

# GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究

魏志明<sup>1</sup>, 岳官印<sup>2</sup>, 李家<sup>1</sup>, 吕天阳<sup>3</sup>

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. Esri 中国信息技术有限公司, 北京 100027; 3. 大连国家海域使用动态监视监测管理中心, 辽宁 大连 116011)

**摘要:** [目的] 对 GPM 与 TRMM 降水产品在海河流域的测量精度进行对比研究, 以评估 TRMM 及 GPM 数据在海河流域的适用性。[方法] 以海河流域为研究区, 利用 35 个气象站点 2014 年 4—10 月的实测降水量数据在月时间尺度上对两代降水产品利用决定系数  $R^2$  和相对误差 BIAS 进行精度评价。[结果] (1) 卫星降水产品与气象台站实测降水量决定系数从 TRMM 数据的 0.758 2 提升至 GPM 数据的 0.760 7, 斜率  $K$  从 TRMM 数据的 0.810 5 提升至 GPM 的数据的 0.833 5。(2) TRMM 与 GPM 降水产品差别较小, 虽两者均轻微低估了降水量, 但整体上精度较高且 GPM 略优于 TRMM。[结论] GPM IMERG 降水产品在海河流域月尺度的高空间分辨率水文分析方面具有很好的应用前景。

**关键词:** GPM; TRMM; 降水数据; 精度评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)02-0171-06

中图分类号: P412.27

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.026; Wei Zhiming, Yue Guanyin, Li Jia, et al. Comparison Study on Accuracies of Precipitation Data Using GPM and TRMM Product in Haihe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2):171-176. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.026

## Comparison Study on Accuracies of Precipitation Data Using GPM and TRMM Product in Haihe River Basin

WEI Zhiming, YUE Guanyin, LI Jia, LÜ Tianyang

(1. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University,

Dalian, Liaoning 116029, China; 2. Esri China Information Technology Co. Ltd, Beijing 100027,

China; 3. Dalian Sea USC Dynamic Surveillance Management Center, Dalian, Liaoning 116011, China)

**Abstract:** [Objective] The accuracies of GPM and TRMM precipitation data were measured to evaluate the applicability of TRMM and GPM data in the Haihe River basin. [Methods] The precipitation products from April to October 2014 in the Haihe River basin were compared with the corresponding data measured with rain gauges from 35 meteorological stations. the coefficient of determination  $R^2$  and relative error BIAS were used as statistical indicators to evaluate the performance of GPM(global precipitation measurement) and TRMM (tropical rainfall measuring mission). [Results] GPM performed slightly better than TRMM did. The coefficient of determination  $R^2$  between satellite precipitation product and in-situ data were 0.758 2 and 0.760 7 for TRMM and GPM, the slope  $K$  were 0.810 5 and 0.833 5, respectively. Although the difference between TRMM and GPM was minor and both of them underestimated the real precipitation, accuracies of them still were relative high. [Conclusion] GPM IMERG precipitation product has potentially good application prospect in monthly scale hydrology for its high spatial resolution.

**Keywords:** GPM; TRMM; precipitation data; evaluation

降水是整个水循环的主要驱动力,同时也是水文模型最基本的输入资料,具有充足时间、空间细节的准确数据对于估算流域尺度水文学非常重要<sup>[1]</sup>。大

量研究成果显示<sup>[2-3]</sup>,空间分辨率直接影响到模型结果的精度,部分学者<sup>[4-5]</sup>研究表明水文模型中使用遥感卫星反演的降水栅格数据精度要优于点源降水数

