

# 全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的 极端降水监测潜力研究

丁明泽<sup>1,2</sup>, 雍斌<sup>1,2</sup>, 杨泽康<sup>3</sup>

1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;

3. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211000

**摘要:** 基于全国自动站与CMORPH融合降水数据集, 综合评估全球降水计划(GPM)下的IMERG与GSMaP的4套纯卫星降水数据, 从极端降水指标、极端降水事件探测能力、对于不同历时的极端降水事件精度评估3个方面研究纯卫星降水产品监测极端降水的能力。依据极端降水的阈值将研究区分为3个区域进行研究, 结果表明: (1) 在RX1指标中, IMERG、GSMaP数据均在受季风影响的复杂地形区域呈现出明显的高估状态, 在其余地区存在不同程度的低估现象; 在R95pTOT指标中, 卫星数据均表现较好, 与地面参考数据具有较高的相关性。(2) 在极端降水事件探测方面, 4套纯卫星产品在东北地区的表现均优于其他区域; GSMaP表现优于IMERG数据, 具有较低的误报率, 但对极端降水的反演精度较低。(3) 在不同历时的极端降水事件精度评估中, IMERG、GSMaP卫星降水产品在历时较长的极端降水事件中的表现较好, 具有更高的精度; 对于极端日降水事件, 卫星降水产品在高雨强下的误差显著性十分明显, 远远高于复杂地形对卫星降水反演精度的影响, 导致卫星降水在复杂地形区域(Ⅲ区)的表现优于其他区域。总体上, IMERG产品在研究区对极端降水的监测能力优于GSMaP产品, 其中又以IMERG\_Late表现最佳; 4套卫星降水产品均能表现出研究区的极端降水区域特征, 但在研究区大部分区域呈现出低估状态, 卫星降水产品对于雨强的误差订正仍是未来极端降水反演的重点与难点之一。

**关键词:** 遥感, IMERG, GSMaP, 卫星降水, 极端降水, GPM, 误差特性

**引用格式:** 丁明泽, 雍斌, 杨泽康. 2022. 全球降水观测计划多卫星联合反演降水产品的极端降水监测潜力研究. 遥感学报, 26(4): 657-671

Ding M Z, Yong B and Yang Z K. 2022. Extreme precipitation monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of Global Precipitation Measurement (GPM) mission. National Remote Sensing Bulletin, 26(4): 657-671 [DOI: 10.11834/jrs.20220240]

## 1 引言

降水作为地球水循环基础组成部分, 连接着大气过程与地表过程, 具有重要的水文学、气象学、气候学意义(郭瑞芳和刘元波, 2015)。在全球变暖的影响下, 随着地面蒸散作用的加强, 大气中水分含量增加, 水循环运动加剧, 洪水、暴风雪、台风等极端降水事件的频率和强度显著上升(Meehl等, 2000)。因极端降水引发的洪涝、旱灾、雪灾等极端气候灾害, 对社会的经济发展、生态系统和人类活动等方面造成巨大影响。

而中国作为世界上极端气候灾害最为严重的国家之一, 科学认知极端降水在中国的特征具有重要的意义, 并为进一步预测中国未来极端降水变化趋势提供科学依据, 以期降低极端降水灾害事件对人类生产生活的影响。

近年来, 国内外专家学者利用地面站点数据对极端降水变化特征进行了大量研究。Westra等(2013)采用全球8000多个观测站的降水资料在全球尺度上的极端降水事件进行监测, 研究显示全球年最大日降水量整体存在明显的增加趋势; 钱维宏等(2007)利用中国160多个地面降水资料得

收稿日期: 2020-07-29; 预印本: 2021-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFA0605402); 国家自然科学基金(编号:51979073)

第一作者简介: 丁明泽, 研究方向为GIS在水文气象中的应用。E-mail: dingmz1997@163.com

通信作者简介: 雍斌, 研究方向为GIS在水文气象中的应用。E-mail: yongbin@hhu.edu.cn

出, 极端强降水事件同样具有增多的趋势; 与强降水有关的极端降水指标在中国黄海区域 (Wang 等, 2017)、长江中下游流域 (白路遥和荣艳淑, 2015)、四川省 (王真, 2019) 等也呈现出上升趋势。然而, 由于地面站点降水资料分布不均、易受外部环境影响的特点, 难以获取到时空尺度连续的区域性降水资料, 对于区域性极端降水的监测仍存在较大困难 (Huffman 等, 2001)。1997–11, 搭载了世界上第一台星载降水雷达的 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星成功发射, 其降水产品弥补了地面观测降水在时空上的局限性, 为极端降水监测提供了新的方式 (Skofronick–Jackson 等, 2017)。Habib 等 (2009) 利用 TRMM 卫星降水产品 TMPA (TRMM Merged Precipitation Analysis) 对美国路易斯安那州的热带风暴事件进行监测, 研究发现卫星降水对于极端降水事件具有一定的监测能力; Chen 等 (2013) 对 TRMM 时代多种降水产品在 2009–08 台湾的强台风“莫拉克”事件的表现进行精度评估, 但研究显示各卫星产品在强降水事件中均存在低估现象。在 TRMM 的基础上, 美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 与日本 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 联合实施了全球降水测量计划 GPM (Global Precipitation Measurement), GPM 下的卫星降水产品具有更广的覆盖范围与更高的时空分辨率 (Tang 等, 2016), 所使用的卫星资料与反演算法较以往产品有所改进, 精度也有所提升。Prakash 等 (2016) 对 TRMM 时代的 TMPA–3B42 与 GPM 时代的 IMERG (The Integrated Multi–satellite Retrievals for GPM) 在印度暴雨探测方面进行研究, 研究发现 IMERG 对于季风季节的极端降水反演精度明显优于 TMPA–3B42 数据; 刘国等 (2017) 利用 GPM 时代多套卫星产品对“威马逊”台风在中国局部地区进行监测评估, 发现卫星降水对于高雨强的极端降水事件的监测仍然存在问题, 主要体现在卫星降水具有较高的误报率与较低的命中率。

综上所述, 目前对于极端降水的研究数据源大多来自长时间序列的地面站点资料与 TRMM 时代降水产品, 采用 GPM 时代卫星降水数据较少; 且对极端降水的监测往往只针对于特定的极端降水事件, 难以获取到极端降水的整体误差特征。因此, 本文以自动站与 CMORPH 融合的网格数据

集作为地面参考数据, 根据极端降水事件的阈值将研究区分为 3 个区域, 采用 GPM 时代下的 IMERG 与 GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) 纯卫星降水产品, 从极端降水指标、极端降水事件探测能力、对于不同历时的极端降水事件精度评估 3 个方面研究其在研究区对极端降水的监测能力。

## 2 研究区、数据与方法

### 2.1 研究区

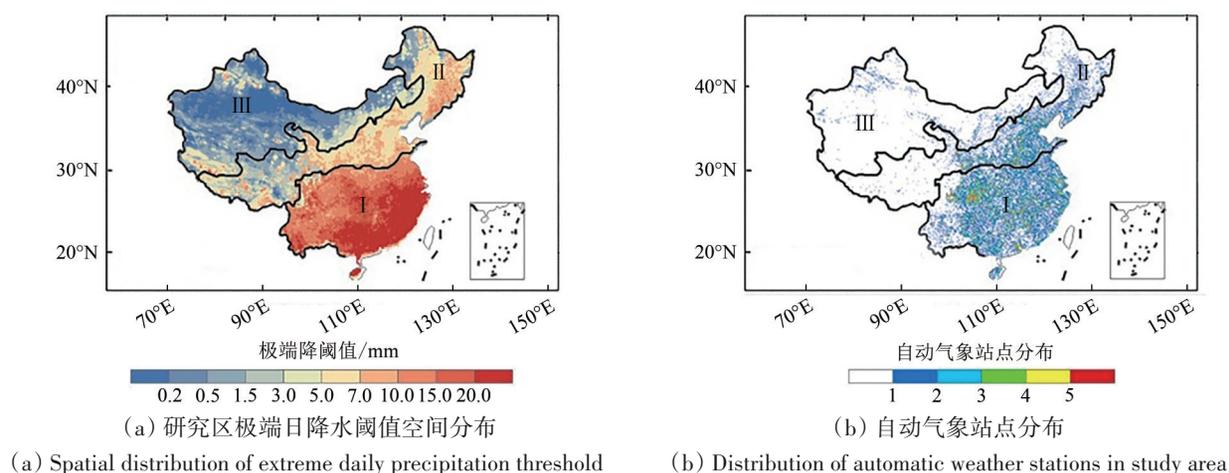
中国幅员辽阔、地形复杂、气候类型多样, 故降水时空分布差异较大, 降水量主要由东南沿海向西北内陆方向递减。极端降水事件频次与降水强度也在时空上存在巨大差异。政府间气候变化专门委员会 IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 将区域降水资料中时间序列的第 95 百分位数作为极端降水阈值, 大于或等于该阈值的情况称为极端降水事件。鉴此, 将地面参考网格数据的时间序列 (2015–01–2018–12) 的第 95 百分位数作为该网格的极端降水阈值, 图 1 给出了中国 (未包含台湾地区) 的极端日降水阈值空间分布, 极端日降水阈值空间分布特征与降水时空分布类似。故根据极端降水阈值的空间区域特征, 以 400 mm、800 mm 年降水量为分界线将研究区分为 3 个区域 (图 1) 进行分析研究: I 区受极端降水事件影响最为严重, 阈值整体偏高 ( $>10$  mm); II 区阈值大多高于 5 mm; III 区大部分区域极端降水阈值较低 ( $<1.5$  mm), 不适于作为极端强降水事件进行评估。为了更加合理的评价极端降水, 在研究与极端降水阈值有关的指标 (POD、FAR、PRCPTOT) 时, 仅对 I、II 区进行研究。

