

TRMM 和 GPM 卫星降水数据在中国 三大流域的降尺度对比研究

崔路明¹ 王思梦¹ 刘轶欣¹ 蒋娅¹ 董林垚² 黄昌^{1, 3, 41}

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3. 西北大学

陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;

4. 西北大学 地表系统与灾害研究院, 陕西 西安 710127)

【摘要】: 以中国三大流域为研究区域, 分别针对 TRMM3B43 和 GPMIMERG 降水数据, 构建基于归一化植被指数 (NDVI) 和数字高程模型 (DEM) 数据的地理加权回归 (GWR) 模型, 以 2014 年夏季 (6~8 月) 数据为例, 得到了三大流域 1km 分辨率的降尺度降水数据, 并进一步通过气象站点数据对降尺度结果进行验证。研究表明: (1) GPM 原始数据整体精度优于 TRMM 数据, 两种数据在黄河流域的精度评价指标优于长江流域与珠江流域; (2) 经降尺度计算, 两种数据空间分辨率得到了显著提高, 且表现出更多降水变化的细节与趋势, 但精度指标对原始数据依赖性大, 导致提升并不显著; (3) 当联合使用 NDVI 及 DEM 作为 GWR 降尺度模型的辅助变量时, 两种降尺度结果的差异值在长江流域与珠江流域的高海拔地区中更为显著; (4) 黄河流域中, 使用不同辅助变量下的降尺度结果在空间分布上总体相似。TRMM 数据使用地形作为单独辅助变量的降尺度结果最佳, 而 GPM 数据不同辅助变量下降尺度结果差异并不明显。

【关键词】: 降尺度 地理加权回归 中国三大流域

【中图分类号】: K903 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1317-12

降水是陆地水汽循环的重要表现形式之一。降水信息对研究水文循环以及环境变化等具有重要的意义, 因此, 如何获取高精度的降水数据一直是水文研究的关键问题之一^[1]。目前获取降水数据的主要方式为雨量站观测、地面雷达观测以及降水卫星遥感反演^[2]。雨量站及地面雷达观测可以以较高的精度获得降水数据, 但受限于其数据获取的方式, 其数据的覆盖范围存在较大的限制, 尤其是在偏远地区, 相关数据稀缺^[3]。而卫星降水观测具有覆盖范围广、时空连续性高和空间分辨率高等特点, 已成为目前获取降水资料的重要方式之一^[4]。热带降水观测计划 (Tropical Rainfall Measurement Missions, TRMM) 卫星计划提供了准全球范围内 (南北纬 50° 以内) 的逐 3h 网格化降水产品, 其空间分辨率为 0.25° × 0.25°, 已广泛应用于水文水资源研究的各个领域。

作者简介: 崔路明 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向遥感和 GIS 应用. E-mail: 1553107356@qq.com

黄昌 E-mail: changh@nwu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1502501, 2017YFC0404302)

域^[5]。而作为 TRMM 计划的继承与发展计划,全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement,GPM)进一步提高了降水产品的时空分辨率和降水数据的精度,并真正实现了全球范围内的降水观测^[6]。目前,TRMM 与 GPM 降水数据已经在流域水文研究中得到了广泛应用^[7]。

由于不同的降水数据在不同的区域具有不同的精度和可靠性,国内外学者开展了许多关于 TRMM 与 GPM 降水数据精度评价的研究。王思梦^[8]、金晓龙^[9]、吴一凡^[10]和许凤林等^[11]分别在黑河流域、天山山区、长江流域和黄淮海平原等地区对 GPM 数据进行了精度验证与比较研究;杨荣芳^[12]、李相虎^[13]、徐东^[14]和孟庆博等^[15]分别在京津冀地区、鄱阳湖地区、怒江流域和尼洋流域对 TRMM 数据进行了适用性分析与评价。以上研究均证实了两种卫星降水数据在不同的区域其精度与适用性均存在差异。也有学者对两种数据在相同研究区域精度进行了对比验证,如刘益峰^[16]、李麒麟^[17]、余坤伦等^[18]在福建省、中国大陆、青藏高原等区域,利用气象站点观测到的降水数据作为参考值对 GPM 与 TRMM 两种卫星降水数据进行了精度评价与对比,发现两种数据总体上均与观测数据存在一定的相关性,但差异仍然较为明显,且不同区域的差异各不相同。

尽管两种卫星降水数据均能提供空间上连续的降水观测,但由于其空间分辨率较低,难以满足高精度水文模拟及其它中小流域水文研究对高分辨率降水信息的需求,因此,降水降尺度研究一直是降水研究的热点问题之一。降水降尺度方法大体可以分为动力降尺度与统计降尺度两大类^[19]。其中统计降尺度由于其简单有效性在近年来得到了快速的发展,目前已被广泛应用于 GPM、TRMM 降水数据的降尺度研究中。代表性的统计降尺度方法是地理加权回归^[20](Geographically Weight Regression,GWR),其在降水降尺度研究中的应用尤为广泛。赵娜等^[21]基于 GWR 在黑河地区结合归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)和数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)对 TRMM 降尺度得到了 1km 分辨率的降水数据,其分析显示不同的 GWR 降尺度方法精度改善不同;曾业隆等^[22]同样基于 GWR 结合 DEM 辅助因子得到喀斯特山区 1km 降尺度降水数据,降尺度结果的精度得到了优化,但研究区内不同地区的降尺度结果略有差异;熊俊楠等^[23]在青藏高原地区构建 TRMM 数据与地表植被指数的 GWR 模型实现了降水数据降尺度,各评价指标都得到了提升,但在不同月份的降尺度精度也有所不同。由于不同区域自然和气候条件各异,往往导致降尺度模型的模型假设与实际情况存在偏差,且不同辅助变量在不同区域和不同条件下对降水的解释力不同,造成基于地理因子的 GWR 降尺度方法在不同区域的结果各有差异,且选用不同的辅助变量对降尺度的结果也存在较大影响。

