

# GPM 与 TRMM 降雨数据在黄河流域适用性分析

董国涛<sup>1</sup>, 樊东<sup>1,2</sup>, 杨胜天<sup>3</sup>, 薛华柱<sup>2</sup>, 周俊利<sup>2</sup>, 党素珍<sup>1</sup>, 程春晓<sup>1</sup>

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室,

郑州 450003; 2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

3. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室 环境遥感与数字城市 北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** GPM(Global Precipitation Measurement)是继 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)之后的新一代全球卫星降水测量计划。GPM 扩展了 TRMM 传感载荷,提升了降水观测能力。以 GPM 和 TRMM 重合期(2014 年 3 月—2015 年 4 月)数据为对象,利用黄河流域内 76 个气象站点的降雨实测数据,探讨了两种卫星降水数据在黄河流域的适用性,并分析了流域内两种卫星降水数据误差的时空分布。结果表明:年尺度上,GPM 与 TRMM 卫星数据与实测降水量的决定系数分别为 0.78,0.86,总体一致性较好,但分别存在 2.46%与 2.19%的相对高估。季节尺度上,春、秋两季数据精度高,夏季卫星降水数据相对于实测降水量存在较大的绝对误差,冬季则相对误差较大。月尺度上,除 7 月、8 月外卫星降水数据均大于实测降水量,相对误差最大值出现在 12 月,绝对误差最大值出现在 9 月。单站验证结果表明 GPM 与 TRMM 卫星降水数据在流域北部的陶乐、惠农、临河等区域数据精度偏低,而在广大的流域中南部区域卫星降水数据与实测降水量有较高的一致性。

**关键词:** GPM; TRMM; 降水; 适用性分析; 黄河流域

**中图分类号:** P468.0<sup>+</sup>24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)03-0081-07

## Analysis on the Applicability of GPM and TRMM Precipitation Data in the Yellow River Basin

DONG Guotao<sup>1</sup>, FAN Dong<sup>1,2</sup>, YANG Shengtian<sup>3</sup>, XUE Huazhu<sup>2</sup>,

ZHOU Junli<sup>2</sup>, DANG Suzhen<sup>1</sup>, CHENG Chunxiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Loess Plateau Soil Erosion and Erosion Water Loss Process

and Control, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research,

Zhengzhou 450003, China; 2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key

Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Precipitation is a fundamental component of the global water cycle, a key parameter of ecology, hydrology and meteorology. Knowing when, where and how precipitation occurs is crucial for understanding how weather and climate impact both our environment and Earth water and energy cycles, including effects on agriculture, fresh water availability, and responses to natural disasters, and it is extraordinarily important for sustaining life on our planet during climate change. Accurate precipitation measurement of estimation is vital to water resource management, weather prediction, disaster monitoring, controlling, and so on. In addition, the availability of high-quality precipitation data is a prerequisite for conducting meaningful climatic, atmospheric and hydrological models. The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission, launched February 27th, 2014 by a joint effort of America National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), is an international satellite mission that provides the next-generation global observations of rain and snow. Based on the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), the GPM to unify precipitation measurements form constellation of research and operational sen-

收稿日期: 2017-06-08

修回日期: 2017-08-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402400); 国家自然科学基金(51779099, 41301496); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(HKY-JBYW-2017-10)

第一作者: 董国涛(1982—), 男, 山东青州人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源遥感方面研究。E-mail: dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

通信作者: 樊东(1992—), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术理论与应用。E-mail: fan\_zhonghe@163.com

sors to provide a new generation precipitation products, GPM was designed to set a new standard for measurement of precipitation and snowfall, measure light rain, and provide quantitative estimates of microphysical properties of precipitation particles. A critical evaluation of these newly released precipitation data sets is very important for both the end users and data developers. In this study, the quality of the GPM and TRMM precipitation product from March 2014 to April 2015 were evaluated in Yellow River Basin with rain gauges from 76 meteorological stations. The main findings of this study are as follows. There was a significant correlation between GPM/TRMM products and the observed data. However, the satellite data might be a little bit overestimated by 2.46 percent and 2.19 percent, respectively. Compared with the observed data, the satellite products contained large absolute error in summer and relative error in winter, yet the computed accuracy is relatively high in spring and autumn. On the scale of months, the satellite precipitation data are greater than the measured values except the August and September, among them, the largest relative error appears in December, whereas the maximum absolute error appears in September. The single-site verification results show that the TRMM and GPM precipitation products have a poor accuracy around the site of Taole, Huinong and Linhe in the north of Yellow River Basin. However, the satellite data and the observation data have highly consistency in the south-central of Yellow River Basin and the precipitation data from satellite is applicable in this region. As the early validation and comparison of the GPM IMERG and TRMM 3B43 V7 monthly products, it will provide useful references and feedbacks for the development of IMERG algorithms and promote the research and application of GPM data over Yellow River Basin and beyond.