### 2.2 地面参考数据

本文选用空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 时间分辨率为 1 h 的自动站与 CMORPH 融合的降水量网格数据集研究区内所有网格数据作为地面参考数据 (时间跨度 2015–01–2018–12), 覆盖范围为  $15^\circ\text{N}–60^\circ\text{N}$ 、 $70^\circ\text{E}–140^\circ\text{E}$ 。该数据集将经过质量控制后的全国 3–4 万多个自动气象站观测的地面观测数据与美国气候预测中心研发的全球 30 min、8 km 分辨率的 CMORPH 卫星反演降水产品采用概率密度匹配与最优插值 (PDF+OI) 进行融合: (1) 地

将时间分辨率为 30 min 的卫星数据累加为逐时降水值，再插值为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的格网资料 (Shen 等, 2014)，使得其时空分辨率与地面数据相同；(2) 通过概率密度匹配误差订正法订正卫星数据系统误差；(3) 将订正后的数据作为初估场，通过最优插值法融合两种数据 (Xie 和 Xiong, 2011)。由于在融合过程中受到站点密度的影响，该数据集在地面站点分布稀疏的 II 区西南部、III 区大部分区

域以及冬季部分自动站不工作的 II 区东北部地区存在部分缺陷，会给评估带来一定的不确定性 (研究区自动站点分布如图 1 所示，审图号为 GS (2021) 3039)。但该产品总体误差控制在 10% 之内，在研究区的表现明显优于国际上其他同类产品 (沈艳等, 2013)，并广泛应用于各类卫星降水产品在研究区的精度评估 (Chen 等, 2020; Su 等, 2018; 岁康和雍斌, 2019)。



审图号:GS(2021)3039

图1 研究区极端日降水阈值空间分布及自动气象站点分布(2015-01—2018-12)

Fig. 1 Spatial distribution of extreme daily precipitation threshold and distribution of automatic weather stations in study area (2015-01—2018-12)

### 2.3 卫星降水数据

本文采用GPM计划的IMERG (IMERG\_Early、IMERG\_Late) 与GSMaP (GSMaP\_NRT、GSMaP\_MVK) 系列纯卫星降水产品。

IMERG是GPM计划下多卫星反演降水数据，该产品结合GPM卫星群提供的红外数据与被动微波数据，借鉴了TRMM时代成熟的卫星反演算法 (de Sousa Neto 和 Barbosa, 2012)：(1) 根据云移动矢量法生成的云移动矢量场通过拉格朗日插值算法对微波数据进行插值；(2) 根据微波数据建立微波与降水强度的关系；(3) 利用卡尔曼滤波算法对插值后的微波数据与红外数据进行融合处理，生成IMERG-Early降水数据；(4) 加入后向传播数据之后，重复以上步骤生成IMERG-Late降水数据。由于IMERG降水数据的时间分辨率为0.5 h，故将数据的时间分辨率重采样处理为与地面参考数据相同 (1 h)。

GSMaP是GPM计划下另一套由日本宇航局负责研发的高分辨率全球降水产品。GSMaP\_NRT采用基于标准算法的简化算法，为保证降水数据的可操作性和降低数据延迟，在操作过程中进行一定程度的简化：(1) 选择日本气象局的预测数据作为大气信息；(2) 选择多源卫星和站点数据融合的全球日海面温度数据作为海洋表面信息；(3) 微波红外融合模块只使用滞时前向云移动。GSMaP\_MVK算法基于由连续的红外图像生成全球的大气传播运动矢量场，利用卡尔曼滤波模型改进近实时降水数据 (Ushio等, 2009)。

### 2.4 精度评估方法

本文为定量研究卫星降水在极端降水中的表现采用了5种评价指标，其中包括：(1) 相关系数CC (Correlation Coefficient) 用于量化卫星降水数据与实测数据之间的线性相关程度，最优值为1；(2) 均方根误差RMSE (Root Mean Square Error)

用于量化卫星降水数据与实测数据之间的离散程度，最优值为0；(3) 相对偏差BIAS (Relative Bias) 用于反映卫星降水数据与实测数据之间的偏差程度，最优值为0；(4) 命中率POD (Probability of detection) 用于反映卫星对极端降水事件的捕捉能力；(5) 误报率FAR (False Alarm Ratio) 用于反映卫星降水对极端降水事件的错误估计的概率，极端降水阈值取该格网时间序列中的第95百分位数。各指标计算方式如表1。

表1 评估指标计算公式

Table 1 Evaluation index calculation method

评价指标	计算方法
相关系数(CC)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$
均方根误差(RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$
相对偏差(BIAS)	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$
命中率(POD)	$POD = \frac{H}{H + M} \times 100\%$
误报率(FAR)	$FAR = \frac{F}{H + F} \times 100\%$

注:  $n$  为样本数量;  $S_i$  为卫星降水;  $G_i$  为地面降水;  $\bar{S}$  为卫星降水平均值;  $\bar{G}$  为地面降水平均值;  $H$  为卫星命中降水数量;  $M$  为卫星漏报降水数量,  $F$  为卫星误报降水数量。

采用世界气象组织WMO (World Meteorological Organization) 在世界气候研究计划WCRP (World Climate Research Programme) 项目中定制的极端降水指标RX1day来代表每月中对社会影响较大的极端降水事件, 以及选择R95pTOT定量分析极端降水事件中可被评估的降水总量 (表2)。

表2 降水类极端气候指数定义

Table 2 Definition of precipitation extreme climate index

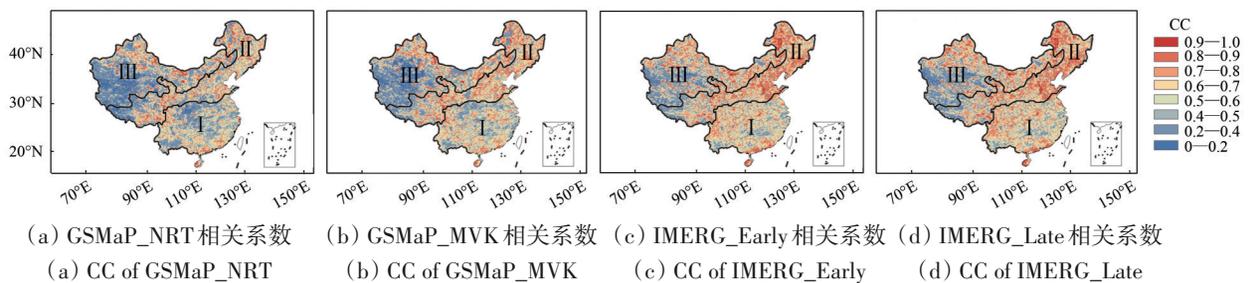
代号	定义	描述	单位
RX1day	Maximum 1-day precipitation	每月内日最大降水量	mm
R95pTOT	Annual total precipitation when >95 percentile	时间序列内日降水量>95百分位值的总降水量	mm

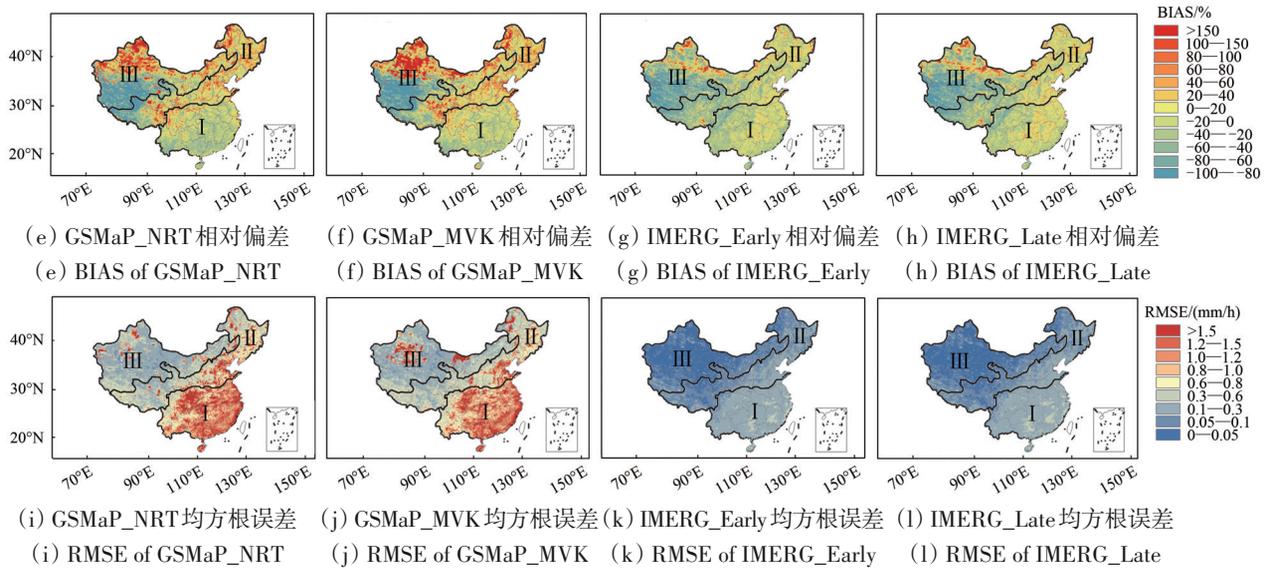
注: 指数来源于网址 ([https://www.climdex.org/learn/indices/\[2020-07-29\]](https://www.climdex.org/learn/indices/[2020-07-29]))。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 极端降水指标精度分析

