

卫星反演降水在华北极端降水监测中的适用性评估*

陈双 陈涛 符娇兰 谌芸

国家气象中心, 北京 100081

摘要

基于 2000–2023 年中国气象局国家基本站降水量日值资料, 从极端降水指标统计、极端强降水事件分析等角度, 对三种常用卫星反演降水日值产品在华北地区夏季极端降水监测分析中的适用性特征进行了评估, 结果表明: 1) GSMaP_GNRT6 倾向低估降水, 尤其在山前区域低估明显, IMERG 则倾向高估降水, 尤其在山东半岛高估明显, 且以 IMERG_V6L 高估更显著; 2) 降水量、降水强度指数普遍在高原平原过渡区相关性高于其他区域, 强降水频次指数则在降水较多区域相关性高于降水较少区域, GSMaP_GNRT6 三类指数普遍出现低估, IMERG 则对降水量指数出现高估、降水频次和降水强度指数出现低估; 3) 卫星反演降水能捕捉到极端降水日, 但绝对强度普遍显著偏弱, 利用百分位和 TOP 值等相对阈值, 其能反映降水极端性的空间分布, 但范围偏大, 尤以 GSMaP_GNRT6 偏大最明显, IMERG_V6L 表现最好, 但较 IMERG_V6E 优势不明显。总体来看, GSMaP 和 IMERG 在华北极端降水监测分析具备一定应用前景。

关键词: 卫星反演降水; GPM; 极端降水; 监测分析; 适用性特征

文章编号 2024085B

中图分类号

文献标识码

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2412.24085

1 引言

降水是全球水循环的重要组成部分, 对人类社会经济生活有着十分重要的影响。强降水的发生, 常伴有洪涝灾害, 易造成大量财产损失和人员伤亡, 而降水的严重不足, 则会引起气象干旱 (Tashima, et al, 2020)。加强降水监测分析, 对提升降水相关灾害天气的预报预警能力进而减轻其带来的社会影响十分重要。

卫星遥感由于其覆盖面广、连续性好, 逐渐成为人们获取降水资料的一种重要手段。近些年来, 研究人员发展了一系列卫星遥感降水反演产品, 其中包括 TRMM (Kummerow C et al,

收稿日期 2024-08-12 网络预出版日期

* 资助课题: 风云卫星应用先行计划 (FY-APP-2022.0101)

作者简介: 陈双, 主要从事暴雨 (雪) 天气机理分析及监测预报技术研究。E-mail: schen520@live.cn

通讯作者: 陈涛, 从事定量降水预报与中尺度对流系统诊断分析工作。E-mail: chentao@cma.gov.cn

27 1998)、TMPA(Huffman, et al, 2010)、CMORPH(Joyce, et al, 2004)、PERSIANN(Sorooshian,
28 et al, 2000)以及基于全球降水观测(Global Precipitation Measurement, GPM)的IMERG
29 (Huffman et al. 2019)和GSMaP(Shige S et al, 2009)等,这些产品在全球降水监测
30 分析中发挥了重要作用。作为GPM衍生的两款主流产品,IMERG和GSMaP采用融合星载被动
31 微波、红外、星载降水雷达等多种传感器数据源的新一代多卫星遥感反演降水技术(Shige S
32 et al, 2009; Draper D W et al, 2015; Huffman et al. 2019),可为用户提供高质量、
33 高时空分辨率(半小时和 0.1°)、高覆盖范围(准全球)的降水资料,在天气、气候、水
34 文、生态等领域取得了广泛应用(Kidd C and Levizzani V, 2011; 陈晓宏等, 2017; Naud C
35 M et al, 2020)。由于被动微波及红外传感器对特定区域有着其自身的探测局限性,以及
36 多传感器反演降水融合分析过程中伴有的误差等多方面原因(Tan et al, 2016),卫星反
37 演降水产品几乎不可避免存在误差,且误差特征往往呈现一定地域差异,一定程度上限制了
38 其实用性的发挥。为此,研究人员对GPM反演降水产品的误差特征开展了大量分析工作(廖
39 荣伟等, 2015; Prakash, et al, 2018; 陈爱军等, 2018; Trinh-Tuan et al, 2019),揭
40 示了其在不同时间尺度、不同地理区域和气候背景下的误差特征,为卫星反演降水产品精度
41 改进及应用提供了参考。

42 气候变化背景下,极端降水事件频发(江洁等, 2022),给人类社会带来严重灾害。IPCC
43 第五次评估报告指出,随着全球气温上升,大多数中纬度陆地上极端降水事件变得越来越强
44 烈和频繁(IPCC, 2014)。在此背景下,研究人员开展了大量IMERG和GSMaP等卫星反演降
45 水产品在全球降水监测分析中适用性特征方面的探讨工作(李伶俐等, 2018; Tashima et al,
46 2020; Nepal, B. et al, 2021; 胡庆芳等, 2022; 徐凡等, 2022; 尚明等, 2023; 杨晓瑞等,
47 2023)。

48 一般认为,极端事件可以从气候和天气两个层面进行理解,极端气候事件是指某一时间
49 段内天气要素的平均状况是极端的,极端天气事件是指某一区域内在统计分布上不经常或者
50 极少发生的事件(Solomon S, et al 2007)。研究人员在进行卫星降水产品极端降水监测
51 适用性特征研究时,主要也从上述两个角度开展。极端降水气候事件监测方面, Tashima et
52 al (2020)利用多年资料统计分析发现, GSMaP近实时产品在东亚及西太平洋区域干旱区
53 域表现出较好的探测能力,而在降水丰富的岛屿区域则表现较差。为描述极端降水气候事件,
54 ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection Indices)给出了一系列极端降水
55 指数,在气候研究中取得了广泛应用。研究人员基于上述指数,开展了大量卫星反演降水产
56 品极端降水监测适用性特征的研究, Nepal, B等(2021)利用上述极端降水指数对IMERG

57 和 GSMaP 在尼泊尔捕捉降水的时空变化及极端事件中的应用准确性进行评估时,发现两种
58 产品都能捕捉降水的时空变化,其中,IMERG 在捕捉日降水极值(RX1day 和 RX5day)方
59 面优于 GSMaP, GSMaP 则在捕捉基于持续时间和阈值的降水日数(CDD、CWD、R10mm、
60 R25mm)方面更为一致; Aksu 等(2023)在针对土耳其卫星反演降水产品的适用性特征研
61 究时,则进一步发现 IMERG 低估连续非降水事件(CDD),而高估连续降水日数(CWD),
62 其整体表现与日降水量大小成反比;国内方面,尚明等(2023)在利用上述极端降水指数对
63 IMERG 和 GSMaP 在中国区域极端降水监测中的适用性特征进行研究时,发现卫星降水产
64 品可以很好反映出各极端降水指数的空间分布特征,且在低海拔地区优于高海拔地区;丁明
65 泽等(2022)对 IMERG 与 GSMaP 的 4 套纯卫星降水数据在中国大陆区域极端降水中的监测潜
66 力进行了研究,发现 IMERG 和 GSMaP 数据均在受季风影响的复杂地形区域对 RX1day 指标呈
67 现出明显高估,在其余地区存在不同程度低估,对 R95p 指标均表现较好。极端降水天气事
68 件监测适用性方面,较多工作从一系列极端降水监测事件出发,对其进行了研究。通过对
69 GPM 近实时卫星降水数据在南京一次极端性强降水和郑州“7·20”极端暴雨事件中的适用
70 性特征进行分析时,研究人员(李伶俐等,2018;胡庆芳等,2022)发现,卫星反演降水对
71 极端降水的中小尺度过程监测已展现了一定积极效果,但定量精度尚有很大改进空间;
72 HUANG Chaoying 等(2019)分析了 IMERG 在六次台风极端降水事件中的表现,发现 IMERG
73 总体上捕捉到了风暴累计降水的空间分布模式,与 IMERG_Uncal(不带有雨量计校正)相
74 比,IMERG_Cal(带有雨量计校正)倾向于低估降水,尤其是在降雨中心的降水量;高玥
75 等(2019)对 GSMaP 在 2017 年湖南省出现的典型极端降水事件监测能力进行了评估,发现
76 误差组成结构中,命中误差占总误差比重最大,对比 IMERG 产品, GSMaP 产品在强降水
77 事件中的表现整体上都要优于同级别的 IMERG 产品; Zhou, C.等(2021)分析了 IMERG 三
78 个降水产品在湖北四次极端降水事件监测中的适用性特征,发现卫星降水产品受地形影响较
79 大,地形复杂地区,IMERG-F 的能力最好,地形不复杂的地区,IMERG-E 和 IMERG-L 的
80 结果与 IMERG-F 一致; Zhang D 等(2022)通过一种目标识别算法提取出了中国华北区域
81 极端降水事件集,关注了 IMERG 两种产品在极端强降水事件集中的表现,发现 IMERG-F
82 在所有时间尺度上表现均优于 IMERG-L。

83 上述研究表明,IMERG 和 GSMaP 总体能表现极端降水时空分布特征,在极端降水研究
84 中有一定的应用前景,但在不同应用场景、不同气候背景、不同地理区域仍存在一定差异,
85 针对其在特定区域极端降水监测分析中的适用性特征,仍有待进一步丰富和完善,尤其是针

86 对中国部分区域的研究,大量工作仍是基于特定极端降水事件,对卫星反演降水产品其极端
87 降水整体误差特征的认识仍有待深入。

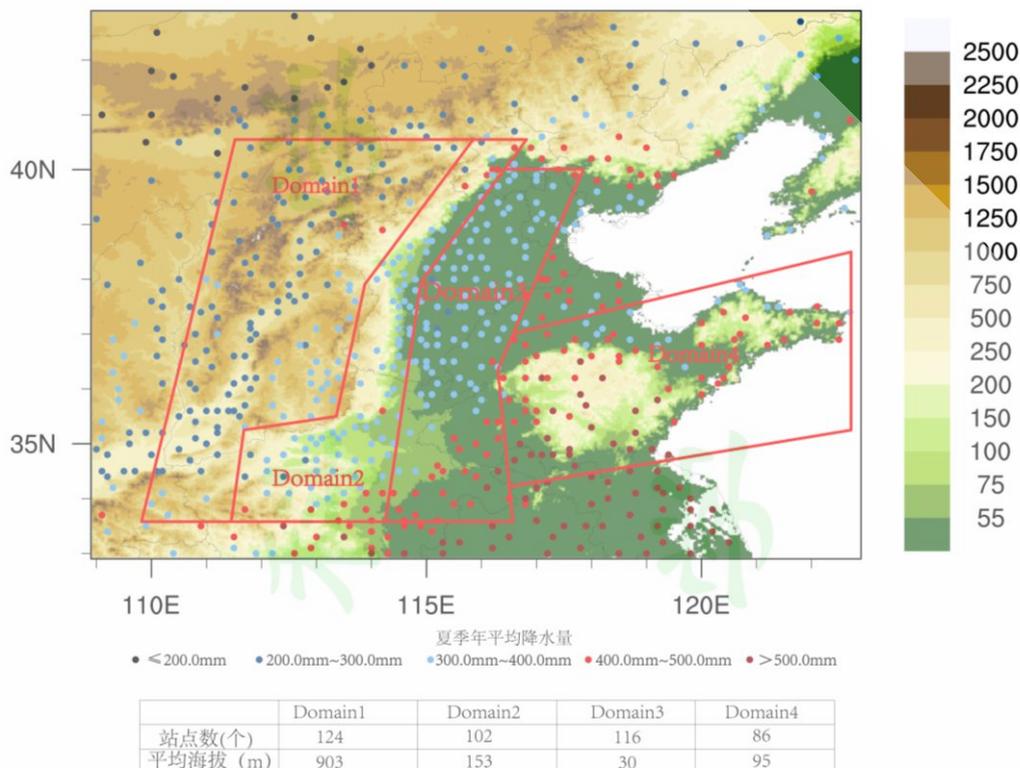
88 近些年来,华北地区一系列极端降水事件(湛芸等,2012;陈碧莹等,2020;冉令坤等,
89 2021;符娇兰等,2023)频发,给人民群众的生命财产安全造成了严重损失,迫切要求我们
90 加强上述区域极端降水的监测分析。卫星反演降水产品作为一种高时空分辨率的降水资料,
91 在一定程度上可以弥补观测不足,尤其是面对极端降水带来的地基观测设备受损、观测数据
92 缺失等问题时,更是开展降水监测分析和灾害评估的一种重要补充手段,那么其在华北极端
93 降水监测中适用性特征如何?为解决上述问题,文章以中国气象局国家站地面观测资料为参
94 考,从极端降水指标、极端强降水事件等出发,对IMERG和GSMaP在华北极端降水监测分析
95 中的适用性特征进行分析,以期利用卫星反演降水资料开展华北地区极端降水监测提供参
96 考。