**Keywords:** GPM; TRMM; precipitation; applicability analyses; Yellow River Basin

降水是全球水热循环中最为重要和活跃的过程之一,同时也是水文过程模拟、水循环和水量平衡分析的重要参数。受地理位置、地形及下垫面因素影响,降水呈现出复杂的时空异质性。获取准确的大范围高时空分辨率连续降水资料,对气象预报、水文模拟、灾害监测、农业生产等具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

目前降水测量手段主要有站点雨量计观测、地面雷达观测与卫星遥感降水反演。雨量计测量方式能够提供高精度的地面“点”降水资料,但受到站点密度及其空间分布的影响,难以准确地反映降水的时空分布;雷达观测降水受电子信号强度以及运行环境等多因素的影响,在地形复杂地区具有较大的不确定性。基于卫星遥感的降水观测方式具有覆盖范围广、时空连续性高等特点,已成为降水观测的重要手段,特别是对于地面气象站点相对匮乏的地区<sup>[2,4]</sup>尤为重要。早期,作为卫星遥感监测降水的 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星提供了准全球范围内的 3 h 网格化降水产品,已在各领域得到广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。作为 TRMM 卫星的继承与发展,GPM(Global Precipitation Measurement)提供了更大范围和更高时空分辨率的降水产品,提供更强大的降水数据支撑。

遥感反演作为一种间接的降水测量手段,进行数据质量评价是数据应用的前提条件。已有众多研究分析了 TRMM 数据在中国大陆<sup>[8-10]</sup>、天山山区<sup>[4,11]</sup>、

黑河流域<sup>[12-14]</sup>、澜沧江流域<sup>[2]</sup>、雅鲁藏布江流域<sup>[15]</sup>、伊洛瓦底江流域<sup>[16]</sup>、横断山区<sup>[6,17]</sup>、金沙江流域<sup>[7]</sup>、鄱阳湖流域<sup>[18]</sup>、洮水流域<sup>[3]</sup>、赣江流域<sup>[19-20]</sup>、川渝地区<sup>[21]</sup>、黄河源区<sup>[22-23]</sup>、东北地区<sup>[24]</sup>、青藏高原<sup>[1,25]</sup>、西北内陆<sup>[5,26-27]</sup>、喀斯特山区<sup>[28]</sup>的适用性,结果表明 TRMM 降水产品整体精度较高,在气象、水文等领域均具有广阔的应用前景。自 2014 年 GPM 核心平台发射以来,对 GPM 卫星降水数据产品的适用性评价工作陆续展开。作为 TRMM 卫星的继承与改进,GPM IMEGR(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)算法将 TRMM 卫星降水数据的空间分辨率由  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  提升到  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ,时间分辨率由 3 h 提高到 30 min,在地表径流过程模拟中表现出了巨大潜力<sup>[29]</sup>。但是在干旱少雨区<sup>[30]</sup>、高纬度地区<sup>[31]</sup>、大气强对流区<sup>[32]</sup>、山地雨影区<sup>[33]</sup>及海陆交汇带<sup>[34]</sup>等地区对短时降水以及冬季微量降水的探测仍具有较大的不确定性。评估 GPM IMEGR 降水数据的有效性,有利于推进 GPM 卫星降水数据在中国气象、水文、生态等行业的研究与应用。

黄河流域作为我国水旱灾害频发的地区之一,降水时间变率大、空间分布不均<sup>[35]</sup>。空间化降水资料的准确与否,将在较大程度上影响水文模拟预报、旱涝灾害防治和水资源规划管理等方案实施效果。因此,本文以黄河流域为研究区,选择 TRMM 和 GPM 重合时期(2014

年3月—2015年4月)降水数据为研究对象,利用流域内气象站点的降水实测数据,分析TRMM和GPM两种卫星降水产品在黄河流域的适用性。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