据。热带降水观测卫星 TRMM (tropical rainfall measuring mission) 于 1997 年 11 月 27 日发射成功, 是美国国家航空航天局 (NASA) 与日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的合作计划。TRMM 有效载荷主要有降雨雷达 PR (precipitation radar)、微波成像仪 TMI (trmm microwave imager)、可见光和红外扫描仪 VIRS (visible and infrared scanner), 其中 PR 是全球第一个星载测雨雷达<sup>[6]</sup>。TRMM 卫星数据的空间分辨率为  $0.25^\circ$ , 相比之前基于卫星的降水产品其分辨率较高, 但是对于小空间尺度的水文研究仍较粗糙。因此, 获得更高空间分辨率的卫星降水产品成为水文研究领域的一个重要目标。2014 年 2 月 27 日, NASA 和 JAXA 在 TRMM 取得的成功之上再次合作, 在日本种子岛发射基地成功发射全球降水观测计划卫星 GPM (global precipitation measurement)。GPM 的成功发射, 为高空间分辨率水文研究提供了新的数据源。GPM 核心观测平台的主要载荷有双频测雨雷达 DPR (dual-frequency precipitation radar) 和 GPM 微波成像仪 GMI (GPM microwave imager)。DPR 能够返回液态及固态降水的三维轮廓及强度, 这些数据将会揭示云中和云下的风暴内部结构。GMI 具备在包括中到大雨及小雪条件下检测降水量、面积、强度和类型的能力<sup>[7-8]</sup>。TRMM 降水数据在应用时必须对其精度进行检验, 学者对此进行了大量的研究工作<sup>[9-13]</sup>, 但目前关于 GPM 应用之前的数据精度验证等方面的研究还不多见, 因此亟需开展类似研究。海河流域是我国经济比较发达的地区之一, 包括作为全国政治和文化中心的首都北京, 研究其水资源问题对京津冀一体化等重大国家战略和华北地区的社会经济与生态环境可持续发展具有重要意义。本研究以海河流域作为研究区, 对 TRMM 及 GRM 卫星数据在该流域的监测精度进行对比评价。首先, 对数据整体进行精度评估。随后, 对数据从逐月整体评估及逐个气象站个体评估两个方面进行了进一步对比, 评估 TRMM 及 GPM 数据在海河流域的适用性, 以更好的表现海河的降水分布模式, 同时也为使用水文模型提供更优的数据源, 有利于提高水文模型的输出结果。

## 1 研究区概况

海河流域位于东经  $112^\circ-120^\circ$ , 北纬  $35^\circ-43^\circ$ , 东临渤海, 南界黄河, 西以太行山脉与黄河流域接界, 北依蒙古高原与内陆河流域接界, 总的地势是西北高, 东南低。由滦河、海河、徒骇马颊河 3 大水系组

成。流域总面积  $3.20 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全国面积 3.3%。其中, 山区面积  $1.89 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总流域面积的 59%; 平原面积  $1.31 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总面积的 41%。海岸线长 920 km, 其中河北省 421 km, 天津市 115 km, 山东省 344 km。除上述沿海 3 省市外, 行政区划还包括北京市全域, 山西省、河南省、辽宁省、内蒙古自治区的部分地区。海河流域地处温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区。年平均气温由南往北和由平原向山地降低, 变化范围在  $0 \sim 14.5^\circ\text{C}$ 。多年平均降水量 535 mm, 是中国东部沿海降水最少的地区。冬季寒冷少雪, 盛行北风和西北风; 春季气温回升快, 风速大, 干旱多风沙; 夏季气候湿润, 降水多, 多东南风; 秋季秋高气爽, 降雨量少。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据及预处理

所用的数据包括气象站点实测降水数据, GPM IMERG 数据<sup>[14]</sup>, TRMM 3B43 数据<sup>[15]</sup>。GPM IMERG 降水数据的空间范围为  $90^\circ\text{S}-90^\circ\text{N}$ ,  $180^\circ\text{W}-180^\circ\text{E}$ , 空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 时间分辨率为月, 数据记录的是每个月的平均每小时降水量 (mm/h)。通过 NASA-GSFC 的降水处理系统 (precipitation processing system, PPS) 通过 ftp 方式 (ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov/) 获得。TRMM 3B43V7 降水数据的空间范围为  $50^\circ\text{S}-50^\circ\text{N}$ ,  $180^\circ\text{W}-180^\circ\text{E}$ , 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间分辨率为月, 数据记录的同样为月内平均每小时降水量 (mm/h)。从美国国家航空航天局 (NASA) 戈达德航空航天中心 (goddard space flight center, GSFC) 通过匿名 FTP (ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/s4\_pa/TRMM\_L3/TRMM\_3B43/) 选取与实测降水数据同时段的数据。DEM 数据为 STRM V4 数据, 水平空间分辨率为 3 弧秒 (相当于 90 m)。