图2结果表明IMERG、GSMaP卫星产品RX1day指标在研究区具有相似的空间分布。各卫星数据均在II区东北部表现较好, 具有较高的相关系数, 普遍在0.6以上, 在其余地区相关系数较低。在I区、III区青藏高原地区呈现低估状态, 而在II区青藏高原东部、III区天山山脉及内蒙古高原北部存在明显高估现象。由此可见, IMERG、GSMaP数据对于RX1day在高雨强地区 (I区) 与复杂地形区域 (III区) 均存在低估现象 (相对偏差BIAS<-20%); 在受季风气候影响的复杂地形区域 (青藏高原东部受印度洋季风影响; 天山山脉区域受大西洋季风影响; 内蒙古北部受西伯利亚季风影响) 则存在明显的高估现象 (BIAS>100%)。另一方面, IMERG纯卫星降水产品的表现明显优于GSMaP的纯卫星降水产品, 其在III区青藏高原东部以及西北部地区的高估现象相比GSMaP有明显的改善以及在I区的低估现象明显提高, 均方根误差RMSE较小, 其中IMERG\_Late降水数据表现最佳。





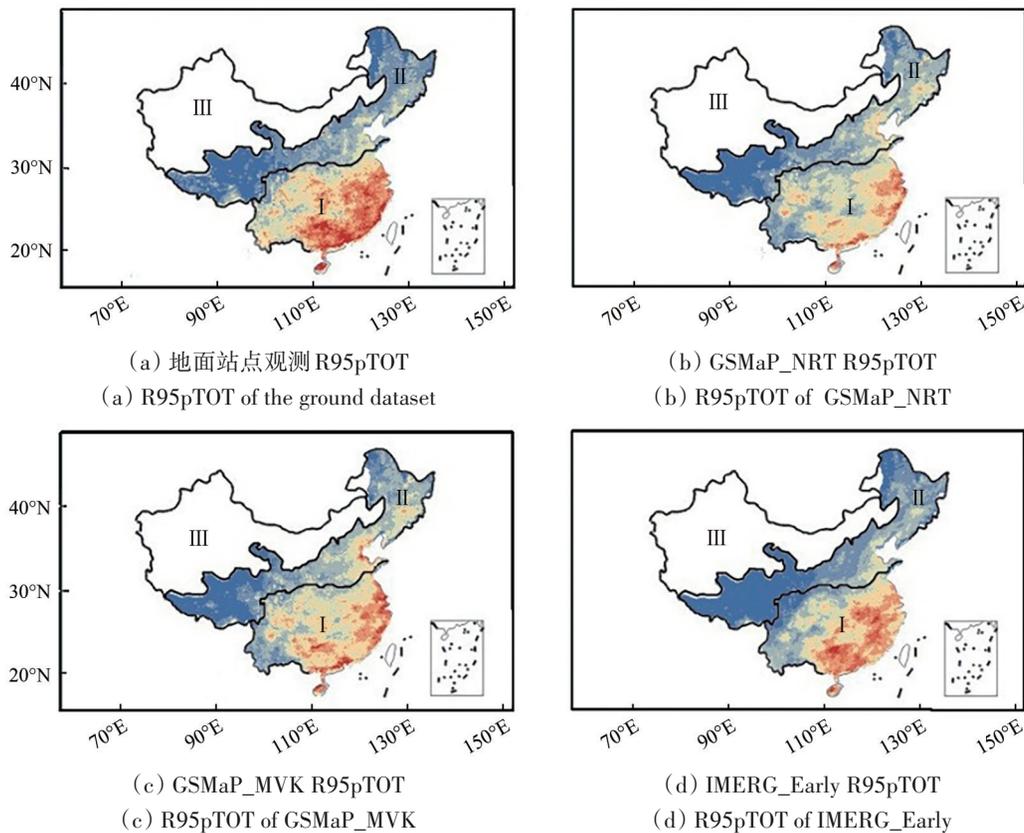
审图号:GS(2021)3039

图2 IMERG与GSMaP卫星降水数据RX1极端降水指标空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of extreme precipitation index RX1 from IMERG and GSMaP satellite precipitation data

图3给出了研究区极端降水事件频率较高的分区(I区、II区)R95pTOT指数的空间分布。结果表明,研究区东部的R95pTOT指数空间分布与该区域的降水空间分布特征相似,极端降水量主要集中在I区,并由东南沿海(R95pTOT>3500 mm)至西北内陆(R95pTOT<750 mm)方向

递减。IMERG、GSMaP卫星降水数据的空间分布均与地面参考数据相似,但I区、II区都存在不同程度的低估现象。IMERG\_Late与GSMaP\_MVK分别比IMERG\_Early和GSMaP\_NRT在I区华南地区的低估有所改善。总体上,IMERG的两套产品表现优于GSMaP。



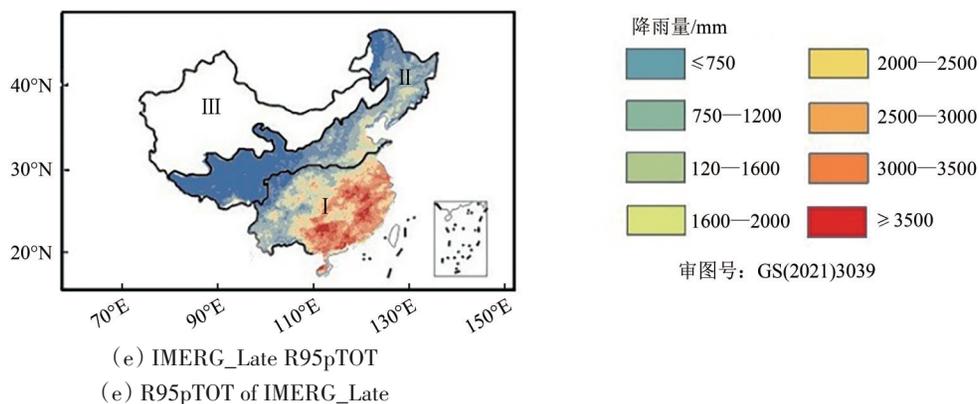


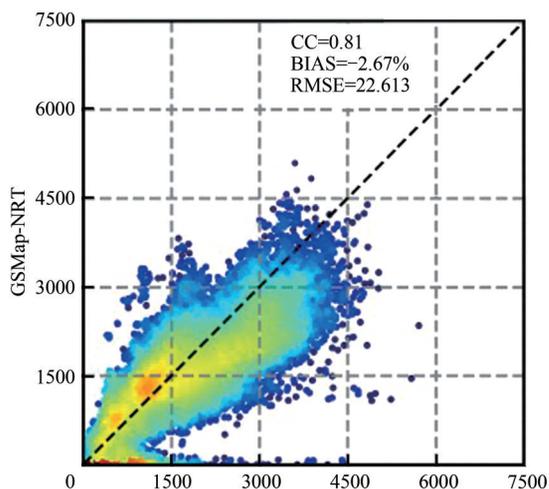
图3 IMERG与GSMaP卫星降水数据R95pTOT极端降水指标空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of extreme precipitation index R95pTOT from IMERG and GSMaP satellite precipitation data

图4给出了GSMaP与IMERG纯卫星降水产品R95pTOT散点图以及相关量化指标,可以看出与上述分析基本一致。由于各精度指标对卫星异常高估与低估降水值十分敏感,累计极端降水量会减少异常偏差造成的严重影响,故4种卫星降水产品对于R95pTOT指数在I区、II区的各评估指标表现较好。各卫星产品相较于实际极端降水量均处于低估状态,但具有较高的相关性( $CC > 0.8$ )。IMERG数据对于R95pTOT指标的表现总体上优于GSMaP数据,其中IMERG\_Late数据表现最好( $CC=0.91$ ,  $RMSE=16.638$  mm/h,  $BIAS=-2.32\%$ )。GSMaP\_NRT和GSMaP\_MVK虽然相对偏差BIAS较小分别为 $-2.67\%$ 和 $-2.56\%$ ,但与IMERG相比,存在更严重的均方根误差RMSE,造成这一现象主要是由于其在极端降水量区间(1500—3000 mm)存在的异常高估值较多,与研究区整体的低估现象相互抵消。

