

引用格式:何坤龙,刘晓辉,刘蛟,张越关.不同偏差校正方法对青藏高原地区 GPM 的应用效果研究[J].山地学报,2021,39(3):439-449.
HE Kunlong, LIU Xiaohui, LIU Jiao, Zhang Yueguan. Performances of different deviation calibration methods on GPM in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):439-449.

不同偏差校正方法对青藏高原地区 GPM 的应用效果研究

何坤龙¹, 刘晓辉¹, 刘蛟^{2,3*}, 张越关¹

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 成都 610039; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;
3. 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 新一代卫星降水产品 GPM 在全球降雨观测精度上较 TRMM 有大幅提升,但在青藏高原地区的精度仍然不理想,而目前遥感降水数据校正缺乏对数据中降水量、雨天频率以及概率分布多重属性的综合考虑。本文根据 19 个典型站点 2014—2017 年的日降水数据,在分析 GPM 降水探测精度的基础上,采用线性缩放法(LS)、局部强度缩放法(LOCI)、Gamma 分布映射法以及 Gamma 和 LOCI 结合的方法(Gamma-LOCI)对青藏高原 GPM 数据进行了偏差校正。结果表明:(1)GPM 对青藏高原日降水事件探测能力总体上表现出从年降水量较少的西北部洪积平原区以及中部腹地向年降水更丰富的东部山地区和平原区转好的趋势,从日降水强度来看,存在对小雨事件(<2 mm)高估和对大雨事件(>10 mm)低估的现象;(2)经四种方法校正后,GPM 与站点观测数据在各百分位点上的整体偏差均有不同程度的降低,Gamma 分布映射对降水时间序列的概率分布进行调整,修正了降水量并保留了极值,使其在降水偏丰区域的应用效果优于 LS 和 LOCI;和 LOCI 结合后同时对降水数据中雨量、雨天频率和时间概率分布校正,其应用效果进一步改善了 GPM 日降水过程的精度,提高了与站点日降水序列的拟合度和匹配度。研究结果为 GPM 在青藏高原地区的准确应用提供校正方法,为区域水文模拟、水资源管理研究奠定基础条件。

关键词: 卫星遥感降水;偏差校正;GPM;精度评估;青藏高原

中图分类号: TP79

文献标志码: A

地面直接观测站点获取的降水数据精度高,但受站点布设的数量限制,观测数据并不能完全反映降水的空间分布^[1-3]。卫星遥感提供连续时间序列的空间分布降水产品,弥补了地面站点观测的不足,在水文生态和气候变化等领域得到了广泛的应用^[4-6],然而由于存在传感器本身误差以及反演算法不确定性等问题,遥感降水产品在不同地区,特别是地形复杂的山区中存在一定偏差^[7-9]。因此偏差校正是遥感降水产品在区域应用研究中的重要前

提。理论上,由于地面观测降水数据的精度相对较高,可作为统计意义上的“真值”,对卫星遥感降水数据的精度偏差进行校正^[10-12]。已有研究^[11-12]对 TRMM 卫星降水数据的精度进行了评估,并建议了不同尺度内降低遥感降水量误差的方法,但是缺乏对降水数据中雨天频率以及概率分布等方面的误差分析。

降水过程及其空间分布是分析区域生态水文循环和气候变化的关键^[13],而青藏高原特殊的气候

收稿日期(Received date):2020-12-08; 改回日期(Accepted date):2021-05-28

基金项目(Foundation item):西华大学重点科研基金(Z17110);西华大学研究生创新基金(yejj2020109)。[Key Scientific Research Fund Of Xihua University(Z17110);Xihua University Graduate Student Innovation Fund(yejj2020109)]

第一作者(Biography):何坤龙(1995-),男,四川巴中人,硕士研究生,主要研究方向:遥感水文水资源学。[HE Kunlong (1995-), male, born in Bazhong, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on remote sensing hydrology and water resources] E-mail:m18833028159@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):刘蛟(1986-),男,博士,讲师,主要研究方向:遥感水文学。[LIU Jiao (1986-), male, Ph. D., lecturer, specialized in remote sensing hydrology] E-mail:liujiao1102@aliyun.com

和地形条件,降水具有极强的时空异质性。青藏高原区的气象站点分布稀疏,极端地形变化降低了站点的空间代表性,限制了站点观测数据的应用^[14]。GPM 卫星降水产品于 2014 年 3 月开始发布,相比较 TRMM,新搭载的多频被动微波成像仪和双频降水雷达,可更精确地捕捉微量降水并区分固态降水^[15-16],并且在覆盖范围和时空分辨率上都有所提高,因此对全球的降水观测精度有大幅提升^[17-19]。但是对青藏高原降水的探测中,相关研究发现 GPM 在 4000 m 海拔以上区域^[20]、冬季降水精度^[21]、以及强降水监测^[22]等方面还存在较大误差。

本研究依据青藏高原地面观测站点的降雨数据,对 GPM 的降水探测能力进行评估;采用不同的偏差校正方法,从数据序列中的降雨量、雨天发生频率和概率分布多个方面对 GPM 降水进行校正,并根据统计指标对校正效果进行对比分析,为 GPM 降水在青藏高原地区的准确应用提供参考的校正方法。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区域

青藏高原(图 1;69°~105°E,25°~40°N)东至横断山脉,西起帕米尔高原,南自喜马拉雅山脉南侧,北到昆仑山—祁连山脉北侧,总面积约 $2.57 \times 10^6 \text{ km}^2$,占我国陆地面积 26.8%。青藏高原平均海

拔高度在 4000 m 以上,地势自西北向东南倾斜,地貌以高海拔丘陵、小起伏高山、中起伏亚高山和中起伏高山为主,占青藏高原总面积的 60.6%,西北部以及中部的冲积平原地势相对平缓。

青藏高原气候为典型的高原大陆性气候,以干旱和半干旱区为主,仅东南部区域出现小部分湿润半湿润地区,区域内的降水空间异质性极强,整体上降水量由东南向西北逐渐减少,东南部区域降水充沛,年降水可达 800~1000 mm,西北部区域降水稀少,年降水为 20~100 mm。近半个世纪以来青藏高原的面平均降水量在年际上总体呈现出上升趋势,上升速率幅度约为 $8.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,多年平均降水量达 472.4 mm。从年内分布来看,区域降水干、湿季分明,7—8 月为主汛期,80% 的降水量集中在夏季半年^[23-24]。

