

郑倩,顾振海,马依依,等. GPM 反演降水数据 IMERG 在浙江省的适用性研究[J]. 山地气象学报,2024,48(1):38–45.

GPM 反演降水数据 IMERG 在浙江省的适用性研究

郑倩,顾振海,马依依,龚理卿,王健疆*

(浙江省衢州市气象局,浙江 衢州 324000)

摘要:【目的】为了研究全球降水测量计划(GPM)综合多卫星检索降水产品(IMERG)在浙江省的适用性。【方法】以浙江省为研究区域,基于浙江省自动观测站降水数据,利用相关系数、均方根误差、相对偏差、分类指数统计法分别从年尺度、季尺度、月尺度、日尺度以及小时尺度分析 GPM 在浙江省的适用性。【结果】(1)春、秋、冬季的 GPM 和自动站对应效果远好于夏季,月尺度、日尺度、小时尺度下 GPM 和自动站降水数据对应效果较好,但整体上存在高值区略低估、低值区略高估现象;(2)年尺度与季尺度下 GPM 与自动站降水平均值的变化趋势一致,但 GPM 降水平均值较高,其中秋季表现最好;(3)年、月、日 3 个尺度下,尺度越精细化,相关系数越高、相对偏差越小,均方根误差越小;小时、日、月 3 个尺度下,降水阈值越低,产品尺度越粗糙,估测能力越高;降水阈值越低,产品尺度越精细,误报降水的比例越低;降水阈值越低,综合探测能力越高;(4)小时尺度下,在 $0.5 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间,GPM 虽然对降水事件略有高估,但拟合效果较好。【结论】综合来看,GPM 日尺度降水数据产品精度在浙江省有较大应用潜力。

关键词:GPM;反演降水;适用性;浙江省;IMERG

中图分类号:P414.9 **文献标识码:**A

Research on Applicability of GPM Retrieved Precipitation Data IMERG in Zhejiang Province

ZHENG Qian, GU Zhenhai, MA Yiyi, GONG Liqing, WANG Jianjiang*

(Quzhou Meteorological Office of Zhejiang Province, Quzhou 324000, China)

Abstract: To study the applicability of Global Precipitation Measurement Program (GPM) integrated multi-satellite Retrieval of Precipitation Product (IMERG) in Zhejiang Province, this article analyzes the applicability of GPM on the yearly, seasonal, monthly, daily and hourly scales in Zhejiang Province by using the correlation coefficient, root mean square error, relative deviation and classification index statistical methods as well as the precipitation data of the automatic weather stations in Zhejiang Province. The results show that: (1) The corresponding effects of GPM and automatic weather station data in spring, autumn and winter are far better than that in summer. The corresponding results of GPM and automatic station precipitation data on the monthly, daily and hourly scales are relatively better, but overall the high-value areas are slightly underestimated and the low-value areas are slightly overestimated. (2) On the yearly and seasonal scales, the variation trends of GPM and automatic station average precipitation are consistent, but the GPM precipitation average is higher, with the value for autumn is the best. (3) On the three scales of year, month and day, the finer the scale, the higher the correlation coefficient, the smaller the relative deviation, and the smaller the root mean square error. On the three scales of hour, day and month, the lower the precipitation threshold, the rougher the product scale, and the higher

收稿日期:2023-11-03

第一作者简介:郑倩(1994—),女,硕士,工程师,主要从事卫星资料分析、大气物理与大气环境研究,E-mail:770586517qq@sina.cn。

通讯作者简介:王健疆(1979—),女,硕士,高工,主要从事中短期天气预报工作,E-mail:jjwwork@126.com。

资助项目:衢州市科技局指导性科技攻关项目(2022115)。

the estimation ability; the lower the precipitation threshold, the finer the product scale, and the lower the false alarm rate; the lower the precipitation threshold, the higher the comprehensive detection capability. (4) On the hourly scale, in the range of $0.5 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, the GPM slightly overestimates the precipitation events, but the fitting effect is better. In summary, the GPM daily precipitation data has a bigger application potential in Zhejiang Province.

Key words: global precipitation measurement (GPM); retrieved precipitation data; applicability; Zhejiang Province; integrated multi-satellite retrieval of precipitation products (IMERG)

0 引言

降水是大气水循环中非常重要的一个环节,在各种时空尺度的大气过程中都有重要作用,因此准确且快速获取降水数据对气象方面的研究尤为重要^[1]。近年来浙江省的干旱或洪涝趋势增强、风险加大^[2],且浙江省地形较为复杂,而降水量易受大尺度环流和局地地形的影响^[3]。由于卫星遥感监测能够获得连续、大范围且比较准确的降水数据^[4],已逐渐成为气象领域的一个重要研究方向。然而,尽管 IMERG 降水产品为研究降水提供了新的机遇,但其在地形和空间差异时存在精度差异,仍需根据地面观测评估精度^[5],因此有必要对其在浙江的适用性进行研究。

