

# 基于地理加权回归的河南省遥感降水产品降尺度估计

苗引引

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年3月20日; 发布日期: 2026年3月30日

## 摘要

TRMM降水数据应用广泛, 多适用于水文、气象、灾害预警等方面的研究, 但 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的空间分辨率太低过于粗糙, 难以满足当前研究的需求。因此本文通过归一化植被指数、数字高程、和经纬度等地理环境因子构建地理加权回归模型以河南省为研究区域, 对2001~2025年河南省TRMM降水数据进行降尺度处理, 使降水数据集的分辨率提高。通过决定系数( $R^2$ )、相对偏差(Bias)、均方根误差(BMSE)等评价指标, 使用气象站点的实测降水数据作为“真实值”对降尺度后的降水数据进行精度验证。研究发现: 经过降尺度操作后, 降水数据的数据精度整体有所提高, 数据的分辨率得到明显的提升, 降水空间分布更加细腻, 能够更好地表现河南省降水的空间分布和时空变化。

## 关键词

TRMM降水数据, 降尺度, 精度评估

# Downscaling Estimation of Satellite-Based Precipitation Products in Henan Province Based on Geographically Weighted Regression

Yinyin Miao

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: February 10, 2026; accepted: March 20, 2026; published: March 30, 2026

## Abstract

TRMM precipitation data are widely used in studies related to hydrology, meteorology, and disaster early warning. However, the spatial resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  is relatively coarse and insufficient to meet the requirements of fine-scale research. Therefore, this study constructs a geographically weighted regression (GWR) model using geographic environmental factors, including the normalized difference vegetation index (NDVI), digital elevation model (DEM), and latitude-longitude information. Taking Henan Province as the study area, the TRMM precipitation data from 2001 to 2025 were downscaled to improve the spatial resolution of the precipitation dataset. The downscaled precipitation data were evaluated with statistical indicators including the coefficient of determination ( $R^2$ ), relative bias (Bias), and root mean square error (RMSE). Observed precipitation data from meteorological stations were used as “ground truth” for accuracy validation of the downscaled precipitation data. The results indicate that the downscaling procedure significantly improved the overall accuracy of the precipitation data. In addition, the spatial resolution was markedly enhanced, resulting in a more refined representation of precipitation patterns and more precise characterization of spatial details.

## Keywords

TRMM Precipitation Data, Downscaling, Accuracy Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

降水是全球水循环与气候系统的关键参数，对自然环境和人类生存发展具有不可替代的作用。当前降水数据获取主要依赖地面观测、降雨雷达和卫星遥感三种方式。地面观测精度高但成本巨大且站点分布不均；雷达探测易受地形限制；卫星遥感则具有覆盖范围广、时空分辨率高、受约束条件少等优势，能有效弥补前两种方法的不足，已成为大尺度水文气象研究的重要数据源。然而，主流遥感降水产品(如 TRMM)空间分辨率较低(通常 0.250)，难以满足区域尺度水文模拟与水资源精细化管理的需求。降尺度技术为解决这一矛盾提供了经济可行的途径——其中统计降尺度因计算量小、操作简便且精度可靠，应用最为广泛。地理加权回归(GWR)模型能充分考虑降水与地理环境因子(如 NDVI、高程、经纬度等)的空间非平稳关系，显著提升降水数据的空间精度。因此，开展遥感降水降尺度研究对区域水文过程认知与水资源管理具有重要意义。

