暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于最优插值和地理加权回归的GPM降水数据降尺度研究——以四川省甘孜州为例

胡春 刘兴忠 何超 刘小波

A study on downscaling GPM precipitation data based on optimal interpolation and geographically weighted regression: A case analysis of Ganzi prefecture, Sichuan Province

HU Chun，LIU Xingzhong，HE Chao，LIU Xiaobo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-154

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于机器学习算法的多源月尺度融合降水产品在中国区域的检验评估

Examination and evaluation of multi-source monthly scale fusion precipitation product in China based on machine learning algorithm

暴雨灾害. 2023, 42(5): 595-605 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-006

台风“烟花”影响浙江期间GPM卫星降水产品的评估及订正

Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during Typhoon "In-Fa" affecting Zhejiang

暴雨灾害. 2023, 42(6): 704-715 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-054

多卫星融合降水产品对2015—2020年登陆浙江台风降水的监测能力评估

Evaluation of monitoring ability of the integrated multi-satellite retrievals for precipitation during typhoon landing in Zhejiang from 2015 to 2020

暴雨灾害. 2023, 42(1): 57-66 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-015

三种插值方法对区域自动气象站日气温缺测数据插补的适用性研究

Applicability of three interpolation methods in estimating daily temperature with missing data from regional automatic weather station

暴雨灾害. 2023, 42(1): 97-104 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-183

一种改进的数值模式降水预报时间降尺度方法

An improved time downscaling method for numerical model precipitation forecast

暴雨灾害. 2024, 43(5): 542-550 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-210

基于GWR模型的中国中东部降水与海拔高度关系特征分析

Analysis of the relationship between precipitation and altitude over central and eastern China based on the Geographically Weighted Regression Model

暴雨灾害. 2021, 40(1): 1-11 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.001

关注微信公众号，获得更多资讯信息

胡春,刘兴忠,何超,等.2025.基于最优插值和地理加权回归的 GPM 降水数据降尺度研究——以四川省甘孜州为例[J].暴雨灾害,44(2):246−254. HU Chun, LIU Xingzhong, HE Chao, et al. 2025. A study on downscaling GPM precipitation data based on optimal interpolation and geographically weighted regression: A case analysis of Ganzi prefecture, Sichuan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):246−254 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−154

基于最优插值和地理加权回归的 GPM 降水数据降尺度研究——以四川省甘孜州为例

胡春[1], 刘兴忠[1], 何超[1], 刘小波[2]

(1. 四川省气象探测数据中心 , 成都 610072; 2. 四川省甘孜州气象局, 康定 626000)

摘　要: 卫星降水产品可提供重要的降水信息, 对水循环、水资源利用保护等具有重要参考, 但卫星降水数据受制于分辨率不高和精度不够的影响, 使其在应用中存在不足。本研究在最优插值 (OI) 和地理加权回归 (GWR) 的基础上, 以归一化植被指数 (NDVI) 和高程 (DEM) 为控制变量, 对四川省甘孜州 GPM 卫星降水数据进行降尺度处理, 将卫星降水数据从 0.1°×0.1°(GPM) 降尺度到 1 km×1 km (OIGPM), 并利用多参数评估降尺度前后数据质量, 在时空上对比降尺度数据与站点数据的差异。结果表明: (1) GPM 和 OIGPM 降水数据均可反映空间降水分布特征, 但 GPM 产品对降水存在低估, OIGPM 更接近实况; (2) GWR 融合降尺度降水可提升降水空间分辨率, 并同时提高降水精度; (3) 多项评估参数定量计算结果显示, 通过最优插值和 GWR 两步方法获得的降水数据, 其评估参数值均明显优于原始数据; (4) 无残差修正、最优插值后的 GPM 降水数据(GOIGPM)在甘孜地区与实测数据相关系数更高、均方根误差更低, 更具有适用性。

关键词: GPM 降水产品; 最优插值; 地理加权回归; 降尺度融合

中图法分类号: P413.2^{+}2　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−154

A study on downscaling GPM precipitation data based on optimal interpolation and geographically weighted regression: A case analysis of Ganzi prefecture, Sichuan Province

