998—2003 年		2004—2016 年	2004—2016 年		
时权	观测值	CMORPH	TRMM	观测值	CMORPH	TRMM	
万州站	1 228.7	1187.4	1143.5	1125.8	1 3 34.7	1198.3	
涪陵站	1184.3	1040.8	1084.3	1055.8	1018.9	1085.7	
奉节站	1236.5	1269.1	1164.7	967.1	1221.2	1046.0	
巴东站	1109.1	1125.5	1075.1	1095.9	1096.9	1021.1	
巫山站	1093.6	1173.8	1114.8	1003.5	1132.7	1016.3	
宜昌站	1137.8	1139.1	1104.9	1095.7	1137.5	1022.7	

1	1	0	9

Table 5 Same as Fig. 4, but for branch stream							
中历		1998—2003 年			2004—2016 年		
时权	观测值	CMORPH	TRMM	观测值	CMORPH	TRMM	
巫溪站	1078.5	1183.0	1125.3	1140.1	1184.3	1012.8	
兴山站	989.1	1045.7	970.6	937.5	1035.1	931.0	
彭水站	1324.1	1112.6	1156.4	1192.0	1112.7	1137.3	
五峰站	1198.0	1357.7	1277.2	1184.1	1325.0	1193.4	
恩施站	1372.2	1 200.9	1260.0	1397.0	1188.1	1194.8	
梁平站	1179.7	1062.8	1091.8	1229.1	1141.5	1148.5	

表 5 同表 4,但为支流 Sable 5 Same as Fig 4 but for branch streau

然也存在低估降水量的情况,但总体误差比 CMOR-PH小。库区蓄水后 CMORPH 的年平均降水量反 演误差在不同站点间差异较大,例如五峰站测站值 为1184.1 mm,CMORPH 值为1325.0 mm,明显 高估了降水量;而恩施站测站值为1397.0 mm, CMORPH 值为1188.1 mm,明显低估了降水量。 相比之下,TRMM 资料的误差相对较小。

为了进一步分析蓄水前后三峡库区的局地降水 变化,参照陈鲜艳等(2009)和张天宇等(2010)的方 法,选取近库区(巫山、巴东)、长江以北远库区(巫 溪、兴山)和长江以南远库区(恩施、建始)的代表站, 对蓄水前后的远近库区降水量比值的变化进行分析。测站资料结果显示蓄水对库区年降水量的影响 不明显,没有造成显著的上升或下降趋势,远近库区 年降水量的比值呈平稳波动状态,表明三峡水库蓄 水后附近地区降水没有明显变化。近库区与江北远 库区的比值普遍高于近库区与江南远库区的比值 (图 13a),与张天宇等(2010)和陈鲜艳等(2014)的 研究结果相符。TRMM资料的远近库区降水量之 比与测站结果比较接近,年际波动相对平稳,江南与



the far-reservoir area in the Three Gorges Reservoir Area during 1998-2016

(a) observation, (b) TRMM, (c) CMORPH

江北远库区年降水量的差异略微偏少(图 13b)。 CMORPH资料也能再现测站资料的平稳波动变化 特征,但江南与江北远库区年降水量的差异较少,近 库区与江北远库区的比值偏低(图 13c)。

4 结 论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)1998—2016 年三峡库区 TRMM 和 CMO-RPH 卫星降水年际变化特征总体上与气象观测站 相符,反演效果日尺度 TRMM 略逊于 CMORPH, 季尺度 CMORPH 略逊于 TRMM;两种卫星资料对 冬季降水反演效果都偏弱。

(2)1998—2016 年三峡库区干流和支流站点的 降水变化总体一致,干、支流站点的降水波动趋势较 为相似,各站点降水量均具有较强的年际变化特征。 TRMM 能大致重现测站降水的年际变化特征, CMORPH 降水年际波动振幅总体上偏大。TRMM 在大多数干流站点的反演效果优于 CMORPH。 TRMM 和 CMORPH 对于支流站点的降水反演各 有优劣。

(3)蓄水前后时段(1998—2003年与2004— 2016年)对比,从不同等级降水的强度和雨日变化、 3h资料计算的季节降水频率和总量等指标反演效 果来看,CMORPH分布相比TRMM更接近测站的 变化趋势,反演效果略优于TRMM。但两种卫星的 降水频率和降水量分布与测站的误差在蓄水前后变 化都不明显。此外,气象测站、TRMM、CMORPH 资料都表现出蓄水后三峡远、近库区年降水量的比 值呈平稳波动状态,没有显著的上升或下降趋势,表 明三峡水库蓄水后附近地区降水没有明显变化。

本文旨在利用多源卫星和气象观测站降水来分 析三峡库区的局地降水变化和卫星资料对库区降水 的反演效果,没有涉及更多的天气气候背景,对卫星 反演测站的误差来源及成因也缺乏深入探讨。今后 更多来源的卫星遥感资料在三峡库区气候及气候效 应方面的研究,能进一步提升对该区域气候及其影 响的认识。

参考文献

白爱娟,刘晓东,刘长海,2011. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化 的对比分析[J]. 高原气象,30(4):852-859. Bai A J,Liu X D,Liu C H,2011. Contrast of diurnal variations of summer precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor,30(4):852-859(in Chinese).