1.2 研究数据

根据青藏高原区域内的降水实测站点分布,选取不同区域、不同地形地貌条件下 19 个典型站点观测的日降水数据,对 GPM 降水产品进行分析。典型站点观测的日降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),时间为 2014 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日,站点的基本信息情况如表 1 所示。GPM 降水产品来自于美国国家航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官网发布的 IMERG “Final Run”数据集(<https://gpm.nasa.gov/data/directory>),数据为

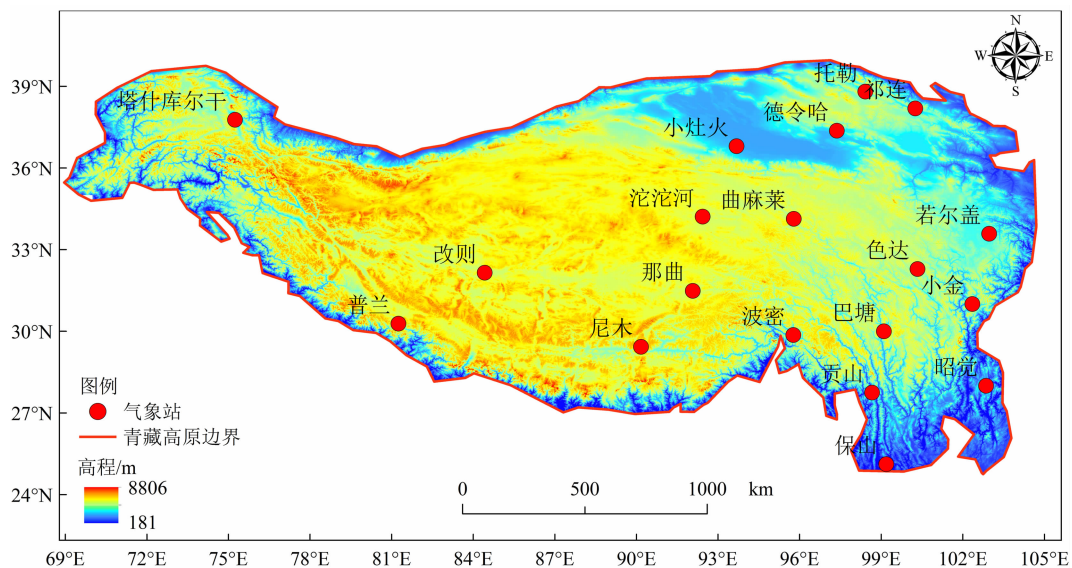


图 1 青藏高原区地形及气象分析站点分布图

Fig. 1 Spatial distribution of topography and meteorological stations in the Qinghai-Tibet Plateau, China

V06B 版本,覆盖了 2014 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日的日降水,空间分辨率为 0.1° 。

表 1 站点基本信息表

Tab. 1 Information of the selected meteorological stations

站点	省份	纬度/ ($^\circ$)	经度/ ($^\circ$)	高程/ m	年均降水/ mm
小灶火	青海	36.80	93.68	2767.00	26.60
塔什库尔干	新疆	37.77	75.23	3090.10	109.50
普兰	西藏	30.28	81.25	4900.00	146.20
德令哈	青海	37.37	97.37	2981.50	242.90
改则	西藏	32.15	84.42	4414.90	247.60
尼木	西藏	29.43	90.17	3809.40	325.10
沱沱河	青海	34.22	92.43	4533.10	337.00
曲麻莱	青海	34.13	95.78	4175.00	377.00
托勒	青海	38.80	98.42	3367.00	415.50
巴塘	四川	30.00	99.10	2589.20	495.40
那曲	西藏	31.48	92.07	4507.00	502.50
祁连	青海	38.18	100.25	2787.40	506.60
若尔盖	四川	33.58	102.97	3439.60	640.20
小金	四川	31.00	102.35	2369.20	673.70
色达	四川	32.28	100.33	3893.90	708.60
保山	云南	25.12	99.18	1652.20	866.80
波密	西藏	29.87	95.77	2736.00	929.10
昭觉	四川	28.00	102.85	2132.40	1150.90
贡山	云南	27.75	98.67	1583.30	1668.70

2 研究方法

2.1 精度分析方法

通过站点降尺度提取 GPM 在 19 个站点位置上的日降水数据,结合站点数据,根据误报率 (False Alarm Rate, FAR),漏报率 (Missing Alarm Rate, MAR)和成功系数 (Critical Success Index, CSI)三个指标评估 GPM 对青藏高原降雨天的探测能力。误报率 FAR 反映了 GPM 降水产品对降水事件的多测误差,漏报率 MAR 反映了 GPM 降水产品对降水事件的漏测误差,CSI 反映了遥感降水产品成功观测到降水事件的比例,各指标的计算公式如下:

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (1)$$

$$MAR = \frac{M}{H + M} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \quad (3)$$

式中, H 为 GPM 和站点同时探测到的降水天数; M 为站点实测有降水而 GPM 未能探测到的降水天数; F 为站点实测未发生降水而 GPM 探测到的降水天数。 FAR 与 MAR 值越接近于 0, CSI 越接近于 1,说明 GPM 产品探测降雨事件性能较好。根据降水观测阈值,本文将当天降雨量大于或等于 0.1 mm 定义为降雨天。

2.2 偏差校正方法

根据降水时间序列的数据属性,采用了包括线性缩放法 (Linear Scaling, LS)、局部强度缩放法 (Local Intensity Scaling, LOCI)、Gamma 分布映射法的偏差校正方法,分别从降水量、雨天频率、概率分布三个方面对 GPM 降水数据进行校正。

(1) LS 法

LS 方法根据站点实测与 GPM 降水的多年月均值的比值,从降水量^[25] 方面进行修正,计算公式如下:

$$P_{\text{cor},m,d} = P_{\text{raw},m,d} \times \frac{P_{\text{obs},m}}{P_{\text{raw},m}} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{cor},m,d}$ 为校正后 GPM 降水第 m 月 d 天的修正值 (mm); $P_{\text{raw},m,d}$ 为 GPM 产品第 m 月 d 天的原始值 (mm); $P_{\text{obs},m}$ 、 $P_{\text{raw},m}$ 分别为实测和 GPM 降水在第 m 月的均值 (mm)。