长江流域、黄河流域以及珠江流域是中国主要三大流域和降水的主要承载地,覆盖了中国 31%以上的国土面积,孕育了全国约 45%的人口。因此,本文拟以此 3 个流域为例,对比分析 TRMM 和 GPM 这两种常用的卫星降水数据使用 GWR 降尺度的效果,并探讨不同的辅助变量及其组合对降尺度结果的影响,以期对相关区域范围的降水降尺度研究提供宏观参考与借鉴。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

本研究以中国三大流域为研究区域,包括黄河流域、长江流域、珠江流域。地理位置介于 21° 31' N~41° 51' N,90° 33' E~112° 25' E,横跨热带、亚热带和温带等不同气候区域,总流域面积约为 300 万 km²,流经青藏高原、内蒙古平原、黄土高原、黄淮海平原、横断山脉、云贵高原、四川盆地、江南丘陵等重要地貌单元,是我国降水的主要承载区域。由于地域广阔,流域内降水空间异质性明显,极端降水事件频繁以致洪涝灾害频发^[24]。

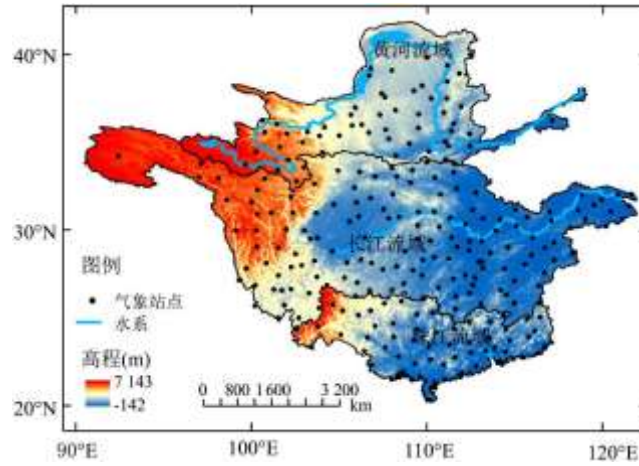


图 1 中国三大流域及气象站点分布

1.2 研究数据

1.2.1 降水数据

本文所使用的卫星降水数据包括 TRMM 数据和 GPM 数据，其中 TRMM 卫星是专门用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星，属于“地球观测系统”(EOS)，由美国国家航空航天局(NASA)、日本宇宙开发事业团(JAXA)联合研制，NASA 负责测雨雷达和卫星发射。TRMM 卫星于 1997 年 11 月发射并于 2015 年 6 月失效，而 GPM 作为 TRMM 的后续降水测量计划，于 2014 年 2 月发射，提供了更大范围和更高时空分辨率的降水数据，其分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ [25]。

由于 TRMM 数据和 GPM 数据重合期为 2014 年 3 月~2015 年 4 月，本文选用的是 2014 年 6~8 月份 TRMM3B43 月数据与 GPMIMERG 月数据，其中 TRMM3B43 月降水数据集是 TRMM 卫星与其他卫星以及地面观测联合反演的降水产品，是众多低级别数据采用红外降水资料融合估算得到 [26]，而 GPMIMERG 该数据集结合了所有微波传感器、地球同步卫星以及地面站点的月降水信息 [27]。两种降水数据均使用 Python 脚本语言进行预处理，包括格式转换、研究区裁剪和降水量累加等，得到 2014 年夏季降水总量。

1.2.2 辅助变量数据

本文中所使用的数字高程模型 (DEM) 与归一化植被指数 (NDVI) 均来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)，其中 DEM 是来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 数据，本文中数据集为基于最新的 SRTM4.1 数据重采样生成，分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ ；而 NDVI 数据集是基于连续时间序列的 SPOT/VAGETATIONNDVI 卫星遥感数据集，采用最大值合成法生成，选取 2014 年夏季季度植被覆盖数据。

1.2.3 气象站点数据

本文选用三大流域内共 209 个气象站点的降水数据作为真实值对降尺度前后的卫星降水数据进行精度验证，气象观测数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。

2 方法与验证

2.1 降尺度方法

地理加权回归模型 (GWR) 是探究空间异质性与区域研究的模型之一, 其基本思想是变量间的关系随空间位置的变化而变化, 通过估算空间上每一位置的自变量和辅助因子的参数来建立回归模型^[28]。已有研究表明, 降水与植被、地形等地表特征存在一定的相关性^[29], 因此, NDVI 和 DEM 是 GWR 降水降尺度模型中使用最为频繁的两种辅助变量。本研究拟分别考察联合两种辅助变量和单独使用其中一种变量对降尺度效果的影响, 将 NDVI 和 DEM 联合作为辅助变量的降尺度模型作为记为 GWR1, 单独使用 NDVI 的模型记为 GWR2, 单独使用 DEM 的模型记为 GWR3, 通过原始降水数据与不同的辅助变量组合方式建立函数关系 (式 1), 以此实现尺度的转换。

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: Y_i 为第 i 点的降水量; (u_i, v_i) 表示第 i 个位置点的经纬度坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 表示第 i 个位置点上的第 k 个回归参数; X_{ik} 表示第 k 个空间因素在 i 点处的值; ε_i 表示每个位置上的残差。