- 蔡庆华,刘敏,何永坤,等,2010.长江三峡库区气候变化影响评估报告[M].北京:气象出版社. Cai Q H, Liu M, He Y K, et al, 2010. Climate Change Impact Assessment Report in the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等,2013. 长江三峡库区和上游气候变化特 点及其影响[J]. 长江资源流域与环境,22(11):1466-1471. Chen X Y,Song L C,Guo Z F, et al, 2013. Climate change over the Three Gorge Reservoir and upper Yangtze with its possible effect[J]. Resour Environ Yangtze Basin,22(11):1466-1471(in Chinese).
- 陈鲜艳,张强,叶殿秀,等,2009. 三峡库区局地气候变化[J]. 长江流 域资源与环境,18(1):47-51. Chen X Y, Zhang Q, Ye D X, et al, 2009. Regional climate change over Three Gorges Reservoir Area[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 18(1):47-51(in Chinese).
- 冯茹,孟翔飞,魏虹,等,2013. 基于 MODIS 的三峡库区(重庆段)地 表温度格局[J]. 生态学杂志,32(9):2398-2406. Feng R, Meng X F, Wei H, et al, 2013. Distribution pattern of land surface temperature in the Three Gorges Reservoir Region (Chongqing section) of China based on MODIS[J]. Chin J Ecol,32(9):2398-2406(in Chinese).
- 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等,2007. 日降水量空间插值方法研究[J]. 应 用气象学报,18(5):732-736. Gao G,Gong L B,Zhao S S,et al, 2007. Spatial interpolation methods of daily precipitation[J]. J Appl Meteor Sci,18(5):732-736(in Chinese).
- 高蕾,陈海山,孙善磊,2014. 基于 MODIS 卫星资料研究三峡工程对 库区地表温度的影响[J]. 气候变化研究进展,10(3):226-234. Gao L,Chen H S,Sun S L,2014. Impacts of Three Gorges Project on land surface temperature based on MODIS dataset[J]. Prog Inquisit Mutat Climatis,10(3):226-234(in Chinese).
- 谷黄河,余钟波,杨传国,等,2010.卫星雷达测雨在长江流域的精度 分析[J].水电能源科学,28(8):3-16.Gu H H,Yu Z B,Yang C G,et al,2010. Application of satellite radar observed precipitation to accuracy analysis in Yangtze River Basin[J]. Water Resour Power,28(8):3-16(in Chinese).
- 桂海林,诸葛小勇,韦晓澄,等,2019. 基于 Himawari-8 卫星的云参数 和降水关系研究[J]. 气象,45(11):1579-1588. Gui H L,Zhuge X Y,Wei X C,et al,2019. Study on the relationship between Himawari-8-based cloud parameters and precipitation[J]. Meteor Mon,45(11):1579-1588(in Chinese).
- 郭瑞芳,刘元波,2015.多传感器联合反演高分辨率降水方法综述
 [J].地球科学进展,30(8):891-903.Guo R F,Liu Y B,2015. Multi-satellite retrieval of high resolution precipitation; an overview[J].Adv Earth Sci,30(8):891-903(in Chinese).
- 何爽爽,汪君,王会军,2018. 基于卫星降水和 WRF 预报降水的"6. 18"门头沟泥石流事件的回报检验研究[J]. 大气科学,42(3): 590-606. He S S, Wang J, Wang H J,2018. Hindcast study of "6.18" mentougou debris-flow event based on satellite rainfall

and WRF forecasted rainfall[J]. Chin J Atmos Sci,42(3):590-606(in Chinese).