97 2 数据和方法

98 2.1 研究区域和数据

99 2.1.1 研究区域概况

100 华北地区位于我国北部,地处副热带季风气候区,受东亚季风影响,其降水具有明显季
101 节性变化,夏季年平均降水量普遍在200.0—500.0 mm之间(图1),约占全年60%以上(郝
102 立生等,2012),空间分布总体呈现自南向北、自东向西减少的分布特征(图1)。境内海拔
103 由西北向东南方向减小,同时包含高原、山地、平原、丘陵等地形,且临近海洋(图1),参
104 考所处区域地形特征及距离海洋远近等因素,大致划分了高原地区(图1中Domain1,站点
105 平均海拔903 m)、高原和平原过渡区(图1中Domain2,站点平均海拔153 m)、受地形
106 和海洋影响相对较小的华北平原区(图1中Domain3,站点平均海拔30 m)以及受海洋影响
107 较大的山东半岛丘陵区(图1中Domain4,站点平均海拔95 m),并重点对其在上述4个区
108 域的表现及差异进行分析。



109

110 图1 研究区域地形、年平均(夏季)降水量(统计时段2000-2023年)、站点分布及区域划分图

111 Fig.1 Map of the study area's topography, average annual (summer) precipitation (statistical
112 period from 2000 to 2023), station distribution and regional divisions

113

114 2.1.2 文章数据

115 考虑到华北地区夏季降水量占到了其全年降水的大部(郝立生等, 2012), 且极端强降
116 水往往出现在夏季, 文章重点评估了卫星反演降水产品在华北夏季期间(6-8月)极端降水
117 的适用性特征, 评估对象为IMERG和GSMaP的日值产品, 参考数据为中国气象局国家基本站
118 降水日值(08:00-08:00时, 北京时)资料, 该数据来源于中国气象局大数据云平台, 对于
119 缺测率超过5%的站点, 未参与统计分析, 最终参与评估地面站共计649站(站点位置如图1
120 所示), 评估资料时长为2000-2023年。

121 IMERG降水数据集包含准实时的早期运行产品IMERG_early(滞后4小时)、近实时产
122 品IMERG_late(滞后12小时)、非实时的后实时产品IMERG_final(滞后3.5个月)等三
123 个版本(Huffman et al. 2019), 产品生成过程中主要包括微波降水反演, 其算法为Goddard
124 Profiling Algorithm(GPROF)(Kummerow et al. 2001), 微波降水前向和后向传播计算,
125 V06算法中运动矢量获取主要基于模式的整层水汽含量, 其中, IMERG_early仅应用了前向

126 传播, IMERG_late 则同时应用了前向和后向传播, 微波降水和红外降水的融合分析, 融合
127 方法参考 Joyce and Xie (2011) 的工作, 以及最终降水产品的校准等过程, 其中 IMERG_final
128 为利用 GPCP 月降水资料进行了偏差校准过后的产品。

129 GSMaP 降水数据集包含实时产品 GSMaP_NOW (滞后 1h)、近实时产品 GSMaP_NRT (滞后
130 4h)、标准产品 GSMaP_MVK (滞后 3 d), 以及基于 GSMaP_MVK 和全球雨量站点、地形及气候信
131 息进行校正的产品 GSMaP_Gauge 等系列产品 (Shige S et al, 2009)。GSMaP 微波反演降
132 水算法参考 Aonashi et al. (2009) 的工作, 基本思想是找到与观测亮温最吻合的辐射传输
133 模型对应的降水率, 微波红外融合, 运动矢量获取基于红外云图连续观测, 融合分析过程中
134 采取卡尔曼滤波模型 (Ushio et al. 2009), 雨量站校准等流程, 雨量站校准主要则基于 CPC
135 的日值资料进行。近实时产品 GSMaP_NRT 降水反演算法与标准算法一致, 但进行了适当简化,
136 其与标准产品主要区别在于: 近实时产品生成过程中, 大气信息使用的为预报数据; 红外微
137 波降水融合过程中, 仅使用前向云移动进行融合; 同时在雨量计调整算法中, 仅使用统计参
138 数。

139 考虑到业务应用的实时性, 同时兼顾准确性, 文章评估对象选取了基于 V06 算法开发的
140 IMERG_early (为方便描述, 以下称 IMERG_V6E) 和 IMERG_late (为方便描述, 以下称
141 IMERG_V6L) 两款准实时产品以及 GSMaP_GNRT (为方便描述, 以下称 GSMaP_GNRT6) 的日值
142 资料, 产品相关信息如表 1 所示。

143 表 1 卫星反演降水数据基本信息表

144 Table 1 Information about the satellite-derived precipitation data used in this study

	时间分辨 率 (h)	空间分辨 率 (°)	覆盖范围	时间范围	供应商
IMERG	0.5	0.10	90° S ~ 90° N	2000.06-现在	NASA
GSMaP	1.0	0.10	60° S ~ 60° N	2000.04-现在	JXJX

145

146 2.2 研究方法

147 为客观描述极端降水的时空变化特征, 文章根据 ETCCDI 推荐的极端降水指数, 选取降
148 水量、降水频次及降水强度等 3 大类 6 个指标 (见表 2) 进行分析, 并基于皮尔逊相关系数
149 (Correlation Coefficient)、均方根误差 (Root Mean Square Error)、相对偏差 (Relative
150 Bias) 等评价指标 (计算方式见表 3) 对卫星反演降水产品误差特征进行定量评价。

151

152
153
154

表 2 极端降水指数列表

Table 2 List of extreme precipitation indices used

指数类别	名称	定义	单位
降水量	R95p	≥95%分位日降水量的降水日其累计降水量	mm
	R99p	≥99%分位日降水量的降水日其累计降水量	mm
降水频次	R20mm	≥20.0mm/day 的降水日其累计降水日数	days
	R50mm	≥50.0mm/day 的降水日其累计降水日数	days
降水强度	RX1day	最大日降水量	mm/day
	RX5day	最大 5 日降水量	mm/day

155

注：指数来源于网址 ([https://www.clindex.org/learn/indices/\[2024-09-15\]](https://www.clindex.org/learn/indices/[2024-09-15]))

156

综合考虑降水强度和影响范围，依据关注区域内（图 1）每日地面站日降水量占据统计

157

时段内（2000–2023 年夏季期间）榜首站点数由多到少进行排序，筛选出排名前十的极端降

158

水日，作为华北地区极端强降水天气事件集，对卫星反演降水产品的探测能力进行分析。极

159

端降水事件的定义，有基于绝对阈值和相对阈值两种方案（高涛等，2014），由于卫星反演

160

降水强度偏弱，尤其对极端强降水，其偏弱特征更为明显，基于相对阈值衡量其对极端强降

161

水的探测能力，较基于绝对阈值而言更为合适（Tashima et al, 2020），故而利用百分位、

162

TOP 值（孙军等，2017）等相对阈值的极端降水研究方法，重点关注了超 95%、99%分位、TOP03

163

值、TOP05 值等极端降水站点，并利用命中率、误警率、临界成功指数评价指标（计算方式

164

见表 3）对卫星反演降水产品极端强降水探测能力进行定量评价。。

165

检验分析时，利用邻近点插值方法将格点降水资料插值到站点进行对比分析，统计计算

166

时滤除低于 1.0 mm/day 的降水站次。

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

表 3 评估指标计算公式

Table3 Evaluation index calculation method

评价指标	计算方法
皮尔逊相关系数	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$
均方根误差 RMSE (mm/day)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$
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	$POD = \frac{a}{a + c}$
误警率 FAR	$FAR = \frac{b}{a + b}$
临界成功指数 CSI	$CSI = \frac{a}{a + b + c}$

177 注：n 为样本数量；G_i为地面降水；S_i为卫星降水； \bar{G} 为地面降水平均值； \bar{S} 为卫星降水平均值；a 为卫星命中降水数

178

量；b 为卫星误报降水数量，c 为卫星漏报降水数量

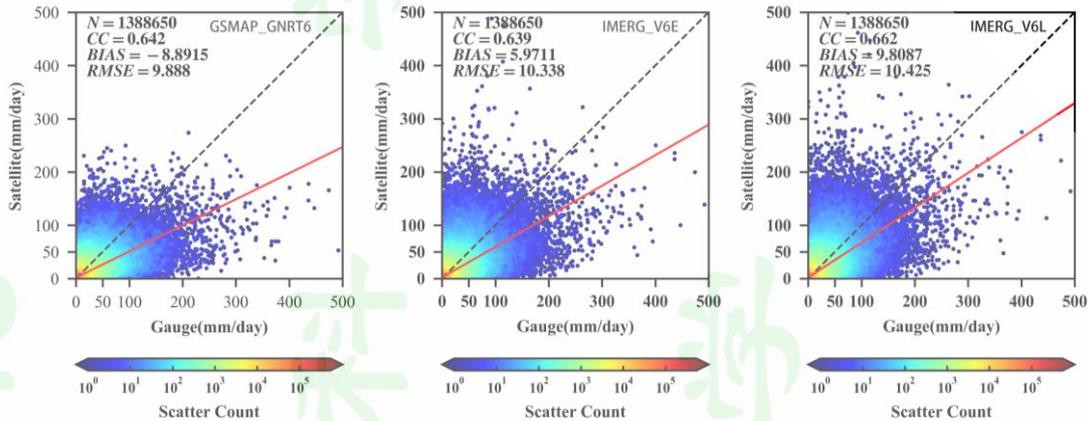
179 3 结果分析

180 本文研究结果主要包括以下三部分内容：1) 降水总体误差特征分析；2) 极端降水指标
181 误差特征分析；3) 极端强降水事件探测能力分析。接下来，文章分别从上述三个方面进行
182 分析。