HU Chun[1], LIU Xingzhong[1], HE Chao[1], LIU Xiaobo[2]

(1. *Sichuan Meteorological Observation and Data Centre*, *Chengdu* 610072; 2. *Ganzi Meteorological Office of Sichuan Province*, *Kangding* 326000)

Abstract: Satellite precipitation can provide important precipitation information and is currently an important reference for precipitation. However, satellite precipitation data is limited by resolution and accuracy, resulting in shortcomings in its application. In this study, based on the optimal interpolation and geographically weighted regression methods, the GPM satellite precipitation data in Ganzi Prefecture were downscaled and fused using the normalized difference vegetation index (NDVI) and digital elevation model (DEM) as the dependent variables. The satellite precipitation data was downscaled from 0.1°×0.1° to 1 km×1 km. The quality of the downscaled data was evaluated using multiple parameters, and the spatiotemporal differences between the downscaled data and station data were compared. The results are as follows. (1) Both GPM and OIGPM precipitation data can reflect the spatial distribution of precipitation, but GPM tends to underestimate precipitation while OIGPM is more accurate. (2) The fusion downscaled precipitation using GWR can improve the spatial resolution of precipitation and enhance its accuracy. (3) Quantitative calculations of multiple evaluation parameters show that the downscaled precipitation data obtained through the optimal interpolation and GWR methods are significantly better than the original data. (4) The Optimal Interpolated GPM precipitation data (GOIGPM) without residual correction has a higher Correlation Coefficient and lower Root Mean Square Error with rainfall gauge data in the Ganzi region, making it more applicable.

Key words: GPM precipitation; optimal interpolation; geographically weighted regression; fused downscaled data

收稿日期: 2023−07−28; **定稿日期**: 2024−05−26

资助项目: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目 (SCQXKJYJXMS202320, SCQXKJYJXMS202318)

第一作者: 胡春, 主要从事大气探测及探测数据的应用研究。E-mail: 349430433@qq.com

通信作者: 刘兴忠, 主要从事大气探测及探测数据的应用研究。E-mail: liuxz246@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引　言

降水是全球水循环的重要环节 (Lu et al., 2020; Zhang et al., 2020)。由于降水有着较强的空间异质性, 因此获取准确的降水信息就成了研究的重点 (胡实等, 2020)。目前, 较为主流的降水资料包括雨量计、雷达和卫星降水数据等。雨量计和雷达数据可被视为直接降水资料, 但前者受制于地形地貌, 无法做到全覆盖, 特别是无人区、高山峡谷地带, 基本均为监测盲区; 雷达资料受观测环境影响, 有遮挡物存在时无法发挥有效作用, 且架设成本高, 难做到普及应用; 这两种资料均有一定的涉密性, 获取难度较大。因此, 卫星降水产品逐渐得到重视, 甚至在某些地区是唯一可被获取的降水资料, 如高原山区、沙漠和海洋等。卫星降水数据一般可免费获取, 且有着较高的时空连续性, 空间覆盖范围广, 可获取时间跨度长, 但较低的空间分辨率和误差也限制了资料的应用。基于此, 校正卫星降水数据的精度, 提高卫星降水产品的空间分辨率及精度就成了重要的研究方向。