2.2 降尺度流程

降尺度方法基于两种假设: (1) 降水与地表特征具有空间关系, 这种空间关系可以用回归模型来模拟与处理; (2) 所建立的低空间分辨率的模型也可用于高分辨率地表特征数据的精细降水预报^[29]。本研究的降尺度步骤包括:

- (1) 将原始 NDVI、DEM 分别重采样至与 TRMM、GPM 数据相同的空间分辨率;
- (2) 按公式 (1) 分别建立 TRMM3B43、GPMIMERG 与独立辅助变量的 GWR 模型, 得到模型常数项、系数以及残差;
- (3) 栅格化模型常数、系数并重采样至 1km 分辨率数据数据, 将模型残差利用克里金插值法^[30]重采样至 1km;
- (4) 利用系数乘辅助变量加上常数项得到 1km 分辨率的预估降水值;
- (5) 将模型预测降水值与残差数据相加得到不同辅助变量组合下的降尺度结果。

2.3 检验指标

为了检验降尺度结果的精度, 根据流域内气象站点实测数据为真实值与降尺度结果进行比较验证。采用决定系数 (R^2)、偏差 (Bias) 以及均方根误差 (RMSE) 3 个指标作为评价指标, 相关计算公式见公式 (2~4)。

$$R^2 = \left(\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$Bias = \frac{\sum_i^n X_i}{\sum_i^n Y_i} - 1 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中： Y_i 为气象站点数据； X_i 为站点所对应的卫星降水产品栅格值； i 为观测站点表示， n 为气象站点数。决定系数(R^2)，又称拟合优度，用以揭示降尺度结果与降水真实值之间的相关程度，值越大表明两者之间相关性越高。偏差(Bias)，用以表示降尺度结果与降水真实值之间的偏离程度，值越小，表明两者之间差异越小。均方根误差(RMSE)，用来表示降尺度结果和降水真实值的偏差，其值越小代表两者越接近。

3 结果与分析

3.1 原始数据精度验证

TRMM 与 GPM 原始数据在三大流域的降水空间分布如图 2 所示，可以看到，两种降水数据在空间分布上呈现较为相似的特征，降水值的范围也较为接近。由于 GPMIMERG 降水数据其空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ，高于 TRMM3B43 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)，因此其表现出更多的空间分布细节。

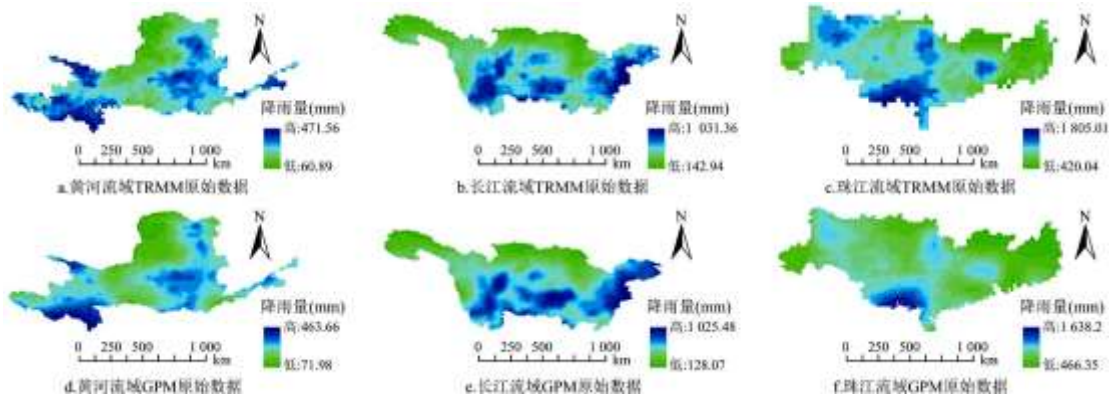


图 2 2014 年夏季 TRMM 与 GPM 原始数据三大流域分布图

为了比较 TRMM、GPM 数据在三大流域的准确性，以站点值为真值分别对其进行验证与对比，并绘制散点图(图 3)，图中黑色线为拟合线性关系，红色线为 1:1 参考线。可以看出，在三大流域中，两种数据的评价参数存在一定的差异，GPMIMERG 原始数据在相同流域中相关系数(R^2)，均方根误差(RMSE)均优于 TRMM3B43 原始数据，但偏差(Bias)大于 TRMM3B43 原始数据。从图 3 还可以看出，在三大流域，卫星降水数据整体以高估为主(散点大多位于 1:1 参考线之上)，随着降水增多时，卫星降水主要表现

为低估(散点大多位于 1:1 参考线之下)。对于 TRMM 数据整体上的高估,这可能是由于卫星本身的特点所致。TRMM 卫星主要是通过微波传感器等设备探测云内降水粒子和云粒子与微波的相互作用达到测量降水的目的,不能很好地估计历时较短、降水较小的降水过程,刘小婵^[31]的研究也表明,TRMM 降水数在夏季主要表现为整体上的高估。而随着实测降水量较大时,TRMM 降水产品往往会低估降水,主要是因为 TRMM 降水雷达为瞬时面扫描探测,有些短时强降水可能会捕捉不到,这与杨荣芳^[12]、陈诚^[32]、黄桂平^[33]的研究一致,随着降水量增大,TRMM 降水量产品往往会低估降水。而 IMERG 在整体水平上的高估是卫星算法所致,IMERG 的校正算法整体性抬升了卫星降水值,当降水偏多时,低估的原因可能是对大雨以及暴雨这种高雨强的降水事件的捕捉监测能力存在极大的缺陷,对高雨强降水的捕捉能力不足导致低估降水^[34]。