183 3.1 降水总体误差特征分析

184 图 2 为研究区域内卫星反演降水与地面站观测的日降水量散点分布图。由图可知，
185 GSMaP_NRT6 总体出现低估特征，IMERG 则总体出现高估特征，上述三种产品相对偏差分别为
186 -8.89%、5.97%和 9.81%，IMERG_V6L 较 IMERG_V6E 高估更为明显。卫星反演降水产品普遍对
187 100.0 mm/day 以上的大暴雨强度估计不足，其中，IMERG 较 GSMaP_GNRT6 有所改进。根据 t
188 检验，在 95%置信区间内，所有产品相关性都是显著的，其中以 IMERG_V6L 相关性最高（相
189 关系数为 0.66），IMERG_V6E 和 GSMaP_GNRT6 的相关性略低且基本相等（相关系数均为 0.64），

190 表明采取前后向传播算法的主被动遥感降水融合后的 IMERG_V6L 较仅基于前向传播算法的
191 主被动遥感降水融合的 IMERG_V6E (Huffman et al. 2019) 在降水时空分布上有所改进。
192



193

194 图 2 研究区域内地面观测和卫星反演降水日降水量散点分布图

195 Fig.2 Scatter plots of rain gauge versus GSMaP_NRT6, IMERG_V6E and IMERG_V6L over the study
196 area

197 进一步分析不同区域差异 (如表 4), GSMaP_GNRT6 在四个重点关注区域内均出现低估
198 现象, 尤以山脉平原过渡区低估最为明显 (相对偏差为-11.55%), IMERG 总体以高估为主,
199 但其在山脉平原过渡区也存在一定程度低估 (相对偏差分别为-4.67%和-1.64%), 反映出卫
200 星反演降水产品普遍在山脉平原过渡区存在低估现象。此外, 需注意的是, IMERG 在半岛丘
201 陵区对降水高估明显, IMERG_V6E 和 IMERG_V6L 的相对偏差分别为 18.99%和 24.54%, 上述
202 偏差也是所有区域内偏差程度最大的, 反映出 IMERG 在受海陆分布影响较大区域存在一定问
203 题。四个重点关注区域卫星反演降水产品的相关性总体以 IMERG_V6L 最高, 但在高原地区,
204 GSMaP_GNRT6 的相关性 (相关系数为 0.63) 高于 IMERG 的两种产品 (相关系数分别为 0.58
205 和 0.60)。总体来看, 在高原区域, GSMaP_GNRT6 的相关性和均方根误差等均优于 IMERG,
206 表现相对较好; 在山脉平原过渡区和平原区域, IMERG 各项指标均优于 GSMaP_GNRT6, 且以
207 IMERG_V6L 表现更优; 在受海陆分布影响较大的半岛丘陵区, IMERG_V6L 的相关性高于
208 GSMaP_NRT6, 但其存在显著高估及均方根误差偏大问题。上述分析反映出在不同地理区域,
209 卫星反演降水存在一定差异。

210

211

212

表 4 卫星反演降水产品总体误差统计特征表

213

Table 4 Overall and regional performances of GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E, and IMERG_V6L on

214

CC, BIAS, and RMSE statistics

Region	Data counts (个)	GSMaP_GNRT6			IMERG_V6E			IMERG_V6L		
		CC	BIAS (%)	RMSE (mm/day)	CC	BIAS (%)	RMSE (mm/day)	CC	BIAS (%)	RMSE (mm/day)
Total	1388650	0.64	-8.89	9.89	0.64	5.97	10.34	0.66	9.81	10.43
Domain1	265314	0.63	-7.07	6.96	0.58	5.16	7.62	0.60	8.02	7.76
Domain2	217993	0.63	-11.55	10.54	0.65	-4.67	10.36	0.66	-1.64	10.31
Domain3	248515	0.63	-9.01	10.51	0.65	1.73	10.47	0.68	5.00	10.43
Domain4	184060	0.65	-8.95	11.82	0.64	18.99	13.41	0.67	24.54	13.74

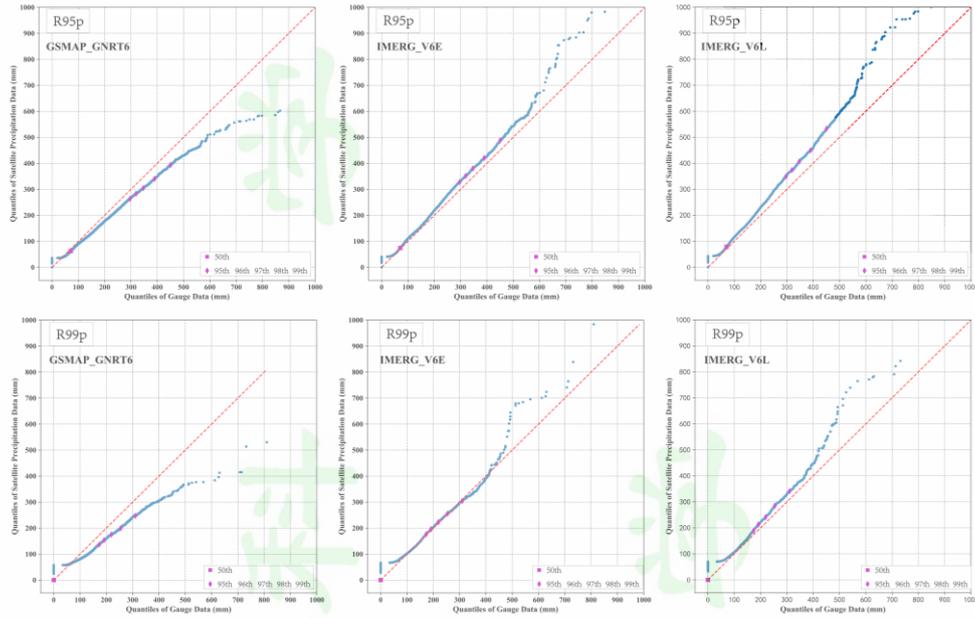
215

216 3.2 极端降水指标误差特征

217 基于极端降水指标，从降水量、降水频次和降水强度等方面对卫星反演降水产品在极端
218 降水监测中的误差特征进行分析。

219 3.2.1 降水量相关指数评估

220 图 3 给出了卫星反演降水和地面观测的 R95p、R99p 指数的分位数-分位数图。由图可知，
221 GSMaP_GNRT6 表现出低值高估、高值低估特征，IMERG 则呈现一致高估特征，且三者在高值
222 区的偏差程度一般随指数增大而愈趋明显，这反映出卫星反演降水在极端降水量较小区域高
223 估极端降水量，而在极端降水量较大区域，GSMaP_GNRT6 低估极端降水量，IMERG 高估极端
224 降水量，相较而言，IMERG_V6L 较 IMERG_V6E 高估更为明显。无论是 R95p 指数还是 R99p 指
225 数，三者中位数与地面观测基本一致，且对 450.0 mm 以下站点（几乎占据了华北地区站点
226 的 99%），卫星反演降水产品偏差普遍相对较小，反映卫星反演降水对华北地区极端降水量
227 总体分布与地面观测较为接近，但对 450.0 mm 以上站点，卫星反演降水产品偏差程度则相
228 对较大，其中，GSMaP_GNRT6 两个指数均随值增大而低估愈明显，IMERG 两个产品的 R99p
229 指数在 500.0 mm 左右，出现一个偏差峰值，此后偏差程度又趋于减小。总体来看，三种卫
230 星降水产品中，以 IMERG_V6E 偏差程度最小，反映出在极端降水量刻画方面，IMERG_V6E 与
231 地面观测最为接近。



232

233

图3 地面观测和卫星反演降水产品 R95p、R99p 指数的分位数-分位数图。

234

Fig.3 Quantile-quantile plots of R95p and R99p for rain gauge versus satellite-retrieved precipitation products

235

236

进一步分析 R95p、R99p 指数其误差特征的空间分布特征（图 4）。当降水分位阈值由

237

95%提高到 99%时，卫星反演降水产品相关性普遍呈现一定程度下降，相关性较高的区域均

238

位于山脉与平原过渡区，上述区域部分站点相关系数达 0.65 以上，但相对偏差普遍偏低，

239

且 R99p 较 R95p 偏低更明显，说明卫星反演降水对山前区域极端降水量时空分布反映相对较

240

好，但强度不足，且降水越极端，强度低估越明显。GSMaP_GNRT6 两个指数的相关性在高原

241

区域普遍高于 IMERG，其在上述区域相对偏差中位数均位于 0 附近，IMERG 则普遍高估；IMERG

242

的 R99p 指数在前述高相关区的北京西南部、河北南部、河南北部，较 GSMaP_GNRT6 有着更

243

为集中的高相关分布，尤以 IMERG_V6E 表现最好。此外需注意的是，IMERG 在半岛丘陵区呈

244

现出明显高于其他区域的过高估特征，且 IMERG_V6L 偏高更明显。以上分析说明，在反映极

245

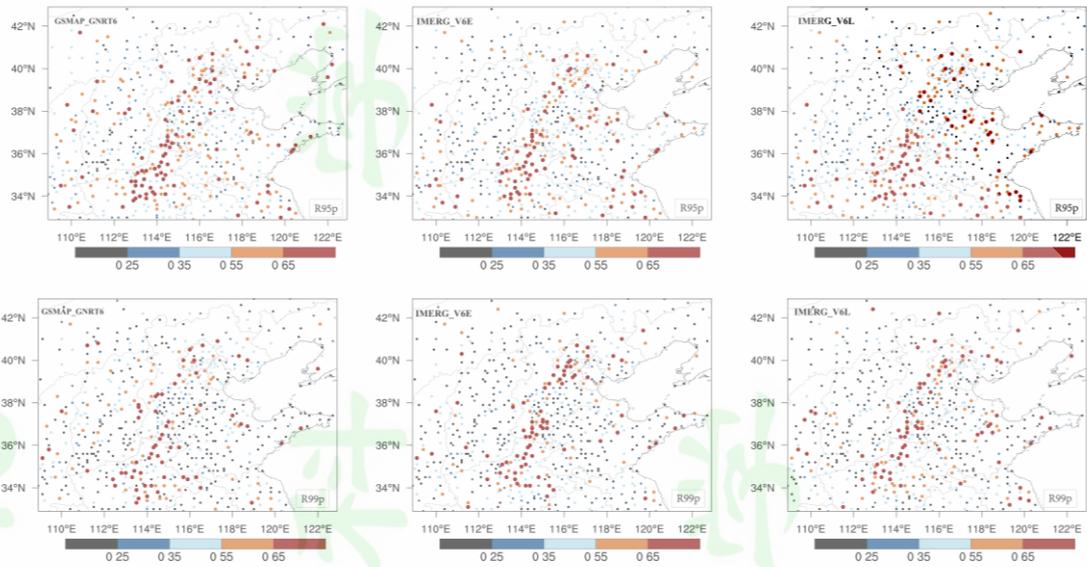
端降水量方面，GSMaP_GNRT6 在高原区域有着优于 IMERG 的表现；IMERG 则对山前区域异常