多年来,基于卫星遥感的降水产品已被广泛应用于研究中^[6-8],例如热带降雨观测卫星 (TRMM) 多卫星降水分析 (TMPA) 等。GPM 任务于 2014 年 2 月 27 日启动,搭载的双频率测雨雷达 (DPR) 和被动微波传感器 (GMI) 可提供全球雨雪观测^[9]。在广泛使用的 TMPA 产品取得成功的基础上,新发布的 GPM 综合多卫星检索 (IMERG) 产品大大提高了时空分辨率和雨雪估计^[10]。随着 GPM 卫星降水产品的出现,国内外学者对 GPM 降水数据开展了初步研究。吴琼等^[11]和张晔祺等^[12]分别对 GPM 双频降水探测雷达 (DPR) 对降雪的探测能力和降水结构特征进行分析,发现 DPR 具有较好的对弱降水和降雪的探测能力,且对强降水和弱降水的反演能力都较强。Jiang 等^[13]、陈凤娇等^[14]和刘益锋等^[15]分别在我国南方、我国中东部和福建省比较了 GPM 的 IMERG 和 TRMM 的 3B42RT、TMPA 和 3B42 产品的精度,结果表明 GPM 具有更好的适用性。此外, GPM 产品的适用性还在韩国^[16]、新加坡^[17]、非洲^[18]等国家和地区进行了验证。

目前,对于 IMERG 的研究大多是与上一代卫星 TRMM 的降水产品或是与 GPM 的另一个产品全球降水卫星制图 (GSMaP) 进行对比,针对 IMERG 的不同时间尺度产品分析较少,而且 GPM 卫星降水产

品 IMERG 在浙江的评估和应用仍然比较缺乏,本研究弥补了以上不足,便于研究者对浙江省降水资料的选择和使用。

1 资料与方法

1.1 研究区域

本文的研究区域为浙江省,位于 $118^{\circ}01' \sim 123^{\circ}10'E$ 、 $27^{\circ}02' \sim 31^{\circ}11'N$,地势由西南向东北呈梯状倾斜,属于季风性湿润气候,年平均降水量由东北向西南逐步递增。由图 1(a) 可以发现浙江省大体上由山地、丘陵、盆地和平原组成。

1.2 降水数据

(1) 本研究的地面降水数据来自于浙江省自动气象探测信息业务系统,时间为 2014 年 9 月—2019 年 8 月,时间分辨率为 1 h,共有 3 338 个自动站和 102 个基本站 (图 1b)。

(2) 集成多卫星检索 IMERG 是 GPM 核心天文台启动后发布的 2 种高分辨率多卫星降水产品之一。它结合了几颗卫星的观测结果,在降水数据的质量和时空分辨率方面比 TMPA 有所改进。选取的 GPM 卫星降水数据 IMERG 包括 GPM_3IMERGHH 06 (时间为 2019 年 6 月 6—8 日,时间分辨率为 0.5 h)、GPM_3IMERGDF 06 (时间为 2015 年,时间分辨率为 1 d)、GPM_3IMERGM 06 (时间为 2014 年 9 月—2019 年 8 月,时间分辨率为 1 月),空间分辨率均为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

1.3 方法介绍

GPM 和地面降水数据有不同的时间和空间尺度,在进行对比分析之前要对数据进行预处理。首先,在时间尺度上对地面降水数据进行累计,处理成逐日 (2015 年)、逐月 (2014 年 9 月—2019 年 8 月)、逐季 (2014 年秋季—2019 年夏季)、逐年 (2015—2018 年) 的地面降水数据。卫星降水数据也需要在时间尺度上进行累计,月产品数据 GPM_3IMERGM 06 处理成逐季 (2014 年秋季—2019 年夏季) 和逐年 (2015—2018 年) 的卫星降水数据。在进行空间分布特征分析时,需要在空间尺度上将地面

降水数据插值到卫星降水数据的格点场,得到 2 组格点数据。

为了定量评估 GPM 卫星降水产品 IMERG 反演的精确度,需要对卫星反演降水与实测降水的偏离程度和卫星反演降水数据对真实降水事件的辨识能力进行分析,这可以通过统计偏差指标和分类评

价指标来评估。此前,程立真等^[19]对这 2 种指标已归纳总结,本文所采用的统计偏差包括相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、相对偏差(BIAS);分类指标包括降水检测率(POD)、降水报错率(FAR)、关键成功数(CSI)。

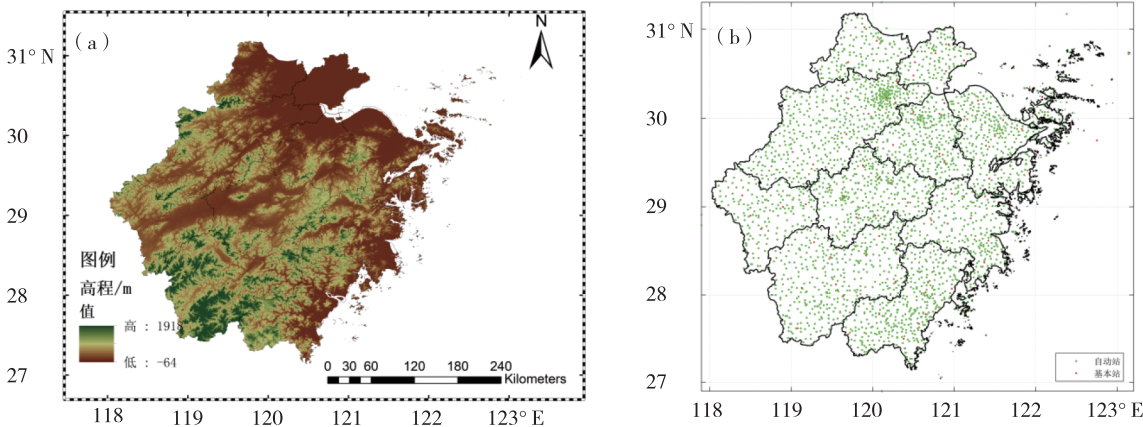


图 1 浙江省数字高程模型(DEM,a)和自动站及基本站站分布图(b)