总体上,两种降水数据与真实值均存在较大的相关性,GPM 数据整体水平与稳定性较好,与站点数据的相关性也较高,只是在部分站点处与真实值差异较大,导致总体偏差略大。三大流域中,黄河流域内两种卫星产品的降水数据精度整体上略优于其它两个流域。

3.2 降尺度结果与对比

3.2.1 不同流域 TRMM 降尺度结果及其精度分析

采用联合 NDVI 和 DEM 的地理加权回归模型(GWR1)对 TRMM3B43 降水数据进行降尺度操作,得到了其在 3 个流域中的降尺度结果(图 4)。可以看到,降尺度结果(图 4)与 TRMM 原始数据(图 2a, b, c)降水空间分布整体仍保持一致。但是,经过降尺度,TRMM 降水数据空间分辨率从 0.25° 提升到 1km,空间分辨率得到了显著提高,可以体现更为细致的降水特征。

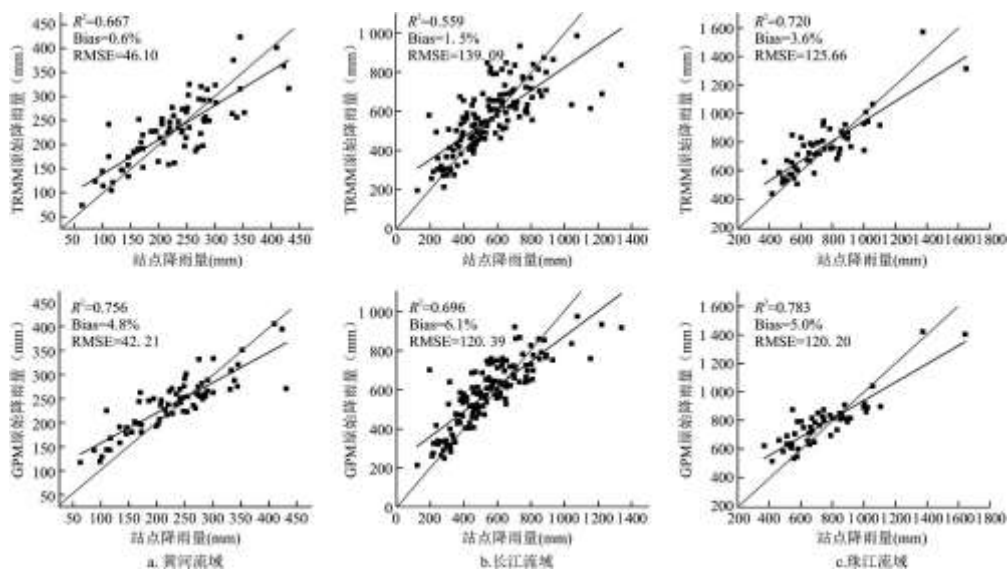


图 3 TRMM 和 GPM 原始数据精度检验散点图

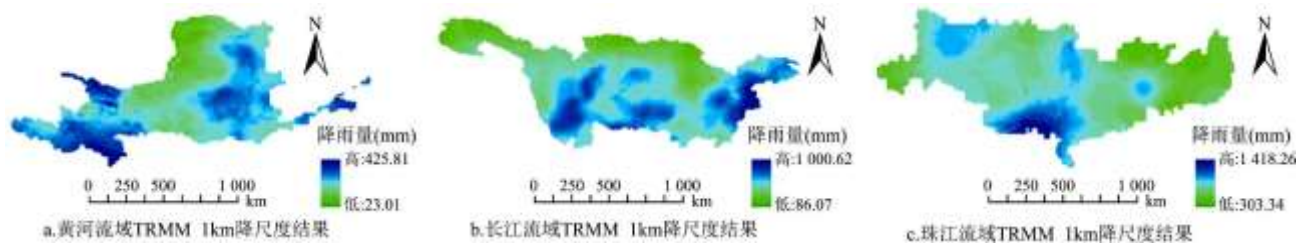


图 4 TRMM3B43 降尺度结果

为了定量分析 TRMM 降水数据降尺度结果在三大流域的精度,本研究利用分布在研究区域内实测站点数据作为参考,绘制散点图(图 5)。可以看到,相比原始数据(图 3),经降尺度过后,黄河流域的降水结果的相关性由 0.667 提升到 0.693,得到了略微提高;而偏差却由 0.6%偏大到 8.7%,说明黄河流域中 TRMM 夏季降水数据降尺度的模拟效果精度偏低;而长江流域中相比原始数据相关系数(R^2)略微降低,偏差(Bias)由 1.5%降低到 1.3%,降尺度模拟精度得到提高。珠江流域中降尺度相关性由 0.720 略微降低到 0.704,而偏差由 3.6%降低到 3.1%;降尺度后三大流域的均方根误差(RMSE)均略微提高。从图 5 还分析出降尺度结果也存在低雨量高估、高雨量低估现象,反映了降尺度结果的精度较大程度上依赖于原始数据的精度。总体来看,TRMM 数据降尺度前后在长江流域中相关系数(R^2)为三大流域中最低值,排除三大流域内站点数量不同等因素影响,相关系数较低的原因可能是由于长江流域内降水丰富多变但地势复杂导致对降水的反演较为困难。

可以看到,在不同流域的验证中,所选择的 3 个精度指标各有高低。为了从整体上比较三大流域基于 TRMM 数据的降尺度结果精度差异,本研究将降尺度结果与站点数据验证结果的标准偏差(SD)、相关系数(R^2)和均方根误差(RMSE)绘制泰勒图(图 6),以反映 TRMM 数据在三大流域中的降尺度精度差异。由图 6 可知,黄河流域的降尺度数据的相关系数与珠江流域大致相同,其偏差(SD)与均方根误差(RMSE)相对于其他流域来说更低。从泰勒图中可以看到,黄河流域的标识更靠近左下角的原点,说明该流域的降尺度结果总体上相对更优。