为提高卫星降水产品的空间分辨率, 降尺度方法被广泛应用。降尺度融合是指引入与降水密切相关又具有更高分辨率的物理量, 如归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 建立降水与物理量之间的数学关系, 基于在低分辨率下建立的模型同样适用于高分辨率数据的假设 (Immerzeel et al., 2009; 胡实等, 2022), 实现低分辨率降水数据在精度和分辨率上的提升。Immerzeel 等 (2009) 建立了 NDVI 和降水的指数模型, 得到了年分辨率下的高分辨率降尺度降水数据; 李炎坤等 (2022) 则利用 DEM (Digital Elevation Model) 和 NDVI 数据, 在多元线性回归模型基础上, 对青海湖流域的降水数据进行了降尺度处理, 发现不同回归模型间存在差异。与线性回归这种全局性回归方法相比, 局部回归模型更注重空间上的差异, 其设定因变量与自变量在空间上每一处都具有不同的回归参数, 实现了更精细化的回归分析, 其中比较有代表性且应用较多的是地理加权回归模型 (Geographically Weighted Regression, GWR)。Shen 等 (2022) 利用 NDVI, 在 GWR 和长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory Network) 基础上对多种卫星降水数据进行了降尺度分析, 结果表明降尺度数据在相关系数等参数上获得了明显提升; 温伯清等 (2021) 则将数字高程模型 DEM 作为因变量, 对陕西省 GPM (Global Precipitation Measurement Mission) 降水数据进行了降尺度融合, 结果显示降尺度数据能在季尺度和年尺度上较好地反映降水的空间分布特征, 相关验证参数也获得提升; 此外, 在我国其他地区的研究中, GWR 也有较好的应用 (史岚等, 2019; 盛夏等, 2021; 林书睿等, 2022); 另外, 部分学者根据研究需求, 对 GWR 模型进行了调整修改, 同样取得了较为理想的结果 (Kamarianakis et al., 2008; Shen et al., 2022; Sheng et al., 2023)。

尽管目前 GWR 模型应用较多, 但模型所用因变量参数较单一, 往往只设置一个自变量, 若涉及到高海拔或山区, 单个自变量就显得不足; 此外, 以往研究较少关注青藏高原地区的降水降尺度研究, 特别是本研究关注的四川省甘孜州地区, 处于青藏高原和四川盆地的过渡带, 地形复杂, 气象、地质等灾害频繁, 对高精度降水信息需求更为迫切, 现有的基准站数据难以满足实际需求, 加密站又是近年才逐步新增, 区域缺乏对早期精细化降水信息的掌握, 也少有研究只针对甘孜州开展降水降尺度工作。基于此, 研究聚焦四川省甘孜州, 使用 GPM 降水数据, 利用 NDVI 和高程两个自变量, 在逐月时间分辨率上, 对 2013—2022 年 5—8 月空间分辨率为 0.1°×0.1°的原始 GPM 降水数据进行降尺度处理; 同时, 考虑 GWR 模型对原始降水数据要求较高, 原始数据精度越高, 融合效果也会越好, 在做 GWR 融合前, 利用地表雨量计数据, 使用最优插值方法 (Optimal Interpolation, OI) 对 GPM 降水进行校正, 再在校正数据基础上引入 NDVI 和高程对降水进行降尺度分析, 使用均方根误差、相对偏差和相关系数等 3 个指标对比融合前后数据质量, 以期为获取甘孜州地区高分辨率降水资料提供新的参考。

1　研究区域及资料与方法

1.1　研究区域

甘孜州位于四川省西部, 地理范围为 97°22′—102°29′E、27°58′—34°20′N, 总面积约 15.3×10^4 km^2。区域属于高原气候, 日照充足、气温较低、降水偏少, 州内分布有高山、草原等, 地形地貌多样, 植被覆盖区较广; 区域平均海拔约 3 500 m, 但高程落差大, 相对高差可达 6 400 m (图 1)。此外, 区域内水力资源丰富, 有多条大江大河流经, 同时矿产资源、动植物资源丰富, 是四川西部乃至我国西部重要的资源聚集区 (王庆莉等, 2019)。

1.2　资料来源

1.2.1　雨量计数据

研究所用雨量计数据来自国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn/) 逐月气象台站观测的降水数

据, 数据时间为 2013—2022 年的 5—8 月, 对数据进行质量控制后, 得到研究时段内时间分辨率为逐月的降水信息。雨量计站点共有 19 个 (图 1, 其中红色实心圆代表训练集站点, 黑色实心圆代表验证集站点), 保证甘孜州每个市县均有一个雨量计数据。