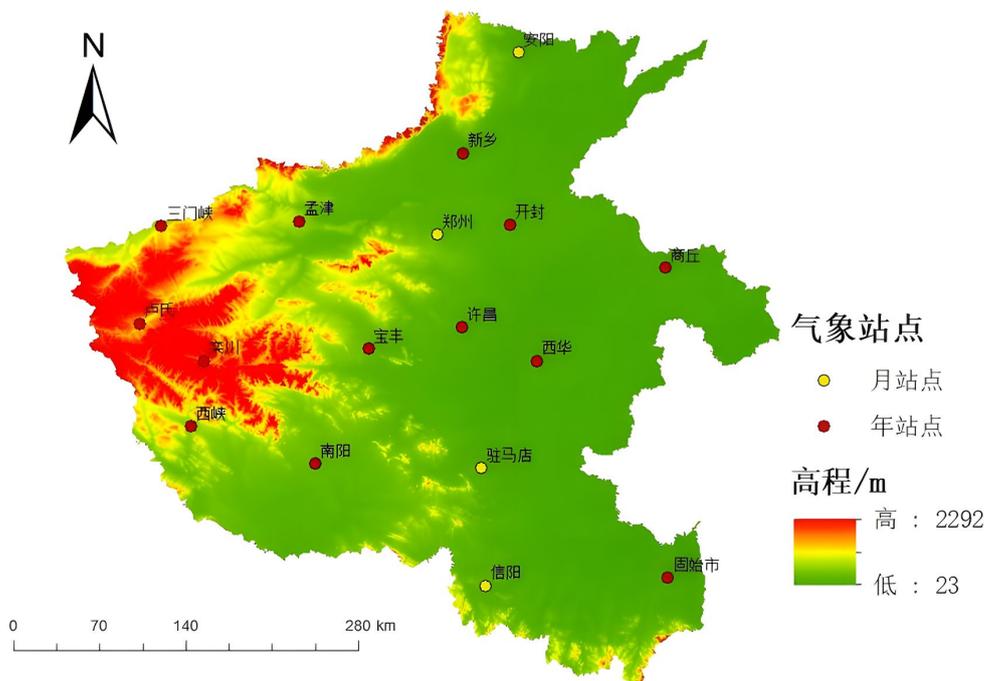
遥感降水数据在地面观测困难地区(如高原、山地、海洋)具有独特优势，已广泛应用于水文气象研究。TRMM 数据作为全球性高时空分辨率降水产品，其精度验证与降尺度方法成为国内研究热点。黎扬兵等基于多尺度地理加权回归模型对渭河流域 TRMM 数据进行降尺度，有效揭示了干旱时空演变特征[1]。李炎坤等利用青海地区气象站点验证了降尺度后数据精度显著提升，并发现海拔对降尺度结果具有重要影响[2]。赵泽宇等以 NDVI 为核心解释变量构建 GWR 模型，证实降尺度数据与实测数据一致性良好，可支持区域水循环与干旱监测研究[3]。范田亿等在湘江流域的综合研究表明，降尺度处理后决定系数( $R^2$ )提高，相对偏差(Bias)和均方根误差(RMSE)均显著降低，验证了 GWR 模型在 TRMM 降尺度中的适用性[4]。在 TRMM 数据应用方面，Zeng 等验证了 TRMM 数据在澜沧江流域干旱监测中的有效性[5]。Savtchenko

等利用 TRMM 数据成功评估了加利福尼亚州降水异常,证实了卫星降水数据的可靠性[6]。Immerzeel 等在南欧伊比利亚半岛构建了不同空间尺度下降水量与 NDVI 的地理加权回归模型,发现降尺度处理显著改善了干旱年与雨季的数据精度,为统计降尺度方法的有效性提供了重要证据[7]。

## 2. 研究概况

### 2.1. 研究区概况

研究区范围见图 1,河南是我国的古代文明的发源地,历史上开发时间早,有悠久的历史 and 灿烂的文化,具有极其重要的政治地位。经度范围大致为  $110.35^{\circ}\sim 116.64^{\circ}$  纬度范围大致为  $31.38^{\circ}\sim 36.36^{\circ}$  河南省气候属于暖温带与亚温带过渡地区,湿润、半湿润气候,具有冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨的气候特点。河南省近十年年平均气温保持在十几度,年降水量在 500 毫米以上。河南省南北、东西跨度大,相隔均五百多公里,占全国国土总面积的百分之 1 点多。随着气候变化,河南省的流域储水量和流域分布等格局都发生了一定的变化,降水是全球水循环中的重要一环,是气候的重要组成部分。河南省的降水资源丰富,在整个生态环境中具有重要的地位,因此获取河南省精确的降水数据,对于理解河南省整个流域生态水文环境的演变具有关键意义。



