

遥感降水数据空间降尺度及干旱时空监测

张寒博^{1,2}, 窦世卿^{1,2}, 温颖^{1,2}, 徐勇^{1,2}, 张楠^{1,2}, 苗林林^{1,2}

(1.桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林 541006;2.桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林 541006)

摘要: 在全球气候变暖的背景下,干旱灾害日趋频发。为全面精细研究华中地区降水的时空变化,结合水汽(PWV)、增强型植被指数(EVI)等数据,基于地理加权回归模型,结合克里金插值分别对 2010—2019 年的 GPM IMERG 和 TRMM 3B43 数据进行空间降尺度,并利用区域内 53 个气象站数据进行精度评价。对优选的降尺度数据采用变异系数法、Theil-Sen Median 趋势分析耦合 Mann-Kendall 显著性检验方法及 Hurst 指数法,分析了华中地区的降水时空变化特征及其可持续性特征,并对未来降水趋势进行预测,最后构建归一化降水距平百分率(NPA)、标准化降水蒸散指数(SPEI₁₂)来实现研究区的干旱时空监测。结果表明:降尺度处理后降水细节增强,能有效改善原始数据的高估现象,GPM 数据降尺度数据比 TRMM 降尺度数据更接近实测数据;近 10 年华中地区降水时空分布差异较大,降水较高波动变化和高波动变化共占全区 69.21%;10 年间降水变化以非显著变化为主,其中,轻微增加地区占全区 54.88%,轻微减小地区占全区 40.41%;10 年间降水变化趋势以弱(27.33%)、中(34.93%)持续性为主;华中地区降水未来趋势以持续增加为主,主要分布在区域北部,未来趋势无法确定的地区占全区 21.63%,主要集中在湖南;华中地区 NPA 空间分布有很大差异性,整体上处于无旱、轻旱灾害状态,NPA 与 SPEI₁₂ 有较好的相关性,且所有年份均通过了 0.05 显著性检验,在一定程度上能反映华中地区的干旱情况。

关键词: GPM IMERG; TRMM 3B43; GWRK; 空间降尺度; 干旱时空监测

中图分类号: S423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0153-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.021

Spatial Downscaling of Remote Sensing Precipitation Data and
Spatiotemporal Monitoring of Drought

ZHANG Hanbo^{1,2}, DOU Shiqing^{1,2}, WEN Ying^{1,2}, XU Yong^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}, MIAO Linlin^{1,2}

(1.Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006; 2.College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006)

Abstract: In the context of global warming, drought disasters are becoming more frequent. In order to comprehensively and finely study the temporal and spatial changes of precipitation in central China from 2010 to 2019, this study combined remote sensing data of water vapor (PWV), enhanced vegetation index (EVI), elevation, slope, and aspect, based on the geographically weighted regression model combined with Kriging Interpolation (GWRK), the GPM IMERG and TRMM 3B43 data from 2010 to 2019 were spatially down-scaled, and the data of 53 meteorological stations in the area were used for accuracy evaluation. For the optimized downscaling data, the coefficient of variation method, Theil-Sen Median trend analysis coupled with the Mann-Kendall significance test method and the Hurst index method were used to analyze the temporal and spatial characteristics of precipitation changes and sustainability characteristics in Central China, and future precipitation trends were predicted. Finally, the NPA (Normalized Precipitation Anomaly) and the SPEI12 (standardized precipitation evapotranspiration indices) were constructed to realize the spatio-temporal monitoring of drought in the study area. The research results showed that the details of the precipitation data are enhanced after downscaling, and the overestimation of the original data can be effectively improved. The downscaling data of GPM data was closer to the measured data than the downscaling data of TRMM. In the past 10 years, the temporal and spatial distribution of precipitation in Central China were quite different,

收稿日期:2021-07-06
资助项目:广西八桂学者专项(GUTQDJJ2017096);国家自然科学基金项目(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项目(191851016);桂林理工大学科研启动基金项目(GUTQDJJ2019046,GUTQDJJ2019172)
第一作者:张寒博(1996—),男,汉族,河南开封人,硕士研究生,主要从事遥感原理与应用研究。E-mail:2120191109@glut.edu.cn
通信作者:窦世卿(1977—),女,汉族,河北定州人,博士,教授,主要从事三维 GIS 与遥感技术应用研究。E-mail:doushiqing@glut.edu.cn

with high fluctuations and high fluctuations in precipitation accounting for 69.21% of the entire region. The precipitation changes during the 10 years were dominated by non-significant changes, of which slightly increased areas accounted for 54.88% of the entire region, and slightly decreased areas accounted for 40.41% of the entire region. The future trend of precipitation in Central China was dominated by a continuous increase, mainly distributed in the northern part of the region. Areas with uncertain future trends accounted for 21.63% of the entire region, mainly concentrated in Hunan. There were great differences in the spatial distribution of NPA in Central China. As a whole, it was in a state of drought-free and light-drought disasters. NPA and SPEI₁₂ had a relatively good correlation, and all years had passed the 0.05 significance test, which can be to a certain extent Reflect the drought in Central China. Downscaling data can reflect the temporal and spatial dynamic changes of precipitation in more detail, and is of great significance for accurate monitoring of drought and flood disasters, guiding agricultural production and promoting sustainable economic development.

