

GPM IMERGE 卫星遥感降水数据在巢湖流域的精度评价

程 扬^{1,2}, 郭 燕^{1,2}, 齐鹏云³, 万能胜³, 赖锡军¹

(1.中国科学院 南京地理与湖泊研究所 中国科学院 流域地理学重点实验室, 南京 210008;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.安徽省巢湖管理局湖泊生态环境研究院, 合肥 230000)

摘 要:以处于湿润区的巢湖流域为研究区,利用 120 个地面站点 2016 年 1 月至 2017 年 2 月的实测降水数据,评估了 GPM IMERGE 降水数据在研究区的适用性和分布规律。结果显示:(1) GPM 产品对巢湖流域降水的估测能力总体较高。日尺度上,GPM 产品均表现出较高的线性相关性($R>0.78$)和较低的均方根误差($RMSE<8.62$ mm),但对降水存在一定程度的高估($BIAS>9.52\%$)。在季节尺度上,GPM 数据与地面站点数据在夏季相关性最高($R>0.8$),但均方根误差也最高($RMSE>13.8$ mm)。(2) 降水强度对 GPM 产品的探测精度存在影响,降水强度过低(0.1 mm/d)或过高(50 mm/d)对 GPM 的探测能力均有削弱。(3) 流域中部 GPM 数据和地面站点降水量的相关性较边缘更高;准实时产品在流域西南部绝对误差较大,但经地面站点校正后的 GPM-F 产品在流域内绝对误差分布较平均;流域内多数站点的 GPM 数据高估了降水。(4) 相比准实时产品,经地面站点校正的 GPM-F 产品在秋冬季和高强度降水中的精度较准实时 GPM-E 和 GPM-L 产品均有提升,但导致了更严重的高估情况。因此,在选择 GPM 产品进行流域降水分析及水文模拟时,应结合时效性要求、研究的时间尺度和降水强度等条件综合考量,并在研究流域做适当精度评估后选用。

关键词:GPM; 降水数据; 巢湖流域; 精度评价

中图分类号:P412.27; P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0188-06

Analysis of Accuracy of GPM IMERGE Precipitation Data in Chaohu Basin

CHENG Yang^{1,2}, GUO Yan^{1,2}, QI Pengyun³, WAN Nengsheng³, LAI Xijun¹

(1.Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. Institute of Lake Eco-environment, Chaohu Administration of Anhui, Hefei 230000, China)

Abstract:The precipitation products from January 2016 to February 2017 in Chaohu Basin were compared with the corresponding data measured with rain gauges from 120 meteorological stations to evaluate the applicability of three GPM IMERGE products (early-run, late-run and final-run). The results show that: (1) on the daily scale, the products show high linear correlation ($R>0.78$) and low absolute error ($RMSE<8.9$ mm), but exhibit overestimated ($BIAS>9.52\%$); on the seasonal scale, the GPM data and the observed data show the highest linear correlation ($R>0.8$) and the highest absolute error ($RMSE>13.8$ mm) in summer, which indicates that abundant precipitation can improve the accuracy of GPM products but heavy rain also leads to large absolute error; (2) rain intensity has a certain degree of influence on the detection accuracy of GPM products; too weak (0.1 mm/d) or too heavy (50 mm/d) rainfall leads to the reduced detection capability; (3) the linear correlation in the middle of the basin is higher than the other area; the absolute error of the near-real-time products is large in the southwest of the basin, but more average as to GPM-F products; GPM data from most stations in the basin overestimate the precipitation; (4) no matter in autumn and winter or in heavy rainfall, the accuracy of GPM-F products is improved compared with that of

收稿日期:2019-02-27

修回日期:2019-11-23

资助项目:国家水体污染控制与管理重大专项“巢湖派河小流域水污染综合治理与湖体富营养化管控关键技术应用推广项目”(2017ZX07603)

第一作者:程扬(1994—),女,江苏扬州人,硕士,主要研究方向为水文与水资源。E-mail:chengyang16@mails.ucas.ac.cn

通信作者:赖锡军(1977—),男,浙江遂昌人,博士,研究员,硕士生导师,主要研究方向为环境水力学。E-mail:xjlai@niglas.ac.cn

near-real-time GPM-E and GPM-L products; but GPM-F product makes a more serious overestimation. Therefore, timeliness, time scale and rainfall intensity should be comprehensively considered when GPM products are used for basin precipitation analysis or hydrological simulation.