由于 GPM IMERG 数据从 2014 年 4 月开始分发, 而到目前为止, TRMM 3B43 数据分发截止之间是 2014 年 10 月, 故本研究采用 2014 年 4—10 月 GPM IMERG 数据产品以及同时期 TRMM 3B43V7 数据产品, 研究中的月降水量通过降水速率逐月换算获得。同时, 为检验两种基于遥感的降水数据在研究区的精度, 从中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>) 选用 2014 年 4—10 月流域内 35 个气象站同期观测月降水量数据作为本研究“真值”, 进行对比分析。本研究使用的行政边界数据为国家基础地理信息系统 1:400 万数据集中国界与省界数

据;海河流域范围从中国 1:25 万一级流域分级数据集<sup>[16]</sup>提取;降水栅格数据为 HDF5 格式。预处理过程为:首先利用 ArcMap 软件提取降水 Precipitation 层数据,然后将其另存为 tiff 格式文件;接下来将文件导入 ENVI 软件将其投影转换为 WGS84 地理坐标系,波段运算去除噪声点后将数据输出;最后将文件再次使用 ArcMap 软件中的“提取值到点”工具提取降水台站所在位置的降水速率值。

## 2.2 检验及分析方法

本研究采用决定系数( $R^2$ ),相对误差(Bias)对两种将数据产品进行精度检验:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^n P_i / \sum_{i=1}^n M_i - 1 \quad (2)$$

式中: $P$ ——站点位置所在网格 TRMM,GPM 降水数据提供的降水量; $M$ ——对应时间地面气象站观测数据; $i$ ——降水站序号; $n$ ——降水站数据记录的总个数; $\bar{P}$ —— $P_i$  的平均值; $\bar{M}$ —— $M_i$  的平均值。 $R^2$  值反映了降水数据与站点实测值的一致性,取值范围为 $[0,1]$ ,越接近 1 表明数据一致性越好。Bias 反映了降水数据与站点实测数据降水值在数值上的偏离程度,Bias 越接近 0,则数据越准确。

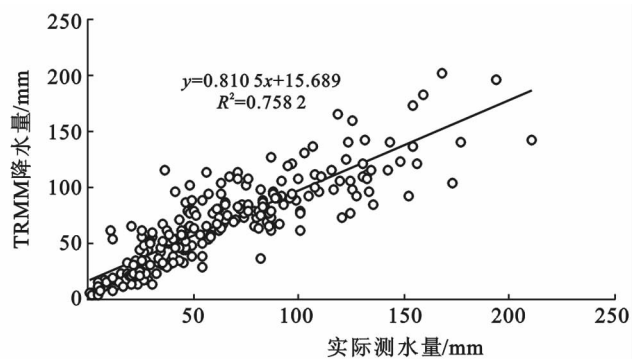
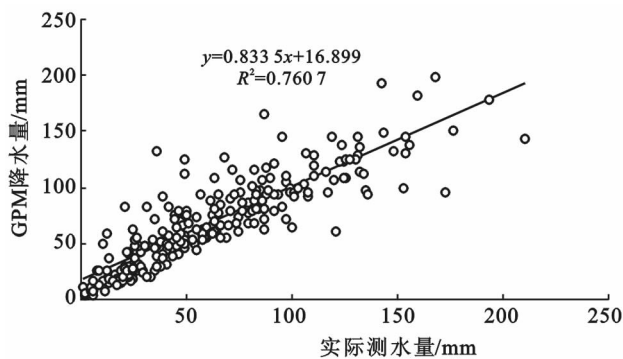


图 1 海河流域 2014 年 4—10 月 GPM(左)、TRMM(右)与地面观测降水量的散点趋势

## 3.2 数据逐月整体精度评估

通过对海河流域研究区内的 35 个气象观测站点 2014 年 4—10 月逐月进行散点趋势分析,可以看出(表 1)在月尺度上,除 4 月 GPM 数据与实测数据精度高于整体检验外,其余各月两种数据的精度均有所下降,其中 7—9 月丰水期内较为显著。在这一时期,TRMM 的决定系数  $R^2$  略优于 GPM 的  $R^2$ ,说明在 7—9 月 TRMM 整体趋势描述更好,而在 4—5 月及 10 月平水期内,GPM 与实测数据的一致性则有更好的表现。所有月份的决定系数均通过  $p < 0.01$  的显

