

陈凤娇,李迎新,高金兰,等,2019. IMERG 和 TMPA 降水产品在夏季中国中东部的检验[J]. 气象,45(12):1680-1690. Chen F J, Li Y X, Gao J L, et al, 2019. Evaluation of IMERG and TMPA precipitation datasets over summer mid-eastern China[J]. Meteor Mon, 45(12):1680-1690(in Chinese).

IMERG 和 TMPA 降水产品在夏季 中国中东部的检验^{*}

陈凤娇¹ 李迎新² 高金兰³ 王 云¹ 朱华亮¹

1 安徽省气象信息中心, 合肥 230031

2 中国环境科学研究院, 北京 100012

3 安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031

提 要: 基于 500 个国家站雨量计的观测, 从时空分布、不同地形条件、不同等级的降水强度及日变化角度, 对比评估了 2014—2016 年夏季多星集成降水产品 TMPA 和 IMERG 在中国中东部的适用性。研究表明, 与雨量计相比, TMPA 和 IMERG 降水产品能较好地反映夏季中国中东部逐日降水量的变化规律, IMERG 的平均误差更小。IMERG 降水产品的日平均降水量与雨量计的相关性更高, 相关系数超过 0.9, 而 TMPA 仅为 0.8。在中国中东部的平原和山区, IMERG 降水产品对弱降水($<4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)强度和弱降水频次的表征能力, 较 TMPA 降水产品有明显的改善; 但 IMERG 降水产品对山区的强降水频次的探测较 TMPA 降水产品改进有限。从日变化来看, TMPA 降水产品明显低估早晨的降水强度和降水频次, 且高估了午后的降水强度和降水频次。IMERG 降水产品作为高时空分辨率的准全球降水资料, 在中国中东部有较高的精度, 未来可应用于气象和水文模式中。

关键词: 降水, IMERG, TMPA, 日变化

中图分类号: P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.005

Evaluation of IMERG and TMPA Precipitation Datasets over Summer Mid-Eastern China

CHEN Fengjiao¹ LI Yingxin² GAO Jinlan³ WANG Yun¹ ZHU Hualiang¹

1 Anhui Meteorological Information Centre, Hefei 230031

2 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

3 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

Abstract: Based on the observations from 500 quality-controlled rain gauges, the applicability of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) and integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG) products to the precipitation in mid-eastern China during the summer of period 2014—2016 was analyzed, from the aspects of spatio-temporal distribution patterns, regional factors, rainfall intensities, and diurnal cycles. Statistical analysis showed that TMPA and IMERG have the similar daily variations of rainfall compared to gauge observations, and the mean errors are much smaller for IMERG. IMERG exhibits much stronger linear correlations (>0.9) with rain gauge observations than TMPA (0.8) at the daily scale. IMERG shows superior skill in estimating light rainfall ($<4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) and detecting light precipitation events, compared with

^{*} 国家自然科学基金项目(41805023)和安徽省自然科学基金项目(1808085MD99)共同资助

2018 年 7 月 7 日收稿; 2019 年 10 月 8 日收修定稿

第一作者: 陈凤娇, 主要从事大气探测卫星遥感和气候环境研究. Email: cfj@mail.ustc.edu.cn

TPMA over both plain and mountain regions. However, no clear improvement is found in detecting heavy rainfall events over mountain regions. For precipitation diurnal cycles, TMPA underestimates the early morning rain intensity and rain frequency, but overestimates those in the late-afternoon. As a high spatio-temporal precipitation dataset, IMERG performs well over mid-eastern China, and can be applied in meteorological and hydrological models in the future.

Key words: precipitation, IMERG, TMPA, diurnal variation

引 言

利用卫星观测反演获得的高时空分辨率降水产品,在天气监测和气象水文模式中应用广泛(Artan et al, 2007)。中国中东部($26^{\circ} \sim 36^{\circ} \text{N}$ 、 $113^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$)地形地貌复杂,加之强降水事件频发,往往使得该区域易受到洪涝和泥石流等灾害(Varun and Kireet, 2006; 李建等, 2013; 刘绿柳等, 2018)。卫星遥感主要通过红外或微波设备观测来反演降水,是获取该区域降水特征的重要途径(卢乃锰等, 2017)。由于多源卫星或多种传感器融合算法的不确定性,若直接将卫星降水产品应用于数值模式中,可能会引入误差(Hong et al, 2006; Tian et al, 2009)。因此,有必要对卫星反演的降水产品的准确性进行评估。

TPMA 和 IMERG 降水产品是时空分辨率较高的降水产品(Huffman et al, 2007; Hou, 2008)。自产品发布以来,已广泛应用于极端天气预报、灾害预报和径流预报中(骆三等, 2011; 成璐等, 2014; 黄勇等, 2015; Chen and Fu, 2015; 金晓龙等, 2018)。学者们就两种降水产品在不同时空尺度、不同地区的准确性进行评估(Min et al, 2011; Fischer and Knutti, 2014; Liu et al, 2015; Fu et al, 2016)。研究发现 IMERG 和 TMPA 降水产品在不同地形条件下、不同降水强度、不同空间尺度上,其精确度差异明显(Prakash et al, 2016; Tang et al, 2016a; 2016b; Wang et al, 2017)。如 IMERG 降水产品在东亚山区、安第斯山脉的表现优于 TMPA,能较好地反映降水特征(Manz et al, 2017)。金晓龙等(2016)发现在天山地区较 TMPA 和 CMORPH (CPC MORPHing technique)降水产品,IMERG 与雨量计观测的相关系数最高,超过 0.6,且相对误差最小,大致在 10%左右。然而,上述结果均依赖于早期的 IMERG 降水产品,时间序列较短(多为 1~2 年),且针对中国中东部的适用性评估的研究还较少。

至今,IMERG 降水产品已积累了 3 年多,为检验 IMERG 和 TMPA 降水产品在中国中东部夏季降水的准确性提供了可能。本研究将对比评估 IMERG 和 TMPA 降水产品在表征中国中东部降水日降水量的区域时空分布特征、不同降水等级及日变化上的能力,为水文和气候模式预报应用提供观测依据。

1 资料与方法

本研究使用了 3 种降水产品,包括 TMPA 和 IMERG 多卫星降水集成产品及雨量计观测的降水资料。覆盖中国中东部的共 510 个国家站雨量计降水数据由中国气象局提供,时间覆盖范围为 2014—2016 年的夏季(6—8 月)。其中,本研究对小时雨量计数据缺测率超过 2%,超过 $400 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的观测数据的国家站予以剔除,最终保留了 500 个站的数据。根据海拔高度,挑选出 43 个海拔高于 200 m 的山区站和 91 个海拔低于 20 m 的平原站(图 1)。TMPA 降水产品(<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads>)和 IMERG(V04)最终产品(<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/TRMM>)的时空分辨率见表 1。