Keywords: GPM IMERG; TRMM 3B43; GWRK; spatial downscaling; drought spatiotemporal monitoring

在全球变暖的趋势下,各地极端灾害现象频发,降水的时空分布趋于不稳定^[1],实现降水的时空变化监测和区域干旱研究对国民生活、经济、水土保持、农业监测等方面都有着重大意义^[2]。

传统的干旱监测是通过气象站获得的降水数据,但存在点位密度不足与分布不均等问题^[3]。遥感数据为干旱监测提供了新方法,陈诚等^[4]利用 TRMM 数据完成了黄淮海地区的干旱时空监测;谭惠芝等^[5]结合 GPM 数据实现了神木市的干旱监测表明,高分辨率的降水数据能更准确表征干旱的时空分布。

热带降雨测量卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)数据被认为是相对准确的降水观测数据。TRMM 3B43(V7)数据在京津冀地区^[6]、黄河流域^[7]等均具有良好的适用性,也有基于 TRMM 数据通过 Sen-Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 Hurst 指数实现对滇黔桂岩溶区^[8]和西南地区^[9]的降水时空动态特征分析。而随着 TRMM 卫星计划的终结,全球降水测量计划(global precipitation measurement, GPM)成为了新一代的降水测量卫星,其精度和分辨率比 TRMM 数据更高。GPM IMERG(integrated multi-satellite retrievals for GPM)产品在南方区域^[10]、黄淮海平原^[11]等地区均能准确地捕捉到降水区域特征。

无论是 TRMM 3B43(V7)数据还是 GPM IMERG 产品,它们的空间分辨率都不能满足小尺度、精细化的研究^[12],为了实现更精准的干旱监测,有必要对其进行空间降尺度。常见的空间降尺度有偏最小二乘法^[13]、多元线性回归法^[14]、随机森林算法^[15]等多种方法,多数学者^[16-17]表明,地理加权回归(GWR)模型效果最优,更适用于降水数据空间降尺度研究。

目前大多数研究都是基于单因子对降水数据进行降尺度,鲜有考虑到水汽因子,而水汽和降水有明

显的正相关性,因此,本文在前人的基础上,基于坡度、坡向、海拔、植被及水汽数据,采用 GWR 模型与克里金插值结合的方法,分别对 TRMM 3B43 数据和 GPM IMERG 数据进行空间降尺度,并通过实测数据对比降尺度数据的精度,对优选的降尺度数据进行降水时空变化分析和干旱监测,为华中地区降水和干旱监测提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华中地区地处气候过渡区^[18],由河南、湖北、湖南 3 省组成,纬度跨度大,地形复杂。区域内降水空间分布规律复杂,雨热同期,旱涝灾害时有发生,干旱作为重大的自然灾害,对国民的生活有着重要影响,因此,对华中地区干旱灾害的监测具有重大意义。研究区地理位置见图 1。

1.2 数据来源

TRMM 3B43(V7)降水数据空间分辨率为 0.25°, GPM IMERG 降水数据空间分辨率为 0.1°,PWV 数据来自 MOD05 近红外水汽产品,EVI 数据来自 MOD 13A3 增强型植被指数产品,空间分辨率都为 1 km,4 种数据时间分辨率都为 1 个月,均来源于 NASA(<https://www.nasa.gov/>)。DEM 数据采用空间分辨率为 90 m 的 SRTM 数据,从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取。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 年华中区域 53 个气象站的月尺度降水数据。

对 TRMM 数据和 GPM 数据进行投影、旋转、格式转换、单位标准化,并合成相应年数据;对 PWV、EVI 数据进行波段提取、拼接、投影、剔除无效值等处理,并合成年均 PWV 数据、年均 EVI 数据;对 DEM 数据进行投影、重采样处理为 1 km,并计算出坡度、坡向数据。

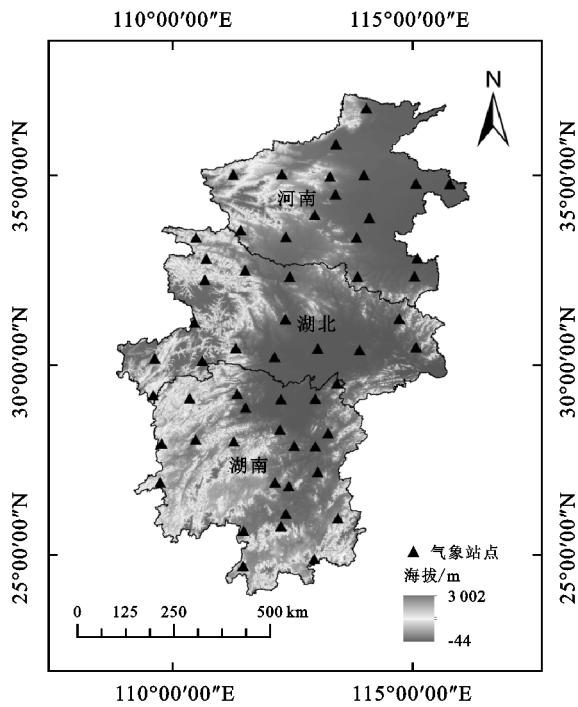


图 1 研究区及气象站分布

1.3 空间降尺度算法

GWRK 是地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型与克里金插值方法的结合。GWR 模型是 Brunson 等^[19] 于 1996 年提出,其基本思想是将空间地理位置嵌入到普通线性回归模型,实现局部估计,以此来解释空间的异质性。其一般公式为:

$$y_i = \alpha_{oi}(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \alpha_{ji}(u_i, v_i)x_{ji} + \sigma(u_i, v_i) \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

式中: y_i 为第 i 个点的降水量; α_{oi} 为第 i 个点的常数项回归参数; u_i, v_i 为第 i 个点的空间坐标; α_{ji} 为第 j 个空间因素 (如 EVI 或 DEM 等) 在第 i 个点的回归参数; k 为空间因素的个数; x_{ji} 为第 j 个空间因素在第 i 个点的值; σ 为第 i 个点的残差值。