黄河流域位于东经 $95^{\circ}53'$ — $119^{\circ}14'$ ,北纬 $32^{\circ}9'$ — $41^{\circ}51'$ ,西起巴颜喀拉山,东至渤海,南临秦岭,北抵阴山,流域面积 $75.2\text{万 km}^2$ ,地势西高东低,地貌特征复杂。黄河流域属典型的温带季风气候,夏季受副热带高压带及西太平洋暖湿气流影响,湿润多雨;冬季受蒙古西伯利亚高压控制,寒冷干燥。降水主要集中在夏秋季节,6—9月降水量占全年降水量由南部的60%逐渐增加到北部的80%以上<sup>[36-37]</sup>。流域降水空间分布由东南向西北递减,多年平均降水量为 $466\text{ mm}$ ,年均降水资源量约为 $3\,510\text{ 亿 m}^3$ <sup>[37]</sup>。由于地域广阔,距海洋距离远近的不同及地形的影响,使得流域内降水不仅年内、年际变化大,且空间异质性强烈。同时,黄河流域也是我国水土流失最为严重的区域,干旱和洪涝灾害频发,降水是造成此类灾害最主要的因素,因此对黄河流域降水进行准确观测与模拟并研究其时空分布规律显得十分必要<sup>[38-40]</sup>。

### 1.2 数据与处理

TRMM卫星是由美国NASA和日本JAXA共同研制的降水试验卫星,于1997年11月27日在日本发射成功,它搭载了首台星载降水雷达,能够有效地探测降水三维空间信息。最初TRMM设计用于对热带地区降水量及地球辐射能量进行测量来了解全球气候变化及其机理,在2001年卫星轨道由 $250\text{ km}$ 提升至 $402.5\text{ km}$ ,观测范围扩展到 $50^{\circ}\text{S}$ — $50^{\circ}\text{N}$ 。观测范围的扩展使得TRMM数据应用更为广泛,其降水产品被广泛应用于气象、水文、生态等领域,对研究全球气候系统、水热循环和能量的收支状况及其变化发挥了重要作用。由于燃料耗尽,TRMM卫星已于2015年4月停止运行。

GPM作为TRMM的后续降水测量计划,包含了法国CNES(Centre National D'Etudes Spatiales)、印度ISRO(Indian Space Research Organization)、欧洲EUMETSAT(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites)、美国NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)以及DOD(Department of Defense)的一系列卫星,其核心观测平台GPMCO(GPM Core Observatory)已于

2014年2月28日成功发射<sup>[41]</sup>。在TRMM卫星的基础上,GPM核心观测平台搭载了以Ku和Ka波段组成的双频段降雨雷达DPI(Dual-frequency Precipitation Rader)和多波段微波成像仪GMI(GPM Microwave Imager),由于技术上的改进使得GPM在精度和敏感性上有较大的提升,能够提供时空分辨率更高的降水产品<sup>[41]</sup>。此外,相比于TRMM卫星,GPM核心观测平台具有更大的轨道倾角,使其有更广阔的观测范围,达到 $60^{\circ}\text{S}$ — $60^{\circ}\text{N}$ 。

本研究所用TRMM与GPM数据均从NASA降水测量计划网站(www.pmm.nasa.gov)获得。其中,TRMM数据为第7版本3B43降水数据(TRMM 3B43 V7),数据空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为月(图1D)。GPM数据为最新的3级融合降水产品IMERG(Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM),其空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ ,时间分辨率为月(图1C)。本文选取TRMM与GPM重合期(2014年3月—2015年4月)降水产品及同时期地面雨量站实测数据进行对比分析。其中,实测降水数据来源于气象数据共享服务网,包含流域内76个国家级气象站的月实测降水量(图1A)。

## 2 方法

本研究采用相关系数( $R$ )、相对误差(BIAS)和均方根误差(RMSE)来评价卫星降水数据准确性。计算方法为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

式中: $y_i$ 为气象站实测降水量,均值为 $\bar{y}$ ;  $x_i$ 为站点所对应像元的卫星降水产品栅格值,均值为 $\bar{x}$ ;  $i$ 为观测站标识;  $n$ 为观测站个数。相关系数 $R$ 表示数据间的相关及一致性程度,BIAS用于表征卫星降水数据的相对偏差状况,RMSE表示数据间数值上的差异程度。 $R$ 越接近于1,BIAS与RMSE越接近于0则数据精度越高。

## 3 结果与分析

### 3.1 年尺度数据精度

根据气象站点经纬度获取TRMM及GPM对应

像元年降水量,以站点实测降水量为自变量遥感像元值为因变量进行一元线性回归分析,结果见图 2。GPM,TRMM 卫星降水数据与实测降水量的决定系数分别为 0.78,0.86,线性方程斜率分别为 0.74,0.85,显示了卫星降水数据与实测降水在整体上较高的一致性,但存在不同程度的偏差。从散点的分布可以看出,GPM 与 TRMM 卫星降水数据在降水量小于 400 mm 时对降水存在一定程度的高估,在年降水量超过 800 mm 时则低估了降水量。与 GPM 降水