Fig. 1 Distribution of digital elevation model (DEM,a), automatic and basic weather stations of Zhejiang Province(b)

2 结果分析

2.1 不同时间尺度下空间分布特征

2.1.1 年尺度 对 2015—2018 年 4 a 的降水量做平均,得到 GPM 和自动站年平均降水量空间分布图(图 2)。可以看出 GPM 反演降水与自动站降水空间分布差异较大。年降水总量上,GPM 年降水量主

要分布在 1 500 ~ 2 200 mm,而自动气象站的降水量则主要集中在 1 000 ~ 1 800 mm。在年均降水总量的对应分布上存在较大差异。究其原因,GPM 主要利用双频率测雨雷达(DPR)和被动微波传感器(GMI)联合反演来估算降水,而地面观测站直接测量降水,自动站和基本站的维护程度不一致等都会导致这一差异。

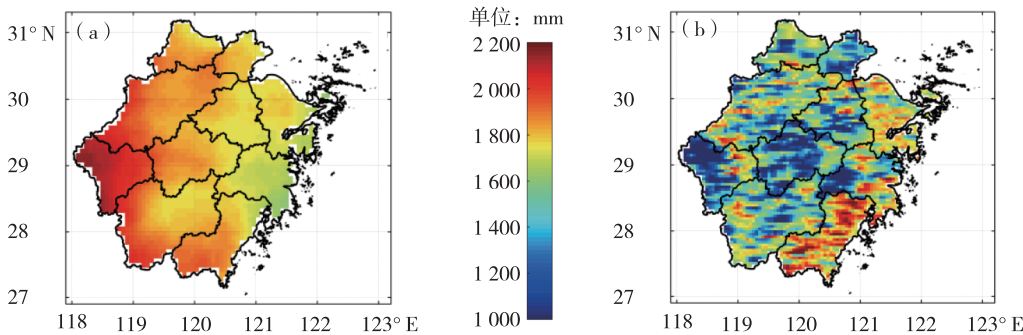


图 2 2015—2018 年浙江省 GPM(a)和自动站(b)年平均降水量分布

Fig. 2 Distribution of annual average precipitation from GPM (a) and automatic weather station (b) in Zhejiang Province from 2015 to 2018

2.1.2 季尺度 对 2015 年秋季—2019 年春季的数据按季节做平均,得到 GPM 和自动站季平均降水量空间分布图(图略)。季节分布,春、秋、冬季 GPM 和自动站的空间对应关系较好,夏季的空间对应关系较差。这有可能是因为夏季降水较多,实测的降

水数据波动较大^[20]。而 GPM 卫星能更好捕捉到夏季降水但误差也相对较大,表明 GPM 卫星对夏季降水的探测能力有限,这和金晓龙等^[21]对 GPM 在天山山区适用性的研究结果是一致的。

2.1.3 月尺度 对 2015 年 9 月—2019 年 8 月的数

据做平均,得到 GPM 和自动站年平均降水量空间分布图(图 3)。虽然在月均降水总量上有所差异,但 GPM 反演降水与自动站降水空间对应分布大体一致,即浙西南地区降水量较多,东北部地区降水量较少。这与吴昊旻等^[2]对浙江省不同强度降水日

数的时空分布特征的研究结果一致。受地形等差异影响,省内自动站月降水量分布也有所差异,存在降水量空间分布的不连续现象,而 GPM 卫星降水数据则表现出较好的空间连续性,这和李蒙等^[22]对 TRMM 卫星降水产品的研究结果也是一致的。

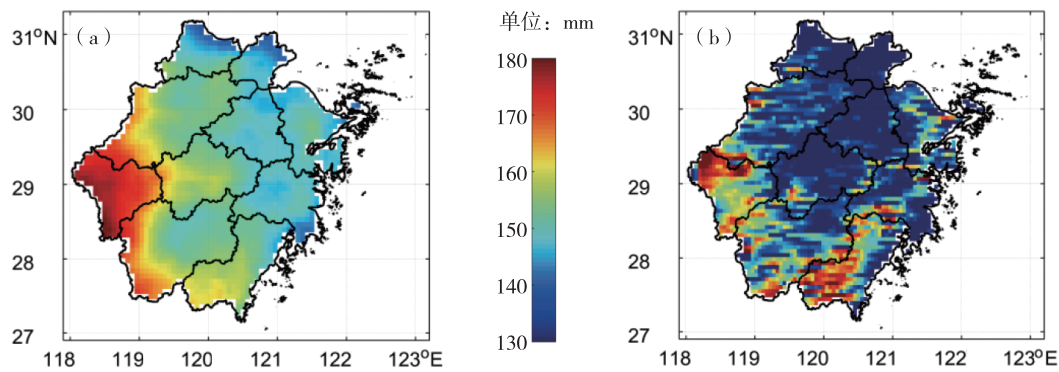


图 3 2014 年 9 月—2019 年 8 月浙江省 GPM(a)和自动站(b)月平均降水量分布
Fig. 3 Distribution of monthly average precipitation from GPM (a) and automatic weather station (b) in Zhejiang Province from September 2014 to August 2019