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2884 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Location of the study area

图 1. 研究区地理位置和街道位置

### 2.2. 数据来源

本研究使用的 TRMM 降水数据来自 NASE 发布的第 7 版本 3 级产品的降水数据,数据范围覆盖整个河南省,空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为 1 个月,数据年份从 2001~2025 年。每月的 TRMM 数据进行统计相加,得到年尺度的降水数据。地面气象站点的降水数据来自中国气象数据网(国家气象信息中心-中国气象数据网(cma.cn)),选取河南省 2001~2025 年的 17 个站点的年降水数据作为“真实值”来对降尺度先后

的年降水数据进行验证归一化植被指数(NDVI)选取空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 个月的 MODIS 传感器发布的 MOD13A3 植被指数数据。DEM 数据是 NASA 发布的空间分辨率为 90 km 的高程数据。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 地理加权回归模型(GWR)

GWR 模型由 Chris 等提出, 是空间数据分析中常用的统计方法之一, 基本思想是通过估算研究区内每一给定位置的相关变量与解释变量的参数建立回归模型。以往的研究证明, 归一化植被指数和高程是影响降水分布的重要因素。本文引入 NDVI 和 DEM 及其对应的经纬度作为降尺度过程中影响降雨的因子, 建立 GWR 模型进行降尺度处理, 公式如下:

$$y_i = \alpha_{0i}(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \alpha_{ji}(u_i, v_i)x_{ji} + \varepsilon_i(u_i, v_i) \quad (1)$$

公式中:  $y_i$  为第  $i$  个点的降水量;  $\alpha_{0i}$  是第  $i$  个点的常数项回归参数;  $u_i, v_i$ : 第  $i$  个点的空间坐标;  $\alpha_{ji}$ : 第  $j$  个空间因素(如 NDVI 或 DEM 等)在第  $i$  个点的回归参数;  $x_{ji}$ : 第  $j$  个空间因素在第  $i$  个点处的值;  $\varepsilon_i$ : 第  $i$  个点的残差值。

#### 3.2. 评价指标

本研究使用决定系数  $R^2$ 、相对误差 BIAS 以及均方根误差 RMSE 来对降尺度前后的降水数据进行适用性评价与精度验证, 这三种指标是评判回归模型反演结果的常用指标参数。本文使用决定系数  $R^2$  表示地面站点实测降水量与降尺度前后的 TRMM 年降水量数据的线性相关性, 其最大值为 1, 最小值为 0, 值越接近 1, 说明回归模型越好, 越接近 0, 则说明回归模型越差。使用相对误差 BIAS 评价实测数据与降尺度前后的 TRMM 降水数据的偏离程度, 其值越小, 则说明数据越准确; 使用均方根误差 RMSE 反映误差的整体水平, 误差越小, 说明数据的精度越好。3 个指标的计算公式为:

决定系数:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - t^-)^2}{\sum_{i=1}^n (k_i - k^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

相对误差:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - k_i)}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - k^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

公式中:  $n$ ——地面监测站点的个数;  $t_i$ ——第  $i$  个点的 TRMM 降水数据;  $t^-$ ——第  $i$  个点的 TRMM 降水数据的平均值;  $k_i$ ——第  $i$  个点的的地面监测站点降水数据;  $k^-$ ——第  $i$  个点的的地面站点降水数据的平均值。

### 4. 结果与分析

#### 4.1. TRMM 数据适用性评价

在对 TRMM 降水数据进行降尺度之前, 要对 TRMM 降水数据和气象站点实测数据之间进行适用性

的分析, 以此来检验研究区内 TRMM 降水数据和气象站点实测数据之间的检验两者之间的显著性、偏离程度和误差。本研究选取 2001~2025 年河南省 17 个气象站点的年降水量, 对降尺度之前的 TRMM 年降水数据进行适用性的分析, 气象站点数据见表 1。由于气象站点记录的月数据的缺失, 选取这 17 个气象站点中的安阳、郑州、驻马店、信阳四个气象站点的季尺度的适用性评价。