246

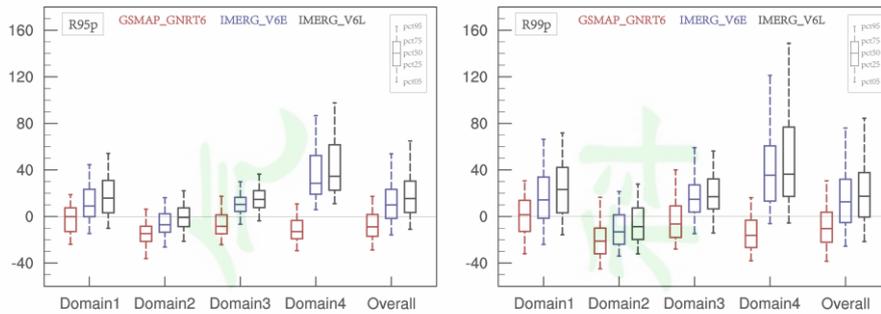
强极端强降水的刻画能力优于 GSMaP，但其在受海陆分布较大区域对极端降水的过高估计尤

247

为明显，IMERG_V6L 高估较 IMERG_V6E 更明显，相较而言，IMERG_V6E 有着更好的表现。



248



249

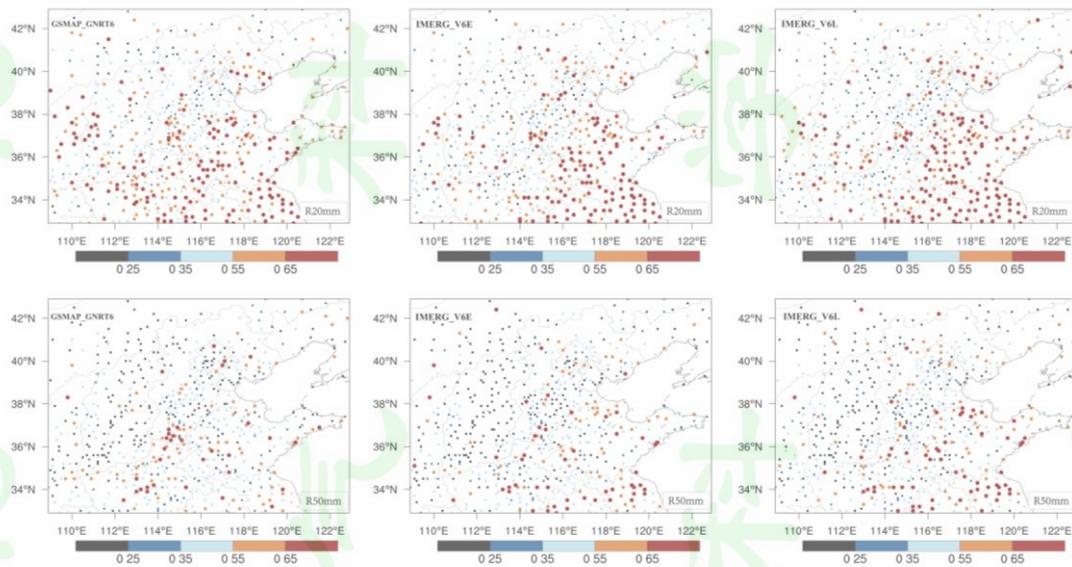
250 图4 降水量相关指数 R95p、R99p 相关性空间分布及不同区域 BIAS (单位: %) 箱须图

251 Fig.4 Spatial distribution of CC of R95p and R99p, along with box plots of BIAS (unit: %) over
 252 different regions, for GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E and IMERG_V6L

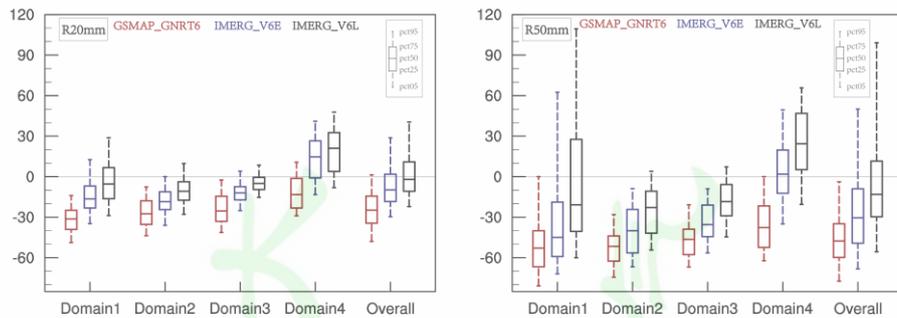
253 3. 2. 2 降水频次相关指数评估

254 选取 R20mm 和 R50mm 分析卫星反演降水产品对强降水频次的反映能力, 相关性站点分布
 255 及不同区域相对偏差分布如图 5 所示。相关性较高区域主要位于降水量较大的山东半岛及苏
 256 皖北部一带, 上述区域三者 R20mm 的相关系数普遍在 0.55 以上, 而相关性较低区域则位于降
 257 水量较小的山西高原区域, 上述区域三者 R50mm 的相关系数普遍低于 0.25, 其相对偏差总
 258 体偏小, 以低估为主。当降水强度阈值由 20.0 mm/day 提高到 50.0 mm/day 时, 卫星反演降
 259 水产品相关性普遍下降明显, 且低估现象也愈趋明显。GSMaP_GNRT6 几乎呈现一致低估特征,
 260 较 IMERG 低估更明显; IMERG 在高原区域、山脉平原过渡区、平原区以低估为主、在受海陆

261 影响较大的半岛丘陵区则出现高估现象，其中，IMERG_V6L 在低估区域较 IMERG_V6E 对低估
 262 现象有所改进，但在高估区域则较 IMERG_V6E 高估更明显。以上分析表明，强降水频次相关
 263 指数的相关性与降水多少的气候特征关系密切，GSMaP_GNRT6 对强降水频次总体以低估为
 264 主，IMERG 较 GSMaP_GNRT6 对低估现象有所改进，尤以 IMERG_V6L 提升较为明显，但其在半
 265 岛丘陵区出现高估，且降水强度提升过后的 IMERG_V6L 较 IMERG_V6E 高估也更明显，反映出
 266 IMERG_V6L 和 IMERG_V6E 在刻画强降水频次方面不同区域各有优劣。



267



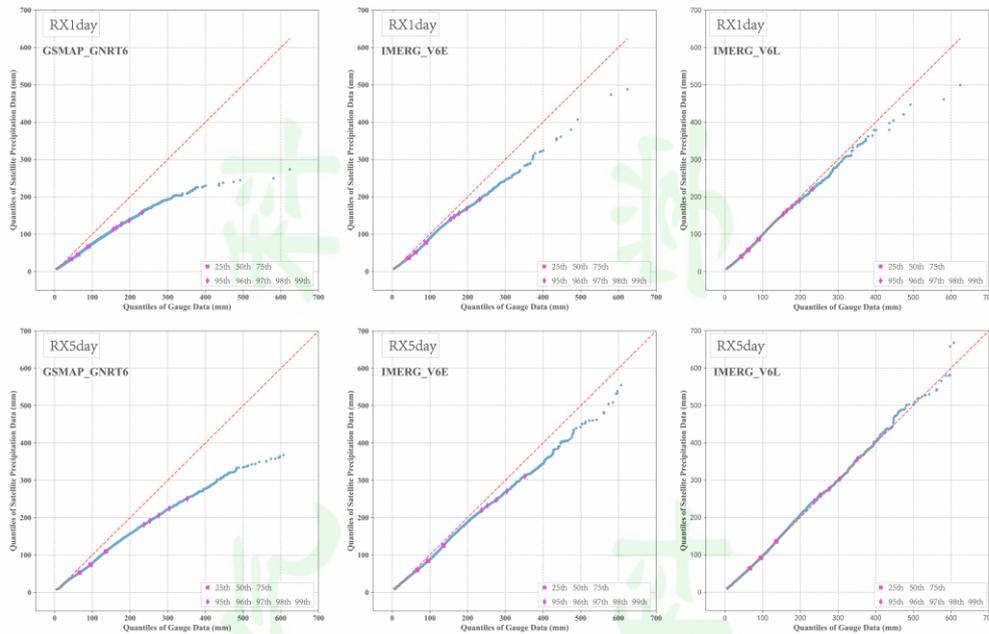
268

269 图 5 降水频次相关指数 (R20mm,R50mm) 相关性空间分布及不同区域 BIAS (单位: %) 箱须图
 270 Fig.5 Spatial distribution of CC of R20mm and R50mm, along with box plots of BIAS (unit: %)
 271 over different regions, for GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E and IMERG_V6L

272 3.2.3 降水强度相关指数评估

273 图 6 给出了地面观测和卫星反演降水的 RX1day、RX5day 指数的分位数-分位数图。由图
 274 可知，GSMaP_GNRT6 和 IMERG_V6E 均出现低估现象，尤其对极端强的 RX1day、RX5day 指数

275 二者显著低估，其中，GSMaP_GNRT6 较 IMERG_V6E 低估更为明显，其对 25%分位以上数值普
276 遍存在低估现象，且值越大低估越明显，而 IMERG_V6E 基本仅对 95%分位以上数值存在低估
277 现象，相较而言，IMERG_V6L 基本与地面观测一致，说明在刻画极端降水强度方面，IMERG_V6L
278 与地面观测最为接近。相较 RX1day 指数，卫星反演降水产品对 RX5day 指数的偏差有所缩小，
279 说明卫星反演降水对时间尺度较大的极端强降水反映能力优于时间尺度较小的极端强降水。



280

281

图 6 地面观测和卫星反演降水产品 RX1day、RX5day 指数分位数-分位数图。

282

Fig. 6 Quantile-quantile plots of RX1day and RX5day indices for rain gauge versus
283 satellite-retrieved precipitation products