由于三种降水资料的时空分辨率不同,首先需处理得到时空匹配的 TMPA、IMERG 降水产品和与雨量计的降水资料集。空间尺度上,将 TMPA 和 IMERG 降水产品插值到雨量计站点上(最近距离法),以雨量计直接观测的降水作为真值,来比较两种卫星降水产品的精度。在时间尺度上,将小时降水量进行日累加,得到 2014—2016 年夏季逐日降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),将日降水量作为基本研究单位,主要是考虑到日累计降水量是反映气候变化的重要因素,且日降水量的多寡直接与洪涝、泥石流灾害及其他多种气象要素密切相关(李红梅等, 2008; 宁亮和钱永甫, 2008; 田冰等, 2008; 高荣等, 2018)。

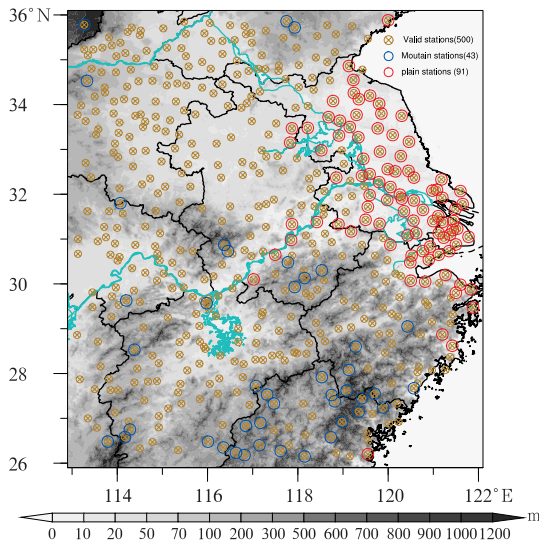


图 1 中国中东部地形(阴影)分布及雨量计观测站点(黄色)、平原站点(红色圆)和山区站点(蓝色圆)的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the topography (shaded area) and all CMA gauge stations (yellow dots), plain stations (red circles) and mountain stations (blue circles) over mid-eastern China (MEC)

为了定量评估 TMPA 和 IMERG 降水产品的精确度,我们使用了几个统计指标,包括平均误差(mean error, ME)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient,

CC)、偏差(BIAS)、探测概率(probability of detection, POD)、错报率(false alarm ratio, FAR)、公正先兆评分(equitable threat score, ETS)(Tian et al, 2007; 金晓龙等, 2016)。主要计算公式如下:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{si} - R_{ri}) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{si} - R_{ri})^2} \quad (2)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{si} - \overline{R_s})(R_{ri} - \overline{R_r})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{si} - \overline{R_s})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (R_{ri} - \overline{R_r})^2}} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{H + F}{H + M} \quad (4)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (5)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (6)$$

$$ETS = \frac{H - HS}{H + M + F - HS},$$

$$HS = \frac{(H + M)(H + F)}{N} \quad (7)$$

式中, R_{si} 是卫星估计的降水, R_{ri} 是雨量计观测的日降水量, $\overline{R_s}$ 和 $\overline{R_r}$ 分别是卫星和雨量计观测的日降水量平均值。 N 是研究时间段内的总观测样本数。 H 、 M 、 F 和 Z 的含义见表 2。

表 1 雨量计、TMPA 和 IMERG 降水产品参数

Table 1 Parameters of three precipitation products (rain gauges, IMERG, and TMPA)

降水产品	时间分辨率/h	空间分辨率/°	覆盖范围	时间跨度	主要数据源
雨量计	1	/	/	1960 年至今	雨量计
TMPA	3	0.25	50°S~50°N	1998 年 1 月至今	卫星和雨量计
IMERG	0.5	0.1	90°S~90°N	2014 年 3 月至今	卫星和雨量计

表 2 雨量计与多卫星降水集成产品的列联表

[阈值根据中国中东部夏季雨量计日降水量的概率密度分布挑选(见结果部分), 分别是 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 20 和 30 mm · d⁻¹]

Table 2 Contingency table of rain gauge measurements and satellite-based rainfall retrievals

[The daily rainfall thresholds are defined according to the distribution of the daily rainfall over MEC during summer (see results as reference), which are 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 20, and 30 mm · d⁻¹]

	雨量计 ≥ 阈值	雨量计 < 阈值
卫星产品 ≥ 阈值	H	F
卫星产品 < 阈值	M	Z

2 时空分布特征

图 2a, 2b, 2c 给出了夏季中国中东部 TMPA、IMERG 降水产品和雨量计计算的日平均降水量的空间分布。日平均降水量是 2014—2016 年夏季某站点的逐日降水量的总和与研究时间段内发生降水天数(日降水量超过 0.1 mm · d⁻¹)之比。中国中东部的日平均降水量大致分布在 1.6~10 mm · d⁻¹, 其中北部是降水量低值区, 南部是高值区(图 2c)。TMPA 和 IMERG(图 2a 和 2b)均能较好地表征夏

季中国中东部的日降水量高低值的空间分布;日降水量的高值区位于长江流域及南部山区,低值区主要位于北部。但卫星降水产品对日降水量均有所高估。从平均误差来看(图 2d 和 2e),卫星产品在中国中东部大部分地区的反演误差较小,大多分布在 $-1.25 \sim 1.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中,TMPA 和 IMERG 降水产品在长江流域、西北部分地区对日降水量均有高估,平均误差最大可达 $1.75 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

图 3 给出了 2014—2016 年夏季 TMPA 和 IMERG 降水产品(逐日降水量)与雨量计观测的日降水量的 CC 和 RMSE。中国中东部大部分地区,TMPA 降水产品的 CC 多在 0.8 左右(图 3a)。从区域性差异来看,TMPA 降水产品在长江流域下游和南部地区的相关性最好,一般超过 0.8。与 TMPA 降水产品相比,IMERG 降水产品(图 3b)在日尺度上相关性明显提高,大多超过 0.9。此外,IME-

RG 降水产品的 RMSE,在中国中东部大部分站点均有所改善,但南方山区和长江流域上游的 RMSE 差较大,可超过 $14 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,这主要是由于上述区域的日降水量均值较大,IMERG 降水产品在上述区域还存在一定的反演误差。