- 嵇涛,刘容,杨华,等,2015. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究——以川渝地区为例[J].地球信息科学学报,17(1):108-117. Ji T,Liu R,Yang H,et al,2015. Spatial downscaling of precipitation using multi-source remote sensing data: a case study of Sichuan-Chongqing Region[J]. J Geo-Inf Sci,17(1):108-117(in Chinese).
- 嵇涛,杨华,刘睿,等,2014. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用 性分析[J]. 地理科学进展,33(10):1375-1386. Ji T, Yang H, Liu R, et al, 2014. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing Region[J]. Prog Geogr,33 (10):1375-1386(in Chinese).
- 矫梅燕,2014. 三峡工程气候效应综合评估报告[M]. 北京;气象出版 社. Jiao M Y,2014. Comprehensive Assessment Report on Climate Effect of Three Gorges Project[M]. Beijing;China Meteorological Press(in Chinese).
- 金秋,张增信,黄钰瀚,等,2017. 基于 TRMM 卫星产品的长江流域 降水精度评估[J]. 人民长江,48(19):48-52. Jin Q, Zhang Z X, Huang Y H, et al, 2017. Accuracy evaluation of precipitation analysis in Yangtze River Basin based on satellite TRMM[J]. Yangtze River,48(19):48-52(in Chinese).
- 金晓龙,邵华,邱源,等,2018. TRMM 卫星降水数据在天山山区的校 正方法研究[J]. 气象,44(7):882-891. Jin X L, Shao H, Qiu Y, et al,2018. Correction method of TRMM satellite precipitation data in Tianshan Mountains[J]. Meteor Mon,44(7):882-891(in Chinese).
- 李博,唐世浩,2014. 基于 TRMM 卫星资料分析三峡蓄水前后的局 地降水变化[J]. 长江流域资源与环境,23(5):617-625. Li B, Tang S H, 2014. Local precipitation changes induced by the Three Gorges Reservoir based on TRMM observations[J]. Resour Environ Yangtze Basin,23(5):617-625(in Chinese).
- 李强,李永华,周锁铨,等,2011. 基于 WRF 模式的三峡地区局地下 垫面效应的数值试验[J]. 高原气象,30(1):83-93. Li Q, Li Y H, Zhou S Q, et al, 2011. Numerical experimentation of local underlying surface effect based on WRF model in Three Gorges Aera[J]. Plateau Meteor, 30(1):83-93(in Chinese).
- 廖荣伟,张冬斌,沈艳,2015.6种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J]. 气象,41(8):970-979. Liao R W, Zhang D B, Shen Y, 2015. Validation of six satellite-derived rainfall estimates over China[J]. Meteor Mon,41(8):970-979(in Chinese).
- 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等,2010. 多卫星遥感降水数据精度评价 [J]. 水科学进展,21(3):343-348. Liu J F, Chen R S, Han C T, et al,2010. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products[J]. Adv Water Sci,21(3):343-348(in Chinese).
- 刘元波,傅巧妮,宋平,等,2011. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. 地 球科学进展,26(11):1162-1172. Liu Y B, Fu Q N, Song P, et al,2011. Satellite retrieval of precipitation: an overview[J]. Adv Earth Sci,26(11):1162-1172(in Chinese).
- 任芝花,赵平,张强,等,2010.适用于全国自动站小时降水资料的质

量控制方法[J]. 气象,36(7):123-132. Ren Z H,Zhao P,Zhang Q,et al,2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteor Mon,36(7):123-132(in Chinese).