Keywords: GPM; precipitation data; Chaohu Basin; accuracy evaluation

降水是水循环过程的重要环节之一,在时空分布上具有显著的变异特征^[1]。同时,降水也是水文模型不可缺少的输入变量,在流域尺度水文学研究中,准确获取高时间、空间分辨率的降水信息是流域水文模型精度的重要保证^[2]。

传统的降水观测主要通过雨量计和雷达两种方式进行,但两种方法在应用时均存在不足。雨量计能够准确的观测到地面点的降水情况,但雨量站的布设密度和位置等条件会对数据的精度造成一定的限制和影响^[3],而目前国内建立的遥测雨量站和气象站密度并不能满足现实的需求^[4];雷达降水在地形复杂地区由于信号遮挡、回波不确定性等问题的存在,探测精度也不能得到有效保证^[5]。近年来,随着航空航天技术、遥感技术以及数据反演算法的发展,卫星降水观测以其高时空分辨率的降水观测产品逐渐成为了新的降水数据来源^[6],如 CMORPH(Climatic Prediction Center Morphing Technique)^[7]、GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)^[8]、TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)^[9]等卫星降水产品已广泛被用于水文水资源以及气候变化等领域的应用中。

GPM 降水计划是继 TRMM 之后新一代全球卫星降水产品,根据其数据反演算法提供了 4 种级别的产品,其中三级产品 IMERGE(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)提供了高时空分辨率的全球降水数据。作为 TRMM 卫星的继承和发展,GPM 对降水的探测在时间、空间分辨率上均有所提升^[10]。但由于 GPM 卫星产品面世时间较短,国内对 GPM 降水数据在各流域的探测精度及适用情况研究尚不足够^[11-12]。

本文将具有代表性的 GPM 三级产品 IMERGE v05 B 选为研究对象,该产品提供给 3 种不同时效性、不同精度的数据:early-run(下文以 GPM-E 表示)发布于观测后 4 h,late-run(下文以 GPM-L 表示)发布于观测后 12 h,final-run(下文以 GPM-F 表示)发布于观测后两个月,三组产品校准次数依次增加,且 GPM-F 经过了地面雨量站观测数据的校准,理论上具有更高的精度^[10]。本文以巢湖流域为研究区域,以地面站点降水数据为对照,分别对 GPM 的三组产品在湿润区的应用精度进行评估。

1 研究区域、资料与方法

1.1 研究区域

巢湖流域(116°26′00″—118°29′52″E, 30°56′21″—32°16′00″N)位于安徽省中部,长江淮河之间,总面积 1.35 万 km²,地跨合肥、芜湖、六安、马鞍山、安庆等五市 16 县市区,是安徽省会经济圈主体。巢湖流域气候类型为亚热带湿润性季风气候,四季分明,流域年平均温度为 16~16.5℃。降水量适中,年均降水量 1 100 mm 左右,主要集中在夏季,梅雨显著。巢湖流域连接着江淮丘陵地带以及沿江平原区,流域内地形以丘陵、平原为主。巢湖是区域内最大的湖泊,位于流域中部,是我国第五大淡水湖。巢湖流域内河网密布,主要分属于杭埠—丰乐河、南淝河、派河、柘皋河、兆河、白石天河、裕溪河等 7 大水系,其中杭埠河和裕溪河分别为入湖和出湖水量最大的河流。

