

基于不同植被指数的 TRMM 数据降尺度及误差校正研究

张寒博, 韦梦思, 覃金兰, 徐勇, 窦世卿

(桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 对不同时间尺度的热带测雨卫星 (TRMM) 数据进行空间降尺度及误差校正研究, 为华中地区洪涝灾害监测等提供科学参考。[方法] 主要借助增强型植被指数 (EVI) 和归一化植被指数 (NDVI) 分别运用地理加权回归 (GWR) 模型实现 2001—2019 年华中地区 TRMM 数据的空间降尺度, 并结合地理差异分析 (GDA) 和地理比率分析 (GRA) 对年、季和月的降尺度结果进行误差校正, 通过气象站数据对校正前后的数据进行对比分析。[结果] ① TRMM 数据和气象站数据的决定系数 (R^2) 在年 (0.630)、季 (0.710~0.865) 和月 (0.637~0.875) 尺度都表明了 TRMM 数据在华中地区具有较好的适用性; ② 通过 GWR 模型实现了 TRMM 数据空间分辨率由 0.25° 到 1 km 的降尺度转换, 且 $TRMM_{EVI}$ 数据精度优于 $TRMM_{NDVI}$ 数据, 说明华中地区 TRMM 数据与 EVI 的关系比 NDVI 更为密切; ③ 对优选的 $TRMM_{EVI}$ 数据分别进行 GDA, GRA 校正, 结果表明 GDA 校正结果优于 GRA 校正, 且在降雨量越多的月份校正效果越好。[结论] 在华中地区, EVI 比 NDVI 更加适合 TRMM 数据降尺度研究。降尺度数据采用 GDA 校正比 GRA 校正效果更为显著。

关键词: 热带测雨卫星数据 (TRMM); 地理加权回归模型 (GWR); 降尺度; 增强型植被指数 (EVI); 地理差异分析 (GDA); 华中地区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)04-0214-10

中图分类号: P426.6

文献参数: 张寒博, 韦梦思, 覃金兰, 等. 基于不同植被指数的 TRMM 数据降尺度及误差校正研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 214-223. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.030; Zhang Hanbo, Wei Mengsi, Qin Jinlan, et al. Downscaling and error correction of TRMM data based on different vegetation indices [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 214-223.

Downscaling and Error Correction of TRMM Data Based on Different Vegetation Indices

Zhang Hanbo, Wei Mengsi, Qin Jinlan, Xu Yong, Dou Shiqing

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: [Objective] The spatial downscaling and error correction of tropical rainfall measuring mission (TRMM) data at different time scales were researched in order to provide references for flood disaster monitoring in Central China. [Methods] This article mainly used geographically weighted regression (GWR) model to achieve spatial downscaling of TRMM data from 2001 to 2019 with the help of enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI), and compared and analyzed the annual, seasonal and monthly downscaled data through meteorological station data. Then combined with the geographic difference analysis (GDA) and geographic ratio analysis (GRA), the downscaling results of the year, quarter and month were corrected for error, and the data before and after the correction were compared and analyzed. [Results] ① The coefficient of determination (R^2) of TRMM data and meteorological station data in year (0.630), season (0.710~0.865) and month (0.637~0.875) all showed that the TRMM data had

收稿日期: 2021-02-05

修回日期: 2021-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“球面空间下的矢量要素与 DEM 的同步综合方法研究”(42061059); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室基金项目(191851016)

第一作者: 张寒博(1996—), 男(汉族), 河南省开封市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感原理与应用。Email: 2120191109@glut.edu.cn.

通讯作者: 窦世卿(1977—), 女(汉族), 河北省定州市人, 博士, 副教授, 主要从事三维 GIS 与遥感技术应用的研究。Email: doushiqing@glut.edu.cn.

better applicability in Central China. ② The spatial resolution of the TRMM data was downscaled from 0.25° to 1 km through the GWR model, and TRMM_{EVI} data had better accuracy than TRMM_{NDVI} data, indicating that TRMM data in Central China had a closer relationship with EVI than NDVI. ③ GDA and GRA corrections were performed on the optimized TRMM_{EVI} data. The GDA correction results were better than the GRA corrections, and the correction effect was better in months with more precipitation. [Conclusion] In Central China, EVI is more suitable for TRMM data downscaling research than NDVI, and downscaling data using GDA correction is more effective than GRA correction.

Keywords: tropical rainfall measuring mission data (TRMM); geographically weighted regression model (GWR); downscaling; enhanced vegetation index (EVI); geographic difference analysis (GDA); Central China

降水是维持全球水循环的一个重要环节^[1-2],降雨量的大小、强度对农作物的科学种植起着不可忽视的作用^[3]。现有研究表明 TRMM 数据可以为农业干旱监测^[4]、草地监测等^[5]提供科学的参考。华中地区河网密集,容易引发洪涝灾害,水土流失较为严重^[6],华中地区是我国粮食主产区和重要的商品粮生产基地^[7],通过研究华中地区降水的分布情况,可以为水土保持和农业发展等提供科学依据。

降水数据主要有 3 个来源:①传统气象站数据;②地面气象雷达数据;③热带测雨卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)数据^[8]。传统气象站数据质量受制于气象站点的数量,在一些站点数量较少且地表类型复杂的地区,数据准确度不能满足应用需求^[9-10]。非降水回波对雷达降水估测影响较大,导致雷达降水数据误差大。TRMM 数据覆盖范围广,可得到区域连续的降水数据,在一定程度上可以替代气象数据^[11]。许多学者的研究证明 TRMM 数据在珠江流域^[12]、湖南省长株潭地区^[13]、金沙江流域^[14]、怒江流域中上游等^[15]国内地区均具有较好的适用性。现阶段,TRMM 数据分辨率已不能满足应用需求,降尺度方法也层出不穷,李琼等^[16]采用逐步回归、BP 神经网络、GWR 模型对 TRMM 数据进行降尺度,结果表明 GWR 模型校正效果最优;熊俊楠等^[17],基于 GWR 模型实现了青藏高原地区 TRMM 数据的降尺度;曾业隆等^[18]基于地形起伏度,通过 GWR 模型提高了 TRMM 数据的空间精度。现有的研究主要采取单因子进行 TRMM 降尺度,且在华中地区尚缺乏相关研究。由于 TRMM 降尺度数据与真实数据存在一定的误差,许多学者致力于提升 TRMM 降尺度数据精度的研究^[19-20]。现有多种校正方法,不同的校正方法在同一地区的校正精度有所差别,不同地区地形差异也决定了不同地区优选校正方法的差异,需要通过试验加以确定优选的校正方法。为此,本文基于 GWR 模型,以 EVI 和 NDVI 两种植被指数因子及地形因子为自变量,