本文以遥感降水数据为因变量, PWV、EVI、高程、坡度、坡向为自变量, 通过 GWR 模型建立高分辨率组与低分辨率组的回归方程, 以此获得 1 km 空间分辨率的 TRMM 数据和 GPM 数据降尺度数据, 详细步骤参考张寒博等^[20] 的研究。

1.4 降尺度效果评估指标

本文利用气象站数据作为实测数据, 对降尺度结果进行精度评价, 评价指标有相关系数 (CC)、标准偏差 (SD)、均方根误差 (RMSE)、相对误差 (BIAS)。其中 CC 表示 2 个数据之间的线性相关性, SD 评定数据集的离散度, RMSE 说明误差的整体水平, BIAS 反映降尺度数据对实测数据的高估或低估程度。计算公式为:

$$CC = \frac{\sum_i (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_i (M_i - \bar{M})^2} \times \sqrt{\sum_i (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_i (P_i - \bar{P})^2} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum_i (P_i - M_i)}{\sum_i M_i} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_i (P_i - M_i)^2} \quad (5)$$

式中: k 为气象站点数, $i = 1, 2, \dots, k$; M_i 为第 i 个气象站实测数据; $\bar{M}$ 为实测数据的平均值; P_i 为第 i 个气象站实测数据所对应的降尺度数据; $\bar{P}$ 为降尺度数据的平均值。

1.5 研究方法

1.5.1 空间分布分析 变异系数法可以分析降水量的空间格局与空间分异规律^[21]:

$$CV = \frac{\sigma}{GPM_down} \quad (6)$$

式中: CV 为降尺度数据的变异系数; σ 为像元的标准差; GPM_down 为像元的平均值。CV 值越大, 波动变化越大, 说明该地区降水量在时序上不稳定, CV 值越小, 波动变化越小, 说明该地区降水量比较均一, 空间差异小。

1.5.2 变化趋势分析 Theil-Sen Median 趋势广泛用于长时间序列数据的趋势分析, 相比一元回归趋势分析法, 其结果不受数据缺失的影响^[22], 但由于本身是基于中值的计算, 不能实现序列趋势的显著性判断, 而 Mann-Kendall 法能够判断序列的突变点以及每个区间的趋势情况, 实现对趋势分析结果进行显著性判断^[23]。

对于时间序列 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, Theil-Sen Median 趋势的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (7)$$

式中: Median 为取中值函数; 当 $\beta > 0$ 时, 时间序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势。

Mann-Kendall 趋势检验法的计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (9)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (10)$$

sgn 为符号函数, 在给定显著水平 α 下, 当 $|Z| > \mu_{1-\alpha/2}$ 为研究的时间序列数据在 α 水平上显著性变化。

1.5.3 变化可持续性分析 Hurst 指数是描述时间序列持续性的有效方法,本文采用重标极差(R/S)分析方法来获取 Hurst 指数,分析华中区域降水变化的未来趋势。

设时间序列 $|\zeta(t)|, t=1,2,3\cdots,\tau$ 对任意正整数 $\tau\in[1,n]$ 存在极差 R 、标准差 S ,满足:

$$R(\tau)/S(\tau)=(C\tau)^H$$

(11)

说明分析的时间序列存在 Hurst 现象。
式中: H 为 Hurst 指数。当 $0<H\leq 0.4$ 时,表现为反向持续性; $0.4<H\leq 0.5$ 时,表现为弱反向持续性; $0.5<H\leq 0.6$ 时,表现为弱持续性; $0.6<H\leq 0.8$ 时,表现为中持续性; $0.8<H\leq 1$ 表现为强持续性。

1.6 干旱指数

1.6.1 归一化降水距平百分率(NPA) 降水距平百分率(PA)能较直观地表征某时间段内的降水与同期平均状态的偏离程度,能够反映降水异常引起的气象干旱,是目前较为常用的干旱指标之一。计算公式为:

$$PA=\frac{P-\overline{P}}{\overline{P}}\times 100\%$$

(12)

式中: P 为某年的降水量(mm); $\overline{P}$ 为同时期多年平均降水量(mm)。

但降水时空分布具有差异性,导致 PA 不具有空间可比性。为了弱化此弊端,对 PA 进行归一化处理得到归一化降水距平百分率(NPA)。计算公式为:

$$NPA=\frac{PA-PA_{\min}}{PA_{\max}-PA_{\min}}$$

(13)

式中: $PA_{\min}$ 和 $PA_{\max}$ 分别为多年同期 PA 的最小值和最大值。

1.6.2 标准化降水蒸散指数(SPEI) 标准化降水蒸散指数(SPEI)是通过计算降水量和潜在蒸散量的差值偏离平均状态的程度,来表征干旱程度,它是一个多尺度干旱指数,本文用 12 个月尺度的 $SPEI_{12}$ 来反映年际干旱变化情况。

(1)首先计算水汽平衡,即逐月降水量和潜在蒸散量的差值。

$$D_i=P_i-PET_i$$

(14)

式中: P_i 为气象站降水量; PET_i 为潜在蒸散量,本文采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量,具体计算过程参考文献[24]。

(2)然后采用三参数的 log-logistic 概率分布函数对 D_i 数据序列进行拟合。

$$f(x)=\frac{\beta}{\alpha}(\frac{x-y}{\alpha})^{\beta-1}(1+(\frac{x-y}{\alpha}))^2$$

(15)

$$F(x)=\int_0^x f(t)dt=(1+(\frac{\alpha}{x-y})^\beta)^{-1}$$

(16)

(3)接着对序列进行正态分布标准化,得到对应

的 SPEI 值。

$$\omega=\sqrt{-2\ln P}$$

(17)

$$SPEI=\omega\frac{c_0+c_1\omega+c_2\omega^2}{1+d_1\omega+d_2\omega^2+d_3\omega^3}$$