284

图 7 展示了 RX1day、RX5day 指数其误差特征的空间分布特征。分析结果表明，

285

GSMaP_GNRT6 在所有区域内均呈现一致的低估现象，而 IMERG 总体上以低估为主，但在半岛

286

丘陵内出现高估，尤以 IMERG_V6L 更明显。随降水时间尺度增大，卫星反演降水产品 RX5day

287

相关性较 RX1day 普遍有所增加，但两个指数均在山脉平原过渡区的山前地带表现出高于其

288

其他区域的较高相关性，上述区域部分站点相关系数达 0.65 以上，然而该区域是降水强度低

289

估最明显的地区，IMERG 在上述区域的相关性及偏差均略优于 GSMaP_GNRT6，相较而言，IMERG

290

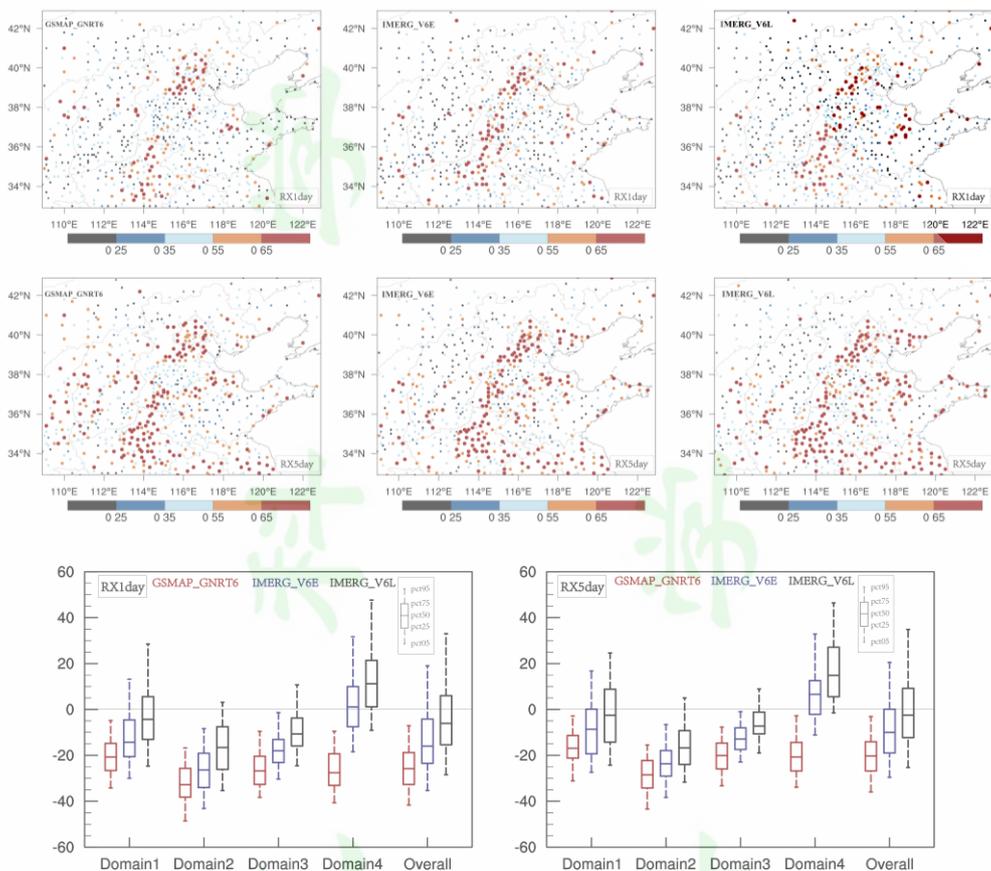
对山前极端强降水的刻画能力略优于 GSMaP_GNRT6。但在高原区域内，IMERG 其 RX5day 相关

291

性普遍低于 GSMaP_GNRT6，反映出在高原区域，GSMaP_GNRT6 对持续时间较长极端强降水的

292

强度的时空分布特征刻画能力优于 IMERG。



293

294

295 图7 降水强度相关指数 (RX1day,RX5day) 相关性空间分布及不同区域 BIAS (单位: %) 箱须图

296 Fig.7 Spatial distribution of CC of RX1day and RX5day,along with box plots of BIAS (unit:%)

297

over different regions, for GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E and IMERG_V6L

298 3.3 极端强降水事件卫星降水评估

299 3.3.1 华北地区极端强降水事件集概况

300 表5为基于地面站点观测筛选出的极端强降水事件集及对应降水日卫星反演降水产品
 301 日降水量历史排位情况。从地面站观测监测到的极端降水日排序来看,排序前三的分别为北
 302 京“7·21”暴雨、华北“7·19”暴雨以及华北“23·7”暴雨,分别有28/26/24站其日降
 303 水量占据榜首位置,基本涵盖了以往研究关注到的重大极端强降水事件(湛芸等,2012;陈
 304 碧莹等,2020;冉令坤等,2021;符娇兰等,2023)。

305 最大日降水量方面,除2016年7月20日外,基本都在330.0mm以上,结合前述夏季
 306 年平均降水量(图1)分布可知,上述日降水量基本占到了夏季年平均降水量的50%以上,
 307 最大日降水量为郑州“7·20”暴雨,达624.0mm。从对应降水日卫星反演降水产品日降
 308 水量历史排位情况来看,以IMERG_V6L重合度最高,GSMaP_GNRT6重合度最低,在地面观测
 309 监测到的排名前10降水日中,IMERG_V6L有9个降水日位于前10,IMERG_V6E有5个降水

310 日位于前 10, GSMaP_GNRT6 则仅有 3 个降水日位于前 10, 排名前 3 降水日中, 上述三种产品
 311 均有 2 个降水日排序位于前 3, 这反映出 IMERG_V6L 对异常强的极端强降水日有更强的捕捉
 312 能力。最大日降水量方面, 卫星反演降水产品均较地面观测显著偏小, 在已统计的降水日中,
 313 最大值均出现在郑州 “7·20” 暴雨, 且以 IMERG_V6L 强度与地面观测最为接近, 但仍然显
 314 著偏小, 这反映出卫星反演降水尽管能在一定程度上捕捉到极端降水事件, 但对超过 300.0
 315 mm/day 的极端强降水其降水强度仍然显著偏小。

316 表 5 华北地区极端降水日排序情况

317 (基于日降水量位于榜首 (统计时段 2000-2023 年夏季) 站点数排序)

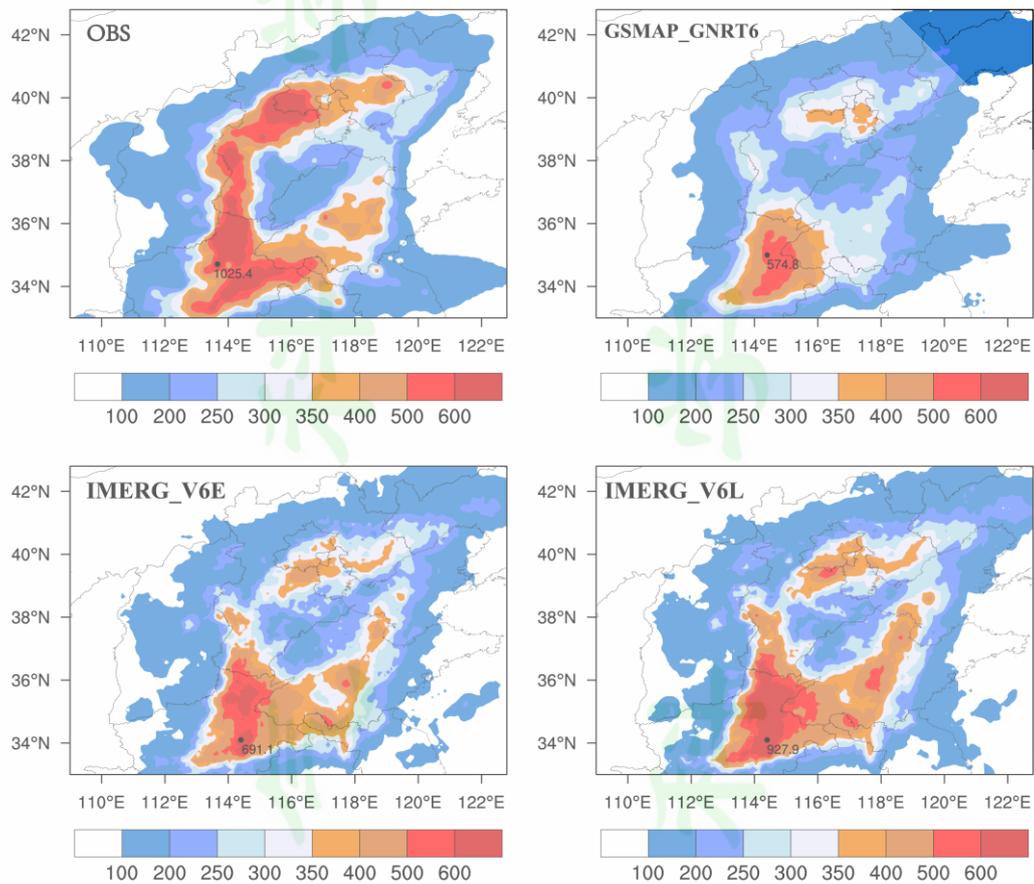
318 Table 5 List of extreme precipitation cases

CASE	OBS	GSMaP_GNRT6	IMERG_V6E	IMERG_V6L
20120721	01 (28 站/337mm)	03 (31 站/192mm)	>10 (12 站/)	10 (10 站/213mm)
20160719	02 (26 站/380mm)	>10 (*站/*mm)	03 (27 站/240mm)	01 (37 站/289mm)
20230730	03 (24 站/395mm)	01 (41 站/192mm)	02 (28 站/193mm)	02 (27 站/210mm)
20160720	04 (22 站/259mm)	>10 (*站/*mm)	04 (23 站/176mm)	05 (20 站/206mm)
20180818	04 (22 站/338mm)	>10 (*站/*mm)	>10 (*站/*mm)	08 (17 站/234mm)
20190810	06 (20 站/367mm)	>10 (*站/*mm)	>10 (*站/*mm)	06 (19 站/262mm)
20210720	07 (19 站/ 624mm)	04 (23 站/ 274mm)	04 (23 站/ 289mm)	02 (27 站/ 343mm)
20210721	08 (14 站/447mm)	>10 (*站/*mm)	>10 (*站*mm /)	07 (17 站/275mm)
20040716	09 (13 站/392mm)	>10 (*站/*mm)	08 (16 站/258mm)	09 (16 站/311mm)
20160708	10 (10 站/374mm)	>10 (*站/*mm)	>10 (*站/*mm)	>10 (*站/*mm)

319 表注: (*站/*mm) 分别为位于所在日期日降水量位于榜首的站点数及该日降水中心最大日降水量, 仅统计位于排名前
 320 十的日期降水情况

321 对极端强降水事件集 10 个降水日其累计降水量 (图 8) 进行分析, 地面观测降水中心
 322 呈 “C” 字型分布, 表现为两条雨带, 一条自河南太行山东侧山前延伸至京津冀燕山南侧,
 323 另一条则位于河南南部至山东南部一带; 北京西南部、河南北部呈现出两个强降水中心, 反
 324 映出华北地区极端强降水与地形关系密切。从对应卫星反演降水分布情况来看, IMERG_V6L
 325 与地面观测形态最为相似, 但其在北京西南部至河北南部一带较地面观测偏弱, 而在河南北
 326 部、山东西南部至中部一带较地面观测略有偏强, GSMaP_GNRT6 则偏弱较为明显, IMERG_V6E

327 与地面观测的接近程度介于 IMERG_V6L 和 GSMaP_GNRT6 之间。相较而言,上述三者在北京西
328 南部一带偏弱更为明显。



329
330

图 8 极端强降水事件集地面观测和卫星反演降水累计降水量(单位:mm)空间分布图(标值最大值)

331 Fig.8 Spatial distribution of accumulated precipitation for ten extreme precipitation cases for
332 OBS , GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E and IMERG_V6L