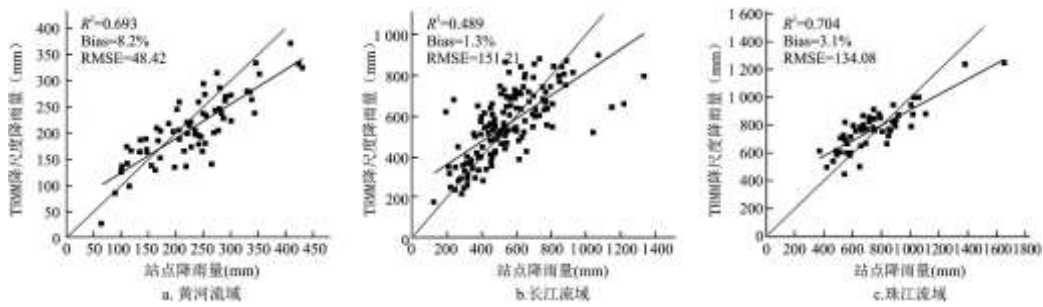


图 5 TRMM 数据三大流域降尺度数据验证散点图

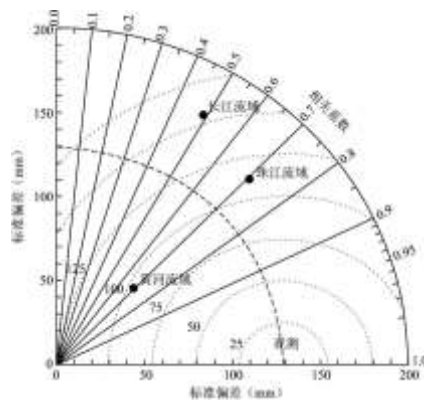


图 6 TRMM 数据三大流域降尺度验证泰勒图

3.2.2 不同流域 GPM 降尺度结果及其精度分析

同样基于 GWR1 对 GPMIMERG 数据进行降尺度, 得到了其在三大流域中的降尺度结果(图 7)。同样可以看到, GPM 数据降尺度结果(图 7)与原始数据(图 2d, e, f)降水空间分布整体仍保持一致。但是, 经过降尺度, GPM 降水数据空间分辨率从 0.1° 提升到 1km, 空间分辨率也相应得到了提高, 亦可以体现更为细致的降水空间特征。

为了进一步定量分析 GPM 的降尺度结果在三大流域的精度, 同样基于实测站点数据作为参考, 绘制散点图(图 8)。结合原始 GPM 降水数据精度(图 3), 可以看到, GPM 经降尺度操作, 黄河流域内相关性与偏差并未发生改变, 均方根误差略有增加; 而长江流域内偏差由 6.1%降低到 5.7%, 数据精度略微提高; 珠江流域内相关系数、偏差以及均方根误差系数均有所下降。而从图 8 也可以看到 GPM 的降尺度结果也存在总体上低雨量高估、高雨量低估现象, 这也很大程度上是由于降尺度结果对原始数据精度的依赖性较高。

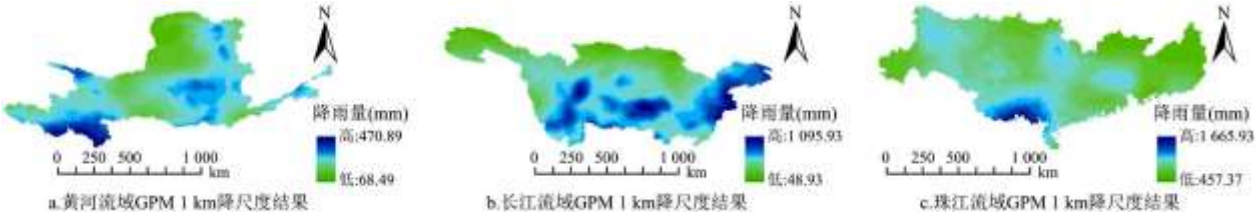


图 7 GPMIMERG 降尺度结果

由泰勒图(图 9)可知, 在相关系数上黄河流域与珠江流域表现大致相同, 而偏差与均方根误差都低于其他流域; 而与 TRMM 数据降尺度结果比较类似, 长江流域在 3 个指标的表现均为最低。如泰勒图所示, 对于 GPM 数据在三大流域的降尺度结果, 黄河流域也呈现相对更好的精度。