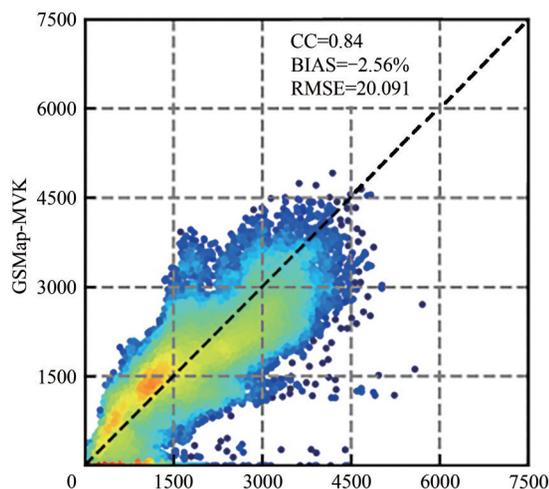
### 3.2 极端降水事件的探测能力分析

图5给出了4套卫星降水产品对于极端日降水事件命中率与误报率的空间分布,结果表明:在对极端降水探测能力方面,4套卫星数据的整体空间分布特征相似,但区域性空间特征存在差别。各产品对于极端降水事件命中率在东北地区( $POD > 80\%$ )表现明显优于西南地区( $POD < 50\%$ ),大致为由东北地区向西南方向递减。IMERG在I区具有较高的极端降水事件命中率POD与误报率FAR, GSMaP在I区虽命中率略低于IMERG,但对于极端降水事件误报率显著下降; IMERG、GSMaP数据均在II区西南部分区域表现较差,具有较低的命中率POD与较高的误报率FAR,由于GSMaP产品在II区西南部分区域存在高估现象,导致其低命中率区域较IMERG有明显改善。且GSMaP在II区东北部极端降水的监测表现也优于IMERG,主要表现在降低了误报率FAR。



(a) GSMaP\_NRT散点图及精度指标

(a) The index of GSMaP\_NRT



(b) GSMaP\_MVK散点图及精度指标

(b) The index of GSMaP\_MVK

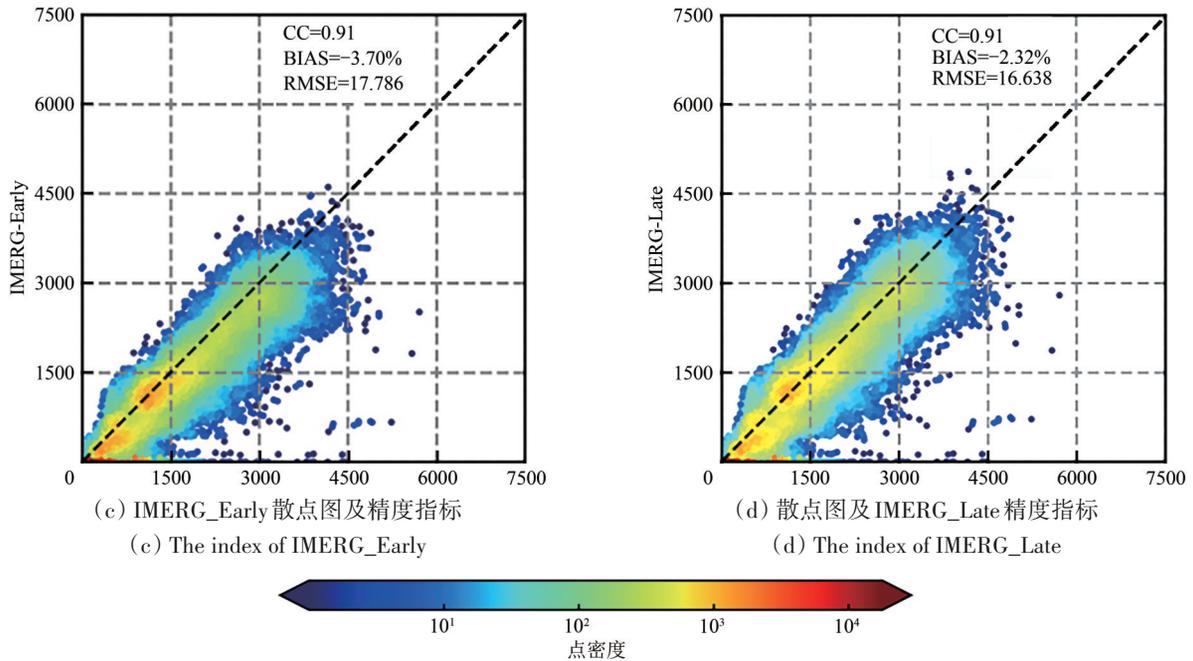
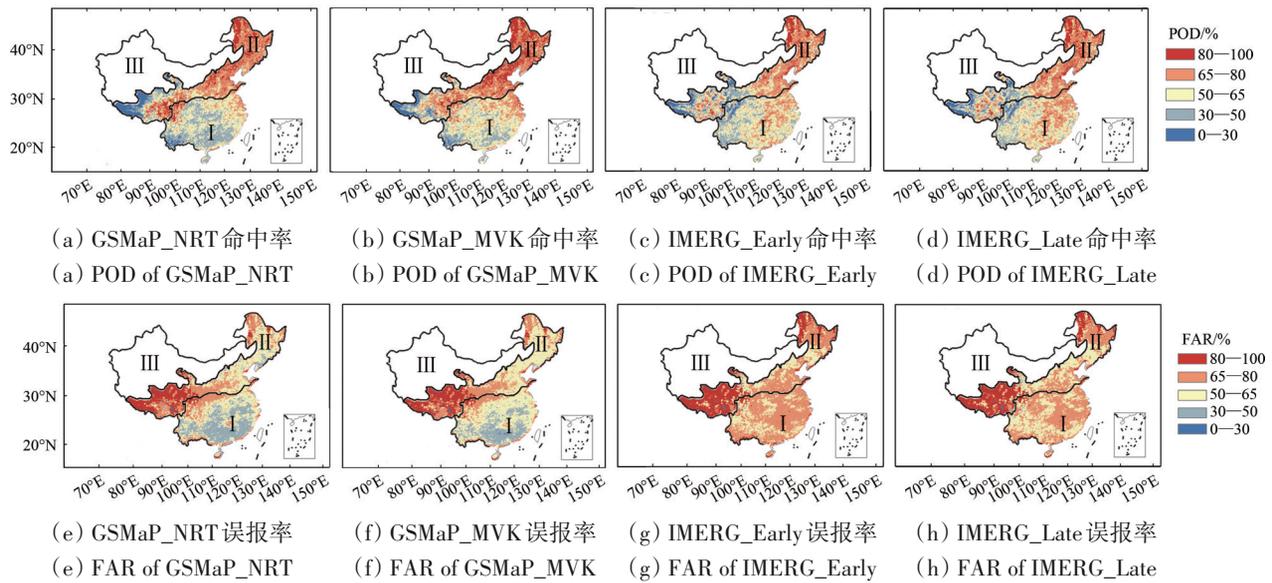


图4 IMERG 与 GSMaP 卫星降水数据与地面降水之间 R95pTOT 指标对比散点图及各精度指标

Fig. 4 Scatter plot of R95pTOT index comparison between satellite precipitation data and reference precipitation and each precision index



审图号:GS(2021)3039

图5 IMERG 与 GSMaP 卫星降水数据的 POD、FAR 指标空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of POD and FAR indices of IMERG and GSMaP precipitation data

综上所述，从极端降水命中率的空间分布来看，4种卫星降水数据仅在Ⅱ区东北区域命中率较高，造成其余地区命中率偏低的原因可能为：Ⅰ区华南地区的极端降水阈值较高 (>10 mm)，而卫星降水数据对于高雨强的极端降水事件的捕捉监测能力存在极大的缺陷 (任英杰 等, 2019)；Ⅱ区西部地形复杂，精确反演这类地形的降水数据仍然是目前各类卫星传感器面临的一个挑战，地面降水数据在此区域也具有较大的不确定性。

为更加深入地了解各卫星降水产品的极端降水探测能力季节性变化情况，选取了时间序列中的降水数据将其分为逐年季节进行计算 POD、FAR (图6)。结果表明：POD 指标在时间上具有较强的季节特性，4种降水数据均在夏秋两季具有较高的命中率，POD 普遍高于 60%，而在秋冬两季的表现相对较差 (POD<50%)。这4种纯卫星降水产品中，GSMaP\_MVK 在夏秋两季的命中率与整体的误报率优于其余卫星降水产品，可能由于

GSMaP数据在夏秋季的高估状态 (Tian等, 2010) 与在高雨强的整体低估状态相互抵消。GSMaP数据在GSMaP\_NRT基础上融合红外传感器数据进行卡尔曼滤波后命中率有明显的提升, 而IMERG\_Late加入后向传播数据对极端降水命中并无明显改进。

### 3.3 极端降水事件精度评估

对极端降水的研究应该涵盖极端日降水和极端降水过程两个方面, 研究任一方面都有其局限性 (邹用昌等, 2009)。所以本文选择地面参考格网数据在时间序列 (2015-01—2018-12) 中降水量最大的一天作为极端日降水, 选择连续降水量最大的5 d作为极端降水过程, 来代表对社会带来重大影响的不同历时的极端降水事件。图7、图8给出了4套IMERG、GSMaP卫星降水产品在极端日降水与极端降水过程中降水强度的空间分布, 4种卫星降水数据在极端日降水与极端降水过程中表现出的降水强度空间分布与地面参考数据相似, 如图7 (a) 所示, 在I区极端日降水事件降水强度较大 (>75 mm/d); II区极端日降水事件降水强度大多位于50—75 mm/d; III区极端日降水事件降水强度较小, 大多小于50 mm/d, 降水强度从东南向西北方向递减。极端降水过程的空间分布特征与极端日降水的空间分布相似, 不过降水强度相对较小。总体上, 4种卫星降水数据在大部分区