图 3 表明两种降水产品在平原和山区的精度不同,因此,表 3 分别计算了平原、山区和所有站点内的卫星产品的逐日降水量的 ME、RMSE 和 CC。在平原地区,IMERG 较 TMPA 降水产品的 RMSE 更小、CC 更大;TMPA 的 RMSE 为 $14.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,CC 为 0.63;而 IMERG 的 RMSE 仅为 $12.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,CC 为 0.72。在山区,IMERG 对日降水量的表征效果并没有显著提升,RMSE 和 ME 均略优于 TMPA。对于整个地区而言,IMERG 降水产品能更好地刻画日降水量,较 TMPA,其 RMSE 差更小,CC 更大。

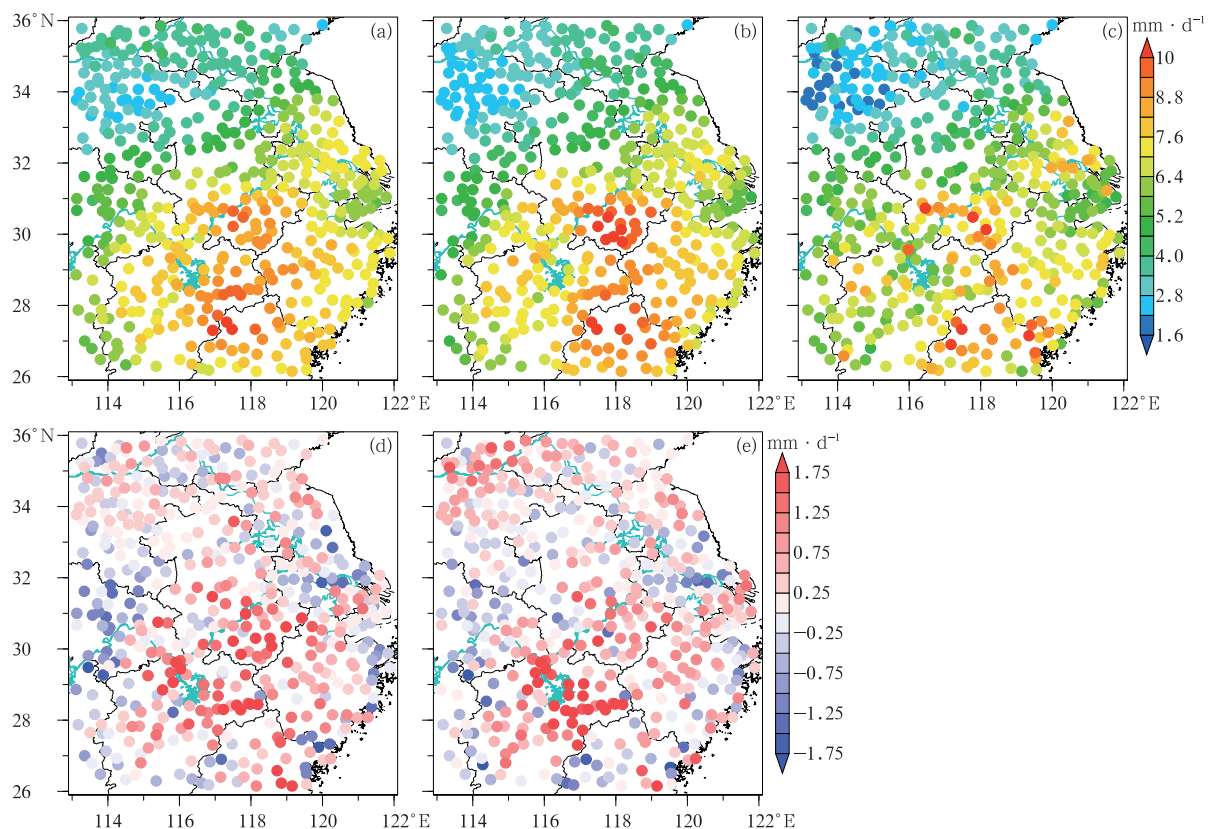


图 2 2014—2016 年夏季中国中东部(a)TMPA、(b)IMERG、(c)雨量计观测的日降水量的空间分布,以及(d)TMPA 和(e)IMERG 与雨量计观测的日降水量的平均误差空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of the mean daily rainfall absorbed by (a) TMPA, (b) IMERG, and (c) rain gauges as well as the ME of (d) TMPA and (e) IMERG over MEC during the summer of 2014—2016

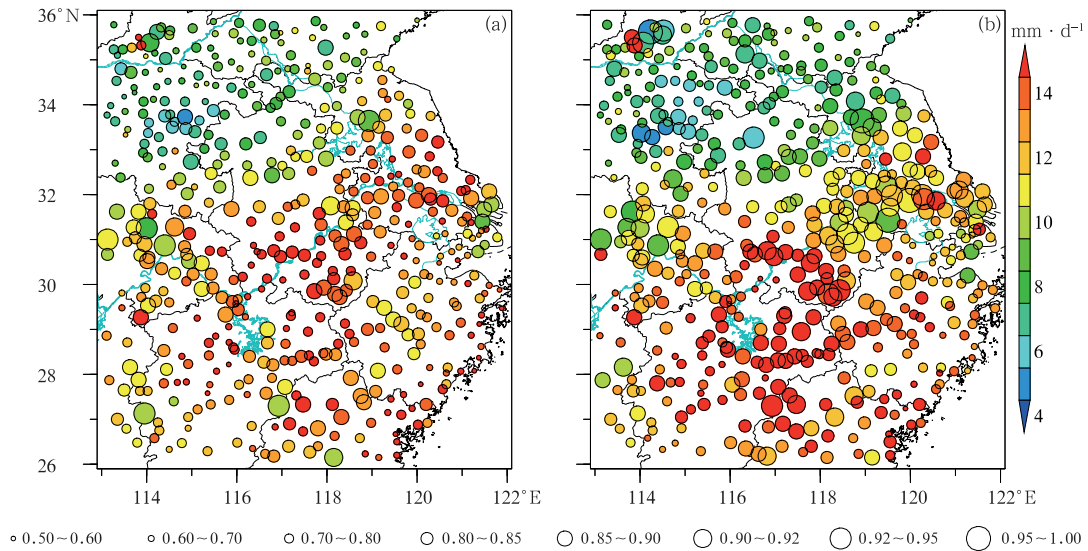


图 3 2014—2016 年夏季中国中东部(a)TMPA、(b)IMERG 的日降水量的 CC(圆圈)及 RMSE(填色)空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the CC (circles) and RMSE (colors) of daily rainfall for TMPA (a) and IMERG (b) over MEC during the summer of 2014–2016

表 3 2014—2016 年夏季中国中东部平原、山区、所有站点 TMPA 和 IMERG 降水产品与雨量计观测的日降水量的 ME, RMSE 和 CC
Table 3 The ME, RMSE and CCs for TMPA and IMERG at plain, mountain and all stations over MEC during the summer of 2014–2016