**Table 1.** Meteorological station data

**表 1.** 气象站点数据

编号	站点	经度(度)	纬度(度)	海拔(米)
53898	安阳	114.4	36.05	69
53986	新乡市	113.883	35.317	72
57051	三门峡	111.2	34.8	353
57067	卢氏市	111.033	34.05	656
57071	孟津市	112.433	34.817	330
57077	栾川市	111.6	33.783	936
57083	郑州	113.65	34.717	119
57089	许昌市	113.867	34.033	68
57091	开封市	114.3	34.783	75
57156	西峡市	111.5	33.3	277
57178	南阳市	112.583	33.033	133
57181	宝丰市	113.05	33.883	151
57193	西华市	114.517	33.783	54
57290	驻马店	114.017	33	86
57297	信阳	114.05	32.133	112
58005	商丘市	115.667	34.45	51
58208	固始市	115.617	32.167	45

以河南省 2001~2025 年的 17 个气象站点实测站点数据为自变量, 气象站点对应的每年的 TRMM 降水数据为因变量, 进行一元线性回归, 通过计算其精度指标来对 TRMM 降水数据进行适用性评价。

TRMM 降水数据进行适用性评价见图 2, 两者之间的相关性为 0.8702, 相对偏差为 13.739%, 均方根误差为 29.7098, 两者之间的相关性比较显著, 但是均方根误差稍大, 可能是因为 25 年的时间跨度太大, 气象站点在进行数据的记录时存在偏差, 以及对降水数据的处理过程中存在数据的丢失等问题。

## 4.2. TRMM 降尺度结果与分析

### 4.2.1. 降水降尺度

降水降尺度结果见图 3, 本研究基于 ArcGIS 和 MATLAB 平台, 将  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  低空间分辨率的 TRMM 降水数据, 通过地理加权回归模型降尺度为 1 km 高空间分辨率的降水数据。本研究选取 2002 年、2010 年、2018 年、2025 年作为典型年份对降水数据降尺度的结果进行分析, 下图为河南省典型年份的 TRMM 降水数据降尺度前后年降水量的空间分布图。可以看出 TRMM 降水量降尺度前后, 降水空间分布特征基本保持一致, 原始的降水数据的分辨率偏低, 图像更加模糊, 不容易对降水信息进行直观的判