域呈低估状态, 明显的低估区域主要集中在I区大部分区域、II区的沿海部分区域、III区中的青藏高原地区。IMERG相较于GSMaP在I区的低估现象以及II区的部分山区的高估现象有显著改善, 与地面参考数据更为接近。

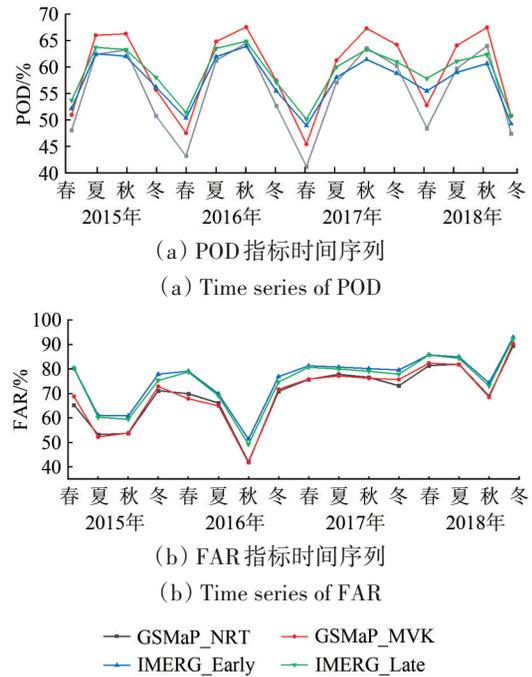
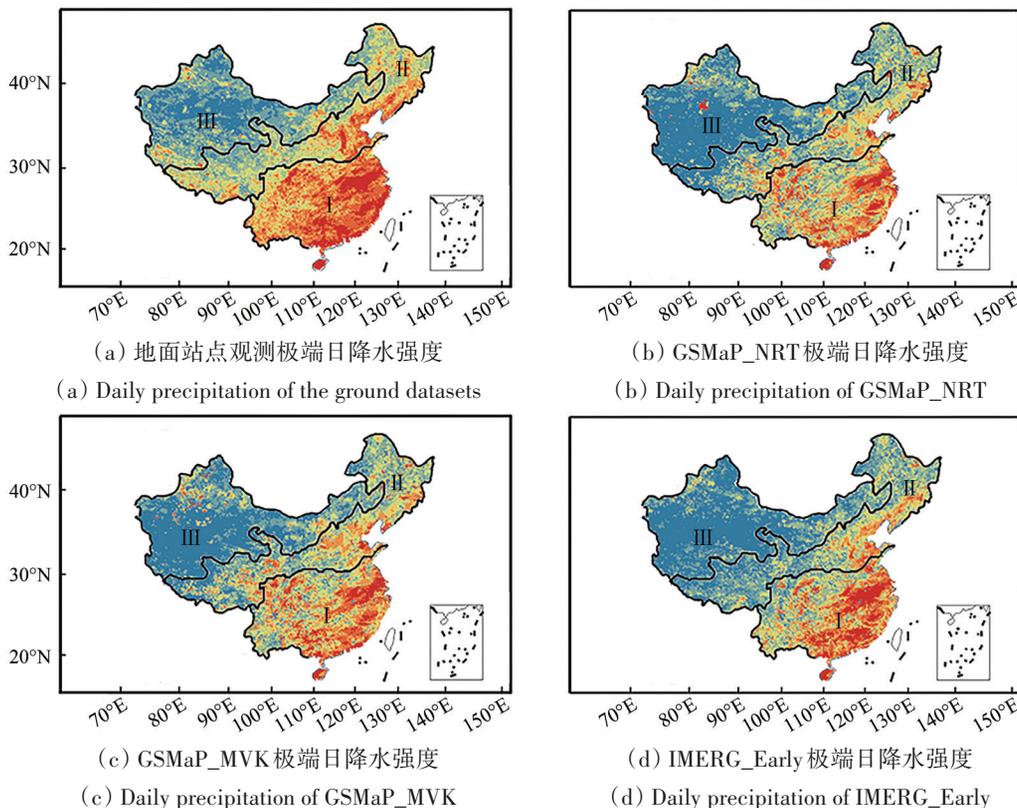


图6 IMERG与GSMaP卫星降水产品的POD、FAR指标时间序列(2015-01—2018-12)  
Fig. 6 Time series of POD and FAR indices of IMERG and GSMaP precipitation products (2015-01—2018-12)



(a) 地面站点观测极端日降水强度  
(a) Daily precipitation of the ground datasets  
(c) GSMaP\_MVK极端日降水强度  
(c) Daily precipitation of GSMaP\_MVK

(b) GSMaP\_NRT极端日降水强度  
(b) Daily precipitation of GSMaP\_NRT  
(d) IMERG\_Early极端日降水强度  
(d) Daily precipitation of IMERG\_Early

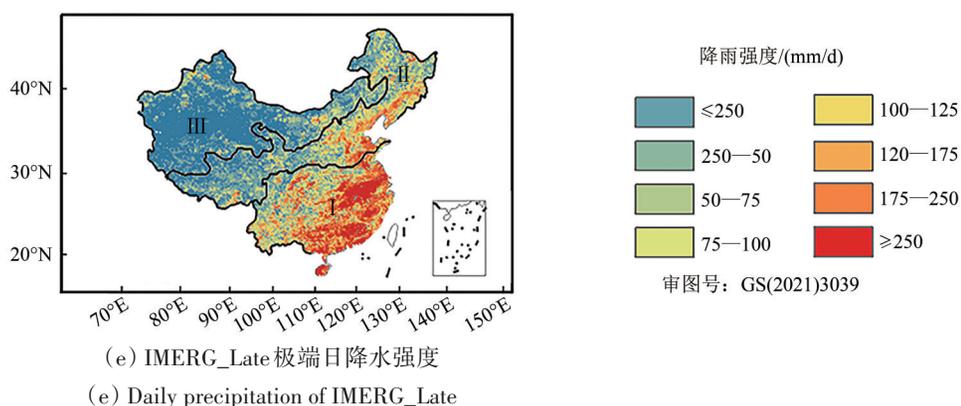


图7 IMERG 与 GSMaP 卫星降水数据极端日降水降水强度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of extreme daily precipitation intensity based on satellite precipitation data

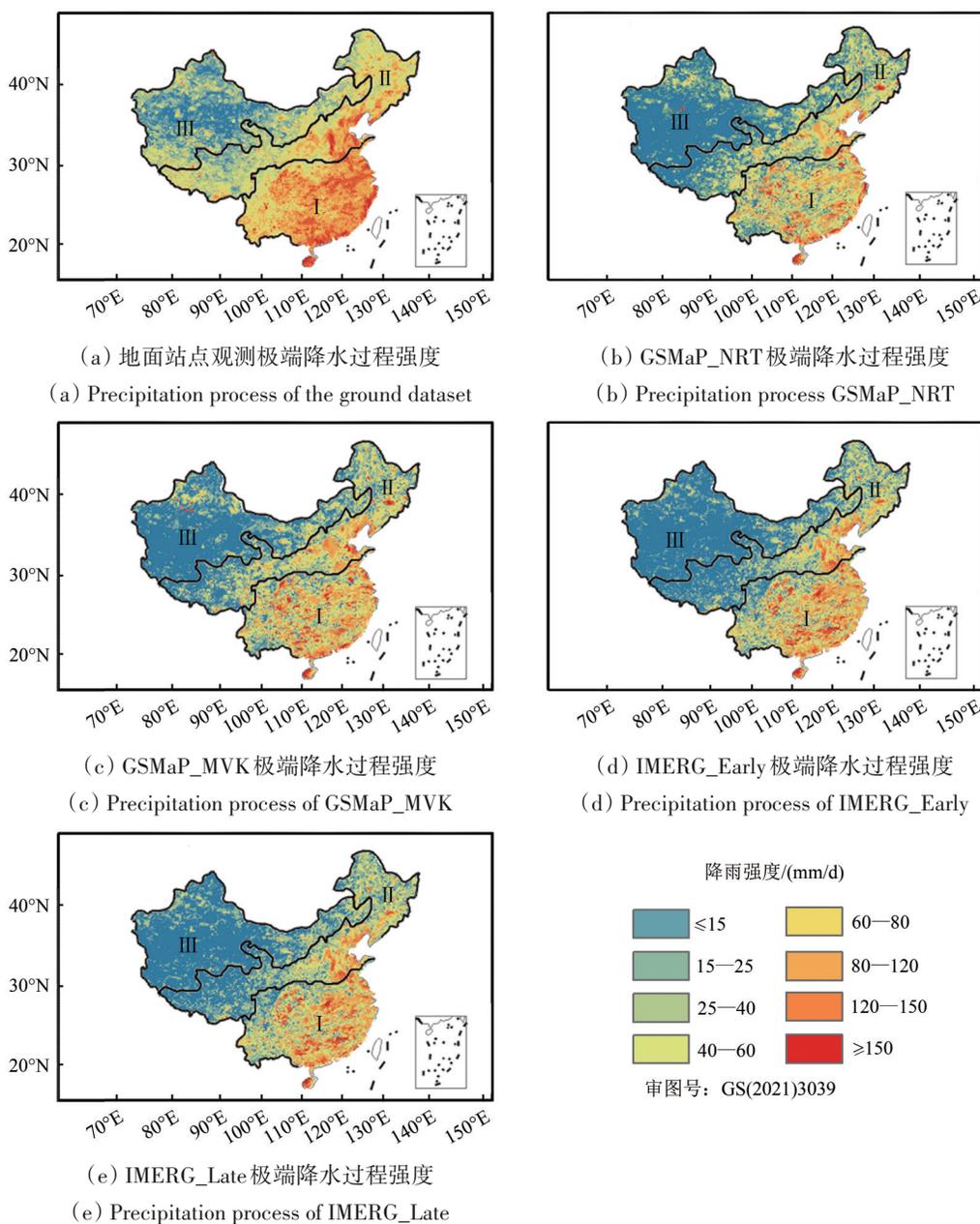


图8 IMERG 与 GSMaP 卫星降水数据极端降水过程降水强度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of precipitation intensity in extreme precipitation process