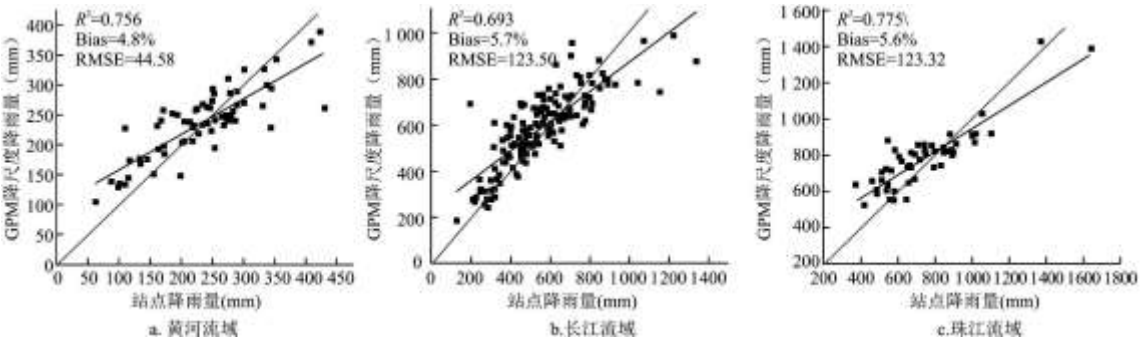


图 8 GPM 数据三大流域降尺度验证散点图

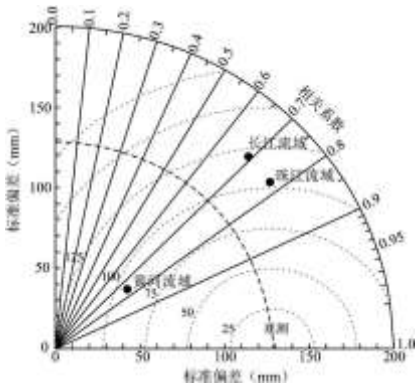


图 9 GPM 数据三大流域降尺度验证泰勒图

3.2.3 两类数据降尺度结果对比

为了进一步对比 TRMM 数据与 GPM 数据降尺度结果之间在不同流域的差异，本研究对 GWR1 降尺度模型下的两种结果进行叠置分析，将 GPM 降尺度结果减去 TRMM 降尺度结果，得到降尺度结果的差值分布图(图 10)，其中正值表示 GPM1km 分辨率数据值大于 TRMM 数据，负值表示 GPM1km 分辨率数据值小于 TRMM 数据，可以看到：黄河流域中上游区域多为正值，而长江流域内除中下游部分地区外绝大部分区域均显示为负值，珠江流域大部分区域均表现为 GPM 降水大于 TRMM。总体上，黄河流域由于总降水量相对更小，其差值的值域范围亦相对更小。

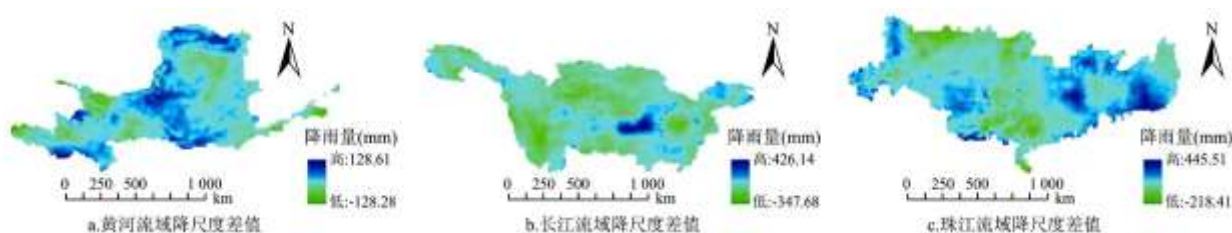


图 10 三大流域降尺度差值分布图

为了进一步对比两种降水数据降尺度结果差值的空间规律，本研究结合研究区内的 DEM 对降尺度差值的空间分布进行统计分析，得到三大流域内不同高程区间内差值的平均值，并绘制三大流域内不同高程区间差值柱状图(图 11)，可以看到：不同高程区间下的平均值差值相差明显；特别是在长江流域与珠江流域内，平均值差值随高程增加而呈现明显的增长趋势，这表明 GPM 数据降尺度结果与 TRMM 数据降尺度结果在高海拔地区相差巨大。原因可能是：地形影响了 TRMM 数据与 GPM 数据原始降水数据精度，而导致了降尺度差值也相差较大。

3.2.4 不同 GWR 模型降尺度结果对比

统计降尺度结果与辅助变量关系密切，本文以黄河流域为例，基于不同辅助变量的 GWR 分别对 TRMM3B43 与 GPMIMERG 两种数据进行降尺度，并对其结果进行对比分析(图 12)。可以看到，两种数据使用不同模型降尺度的结果中，降水高值区域与低值区域总体上基本一致。其中 GWR1 的结果由于结合了两种不同来源的辅助变量，其降水的空间分布异质性更高一些，而且使用该模型对 TRMM 和 GPM 降尺度的结果差异也更加明显一些，主要表现在流域上游地区 TRMM 降水整体上明显低于 GPM。