读。但对其进行降尺度处理后,GWR 结果能够更好地表达降水的细节信息,和真实的降水信息更加符合。

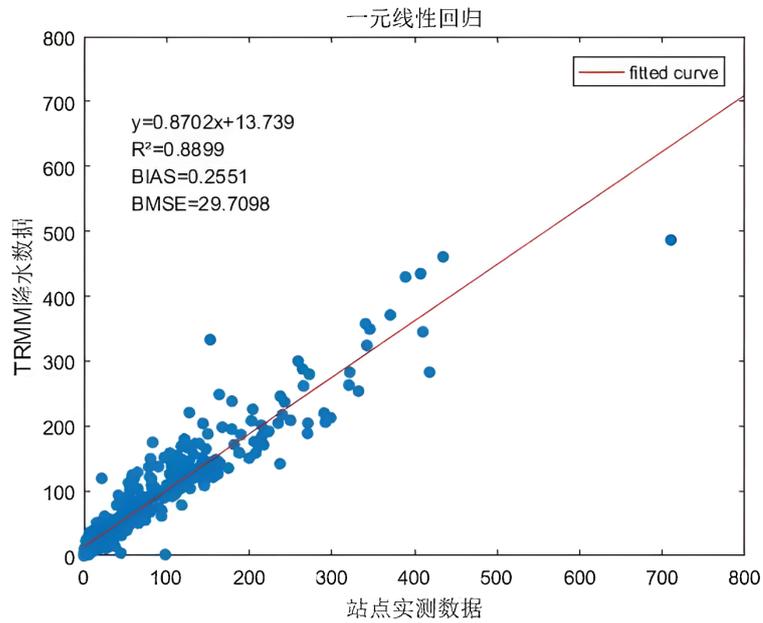