结合卫星降水数据在不同分区上的误差统计指标(表3),分析发现各卫星降水产品在不同分区的相对偏差BIAS皆小于0,说明4种卫星降水数据相对于实际降水处于低估状态,低估现象在I区相较于其他地区最为严重。极端日降水中,各卫星数据在III区的表现优于其他地区,与卫星降水在复杂地形反演精度较低相矛盾,其原因可能为

在其他区域的降水强度相对较高,卫星降水产品在高雨强区域下的误差显著性十分明显,远远高于复杂地形对卫星降水反演精度的影响。而在极端降水过程中,卫星降水在I区的相关系数最高,但由于该区域降水强度较大,导致其RMSE整体高于其余地区。

表3 卫星降水产品在不同区域上误差评估指数统计

Table 3 Error evaluation index statistics of satellite precipitation products in different regions of study area

区域	产品	极端日降水			极端降水过程		
		CC	BIAS/%	RMSE/(mm/h)	CC	BIAS/%	RMSE/(mm/h)
I 区	GSMaP_NRT	0.520	-4.46	3.24	0.614	-3.72	0.97
	GSMaP_MVK	0.561	-3.59	3.13	0.662	-3.02	0.93
	IMERG_Early	0.657	-3.83	2.98	0.736	-2.68	0.90
	IMERG_Late	0.670	-3.22	2.87	0.742	-2.12	0.88
II 区	GSMaP_NRT	0.533	-3.06	2.30	0.620	-1.92	0.58
	GSMaP_MVK	0.570	-2.60	2.13	0.667	-1.56	0.57
	IMERG_Early	0.662	-3.65	1.88	0.738	-2.67	0.52
	IMERG_Late	0.675	-3.15	1.82	0.745	-2.23	0.50
III 区	GSMaP_NRT	0.568	-1.43	1.23	0.643	-0.73	0.49
	GSMaP_MVK	0.598	-1.39	1.17	0.685	-0.76	0.36
	IMERG_Early	0.677	-2.40	1.10	0.746	-1.67	0.33
	IMERG_Late	0.689	-2.22	1.08	0.753	-1.44	0.33

为了更加直观地对比各卫星降水产品监测极端降水事件的精度与误差,展示了卫星数据与地面参考数据之间降水强度在研究区的散点图(图9、图10),散点对比情况解释了表2中相对偏差BIAS与其余精度指标中存在的矛盾,即IMERG数据低估状态相较于GSMaP数据更加明显,但在CC、RMSE指数的表现皆优于GSMaP。而导致这一矛盾主要是由于GSMaP数据在部分降水强度区间(极端日降水位于100—200 mm/d、极端降水过程位于30—50 mm/d)出现大量异常高估的降水值,与整体上的低估降水值产生正负抵消的现象。从研究区的整体精度指标来看,IMERG卫星数据在极端降水事件上的表现优于GSMaP;IMERG\_Late降水数据与GSMaP\_MVK降水数据分别在IMERG\_Early、GSMaP\_NRT基础上有所改善;其中IMERG\_Late数据表现最好,但在极端降水事件上的低估现象并未有效解决,还需进一步完善。

### 3.4 讨论

研究结果显示,IMERG、GSMaP各卫星降水

产品受地形、降水强度、反演算法等因素的影响,表现出相似的误差特征与明显的精度差异。对于相似误差特性的订正将是未来极端降水反演工作的重点与方向,对精度差异的讨论可为降水卫星反演算法的改进提供参考。

各卫星共同的误差特性主要表现为:高雨强地区显著的低估现象(图2:BIAS<-20%)与复杂地形区域的高估现象(图2:BIAS>100%)。造成这一误差特性的原因可能为目前微波红外卫星降水遥感反演原理的局限性。降水卫星在被动微波遥感中,通过云顶微波亮度与降水强度之间的定量关系推测降水量(Wilheit等,2003),云顶微波亮温随着降水强度增加而增加,并逐渐趋于稳定,导致在极端降水中无法建立微波亮度与降水强度间的关系(Wilheit等,1994),并且地面的微波发射率随地表复杂度变化波动范围较大,加大了陆地降水的反演难度。降水卫星红外传感器利用该波段获取到的云顶温度数据,根据云顶温度与降水强度负相关性,建立云顶红外亮温与降水强度

之间的关系 (Prigent, 2010)。而台风雨与地形雨的降水特性并不符合该降水反演方法的基本假设条件 (Kidd, 2010), 故遥感卫星对于台风雨带来的强降水与复杂地形区域的地形雨估算精度要低

得多。未来降水反演工作可以从锋面雨、地形雨等降水特性出发, 针对不同降水类型建立亮度与降水强度之间的关系。

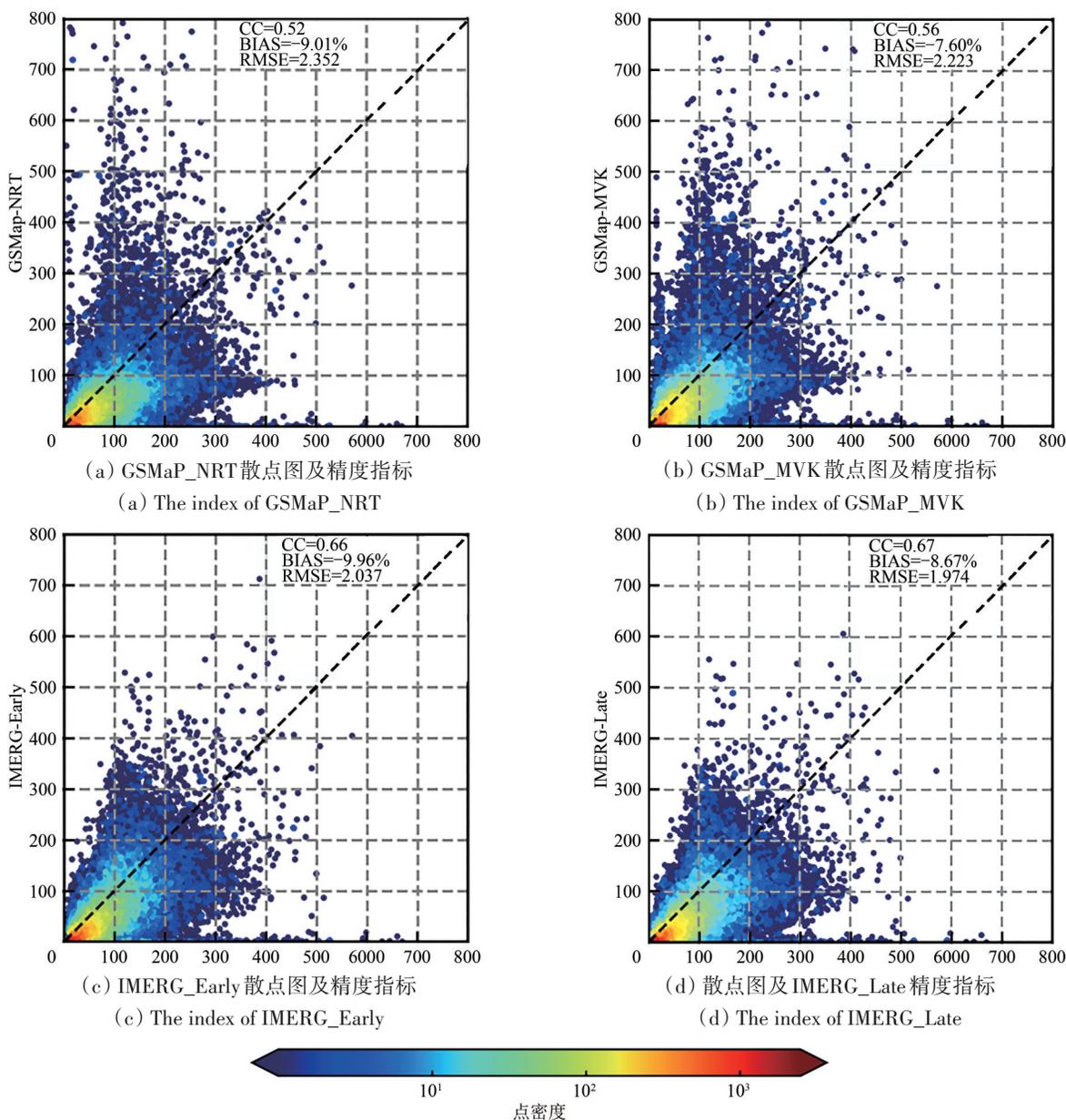


图9 IMERG与GSMaP卫星降水数据与地面降水之间极端日降水对比散点图及各精度指标

Fig. 9 Scatter chart of extreme daily precipitation comparison between satellite precipitation data and reference precipitation and its accuracy indexes