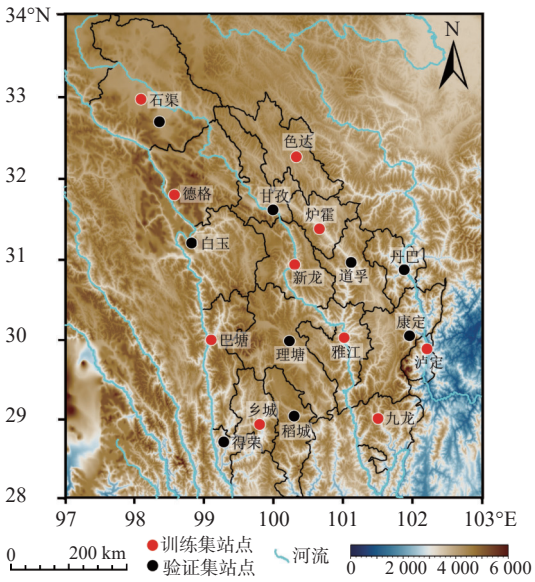


图 1 甘孜州雨量计站点分布及高程信息 (填色, 单位: m) 图

Fig. 1 Distribution and elevation (shaded, unit: m) information map of rain gauge stations in Ganzi Prefecture

1.2.2 GPM 降水资料

GPM 是指全球降水探测计划, 该计划由美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和日本航空航天研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 共同实施。GPM 是 TRMM 的后续卫星, 目的是提供全球范围更高空间分辨率的降水产品, 该数据在我国也被广泛应用 (曲学斌等, 2020; 傅云飞等, 2022; 王智敏等, 2022; 杨荣芳等, 2022); GPM 卫星的核心仪器为双频降水雷达 (DPR) 和微波辐射计 (GMI), DPR 具有更广覆盖范围和更高的灵敏度, 如 Ku 波段的探测范围较 Ka 波段更宽, 能提供更精确的立体降水微观结构信息, 使 GPM 系列卫星在探测微量和小降雨事件上的能力大幅提升 (吴琼等, 2017; 张寿祺和傅云飞, 2018; 魏鸣等, 2023); GMI 则利用每个通道的偏振差作为光学厚度、含水量和降水系统的指标, 来反演强降水、中等和弱降水(魏鸣等, 2023), 使 GPM 可更准确地反演不同强度的降水。目前, GPM 可提供最小时间分辨率为 30 min, 最小空间分辨率为 0.1°×0.1°的降水数据, 数据类型有“Early-run”、“Late-run”和“Final-run”三种。其中“Early-run”未经过严格的订正, 数据质量在三种类型中较差, “Late-run”则经过了相关算法处理和校正, 数据质量得到优化, 而“Final-run”则经过最为完善的优化和验证, 数据质量最佳, 目前三种数据均可在官方网站获取 (https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm)。但由于“Final-run”数据目前处于维护中, 2021 年以来的数据不可被获取, 因此研究使用的数据来自“Late-run”系列, 数据时间分辨率为逐日, 空间分辨率为 0.1°×0.1°, 时间跨度为 2013—2022 年。由于研究的时间分辨率为逐月, 利用 MATLAB 程序将逐日的 GPM 降水处理为逐月的 GPM 降水, 处理过程中, 为保证数据的有效性, 去除了逐日数据中的无效值, 由于研究时段内无数据缺失, 因此不需要进行缺省值补充等处理, 经过上述步骤后, 累加得到最终的逐月降水数据。

1.2.3 NDVI 植被指数资料

研究采用的 NDVI 数据来自于 TEERA 卫星 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器的标准产品, 产品可在 NASA 官网上免费获取(http://ladsweb.nascom.nasa.gov/), 产品编号为 MOD13A3, 空间分辨率为 1 km×1 km。根据研究范围, 下载数据的行列号分别为 h25v05/h26v05/h26v06/h27v06, 通过 Python 调用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 的方法实现数据的拼接。官网提供的 NDVI 存在拉伸情况, 需要除以 10 000 的拉伸系数, 研究利用 MATLAB 实现这一目的, 再去除数据中的无效值和超过限定范围的值, 得到最终的逐月 NDVI 结果。

1.2.4 高程 DEM 数据

本次研究所用高程数据来自黑河计划数据管理中心, 高程数据的空间分辨率为 1 km×1 km, 数据可在官网注册后获取 (http://westdc.westgis.ac.cn)。