1.2 数据来源及预处理

本研究使用的降水数据时段从 2016 年 1 月 1 日至 2017 年 2 月 28 日。其中,GPM 产品数据下载自美国国家宇航局(<https://pmm.nasa.gov/>),数据格式为 netCDF,数据的时间分辨率为 0.5 h;空间分辨率为 0.1°×0.1°,覆盖范围 60°S~60°N;而作为评估的对比参考数据,本文使用的地面站点降水数据来源于安徽省气象局,包括巢湖流域庐江、无为、舒城、巢湖闸下、肥西、合肥、肥东等 120 个站点的逐日的降水数据,站点空间分布如图 1 所示。

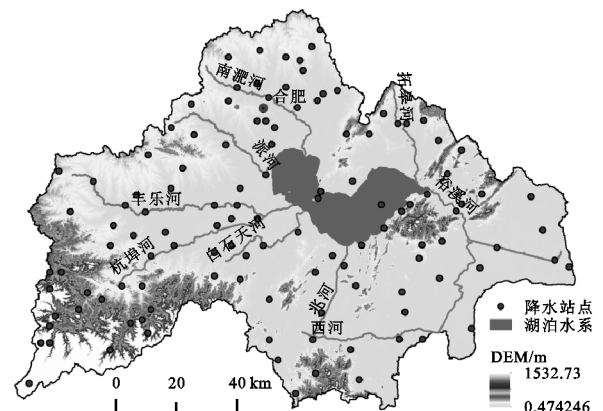


图 1 研究区域及地面降水站点分布

数据预处理过程如下:(1) 将 netCDF 数据集格式转换为便于进行空间处理的 TIFF 数据集。(2) 将对应时间段的 0.5 h 降水数据累加成为逐日降水数据。

(3) 由于气象站点观测数据较少,插值成空间数据后误差较大,因此选择利用 ArcGIS 软件基于地面站点的坐标提取出 GPM 数据对应栅格的降水数据,在站点尺度上对数据精度进行评价。

1.3 评估指标

本文采用定量分析方法和分类统计指标两种评价方式对 GPM 产品的数据精度进行评价。

(1) 定量分析方法。定量指标反映 GPM 卫星降水数据与地面站点数据在数量上的一致性,包括以下几个指标:

相关系数 R :用于衡量卫星降水数据和地面观测数据之间的线性相关程度;取值范围 $[-1,1]$,绝对值越大,相关性越强。

$$R = \frac{\sum (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

均方根误差 RMSE:用于衡量卫星降水数据的绝对误差,对特大特小误差反映敏感;取值范围 $[0, +\infty]$,值越小,误差越小。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

相对误差 BIAS:用于衡量卫星降水数据的相对误差,能够表现数据的偏离的方向;取值范围 $[-1,1]$,绝对值越小,误差越小,大于 0 表示高估降水量,小于 0 表示低估降水量。

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O_i}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n$; n 为样本总量; S_i, O_i 分别为 GPM 降水量和地面站点降水量序列; \bar{S}, \bar{O} 分别为 GPM 降水量和地面站点降水量序列均值。

(2) 分类评分指标。分类评分指标反映 GPM 卫星降水产品对不同降水事件的检测能力,包括以下几个指标:

探测率 POD:用于衡量对降水事件的探测能力;取值范围为 $[0,1]$,值越大,说明 GPM 产品对降水事件的成功探测的程度越高。

$$\text{POD} = \frac{H}{H+M} \quad (4)$$

空报率 FAR:用于衡量降水事件被错误预测的概率;取值范围为 $[0,1]$,值越小,说明 GPM 产品对降水的误报程度越小。

$$\text{FAR} = \frac{F}{H+F} \quad (5)$$

频率偏差 B :用于衡量降水事件是否被高估或低估;取值范围为 $[0, +\infty]$, $B>1$ 说明 GPM 产品高估了降水事件; $B<1$ 说明 GPM 产品低估了降水事件。