4种卫星产品在I区南部的精度差异, 可能是由其红外与微波数据融合算法上的差别造成的。GSMaP反演算法利用红外数据对微波推算出的降水数据进行适当性的卡尔曼滤波校正, 而IMERG数据则首先通过根据红外数据的位移矢量判断其微波数据是否需要利用红外数据进行卡尔曼滤波校正 (Huffman等, 2014)。故GSMaP相较于IMERG数据在该区域的极端降水量进行更多的平滑运算,

导致其在I区南部低估现象更为严重 (表3: GSMaP\_MVK的BIAS为-3.59%; IMERG\_Late的BIAS为-3.22%), 但也具有更小的极端降水误报率 (图5: GSMaP的FAR为30%—65%; IMERG的FAR为50%—80%)。在没有微波覆盖的区域 (>50°N/S) 都统一使用红外数据推算出的降水强度替代微波数据, 这也解释了4种卫星各误差指标在II区北部区域 (>50°N) 具有十分相似的空间分布。

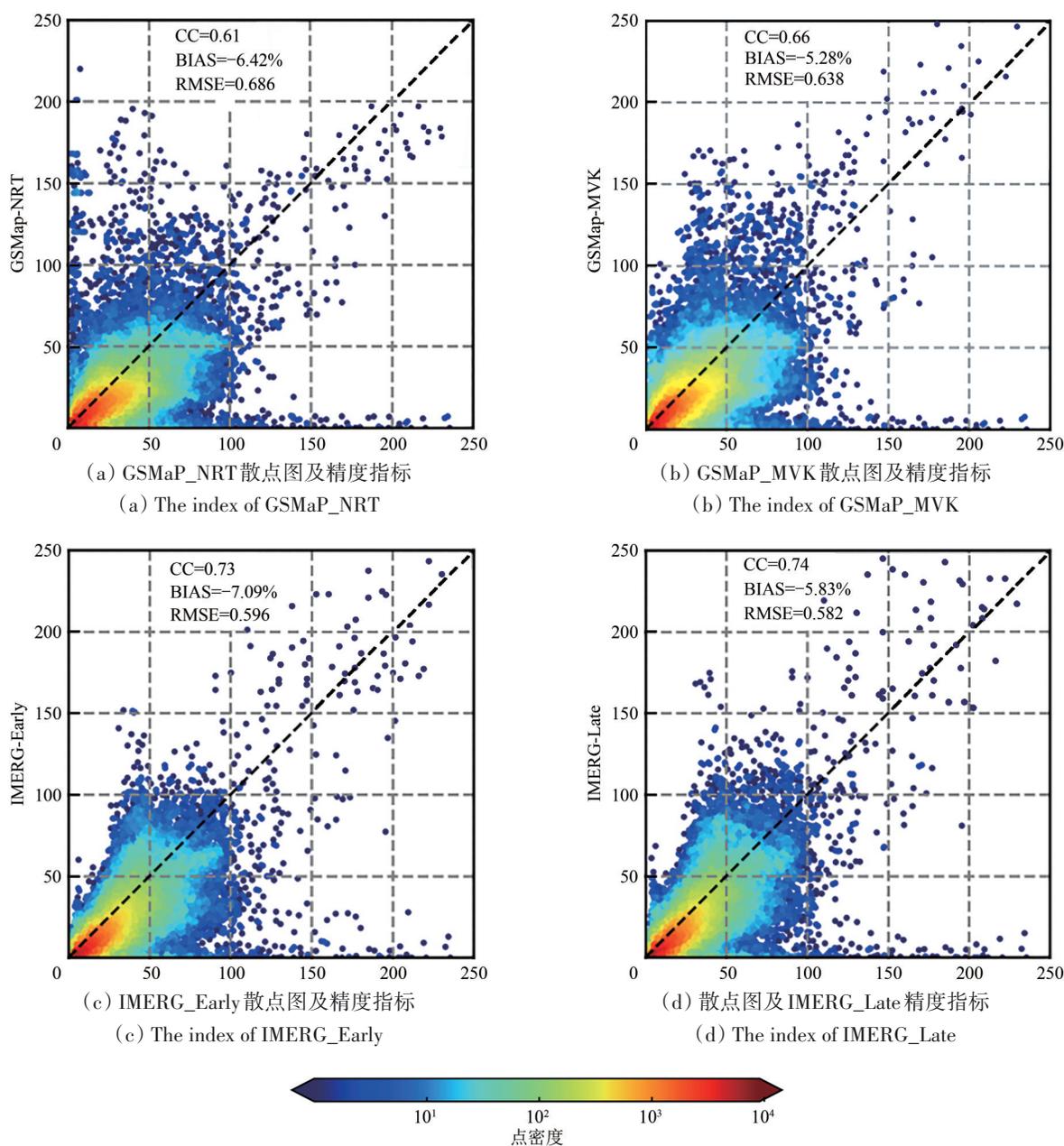


图10 IMERG 与 GSMaP 卫星降水数据与地面降水之间极端降水过程对比散点图及各精度指标

Fig. 10 Scatter chart of extreme precipitation process comparison between satellite precipitation data and reference precipitation and its accuracy indexes

## 4 结论

基于自动站与CMORPH融合降水数据集,采用多种评价指标综合评估IMERG和GSMaP纯卫星降水产品,在降水指标、极端降水事件探测能力、对于不同历时的极端降水事件精度评估3个方面在研究区对极端降水监测能力进行研究,结论为:

(1) 通过RX1与R95pTOT极端降水指标验证了卫星降水数据在高雨强降水呈现出低估状态,而在受季风影响的复杂地形区域呈现出严重的高

估状态。在极端降水指标中,IMERG的表现优于GSMaP数据,实际应用中建议优先使用IMERG-Late数据。

(2) 本文发现GSMaP对于极端降水事件具有更好的探测能力(略高的POD和较低FAR),但由于该产品存在较多的异常高估值,故对极端降水事件反演精度较低。卫星降水在东北区域对于极端降水事件具有较好的探测能力;卫星降水对于极端降水事件命中率具有明显的季节特性,在夏秋的表现优于冬春两季。故对于极端降水事件,

建议 GSMaP\_MVK 与 IMERG\_Late 数据协同使用, 利用 IMERG\_Late 数据监测由 GSMaP\_MVK 数据探测到的极端降水事件。

(3) 本文发现卫星降水产品对于历时较长的极端降水事件中有更高的精度。其中, IMERG\_Late 数据在极端降水事件反演中表现出一定的应用潜力, 在研究区各个区域都表现出较高的适用性, IMERG\_Late 数据相较于地面参考数据具有更小的时间分辨率 (0.5 h), 可在时间上更为准确地对极端降水事件进行监测。

(4) IMERG 和 GSMaP 纯卫星降水产品均能捕捉到研究区极端降水的空间分布, IMERG 在研究区的极端降水反演精度优于 GSMaP 数据, GSMaP\_MVK 数据在融合红外数据进行卡尔曼滤波处理之后, 精度较 GSMaP\_NRT 提升较大, 然而 IMERG\_Late 数据仅加入后向数据进行处理, 较 IMERG\_Early 数据没有明显提升。

IMERG、GSMaP 卫星降水产品对于极端降水反演误差在研究区具有明显的区域特征, 高雨强低估的误差特性表现显著, 因此卫星降水产品在研究区不同区域对于雨强的误差订正将是未来极端降水反演工作的重点与难点之一。

## 参考文献 (References)

Bai L Y and Rong Y S. 2015. Reanalysis of the characteristics of extreme rainfall in the Yangtze River basin during recent 50 years. *Journal of Water Resources Research*, 4(1): 88-100 (白路遥, 荣艳淑. 2015. 最近 50 年长江流域极端降水特征的再分析. *水资源研究*, 4(1): 88-100) [DOI: 10.12677/jwrr.2015.41011]

Chen H Q, Yong B, Shen Y, Liu J F, Hong Y and Zhang J Y. 2020. Comparison analysis of six purely satellite-derived global precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 581: 124376 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124376]

Chen S, Hong Y, Cao Q, Kirstetter P E, Gourley J J, Qi Y C, Zhang J, Howard K, Hu J J and Wang J. 2013. Performance evaluation of radar and satellite rainfalls for Typhoon Morakot over Taiwan: are remote-sensing products ready for gauge denial scenario of extreme events? *Journal of Hydrology*, 506: 4-13 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.026]

de Sousa Neto A L and Barbosa M H. 2012. Incidentes transfusionais imediatos: revisão integrativa da literatura. *Acta Paulista de Enfermagem*, 25(1): 146-150 [DOI: 10.1590/S0103-21002012000100025]