降水产品	下垫面类型	ME/ (mm · d ⁻¹)	RMSE/ (mm · d ⁻¹)	CC
TMPA	平原	0.24	14.8	0.63
	山区	-0.046	15.2	0.65
	所有	0.43	13.3	0.66
IMERG	平原	0.51	12.9	0.72
	山区	-0.43	14.8	0.71
	所有	0.52	12.7	0.72

3 不同等级的降水强度

进一步评估 IMERG 和 TMPA 降水产品对不同等级的降水强度的探测能力。图 4 所示为雨量计与卫星产品的日平均降水均值关系。具体计算方法是分别计算某类雨量计(所有、平原或山区站点)某日降水量间隔内,雨量计和卫星产品估计的日降水量均值。为了保证统计的准确性,统计时需确保每个日降水量间隔内的探测样本相同。当日降水量低于 20 mm · d⁻¹ 时,对于全部站点、山区和平原站点的 TMPA 和 IMERG 日平均降水量与雨量计表现

出较好的一致性。随着日降水量的增加, TMPA 和 IMERG 估计的日降水量明显低于站点观测值。对比 TMPA 和 IMERG 可知,IMERG 产品对不同等级降水的表征能力更好,更接近与 1 : 1 线(灰色虚线),在平原和山区地区的 CC 分别达到 0.993 和 0.998,更优于 TMPA 降水产品。

图 5 所示为夏季中国中东部所有站点、平原和山区的三种降水产品日降水量的概率密度分布(probability distribution function, PDF)。从雨量计的观测结果来看(柱状图),平原地区 < 10 mm · d⁻¹ 的降水事件占总降水频次达 61.8%,山区站点达 58.8%,整个中国中东部达 61.9%;而超过 50 mm · d⁻¹ 的降水频次较低,在平原和山区站点均仅占 7.1%,整个中国中东部仅占 6.6%左右。基于 TMPA 和 IMERG 的日降水量(折线)也表现出高弱降水频次和低强降水频次的分布特征。与雨量计观测相比,IMERG 对弱降水(0 ~ 5 mm · d⁻¹)频次有所高估,而 TMPA 有所低估。此外,与雨量计观测相比,IMERG 估计的降水分布型,表现出对强降水(>50 mm · d⁻¹)的低估,尤其是在山区站点,其占比仅达到 5.8%,这主要是由于 IMERG 对弱降水探测的比例增多导致;而 TMPA 对强降水事件有所高估,在山区和平原地区其占比分别超过 8.2%和 8.5%。上述结果说明 IMERG 在山区对强降水探测的改进效果有限。

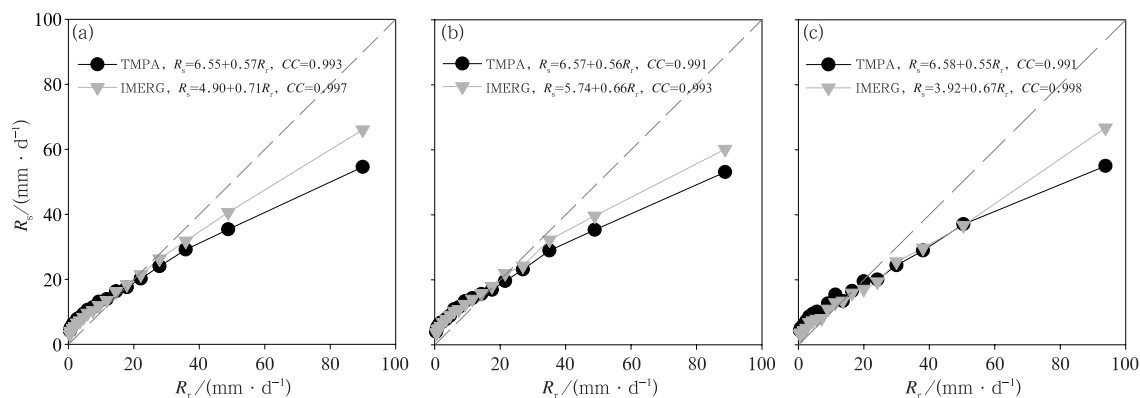


图 4 2014—2016 年夏季中国中东部(a)所有、(b)平原、(c)山区站点雨量计观测的日降水量(R_r)与卫星产品日降水量(R_s)的关系

Fig. 4 Mean daily rainfall from rain gauge (R_r) versus daily rainfall from TMPA and IMERG (R_s) at all (a), plain (b), and mountainous stations (c) during the summer of 2014—2016

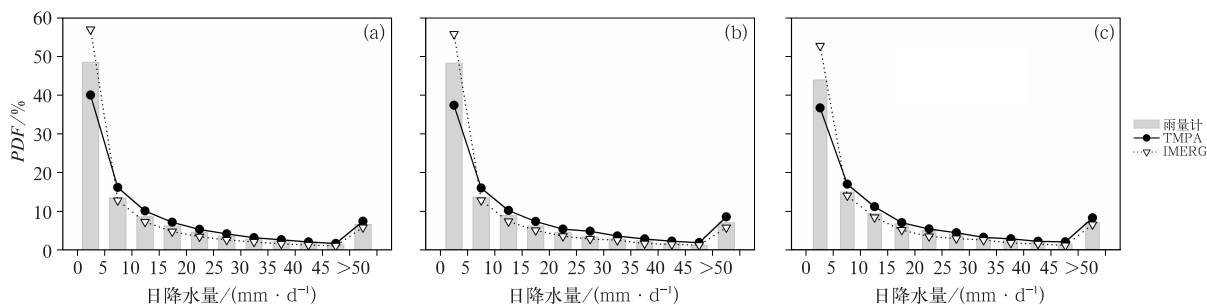


图 5 2014—2016 年夏季中国中东部(a)所有站点、(b)平原站点、(c)山区站点雨量计、TMPA 和 IMERG 的日降水量的概率密度分布图

Fig. 5 Probability distribution function (PDF) of the daily rainfall observed by gauges, TMPA and IMERG at all (a), plain (b) and mountain stations (c) during the summer of 2014—2016

进一步地给出了两种卫星降水产品在整个中国中东部、平原和山区的不同日降水量阈值下的 BIAS, POD, FAR 和 ETS(图 6)。根据日降水量的概率密度分布(图 5),我们选取 0.5, 1, 2, 4, 8, 10, 20 和 30 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为阈值。一般而言,对给定的降水量阈值,TMPA 对该强度的降水事件均有所高估,其 BIAS 均大于 1。IMERG 对平原地区不同降水量阈值下的降水也存在高估($\text{BIAS} > 1$),但与强降水相比,弱降水的高估现象更明显;而在山区,当日降水量 $> 2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,IMERG 对此类降水强度事件存在低估($\text{BIAS} < 1$)。