## 3 数据准确度检验

### 3.1 数据整体精度评估

以研究区内 35 个气象观测站 2014 年 4—10 月的观测数据为自变量,分别以 TRMM 3B43 及 GPM IMERG 数据为因变量做一元线性回归分析(图 1)。经检验 TRMM 数据与气象台站的决定系数,斜率  $K = 0.8335$ ;GPM 数据与气象台站的决定系数  $R^2 = 0.7607$ ,斜率  $K = 0.8105$ ,两代数据的决定系数均通过  $p < 0.01$  的显著性检验,说明 2 种数据与观测数据之间具有明显的相关特性与一致性。从整体上看,TRMM 数据降水量与观测量相比偏小,这很可能由于降水雷达(PR)观测数据的衰减校正和降水估算方法不确定性影响有关<sup>[17-18]</sup>,其可能因此导致 TRMM 数据在数值上偏小。同时,GPM 数据降水量与观测量也偏小,在整体一致性上略优于 TRMM 数据,一定程度上说明了 GPM 在侦测小雨雪上的能力上优于 TRMM。

从以上的检验的结果来看,TRMM,GPM 两代数据产品在整体上具有较好的精度,为全面客观地揭示出两代产品在不同时间段精度及空间上的差异以及进一步分析 TRMM 与 GPM 两代产品在研究区的内的数据精度,现对两种数据从时间尺度及空间尺度 2 个方面进行精度验证。

著性检验。为真实反映两种降水产品在研究时间段里对于降水侦测能力,计算逐月降水量并绘制折线图(图 2),结果显示除 7 月 TRMM 与实测降水量差值大小与 GPM 实测降水量小以外,其余各月 GPM 与 TRMM 相比于实测降水量差值更小,说明 GPM 相较于 TRMM 在捕捉降水信息上更为准确。GPM 数据更为准确的原因是因为 GPM 核心观测平台中的两大主要载荷较其前代的性能提升。其中,GMI 相比 TMI 频率范围由  $10 \sim 85.5$  GHz 拓展到  $10 \sim 183$  GHz,增加的 4 个高频段更适合观测小到中雨;DPR 的使用

相比 PR 原有 Ku 波段(13.8 GHz)相控阵天气雷达的基础上增加了 Ka 波段(35.5 GHz),这一频率可成功侦测低至 0.5 mm/h 的微量降水及固态降水<sup>[19-20]</sup>。

体检验法也同时掩盖了单个站点数据与对应格网降水产品的差异,尤其降水是所有气象要素中影响

因子最多的变量,其受地形、地势、海拔、大气环流、经纬度位置、海陆位置等因素影响<sup>[9]</sup>,具有空间、时间上的不连续性和高度非线性特征。因此,仅仅对数据总体精度进行评估是不足的。因此需要对研究区内各个站点进行进一步的精度验证。

表 1 海河流域 2014 年 4—10 月逐月 GPM,TRMM 与地面观测站降水量决定系数

决定系数	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
$R^2$ GPM	0.843 5	0.624 7	0.702 6	0.552 6	0.477 9	0.588 7	0.727 6
$R^2$ TRMM	0.681 0	0.390 4	0.627 2	0.587 7	0.521 7	0.692 3	0.643 5

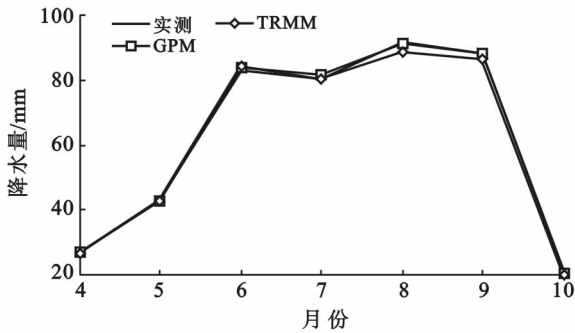


图 2 2014 年 4—10 月 GPM 与 TRMM 测得海河流域平均降水量关系

### 3.3 数据个体精度评估以

研究区内各个气象观测站 2014 年 4—10 月的月降水量数据为自变量(X 轴),以各个气象站对应的格网降水产品(GPM 和 TRMM)数据为因变量(Y 轴),做一元线性分析,得到各个格网数据与各气象观测站点之间的决定系数(且均通过了  $p < 0.05$  的显著性检验)(表 2)。