TRMM 数据为因变量,对华中地区 2001—2019 年的 TRMM 数据进行空间降尺度。再对优选的降尺度数据进行 GDA 和 GRA 校正,最后通过气象站数据在不同时间尺度对校正前后的数据进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华中地区(图 1)是中国 7 大地理分区之一,地处我国的中部(24°58′—36°22′N,108°21′—116°39′E)^[21],由湖南、湖北、河南 3 省组成,总面积约为 5.60×10^5 km²,约占全国总面积的 5.9%^[22],是我国东西地势与南北气候的过渡地带。区域内地势西高东低,属温带季风气候和亚热带季风气候,雨热同季,受到全球气候变暖的影响,夏季可能会发生区域性极端日降水事件。

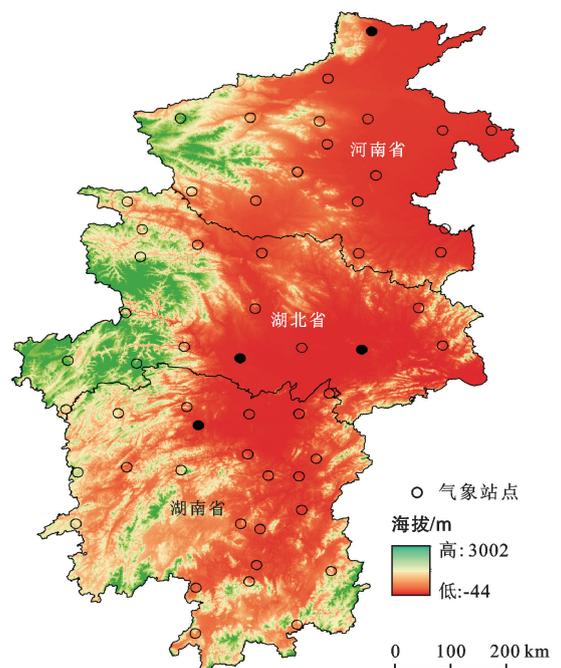


图 1 华中地区气象站空间分布

1.2 数据源及预处理

本文采用 2001—2019 年的 TRMM 3B43 (version 7) 月降水数据、MOD13A3 数据均来源于 NASA 网站 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>)。其中 TRMM 数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (大约为 $27.5 \text{ km} \times 27.5 \text{ km}$), 经过投影变换、角度旋转、单位换算等预处理, 并将一年 12 期的 TRMM 月数据进行求和, 获得 TRMM 年累计数据; NDVI, EVI 数据从 MOD13A3 数据中获取, 其空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 进行波段提取、投影变换、最大值合成等处理, 并对一年 12 期 NDVI, EVI 月数据求平均, 分别得到年均 NDVI、年均 EVI 数据。DEM 数据从地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 中获取, 空间分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$, 经过投影转换、重采样等处理, 并利用 ArcGIS 获得坡度、坡向数据。气象站数据来源于中国气象局国家气象中心 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>), 包括 2001—2019 年华中地区 56 个地面气象站降水数据以及研究区外一定范围的地面站点数据, 经过数据整理, 累加计算出年降水数据。

1.3 研究方法

1.3.1 GWR 模型 GWR 模型是 Brunsdon 等^[23]提出的一种用于量化空间异质性的局部参数估计方法^[24], 是普通线性回归模型的扩展。GWR 模型将数据的空间位置嵌入到回归参数中, 引入地理距离权重进行最小二乘法逐点参数估计, 来分析空间数据非平稳性的统计回归模型。其计算基本公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{i=1}^n \beta_i(u_i, v_i) x_{ii} + \varepsilon(u_i, v_i) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 个样本点因变量的降水量; x_{ii} 为第 t 个自变量的第 i 个样本点的观测值; (u_i, v_i) 表示第 i 个样本点的经纬度坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个样本点的常数项回归参数; $\beta_i(u_i, v_i)$ 为第 t 个影响因子对第 i 个样本点的线性回归参数; $\varepsilon(u_i, v_i)$ 为模型在第 i 个样本点所计算出来的残差值; n 为点的数量。

1.3.2 数据降尺度 由于降水量和地形、植被等因素存在空间非平稳性, 所以可以对华中地区 TRMM 数据与同期的 NDVI 值、EVI 值、高程、坡度和坡向数据建立 GWR 模型, 来实现 TRMM 数据的空间降尺度, 其详细步骤为: ①将 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率的 NDVI 值、EVI 值、高程、坡度、坡向数据重采样为与 TRMM 数据相同的空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。②设定低分辨率的 TRMM 数据 (0.25°) 为因变量, NDVI 数据 (0.25°)/EVI 数据 (0.25°)、DEM 数据 (0.25°)、坡度

数据 (0.25°)、坡向数据 (0.25°) 为自变量, 设置核函数参数为 ADAPTIVE, 内核带宽参数为 CV (选择这两个参数建立的 GWR 模型所得到的数据决定系数较高), 建立低分辨率 GWR 模型。从回归模型中得到各自变量对应系数、常数项及残差项。③将各自变量系数、常数项和残差项利用反距离权重法插值得到高分辨率的自变量系数值、常数值和残差值 (1 km)。④基于 GWR 模型, 将高分辨的数据进行模型回代, 得到空间分辨率为 1 km 的 TRMM 降尺度数据。

1.3.3 数据校正 尽管通过降尺度, 很大程度上提高了 TRMM 数据分辨率, 但与气象站数据相比仍存在很大的误差, 因此有必要对降尺度数据进行校正。分别利用 GRA, GDA 对降尺度数据进行校正, 从而获得更高精度的降水数据。GDA 校正的大致过程为: ①将研究区 56 个气象站点随机分配成试验点 (36 个) 和验证点 (20 个), 计算试验点及其研究区周边气象站数据和对应位置降尺度 TRMM 数据降水量之差; ②选择反距离权重的插值方法, 将差值的点数据转换为连续的面数据; ③将降尺度 TRMM 数据和插值的差值相加, 得到校正后的降尺度 TRMM 数据。

GRA 校正步骤和 GDA 校正相似, 不同的是将试验点及其周边气象站数据和降尺度 TRMM 数据相比, 并将相加改为相乘即可。

1.3.4 精度指标 本文以气象站数据作为“真实值”, 用决定系数 (R^2)、相对误差 (BIAS)、均方根误差 (RMSE) 对降尺度数据进行精度评定。 R^2 评定降尺度降水数据与气象站数据的线性相关性, 其值在 0 到 1 之间, 值越大相关性越高; BIAS 反映降尺度数据与气象站数据的偏离程度, BIAS 越接近 0 数据越精确; RMSE 来评定误差的整体水平。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{cal}[i]} - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{\text{cal}[i]} - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{cal}[i]}}{\sum_{i=1}^n O_i} - 1 \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{cal}} - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{cal}[i]}$ 为第 i 个气象站的 TRMM 降尺度数据降水量 (mm); O_i 为气象站降水量 (mm); n 为气象站数量; \bar{P}_{cal} 为对应气象站点 TRMM 降尺度数据降水量的平均值 (mm); \bar{O} 为对应气象站降水量的平均值