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

公正先兆评分 ETS:用于衡量对降水的综合探测能力。取值范围为 $[-1/3,1]$,值越大,说明 GPM 产品对降水的综合探测能力越强。

$$\text{ETS} = \frac{H - H_s}{H+M+F-H_s} \quad (7)$$

$$H_s = \frac{(H+M)(H+F)}{H+M+F+Z} \quad (8)$$

式中: H 为卫星产品准确探测到的降水事件数; F 为误报的降水事件数; M 为漏报的降水事件数; Z 为卫星降水和地面观测数据均未发生该强度降水事件数。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度精度评价

2.1.1 日尺度 绘制流域内 120 个站点 2016 年 1 月至 2017 年 2 月的 GPM 数据和地面站点数据的散点图并进行相关分析(图 2)。结果显示,GPM-E 产品的相关系数 $R=0.79$,斜率 $K=0.70$;GPM-L 产品的相关系数 $R=0.63$,斜率 $K=0.72$;GPM-F 产品的决定系数 $R^2=0.66$,斜率 $K=0.84$,三组数据的决定系数均通过 $p<0.01$ 的显著性检验,表明 3 种 GPM IMERGE 降水产品与地面降水数据在整体上均具有较高的一致性。比较 3 种产品的决定系数可以发现,随着校准次数的增加,GPM 产品精度也略有递增。

相关系数只能表示卫星降水数据与地面站点数据整体的一致性,而不能有效反映差异量的大小,因此,计算各 GPM 产品的精度评价指标,结果见表 1。3 种产品的均方根误差 RMSE 相差不大,分别为 8.59 mm,8.44 mm 和 8.62 mm。而相对误差 BIAS 指标显示,GPM 产品对降水均存在一定程度的高估,其中 GPM-E 和 GPM-F 产品对降水相对高估了 9.52% 和 9.75%,而 GPM-L 产品对降水的观测相对偏高 23.15%。

2.1.2 季节尺度 巢湖流域降水年内分布不均,夏季降水最多,梅雨显著,冬季降水最少,因此有必要对 GPM 数据进行季节尺度上的精度评价。将巢湖流域 2016 年 3 月至 2017 年 2 月的降水数据按 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12 月一次年 2 月依次划分为春季、夏季、秋季和冬季进行分析。由于 2016 年巢湖流域地面站点降水数据缺失值集中在秋季,因此在进行季节降水量精度评估时仅选取庐江、无为、舒城、巢湖闸下、肥西、合肥、肥东等无数据缺失的 7 个站点以季节内各站点降水总量的平均值代表整个流域的季节总降水量,并计算 GPM 各降水产品在各季节内的精度评价指标(图 3)。