1.3 研究方法

1.3.1 GPM 降水数据订正方法

最优插值方法是一种常见的数据校正方法 (韩焱红等, 2019), 最优插值方法中包括一个初估场和一个观测场, 其中初估场可理解为卫星降水数据, 观测场为雨量计数据, 对应格点上的降水分析值A_k等于该点的初估场F_k加上该点观测值与初估值的偏差, 这个偏差由一定范围内n个格点上已知的观测值O_i与初估值F_i的偏差加权估计得到, 具体计算公式如下

$$A_k = F_k + \sum_{i=1}^{n} w_i (O_i - F_i) \tag{1}$$

其中, k为待分析格点, i为待分析格点中的“有效”格点, w_i为权重, 表示第i点上的观测值与初估值的偏差在估计时分配的权重; 同时, 分析格点上的误差方差见式 (2), 其中T_k为k点上的真值。

$$E^2 = \overline{(A_k - T_k)^2} \tag{2}$$

最优插值中, 假设观测误差和初估场误差不相关, 如式 (3)

$$\overline{(O_i - T_i)(F_j - T_j)} = 0 \tag{3}$$

将式 (1) 带入式 (2), 则分析误差方差可化为式 (4), 其中$(\delta_k^f)^2$为初估场误差方差, $\tau_{ij}^f = \overline{(F_i - T_i)(F_j - T_j)}$, $\tau_{ij}^o = \overline{(O_i - T_i)(O_j - T_j)}$, 分别表示初估场误差协方差和观测误差协方差。

$$E^2 = (\delta_k^f)^2 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_i w_j(\tau_{ij}^f + \tau_{ij}^o) - 2\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \tau_{ik}^f\right) \tag{4}$$

针对式 (4), 利用最小二乘法构建线性方程式 (5), 其中μ_{ij}^f表示初估场误差协相关, μ_{ij}^o表示观测误差协相关, λ_i为点i上观测误差标准偏差δ_i^o和初估误差标准偏差δ_i^f的比率, 通过求解式 (5) 确定权重w_i, 最后得到分析误差的最小方差估计, 如式 (6)

$$\sum_{j=1}^{n}(\mu_{ij}^f + \mu_{ij}^o \lambda_i \lambda_j) w_j = \mu_{ki}^f (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{5}$$

$$E_{\min}^2 = \left(\delta_k^f\right)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^{n} w_i \tau_{ik}^f\right) \tag{6}$$

其中, δ_i^o、μ_{ij}^o、δ_i^f和μ_{ij}^f均需为已知量, 需要对雨量计和卫星降水数据的误差及误差的相关性进行预先估计来给定, 可参考潘旸等 (2012) 来计算这些参数 。

需要注意, 使用 OI 方法校正原始数据需要用到数量较多的站点数据, 本次研究共有 19 个站点, 从中挑选 10 个来进行 OI 校正, 剩余 9 个作为独立量用来验证融合精度, 因此只能简化 OI 算法。设定校正和验证站点时, 首先考虑两类站点尽量不连续, 其次是在研究范围上尽量做到均匀分布; 对康定和泸定这样日常降水较多的区域, 设定一个为校正、一个为验证数据; 对甘孜和雅江这类区域既有高山峡谷, 又有草原的区域同样一个为校正, 一个为验证数据 (图 1)。研究在计算中, 设定w_i为反距离加权权重, 设定站点影响范围为 100 km (潘旸等, 2012; 李林等, 2021), 在以上步骤基础上得到校正后的 GPM 降水数据。需要注意, 这是一种简化版的方法, 可有效提升雨量计周边一定范围内卫星降水数据的质量, 但和雨量计距离较远的地区, 卫星降水数据结果仍占主导作用。

1.3.2 降尺度模型的建立

地理加权回归 (GWR) 最初被用来计算犯罪率与酒吧、商场等变量的局部回归系数, 以预测未来可能的犯罪地和犯罪率(Cahill and Mulligan, 2007)。这一方法的理论与降尺度融合方法的理论高度契合, 因此被引入到了降水等降尺度融合研究中。GWR 计算公式如下

$$P_j = \beta_0(\mu_j, \upsilon_j) + \sum_{i=1}^{n} \beta_i(\mu_j, \upsilon_j) X_{ij} + \varepsilon_j \tag{7}$$