2.1.4 日尺度 对 2015 年 365 d 的数据做平均,得到 GPM 和自动站日平均降水量空间分布图(见图 4)。日均降水量的空间分布与月均降水量的空间分布较为相似,虽然在日均降水总量上有所差异,但 GPM 反演降水与自动站降水空间对应分布大

体一致,即浙江西部地区降水量较多,东部地区降水量较少。但 GPM 和自动站降水量的空间分布特征在具体细节上还存在差异,这主要是受对流层低层环流的变化和复杂的云雨形成及演变过程的影响^[23]。

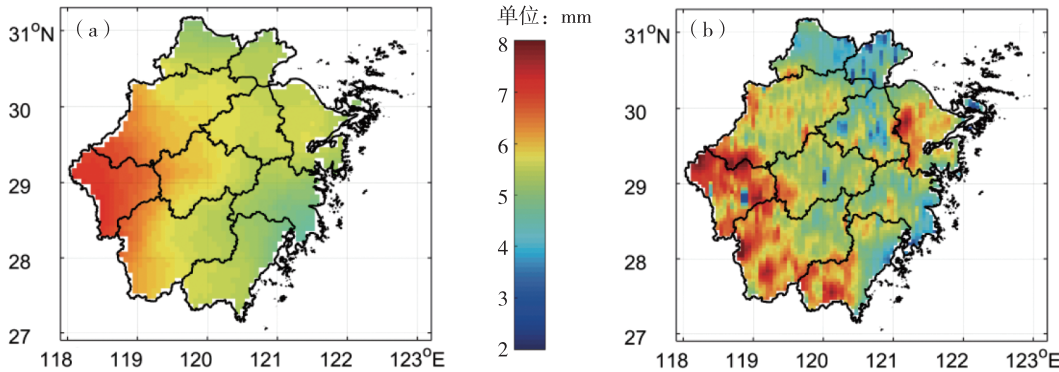


图 4 2015 年浙江省 GPM(a)和自动站(b)日平均降水量分布
Fig. 4 Distribution of daily average precipitation from GPM (a) and automatic weather station (b) in Zhejiang Province in 2015

2.1.5 小时尺度 2019 年 6 月 6—8 日期间浙江江山发生了一次灾害性暴雨天气,分析此时段内的小时尺度的 GPM 与自动站空间对应情况(图 5)有助于评估该卫星产品小时尺度的精度。由此图可以看出,GPM 降水卫星能较为准确地呈现江山降水的空间位置,但在降水量级上估值较低,同时还判断浙江南部地区也存在一些高值区,这是自动站实际没有呈现的。结合浙江省地形(图 1a)可以发现,

这可能与江山暴雨的水汽来源以及地形对此次降水的阻挡效应有关^[24-25]。

2.2 年尺度与季尺度下平均值对比

将浙江省的 GPM 降水数据和自动站数据处理为年均降水量并逐年对比(图 6),可以发现二者总体趋势一致,但 GPM 反演年降水总体高于自动站实测,且平均高 252. 425 mm。

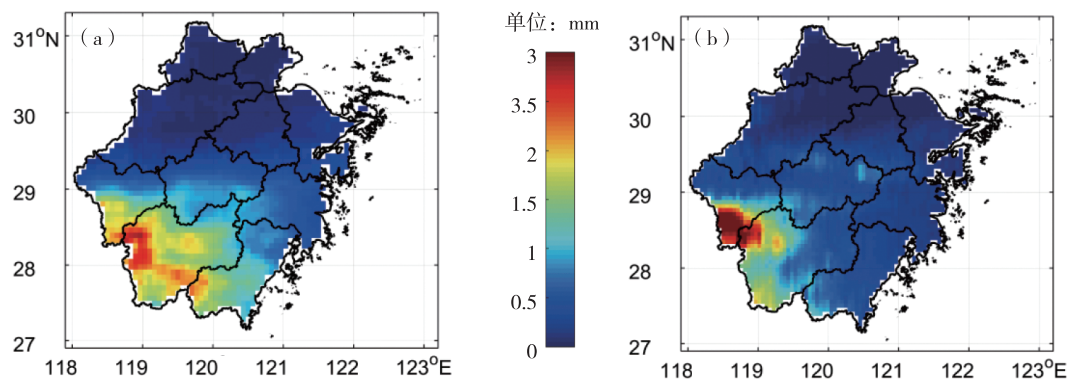


图 5 2019 年 6 月 6 日—6 月 8 日浙江省 GPM(a)和自动站(b)小时平均降水量分布

Fig. 5 Distribution of hourly average precipitation from GPM (a) and automatic weather station (b) in Zhejiang Province from June 6 to 8, 2019