(2) LOCI 法

LOCI 在考虑雨天发生频率的基础上对降水量进行修正,适用于对时间序列中小雨事件偏多的修正^[26]。首先,根据实测降水序列确定第 m 个月的湿态阈值 $P_{\text{thres},m}$,以确保 GPM 降水数据中的降雨天数与站点数据中的相等;然后计算缩放因子 S_m ,保证校正后的降水总量和实测的降水总量相等,计算公式为:

$$S_m = \frac{\mu(P_{\text{obs},m,d} | P_{\text{obs},m,d} > 0)}{\mu(P_{\text{raw},m,d} | P_{\text{raw},m,d} > P_{\text{tjres},m})} \quad (5)$$

$$P_{\text{LOCI},m,d} = \begin{cases} 0, & P_{\text{raw},m,d} < P_{\text{thres},m} \\ P_{\text{raw},m,d} \times S_m, & P_{\text{raw},m,d} \geq P_{\text{thres},m} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\mu(P_{\text{obs},m,d} | P_{\text{obs},m,d} > 0)$ 为实测降水值第 m 月 d 天大于 0 之和; $\mu(P_{\text{raw},m,d} | P_{\text{raw},m,d} > P_{\text{thres},m})$ 为 GPM

日降水第 m 月 d 天大于湿天阈值之和。

(3) Gamma 分布映射法

Gamma 分布映射法的基础是降水时间序列服从伽马分布函数,基于站点数据分布,通过修正 GPM 降水的均值、标准差和分位数等^[27]调整 GPM 降水分布, Gamma 分布函数如下:

$$f_{\gamma}(x | \alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{\beta^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}; \quad x \geq 0; \alpha, \beta > 0 \quad (7)$$

$$P_{\text{gam}, m, d} = F_{\gamma}^{-1}(F_{\gamma}(P_{\text{raw}, m, d} | \alpha_{\text{raw}, m}, \beta_{\text{raw}, m}) | \alpha_{\text{obs}, m}, \beta_{\text{obs}, m}) \quad (8)$$

式中, f_{γ} 为 Gamma 密度分布函数; $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数; α 为形状参数; β 为尺度参数; $F_{\gamma}(x)$ 和 F_{γ}^{-1} 分别为 Gamma 累积分布函数和逆函数; $\alpha_{\text{raw}, m}$ 为 m 月 GPM 原始序列; $\beta_{\text{raw}, m}$ 为 m 月 GPM 原始序列和经 LOCI 法校正后的降水序列的尺度参数; $\alpha_{\text{obs}, m}$ 为 m 月实测降水的形状参数和尺度参数。

以上三种校正方法对降水数据中不同属性进行修正,同时结合 LOCI 和 Gamma 两种方法,将 Gamma 分布映射法中的原始 GPM 数据换成经过 LOCI 校正过后的数据,共采用了四种偏差校正方法,对应校正的数据属性如表 2 所示。

表 2 四种校正方法修正的时间序列属性

Tab. 2 Time-series properties of four calibration methods

降水属性	校正方法			
	LS	LOCI	Gamma	Gamma-LOCI
降水的量	修正	修正	修正	修正
雨天发生频率	未修正	修正	未修正	修正
时间序列概率分布	未修正	未修正	修正	修正

2.3 评价指标

本文利用综合性 C 指标对校正方法的应用效果进行评价, C 指标根据经验累积分布函数分位数偏差累积理论进行计算,包含了各分位点下的降水偏差,能将大部分传统指标的特点和优势综合起来^[28]。计算公式如下:

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |V_{m, \text{cor}}(i) - V_o(i)|}{\sum_{i=1}^N |V_m(i) - V_o(i)|} = 1 - \frac{AD_{\text{cor}}}{AD} \quad (9)$$

式中, $V_o(i)$ 、 $V_m(i)$ 和 $V_{m, \text{cor}}(i)$ 分别为实测降雨数

据、原 GPM 降雨数据和 GPM 偏差校正后降雨数据的第 i 个分位点对应的降水量; $|V_m(i) - V_o(i)|$ 和 $|V_{m, \text{cor}}(i) - V_o(i)|$ 分别为第 i 个分位点下,偏差校正前后 GPM 降雨与站点降雨之间存在的偏差; AD 和 AD_{cor} 分别为偏差校正前后 GPM 与站点降水数据的总体偏差。本文根据各月份降水数据中的 20 个等分位点进行 C 指标的计算。

同时采用相关系数 R 和纳什系数 $NSCE$ 两个统计指标,分析经不同方法校正过后的 GPM 降水数据与实测值之间的相关性和匹配程度,计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (10)$$

$$NSCE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \quad (11)$$

式中, n 为时间序列的长短; G_i 和 S_i 分别为第 i 天地面雨量和 GPM 的降水量; \bar{G} 为 GPM 产品序列的均值。其中 R 值越接近 1, 表示 GPM 降水产品与实测降水的线性相关程度越高; $NSCE$ 值越接近 1, 表示 GPM 降水产品与实测降水的拟合效果越好。

3 结果与讨论

3.1 GPM 对站点降水事件的探测能力

GPM 产品对 2014—2017 年的日降水事件探测中, 19 个站点上的指标统计如图 2 所示。GPM 降水对站点年降水量不足 300 mm 区域的探测能力较低, 成功系数均小于 0.4, 其中小灶火降水稀少, 年降水量不足 30 mm, 作为大尺度降水观测的 GPM 在该站点中依然包含了大量的多余降水事件, 导致误报率极高, 而成功系数仅为 0.1。随着站点年降水量的增加, 误报率和空报率都趋向于最优值, 成功系数也有所增加, 在年均降水量超过 1500 mm 的贡山超过 0.6。总体上 GPM 对青藏高原区日降水事件的探测能力呈现出从降水较少的西北部洪积平原区以及中部腹地的中高海拔洪积平原区向东部降水较丰富的山地区和平原区转好的趋势。

在对降水事件的探测中, 除了发生事件的同步性以外, 还存在降水量等同性问题。本文参照世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO)