数据相比,TRMM 降水数据与实测值散点图更接近于 1:1 线,在年尺度上的精度更高。相关系数只能表示卫星降水数据与实测降水量整体的一致性,不能有效反映差异量的大小,因此,计算两种卫星降水产品与实测降水量的相对误差与均方根误差,结果见表 1。GPM 与 TRMM 数据的 BIAS 均大于 0,表示两者对于降水存在一定的高估,RMSE 分别为 82.18 mm 和 65.50 mm。总体上,TRMM 年降水数据准确性高于 GPM 降水数据。

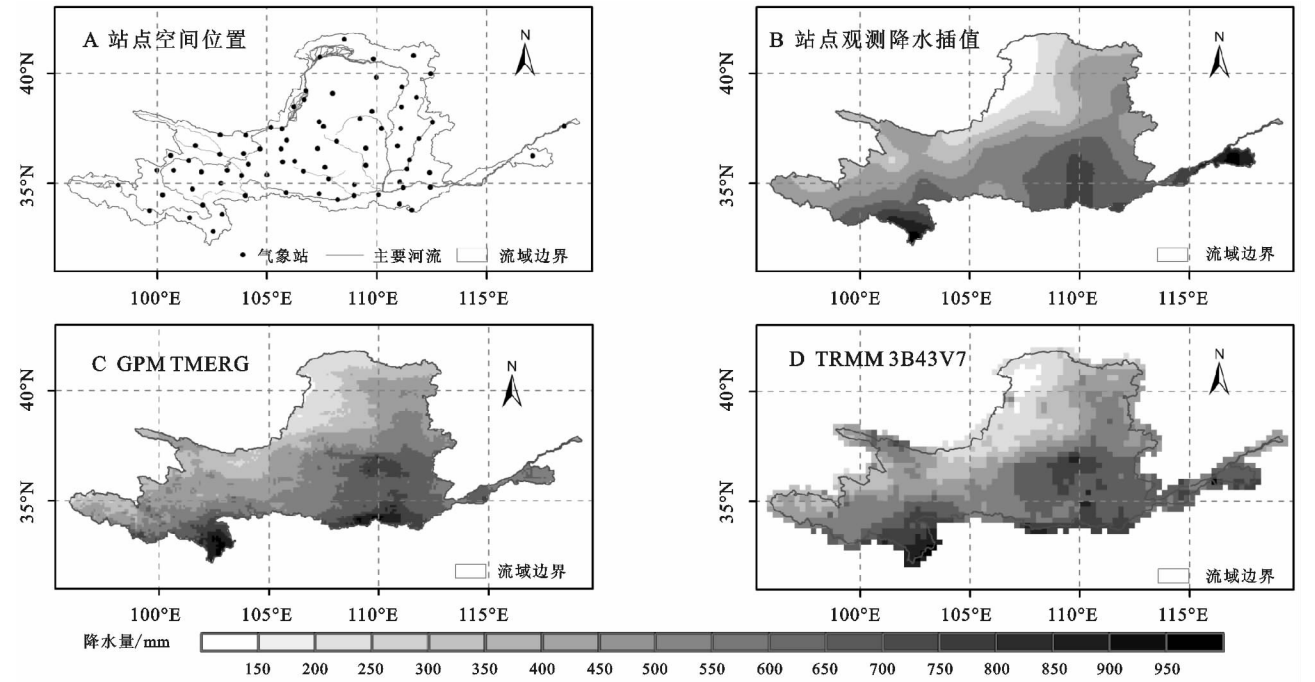


图 1 黄河流域气象站点及 2014 年降水量空间分布

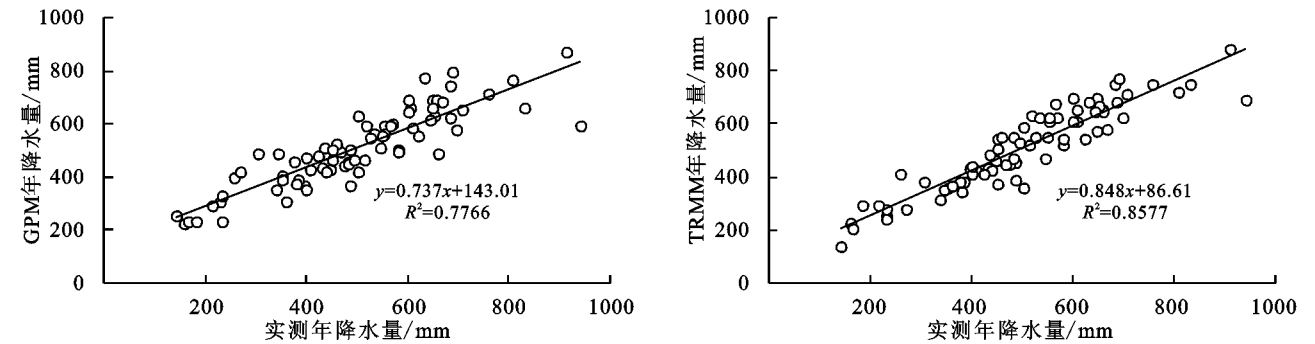


图 2 黄河流域 2014 年 GPM,TRMM 卫星降水数据与实测降水量散点图

表 1 GPM 与 TRMM 卫星年降水数据精度

参数	R	BIAS/%	RMSE/mm
GPM	0.88	2.46	82.18
TRMM	0.93	2.19	65.50

3.2 季尺度数据精度