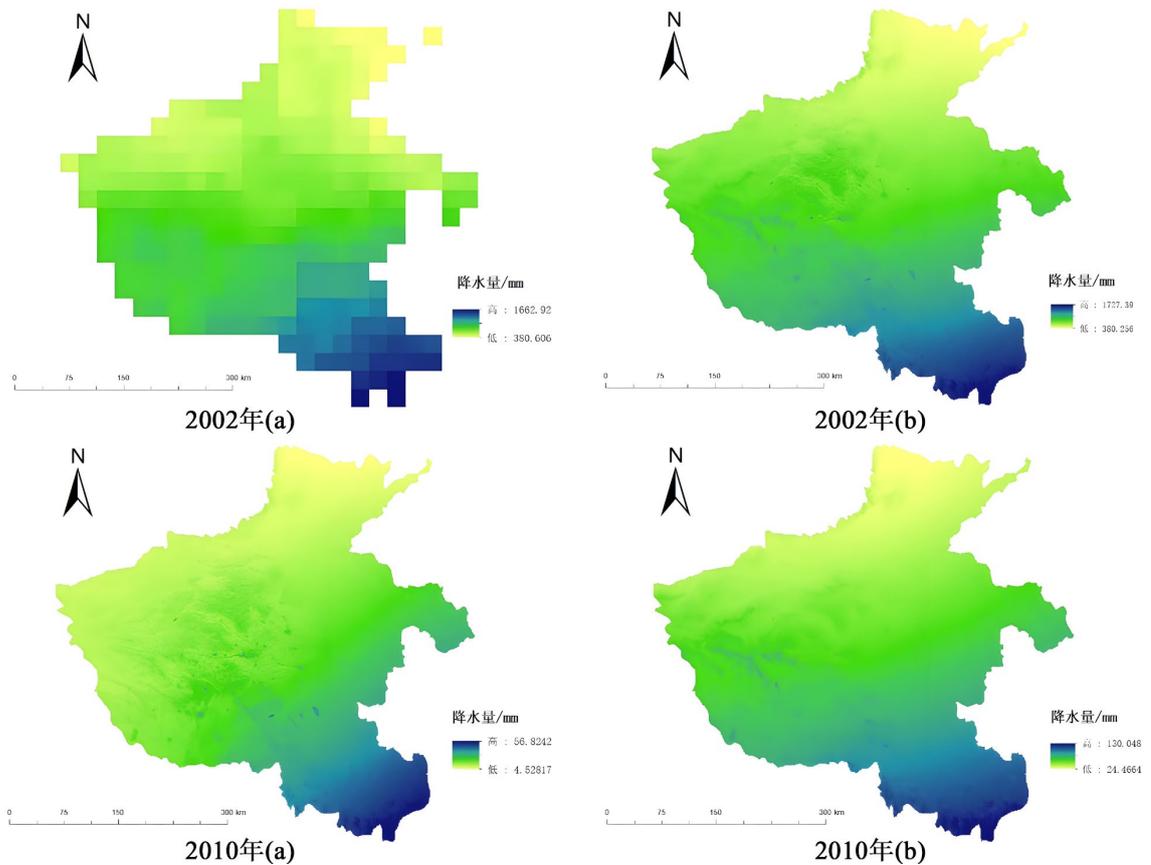
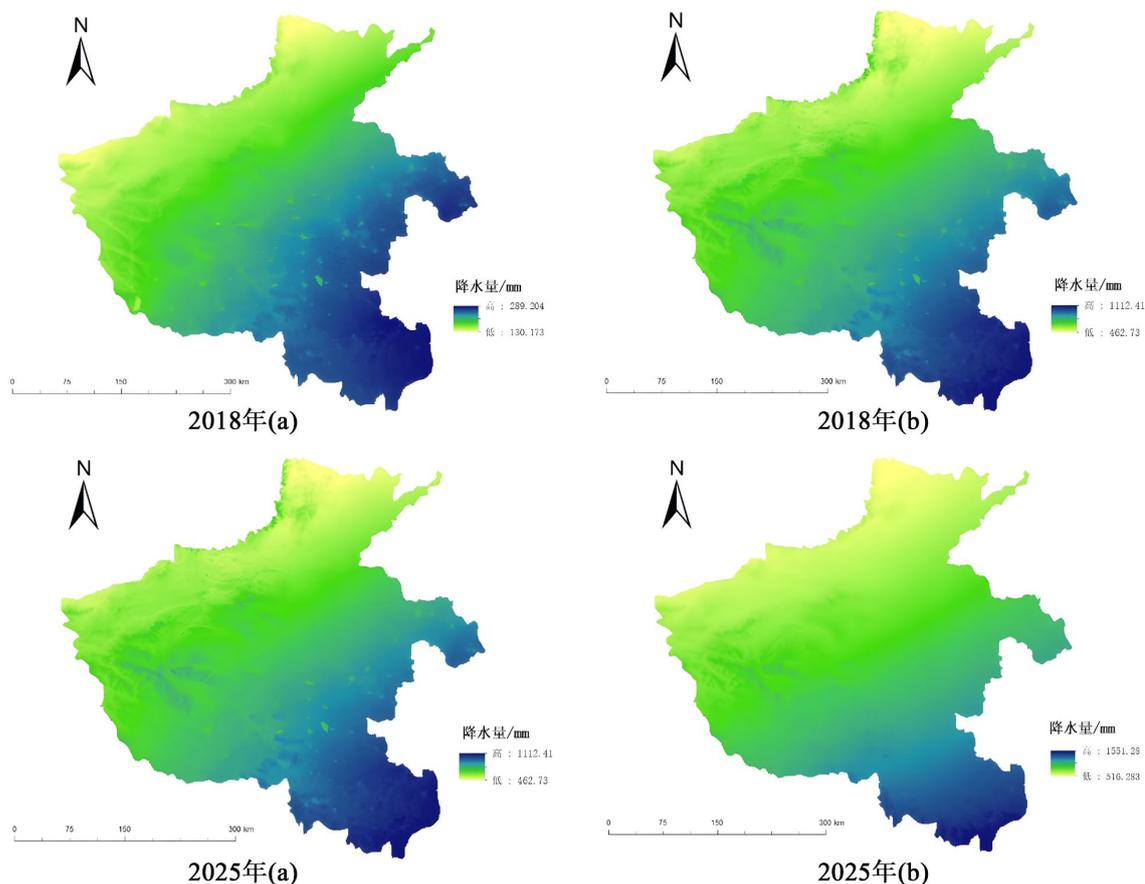