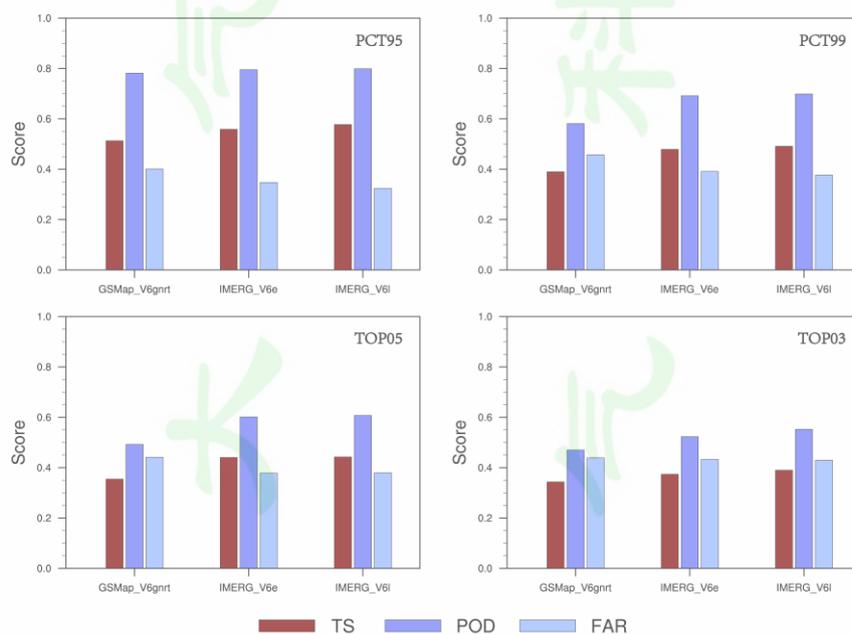
333 3.3.2 极端强降水探测能力分析

334 在 95%分位、99%分位、TOP03 值、TOP05 值等极端降水阈值区间上,基于命中率、误警
335 率、临界成功指数等对三种卫星降水反演产品在上述极端强降水事件集中极端强降水站次的
336 探测能力进行分析。其中, TOP 值阈值法判断规则如下,以 TOP03 值为例,如果地面观测该
337 站点降水位于其历史序列前三,而卫星反演降水也位于相应的历史序列前三,则认为卫星反
338 演降水正确,否则认为卫星反演降水错误, TOP05 值阈值法判断规则类似。

339 图 9 给出了基于相对阈值法计算的极端强降水站次评分情况。由图可以看出,随降水极
340 端性增强,卫星反演降水探测能力下降,IMERG 相较 GSMaP_GNRT6 表现更好。对超过 95%分
341 位值的极端降水站次,三种降水产品命中率差异不大,但由于 GSMaP_GNRT6 的误警率较高

342 (0.4012)，故其临界成功指数最低(0.5130)，而IMERG_V6L误警率最低(0.3243)，故
 343 其临界成功指数最高(0.5775)；对超过99%分位值的极端降水站次，IMERG命中率较
 344 GSMAP_GNRT6偏高较显著，同时其误警率均低于GSMAP_GNRT6，进而其临界成功指数与
 345 GSMaP_GNRT6相比也较超过95%分位值的极端降水偏高程度更明显，最高的IMERG_V6L(临
 346 界成功指数为0.4912)较GSMaP_GNRT6(临界成功指数为0.3900)偏高0.1012。进一步基于
 347 TOP值阈值计算时，对排名前五的极端降水站次，IMERG的两种降水产品各项评分基本一致，
 348 临界成功指数分别0.4427和0.4404，GSMaP_GNRT6则在命中率、误警率及临界成功指数等
 349 指标方面均差于IMERG，其临界成功指数为0.3545；对排名位于前三的极端降水站次，
 350 IMERG_V6L的临界成功指数值最高(0.3900)，其次为IMERG_V6E(0.3739)，GSMaP_GNRT6
 351 为0.3545，三种差距减小，主要由于IMERG虚警率也有所增加，其与GSMAP_GNRT6的差距
 352 也减小，IMERG_V6E和GSMaP_GNRT6虚警率分别为0.4327和0.439。

353 以上分析表明，在华北极端强降水站次探测方面，IMERG_V6L表现最优，但其相对
 354 IMERG_V6E优势不明显，GSMaP_GNRT6其误警率普遍高于IMERG的两种产品，总体表现也最
 355 差，尤其在99%分位及TOP05阈值区级上，其与IMERG的两种产品差距较为明显。



356

357

图9 基于相对阈值法计算的极端强降水站点评分图

358

Fig.9 Scoring map of stations with extreme heavy rainfall calculated based on the relative threshold method for GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E, and IMERG_V6L

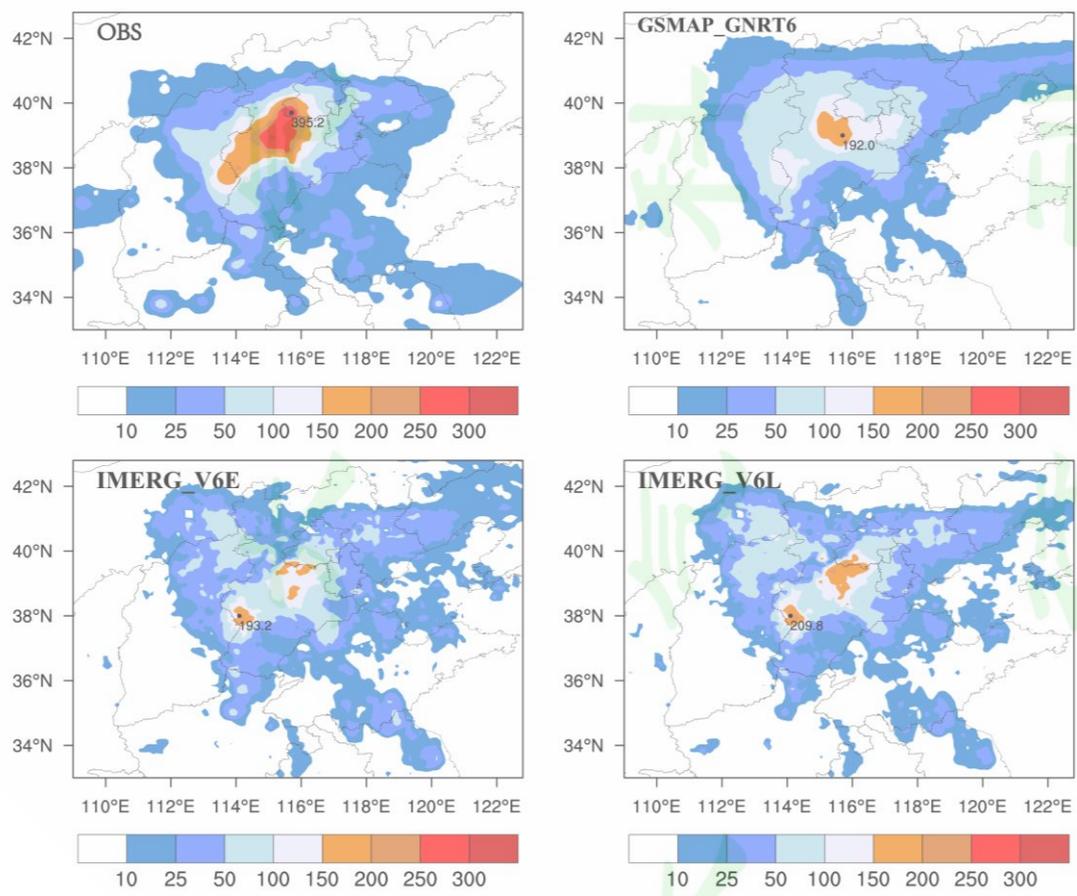
359

360

3.3.3 极端强降水事件探测能力的个例分析

361 2023年7月29日-8月1日，受台风“杜苏芮”残余环流影响，华北地区出现持续性暴
362 雨到大暴雨，北京西部、河北中部和西南部等地局地出现特大暴雨，19个国家气象观测站
363 日降水量突破建站以来历史极值，极端强降水给河北、北京等地带来严重的洪涝灾害。最强
364 降水时段7月30日08时-31日08时。

365 图10给出了最强降水时段地面观测及卫星反演降水24小时累计降水量的空间分布。由
366 图可知，卫星反演降水总体能把握强降水东北西南走向的空间分布及强降水中心位置，但对
367 50.0 mm以上暴雨区范围，GSMaP_GNRT6明显偏大，IMERG的两种产品略偏小，相较而言更
368 接近实况，然而其在山西东北部也较地面观测偏大，尤以IMERG_V6L偏大更明显。对降水
369 中心强度，卫星降水产品普遍显著偏弱，尤以GSMaP_GNRT6偏弱更明显，IMERG_V6L局地考
370 虑了200.0 mm以上的降水，其强度更接近地面观测实况。总体来看，IMERG_V6L暴雨区范围
371 和强度更接近地面观测，GSMaP_GNRT6则存在暴雨区范围显著偏大，卫星反演降水产品普遍
372 存在中心强度显著不足问题。



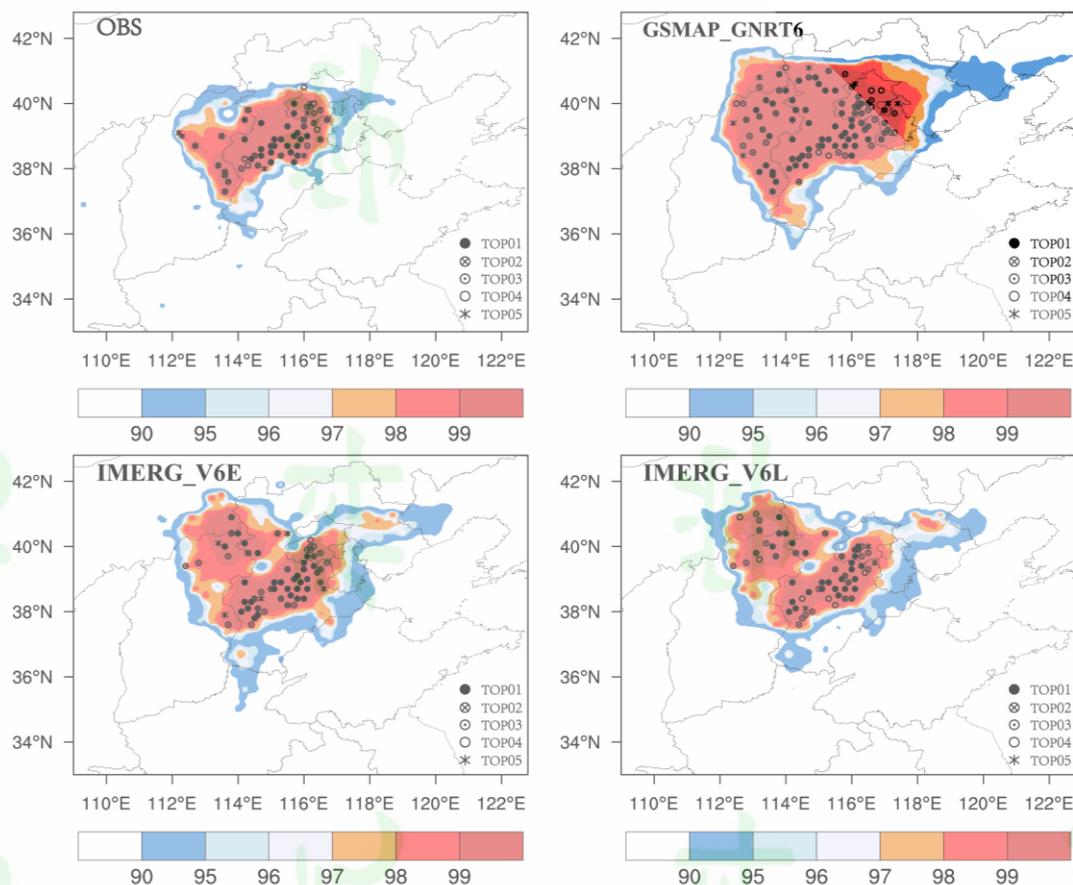
373

374 图10 2023年7月30日08时-31日08时24小时累计降水量(单位: mm)空间分布图

375 **Fig.10 Spatial distribution of accumulated precipitation (unit: mm) from 08:00 on 30 July to 08:00 on 31**