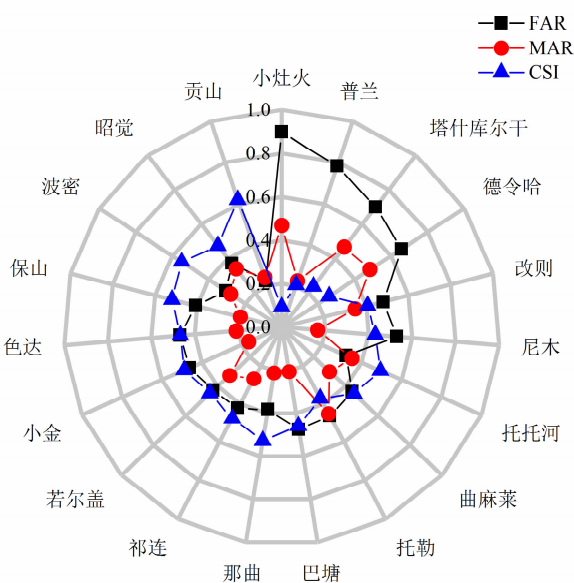


图2 GPM 对 19 个站点 2014—2017 年日降水事件的误报率、漏报率和成功系数雷达图

Fig.2 MAR, FAR and CSI values of rainy days detected by GPM at 19 meteorological stations in 2014—2017

的分类标准,将日降水事件按降水量分为小雨($<2\text{ mm}$)、中雨($2\sim10\text{ mm}$)和大雨($>10\text{ mm}$)三类,进一步分析 GPM 对不同强度降水事件的探测能力。从 GPM 对各站点不同强度降水事件探测的成功系数来看(图 3),总体上 GPM 在降水事件探测中对中雨降水事件的表现最好,对小雨事件次之,对大

雨最差。青藏高原西北部洪积区和中部腹地区域年降水量偏少,雨天频率较低且以小雨事件为主,GPM 在该区域中存在较为严重的中雨和大雨误报,这也导致了该区域的成功系数偏低。随着东部区域降水量的增加,雨天频率增大,GPM 的探测能力有所改善,但是在年降水量大于 800 mm 的东南部山地区域,GPM 存在对大雨事件的漏报现象,限制了 GPM 在该地区成功系数(约 0.6)。

3.2 偏差校正结果分析

精度分析结果表明,GPM 对青藏高原各站点实测降水的探测能力上存在着不同程度的偏差。通过四种方法进行偏差校正后,各站点位置 GPM 降水在百分位数上的整体偏差表现如图 4 所示。结果表明:偏差校正前,19 个站点处的 GPM 降雨与实测降雨在各分位点的偏差范围为 $0.7\sim18\text{ mm}$, 2 mm 以下的站点仅 4 个,主要分布在西北部降水较少的区域。东部降水更加丰富的站点,由于低百分位点上强降水的偏差较大,导致 GPM 的整体偏差也较大。

经过 LS、LOCI、Gamma 和 Gamma-LOCI 校正后,GPM 数据在 19 个站点的整体偏差都有较为明显的减小,整体偏差值 AD_{cor} 的范围也分别缩小到 $0.58\sim5.91\text{ mm}$ 、 $0.35\sim5.91\text{ mm}$ 、 $0.10\sim6.13\text{ mm}$ 和 $0.11\sim5.79\text{ mm}$,表明四种校正方法的校正效果明显,但是差别不大。从站点分布来看,经过四种方法校正后, AD_{cor} 在 2 mm 以下的站点从校正前的 4 个

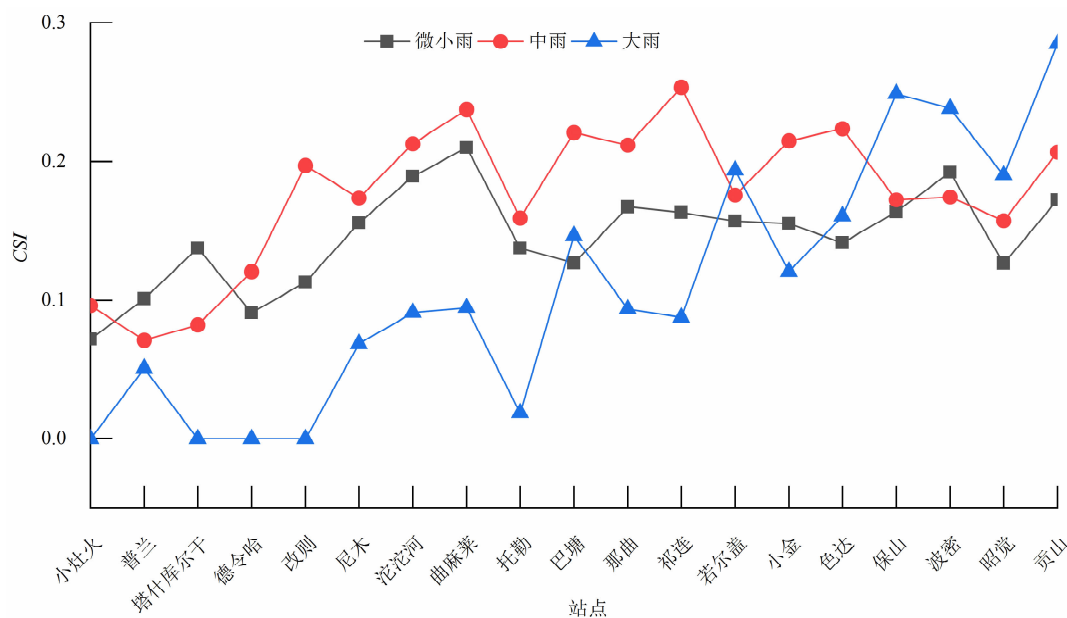


图3 GPM 对不同强度降雨事件探测的成功系数

Fig.3 CSI values of GPM for different intensity rainy days in 2014—2017

分别提高到了 8 个、10 个、14 个和 15 个。可以看出 Gamma 分布映射校正方法的校正效果最好,这表明 Gamma 分布映射校正能够在保留极端降水事件情况下同时对雨量值进行调整,因此在东部降水较为丰富地区的应用效果明显优于 LS 和 LOCI 两种方法,而进一步结合 LOCI 对雨天频率调整后应用,校正效果还能得到进一步的提升。

从 C 指标来看(图 5),四种校正方法中的 Gamma 和 Gamma-LOCI 总体应用效果最好。在年

降水量在 200 mm 以下的西北部站点和 800 mm 以上的东南部站点, Gamma 和 Gamma-LOCI 偏差校正效果差别不大;年均降水量为 200 ~ 800 mm 的大多数站点,采用 Gamma-LOCI 方法校正效果较好,说明兼顾雨天频率的 Gamma 分布映射法能更好地适用于不同降水过程。