对于山区和平原地区,随着降水量阈值的增加,IMERG 和 TMPA 降水产品的 POD 和 ETS 明显减小,FAR 明显增加(图 6b~6d)。当日降水量在

1 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, $\text{POD} > 70\%$, $\text{FAR} < 30\%$,ETS 在 0.5 左右;而当日降水量为 30 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,POD 仅为 50%, $\text{FAR} > 40\%$,ETS 仅为 0.3 左右。从这三个指标来看,TMPA 和 IMERG 降水产品在估计强降水事件的能力较差。对于平原站点,IMERG 较 TMPA 降水产品,其对弱降水和强降水事件的表征能力明显更优,POD 更高,FAR 更低,ETS 更高。然而,对于山区站点,IMERG 较 TMPA 降水产品的提升并不明显,其 POD 更小,但 FAR 更小,ETS 值相近,这与图 5 的结果类似。

4 日变化特征

为了便于研究降水日变化,本节使用的是 1 h

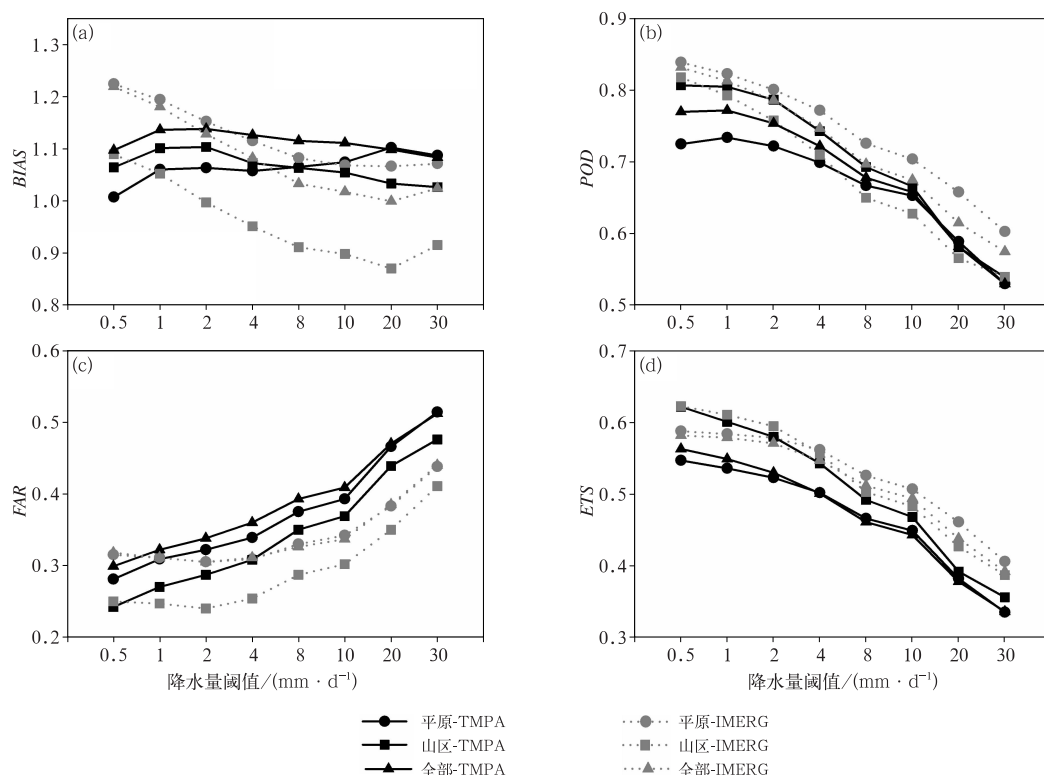


图 6 2014—2016 年夏季整个中国中东部所有站点、平原站点、山区站点 TMPA 和 IMERG 降水产品对不同等级降水的 (a)BIAS, (b)POD, (c)FAR 和 (d)ETS

Fig. 6 (a) BIAS, (b) POD, (c) FAR, and (d) ETS for TMPA and IMERG for different rainfall intensities at all, plain, and mountainous stations over MEC during the summer of 2014—2016

分辨率的雨量计数据、3 h 分辨率的 TMPA 和 0.5 h 分辨率的 IMERG 降水产品数据(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。小时降水率的计算方法是用研究时间段内(2014—2016 年的夏季)某时次降水强度总量与总降水次数的比值。小时的降水频次的计算方法是研究时间段内降水事件的次数与总探测次数之比。

图 7 所示为中国中东部三种降水产品估计的降水强度和降水频次峰值出现时间的空间分布。由图 7a 和 7d, 南部的降水强度峰值多出现在傍晚(大约在 18 时), 中部地区多出现在早晨(08 时), 而西北地区则多出现在夜间(20 时)。对于降水频次而言, 其峰值的出现时间一般比降水强度峰值出现的时间早(如中部及北方地区), 而对于南方地区则稍晚。TMPA 和 IMERG 估计的降水强度峰值出现时间(图 7b 和 7c)与雨量计的观测结果, 在空间分布上十分相似。但 IMERG 降水产品比 TMPA 降水产品的效果更优, 在中部地区, IMERG 捕捉到该区域早晨的降水强度峰值, 而 TMPA 未捕捉到。TMPA

和 IMERG 估计的降水频次峰值时间(图 7e 和 7f)与雨量计相比差异很大。TMPA 和 IMERG 均无法表征中部地区早晨的日降水频次峰值。但与 TMPA 相比, IMERG 对日降水频次峰值出现时间的表征能力更优。如 TMPA 无法探测到西北部地区的夜间的日降水频次峰值。

为了进一步对比区域性差异, 图 8 给出了三种降水产品在平原和山区的降水强度和降水频次的日变化分布。由雨量计的观测结果可知, 对于平原地区, 降水强度和频次均在 06 时和 16 时较大(图 8a 和 8b); 对于山区站点, 降水强度在 16 时达到峰值, 降水频次在 17 时达到峰值。

IMERG 降水产品估计的降水强度和频次的日变化与雨量计结果相似, 在平原地区早晨和午后的降水强度和降水频次较大。对于山区地区, 降水强度峰值出现在 18 时左右, 但与雨量计的结果相比, 存在 1 h 的延迟。与 IMERG 降水产品相比, 基于 TMPA 降水产品无法重现早晨的降水强度和降水