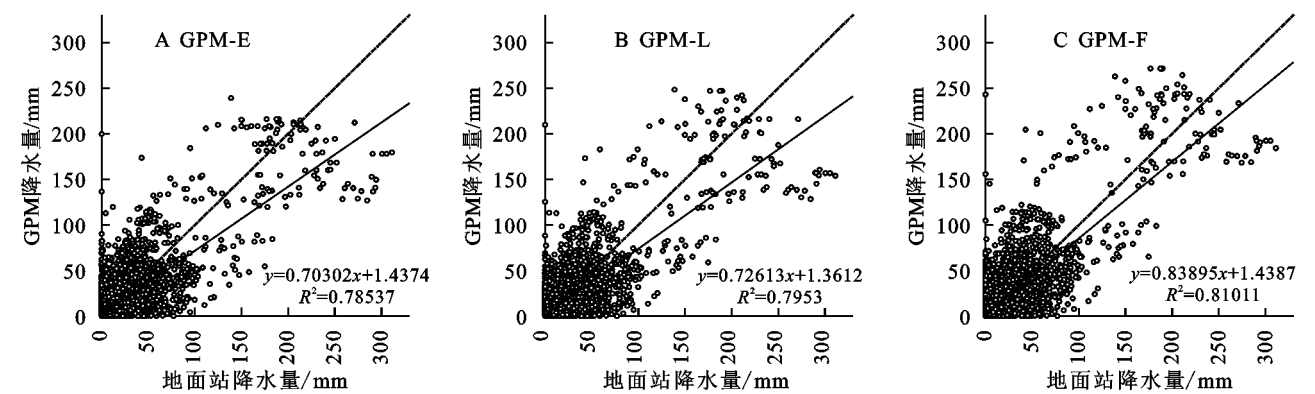


图2 GPM产品与地面站日降水量散点图

表1 GPM 日降水序列总体精度评价指标

产品	GPM_E	GPM_L	GPM_F
RMSE/mm	8.59	8.44	8.62
BIAS/%	9.52	9.75	23.15

从图 3A 可见,巢湖流域 2016 年夏季降水最多,其次为秋季和春季,冬季降水最少。对于 2016 年各季节降水量,GPM 产品在降水较少的春季和冬季高于地面站点实测降水,而在夏、秋两季,准实时产品 GPM-E 和 GPM-L 低于地面降水,校正后的非实时 GPM-F 产品高于地面站点降水。图 3B 显示,各产品各季节的相关性都较高($R>0.7$),其中,在降水最多的夏季,3 种 GPM 降水产品与地面降水数据之间的线性相关程度也最高($R>0.8$)。值得注意的是,秋、冬两季 GPM-E,GPM-L,GPM-F 3 种产品的相关系数依次递增,可能的原因是 GPM 卫星产品对微量降水及以冰雪形态出现的固态降

水探测存在较大误差,而 GPM-F 产品经地面站点校正,有效弥补了该方面不足。图 3C 显示,3 种 GPM IMERGE 产品的均方根误差 RMSE 均与降水量大小表现出一致的趋势,夏季最高,春冬两季较低,可能是由于巢湖流域夏季降水多且多以强降水形式出现,给卫星精确地观测降水带来极大地挑战,而春冬两季降水较少且强度较低,降水量总体变化不大,RMSE 的值就相对较低。图 3D 显示,GPM-E,GPM-L 两种准实时产品的相对误差 BIAS 趋势一致,在降水较少的春冬两季表现为高估,而在降水较多的夏秋两季表现为高估,其中在夏季误差最小($<2\%$)。而 GPM-F 产品对 4 个季节的降水量估计均偏高,具体表现为春季相对误差最大,冬季相对误差最小。3 种产品相比,经地面站点校正后的 GPM-F 产品相对与准实时的 GPM-E 和 GPM-L 产品,其探测精度在冬季表现出绝对的优势。