(mm)。R² 值越高,降尺度结果越接近地面观测降水量大小;BIAS, RMSE 值越小,降尺度的误差就越小。

2 结果与分析

2.1 TRMM 数据适用性分析

通过 2001—2019 年研究区内 56 个气象站年尺度降水数据与相对应的 TRMM 数据构建线性回归函数。由图 2 可知, R² 为 0.630, BIAS 为 0.072, RMSE 为 250.09 mm, 上述精度评价指标说明, TRMM 年尺度数据与气象站年尺度数据具有较好的相关性。其中 BIAS 数值为正, 表明 TRMM 年尺度数据存在一定程度的高估现象。通过计算每个气象站年尺度数据与相应位置 TRMM 年尺度数据的 R, 构建华中地区 56 个站点 R 的泰勒多边形(图 3), 可以看出 R 的范围为 0.54~0.97, 高于 0.75 的点比例为 85%, 且都通过了 0.05 的显著性检验。

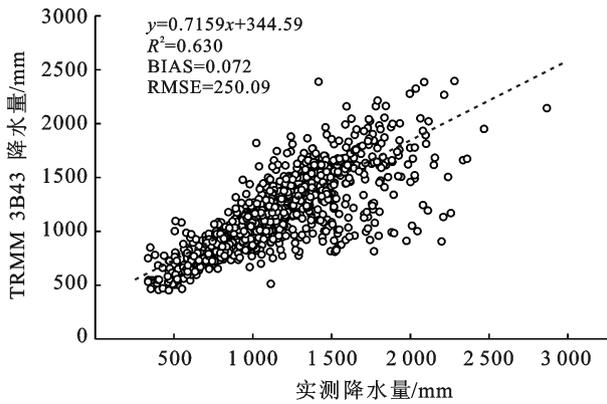


图 2 TRMM 年尺度数据和实测年尺度数据的关系散点图

将华中地区 2001—2019 年 TRMM 月尺度数据和 56 个气象站月尺度数据按照季尺度分别进行合成, 并对 TRMM 季尺度数据进行相关性分析。由图 4 可以看出, 春季(R²=0.818)、夏季(R²=0.710)、秋季(R²=0.788)和冬季(R²=0.865)的 TRMM 季尺度数据与气象站季尺度数据存在较好的相关性。且

与 TRMM 年尺度数据的相关性比较, TRMM 季尺度数据优于 TRMM 年尺度数据。BIAS 数值波动范围为 0.052~0.069, 4 个季节相对误差相差不大。RMSE 值最大的季节是夏季(RMSE=55.72 mm), 最小的为冬季(RMSE=14.08 mm)。与 TRMM 年尺度数据的均方根误差(RMSE=250.09 mm)相比, TRMM 季尺度数据的精度明显优于 TRMM 年尺度数据。

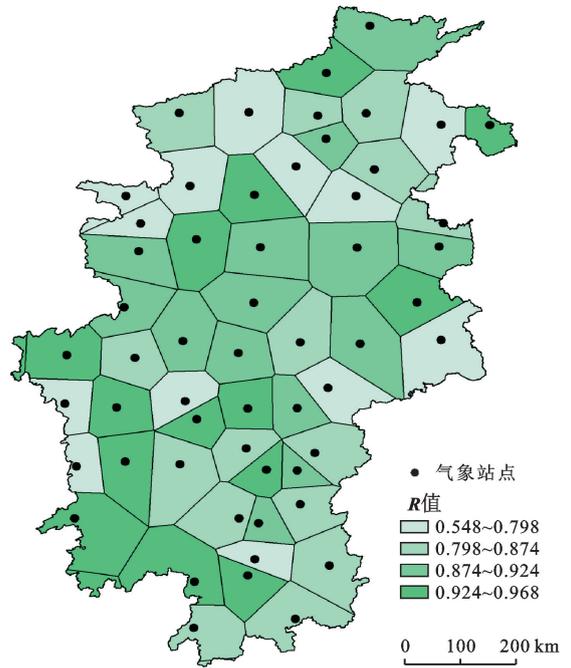


图 3 基于气象站点的研究区 R 值空间分布

对华中地区 56 个气象站数据和 TRMM 数据在月尺度上进行相关性分析, 构建月尺度数据的线性回归方程。从表 1 可以看出, 月的 R² 在 0.637~0.875 浮动, 其中 R² 最小的月份是 8 月, 最大的月份为 12 月, 普遍来说, 降雨量较少的月份 R² 较大。各个月的 BIAS 数据表明, BIAS 数值范围为 0.030 1~0.983 0, 其中最低的月份为 7 月。RMSE 的数值在 12.115~62.414 mm, 数值最大的月份为 7 月。月尺度数据与季尺度数据在 R²、BIAS 和 RMSE 具有一致性。

表 1 研究区 TRMM 月尺度数据适用性的验证结果

月份	R ²	BIAS	RMSE/mm	月份	R ²	BIAS	RMSE/mm
1	0.847	0.073 5	12.687	7	0.715	0.030 1	62.414
2	0.854	0.070 7	16.939	8	0.637	0.066 2	49.031
3	0.839	0.098 3	24.349	9	0.731	0.072 2	36.705
4	0.791	0.048 7	35.796	10	0.813	0.049 1	23.060
5	0.742	0.049 1	46.267	11	0.828	0.063 8	21.182
6	0.724	0.062 5	54.891	12	0.875	0.063 7	12.115