从 R 和 $NSCE$ 两个统计指标来看(如图 6 和图 7 所示),GPM 日降水数据经四种方法校正后,年降水量小于 300mm 的西北部洪积区和中部腹地区站

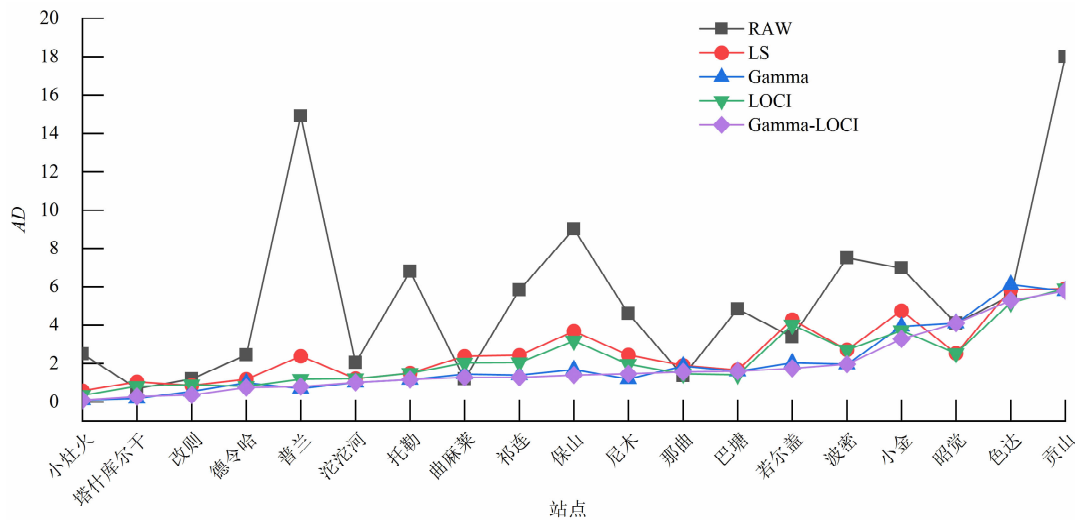


图 4 四种方法校正前后 GPM 与 19 各站点实测降水之间的整体偏差

Fig. 4 Overall deviations between the observations and GPM at 19 stations before and after calibrated by four methods