其中P_j代表的是点j处的卫星降水值, $\beta_0(\mu_j, \upsilon_j)$代表$(\mu_j, \upsilon_j)$点处的回归常数, $\beta_i(\mu_j, \upsilon_j)$为点$(\mu_j, \upsilon_j)$处的回归系数, X_{ij}代表(μ_j, υ_j)点处的自变量, 本次研究中分别为 NDVI 和 DEM, ε_j为回归残差, n为自变量个数, i为第i个自变量。研究设定以下步骤来完成 GWR 融合: (1) 在 MATLAB 中, 利用双线性插值的方法将 NDVI 和 DEM 重采样到 0.1°×0.1°; (2) 通过 GWR 模型, 建立经过 OI 校正后的 GPM 降水数据与 NDVI 和 DEM 的回归模型, 计算得到 0.1°×0.1°分辨率下的回归系数、回归常数和残差; (3) 将回归系数、回归常数和残差插值到 1 km×1 km, 再代回式 (7), 得到融合降尺度后的卫星降水数据 (温伯清等, 2021; 谢劭峰等, 2021; Shen et al., 2022)。

需要注意, NDVI 和降水之间往往存在时滞性问题, 即当前的发生的降水, 需要一段时间后的 NDVI 才能与之对应, 但这种对应的时间间隔往往在月尺度以下 (胡实等, 2020), 若是在夏季或秋季, 当月的降水即可与当月的 NDVI 对应, 本次研究时段是每年的 5—8 月, 是甘孜州的多雨季, 因此 NDVI 选用的也是当月的数据; 其次, 利用 GWR 方法进行降水降尺度融合, 最后是否需要进行残差修正一直是相关研究讨论的重点, 目前来看是不同地区有不同的结果, 因此研究也将分别计算有残差修正的降水数据和无残差修正的降水数据, 通过对比来确定甘孜地区是否有进行残差修正的必要。

1.3.3 降尺度效果验证方法

研究拟选用三个指标来评估降尺度融合效果, 分别是均方根误差 RMSE (记为 E_{RMS}), 相对偏差 RB(记为 R_{B}) 和相关系数 CC (记为 C_{C})。其中x_i代表第i点上的卫星降水值, $\bar{x}$代表卫星降水均值, y_i代表i点上雨量计观测值, $\bar{y}$为雨量计均值。其中, RMSE 用于评估卫星降水数据与实测降水数据的差异程度, 值越小, 表明与雨量计结果越接近; RB 代表卫星降水与雨量计的正负偏差程度, 值越大, 偏差越大; CC 代表卫星降水数据与雨量计降水数据的相关程度, 值越大, 相关性越高 (胡实等, 2020)。

$$E_{\mathrm{RMS}(i)} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{8}$$

$$R_{\mathrm{B}(i)} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i - y_i}{y_i} \times 100\% \tag{9}$$

$$C_{C(i)}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{10}$$

2 结果与分析

2.1 GPM 降水数据订正结果

为验证 GPM 降水、OIGPM 降水的精度，根据经纬度距离挑选与雨量计最近像元点上的 GPM 降水、OIGPM 降水值，计算两者与雨量计降水的均方根误差、偏差和相关系数结果，结果如图 2。从中可见，OIGPM 降水的均方根误差显著低于 GPM 降水。统计结果表明，GPM 降水的均方根误差范围在 33.13~175 mm 之间，平均为 97.92 mm，OIGPM 降水的均方根误差在 13.35~160 mm 之间，平均为 52.43 mm，下降了 45.49 mm，说明经过校正，卫星降水数据质量得到了提升。从图 2b 可见，GPM 降水数据的相对偏差基本均为负值，研究时段内相对偏差均值达到 79.45%，说明 GPM 降水对真实降水存在明显低估，而以往研究显示 GPM 卫星通常对低降水量存在低估，对高降水量存在高估 (陈汉清等，2019；杜懿等，2021；施丽娟等，2022；刘洁等，2023)，相对偏差显示的结果与以往研究结论相差较大，这可能和甘孜地区独特的地形和气候条件有关；OIGPM 降水在研究时段内的相对偏差均值达到 72.76%，对降水有着明显的高估，虽然与以往研究结果存在契合，但量级明显偏高；但需要看到，OIGPM 降水相对偏差曲线起伏较大，2014 年 6 月、2019 年 5 月和 6 月以及 2020 年 6 月相对偏差显著高于其他月份，若将这几个月去除，则剩余 36 个月的相对偏差只有 45.29%，表明 OIGPM 降水在少数月份对降水存在明显的高估，但在长时间序列上，高估的量级并不大。从相关系数看，校正前后相关系数较为接近，两者平均相关系数分别为 0.52 与 0.56，OIGPM 降水相关系数略高于 GPM 降水，且整体呈较强相关关系；除 2016、2019 和 2022 年外，其余年份的相关系数均为正值，在 2019 年 8 月两者相关系数均达到最低值，分别为−0.72 和−0.49；10 年间 40 个月相关系数大于 0.6 的月份两者分别为 21 和 20 个月，大于 0.5 的月份分别有 23 和 26 个月，总体表明校正后数据与雨量计数据相关性更高。