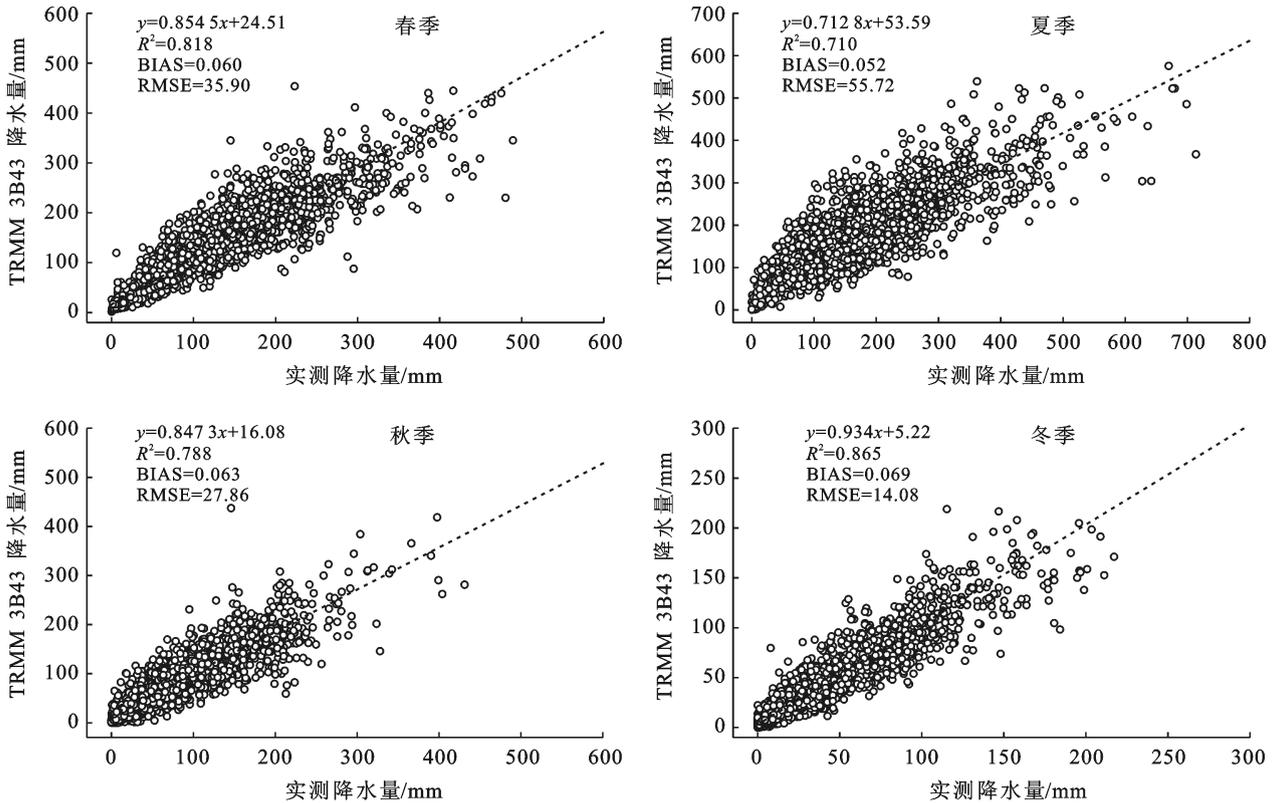


图 4 TRMM 季尺度数据与实测季尺度数据散点图

2.2 TRMM 降尺度及校正数据分析

2.2.1 年 TRMM 降尺度数据校正分析 本文将 DEM 数据、坡向数据和坡度数据分别结合 EVI 数据和 NDVI 数据对 TRMM 数据降尺度,得到 1 km 的 $TRMM_{Year-EVI}$ 数据和 $TRMM_{Year-NDVI}$ 数据。由图 5 可知,降尺度前后数据空间分布具有一致性,具体表现为降水量由南到北、自东向西递减趋势,符合地理学

上的地带性差异。华中地区的降雨主要集中在湖南地区,东南边缘地带相较于其他地区降雨量较多。在华中地区的中部,降雨量分布呈现一条明显的过渡带,往北递减,往南递增。降尺度后的数据均能更为详细的反映华中地区降水量的空间分布,在河南东南部、湖北东部、湖南南部等地区尤为明显,且 $TRMM_{Year-EVI}$ 数据比 $TRMM_{Year-NDVI}$ 数据更接近 TRMM 数据。

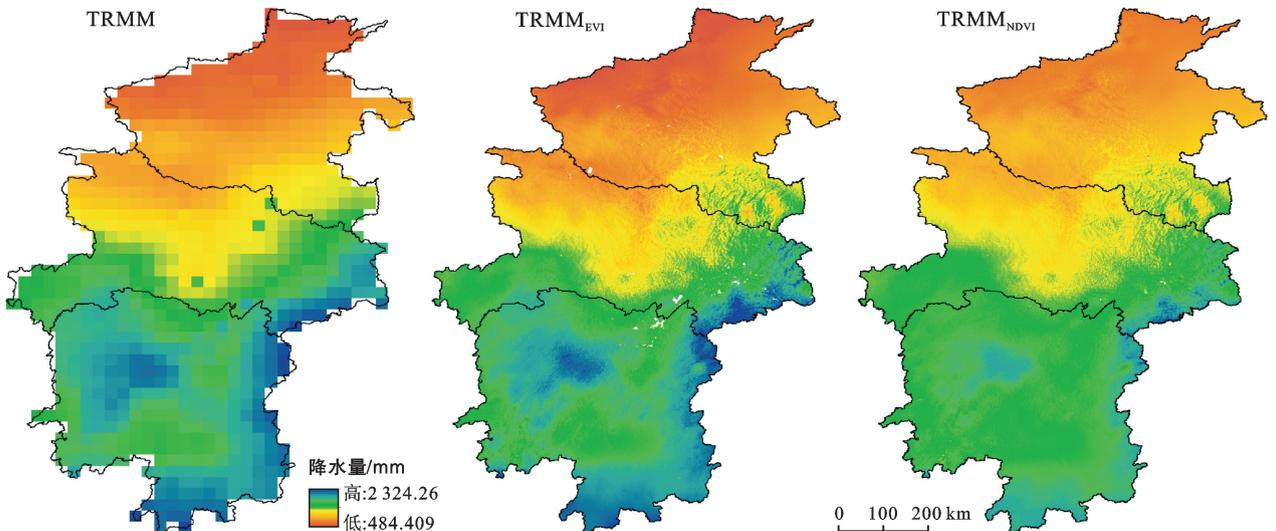


图 5 研究区年平均 TRMM 数据降尺度结果

为了进一步对比两种植被指数反演 TRMM 数据降尺度的效果,分别对两种降尺度数据和气象站数

据进行相关性分析。由图 6 可知, $TRMM_{Year-EVI}$ 数据 ($R^2=0.847$, $BIAS=-0.044$, $RMSE=173.55$ mm)

比 $TRMM_{Year-NDVI}$ 数据 ($R^2 = 0.836$, $BIAS = -0.040$, $RMSE = 176.31$ mm) 精度更高, 表明在华中地区 EVI 与 TRMM 数据相关性更强。

对优选的 $TRMM_{Year-EVI}$ 数据进行 GDA 校正和 GRA 校正, 得到 $TRMM_{Year-EVI}^{GDA}$ 数据和 $TRMM_{Year-EVI}^{GRA}$ 数据。由图 7 可知, 在局部地区 GDA 校正比 GRA 校正结果的降雨量细节更为明显。对于降雨量较少的北部, 校正效果无明显差别, 南部降雨量较多地区校正效果则较为显著。将 $TRMM_{Year}$ 数据、 $TRMM_{Year-EVI}$

数据、 $TRMM_{Year-EVI}^{GDA}$ 数据和 $TRMM_{Year-EVI}^{GRA}$ 数据分别和气象站数据进行相关性分析。由表 2 可知, GDA 校正和 GRA 校正后数据精度均有较大的提升。校正后的 $TRMM_{Year-EVI}^{GDA}$ 数据 ($R^2 = 0.956$, $BIAS = -0.026$, $RMSE = 86.233$ mm) 相比于 $TRMM_{Year-EVI}^{GRA}$ 数据 ($R^2 = 0.831$, $BIAS = -0.043$, $RMSE = 111.921$ mm) 精度更高。因此, 华中地区 TRMM 数据采用 GDA 校正比 GRA 校正效果更佳, 且通过 GDA 校正可以更好地改善 TRMM 降尺度数据存在的高估现象。