黄河流域是典型的季风气候区,降水量年内分布不均,各季节降水量差异极为明显,仅仅分析两种卫星降水产品在整年的适用性是不够的。本研究以 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—翌年 2 月为冬季,计算各季节卫星降水数据与站

点实测值的  $R$ ,BIAS, RMSE(图 3)。各季节卫星降水产品与实测降水量的相关系数在 0.76~0.91,表现出很好的一致性。其中春、秋两季相关系数较高,而冬、夏两季相关性略低,原因在于冬季降水主要以降雪的形式出现,夏季降水多呈现历时短、雨量大的强对流天气,卫星对固态降水及短时降水探测能力有限导致相关系数偏低。从 BIAS 来看,冬季相对误差明显大于其他季节,原因是冬季降水相对较少(全流域冬季平均降水仅为 11.1 mm),较小的总降水量使得误差所占比重

较其他季节更为明显。黄河流域卫星降水与实测值在各季节的 RMSE 都在 50 mm 以下,夏季最大而冬季最小。这与绝对降水量存在相似的分布特征,流域内气象站点所监测的夏季降水均值为 227.2 mm,且多以强降雨形式出现,给卫星精确地观测降水带来极大

地挑战,同时 RMSE 对离群值反映较为敏感,因此 RMSE 在绝对误差较大的雨季大于绝对误差较小的旱季。对比两种卫星降水产品,TRMM 数据与实测值有更高的相关系数,更小的相对误差和均方根误差,表现出与实测值更好的一致性。