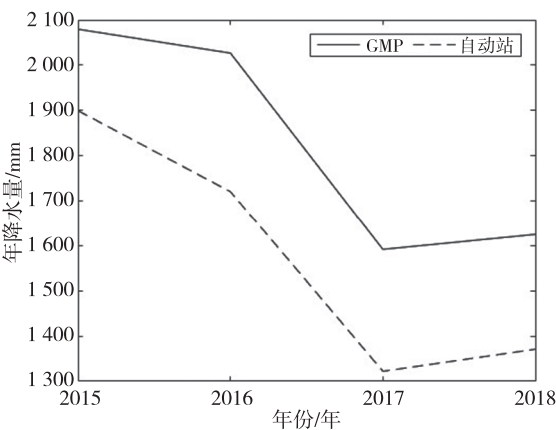


图 6 2015—2018 年浙江省 GPM 和自动站年平均降水量逐年分布

Fig. 6 Year - to - year distribution of annual average precipitation from GPM and automatic weather stations in Zhejiang Province from 2015 to 2018

将浙江省的 GPM 降水数据和自动站数据处理为季均降水量并逐年对比(图 7),可以发现二者虽然存在一定误差,但总体趋势一致,且不论春夏秋冬四个季节,GPM 反演降水数据均高于自动站数据。其中,春季 GPM 反演降水与气象站反演降水的平均值偏差最大,而秋季最小。这说明在浙江省 GPM 秋季季均降水量的精度最高。

2.3 不同时间尺度下统计偏差及分类评价

对浙江省 GPM 降水数据和自动站数据分别从年、季、月、日、小时尺度做一元线性回归分析,并进行统计偏差分析(图 8)。从相关系数 CC 看,年、月、日、小时尺度的相关系数依次为 -0.2、0.543 8、-0.623 9、0.793 2,因此时间尺度越精细化,GPM 和自动站的相关性越高,数据一致性;春夏秋冬四季尺度的相关系数依次为 0.200 3、-0.030 9、0.676 4、

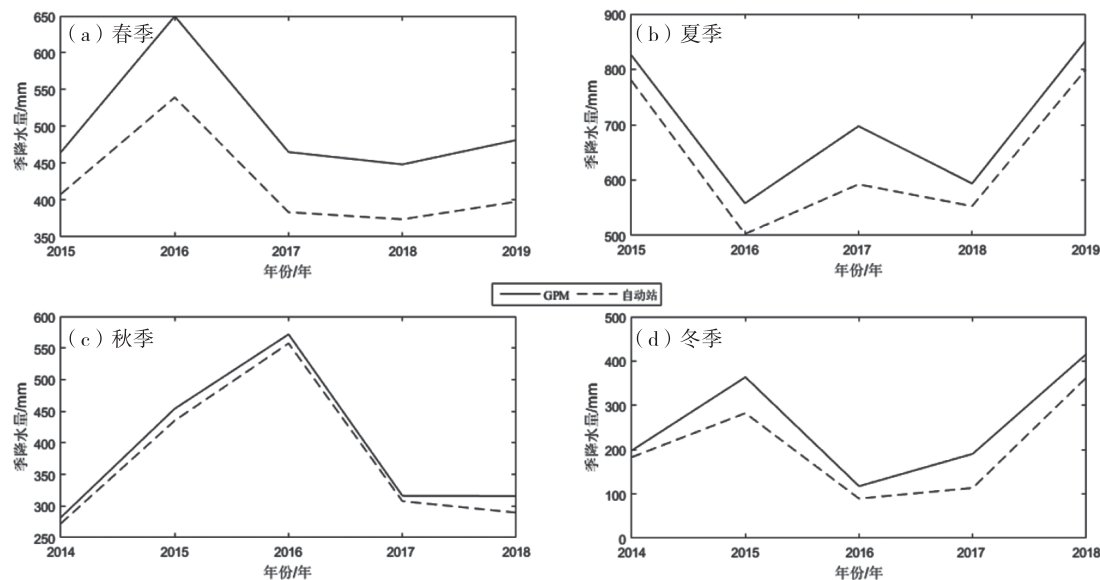


图 7 2014 年秋季—2019 年夏季浙江省 GPM 和自动站季平均降水量逐年分布

Fig. 7 Year - to - year distribution of seasonal precipitation from GPM and automatic weather stations in Zhejiang Province from autumn 2014 to summer 2019

0.103 5,因此秋季 GPM 和自动站的相关性较高。从相对偏差 BIAS 看,年、月、日、小时尺度的相对偏差依次为 21.312 3%、14.843 0%、4.568 7%、42.166 8%,从年尺度到日尺度,时间尺度越精细,GPM 和自动站的相对偏差越小,而小时尺度的相对偏差较高,这可能是由于 GPM 高估了浙南地区的降水事件导致的;春夏秋冬四季尺度的相对偏差依次为 23.785 9%、10.851 9%、27.267 7%、13.123 0%,因此夏季和冬季 GPM 和自动站的相对偏差较小,春秋两季的相对偏差较大。从均方根误差 RMSE 来