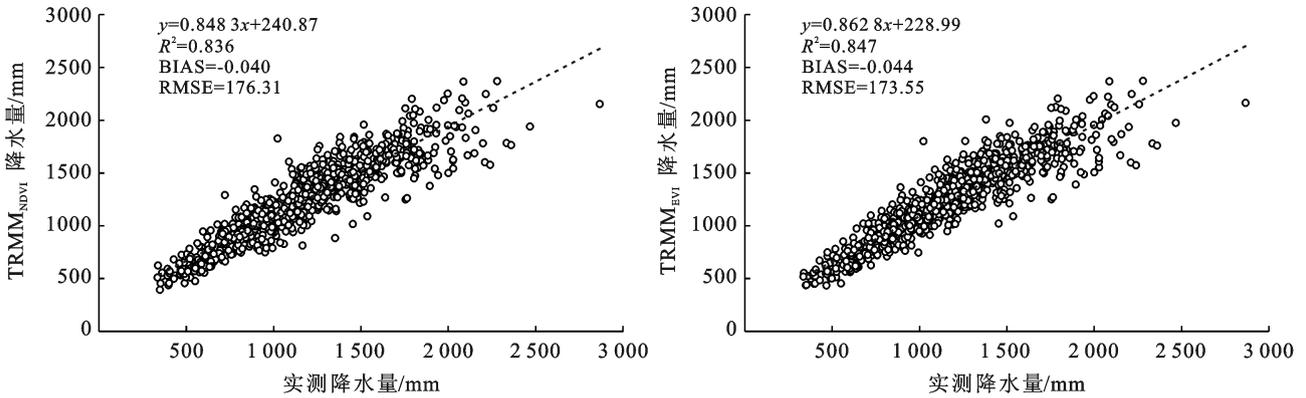


图 6 研究区降尺度数据和实测数据的相关性分析散点图

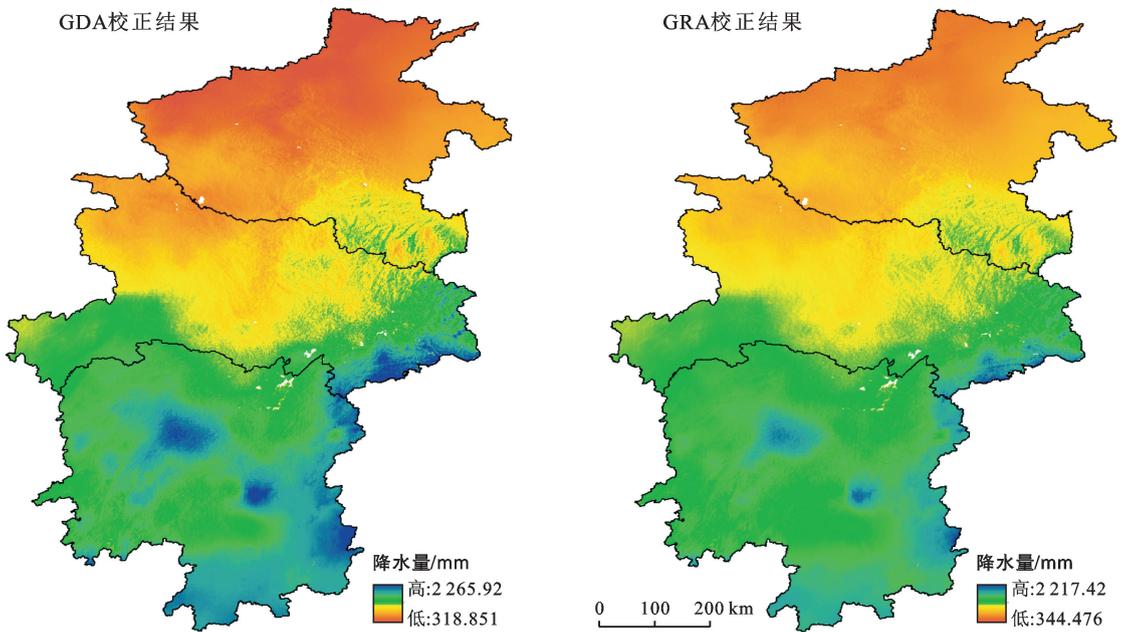


图 7 研究区多年平均 TRMM 数据降尺度校正结果

表 2 研究区校正年尺度数据准确性分析

数据	R^2	BIAS	RMSE/mm
$TRMM_{Year}$	0.630	0.072	250.09
$TRMM_{Year-EVI}$	0.847	-0.044	173.55
$TRMM_{Year-EVI}^{GRA}$	0.831	-0.043	111.921
$TRMM_{Year-EVI}^{GDA}$	0.956	-0.026	86.233

2.2.2 季 TRMM 降尺度校正数据分析 通过对华中地区 TRMM 月尺度数据进行季数据合成, 得到 $TRMM_{Season}$ 数据, 并通过降尺度及校正得到相应的 $TRMM_{Season-EVI}^{GDA}$ 数据。由图 8 可知, 两种数据降雨量分布趋于一致, 降尺度后影像细节明显增强。春季降雨量与纬度表现出明显的负相关; 夏季降雨增多, 主要

集中在湖南和湖北东部;秋季降雨量重心向西南转移,主要集中在湖南湖北交界带西部;冬季降雨从湖北东部至湖南西部呈现出一条明显的降雨过渡带,北侧逐渐减少,南侧反之。华中地区全年降雨主要集中在夏季,冬季降雨量最少,峰值不及夏季的 1/2。

通过气象站数据对季尺度数据进行精度验证,从表 3 可知,校正前后的数据均表现为冬季数据最优,夏季最差。校正后各季节数据精度均有不同程度提

升。其中, $TRMM_{Summer-EVI}^{GDA}$ 数据 ($R^2 = 0.811$) 相比 $TRMM_{Summer-EVI}$ 数据 ($R^2 = 0.709$), R^2 提升了 0.102, $|BIAS|$ 下降了 0.039, $|RMSE|$ 下降了 13.561 mm, 校正效果最显著; $TRMM_{Winter-EVI}^{GDA}$ 数据 ($R^2 = 0.873$) 相比 $TRMM_{Winter-EVI}$ 数据 ($R^2 = 0.864$), R^2 提升了 0.009, $|BIAS|$ 下降了 0.009 6, $|RMSE|$ 下降了 0.951 mm, 精度提升最弱。综上所述,在降雨量较多的季节 GDA 校正效果更为显著。