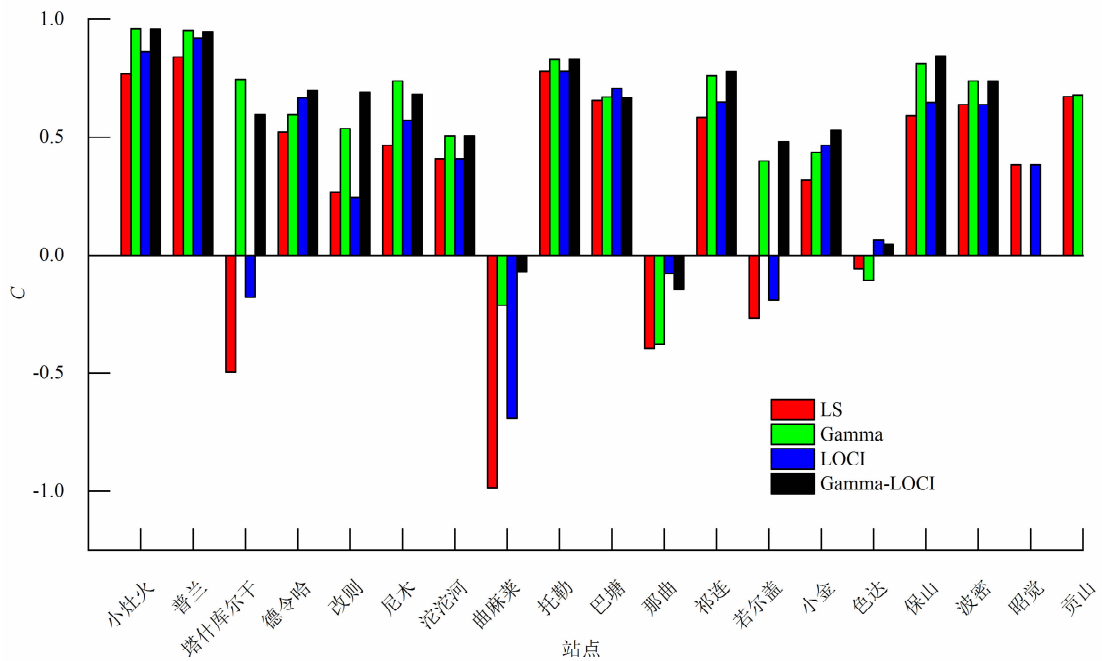


图 5 经四种校正方法校正后 GPM 的综合指标 C 值

Fig. 5 C values of GPM after calibrated by four calibration methods

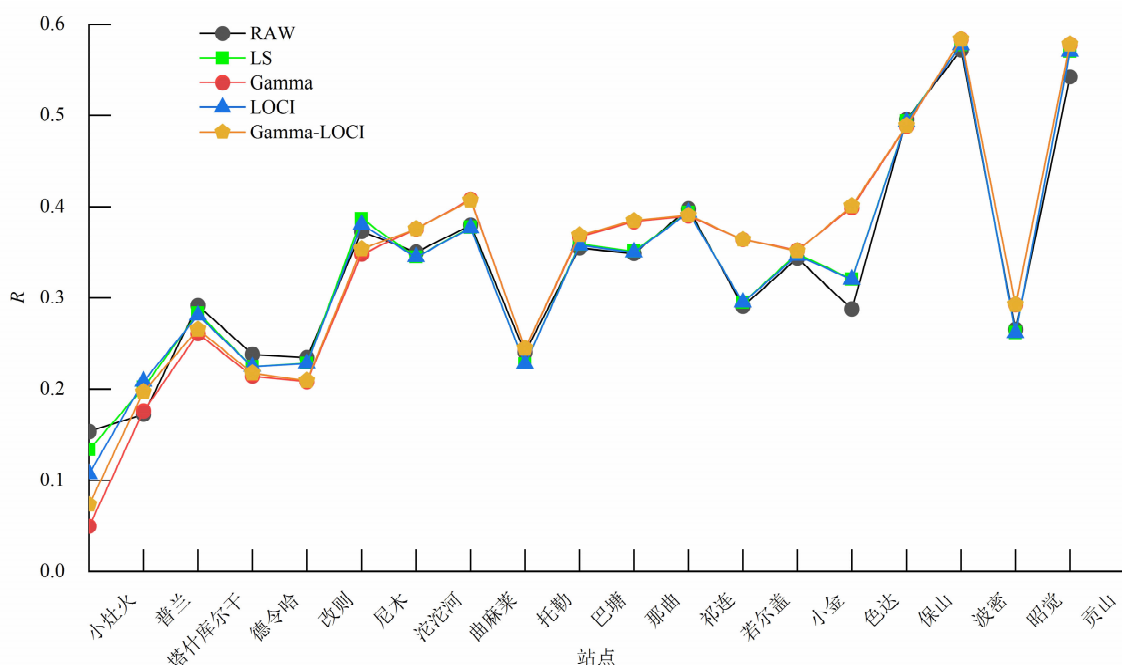


图6 四种方法校正前后 GPM 与 19 个站点实测降水之间的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between the observations and GPM at 19 stations before and after calibrated by four methods

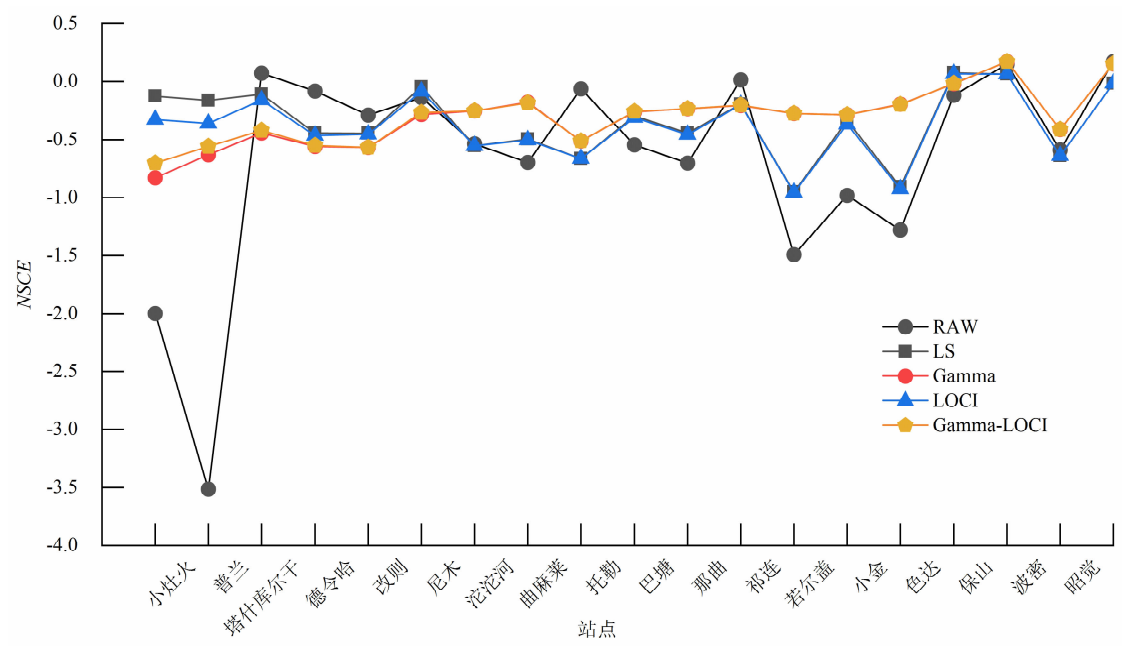


图7 四种方法校正前后 GPM 与 19 各站点实测降水之间的纳什系数

Fig. 7 Nash coefficients between the observations and GPM at 19 stations before and after calibrated by four methods

点的日降水过程的变化不大,除了小灶火和普兰的纳什效率系数显著提升外,其余的变化很小。而对于年降水量大于 300 mm 的东部以及东南部站点,经过考虑了降水量、雨天频率以及概率分布的 Gamma-LOCI 校正后,GPM 与实测日降水过程的匹配度有更为明显的改善。

3.3 讨论

GPM 对青藏高原区降水的探测能力受区域地理条件以及降水强度的影响较大,表现出极强的空间异质性,这与 MA 等^[20]、XU 等^[29]在青藏高原上对 GPM 的评估结果较为一致。主要是因为 GPM 作为大尺度的降水观测手段,对局部地形变化较大的

区域导致的降水变化的探测能力存在不足。在探测精度分析中,降水强度的组成对降水数据的精度表现具有重要的作用,通过降水强度划分,可以更好地解释 GPM 数据在青藏高原各站点区域出现不同精度偏差的原因,而明确 GPM 对极端降水事件的探测能力,对防洪和抗旱的意义更为重要,极端降水事件也应该在未来的研究中被进一步关注。

精度分析结果表明,GPM 产品在青藏高原地区的精度总体上表现较差,直接应用存在数据的不确定性等问题,但是 GPM 降水在青藏高原水文相关研究中仍具备较大的潜力,本文考虑青藏高原降水分布特点,从降水数据不同的属性出发开展多种偏差校正方法的对比研究。针对不同校正方法,LOCI 法能校正 GPM 降水的频率和降水强度,但因为均值处理改变了降水序列中的极值,在降水较为丰富的区域应谨慎使用;Gamma 分布映射法能保留降水序列中的极值,但不能完全校正雨天频率,在降水稀少的干旱半干旱区域 GPM 对降水事件往往存在较为严重的误报,因此不宜采用此法^[30]。而 Gamma-LOCI 法综合了 LOCI 法和 Gamma 分布映射法的优点,总的来说在各区域的 GPM 降水数据校正中的应用效果最优。本研究可为高海拔、稀缺资料区域获取更为准确的卫星遥感降水数据提供参考方法。本次研究主要是根据降水的时间过程进行校正,未从空间尺度考虑连续变化,后期将进一步结合地理地形等因子影响,对站点的校正结果进行空间展布,提高遥感降水产品对区域空间降水的表达能力。