从表 2 可以看出:(1)大部分的气象观测站实测降水量与 TRMM 3 B43,GPM IMERG 产品降水量之间

呈现较高的相关性,这进一步验证了在海河流域,GPM 和 TRMM 数据与气象观测数据存在明显的线性关系;(2)个别气象站点与气象台站决定系数较低,如天镇,霸州,饶阳,泊头,南宫观测降水量与 GPM(TRMM)的  $R^2$  值分别为 0.38(0.41),0.20(0.41),0.20(0.10),0.17(0.34),0.42(0.30),说明这些台站 GPM(TRMM)与观测数据之间的线性关系较弱。其中除天镇外,其余 4 点皆位于华北平原区及海河南系二级流域内(图 3)。其主要原因可能是由于成像雷达像元内的降水不均匀性,导致降水产品与实测降水量两者在时空检测尺度不匹配<sup>[21-22]</sup>,使中部平原相较燕山太行山地区及东部沿海地区相比造成决定系数  $R^2$  偏小。(3)35 个观测站点中,有 23 个站点 GPM 与实测数据的决定系数高于 TRMM 与实测数据的决定系数,占到台站总数的 65.7%。在其余 12 个观测站,除霸州与泊头两站 GPM 决定系数与 TRMM 决定系数相差较大外,其余 10 个观测站决定系数基本相当。2 种数据表明在大多数站点上 GPM 月降水数据相较 TRMM 月降水数据与实测数据具有更好的一致性。

表 2 海河流域 2014 年 4—10 月 GPM,TRMM 与地面观测站降水量决定系数

台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM
大同	0.73	0.86	榆社	0.96	0.85	丰宁	0.97	0.99	青龙	0.76	0.82	乐亭	0.87	0.96
天镇	0.38	0.41	邢台	0.78	0.84	围场	0.94	0.71	秦皇岛	0.68	0.65	保定	0.96	0.93
五台山	0.75	0.84	长治	0.93	0.89	张家口	0.92	1.00	北京	0.89	0.87	饶阳	0.20	0.10
蔚县	0.95	0.94	襄垣	0.86	0.56	怀来	0.82	0.80	霸州	0.20	0.41	泊头	0.17	0.34
灵丘	0.94	0.89	安阳	0.96	0.95	密云	0.76	0.71	宝坻	0.78	0.70	黄骅	0.82	0.72
原平	0.86	0.82	新乡	0.86	0.91	承德	0.91	0.91	天津	0.84	0.88	南宫	0.42	0.30
石家庄	0.80	0.76	多伦县	0.93	0.75	遵化	0.85	0.84	唐山	0.94	0.78	惠民	0.94	0.96

决定系数只能反映出 TRMM 与 GPM 降水数据和降水实测降水量之间一致性大小,无法客观反映两者之间降水量数值的差异程度。各气象站点计算得到的相对误差 Bias 反映了 TRMM,GPM 月降水数据偏离实测降水量的程度。利用公式(2)计算各个站

点的 Bias(表 3)。由表 3 可知,在研究区 35 个观测站点中,2 种产品五台山、遵化、惠民等 3 个站点的 Bias 均为负值,表明在这些站点上,月降水数据在整体上相比于站点实测降水量存在一定的低估。大同、蔚县、灵丘等 22 个观测站中 Bias 为正值,表明在这些

点上,月降水数据在整体上相比于站点实测降水量存在一定的高估。其中,特别是石家庄、乐亭、泊头存在非常明显的高估。其余包括天镇、长治等在内的 10 个点在两种产品中,Bias 值互为正负,表明存在不同的偏差。综合以上的精度验证结果:整体上,海河流