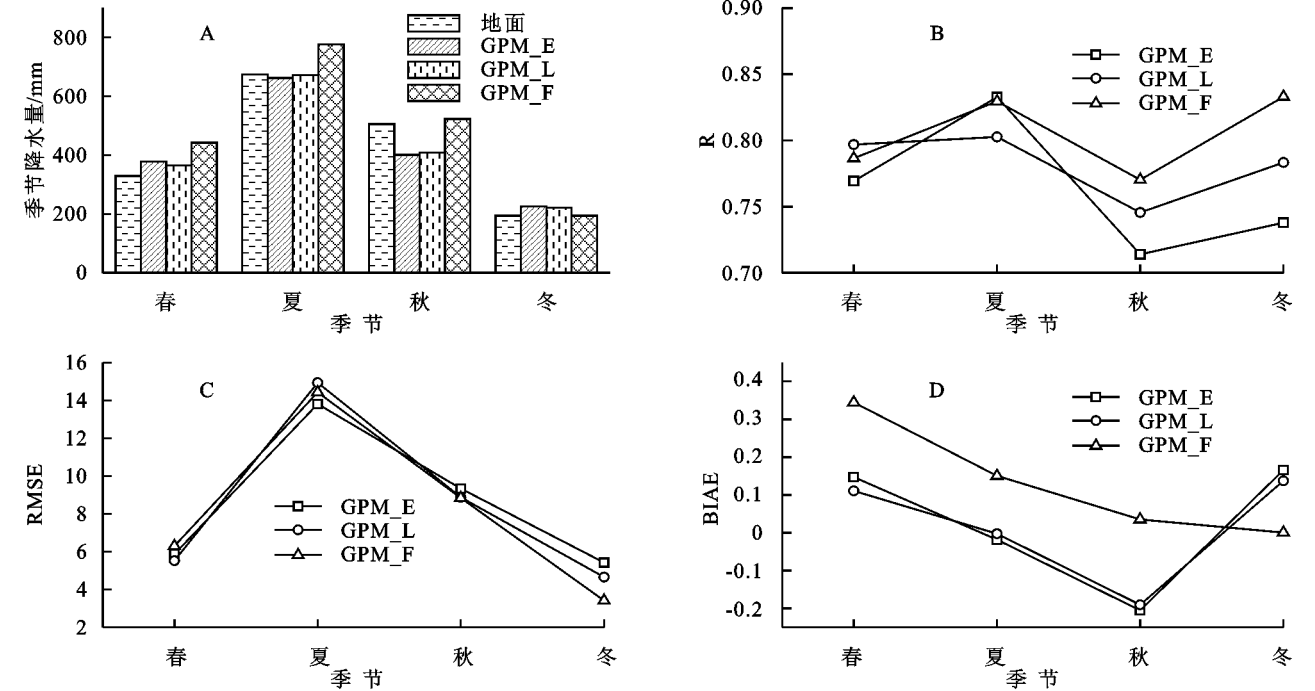


图3 季节降水量及评价指标

2.2 不同强度降水精度评估

从上文的分析结果来看,降水强度对 GPM 产品

的精度有一定程度的影响,因此引入分级评价指标探测率 POD、空报率 FAR、频率偏差 B 和公正先兆评

分 ETS 等指标定量地对降水强度的影响进行评价。

根据天气学对降水量等级的划分规定和巢湖流域的降水强度情况,选取 0.1 mm/d, 10 mm/d, 25

mm/d, 50 mm/d 4 个阈值将降水划分为无雨、小雨、中雨、大雨、暴雨级以上几个等级,分别计算各等级降水的分级评价指标(表 2)。

表 2 GPM 产品对不同强度降水观测精度分级评价指标

雨强	POD				FAR				B				ETS			
	0.1	10	25	50	0.1	10	25	50	0.1	10	25	50	0.1	10	25	50
GPM-E	0.79	0.63	0.49	0.38	0.48	0.45	0.45	0.55	1.52	1.14	0.90	0.85	0.21	0.37	0.33	0.25
GPM-L	0.79	0.64	0.52	0.41	0.46	0.44	0.44	0.52	1.48	1.16	0.93	0.85	0.23	0.37	0.35	0.28
GPM-F	0.79	0.66	0.61	0.50	0.45	0.48	0.45	0.48	1.44	1.26	1.11	0.96	0.24	0.36	0.38	0.34

总体来看,降水强度对 GPM 产品对降水探测的能力有一定影响。对于探测率 POD,GPM 产品对是否降雨(0.1 mm/d)的探测率最高,达 0.79,而随着降雨强度的增大,GPM 产品对相应强度降水的探测率逐渐降低。空报率 FAR 显示,GPM 产品对 50 mm/d 的降水存在最多的误报可能。从频率偏差指标 B 可以看出,GPM 产品对 10 mm/d 以下的小雨表现为高估,且对 0.1 mm/d 的少量降水高估最严重;而对 50 mm/d 的强降水表现为低估。综合以上 3 个指标并结合 ETS 指标可以发现,GPM 产品对 0.1 mm/d 和 50 mm/d 的降水探测精度低于 10 mm/d 和 25 mm/d 强度的降水,说明降水强度过低或过高对 GPM 产品的探测精度均有一定程度的影响。