Figure 2. Scatter plot of TRMM3B43 annual precipitation data in mm and station-measured precipitation data in mm from 2001 to 2025

图 2. 2001~2025 年 TRMM3B43 年降水数据/mm 与站点实测降水量/mm 散点图





**Figure 3.** Spatial distribution of TRMM precipitation in a typical year (a) and downscaled TRMM precipitation (b) in Henan Province

**图 3.** 河南省典型年 TRMM 降水量(a)及 TRMM 降尺度降水量(b)空间分布

#### 4.2.2. 精度评价

精度评价结果见图 4，为了验证降尺度后的 TRMM 降水数据结果的可靠性，以典型年份的站点实测数据为自变量，气象站点对应的降尺度之后的 TRMM 降水数据为因变量，进行一元线性回归。从河南省典型月 TRMM 降水量(a)及 TRMM 降尺度降水量(b)与观测降水量的散点图来看，2002 年降尺度之后的降水数据与站点的实测降水数据之间的决定系数为 0.9684，相对偏差为 15.63%，均方根误差为 127.1193。2025 年降尺度之后的降水数据与站点的实测降水数据之间的决定系数为 0.7795，相对偏差为 8.51%，均方根误差为 68.6690。与 TRMM 原始降水数据和站点的实测降水数据之间的各项精度指标相比，决定系数和均方根误差相对提高，误差相对下降，其他年份也得到相似结论。这表明经过降尺度处理后数据的精度得到了显著提升，降尺度的结果具有可靠性。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