376 **July 2023 for OBS,GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E,and IMERG_V6L**

377 图 11 给出上述降水量历史百分位及 TOP 值排位情况。从百分位分布情况来看，地面观
378 测显示，华北地区出现了大范围超 95%分位值的强降水，其中，山西东部、河北中部、北京
379 南部等地降水超 99%分位值；卫星反演降水产品，对超 95%分位值的降水区分布范围，普遍
380 较地面观测偏大，尤以 GSMaP_GNRT6 偏大更明显；对超 99%分位值的极端强降水区，
381 GSMaP_GNRT6 其范围明显偏大，IMERG 两种产品较为相似，其范围相对较小，总体更接近地
382 面观测，其差异主要位于山西东北部，在上述区域考虑了大片超 99%分位值的极端强降水，
383 极端性考虑偏强；利用 TOP 值排位做进一步分析，地面观测在河北中部、北京西南部等地共
384 有 24 个站日降水量位于 TOP01 位置，卫星反演降水产品反映出的极端性特征更为明显，
385 GSMaP_GNRT6 有 41 个站次位于 TOP1 位置，IMERG_V6E 和 IMERG_V6L 则分别有 28 和 27 个站
386 位于 TOP1 位置，相较而言，GSMaP_GNRT6 反映出的极端性特征较地面观测更强，其在河北
387 中部偏北地区出现了大量 TOP5 以上强度的站点，而地面观测则无明显体现，IMERG 的两种
388 降水产品，则除在山西东北部出现了较多站点 TOP5 以上强度的降水出现空报外，对河北中
389 部的极端降水站点其极端性总体反映较好，又以 IMERG_V6E 更为接近地面观测。



390

391 图 11 2023 年 7 月 30 日 08 时-31 日 08 时 24 小时累计降水量历史分位数（填色，单位：%）及排位分布图

392 **Fig.11 Historical percentile (shaded, unit: %) and ranking distribution of the accumulated precipitation**

393 **from 08:00 on 30 July to 08:00 on 31 July 2023 for OBS,GSMaP_GNRT6, IMERG_V6E,and IMERG_V6L**

394 以上分析表明，利用卫星反演降水产品进行极端降水监测时，尽管其中心绝对强度偏弱，
 395 但基于分位数和 TOP 值等相对阈值判断时，反而容易出现对极端性的过强考虑。因此，在应
 396 用时需关注其极端性的过高估计，相较而言，IMERG 可参考性更强。

397 4 结论与讨论

398 文章基于中国气象局国家基本站日降水量观测数据，利用 2000-2023 年近 24 年资料，
 399 对 GSMaP_GNRT6、IMERG_V6E、IMERG_V6L 在华北地区夏季极端降水的适用性特征进行了分析，
 400 主要结论如下：

401 (1) 总体误差方面，GSMaP_GNRT6 呈现一致低估特征，尤以高原平原过渡区低估明显，
 402 其在高原区域相关性、均方根误差等指标均优于 IMERG；IMERG 则除高原平原过渡区低估外，
 403 其他区域以高估为主，尤其在受海陆分布影响较大的山东半岛丘陵地区显著高估，其在高原

404 平原过渡区、平原地区等地误差指标优于 GSMaP_GNRT6，其中，IMERG_V6L 较 IMERG_V6E 略
405 有改进。

406 (2) 极端降水指标方面，降水量相关指数 (R95p、R99p)，GSMaP_GNRT6 总体呈现低
407 值高估、高值低估特征，其在高原区域优于 IMERG，IMERG 总体呈现一致高估特征，其对山
408 前区域异常强极端强降水的刻画能力优于 GSMaP_GNRT6，尤以 IMERG_V6E 与地面观测最为接
409 近，相关性较高区域普遍位于高原平原过渡区；降水频次相关指数 (R20mm、R50mm)，
410 GSMaP_GNRT6 以低估为主，IMERG 较 GSMaP_GNRT6 对低估现象有所改进，尤以 IMERG_V6L 提
411 升较为明显，但其在半岛丘陵区出现高估特征，上述指数相关性较高区域普遍位于降水丰富
412 区；降水强度指数 (RX1day、RX5day)，卫星反演降水普遍存在低估现象，但 IMERG 在半岛
413 丘陵区区域内存在高估现象，尤以 IMERG_V6L 高估更明显。

414 (3) 极端强降水事件探测能力方面，卫星反演降水能在一定程度上捕捉到极端降水日，
415 但降水绝对强度普遍显著偏弱，基于百分位和 TOP 值等相对阈值时，卫星反演降水能较好体
416 现降水极端性的空间分布，但范围较地面观测偏大，相较而言，IMERG_V6L 对强降水站次探
417 测能力最优，但较 IMERG_V6E 优势不明显，GSMaP_GNRT6 则存在较大空报，总体表现也最差，
418 尤其在 99%分位及 TOP05 阈值区级上，其与 IMERG 两种产品差距较为明显。

419 尽管随着反演算法及卫星传感器的改进，卫星反演降水产品精度已有所改进，但受限
420 于卫星红外微波遥感探测及降水反演原理的局限性 (Wilheit T, 1994; Wilheit T, 2003;
421 丁明泽等, 2022)，卫星反演降水精度不可避免地受到地形、海陆分布、气候等多个因素影
422 响 (Gebregiorgis and Hossain 2013; Zhou C, 2021; Yu L, 2022; 尚明等, 2023)，如
423 Xu et al (2017) 研究表明，GPM 产品精度受地形、云雨微物理过程及其与地形相互作用
424 影响较大，Yu L et al (2022) 研究发现，IMERG 在湿润气候背景下表现优于干旱气候背景
425 下，在西部干旱地区低估极端降水明显，这些在一定程度上限制了卫星反演降水产品在极端
426 降水监测中的应用。造成上述卫星反演降水的误差来源主要包括传感器误差、反演算法误差、
427 微波红外融合算法误差等多方面 (Aksu, 2023)，了解上述误差来源，有助于理解和应用卫
428 星反演降水产品。

429 研究结果表明，无论是极端降水指标还是极端强降水集的表现来看，卫星反演降水普遍
430 面临强降水低估、地形降水刻画不足等问题，这与随着降水增强导致的被动红外和微波探测
431 能力降低有直接关系，极端降水事件中微波亮度和降水强度相关性降低 (Wilheit T, 1994)，
432 复杂地形地区降水不满足辐射亮温与降水强度相关的基本假设 (Kidd, 2010) 等卫星反演降
433 水原理局限性相关。相较而言，GSMaP 偏弱更明显，IMERG_V6L 在加入后向数据进行处理后

434 较 IMERG_V6E 略有提升,但提升不明显,基于地面站降水观测对卫星反演降水产品进行订正
435 可在一定程度上加以改进,如 Zhang D et al (2022) 研究表明,基于地面站降水订正后
436 IMERG_Final 产品较 IMERG_Late 产品在华北极端降水监测方面总体表现有所改进,但考虑
437 到 IMERG 和 GSMaP 提供的地面站点订正后产品主要基于月值资料开展(Huffman et al. 2019;
438 Shige S et al, 2009),其时空分辨率难以满足高精度降水资料需求,利用时空分辨率更
439 高的站点降水日值甚至小时值资料进行偏差订正,在卫星反演降水产品精度方面仍有较大改
440 进空间。

441 此外,具体到不同极端降水指标在不同区域的表现,GSMaP_GNRT6 和 IMERG 的两种产品
442 各有优劣,利用相对阈值开展极端强降水监测分析时,卫星反演降水容易高估极端强降水范
443 围,尤以 GSMaP_GNRT6 更为明显,这与反演过程中 99%分位以上降水值,不仅包括真实降水,
444 也与被动微波反演降水算法偏差造成的降水虚高值有关(Tashima T et al, 2020)。卫星
445 反演降水产品对极端降水具备一定空间反映能力,同时也能捕捉到部分极端降水事件,但在
446 利用卫星反演降水产品开展极端降水监测过程中,针对特定区域的特定应用,还应综合不同
447 气候背景、地形特征、降水类型等多方面的因素,建立有针对性的极端降水指标体系,这将
448 有利于用好卫星反演降水产品开展极端降水降水监测。

449 参考文献

450 陈爱军,孔宇,陆大春.2018.利用 CGDPA 评估中国大陆地区 IMERG 的降水估计精度[J].大气
451 科学学报,41(6):797-806.CHEN Aijun, KONG Yu, LU Dachun, 2018.Evaluation of the
452 precipitation estimation accuracy of IMERG over main-land China with CGDPA[J].Transactions
453 of Atmospheric Sciences, 41(6): 797-806

454
455 陈碧莹,闵锦忠.2020.华北“7·19”暴雨中低涡系统演变及多尺度相互作用机制研究[J].
456 热带气象学报,36(1):85-96. CHEN Bi-ying, MIN Jin-zhong.2022. A study on the evolution of
457 vortex system and multi-scale interaction mechanism during the "7·19" rainstorm in north china.
458 JOURNAL OF TROPICAL METEOROLOGY, 36(1): 85-96.

459
460 陈晓宏,钟睿达,王兆礼等,2017.新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区
461 的精度及水文效用评估[J].水利学报,48(10):1147-1156Chen X H, ZHONG R D, Wang Z
462 L, et al. 2017.Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation
463 GPM IMERG product over South China[J].Journal of hydraulic engineering

464
465 谌芸,孙军,徐珺等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].
466 气象,38(10):1255-1266. CHEN Yun, SUN Jun, XU Jun, et al. 2012. Analysis and Thinking on
467 the Extremes of the 21 July 2012 Torrential Rain in Beijing Part I: Observation and Thinking.
468 Meteorological Monthly, 38(10): 1255-1266.

469

470 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
471 力研究[J]. 遥感学报, 26(4): 657-671.Mingze D, Bin Y, Zekang Y. 2022. Extreme precipitation
472 monitoring capability of the multi-satellite jointly retrieval precipitation products of Global
473 Precipitation Measurement (GPM) mission[J]. National Remote Sensing Bulletin, 26(4): 657-671.
474

475 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等.2023. “23·7” 华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条
476 件初探[J].气象,49(12):1435-1450.FU Jiaolan, QUAN Wanqing, MAI Zi, et al.2023.Preliminary
477 Study on the Refined Characteristics of Rainfall Intensity and Dynamic and Thermodynamic
478 Conditions in the July 2023 Severe Torrential Rain in North China[J].Meteor
479 Mon,49(12):1435-1450
480

481 高涛, 谢立安. 2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展,
482 29(5): 577--589. Gao Tao, Xie Lian.2014. Study on Progress of the Trends and Physical causes of
483 Extreme Precipitation in China During the Last 50 Years[J]. Advances in earth science.29(5):
484 577-589
485

486 高玥, 徐慧, 刘国. 2019.GSMaP 遥感降水产品对典型极端降水事件监测能力评估 [J].遥感技
487 术与应用, 34(5): 1121-1132. Yue Gao, Hui Xu, Guo Liu.2019. Evaluation of the GSMaP
488 Estimates on Monitoring Extreme Precipitation Events[J]. Remote Sensing Technology and
489 Application, 34(5): 1121-1132
490

491 郝立生, 丁一汇. 2012.华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展[J], 31(5): 593-601. Hao L
492 S, Ding Y H.2012.Progress of Precipitation Research in North China. PROGRESS IN
493 GEOGRAPHY. 31(5): 593-601
494