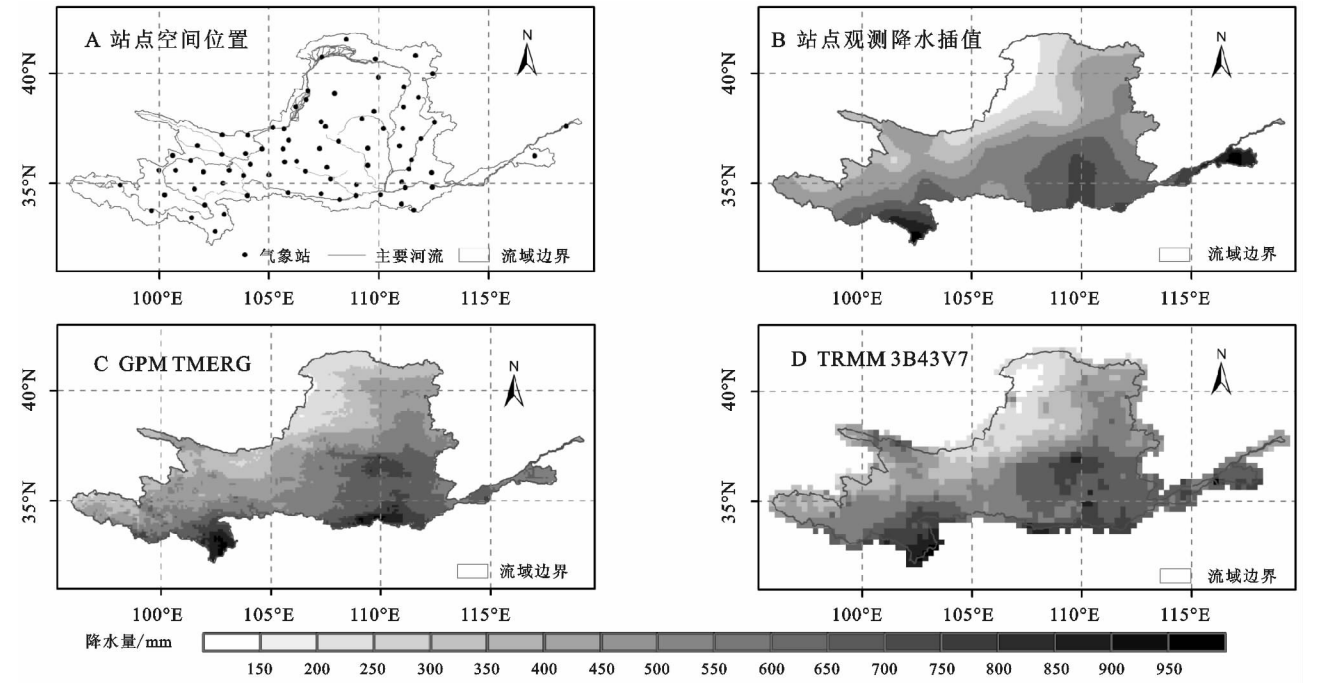


图 3 GPM,TRMM 降水数据在各季节的相关系数、相对误差与均方根误差

3.3 月尺度数据精度

图 4 为流域内各月实测降水均值与该月卫星降水产品像元值对比图。两种卫星降水产品在 7 月、8 月存在对降水的低估,GPM 与 TRMM 在 8 月对各站点实测降水平均低估 2.3 mm 和 5.5 mm,占月降

水量的 2.5%和 6.1%。在其他月份卫星降水数据均大于实测降水量,其中 12 月相对误差最大,GPM 与 TRMM 降水产品在每个站点比实测降水量平均高出 29.15%和 30.79%;最大的绝对误差出现在 9 月,分别为 7.1 mm 和 6.0 mm。

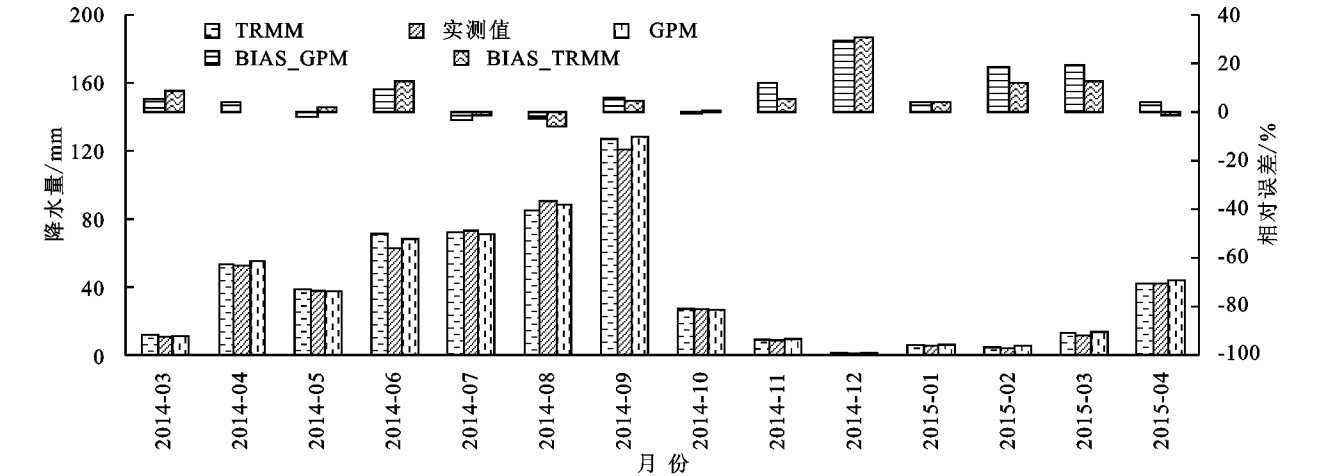


图 4 黄河流域月 GPM,TRMM 与实测月降水量对比

3.4 单站点数据精度

从年、季、月尺度检验的结果来看,TRMM 与 GPM 数据在大部分时间段均具有较好的精度,但整体精度检验不能反映出单个站点上卫星降水数据与实测降水量之间的差异。

降水是所有气象要素中影响因子最多的变量之一,其受地形地势、经纬度、海拔、大气环流等因素影响具有较大的时间变率和空间异质性,仅对数据整体进行评估不能全面客观地反映出数据精度在空间上的不均一性。因此,本文计算了每个站点实测降