3 种不同时效性产品相比,总体上,随着校正次数的增加,GPM 产品的精度越高。特别是对于 50 mm/d 的高强度降水,GPM-F 产品经地面站点数据校正后,相比 GPM-E 和 GPM-L 产品探测精度提升明显。

2.3 不同站点数据精度

降水受不同气象要素和地理要素的影响,在空间上表现出较强的空间异质性,有必要对巢湖流域内各站点的数据精度分别进行分析^[13]。因此,基于研究区内 120 个地面气象站点的日降水量分别计算 3 种 GPM 产品的精度评价指标,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,绝大部分地面站点降水量和 GPM 产品降水量之间的相关系数较高,进一步验证了在巢湖流域 GPM 卫星降水数据与地面站点数据存在明显的一致性。流域中部站点相关系数较高而流域边缘地区相对稍低,天苍、瑶海磨店、张桥水库、众兴水库、众兴等个别站点相关系数低于 0.6,说明这些站点 GPM 与地面站点数据之间的线性关系较弱。其中,除天苍站位于流域西南的大别山区外,其他几个站点均集中于流域北端长丰县和肥东县交界区域,其可能原因为该区域内成像雷达像元内的降水不均匀,导致遥感产品与地面站点实测降水在时空检测尺度上不匹配^[14]。另外,GPM-F 产品相对于两准实时

产品来说,流域中部的相关系数明显提升,表明经过地面站点的校正后,GPM-F 产品在流域中部地区与实测降水数据有更高的一致性。

分析 3 种 GPM 产品在各站点的绝对误差分布图可以发现,GPM-L 产品与 GPM-E 产品相比绝对误差略有降低但不明显,且两准实时产品的绝对误差均在流域东南部最大,近半数站点的绝对误差都在 10 mm 以上。而 GPM-F 产品的绝对误差在全流域没有明显的分布特征,其数据在流域东南部绝对误差明显低于两准实时产品,但在其他站点也出现了绝对误差过大的情况,考虑可能的原因为 GPM-F 产品相较 GPM-E 和 GPM-L 产品经历了更多校正方案的处理,不同的校正算法导致了 GPM-F 产品在流域内误差分布情况不同于准实时产品。

BIAS 指标反映了 GPM 产品日降水数据偏离实测降水量的程度,对于 GPM-E 和 GPM-L 产品,有 93 个站点在流域内的 BIAS 值大于 0,占总站点数的 77.5%,说明该产品在巢湖流域大部分站点对降水的估计表现为高估。而 GPM-F 产品在 120 个站点中仅有 8 个站点的 BIAS 低于 0,即经过更多校正处理后,GPM-F 产品在巢湖流域对降水的估计偏高更加严重。