(18)

当 $P\leq 0.5$ 时, $P=1-F(x)$;当 $P>0.5$ 时, $P=1-P$,且 SPEI 的符号逆转;常数项 $c_0=2.515\ 517$, $c_1=0.802\ 853$, $c_2=0.010\ 328$, $d_1=1.432\ 788$, $d_2=0.189\ 269$, $d_3=0.001\ 308$ 。

2 结果与分析

2.1 降尺度结果及检验

分别对 2011—2019 年的 TRMM 数据和 GPM 数据进行降尺度,并求得多年平均数据。由图 2 可知,降尺度前后数据的降水空间分布整体趋于一致,表现由南向北递减,湘中、湘东、湖北东南部等局部地区降水较丰富。降尺度前的数据空间分辨率低,局部的空间降水特征模糊,降尺度后的数据空间分辨率均提升至 1 km,表现的空间降水特征比原数据更为细致,且在降水量越多的地区改善越明显。

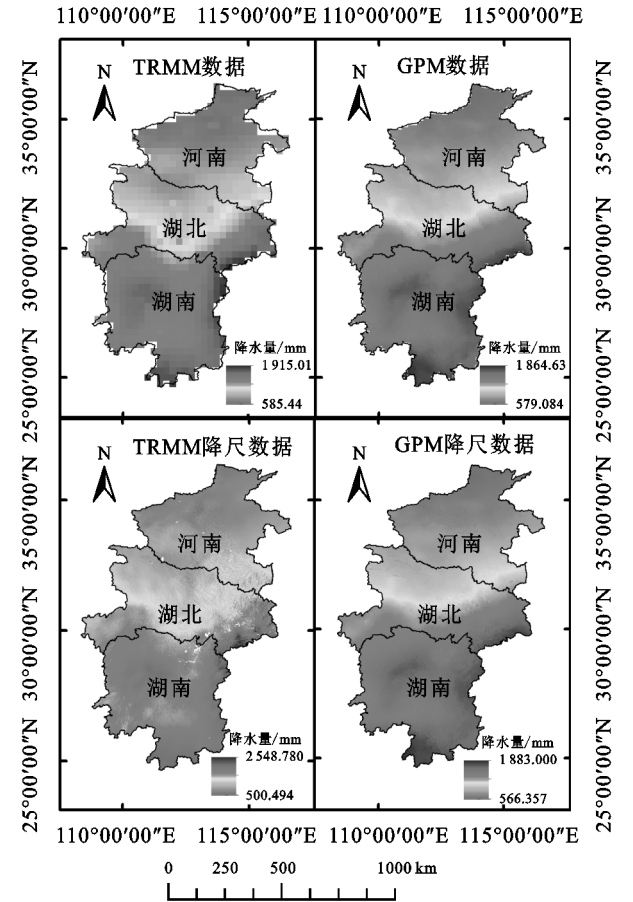


图 2 2010—2019 年降尺度前后 TRMM 和 GPM 年均数据对比

为进一步验证降尺度数据的可靠性,以气象站数据为实测值,对 10 年的降尺度数据进行精度验证。由图 3 可知,2 种降水数据与实测数据均有较高的相关性($CC>0.85$),GPM 数据与实测数据的 SD 、

RMSE、BIAS 均低于 TRMM 数据,更接近实测数据。降尺度处理后,2 种数据精度都得到了提升,且 GPM 降尺度数据($CC = 0.948$, $SD = 323.58$ mm, $RMSE = 117.68$ mm, $BIAS = 0.054$)精度最优。由图 4 可知,GPM 数据经过降尺度处理,数据精度除 2011 年、2013 年基本保持不变,其他年份均得到一定程度改善。综上分析,通过 GWRK 对遥感降水数据进行空间降尺度不仅可以获得较高分辨率的降水数据,还在一定程度上对数据进行了优化,改善了原数据的高估现象,使之能更准确地完成对降水量的预估,且 GPM 数据降尺度结果优于 TRMM 数据降尺度结果,更加符合真实降水信息的时空分布。

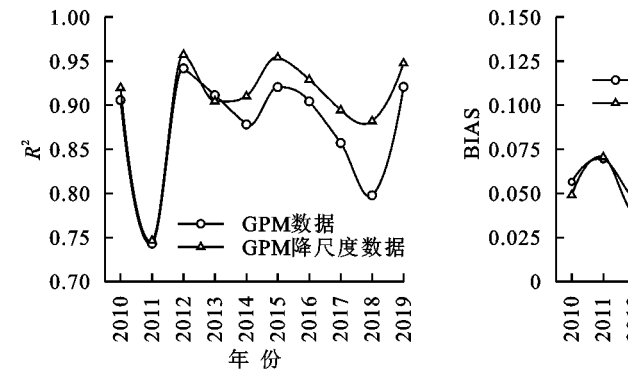


图 4 GPM 数据降尺度前后的 R^2 、BIAS 和 RMSE 变化趋势

2.2 基于 GPM 降尺度数据的华中地区降水空间分布分析

华中地区气候特征复杂,旱涝灾害频发,降水时空分布差异较大。为更好分析 2010—2019 年降水空间变化特征,通过变异系数法逐像元对优选的 GPM 降尺度数据进行变异特征分析,并将结果分为 5 级(表 1)。由图 5 可知,10 年间华中地区整体降水波动较高,较高波动变化和高波动变化分别占 38.67%,30.54%,高波动变化地区主要分布在华中地区中东部及湖南东南地区,降雨受气旋的影响较大,这或许与该地区所处地理位置有关。低波动变化地区及较低波动变化地区仅占 7.90%,主要分布在豫北一些城市地区,此地区年均降水较少,降水变异程度浅。