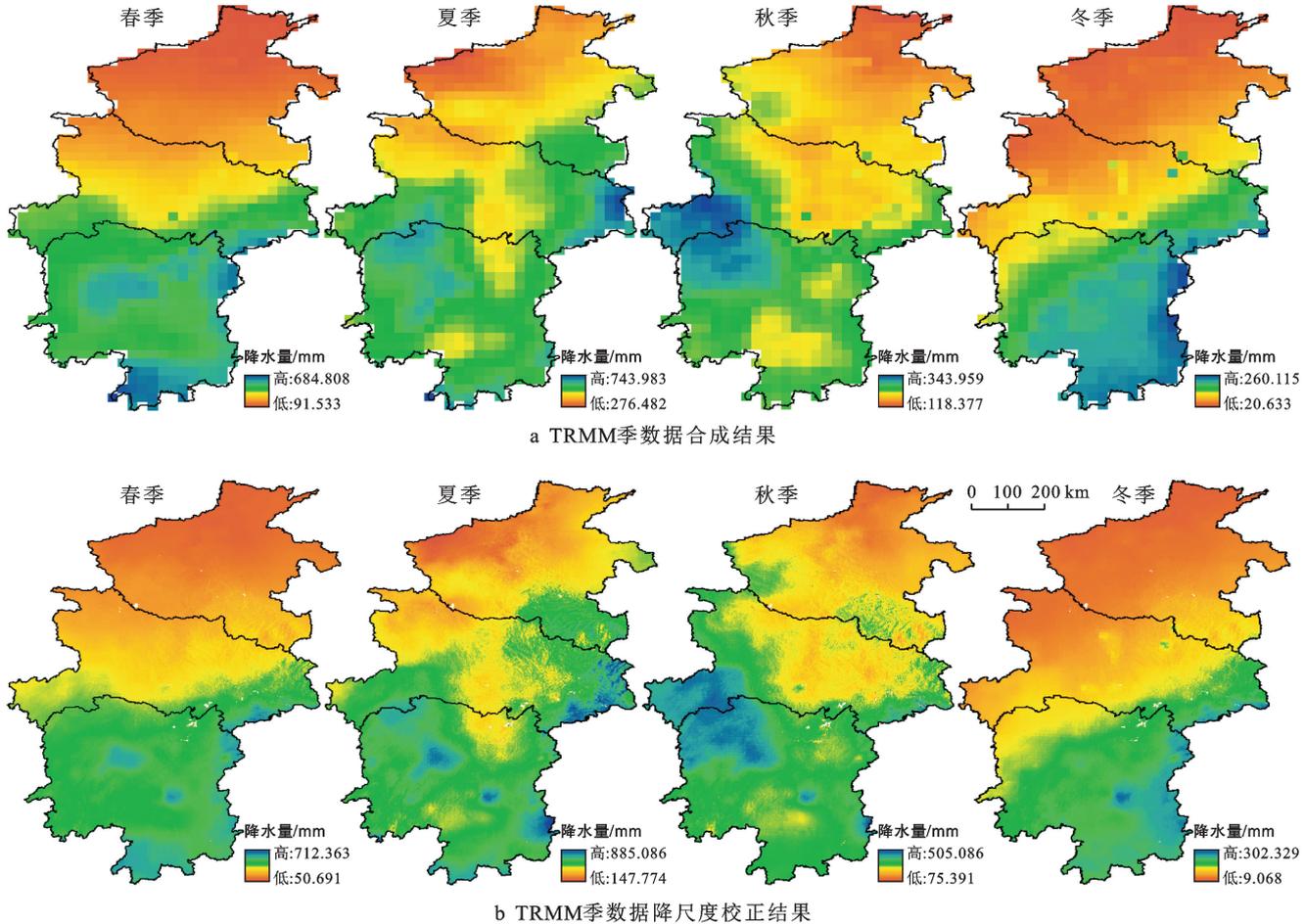


图 8 研究区季尺度数据降尺度校正结果

表 3 研究区季数据验证结果

季节	数据	R^2	BIAS	RMSE/mm
春季	$TRMM_{Season}$	0.818	0.061 4	35.897
	$TRMM_{Season-EVI}$	0.812	0.051 5	34.787
	$TRMM_{Season-EVI}^{GDA}$	0.859	0.008 6	28.257
夏季	$TRMM_{Season}$	0.709	0.051 9	55.715
	$TRMM_{Season-EVI}$	0.706	0.049 7	53.812
	$TRMM_{Season-EVI}^{GDA}$	0.811	-0.012 9	42.154
秋季	$TRMM_{Season}$	0.787	0.062 6	27.855
	$TRMM_{Season-EVI}$	0.808	0.061 9	27.245
	$TRMM_{Season-EVI}^{GDA}$	0.861	-0.004 9	22.469
冬季	$TRMM_{Season}$	0.864	0.069 7	14.219
	$TRMM_{Season-EVI}$	0.869	0.070 2	14.081
	$TRMM_{Season-EVI}^{GDA}$	0.873	0.060 1	13.268

2.2.3 月 TRMM 降尺度校正数据分析 对华中地区 2001—2019 年 TRMM 月数据进行降尺度,并进行 GDA 校正,得到 $TRMM_{Month-EVI}^{GDA}$ 数据。由图 9 可知,逐月的降水量近似服从正态分布,降水主要集中在 4—8 月, $TRMM_{Month}$ 数据在华中地区普遍存在高估现象,降雨量越多,高估情况越严重。 $TRMM_{Month}$ 数据经过 GDA 校正后,高估现象得到一定程度上的缓解。

通过气象站数据对 $TRMM_{Month-EVI}^{GDA}$ 数据、 $TRMM_{Month}$ 数据进行精度评价。由图 10 可知, $TRMM_{Month}$ 数据在每年的中旬 R^2 最低, RMSE 达到

全年最高峰,表明 7 月左右的 TRMM 数据的质量较差。其因为华中地区夏季极端日降水较多^[25],短时强降水对 TRMM_{Month} 数据质量的影响大。TRMM_{Month-EVI}^{GDA} 数据与 TRMM_{Month} 数据的精度评价指标在 2001—2019 年整体呈现一致的趋势,但 TRMM_{Month-EVI}^{GDA} 数据的三项指标都得到了一定程度的改善,且在降雨量多的月份改善更明显,这与季尺度校正结果相照应。