4 结论

基于青藏高原 19 个典型气象观测站点 2014—2017 年的日降水数据,分析评价了站点尺度上 GPM 降水产品的数据精度;采用 LS 法、LOCI 法、Gamma 分布映射法和 Gamma-LOCI 四种偏差校正方法对 GPM 日降水数据进行了校正,最后对四种方法的校正效果进行了对比分析。结论如下:

(1) GPM 对青藏高原区日降水的探测性能与站点的地理条件和降水强度有关。GPM 对青藏高原区降水事件的探测能力呈现出从西北部降水较少的中高海拔洪积平原向东部降水较丰富的山地和平原区转好的趋势,且存在对小雨事件($< 2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)高估和对大雨事件($> 10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)低估的现象,导

致 GPM 在平原区和山地区对降雨的量探测误差较大,平原区倾向于多测,山地区倾向于少测。

(2) 四种不同偏差校正方法针对不同的降水数据属性,适用于在青藏高原不同降水条件下的区域。在青藏高原区,导致 GPM 降水探测精度较差的主要原因在各区域不同,四种校正方法分别从降水量、雨天频率、概率分布三方面的属性进行偏差校正,虽然基本都能在一定程度上降低各站点降水数据的整体偏差,但是 LS 和 LOCI 会通过平均雨量消除极值,不适合在降水丰富、大雨事件发生频率更高的东南部山区适用。Gamma 分布映射法通过调整概率分布曲线,不仅对雨量进行调整,同时保留降水极值,在降水丰富区域的应用效果良好,进一步结合 LOCI 方法,对雨天频率进行调整,校正的效果进一步提升,在不同条件下的适用性也更好。

参考文献 (References)

- [1] SHI H Y, LI T J, WEI J H. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the Three - River Headwaters Region [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **548** (5): 322 - 332. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.017
- [2] CHAPPELL A, RENZULLO L J, RAUPACH T H, et al. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **493**(7): 105 - 114. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.024
- [3] GUO H, CHEN S, BAO A M, et al. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176 - 177**: 121 - 133. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.02.020
- [4] SUN R C, YUAN H L, LIU X L, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **536**(3): 302 - 319. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.054
- [5] HONG Y, ADLER R F, HUFFMAN G J, et al. Applications of TRMM-based multi-satellite precipitation estimation for global runoff prediction: Prototyping a global flood modeling system [G]// GEBREMICHAEL M, HOSSAIN F. *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Berlin: Springer, 2010: 245 - 265. DOI: 10.1007/978-90-481-2915-7_15
- [6] GAO Z, LONG D, TANG G Q, et al. Assessing the potential of satellite-based precipitation estimates for flood frequency analysis in ungauged or poorly gauged tributaries of China's Yangtze River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **550**(5): 478 - 496. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.025

- [7] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM3B43 数据精度检验 [J]. 地理学报, 2011, **66**(7): 994 – 1004. [ZENG Hongwei, LI Lijuan. Accuracy validation of TRMM 3B43 data in Lancang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(7): 994 – 1004]
- [8] 嵇涛,杨华,刘睿,等. 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, 2014, **33**(10): 1375 – 1386. [JI Tao, YANG Hua, LIU Rui, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region [J]. Progress in Geography, 2014, **33**(10): 1375 – 1386] DOI: 10.11820/dlkxjz. 2014. 10. 009
- [9] 金晓龙,邵华,张弛,等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析 [J]. 自然资源学报, 2016, **31**(12): 2074 – 2085. [JIN Xiaolong, SHAO Hua, ZHANG Chi, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2016, **31**(12): 2074 – 2085] DOI: 10.11849/zrzyxb. 20160057
- [10] 李豪,陈厚霖,程雯颖,等. 兼顾多要素空间非平稳性特征的卫星降水数据精度提升方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2020, **36**(5): 29 – 38. [LI Hao, CHEN Houling, CHEN Wenying, et al. Improvement of the accuracy of satellite-derived precipitation data by considering the spatial non-stationarity of multifactor: A case study of Sichuan province [J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, **36**(5): 29 – 38] DOI: 10.3969/j. issn. 1672 – 0504. 2020. 05. 005
- [11] 孙乐强,郝振纯,王加虎,等. TMPA 卫星降水数据的评估与校正 [J]. 水利学报, 2014, **46**(10): 1135 – 1146. [SUN Leqiang, HAO Zhenchun, WANG Jiahu, et al. Assessment and correction of TMPA products 3B42RT and 3B42V6 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **46**(10): 1135 – 1146] DOI: 10.13243/j. cnki. slxb. 2014. 10. 001
- [12] 曲伟,路京选,宋文龙,等. TRMM 遥感降水数据在伊洛瓦底江流域的精度检验和校正方法研究 [J]. 地球科学进展, 2014, **29**(11): 1262 – 1270. [QU Wei, LU Jingxuan, SONG Wenlong, et al. Research on accuracy validation and calibration methods of TRMM remote sensing precipitation data in Irrawaddy Basin [J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(11): 1262 – 1270] DOI: 10.11867/j. issn. 1001 – 8166. 2014. 11. 1262
- [13] BIAN Q, XU Z, ZHAO L, et al. Evaluation and intercomparison of multiple snow water equivalent products over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, **20**(10): 2043 – 2055. DOI: 10.1175/JHM – D – 19 – 0011.1
- [14] 张秀红,张文江,蒋蕙如. 基于水量平衡的青藏高原东南部卫星降水产品质量评估与校正 [J]. 地理与地理信息科学, 2018, **34**(6): 34 – 41. [ZHANG Xiuhong, ZHANG Wenjiang, JIANG Huiru. Evaluation and correction of satellite precipitation products in the southeastern Tibetan Plateau based on basin water balance [J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, **34**(6): 34 – 41] DOI: 10.3969/j. issn. 1672 – 0504. 2018. 06. 006
- [15] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 2015, **30**(4): 607 – 615. [TANG Guoqiang, WAN Wei, ZENG Ziyue, et al. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and its latest development [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, **30**(4): 607 – 615] DOI: 10.11873/j. issn. 1004 – 0323. 2015. 4. 0607
- [16] 胡实,韩建,占车生,等. 太行山区遥感卫星反演降雨产品降尺度研究 [J]. 地理研究, 2020, **39**(7): 1680 – 1690. [HU Shi, HAN Jian, ZHAN Chesheng, et al. Spatial downscaling of remotely sensed precipitation in Taihang Mountains [J]. Geographical Research, 2020, **39**(7): 1680 – 1690] DOI: 10.11821/dlyj020190545
- [17] 董国涛,樊东,杨胜天,等. GPM 与 TRMM 降雨数据在黄河流域适用性分析 [J]. 水土保持研究, 2018, **25**(3): 81 – 87. [DONG Guotao, FAN Dong, YANG Shengtian, et al. Analysis on the applicability of GPM and TRMM precipitation data in the Yellow River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(3): 81 – 87] DOI: 10.13869/j. cnki. rswc. 2018. 03. 013
- [18] 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] DOI: 10.14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 03. 001
- [19] 魏志明,岳官印,李家,等. GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究 [J]. 水土保持通报, 2017, **37**(2): 171 – 176. [WEI Zhiming, YUE Guanyin, LI Jia, et al. Comparison study on accuracies of precipitation data using GPM and TRMM product in Haihe River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(2): 171 – 176] DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 026
- [20] MA Y Z, TANG G Q, LONG D, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2016, **8**(7): 569 – 586. DOI: 10.3390/rs8070569
- [21] 余坤伦,张寅生,马宁,等. GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估 [J]. 干旱区研究, 2018, **35**(6): 1373 – 1381. [YU Kunlun, ZHANG Yinsheng, MA Ning, et al. Applicability of GPM and TRMM remote sensing precipitation products in the central Tibet Plateau [J]. Arid Zone Research, 2018, **35**(6): 1373 – 1381] DOI: 10.13866/j. azr. 2018. 06. 14
- [22] CHEN F R, LI X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over Mainland China [J]. Remote Sensing, 2016, **8**(6): 472. DOI: 10.3390/rs8060472
- [23] 石玉立,宋蕾. 1998 – 2012 年青藏高原 TRMM 3B43 降水数据的校准 [J]. 干旱区地理, 2015, **38**(5): 900 – 911. [SHI