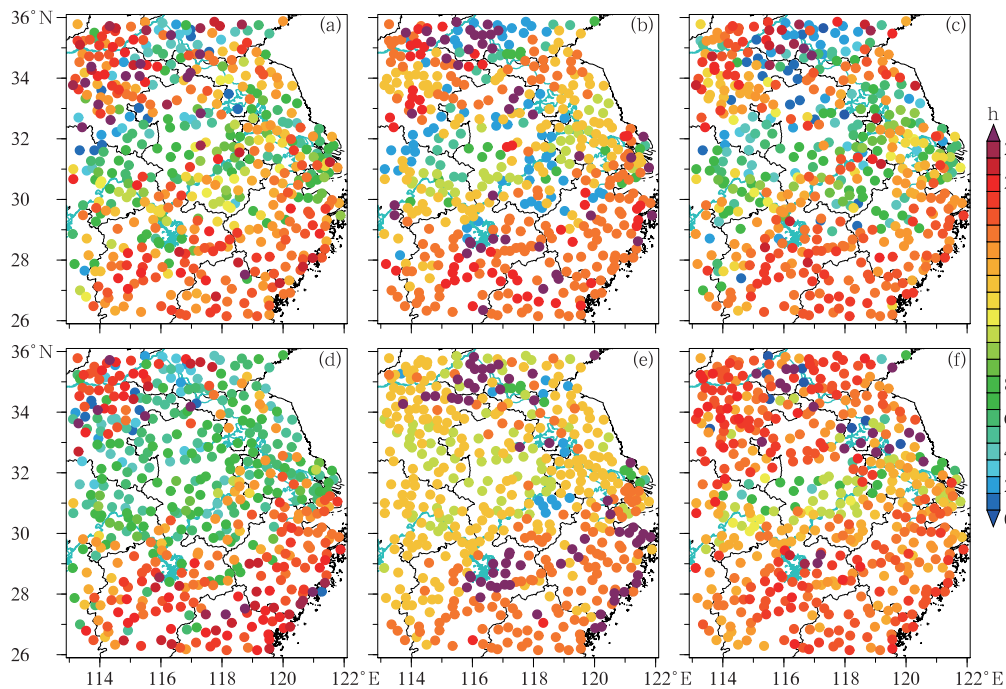


图 7 2014—2016 年夏季中国中东部(a,d)雨量计,(b,e)TMPA,(c,f)IMERG 观测的降水强度(a,b,c)和降水频次(d,e,f)峰值出现时间的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the local solar time observed by rain gauges (a, d), TMPA (b, e), and IMERG (c, f), when the maximum rain rate (a, b, c) and rain frequency (d, e, f) occurred over MEC during the summer of 2014—2016

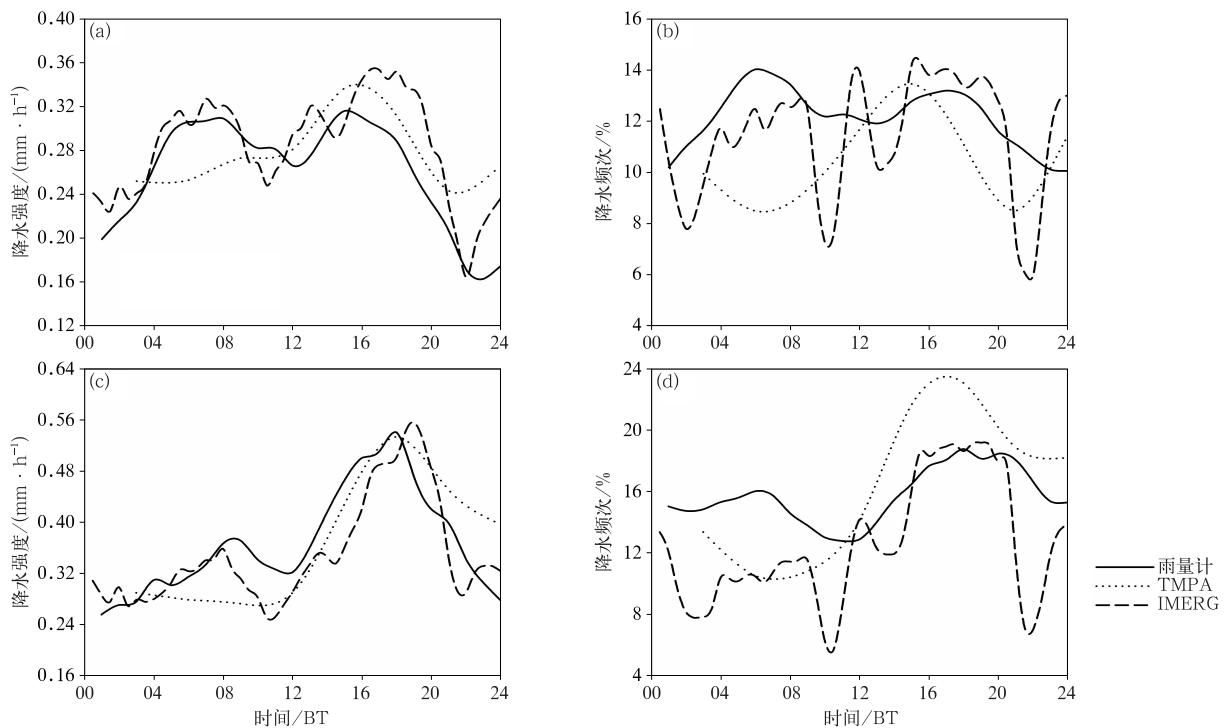


图 8 2014—2016 年夏季中国中东部平原(a,b)和山区(c,d)的雨量计(1 h 分辨率)、TMPA(3 h 分辨率)和 IMERG(0.5 h 分辨率)观测的降水强度(a,c)和降水频次(b,d)的日变化

Fig. 8 Mean diurnal cycle of the summer mean rain intensity (a, c) and rain frequency (b, d) observed by rain gauges (1 h bins), TMPA (3 h bins), and IMERG (0.5 h bins) over plain stations (a, b) and mountain stations (c, d) over MEC during the summer of 2014—2016

频次高值区, 仅仅捕捉到午后(16 时)的降水强度和频次的高值区。对于山区, TMPA 降水产品也无法重现 06 时降水强度和频次的次峰值。从日变化的幅值来看, 与 TMPA 降水产品相比, 在平原地区, IMERG 降水产品观测的降水强度和频次幅值与雨量计观测结果最为相近。但对于山区, IMERG 降水产品估计的降水频次幅值低于雨量计观测。此外, 基于 IMERG 降水产品的日降水强度和频次的时间变率更为明显, 这主要是由于 IMERG 降水产品的时间分辨率为 0.5 h, 其时间分辨率最高。对于山区和平原地区, 基于 TMPA 降水产品估计的降水强度和频次在早晨明显低于雨量计的观测值, 而在山区 TMPA 降水产品高估了午后降水频次, 比雨量计的观测结果高出 8%。