水量与对应卫星数据像元值的相关系数,同时以泰森多边形法根据各站点的空间位置对整个研究区进行划分,使多边形中任意点到多边形内气象站点的距离最小,借此对离散的相关系数进行区域化,并以  $K$  均值聚类方式对各多边形进行空间聚类,研究流域内卫星降水数据精度的空间分布规律(图 5)。流域内大部分气象站点与卫星降水数据相关性较高,相关系数都在 0.8 以上,这与全局检验的结果一致,

进一步表明了 GPM 与 TRMM 卫星降水数据在黄河流域具有较强的适用性。流域内各站点  $R$  值大小空间差异明显,流域南部  $R$  值普遍较大而北部略小。鄂尔多斯高原及其以北地区的陶乐、惠农、临河等站点附近卫星所测得降水量与实测值的相关性最低,可能的原因在于这些站点处降水稀少(年降水量不足 200 mm)且降水变率较大,造成卫星降水反演在这些区域不够准确。

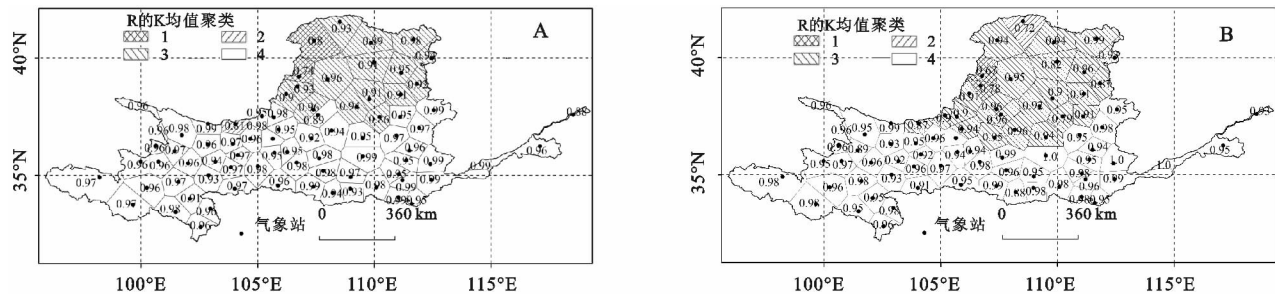


图 5 黄河流域 GPM(A)与 TRMM(B)数据与实测降水量  $R$  值空间分布及  $K$  均值聚类

## 4 结论

(1) 黄河流域内 GPM 与 TRMM 卫星降水数据与实测年降水量之间存在良好的线性关系。整体而言,卫星数据降水值比实测降水量偏大,GPM 与 TRMM 分别高估 2.46% 和 2.19%。

(2) GPM 与 TRMM 数据在各季节与实测降水量的相关系数在 0.76~0.91,不同季节数据质量差异明显,秋季相关性最高而冬季相关性最低。以固态降水为主的形式和较少的绝对降水量导致冬季相对误差较大;夏季多暴雨,卫星数据与站点实测降水量在绝对值上差异较为明显。

(3) GPM 与 TRMM 数据在 7 月、8 月份比站点实测降水量略微偏小,8 月对降水量低估最大,占月降水量的 2.54% 和 6.05%;其余月份对降水量存在不同程度的高估,其中 12 月相对误差最大,GPM 与 TRMM 降水产品平均每个站点比实测降水量高出 29.15% 和 30.79%;最大绝对偏差出现在 9 月,分别为 7.10 mm 和 6.00 mm。

(4) 各站点验证结果表明,流域中南部区域 GPM 与 TRMM 数据和实测降水量的相关系数较高,而鄂尔多斯高原及其以北地区卫星所测降水量与实测值的相关性相对较低,与该区域内总降水量偏小且降水历时短、强度大等降水特征有关。

### 参考文献:

[1] 齐文文,张百平,庞宇,等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学,2013,33(8):999-1005.  
[2] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM3B43 数据

精度检验[J]. 地理学报,2011,66(7):994-1004.