表 1 变异程度分级

CV	变异程度	占总面积百分比/%
$CV \leq 0.05$	低波动变化	2.58
$0.05 < CV \leq 0.10$	较低波动变化	5.32
$0.10 < CV \leq 0.15$	中等波动变化	22.89
$0.15 < CV \leq 0.20$	较高波动变化	38.67
$CV > 0.20$	高波动变化	30.54

2.3 基于 GPM 降尺度数据的华中地区降水变化趋势分析

为探究华中区域的降水变化趋势,基于 GPM 降尺度数据,采用 Theil-Sen median 趋势耦合 Mann-Kendall 检验将区域内 2010—2019 年降水变化趋势进行 4 类划分。由表 2 可知,降水变化趋势主要表现为增加,各

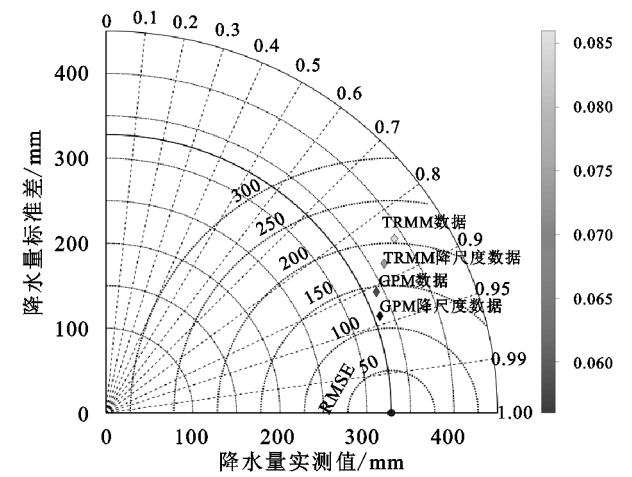


图 3 4 种年降水数据相对于地面实测降水的泰勒图

变化趋势面积占比为:轻微增加(54.88%)>轻微减小(40.41%)>显著增加(3.22%)>显著减少(1.49%),非显著变化面积占 95.29%。由图 6 可知,区域内整体降水变化以轻微变化占主导,从各亚区来看,河南、湖南降水变化趋势以轻微增加为主,湖北以轻微减小为主,显著增加区域主要分布在湖南中部部分地区。

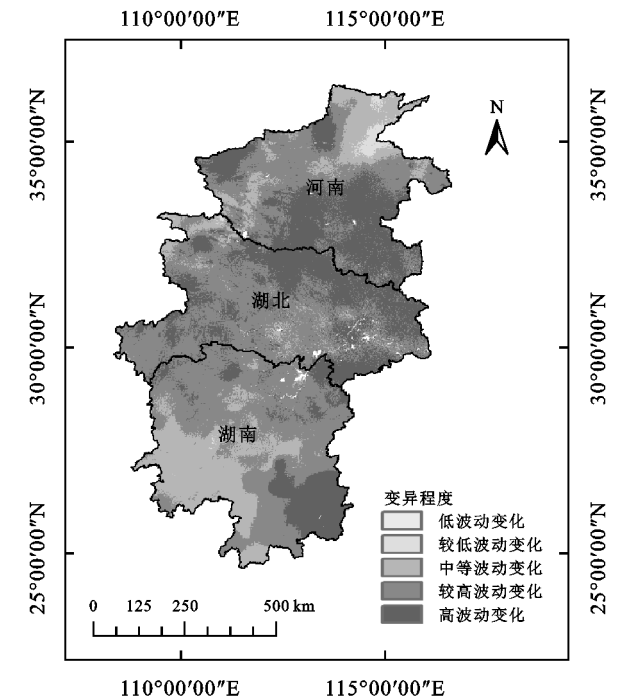


图 5 2010—2019 年华中地区年均降水变异程度

表 2 降水变化趋势分级

β	$ Z $	降水变化趋势	占总面积百分比/%
$\beta<0$	$ Z >1.96$	显著减小	1.49
$\beta<0$	$ Z \leq 1.96$	轻微减小	40.41
$\beta>0$	$ Z \leq 1.96$	轻微增加	54.88
$\beta>0$	$ Z >1.96$	显著增加	3.22

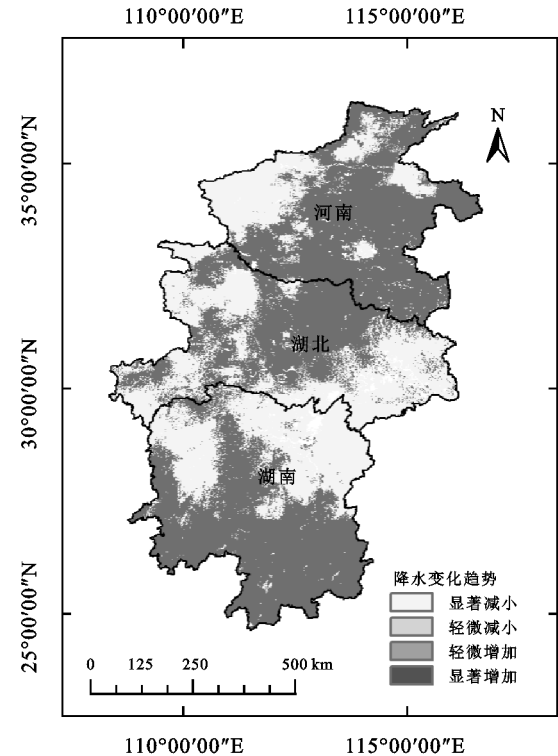


图 6 2010—2019 年华中地区年均降水变化趋势

2.4 基于 GPM 降尺度数据的华中地区降水变化可持续性分析

通过计算 2010—2019 年 GPM 降尺度数据的 Hurst 指数对未来降水变化可持续性进行分析。由表 3 可知,华中地区绝大数区域(78.37%)的降水变化趋势都具有持续性,其中,中持续性(34.93%)>弱持续性(27.33%)>强持续性(16.11%)。从 Hurst 指数空间分布(图 7)来看,强持续性地区主要分布在湖北,反持续性地区主要分布在湖南,河南地区以弱持续性和中持续性为主。