看,年、月、日、小时尺度的均方根误差依次为 482.597 2 mm、28.37 mm、0.798 5 mm、0.446 7 mm,将各尺度的均方根平均到日发现从年尺度到日尺度,时间尺度越精细化,GPM 和自动站的均方根误差越小,而小时尺度的均方根误差较高,这和相对偏差是一致的;春夏秋冬四季尺度的均方根误差依次为 144.91 mm、124.417 1 mm、105.985 5 mm、52.614 4 mm,因此冬季 GPM 和自动站的均方根误差最小。

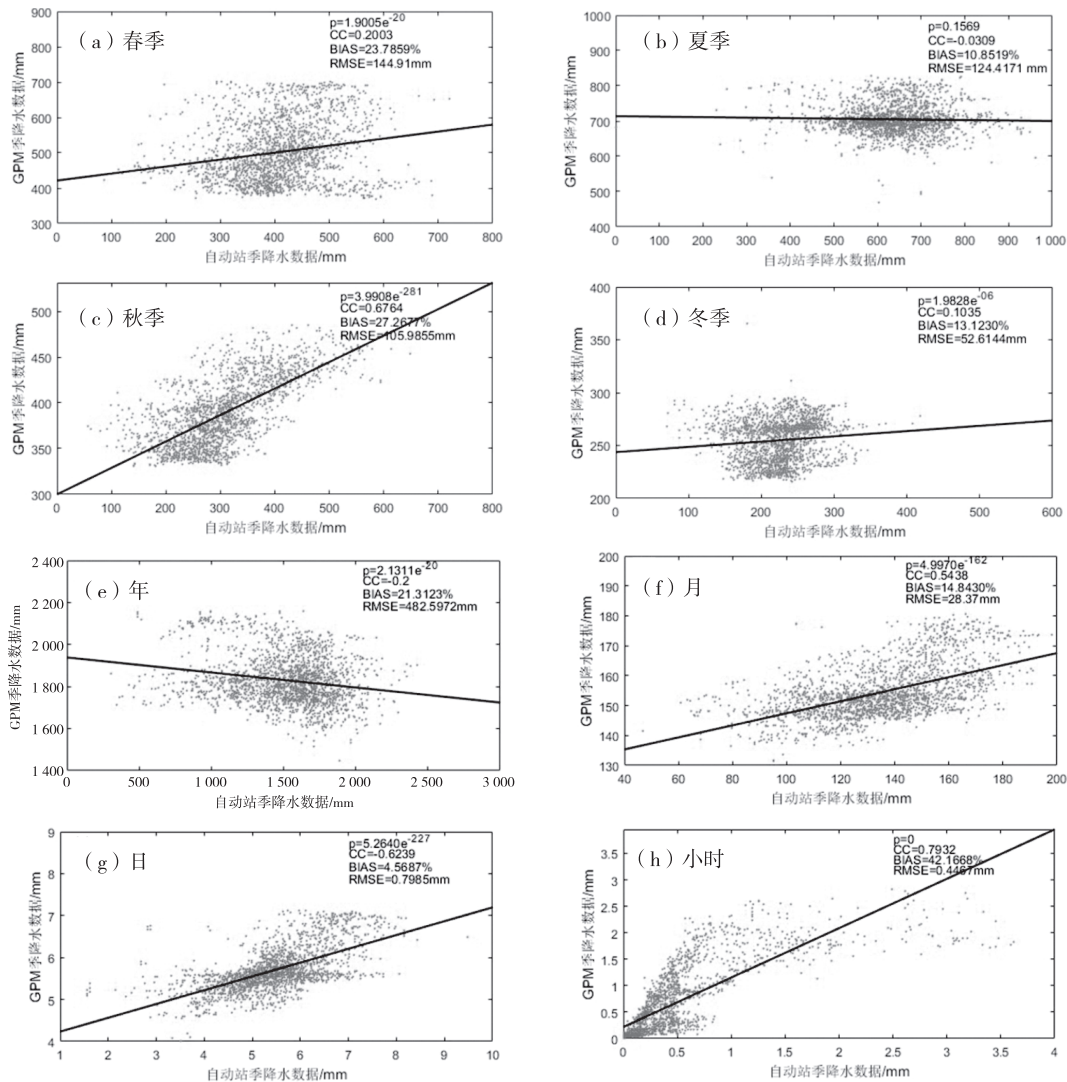


图8 不同时间尺度浙江省 GPM 和自动站降水数据散点图(春:a、夏:b、秋:c、冬:d、年:e、月:f、日:g、小时:h)
Fig. 8 Scatter plots of precipitation data from GPM and automatic weather station in Zhejiang Province on different time scales
spring (a), summer(b), autumn(c), winter(d), yearly(e), monthly(f), daily(g), hourly(h)

以 $0.2\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.175\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.15\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 作为是否发生降水事件的阈值,并根据 POD、FAR、CSI 的计算公式计算分类评价指数。表 1 为 3 种阈值下 GPM 小时、日、月尺度卫星产品的分类评价指数 POD、FAR、CSI。3 种产品尺度的 POD 值都