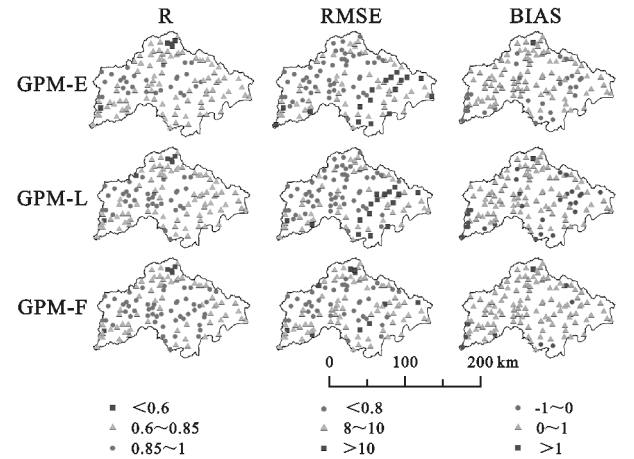


图 4 各站点评价指标

综合以上分析,流域中部 GPM 数据和地面站点降水量的相关性较边缘更高;准实时产品在流域西南部绝对误差较大,但经地面站点校正后的 GPM-F 产

品在流域内绝对误差分布较平均;流域内多数站点的 GPM 数据高估了降水,且校正后的 GPM-F 产品在更多站点表现出高估。

3 结论

(1) GPM IMERGE 产品对巢湖流域降水的估测能力总体较高,但在不同的时间尺度下的探测精度表现不一。日尺度方面,GPM IMERGE 产品均表现出较高的线性相关性($R>0.78$)和较低的均方根误差($RMSE<8.6\text{ mm}$),而相对误差检验则显示了 GPM 产品对降水一定程度的高估,其中,两准实时产品高估低于 10%,而非实时 GPM-F 产品存在 23.15% 的高估。在季节尺度上,GPM 数据与地面站点数据在夏季拥有最高的线性相关性($R>0.8$)和最高的均方根误差($RMSE>13.8\text{ mm}$),说明丰富的降水能够带来 GPM 数据精度的提高,但暴雨也导致了较大的绝对误差。

(2) 降水强度对 GPM IMERGE 产品的探测精度存在一定程度的影响。随着降雨强度的增大,GPM 产品对相应强度降水的探测率逐渐降低,同时,GPM 产品对 50 mm/d 的降水存在最多的误报可能。GPM 产品容易高估 10 mm/d 以下的小雨,而低估 50 mm/d 的强降水。总体来看,GPM 产品对 10 mm/d 的降水综合探测能力最强,降水强度过低或过高对 GPM 的探测精度均有一定程度的影响,但对 50 mm/d 的暴雨的探测能力最弱。

(3) 各站点验证结果表明,流域中部 GPM 数据和地面站点降水量的相关性较边缘更高;准实时产品在流域西南部绝对误差较大,但经地面站点校正后的 GPM-F 产品在流域内绝对误差分布较平均;流域内多数站点的 GPM 数据高估了降水。

(4) 经地面站点校正的 GPM-F 产品在秋冬季和高强度降水中的精度较准实时 GPM-E 和 GPM-L 产品均有提升,但导致了更高的高估。因此,在选择 GPM 产品进行流域降水分析及水文模拟时,因结合时效性要求、研究的时间尺度和降水强度等条件综合考量,并在研究流域做适当精度评估后选用。

参考文献:

[1] Marzano F S, Cimini D, Montopoli M. Investigating precipitation microphysics using ground-based microwave remote sensors and disdrometer data[J]. Atmos-

pheric Research, 2010, 97(4): 583-600.

[2] Immerzeel W W, Rutten M M, Droogers P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(2): 362-370.

[3] Villarini G, Krajewski W F. Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges[J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(7): 1015-1023.

[4] 吕洋,杨胜天,蔡明勇,等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1414-1425.

[5] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615.

[6] 陈晓宏,钟睿达,王兆礼,等. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156.

[7] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 487-503.

[8] Tian Y, Peters-Lidard C D, Adler R F, et al. Evaluation of GSMaP precipitation estimates over the contiguous United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(2): 566-574.

[9] Su F, Hong Y, Lettenmaier D P. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis(TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(4): 622-640.

[10] A. Y. Hou, R. K. Kakar, S. Neeck, et al. The Global Precipitation Measurement Mission[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(5): 701-722.

[11] 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.

[12] 杨雨蒙,杜鹃,程琳琳. TRMM 卫星降雨数据在湖南省的精度和可靠性评定[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 26-32.

[13] 董国涛,樊东,杨胜天,等. GPM 与 TRMM 降雨数据在黄河流域适用性分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 81-87.

[14] 魏志明,岳官印,李家,等. GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 171-176.