图 9 给出了夏季中国中东部的降水强度和降水频次的纬度-时间分布。在 $26^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ (大部分山区, 海拔高度较高), 雨量计的观测结果显示 18 时出现高降水强度(图 9a)和高降水频次(图 9d)。然而, TMPA 降水产品高估了午后的降水强度和降水频次, 且低估了早晨的降水强度和频次(图 9b 和 9e)。IMERG 降水产品能更好地表征此纬度带内的降水强度的日变化, 但对早晨的降水频次仍有一定的低估。在 $30^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ (平原地区), 其降水强度和降水频次与 $26^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 相比, 明显减小; 其降水强度和降水频次大值仍出现在 06 时和 18 时左右。基于 TMPA 和 IMERG 降水产品得到的降水强度日变化与雨量计的结果相似, 卫星观测与该纬度带内的降水频次的日变化还存在一定的差异。

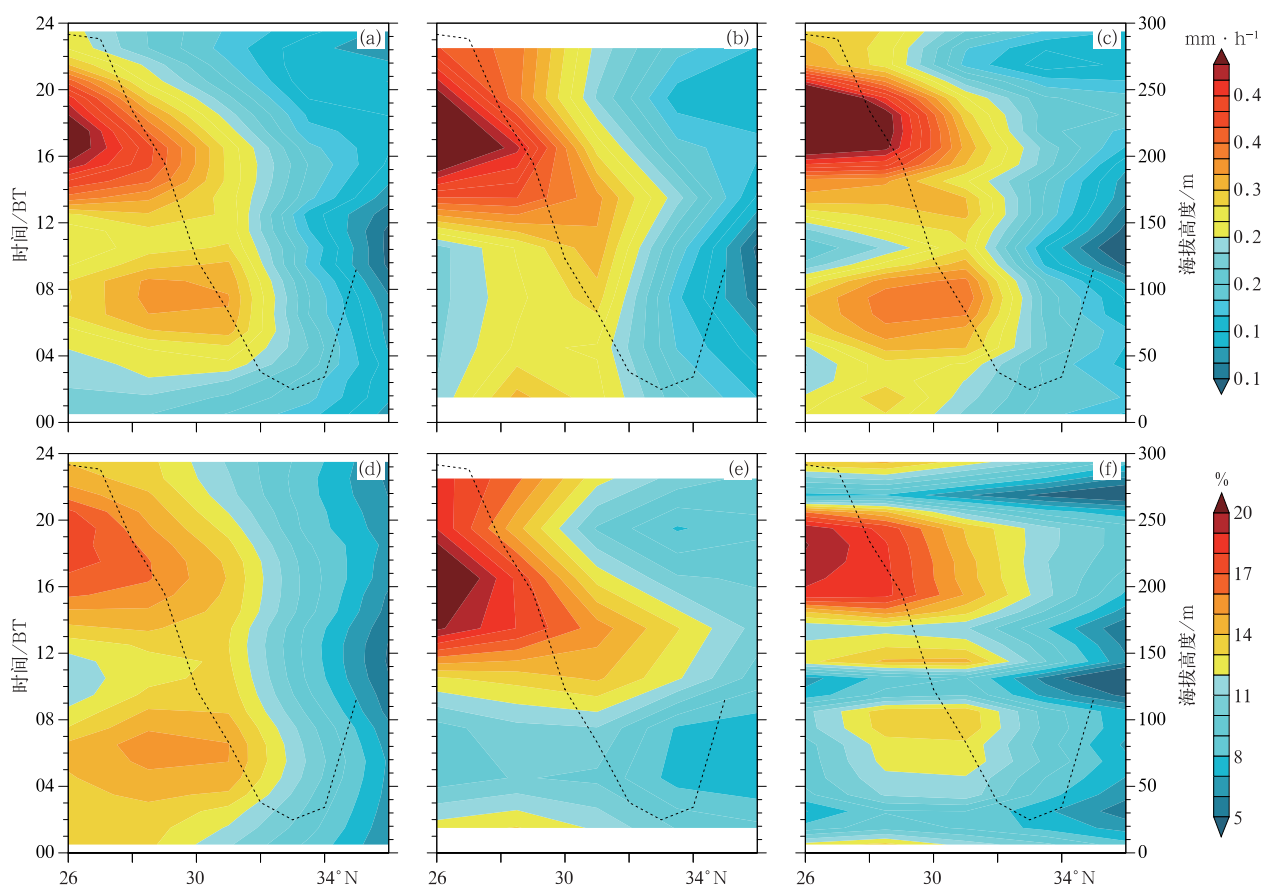


图 9 2014—2016 年夏季中国中东部雨量计(a,d)、TMPA(b,e)和 IMERG(c,f)观测的降水强度(a,b,c)和降水频次(d,e,f)的时间-纬度分布
[灰色点线为海拔高度(右边的 Y 坐标)随纬度带的变化]

Fig. 9 Time-latitude cross-sections of mean diurnal variations in hourly rain intensity (a, b, c) and rain frequency (d, e, f) averaged over MEC observed by rain gauges (a, d), TMPA (b, e), and IMERG (c, f) during the summer of 2014—2016
[The gray-dashed line denotes the mean elevation (right-hand axis) along the latitude belts]

5 结 论

本研究检验和验证了 2014—2016 年夏季高时空分辨率的多卫星降水集成产品(TMPA 和 IMERG)在中国中东部的适用性,主要从日平均降水量时空分布、不同地形、不同等级降水强度和降水日变化角度,与雨量计的观测结果进行对比评估。主要结论如下:

(1) TMPA 和 IMERG 降水产品与雨量计观测的日平均降水量在空间分布上较相似,在中国中东部大部分区域的 ME 较小,长江流域下游存在较大的正误差($>1.75 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。IMERG 降水产品与雨量计观测的日降水量的 CC 更高,多超过 0.9, TMPA 仅为 0.8。对于平原地区,IMERG 降水产品与 TMPA 降水产品相比,其日降水量的 RMSE 更小,CC 更大。但对于山区,IMERG 降水产品对日平均降水量的表征的提升能力不显著, RMSE 仅略低于 TMPA,且存在较大的负平均误差。

(2) 当日降水量 $<20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,在山区和平原地区, TMPA 和 IMERG 降水产品与雨量计观测的降水强度结果相近。但随着日降水量的增加,山区和平原的 TMPA 和 IMERG 降水产品的估计值明显低于雨量计的观测值。对比 TMPA 和 IMERG 降水产品可知,IMERG 降水产品对弱降水($1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)的捕捉能力更强,探测效率达到 70%,错报率低于 30%,ETS 在 0.5 左右。对于平原站点,IMERG 对弱降水和强降水事件的表征能力明显更优, POD 更高, FAR 更低, ETS 更高。然而,对于山区站点,IMERG 较 TMPA 的提升并不明显,其 POD 更小,但 FAR 更小, ETS 值相近。