随着降水阈值的减小而增加,且均呈现出较高的 POD 值(0.9~1)。但同一阈值下,随产品尺度精细化,POD 值有所下降。小时和日尺度的 FAR 值随降水阈值的减小而减小,月尺度的 FAR 值则略有不同,但 3 种产品尺度的 FAR 值均呈现出较低

值(0.01~0.4)。除0.15 mm·h⁻¹阈值下日尺度出现 FAR 值低于小时尺度这一情况,其他情况下同一阈值,随产品尺度精细化,FAR 值下降。小时和日尺度的 CSI 值随降水阈值的减小而增加,月尺度的

CSI 值则随降水阈值的减小而下降,且均呈现较高的 CSI 值(0.6~1)。同一阈值下,CSI 值随产品的精细化程度变化呈现不同的变化。

表 1 GPM 降水产品小时降水数据在不同阈值下的各分类评价指数

Tab. 1 Classification indexes of hourly precipitation data of GPM precipitation products under different thresholds

阈值/(mm·h ⁻¹)	产品尺度	产品	POD	FAR	CSI
0.2	小时	GPM_3IMERGHH 06	0.901 2	0.105 9	0.814 3
	日	GPM_3IMERGDF 06	0.995 8	0.202 8	0.794 5
	月	GPM_3IMERGM 06	0.998 7	0.376 8	0.991 4
0.175	小时	GPM_3IMERGHH 06	0.910 4	0.078 5	0.844 9
	日	GPM_3IMERGDF 06	1	0.093 9	0.906 1
	月	GPM_3IMERGM 06	1	0.139 0	0.861 0
0.15	小时	GPM_3IMERGHH 06	0.921 2	0.067 5	0.863 6
	日	GPM_3IMERGDF 06	1	0.030 5	0.969 5
	月	GPM_3IMERGM 06	1	0.357 9	0.642 1

2.4 不同等级降水强度误差检验

卫星降水产品的精度表现出与降雨强度的强依赖性,了解不同降雨强度上卫星反演降水的误差特征可为极端天气的研究提供参考^[26]。进一步研究在格点尺度下,小时尺度 GPM 卫星反演降水和自动站观测降水不同雨强的频率分布(图 9)。从小时降水量的分布来看,在 0~0.5 mm·h⁻¹ 区间内,GPM 的频率为 72.20%,而自动站的频率为 56.35%,GPM 卫星反演降水高估该区间的降水量。在 0.5~1 mm·h⁻¹ 区间内,GPM 和自动站的频率分别为 16.47% 和 18.23%,可见 GPM 和自动站降水数据在此区间内拟合较好。随着雨强区间增大,在 1~2.5 mm·h⁻¹ 区间内,GPM 对该区间的降水量存在不同程度的低估。当雨强区间增大到 2.5~3 mm·h⁻¹ 时,GPM 和自动站的频率分别为 1.05% 和 0.72%,GPM 卫星反演降水对该区间的降水量略有高估。当雨强区间继续增大到 3~4 mm·h⁻¹,GPM 对该区间的估计为 0.90% 和 0.10%,而实际自动站的频率仅为 0。从 GPM 和自动站雨强的频率看来,GPM 卫星降水产品在 0~0.5 mm·h⁻¹ 和 2.5~3 mm·h⁻¹ 区间上高估了降水事件,在 0.5~2.5 mm·h⁻¹ 区间上低估了降水事件。其中,在 0.5~1 mm·h⁻¹ 区间 GPM 虽然对降水事件略有高估,但拟合效果较好。而 3~4 mm·h⁻¹ 区间上存在少量误报降水事件。综合看来,除了过度检测强降水事件的趋势外,GPM 卫星产品具有较好的检测降水的水平以及反映干旱和暴雨等极端天气的能力。

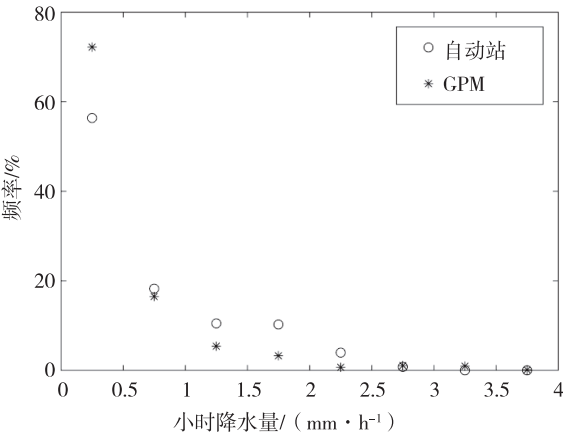


图 9 2019 年 6 月 6—8 日浙江省 GPM 和自动站小时降水量频率分布

Fig.9 Frequency distribution of hourly precipitation from GPM and automatic weather stations in Zhejiang Province from June 6 to 8, 2019

3 结论与讨论

基于浙江省自动站逐小时观测降水数据,对 GPM 卫星降水数据在不同时间尺度进行适用性分析,得到以下主要结论:

(1)在空间对应关系方面,年尺度下,GPM 和自动站降水数据差异较大;季节尺度下,整体上 GPM 卫星降水数值高于自动站数据,但春、秋、冬季的 GPM 和自动站对应效果远好于夏季;月尺度、日尺度、小时尺度下两者对应效果较好,但整体上存在

高值区略低估,低值区略高估现象。

(2)年尺度与季尺度下 GPM 与自动站降水平均值的变化趋势一致,但 GPM 降水平均值较高。在季节尺度下,秋季的降水平均值 GPM 与自动站最为一致。

(3)在统计偏差方面,年尺度、月尺度、日尺度 3 个尺度越精细,相关系数越高、相对偏差越小,均方根误差越小;而由于 GPM 对江山暴雨事件发生范围的过高估计,其小时尺度的相对偏差和均方根误差均相对较大;在季尺度下,秋季的相关系数最高,夏季的相对偏差最小,冬季的均方根误差最小。在分类评价方面,在小时、日、月 3 个尺度下,降水阈值越低,产品尺度越粗糙,估测能力越高;降水阈值越低,产品尺度越精细,误报降水的比例越低;降水阈值越低,综合探测能力越高。

(4)GPM 卫星产品表现出较好的检测降水的水平以及反映干旱和暴雨等极端天气的能力。在小时尺度下,在 $0.5 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间,GPM 虽然对降水事件略有高估,但拟合效果较好。

参考文献

- [1] YU R C, LI J, CHENG H M, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 72(5): 948 – 968.
- [2] 吴昊旻, 廖必军, 蔡寿强. 浙江省不同强度降水日数的时空分布特征[J]. *干旱气象*, 2012, 30(3): 360 – 366.
- [3] 程志刚, 王俊锋, 宾昕, 等. TRMM 3B42 降水产品在秦巴山区的适用性研究[J]. *水文*, 2019, 39(6): 46 – 51.
- [4] 张蒙, 黄安宁, 计晓龙, 等. 卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(1): 34 – 42.
- [5] WANG Z, ZHONG R, LAI C, et al. Evaluation of the GPM IMERG satellite – based precipitation products and the hydrological utility [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 196: 151 – 163.
- [6] 孙燕, 严文莲, 尹东屏, 等. 江苏冬季降水相态气候分布特征及预报方法探讨[J]. *气象科学*, 2013, 33(3): 325 – 332.
- [7] 杨云川, 程根伟, 范继辉, 等. 四川盆地及周边地区 TRMM 3B42 数据精度检验[J]. *气象科学*, 2013, 33(5): 526 – 535.
- [8] 何其全, 史岚, 谭璐璐, 等. 中国中东部区域 TRMM 降水产品降尺度研究及其时空特征分析[J]. *气象科学*, 2019, 39(3): 312 – 321.
- [9] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(5): 701 – 722.
- [10] LIU Z. Comparison of integrated multi – satellite retrievals for GPM (IMERG) and TRMM multi – satellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products: initial results [J]. *Journal of Hydro Meteorology*, 2016, 17(3): 777 – 790.
- [11] 吴琼, 仰美霖, 窦芳丽. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析[J]. *气象*, 2017, 43(3): 348 – 353.
- [12] 张晁祺, 傅云飞. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. *大气科学*, 2018, 42(1): 33 – 51.
- [13] JIANG S, REN L, XU C Y, et al. Statistical and hydrological evaluation of the latest Integrated Multi – satellite Retrievals for GPM (IMERG) over a mid latitude humid basin in South China [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 214: 418 – 429.
- [14] 陈凤娇, 李迎新, 高金兰, 等. IMERG 和 TMPA 降水产品在夏季中国中东部的检验[J]. *气象*, 2019, 45(12): 1680 – 1690.
- [15] 刘益锋, 汪小钦, 吴思颖, 等. GPM 与 TRMM 卫星降雨数据在福建省的适用性对比分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 311 – 316.
- [16] KIM K, PARK J M, BAIK J J, et al. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far – East Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 187(5): 95 – 105.
- [17] TAN M L, DUAN Z. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 720 – 736.
- [18] DEZFULI A K, ICHOKU C M, HUFFMAN G J, et al. Validation of IMERG precipitation in Africa [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(10): 2817 – 2825.
- [19] 程立真, 杨梅学, 王学佳, 等. TRMM 3B42 降水产品在洮河中上游的精度评估分析[J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 185 – 195.
- [20] 王思梦, 王大钊, 黄昌. GPM 卫星降水数据在黑河流域的适用性评价[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1847 – 1861.
- [21] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2074 – 2085.
- [22] 李蒙, 秦天玲, 刘少华, 等. 怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品资料时空验证及降水特征分析[J]. *高原气象*, 2017, 36(4): 950 – 959.
- [23] 王颖, 刘丹妮, 张玮玮, 等. 2004—2016 年浙江省夏季降水的日变化特征[J]. *干旱气象*, 2019, 37(1): 1 – 9.
- [24] 李琼, 杨梅学, 万国宁, 等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 620 – 633.
- [25] WANG X, PANG G, YANG M, et al. Precipitation changes in the Qilian Mountains associated with the shifts of regional atmospheric water vapour during 1960—2014 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(12): 4355 – 4368.
- [26] 曾岁康, 雍斌. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1305 – 1318.