- 王宝鉴,黄玉霞,魏栋,等,2017. TRMM 卫星对青藏高原东坡一次大 暴雨强降水结构的研究[J]. 气象学报,75(6):966-980. Wang B J,Huang Y X, Wei D, et al, 2017. Structure analysis of heavy precipitation over the eastern slope of the Tibetan Plateau based on TRMM data[J]. Acta Meteor Sin,75(6):966-980(in Chinese).
- 王维琛,张唯,谭伟伟,等,2017. 融合时空异质特征的 TRMM 3B43 降水产品适宜性分析—以湖北省为例[J]. 地理与地理信息科 学,33(1):59-66. Wang W C,Zhang W,Tan W W,et al,2017. Applicability analysis of TRMM 3B43 precipitation product concerning the spatial and temporal heterogeneity of precipitation: Taking Hubei Province as an example[J]. Geogr Geo-Inf Sci,33 (1):59-66(in Chinese).
- 王新华,罗四维,刘小宁,等,2006. 国家级地面自动站 A 文件质量控 制方法及软件开发[J]. 气象,32(3):107-112. Wang X H,Luo S W,Liu X N,et al,2006. Quality control and software development about A-format data of national basic automatic weather station[J]. Meteor Mon,32(3):107-112(in Chinese).
- 吴佳,高学杰,张冬峰,等,2011. 三峡水库气候效应及 2006 年夏季川 渝高温干旱事件的区域气候模拟[J]. 热带气象学报,27(1):44-52. Wu J,Gao X J,Zhang D F, et al,2011. Regional climate model simulation of the climate effects of the Three Gorge Reservoir with specific application to the summer 2006 drought over the Sichuan-Chongqing Area[J]. J Trop Meteor, 27(1):44-52(in Chinese).
- 吴建峰,陈阿林,嵇涛,等,2014a. 三峡库区(重庆段)TRMM 降水实 用性分析及时空特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),31 (4):70-77. Wu J F, Chen A L, Ji T, et al, 2014a. The applicability analysis of TRMM precipitation in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing and its spatial-temporal distribution[J]. J Chongqing Normal Univ (Nat Sci),31(4):70-77(in Chinese).
- 吴建峰,陈阿林,嵇涛,等,2014b. TRMM 降水数据在复杂山地的精度评估——以重庆市为例[J].水土保持通报,34(4):201-207.
 Wu J F, Chen A L, Ji T, et al, 2014b. Accuracy evaluation of tropical rainfall measuring mission precipitation data in complex mountainous areas-taking Chongqing City as an example[J].
 Bull Soil Water Conserv,34(4):201-207(in Chinese).
- 徐新创,张学珍,戴尔阜,等,2014. 1961-2010 年中国降水强度变化 趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究,33(7):1335-1347. Xu X C,Zhang X Z,Dai E F,et al,2014. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010[J]. Geogr Res,33(7):1335-1347(in Chinese).
- 杨云川,程根伟,范继辉,等,2013.四川盆地及周边地区 TRMM 3B42数据精度检验[J]. 气象科学,33(5):526-535. Yang Y C, Cheng G W,Fan J H,et al,2013. Accuracy validation of TRMM 3B42 data in Sichuan basin and the surrounding areas[J]. Sci

1112

Meteor Sin, 33(5): 526-535(in Chinese).

- 张洪涛,祝昌汉,张强,2004. 长江三峡水库气候效应数值模拟[J]. 长 江流域资源与环境,13(2):133-137. Zhang H T, Zhu C H, Zhang Q,2004. Numerical modeling of microclimate effects produced by the formation of the Three Gorges Reservoir[J]. Resour Environ Yangtze Basin,13(2):133-137(in Chinese).
- 张天宇,范莉,孙杰,等,2010.1961~2008 年三峡库区气候变化特征 分析[J]. 长江资源流域与环境,19(Z1):52-61. Zhang T Y,Fan L,Sun J, et al, 2010. Characteristics of climate change in the Three Gorges Reservoir Area during 1961-2008[J]. Resour Environ Yangtze Basin,19(Z1):52-61(in Chinese).
- 张天宇,孙佳,王勇,等,2014. 重庆雾日的气候特征及变化[J]. 西南 大学学报(自然科学版),36(7):126-134. Zhang T Y,Sun J, Wang Y,et al,2014. Impact of climate change on fog days in Chongqing[J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed),36(7):126-134 (in Chinese).
- 张夕迪,孙军,2018. 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. 气象,44(10):1245-1254. Zhang X D,Sun J,2018. Application analysis of Himawari-8 in monitoring heavy rain convective clouds[J]. Meteor Mon,44(10):1245-1254(in Chinese).
- 中国气象局国家气候中心,2011. 三峡水利工程气候效应分析与评估 [J]. 中国三峡,(9):28-30. National Climate Center, China Meteorological Administration, 2011. Climate effect analysis and

assessment of Three Gorges Water Conservancy Project [J]. Three Gorges of China, (9):28-30(in Chinese).

- 周李磊,杨华,刘睿,等,2017. 基于 TRMM 数据的西南地区年降水 时空特征研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),34(1): 114-122. Zhou L L,Yang H,Liu R,et al,2017. Spatial-temporal characteristics of annual precipitation in Southwest China based on TRMM 3B43 V7 data[J]. J Chongqing Normal Univ (Nat Sci),34(1):114-122(in Chinese).
- Dyrrdal A V,Stordal F,Lussana C,2018. Evaluation of summer precipitation from EURO-CORDEX fine-scale RCM simulations over Norway[J]. Int J Climatol,38(16):1661-1677.
- Fu Y F,Liu G S, Wu G X, et al, 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer[J]. Geophys Res Lett, 33(5):L05802.
- Karl T R, Knight R W, 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(2):231-242.
- Li Z, Yang D W, Hong Y, 2013. Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River[J]. J Hydrol, 500:157-169.
- Wu L G, Zhang Q, Jiang Z H, 2006. Three Gorges Dam affects regional precipitation[J]. Geophys Res Lett, 33(13): L13806.