本研究利用经纬度、NDVI 以及研究区的 DEM 等变量资料以及 TRMM 降水数据进行地理加权，构建降尺度模型，对 TRMM 降水数据做降尺度操作，得到研究区 2001~2025 年 1 km 的高分辨率降水空间分布数据，并利用决定系数(R)、相对偏差(Bias)、和均方根误差(BMSE) 3 个精度指标使用气象站点的

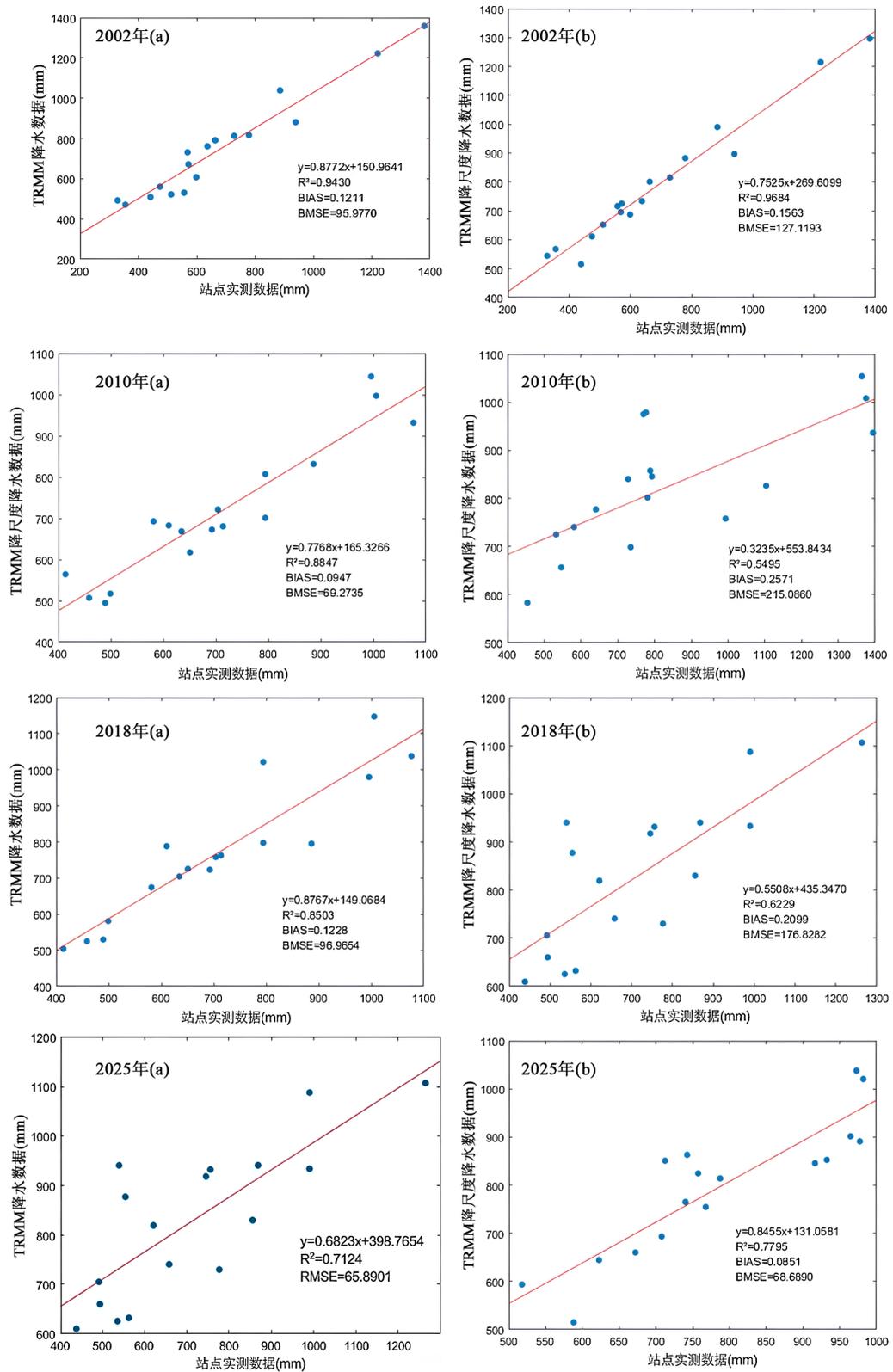


Figure 4. Scatter plots of typical annual TRMM precipitation (a) and downscaled TRMM precipitation (b) in Henan Province versus observed precipitation

图 4. 河南省典型年 TRMM 降水量(a)及 TRMM 降尺度降水量(b)与观测降水量的散点图

实测数据对降尺度后的 TRMM 降水数据进行验证。得到的结论如下：

(1) 河南省年降水量大致呈现出南高北低的现象，降水量最大值出现在河南省的东南部和东部，即信阳市和高丘市，降水量最小值出现在河南省的北部，即安阳市。从总体上来 TRMM 降水量降尺度先后，降水空间分布特征基本保持一致，降水范围大致相同。

(2) 以典型年份气象站点的实测降水数据对降尺度后的典型月份的 TRMM 降水数据进行精度评估，计算相应的精度评价指标。可以得出，在经过降尺度处理之后，发现降尺度后两者之间的  $R^2$ 、Bias、BMSE 都有一定程度的提高。此外，除了数据的空间分辨率提高之外，数据的精度也有一定的改善，能更好地反映河南省的真实降水状况。

## 5.2. 不足和展望

本研究在对 TRMM 降水数据进行降尺度操作后，虽然数据的精度有所提升，可以更加细致地表现河南省的降水时空特征的变化，但是本研究中仍然存在一些不足需要改进。

由于气象数据的缺失，本次研究选取 17 个气象站点来对降尺度后年 TRMM 降水数据进行精度验证，再从中选取 4 个气象站点来对降尺度后的 TRMM 降水数据进行精度验证。由于验证的气象站点数量有限，可能会造成对河南省 TRMM 降水数据的适用性和降尺度结果验证存在一定的局限性。

虽然对河南省降水数据进行降尺度操作后，取得了较好的效果，提高了对河南省降水数据的时空变化可以有更好的表达。但是没有对研究区之外的地区进行进一步分析与验证，在研究中存在不足，希望后续可以基于本文研究方法，进行进一步的改进与完善。

## 参考文献

- [1] 黎扬兵, 张洪波, 任冲锋, 等. 基于 TRMM 降尺度数据的渭河流域干旱时空演变特征与重心迁移规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 14-24.
- [2] 李炎坤, 高黎明, 张乐乐, 等. 青海湖流域及周边区域 TRMM3B43 降水数据降尺度方法对比分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1706-1716.
- [3] 赵泽宇, 秦福莹, 那音太, 等. 基于 GWR 模型降尺度模拟蒙古高原地区 TRMM 降水数据[J]. 中国农业气象, 2023, 44(3): 182-192.
- [4] 范田亿, 张翔, 黄兵, 等. TRMM 卫星降水产品降尺度及其在湘江流域水文模拟中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 179-188.
- [5] Zeng, H., Li, L. and Li, J. (2012) The Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in Drought Monitoring in the Lancang River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, **22**, 273-282. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0926-1>
- [6] Savtchenko, A.K., Huffman, G. and Vollmer, B. (2015) Assessment of Precipitation Anomalies in California Using TRMM and MERRA Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 8206-8215. <https://doi.org/10.1002/2015jd023573>
- [7] Immerzeel, W.W., Rutten, M.M. and Droogers, P. (2009) Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Using Vegetative Response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.004>