域 TRMM 与 GPM 分别与站点实测降水量具有较好的一致性,除个别站点外全流域 值在 0.75 以上,数值上降水数据与实测站点数据整体略微偏高;从个体上,大多数站点卫星月降水数据与实测降水量在数值上差异较小,而在石家庄、乐亭、泊头差异较大。

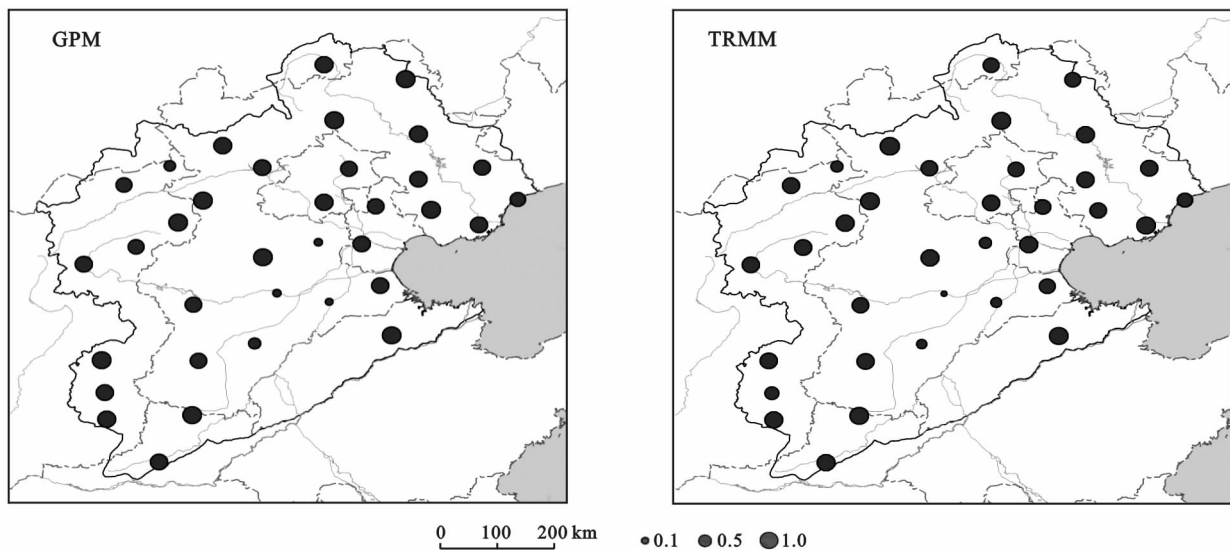


图 3 GPM,TRMM 决定系数空间分布

表 3 海河流域 2014 年 4—10 月 GPM,TRMM 数据与地面观测站降水量相对误差

台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM	台站	GPM	TRMM
大同	0.03	0.04	榆社	0.07	0.00	丰宁	0.04	0.09	青龙	0.14	0.23	乐亭	0.47	0.29
天镇	-0.03	0.09	邢台	0.22	0.11	围场	0.02	0.25	秦皇岛	0.25	0.08	保定	0.20	-0.05
五台山	-0.17	-0.18	长治	0.04	-0.04	张家口	0.02	0.01	北京	0.18	-0.03	饶阳	0.30	0.13
蔚县	0.08	0.05	襄垣	0.11	0.10	怀来	0.30	0.31	霸州	0.28	0.00	泊头	0.60	0.57
灵丘	0.06	0.14	安阳	0.01	-0.04	密云	0.02	-0.02	宝坻	0.24	0.12	黄骅	0.20	0.08
原平	0.20	0.28	新乡	0.05	0.19	承德	0.05	0.14	天津	0.29	-0.03	南宫	0.04	-0.13
石家庄	0.66	0.41	多伦县	-0.05	0.05	遵化	-0.10	-0.10	唐山	-0.02	0.00	惠民	-0.03	-0.03

## 4 结论

(1) 在海河流域内 TRMM 3B43/GPM IMERG 数据与 35 个气象观测数据在整体上  $R^2$  分别为 0.758 2和 0.760 7,斜率  $K$  分别为 0.810 5 和 0.833 5,说明两代数据产品差别较小,GPM 略优于 TRMM,与观测数据具有明显的线性关系特征,数据质量较高。整体而言,从月数据产品中提取的降水值实测值比站点实测降水量均略微偏小。