表 3 降水变化可持续性分级

Hurst 指数	持续性强度	占总面积百分比/%
0~0.4	强反持续性	6.45
0.4~0.5	弱反向持续性	15.18
0.5~0.6	弱持续性	27.33
0.6~0.8	中持续性	34.93
0.8~1.0	强持续性	16.11

2.5 华中地区降水未来趋势分析

通过耦合 2010—2019 年降水变化趋势和降水变化持续性,实现华中地区降水未来趋势的预测。借鉴康尧等^[25]研究结果,把未来降水趋势分为 5 类(表

4)。结合图 8 可知,区域内 43.86%的地区降水持续增加,其中,41.21%的地区降水表现为持续性轻微增加,主要分布在区域北部;降水持续减小的地区主要分布在区域西部及湘鄂交界处,占总面积的34.51%;未来趋势无法确定的地区占全区 21.63%,主要集中在湖南。

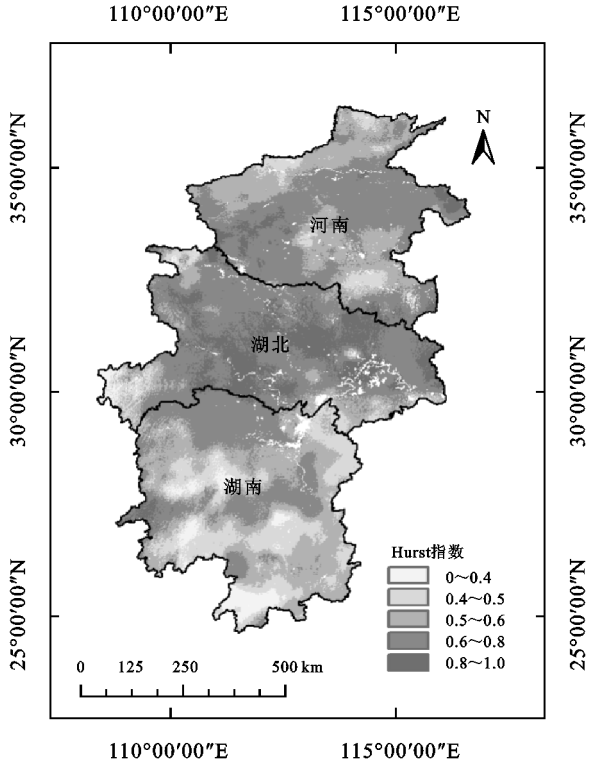


图 7 2010—2019 年华中地区降水的 Hurst 指数分布

2.6 华中地区干旱分析

为实现 2010—2019 年华中地区的干旱监测,通过 GPM 降尺度数据计算出 NPA,并根据《气象干旱等级》^[26]对 NPA 进行干旱等级划分(表 5)。由图 9 可知,除 2011 年的湖南、2019 年的湖北及河南南部出现大面积重旱地区外,华中地区整体上处于无旱、轻旱灾害状态。这与实际情况符合:2011 年为拉尼娜年^[27],我国境内夏热冬冷,热带气旋登陆频繁,导致我国 2011 年夏季降雨较少,多数地区出现干旱现象;2019 年发生厄尔尼诺现象,我国境内极端天气频发^[28],同年 9 月华中地区出现比较大范围的“华中干旱带”。10 年期间区域内 NPA 空间分布有很大差异性,干旱灾害时有发生,重旱灾害地区由南向北转移。从最明显的干旱年度特征来看,NPA 反映的干旱现象与实际相符,能够作为干旱评价指标。

为进一步验证 NPA 在华中地区进行干旱监测的适用性,通过 2010—2019 年研究区内 53 个气象站数据计算出 SPEI₁₂,并提取对应位置的 NPA 进行相关性分析,以此来对 NPA 数据进行精度验证。由表 6 可知,NPA 与 SPEI₁₂有较强的相关性,所有年份均通过了 0.05 显著性检验,且除 2011 年和 2019 年的其他年份都通过了 0.01 显著性检验。2014 年相关性

最高(0.724),2011 年相关性最低(0.442)。因此,NPA 可以在一定程度上用于华中地区的干旱监测。

表 4 降水未来趋势分级

$b\beta$	$ Z $	Hurst 指数	降水未来趋势	占总面积百分比/%
$b\beta<0$	$ Z >1.96$	>0.5	持续性显著减小	1.24
$b\beta<0$	$ Z \leq1.96$	>0.5	持续性轻微减小	33.27
$b\beta>0$	$ Z \leq1.96$	>0.5	持续性轻微增加	41.21
$b\beta>0$	$ Z >1.96$	>0.5	持续性显著增加	2.65
—	—	<0.5	无法确定	21.63

3 讨论

本文先基于 GWRK 模型对 TRMM 3B43 数据和 GPM IMERG 数据进行了空间降尺度,并通过实测数据优选出精度较高的降尺度数据。结果表明,GPM 降尺度数据在提高空间分辨率的同时提升了数据的准确度,能更好地反映出华中地区降水的空间分布,这与史岚等^[12]和玉院和等^[16]的研究结论基本一致。