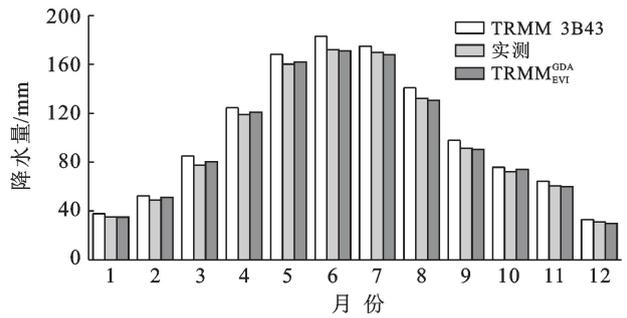


图 9 研究区多年平均月降水量

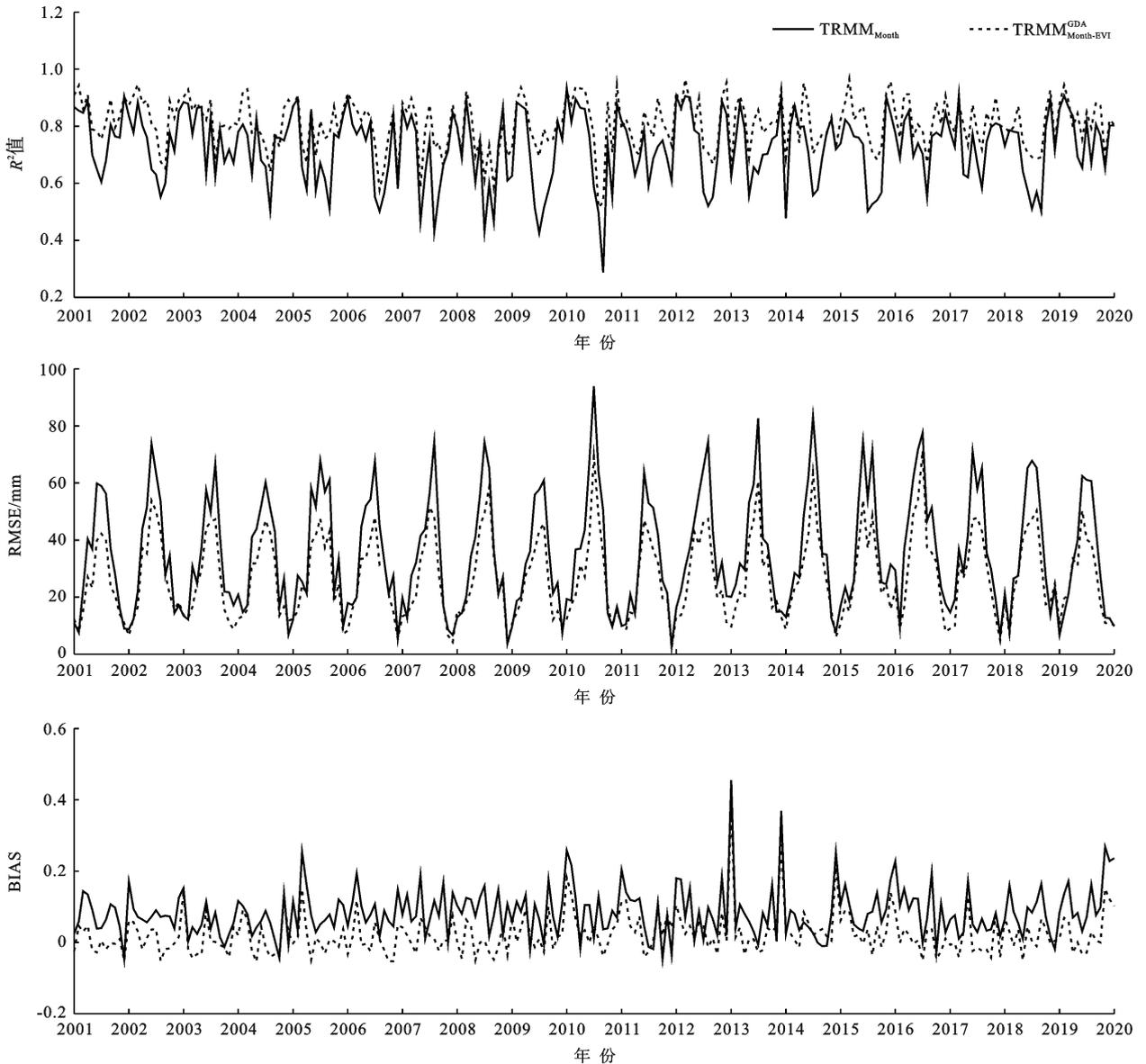


图 10 研究区月尺度数据精度指标变化

3 讨论与结论

3.1 讨论

杜方洲等^[26]对东北地区 TRMM 数据进行深入研究,部分东北地区的冬季降水以降雪形式为主,1

月数据拟合效果较差;夏季气候多变,7 月数据的模型拟合效果也不理想。东北地区比华中地区的地理纬度高、降雪量多,且东北地区有较大面积的东北平原,夏季短冬季长;而华中地区夏季降雨量大且易发生极端日降雨^[25],地形以山地和丘陵为主。在气候

与地形等因子的影响下,东北地区与华中地区 TRMM 的冬季数据质量呈现相反的结果,夏季数据质量呈现一致性。日后可以深入研究 TRMM 数据与各种因子间具体的相关性,探究华中地区 TRMM 数据季节性周期规律。

目前,基于两种植被指数因子反演 TRMM 降尺度对比研究较少,现有熊俊楠等^[17]采用 EVI、杜方洲等^[26]和金辉明等^[27]采用 NDVI 为因子进行 TRMM 数据降尺度研究,张寒博等^[28]研究表明在长江流域 NDVI 比 EVI 降尺度效果更好。本文研究结果表明在华中地区 TRMM_{Year-EVI} 数据比 TRMM_{Year-NDVI} 数据精度更高。从 EVI 和 NDVI 的原理公式出发,可知 EVI 相较 NDVI 考虑到了蓝光波段、气溶胶和冠层的影响。NDVI 在植被覆盖率高的地区,红光波段容易出现饱和现象,而 EVI 综合了大气抵抗植被指数和抗土壤植被指数的特性。综上所述,由于不同的植被覆盖情况和不同植被指数公式的特性,在不同地区采取 EVI 或 NDVI 对 TRMM 数据降尺度,得到的效果呈现差异性。

通过 GDA 校正和 GRA 校正,可以进一步提升 TRMM 降尺度数据的精度。国外学者 Zhang^[20]对位于中国西南地区的红河流域 TRMM 降尺度数据进行校正,研究表明在该地区 GRA 校正效果优于 GDA 校正效果。而本文研究的华中地区 TRMM 数据的降尺度校正效果与之相反。红河流域于华中地区相比,纬度较低,北回归线横穿流域,日照时间较长。由此,经纬度位置差异可能影响 GDA 校正和 GRA 的校正效果。另外从 GRA 的原理公式出发,可知,当 TRMM 数据或气象站数据部分缺失而呈现异常高的数值时,TRMM 数据与气象站数据相差过大,GRA 比值倍数增加,导致使用 GRA 校正出来的降尺度数据较大程度上偏离真实地表降雨情况。GDA 校正使气象站数据与 TRMM 数据进行差值运算,虽然不可避免出现误差,但在华中地区所呈现的效果表明 GDA 校正效果更佳。综上,GDA 校正和 GRA 校正的效果差异可能与地理纬度和数据质量有关。