Guo R F and Liu Y B. 2015. Multi-satellite retrieval of high resolution precipitation: an overview. *Advances in Earth Science*, 30(8): 891-

903 (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. *地球科学进展*, 30(8): 891-903) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.08.0891]

Habib E, Henschke A and Adler R F. 2009. Evaluation of TMPA satellite-based research and real-time rainfall estimates during six tropical-related heavy rainfall events over Louisiana, USA. *Atmospheric Research*, 94(3): 373-388 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.06.015]

Huffman G J, Adler R F, Morrissey M M, Bolvin D T, Curtis S, Joyce R, McGavock B and Susskind J. 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1): 36-50 [DOI: 10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2]

Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, Hsu K, Joyce R and Xie P P. 2014. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). National Aeronautics and Space Administration

Kidd C. 2010. Satellite rainfall climatology: a review. *International Journal of Climatology*, 21(9): 1041-1066. [DOI: 10.1002/joc.635]

Liu G, Zhu Z W and Tan X H. 2017. Assessments of high resolution multi-satellite precipitation products on extreme storm event monitoring: a case study of typhoon "Rammasun" in 2014. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 12(4): 39-48 (刘国, 朱自伟, 谭显辉. 2017. 高分辨率遥感降水产品对强降水的监测能力评估——以 2014 年“威马逊”台风为例. *亚热带资源与环境学报*, 12(4): 39-48) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-7105.2017.04.006]

Meehl G A, Karl T, Easterling D R, Changnon S, Pielke R, Changnon D, Evans J, Groisman P Y, Knutson T R, Kunkel K E, Mearns L O, Parmesan C, Pulwarty R, Root T, Sylves R T, Whetton P and Zwiers F. 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events: observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3): 413-416 [DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<0413:AITTIE>2.3.CO; 2]

Prakash S, Mitra A K, Pai D S and AghaKouchak A. 2016. From TRMM to GPM: how well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 88: 1-7 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.11.008]

Prigent C. 2010. Precipitation retrieval from space: an overview. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(4/5): 380-389 [DOI: 10.1016/j.crte.2010.01.004]

Qian W H, Fu J L, Zhang W W and Lin X. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years. *Advances in Earth Science*, 22(7): 673-684 (钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 林祥. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述. *地球科学进展*, 22(7): 673-684) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2007.07.003]

- Ren Y J, Yong B, Lu D K and Chen H Q. 2019. Evaluation of the Integrated Multi-satellite Retrievals (IMERG) for Global Precipitation Measurement (GPM) mission over the mainland china at multiple scales. *Journal of Lake Sciences*, 31(2): 560-572 (任英杰, 雍斌, 鹿德凯, 陈汉清. 2019. 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估. *湖泊科学*, 31(2): 560-572) [DOI: 10.18307/2019.0224]
- Shen Y, Pan Y, Yu J J, Zhao P and Zhou Z J. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 36(1): 37-46 (沈艳, 潘咏, 宇婧婧, 赵平, 周自江. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估. *大气科学学报*, 36(1): 37-46) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.005]
- Shen Y, Zhao P, Pan Y and Yu J J. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. *Journal of Geophysical Research*, 119(6): 3063-3075 [DOI: 10.1002/2013JD020686]
- Skofronick-Jackson G, Petersen W A, Berg W, Kidd C, Stocker E F, Kirschbaum D B, Kakar R, Braun S A, Huffman G J, Iguchi T, Kirstetter P E, Kummerow C, Meneghini R, Oki R, Olson W S, Takayabu Y N, Furukawa K and Wilheit T. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1679-1695 [DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00306.1]
- Su J B, Lü H S, Zhu Y H, Wang X Y and Wei G H. 2018. Component analysis of errors in four GPM-based precipitation estimations over mainland China. *Remote Sensing*, 10(9): 1420. [DOI: 10.3390/rs10091420]
- Tang G Q, Zeng Z Y, Long D, Guo X L, Yong B, Zhang W H and Hong Y. 2016. 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? *Journal of Hydrometeorology*, 17(1): 121-137 [DOI: 10.1175/JHM-D-15-0059.1]
- Tian Y D, Peters-Lidard C D, Adler R F, Kubota T and Ushio T. 2010. Evaluation of GSMaP Precipitation Estimates over the Contiguous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2): 566-574 [DOI: 10.1175/2009JHM1190.1]
- Ushio T, Sasashige K, Kubota T, Shige S, Okamoto K, Aonashi K, Inoue T, Takahashi N, Iguchi T, Kachi M, Oki R, Morimoto T and Kawasaki Z I. 2009. A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87A: 137-151 [DOI: 10.2151/jmsj.87A.137]
- Wang H L, Shao Z H, Gao T, Zou T, Liu J and Yuan H B. 2017. Extreme precipitation event over the Yellow Sea western coast: is there a trend? *Quaternary International*, 441: 1-17 [DOI: 10.1016/j.quaint.2016.08.014]
- Wang Z. 2019. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in Sichuan province from 1971 to 2018. *Open Journal of Nature Science*, 7(4): 333-348 (王真. 2019. 1971~2018年四川省极端降水指数时空变化特征. *自然科学*, 7(4): 333-348) [DOI: 10.12677/OJNS.2019.74043]
- Westra S, Alexander L V and Zwiers F W. 2013. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26(11): 3904-3918 [DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00502.1]
- Wilheit T, Adler R, Avery S, Barrett E, Bauer P, Berg W, Chang A, Ferriday J, Grody N, Goodman S, Kidd C, Kniveton D, Kummerow C, Mugnai A, Olson W, Petty G, Shibata A and Smith E. 1994. Algorithms for the retrieval of rainfall from passive microwave measurements. *Remote Sensing Reviews*, 11(1/4): 163-194 [DOI: 10.1080/02757259409532264]
- Wilheit T, Kummerow C D, Ferraro R. 2003. NASDARainfall algorithms for AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 204-214 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808312]
- Xie P P and Xiong A Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses. *Journal of Geophysical Research*, 116(21): D21106 [DOI: 10.1029/2011JD016118]
- Zeng S K and Yong B. 2019. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region. *Acta Geographica Sinica*, 74(7): 1305-1318 (曾岁康, 雍斌. 2019. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估. *地理学报*, 74(7): 1305-1318) [DOI: 10.11821/dlxb201907003]
- Zou Y C, Yang X Q, Sun X G, Tang J P, Fang J B and Liao Y F. 2009. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 45(1): 98-109 (邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 汤剑平, 房佳蓓, 廖玉芳. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异. *南京大学学报(自然科学)*, 45(1): 98-109) [DOI: 10.3321/j.issn:0469-5097.2009.01.014]

# Extreme precipitation monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of Global Precipitation Measurement (GPM) mission

DING Mingze<sup>1,2</sup>, YONG Bin<sup>1,2</sup>, YANG Zekang<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211000, China

**Abstract:** This study aims to comprehensively evaluate the four sets of pure satellite precipitation data of IMERG and GSMaP under Global Precipitation Measurement (GPM). The evaluation content is divided into three aspects: extreme precipitation index, extreme precipitation detection ability, and accuracy evaluation of extreme precipitation events with different durations.

Based on the grid data set of automatic stations and CMORPH, the study area is divided into three regions according to the threshold of extreme precipitation events. Five evaluation indexes, namely, CC, BIAS, RMSE, POD, and FAR, are used to quantitatively study the performance of satellite precipitation in extreme precipitation. The precipitation products of IMERG and GSMaP are affected by factors such as terrain, precipitation intensity, and inversion algorithm, showing similar error characteristics and obvious accuracy differences. The correction of similar error characteristics will be the focus and direction of extreme precipitation inversion in the future. The discussion of accuracy difference can provide a reference for the improvement of the precipitation satellite inversion algorithm. (1) In the RX1 extreme precipitation index, IMERG and GSMaP data are obviously overestimated in the complex terrain area affected by complex terrain and underestimated in other areas. In the R95pTOT index, four sets of satellite data perform well and have a high correlation with ground-based datasets. (2) In terms of detection capability of extreme precipitation events, the performance of four pure satellite products in Northeast China is better than that of other regions. GSMaP performs better than does IMERG data with a lower false alarm rate, but the retrieval accuracy for extreme precipitation is low. (3) In the accuracy evaluation of extreme precipitation events with different durations, IMERG and GSMaP satellite precipitation products have better performance and higher precision in long-term extreme precipitation events. For extreme daily precipitation events, the error of satellite precipitation products under high rain intensity is very obvious, which is much higher than that of complex terrain on the accuracy of satellite precipitation retrieval, resulting in the performance of satellite precipitation in complex terrain area III is better than other regions. Overall, the IMERG products have the better ability to monitor extreme precipitation in the study area than GSMaP products, and IMERG\_Late data performs best. The retrieval error of extreme precipitation from IMERG and GSMaP satellite precipitation products has obvious regional characteristics in China, and the error characteristic of underestimation of high rainfall intensity is significant. The four types of satellite precipitation products can show the extreme precipitation region characteristics in study area but underestimate the precipitation in most parts of the study area. The error correction of satellite precipitation products for rainfall intensity remains one of the key and difficult points in future extreme precipitation retrieval.

**Key words:** remote sensing, IMERG, GSMaP, satellite precipitation, extreme precipitation, GPM, error characteristics

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFA0605402); National Natural Science Foundation of China (No. 51979073)