通过变异系数、Theil-Sen Median 趋势分析方法对 GPM 降尺度数据进行了降水变化动态分析。结果表明,华中地区降雨时空分布不均,整体表现为南多北少。2011 年、2019 年降水空间分布差异明显,与陈波等^[29]研究华中地区降水强度表现为以 6~9 年为周期的加强和减弱现象相符。

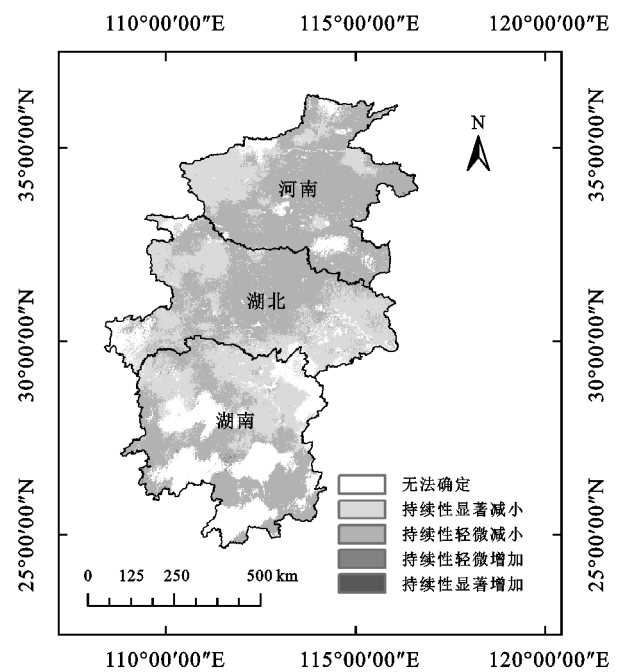


图 8 2010—2019 年华中地区降水变化可持续性

表 5 干旱等级划分

指标	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
PA/%	≤-45	$(-45,-40]$	$(-40,-30]$	$(-30,-15]$	≥-15
NPA	$[0,0.1]$	$(0.1,0.15]$	$(0.15,0.25]$	$(0.25,0.5]$	$(5,1]$

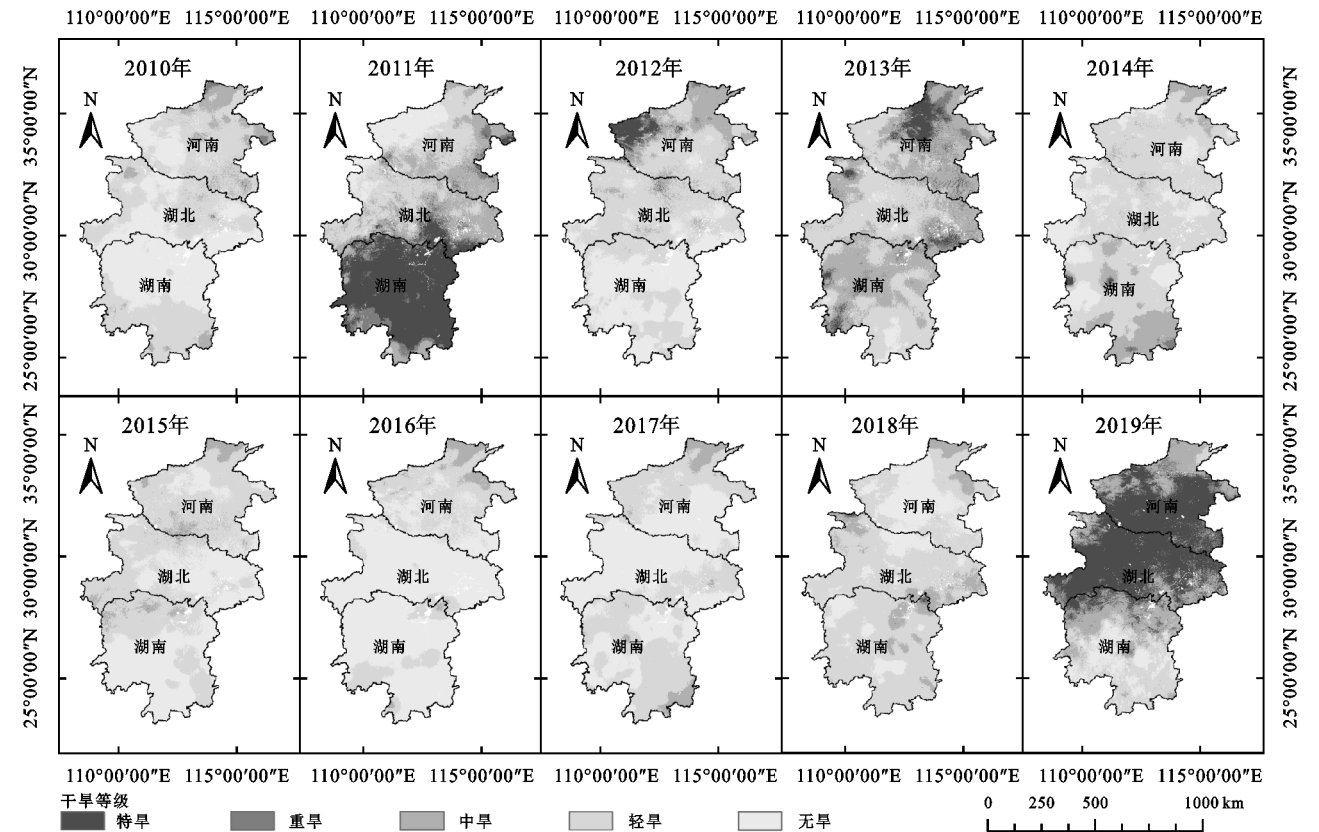


图 9 2010—2019 年华中地区干旱等级空间分布

本文在对不同遥感降水数据进行空间降尺度的基础上,进一步分析了华中地区的降水时空动态变化特征,并基于 NPA 实现了干旱时空监测,虽通过

SPEI₁₂ 证实了其适用性,但影响干旱现象的因素众多,若只根据单因子进行干旱监测过于片面,在后续研究中应考虑更多影响因素应用于干旱监测。

表 6 NPA 与 SPEI₁₂ 的相关性

年份	相关性	年份	相关性
2010	0.691**	2015	0.703**
2011	0.442*	2016	0.724**
2012	0.652**	2017	0.664**
2013	0.627**	2018	0.629**
2014	0.688**	2019	0.438*