495 胡庆芳, 张野, 李伶杰, 等. 2022. GPM 近实时反演数据对河南省 2021 年 “7·20” 极端暴雨
496 的比较分析[J]. 水科学进展, 33(4): 567-580. HU Qingfang, ZHANG Ye, LI Lingjie, et al.2022.
497 Comparative evaluation of GPM near-real-time precipitation products during the 20 July 2021
498 extreme rainfall event in Henan Province[J]. Advances in Water Science, 33(4): 567-580
499

500 李伶杰, 胡庆芳, 黄勇, 等, 2018.近实时卫星降水数据对南京 “20170610” 极端性强降水过程
501 的监测分析 [J]. 高原气象, 37(3) : 806—814.Li Lingjie, Hu Qingfang, Huang Yong, et
502 al.2018.Monitoring and Analysis of the Extreme Heavy Rainfall Process on June 10, 2017 in
503 Nanjing Using Five Near Real Time Satellite Rainfall Estimations. Plateau Meteorology, 37(3) :
504 806—814
505

506 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.气象,
507 41(8):970-979 .Liao Rongwei, Zhang Dongbin, Shen Yan, 2015.Validation of Six
508 Satellite-Derived Rainfall Estimates over China. 41(8):970-979
509

510 江洁, 周天军, 张文霞. 2022.近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 46(3):
511 707-724. JIANG Jie, ZHOU Tianjun, ZHANG Wenxia.2022. Temporal and Spatial Variations of
512 Extreme Precipitation in the Main River Basins of China in the Past 60 Years [J]. Chinese Journal
513 of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 707-724

514

515 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021. 2021 年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分
516 析[J]. 大气科学, 45(6): 1366–1383. RAN Lingkun, LI Shuwen, ZHOU Yushu, et al. 2021.
517 Observational Analysis of the Dynamic, Thermal, and Water Vapor Characteristics of the “7.20”
518 Extreme Rainstorm Event in Henan Province, 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences
519 (in Chinese), 45(6): 1366–1383

520

521 孙军, 张福青. 2017. 中国日极端降水和趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 47(12): 1469-1482. Sun
522 J, Zhang F Q. 2017. Daily extreme precipitation and trends over China. Science China Earth
523 Sciences, 60: 2190–2203,

524

525 肖柳斯, 张阿思, 闵超, 等. 2019. GPM 卫星降水产品在台风极端降水过程的误差评估[J]. 高
526 原气象, 38(5): 993-1003. Xiao Liusi, Zhang Asi, Min Chao, et al. 2019. Evaluation of GPM
527 Satellite-based Precipitation Estimates during Three Tropical-related Extreme Rainfall Events.
528 Plateau Meteorology, 38(5): 993-1003.

529

530 徐凡, 王莹. 2022. IMERG 卫星降水产品在我国梅雨极端降水期的适用性评估[J]. 气象与减
531 灾研究, 44(4): 280-289. Xu F, Wang Y. 2022. Evaluation of the applicability of IMERG
532 precipitation products during Meiyu extreme precipitation period of China. Meteorology and
533 disaster reduction research.

534

535 尚明, 任阳阳, 宋宏利, 等. 2023, IMERG 和 GSMaP 对中国极端降水监测能力评估[J]. 地球
536 信息科学学报, 25(9): 1813-1826. Shang M, Ren Y Y, Song H L, et al. 2023. Evaluation of
537 IMERG and GSMaP precipitation products on monitoring extreme precipitation events over
538 mainland China[J]. Journal of Geo-information Science, 25(9): 1813-1826

539

540 杨晓瑞, 曾岁康, 林志鹏. 2023, GPM 卫星降水数据对四川极端降水的监测能力评估[J]. 遥感
541 技术与应用, 38(6): 1496-1508. Xiaorui Y, Suikang Z, Zhipeng L, 2023. Evaluation of Monitoring
542 Ability of GPM Satellite Precipitation Products for Extreme Precipitation over Sichuan
543 Province[J]. Remote Sensing Technology and Application, 38(6): 1496-1508.

544

545 Aksu H, Taflan G Y, Yaldiz S G, et al. Evaluation of IMERG for GPM satellite-based
546 precipitation products for extreme precipitation indices over Turkiye[J]. Atmospheric Research,
547 2023, 291: 106826.

548

549 Draper D W, Newell D A, Wentz F J, et al. 2015. The Global Precipitation Measurement (GPM)
550 Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance [J]. IEEE Journal
551 of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 8(7): 3452-3462

552

553 Gebregiorgis, A.S., Hossain F., 2013. Estimation of satellite rainfall error variance using readily
554 available geophysical features. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 52, 288–304

555

556 He, Z., L. Yang, F. Tian, G. Ni, A. Hou, 2017. Intercomparisons of Rainfall Estimates from
557 TRMM and GPM Multisatellite Products over the Upper Mekong River Basin [J]. Journal of

558 Hydrometeorology, 18 : 701—722
559
560 HUANG, Chaoying, et al, 2019. How well can IMERG products capture typhoon extreme
561 precipitation events over southern China?. Remote Sensing, 2019, 11.1, 70.
562
563 Huffman G.J., Adler R.F., Bolvin D.T., Nelkin, E.J. (2010). The TRMM Multi-Satellite
564 Precipitation Analysis (TMPA). In: Gebremichael, M., Hossain, F. (eds) Satellite Rainfall
565 Applications for Surface Hydrology. Springer, Dordrecht.
566
567 Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al.2019. Algorithm theoretical basis document
568 (ATBD) version 06[J]. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-Satellite
569 Retrievals for GPM (IMERG), NASA. Available online: [https://pmm. nasa.](https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm)
570 [gov/data-access/downloads/gpm](https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm) (accessed on 4 December 2019),16-17
571
572 IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. In Contribution of Working Groups I, II and III to
573 the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing
574 Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland,2014; p. 151.
575
576 Joyce, Robert J., et al. 2004.CMORPH: A method that produces global precipitation estimates
577 from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. Journal of
578 hydrometeorology 5.3: 487-503.
579
580 Kidd C, Levizzani V. Status of satellite precipitation retrievals[J]. Hydrology and Earth System
581 Sciences, 2011, 15(4): 1109-1116
582
583 Kidd C, Kniveton D, Kummerow C, et al. 1994. Al gorithms for the retrieval of rainfall from
584 passive microwave mea surements. Remote Sensing Reviews, 11(1/4): 163-194
585
586 Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998.The tropical rainfall measuring mission (TRMM)
587 sensor package[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,15(3): 809-817
588
589 Mazzoglio P, Laio F, Balbo S, et al.2019. Improving an extreme rainfall detection system with
590 GPM IMERG data[J]. Remote Sensing, 11(6): 677.
591
592 Naud C M, Jeyaratnam J, Booth J F, et al.2020. Evaluation of modeled precipitation in oceanic
593 extratropical cyclones using IMERG[J]. Journal of Climate, 33(1): 95-113
594
595 Nepal B., Shrestha D., Sharma S., Shrestha M.S., et al,2021. Assessment of GPM-Era Satellite
596 Products' (IMERG and GSMaP) Ability to Detect Precipitation Extremes over Mountainous
597 Country Nepal. Atmosphere 2021, 12, 254.
598
599 Prakash S., Mitra A. K., AghaKouchak, et al. 2018.A preliminary assessment of GPM-based
600 multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region [J] . Journal of
601 Hydrology, 556: 865-876

602

603 Shige S, Yamamoto T, Tsukiyama T, et al.2009. The GSMaP precipitation retrieval algorithm for
604 microwave sounders—Part I: Over-ocean algorithm[J]. IEEE transactions on geoscience and
605 remote sensing, 47(9): 3084-3097

606

607 Sorooshian S., Hsu K.L., Gao X., et al. 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based
608 estimates of tropical rainfall. Bull. Am. Meteorol. Soc. 81 (9), 2035–2046.

609

610 SOLOMON, Susan (ed.), 2007.Climate change 2007-the physical science basis: Working group I
611 contribution to the fourth assessment report of the IPCC . Cambridge university press.

612

613 Tan J., Petersen W.A., Tokay A., 2016. A novel approach to identify sources of errors in IMERG
614 for GPM ground validation. J. Hydrometeorol. 17 (9), 2477–2491.

615

616 Tashima T, Kubota T, Mega T, et al. 2020. Precipitation extremes monitoring using the
617 near-real-time GSMaP product[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations
618 and Remote Sensing, 13: 5640-5651.

619

620 Wilheit T, Kummerow C D, Ferraro R. 2003. NASDARainfall algorithms for AMSR-E. IEEE
621 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2): 204-214

622

623 Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H., Hou, A., 2017. Ground validation of GPM IMERG and
624 TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain
625 gauge network. J. Geophys. Res. Atmos. 122, 910–924

626

627 Yu L, Leng G, Python A. 2022.A comprehensive validation for GPM IMERG precipitation
628 products to detect extremes and drought over mainland China[J]. Weather and Climate Extremes,
629 36: 100458.

630

631 Zhang D, Yang M, Ma M, et al.2022. Can GPM IMERG capture extreme precipitation in North
632 China Plain?[J]. Remote Sensing, 14(4): 928.

633

634 Zhou C, Gao W, Hu J, et al. Capability of imerg v6 early, late, and final precipitation products
635 for monitoring extreme precipitation events[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 689

636

637

638

639

640

641

642

643

644 **Evaluation of the Applicability of Satellite-Derived Precipitation in**
645 **Monitoring Extreme Precipitation in North China**

646 CHEN Shuang CHEN Tao FU Jiaolan CHEN Yun

647 National Meteorological Centre, Beijing 100081, China

648 **Abstract**

649 Strengthening the monitoring and analysis of extreme precipitation is crucial for early
650 warning of disaster weather. Based on daily precipitation data from the national basic stations of
651 China Meteorological Administration from 2000 to 2023, the applicability of three
652 near-real-time daily products of GPM for monitoring extreme precipitation in North China
653 during summer is analyzed from the perspectives of extreme precipitation indices and extreme
654 heavy precipitation events. The results indicate that: 1) IMERG products tend to overestimate
655 precipitation, particularly in the Shandong Peninsula, with IMERG_V6L showing a more
656 pronounced overestimation, in contrast, GSMaP_GNRT6 tends to underestimate precipitation,
657 especially in the foothill regions.2)Precipitation amount and intensity indices generally exhibit
658 higher correlations in the transitional regions between mountains and plains compared to other
659 areas, while precipitation duration and heavy precipitation frequency indices show relatively
660 lower correlations in these regions, and in regions with more precipitation, the correlations are
661 higher than in regions with less precipitation.3) satellite-derived precipitation can capture
662 extreme precipitation days, with IMERG_V6L performing the best, however, the absolute
663 intensity of precipitation is generally significantly underestimated. Using relative thresholds
664 such as percentiles and TOP values can reflect the spatial distribution of extreme precipitation,
665 but there is an issue of overestimation in the spatial extent, with GSMaP_GNRT6 showing the
666 most pronounced overestimation.Overall, IMERG and GSMaP have potential for application in
667 monitoring and analyzing extreme precipitation in North China during summer, but different
668 products should be distinguished and applied according to different regions and application
669 scenarios.。

670 **Key words:** satellite-derived precipitation; GPM; extreme precipitation; monitoring and analysis;
671 applicability characteristics