(2) 在研究时间区间内,对两种数据产品进行逐月精度检验,发现 GPM IMERG 与 TRMM 3B43 相比整体上更接近实测降水量,且在平水期与实测数据有更好的一致性。

(3) 对 35 个气象台站降水数据与实测数据进行一元回归分析,结果表明各站点位置 GPM 的 值与

值均略高于 TRMM 各站点位置的 值与 值,且更接近与 1,说明 GPM IMERG 在数据整体的一致性上,略优于 TRMM 3B43。

(4) 对 35 个气象台数据准确性逐个进行分析,发现大部分值较高,少部分值较低,最低值出现在研究区中部的霸州、饶阳、泊头、南宫等地区;本研究的不足之处在于,TRMM 卫星与 GPM 卫星的交接期较短,致使本研究的时间范围仅为 7 个月。且相对于整个海河流域,35 个气象台站虽分布较均匀,但点位仍较少。如果未来采用卫星日尺度或小时尺度降水产品与实测站点数据,则有必要对降水产品进行更细致的适用性分析。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 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.
- [2] Meng Jin, Li Li, Hao Zhenchun, et al. Suitability of TRMM satellite rainfall in driving a distributed hydrological model in the source region of Yellow River[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,509(2): 320-332.
- [3] 张蒙蒙,江志红. 我国高分辨率降水融合资料的适用性评估[J]. *气候与环境研究*,2013,18(4):461-471.
- [4] Duan Z, Bastiaanssen W G M, Liu J. Monthly and annual validation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis(TMPA) products in the Caspian Sea Region for the period 1999—2003[C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, IEEE: 2012 IEEE International. 2012:3696-3699.
- [5] Adler R F, Kidd C, Petty G, et al. Intercomparison of global precipitation products: The third precipitation intercomparison project (PIP-3) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(7): 1377-1396.
- [6] Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 2001,39(1): 102-116.
- [7] Smith E A, Asrar G, Furuhashi Y, et al. International global precipitation measurement (GPM) program and mission: An overview [M] // *Measuring precipitation from space*. Springer Netherlands, 2007:611-653.
- [8] 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.
- [9] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. *地理学报*,2011,66(7):994-1004.
- [10] Liu Junzhi, Zhu AXing, Duan Zheng. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation product using rain gauge data in Meichuan watershed, Poyang Lake basin, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012,3(4), 359-366.
- [11] 骆三,苗峻峰,牛涛,等. TRMM 测雨产品 3 B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. *气象*,2011,37(9): 1081-1090.
- [12] Chen Sheng, Yang Hong, Cao Qing, et al. Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(23):13,060-13,074.
- [13] Koo M S, Hong S Y, Kim J. An evaluation of the tropical rainfall measuring mission(TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) data over South Korea[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2009,45(3):265-282.
- [14] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) [M]// *Algorithm theoretical basis document*, version 4.1. NASA, 2013.
- [15] George J H, Robert F A, David T B. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006,8(1):38-55.
- [16] 国家科技基础条件平台—国家地球系统数据共享平台—湖泊—流域科学数据中心. 中国 2002 年 1 : 25 万一级流域分级数据集 [DB/OL]. (20020105) [20150525]http://lake.data.ac.cn.
- [17] Iguchi T, Kozu T, Kwiatkowski J, et al. Uncertainties in the rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar[J]. *气象集誌*,2009,87(2):1-30.
- [18] 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 卫星遥感反演降水研究综述 [J]. *地球科学进展*,2011,26(11):1162-1172.
- [19] Bidwell S W, Flaming G M, Durning J F, et al. The global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI) instrument: role, performance, and status[C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium,IGARSS'05. Proceedings*. IEEE: IEEE International, 2005.
- [20] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. Developing the integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)[J]. *Acta Paulista De Enfermagem*, 2012, 25(1):146-150.
- [21] 商建,范学花,杨汝良. TRMM 卫星测雨雷达与地基雷达的数据匹配问题研究[J]. *遥感技术与应用*,2009,24(2):164-166.
- [22] 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.