- Yuli, SONG Lei. Calibration of TRMM 3B43 over Tibetan Plateau during 1998 – 2012 [J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(5): 900 – 911] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.05.004
- [24] 马伟东,刘峰贵,周强,等. 1961—2017 年青藏高原极端降水特征分析 [J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(12): 3039 – 3050. [MA Weidong, LIU Fenggui, ZHOU Qiang, et al. Characteristics of extreme precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(12): 3039 – 3050] DOI: 10.31497/zrzyxb.20201218
- [25] LENDERINK G, BUISSAND A, VAN DEURSEN W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, **11**(3): 1145 – 1159. DOI: 10.5194/hess-11-1145-2007
- [26] SCHMIDL J, FREI C, VIDALE P L. Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods [J]. *International Journal of Climatology*, 2006, **26**(4): 679 – 689. DOI: 10.1002/joc.1287
- [27] FANG G H, YANG J, CHEN Y N, et al. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(6): 2547 – 2559. DOI: 10.5194/hess-19-2547-2015
- [28] 高超,文化,宣伟栋,等. 基于分段三伽玛分布的降雨偏差纠正方法 [J]. *水科学进展*, 2018, **29**(2): 169 – 178. [GAO Chao, WEN Hua, XUAN Weidong, et al. A separated three-gamma bias correction method for precipitation [J]. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(2): 169 – 178] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.02.003
- [29] 田霖,孟凡浩,刘铁,等. 干旱典型山区 CFSR 降水数据的偏差校正方法研究——以新疆开孔河流域为例 [J]. *干旱气象*, 2017, **35**(2): 313 – 320. [TIAN Lin, MENG Fanhao, LIU Tie, et al. Comparison of bias-correction methods for CFSR reanalysis precipitation data in typical arid mountainous regions: A case study in Kaikong River Basin [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(2): 313 – 320] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0313
- [30] XU R, Tian F Q, YANG L, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gaugenetwork [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(15): 910 – 924. DOI:10.1002/2016JD025418

Performances of Different Deviation Calibration Methods on GPM in the Qinghai-Tibet Plateau, China

HE Kunlong¹, LIU Xiaohui¹, LIU Jiao^{2,3*}, ZHANG Yueguan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

3. Mianyang S&T City Division, National Remote Sensing Center of China, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: Although a new generation of satellite precipitation product, Global Precipitation Measurement (GPM) can improve the accuracy of global precipitation observation data as compared with the previous Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), its accuracy is still not high enough when applying it to the Qinghai-Tibet Plateau, China. Due to unique local climate and precipitous relief in the Qinghai-Tibet Plateau, precipitations collected at sparse rainfall gauges exhibited strong space-time heterogeneity, making some available approaches of precipitation calibration for GPM lacked of an integrated consideration of multiple attributes of rainfall volumes, rainfall frequency in rainy days and relevant probability distribution. In this study, GPM data for 2014 – 2017 was calibrated by observed precipitation collected at 19 meteorological stations in Tibet on a daily basis. Linear Scaling (LS), local Intensity (LOCI), Gamma Distribution Mapping (GDM) and GDM-LOCI methods were used to eliminate the deviation between GPM and the ground observations. The results show that: (1) Overall, the performance of GPM to detect daily precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau described an increasing trend in space, rising gradually from low annual precipitation in the northwest pluvial plain and the central hinterland to rich

annual precipitation in the eastern intermountainous plain. Unfortunately, light rain event (<2 mm) was overestimated but heavy rain event (>10 mm) was underestimated in terms of daily precipitation intensity. (2) After calibration by aforesaid four methods, the overall deviation between GPM and site observations were reduced to some extent at each percentile. The probability distribution of precipitation time series was optimized by GDM, and it calibrated precipitation values and retained extreme value by properly adjusting the probability distribution of GPM, making its application effect better than those of LS and LOCI in the area with more abundant precipitation. After combining with LOCI, GDM calibrated the precipitation, frequency of rainy day and time probability distribution of rainfall in GPM, and its application effect further improved the accuracy of GPM, and improved the fitting degree and matching degree to the daily precipitation series provided by ground stations. GDM-LOCI was the best suitable method to calibrate GPM after compared with any other single method. This research provides a reference calibration method for an accurate application of GPM in the Qinghai-Tibet Plateau, and lays a basic condition for regional hydrological simulation and water resources management research.

Key words: satellite remote sensing precipitation; deviation correction; GPM; accuracy assessment; the Qinghai-Tibet Plateau