[3] 江善虎,任立良,雍斌,等. TRMM 卫星降水数据在沱水流域径流模拟中的应用[J]. 水科学进展,2014,25(5):641-649.  
[4] 刘俊峰,陈仁升,卿文武,等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J]. 水科学进展,2011,22(4):447-454.  
[5] 卢新玉,魏鸣,王秀琴,等. TRMM 3B43 降水产品在新疆地区的适用性研究[J]. 国土资源遥感,2016,28(3):166-173.  
[6] 朱国锋,蒲焘,张涛,等. TRMM 降水数据在横断山区的精度[J]. 地理科学,2013,33(9):1125-1131.  
[7] 杨云川,程根伟,范继辉,等. 卫星降雨数据在高山峡谷地区的代表性及可靠性[J]. 水科学进展,2013,24(1):24-33.  
[8] 黄勇,陈生,冯妍,等. 中国大陆 TMPA 降水产品气候态的评估[J]. 气象,2015,41(3):353-363.  
[9] 刘少华,严登华,王浩,等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. 水科学进展,2016,27(5):639-651.  
[10] 骆三,苗峻峰,牛涛,等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象,2011,37(9):1081-1090.  
[11] 赵传成,丁永建,叶柏生,等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法[J]. 水科学进展,2011,22(3):315-322.  
[12] 赵军,刘原峰,朱国锋,等. 热带测雨卫星数据在黑河流域的精度及应用[J]. 水土保持通报,2016,36(3):309-315.  
[13] 王超,赵传燕. TRMM 多卫星资料在黑河上游降水时空特征研究中的应用[J]. 自然资源学报,2013,28(5):862-872.  
[14] 吴雪娇,杨梅学,吴洪波,等. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用[J]. 冰川冻土,2013,35(2):

- 310-319.
- [15] 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.
- [16] 曲伟,路京选,宋文龙,等. TRMM 遥感降水数据在伊洛瓦底江流域的精度检验和校正方法研究[J]. 地球科学进展,2014,29(11):1262-1270.
- [17] 张涛,李宝林,何元庆,等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征[J]. 自然资源学报,2015,30(2):260-270.
- [18] 李相虎,张奇,邵敏. 基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J]. 地理科学进展,2012,31(9):1164-1170.
- [19] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. 赣江流域 TRMM 降水数据的误差特征与成因[J]. 水科学进展,2013,24(6):794-800.
- [20] 唐国强,李哲,薛显武,等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. 水科学进展,2015,26(3):340-346.
- [21] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.
- [22] 孙乐强,郝振纯,王加虎,等. TMPA 卫星降水数据的评估与校正[J]. 水利学报,2014,46(10):1135-1146.
- [23] 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.
- [24] 刘小婵,赵建军,张洪岩,等. TRMM 降水数据在东北地区的精度验证与应用[J]. 自然资源学报,2015,30(6):1047-1056.
- [25] 罗布坚参,翟盘茂,假拉,等. 青藏高原测站降水与 TRMM 估测降水一致性评估[J]. 气象,2015,41(9):1119-1125.
- [26] 沈彬,李新功. 塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估[J]. 干旱区地理,2015,38(4):703-712.
- [27] 蔡晓慧,邹松兵,陆志翔,等. TRMM 月降水产品在西北内陆河流域的适应性定量分析[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2013,49(3):291-298.
- [28] 李威,蒋平,赵卫权,等. TRMM 卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析:以贵州省为例[J]. 水土保持研究,2016,23(1):97-102.
- [29] Li N, Tang G, Zhao P, et al. Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin[J]. Atmospheric Research, 2017,183(25):212-223.
- [30] Tang G, Ma Y, Long D, et al. Evaluation of GPM day-1 IMERG and TMPA version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales [J]. Journal of Hydrology, 2016,533(21):152-167.
- [31] Guo H, Chen S, Bao A, et al. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China[J]. Atmospheric Research, 2016, 52(12):121-133.
- [32] Siuki S K, Saghafiana B, Moazami S. Comprehensive evaluation of 3-hourly TRMM and half-hourly GPM-IMERG satellite precipitation products[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017,38(2):558-571.
- [33] Prakash S, Mitra A K, Aghakouchak A, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region [J]. Journal of Hydrology, 2016,221(13):116-132.
- [34] Kim K, Park J, Baik J, et al. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM3B42 over Far-East Asia[J]. Atmospheric Research, 2017,187(5):95-105.
- [35] 周丹,张勃,安美玲,等. 黄河流域不同时间尺度干旱对 ENSO 事件的响应[J]. 中国沙漠,2015,35(3):753-762.
- [36] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究,2006,23(1):27-34.
- [37] 刘昌明,曾燕,邱新法. 黄河流域气象水文学要素图集[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.
- [38] 宋文龙,杨胜天,路京选,等. 黄河中游大尺度植被冠层截留降水模拟与分析[J]. 地理学报,2014,69(1):80-89.
- [39] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等. 黄河河口镇—潼关区间 1998—2010 年土地利用变化特征[J]. 地理学报,2014, 69(1):42-53.
- [40] 王楠,李栋梁,张杰. 黄河中上游季节内强降水的时间非均匀性特征及其对大气环流的响应[J]. 中国沙漠, 2013,33(1):239-248.
- [41] 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.