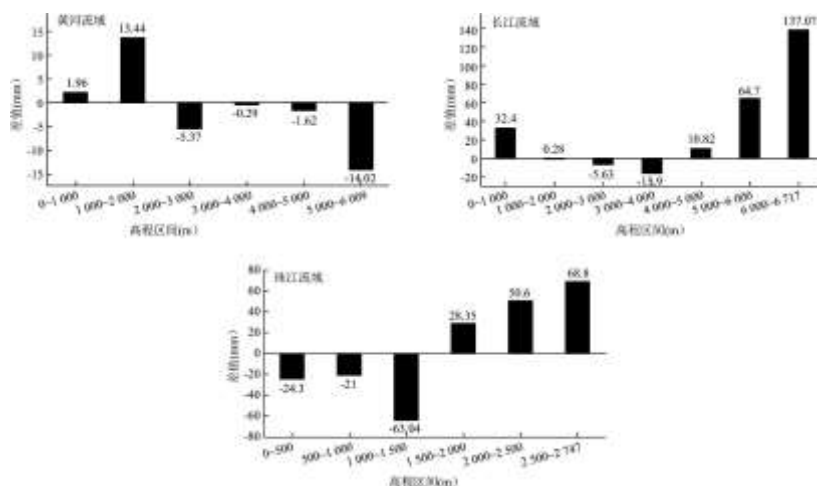


图 11 三大流域不同高程区间差值均值柱状图

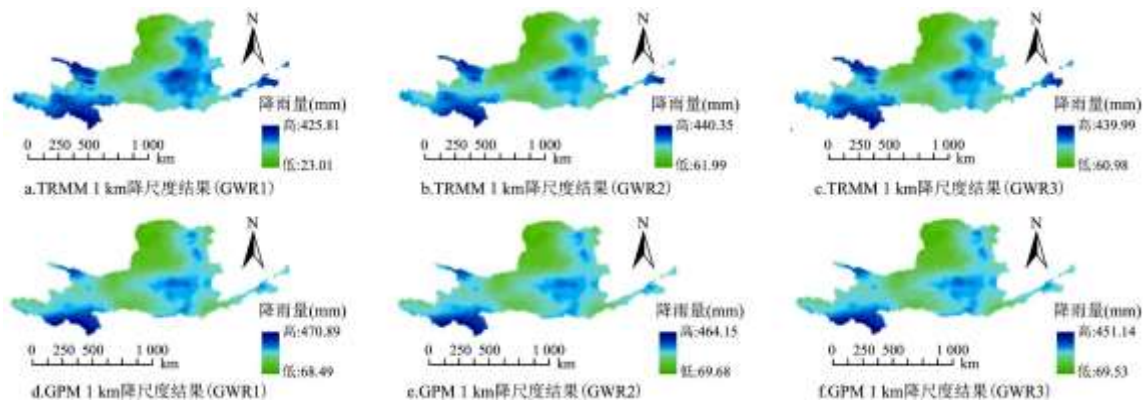


图 12 黄河流域不同模型降尺度结果

同样基于站点数据利用 R^2 、Bias、RMSE 3 个评价指标对不同模型的降尺度结果精度进行评价(表 1)。可以看到, TRMM3B43 数据在 3 种降尺度模型下的结果相关系数(R^2)都较原始数据有所提高, 但偏差(Bias)亦有不同程度的增加, 均方根误差(RMSE)在使用 GWR2 和 GWR3 时略微有所下降。不同降尺度方法使得 TRMM 资料 Bias 增加, 究其原因, 可能是降尺度计算从本质上未能改变 TRMM 原始降水测量值, 且处理过程中存在存在一定的信息损失, 导致不同降尺度方法结果的偏差值有所增加。而对于 TRMM 资料, GWR3 的降尺度结果相比 GWR2 的结果偏差略有降低, 可能是因为在黄河流域, 地形相比 NDVI, 是影响降水的重要下垫面因子, 地形不仅高程、坡度等影响降水分布, 还可以通过干扰天气系统的运动或者控制局地天气系统进程的方式影响局地降水, 促使山区形成特殊的降水空间分布。而植被对降雨分布的解释力重要体现在植被生长状况对降雨空间分布的响应, 导致 NDVI 受植被种类等因素, 常常与降雨存在一定的不同程度的滞后性, 导致将其作为辅助因子时降尺度结果不佳。所以以 DEM 为单一辅助变量的 GWR3 降尺度结果偏差优于 NDVI 为辅助变量的 GWR2 结果。总体来说, 在黄河流域, 使用 GWR3, 即单纯使用地形作为辅助变量进行降尺度, 其精度评价指标值最高。

对于 GPMIMERG 数据, 3 种模型结果的相关系数(R^2)均未见提高, 但偏差指数(Bias)略有减小。均方根误差指标(RMSE)在使用 GWR3 时有所降低但当把 NDVI 加入辅助变量时会有所升高。而对于 GPM 数据, 使用 NDVI 及 DEM 两种辅助变量中的一种或两种进行地理加权回归降尺度得到的结果未呈现明显的优劣差异, 偏差也有了不同程度的降低, 究其原因, 可能是由于 GPM 的降尺度在该流域主要受原始 GPM 降水数据主导, 导致不同降水方法得到的降尺度结果差异相对较小。

表 1 不同模型下的降尺度结果验证

数据	评价指标	原始数据	GWR1	GWR2	GWR3
TRMM	R^2	0.667	0.693	0.686	0.733
	Bias	0.6%	8.7%	3.1%	2.0%
	RMSE	46.10	48.42	45.24	41.38
GPM	R^2	0.756	0.756	0.704	0.720
	Bias	4.8%	4.8%	2.0%	2.5%
	RMSE	42.21	44.58	43.18	40.96

4 结论

本文针对目前主流的 TRMM 与 GPM 两种卫星降水数据,以中国三大流域为例,对比分析基于不同辅助变量的地理加权回归降尺度方法进行降水降尺度的效果,并通过研究区域内气象站点实际观测的降水数据进行精度验证。主要结论如下:

(1)从原始卫星降水产品数据来说,TRMM、GPM 卫星降水数据与实测降水量之间均存在较好的线性相关关系,但 GPM 整体水平与精度更高,与站点相关程度也更高;在对三大流域中的对比来看,两种数据在黄河流域的精度指标均优于长江流域和珠江流域。

(2)与原始数据相比,两种数据经降尺度后,空间分辨率均得到了显著提高,获得了更多的降水空间细节;但两种数据的降尺度结果精度依赖于原始数据且并未得到显著提高,甚至损失了一定的相关性与精度,这可能是由于研究区域自然地理条件复杂,所选用的地理因子(地形、植被指数)与降尺度模型无法完全对降水的空间异质性进行解释。

(3)将 NDVI 和 DEM 联合作为辅助变量时,TRMM 和 GPM 降尺度结果的差异值在长江流域与珠江流域高海拔地区表现出了较为明显的增加,反映了在高海拔地区对二者的选择更应慎重,而在黄河流域中两者差值在不同的高程区间均相对较小。