(3) 两种卫星降水产品能较好地表征中国中东部降水强度的日变化规律,但对降水频次的日变化的表征还存在一定的缺陷。对于中国中东部平原地区,IMERG 降水产品再现了早晨和午后的降水强度和频次大值,而 TMPA 降水产品仅捕捉到午后的大值区。此外,基于 IMERG 降水产品计算的降水强度和频次幅值与雨量计相比最为接近,而 TMPA 明显低估早晨的降水强度和频次值,高估了午后的降水强度和频次。

从本文的研究结果来看,IMERG 降水产品在中国中东部具有较高的精度,未来可有效应用于降水监测、气象和水文模式预报中。

参考文献

- 成璐,沈润平,师春香,等,2014. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象,40(11):1372-1379. Cheng L, Shen R P, Shi C X, et al, 2014. Evaluation and verification of CMORPH and TRMM 3B42 precipitation estimation products[J]. Meteor Mon, 40(11):1372-1379(in Chinese).
- 高荣,宋连春,钟海玲,2018. 2016 年汛期中国降水极端特征及与 1998 年对比[J]. 气象,44(5):699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5):699-703(in Chinese).
- 黄勇,陈生,冯妍,等,2015. 中国大陆 TMPA 降水产品气候态的评估[J]. 气象,41(3):353-363. Huang Y, Chen S, Feng Y, et al, 2015. Evaluation of TMPA precipitation estimates from 2008 to 2012 over China[J]. Meteor Mon, 41(3):353-363(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).
- 金晓龙,邵华,张弛,等,2016. 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,31(12):2074-2085. Jin X L, Shao H, Zhang C, et al, 2016. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. J Nat Resour, 31(12):2074-2085(in Chinese).
- 李红梅,周天宇,宇如聪,2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学,32(2):358-370. Li H M, Zhou T J, Yu R C, 2008. Analysis of July—August daily precipitation characteristics variation in Eastern China during 1958—2000[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2):358-370(in Chinese).
- 李建,宇如聪,孙激,2013. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J]. 气象学报,71(4):652-659. Li J, Yu R C, Sun W, 2013. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China[J]. Acta Meteor Sin, 71(4):652-659(in Chinese).
- 刘绿柳,杜良敏,廖要明,等,2018. 基于时空统计降尺度的淮河流域夏季分月降水概率预测[J]. 气象,44(11):1464-1470. Liu L L, Du L M, Liao Y M, et al, 2018. Probability prediction of monthly precipitation over Huaihe River Basin in China in summer based on spatio-temporal statistical downscaling method[J]. Meteor Mon, 44(11):1464-1470(in Chinese).
- 卢乃锰,方翔,刘健,等,2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象,43(3):257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Understanding clouds by meteorological satellite[J]. Meteor Mon, 43(3):257-267(in Chinese).
- 骆三,苗峻峰,牛涛,等,2011. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象,37(9):1081-1090. Luo S, Miao J F, Niu T, et al, 2011. A comparison of TRMM 3B42 products with rain gauge observations in China[J]. Meteor Mon, 37(9):1081-1090(in Chinese).

- 宁亮,钱永甫,2008. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,27(5):1010-1020. Ning L, Qian Y F, 2008. Analyses on trends of annual and seasonal four kinds of daily precipitation in China[J]. Plateau Meteorol, 27(5):1010-1020 (in Chinese).
- 田冰,王裕宜,洪勇,2008. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系——以云南省蒋家沟为例[J]. 水土保持通报,28(2):71-75. Tian B, Wang Y Y, Hong Y, 2008. Weighted relation between antecedent rainfall and process precipitation in debris flow prediction—a case study of Jiangjia Gully in Yunnan Province[J]. Bull Soil Water Conserv, 28(2):71-75 (in Chinese).
- Artan G, Gadain H, Smith J L, et al, 2007. Adequacy of satellite derived rainfall data for stream flow modeling[J]. Nat Hazards, 43(2):167-185.
- Chen F J, Fu Y F, 2015. Contribution of tropical cyclone rainfall at categories to total precipitation over the Western North Pacific from 1998 to 2007[J]. Sci China Earth Sci, 58(11):2015-2025.
- Fischer E M, Knutti R, 2014. Detection of spatially aggregated changes in temperature and precipitation extremes[J]. Geophys Res Lett, 41(2):547-554.
- Fu Y F, Chen F J, Liu G S, et al, 2016. Recent trends of summer convective and stratiform precipitation in mid-eastern China[J]. Sci Rep, 6:33044.
- Hong Y, Hsu K L, Moradkhani H, et al, 2006. Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response[J]. Water Resour Res, 42(8):W08421.
- Hou A, 2008. The global precipitation measurement (GPM) mission: overview and status[C]. //Proceedings of the 4th International Precipitation Working Group Workshop. Beijing: NASA Goddard Space Flight Center:13-17.
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al, 2007. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. J Hydrometeorol, 8(1):38-55.
- Liu R, Liu S C, Cicerone R J, et al, 2015. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes[J]. Adv Atmos Sci, 32(8):1027-1037.
- Manz B, Páez-Bimos S, Horna N, et al, 2017. Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the tropical andes[J]. J Hydrometeorol, 18(9):2469-2489.
- Min S K, Zhang X B, Zwiers F W, et al, 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. Nature, 470(7334):378-381.
- Prakash S, Mitra A K, Pai D S, et al, 2016. From TRMM to GPM: how well can heavy rainfall be detected from space? [J]. Adv Water Resour, 88:1-7.
- Tang G Q, Ma Y Z, Long D, et al, 2016a. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J]. J Hydrol, 533:152-167.
- Tang G Q, Zeng Z Y, Long D, et al, 2016b. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM level-3 products over a midlatitude basin: is day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7? [J]. J Hydrometeorol, 17(1):121-137.
- Tian Y D, Peters-Lidard C D, Choudhury B J, et al, 2007. Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications[J]. J Hydrometeorol, 8(6):1165-1183.
- Tian Y D, Peters-Lidard C D, Eylander J B, et al, 2009. Component analysis of errors in satellite-based precipitation estimates[J]. J Geophys Res: Atmos, 114(D24):D24101.
- Varun J, Kireet K, 2006. Extreme rainfall events and associated natural hazards in Alaknanda valley, Indian Himalayan Region[J]. J Mt Sci, 3(3):228-236.
- Wang Z L, Zhong R D, Lai C G, et al, 2017. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility[J]. Atmos Res, 196:151-163.