注：* 表示通过 0.01 水平的显著检验；* 表示通过 0.05 水平的显著检验。

4 结论

(1)TRMM 和 GPM 数据在降尺度处理前后的降水空间分布趋于一致,整体表现为由南部向北部递减,且降尺度数据在提高空间分辨率的同时也不不同程度提升了数据的精度,其中,GPM 降尺度数据(CC=0.948,SD=323.58 mm,RMSE=117.68 mm,BIAS=0.054)的精度普遍优于 TRMM 降尺度数据。

(2)近 10 年华中地区降水空间分布差异显著,整体降水波动较高(高波动区域占全区 69.21%);降水变化趋势以不显著变化为主,但降水持续变化的区域(Hurst>0.5)占 78.37%;从降水未来趋势来看,43.86%的区域会持续增加,21.63%的区域无法确定。

(3)华中地区的归一化降水距平百分率(NPA)与标准化降水蒸散指数(SPEI₁₂)具有较强的相关性(0.442~0.724),并且 NPA 在反应干旱时空分布上与实际结果相符,在一定程度上可作为一种干旱监测指标。

参考文献:

[1] 孙劭,李多,刘绿柳,等.2016 年全球重大天气气候事件及其成因[J].气象,2017,43(4):477-485.

[2] 胡彦婷,张富,罗珠珠,等.半干旱区降水和水土保持措施强度:径流演变规律研究[J].干旱区地理,2020,43(6):1426-1434.

[3] 王蔚丹,孙丽,裴志远,等.典型旱年农业干旱遥感监测指标在东北地区生长季的表现[J].中国农业气象,2021,42(4):307-317.

[4] 陈诚,赵书河.基于 TRMM 降雨数据的中国黄淮海地区干旱监测分析[J].国土资源遥感,2016,28(1):122-129.

[5] 谭惠芝,尹倩,姬莉雯,等.融合 GPM 降水数据的土壤干旱遥感监测[J].干旱区研究,2021,38(2):513-525.

[6] 杨荣芳,曹根华,张婧.TRMM3B43 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.

[7] 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.

[8] 靖娟利,罗福林,王永锋,等.1998—2017 年滇黔桂岩溶区降水时空动态特征[J].水土保持研究,2019,26(5):158-165.

[9] 周李磊,杨华,刘睿,等.基于 TRMM 数据的西南地区年降水时空特征研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(1):114-122.

[10] 陈晓宏,钟睿达,王兆礼,等.新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J].水利学报,2017,48(10):1147-1156.

[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] 史岚,何其全,杨娇,等.闽浙赣地区 GPM IMERG 降水产品降尺度建模与比较分析[J].地球信息科学学报,2019,21(10):1642-1652.

[13] 宁珊,张正勇,刘琳,等.TRMM 偏最小二乘降尺度降水模型在新疆不同地貌的适应性[J].农业工程学报,2020,36(12):99-109.

[14] Alexakis D D, Tsanis I K. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for downscaling TRMM precipitation products using MODIS data[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(14):1077-1089.

[15] 徐彬仁,魏媛媛.基于随机森林算法对青藏高原 TRMM 降水数据进行空间统计降尺度研究[J].国土资源遥感,2018,30(3):181-188.

[16] 玉院和,王金亮.TRMM 3B43 降水数据在云南地区的降尺度适用性评价[J].中国农业气象,2020,41(9):575-586.

[17] Lv A F, Zhou L, Koch M, et al. A rainfall model based on a Geographically Weighted Regression algorithm for rainfall estimations over the Arid Qaidam Basin in China[J].Remote Sensing,2016,8(4):311-327.

[18] 任永建,高媛,肖莺,等.1961—2010 年华中区域降水变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(增刊 1):90-95.

[19] Brunsdon 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.

[20] 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[J].水土保持研究,2021,28(3):149-155.

[21] 赵晶,周耀治,邓兴耀.西北干旱区植被覆盖时空动态特征[J].林业资源管理,2017(1):118-126.

[22] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.

[23] 佟彪,党安荣,周宏宇.无定河流域城镇聚落的历史演变与 人地耦合[J].自然资源学报,2021,36(1):38-54.

[24] Durdiev K, Chen X, Huang Y, et al. Investigation of crop evapotranspiration and irrigation water requirement in the lower Amu Darya River Basin, Central Asia[J].Journal of Arid Land,2021,13(1):23-39.

[25] 康尧,郭恩亮,王永芳,等.温度植被干旱指数在蒙古高原干旱监测中的应用[J].应用生态学报,2021,32(7):2534-2544.

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S].北京:气象出版社,2017.

[27] 张雪,闫凯丽.长江流域干旱特征及成因分析[J].大众科技,2018,20(2):4-6.

[28] 李俊,袁媛,王遵娅,等.2019 年长江中下游伏秋连旱演变特征[J].气象,2020,46(12):1641-1650.

[29] 陈波,史瑞琴,陈正洪.近 45 年华中地区不同级别强降水事件变化趋势[J].应用气象学报,2010,21(1):47-54.