3.2 结论

(1) 年、季和月尺度的 TRMM 数据在华中地区都体现出较好的适用性。与气象站数据的 R^2 , BIAS 和 RMSE 均满足精度要求。

(2) 通过 GWR 模型实现了 TRMM 数据空间分辨率由 0.25° 到 1 km 的提升,对降尺度数据和气象站点插值数据进行分析,两者具有一致的空间分布。

(3) 基于不同植被指数作为自变量对 TRMM_{Year} 数据进行降尺度研究,可知 TRMM_{Year-EVI} 数据 ($R^2 =$

0.847) 比 TRMM_{Year-NDVI} 数据 ($R^2 = 0.836$) 精度稍高,表明 EVI 更加适合华中地区 TRMM 反演降水数据。将优选的 TRMM_{Year-EVI} 数据进行 GDA 校正和 GRA 校正,结果显示 TRMM_{Year-EVI}^{GDA} 数据 ($R^2 = 0.956$, BIAS = -0.026, RMSE = 86.233 mm) 比 TRMM_{Year-EVI}^{GRA} 数据 ($R^2 = 0.831$, BIAS = -0.043, RMSE = 111.921 mm) 校正效果更显著,GDA 校正后局部的数据细节性更好。

(4) 对季、月的 TRMM 降尺度数据进行 GDA 校正,结果显示降雨量大小与校正效果呈现正相关。但在校正前后,冬季数据具有更高的可信度。

[参 考 文 献]

- [1] Chang A T C, Chiu L S, Kummerow C, et al. First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: Comparison with SSM/I [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(15): 2379-2382.
- [2] Cao Yueqian, Zhang Wu, Wang Wenjing. Evaluation of TRMM 3B43 data over the Yangtze River Delta of China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-12.
- [3] 房世波,韩国军,张新时,等.气候变化对农业生产的影响及其适应[J].*气象科技进展*, 2011, 1(2): 15-19.
- [4] 胡鹏飞,李净,王丹,等.基于 MODIS 和 TRMM 数据的黄土高原农业干旱监测[J].*干旱区地理*, 2019, 42(1): 172-179.
- [5] 李政,吴静,李纯斌,等. TRMM 降水产品在中国草地的适用性研究[J].*中国草地学报*, 2020, 42(6): 75-81.
- [6] 王占礼.中国水土流失的基本概况及其综合治理对策[J].*科学对社会的影响*, 2001(1): 34-39.
- [7] 王立辉,黄进良,孙俊英.基于时序 MODIS-EVI 监测华中地区耕地复种指数[J].*长江流域资源与环境*, 2010, 19(5): 529-534.
- [8] 张顾,王加虎,罗晓春,等. TRMM 数据驱动下雅砻河流域径流预报研究[J].*中国农村水利水电*, 2020(11): 8-13.
- [9] Abdelmoneim H, Soliman M R, Moghazy H M. Evaluation of TRMM 3B42V7 and CHIRPS Satellite Precipitation Products as an Input for Hydrological Model over Eastern Nile Basin [J]. *Earth Systems and Environment*, 2020, 4: 685-6998.
- [10] Yan Yan, Wu Huan, Gu Guojun, et al. Climatology and interannual variability of floods during the TRMM era (1998—2013) [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(8): 3289-3305.
- [11] 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.
- [12] 刘晓林,刘超群,杨胜天,等. TRMM 卫星降水数据在珠江流域的适用性评价[J].*中山大学学报(自然科学*

- 版),2020,59(6):70-79.
- [13] 谢红霞,刘旭星,隋兵,等. TRMM 降雨数据在湖南省长株潭地区的适用性[J].水土保持通报,2017,37(3):295-301.
- [14] 彭玉芝,范建容,于江,等.金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2018,38(2):8-13.
- [15] 范雪梅,罗贤,季漩,等.基于 MOD16 产品的怒江流域中上游蒸散发分布特征研究[J].水土保持通报,2019,39(2):199-205,2.
- [16] 李琼,魏加华,安娟,等.基于地形因子的 TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的融合校正研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):1147-1163.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 金彩平. TRMM 卫星降雨数据空间降尺度校准及应用研究[D].广西南宁:广西大学,2018.
- [20] Zhang Yueyuan, Li Yungang, Ji Xuan, et al. Fine-resolution precipitation mapping in a mountainous watershed: Geostatistical downscaling of TRMM products based on environmental variables [J]. Remote Sensing,2018,10(1):119.
- [21] 王绍武,沈润平,陈萍萍,等.基于马尔可夫链模型的华中地区土壤质地空间分布模拟研究[J].河南农业大学学报,2019,53(2):282-288.
- [22] 叶宏,邱艺.华中地区旅游产业集群辨识及发展策略分析[J].福建质量管理,2020(2):47.
- [23] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2017,47(3):431-443.
- [24] Brunson C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted local statistics applied to binary data [C]// International Conference on Geographic Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002: 38-50.
- [25] 柯丹,管兆勇.华中地区夏季区域性极端日降水事件变化特征及环流异常[J].气象学报,2014,72(3):478-493.
- [26] 杜方洲,石玉立,盛夏.基于深度学习的 TRMM 降水产品降尺度研究:以中国东北地区为例[J].国土资源遥感,2020,32(4):145-153.
- [27] 金辉明,徐鹏,何康,等.基于地理加权回归模型的省级 TRMM 降水数据降尺度研究[J].浙江水利水电学院学报,2017,29(3):29-36,83.
- [28] 张寒博,徐勇,窦世卿,等.基于 GWR 模型的长江流域 TRMM 数据降尺度研究[J].水土保持研究,2021,28(3):149-155,162.

(上接第 213 页)

- [9] 赵旭.基于空间冲突分析的昌黎县“三生”空间优化研究[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [10] 周德,徐建春,王莉.环杭州湾城市群土地利用的空间冲突与复杂性[J].地理研究,2015,34(9):1630-1642.
- [11] 杨俊,解鹏,席建超.基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟:以大连经济技术开发区为例[J].地理学报,2015,70(3):461-475.
- [12] 袁先强,卫亚星.基于马尔科夫模型的盖州市土地利用动态变化研究[J].国土与自然资源研究,2017,166(1):19-22.
- [13] 张子明,刘平辉,朱寿红.基于 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究:以临川区为例[J].江西农业学报,2018,30(5):117-123.
- [14] 王耕,王泽.基于 CA-Markov 模型的大连市旅顺区土地利用变化及预测研究[J].国土与自然资源研究,2016,164(5):10-15.
- [15] 魏伟,缪江波,夏俊楠,等.湖北省长江经济带沿岸地区“三区空间”演化特征及机制分析(2010-2017)[J].经济地理,2020,40(2):133-141.
- [16] 张龙,宋戈,孟飞,等.宁安市土地生态脆弱性时空变化分析[J].水土保持研究,2014,21(2):134-143.