(4)在黄河流域,基于不同辅助变量组合方式的 GWR 降尺度模型,降尺度结果在空间分布上总体相似。对于 TRMM 数据,单纯使用地形作为辅助变量进行降尺度得到的结果精度最佳,而对于 GPM 数据,使用不同的辅助变量组合其降尺度结果并未展现明显的差异。

本文通过从不同流域、不同数据、不同模型 3 个维度对降水数据降尺度效果进行对比分析,并结合站点数据进行验证分析。虽然由于缺少更高空间分辨率的降水数据导致难以开展空间范围的更为细致的精度验证,但通过精度指标、叠置分析等几种不同的手段,对覆盖我国大部分区域的三大流域中降水数据的降尺度方法进行了较为细致的对比研究,研究结果一定程度上可以为我国大部分区域不同尺度下的降水数据获取及降尺度处理提供参考和借鉴。

参考文献:

[1]SHEN Y,ZHAO P,PAN Y,et al.A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2014,119(6):3063-3075.

[2]SHEN Y,HONG Z,PAN Y,et al.China's 1 km merged gauge,radar and satellite experimental precipitation dataset[J].Remote Sensing,2018,10(2):264.

[3]谈戈,夏军,李新.无资料地区水文预报研究的方法与出路[J].冰川冻土,2004,26(2):192-196.

[4]SMITH E A,ASRAR G,FURUHAMA Y,et al.International global precipitation measurement (GPM) program and mission:An overview [M].Measuring precipitation from space.Springer,Dordrecht,2007:611-653.

[5]HUFFMAN G J,BOLVIN D T,NELKIN E J,et al.The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA):Quasi-global, multiyear,combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J].Journal of hydrometeorology,2007,8(1):38-55.

[6]HUFFMAN G J,BOLVIN D T,BRAITHWAITE D,et al.NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)[J].Algorithm theoretical basis document,version,2015,4:30.

-
- [7]LIU Z.Comparison of integrated multisatellite retrievals for GPM (IMERG) and TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products:Initial results[J].Journal of Hydrometeorology, 2016,17(3):777-790.
- [8]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):1847-1860.
- [9]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.
- [10]吴一凡,张增信,金秋,等.GPM 卫星降水产品在长江流域应用的精度估算[J].人民长江,2019,50(9):77-85,152.
- [11]许凤林,郭斌,叶贝,等.GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):79-86.
- [12]杨荣芳,曹根华,张婧.TRMM 3B43 卫星降水数据在京津冀地区的适用性研究[J].冰川冻土,2019,41(3):689-696.
- [13]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.
- [14]徐东,邹进,陆颖,等.TRMM 卫星降水数据在怒江流域的适用性分析[J].水土保持研究,2019,26(1):240-244,251.
- [15]孟庆博,刘艳丽,刘冀,等.TRMM 卫星降水产品在尼洋河流域的适用性定量分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):89-96.
- [16]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.
- [17]李麒麟,张万昌,易路,等.GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J].水科学进展,2018,29(3):303-313.
- [18]余坤伦,张寅生,马宁,等.GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估[J].干旱区研究,2018,35(6):1373-1381.
- [19]WILBY R L,WIGLEY T.Downscaling general circulation model output:A review of methods and limitations[J].Progress in Physical Geography,1997,21(4):530-548.
- [20]BRUNSDON C,FOTHERINGHAM A S,CHARLTON M E.Geographically weighted regression:A method for exploring spatial nonstationarity[J].Geographical Analysis,1996,28(4):281-298.
- [21]赵娜,焦毅蒙.基于 TRMM 降水数据的空间降尺度模拟[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1388-1395.
- [22]曾业隆,谭伟,王超,等.基于 GWR 模型的贵州喀斯特山区 TRMM 3B43 降水资料降尺度分析[J].干旱气象,2018,36(3):405-414.
- [23]熊俊楠,李伟,刘志奇,等.基于 GWR 模型的青藏高原地区 TRMM 数据降尺度研究[J].国土资源遥感,2019,31(4):88-95.

-
- [24]王思梦. 中国暴雨山洪时空分布规律及其驱动因素研究[D]. 西北大学, 2019.
- [25]HUFFMAN G J.The transition in multi-satellite products from TRMM to GPM (TMPA to IMERG)[J].Version 161025, 2016:5.
- [26]GEBREIORGIS A S, KIRSTETTER P-E, HONG Y E, et al. To what extent is the Day-1 GPM IMERG satellite precipitation estimate improved as compared to TRMM TMPA-RT[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2018, 123(3):1694-1707.
- [27]袁金国, 牛锋, 龙丽民, 等. TRMM 卫星和全球降雨观测计划 GPM 及其应用[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(9):1754-1757.
- [28]CHEN C, ZHAO S, DUAN Z, et al. An improved spatial downscaling procedure for TRMM 3B43 precipitation product using geographically weighted regression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(9):4592-4604.
- [29]JING W, YANG Y, YUE X, et al. A comparison of different regression algorithms for downscaling monthly satellite-based precipitation over north China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(10):835.
- [30]LI Y, ZHANG Y, HE D, et al. Spatial downscaling of the tropical rainfall measuring mission precipitation using geographically weighted regression kriging over the Lancang River Basin, China[J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(3):446-462.
- [31]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.
- [32]陈诚. TRMM 3B43 遥感降水量产品数据定标与降尺度方法研究[D]. 南京大学, 2016.
- [33]黄桂平, 曹艳萍. TRMM 卫星 3B43 降水数据在黄河流域的精度分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5):1111-1120.
- [34]任英杰, 雍斌, 鹿德凯, 等. 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2):560-572.