为进一步验证以上曲线中较大波动的现象是否与降水量存在关系，图 3 给出了雨量计、GPM 和 OIGPM 每月总降水量直方图。从图中可见，GPM 降水量基本均低于雨量计降水量，而 OIGPM 则往往高估降水量，结合图 2b，需要注意在相对偏差较高的月份如 2014 年 6 月、2019 年 5 月和 6 月以及 2020 年 6 月，除 2014 年 6 月，其他月份的总降水量并不高，这也说明当降水量较低时，或许也会存在较大的高估现象，这可能和研究区为高原地带存在一定联系，还可能与验证站点数量较少有关。

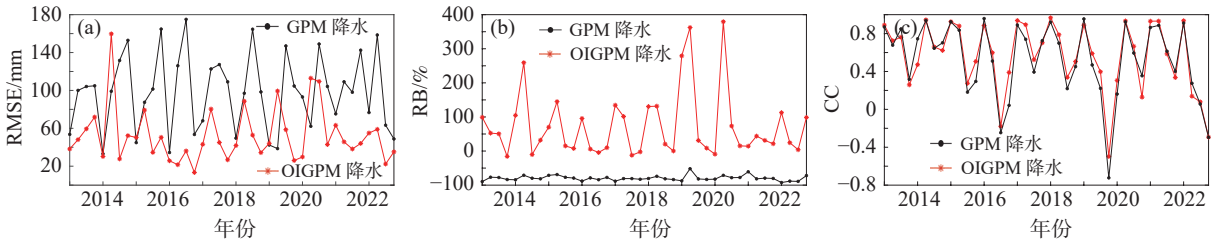


图 2 2013—2022 年甘孜州 GPM、OIGPM 降水与雨量计的均方根误差 RMSE (a)、相对偏差 RB (b) 及相关系数 CC (c) 时序图

Fig. 2 (a) RMSE, (b) RB and (c) CC time series diagrams of GPM, OIGPM precipitation and rain gauges in Ganzi prefecture from 2013 to 2022

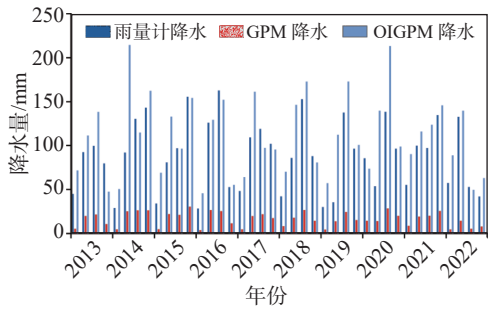


图 3 2013—2022 年甘孜州研究时段内雨量计、GPM 与 OIGPM 降水量直方图

Fig. 3 Rainfall histograms of rain gauges, GPM, and OIGPM during the study period in Ganzi prefecture from 2013 to 2022

除时序图外，空间上 OIGPM 降水的分布也与雨量计更接近，同时降水细节上也更加丰富。以 2016 年 8 月为例，图 4 为雨量计降水、GPM 降水和 OIGPM 降水的空间分布图。从图中可见，OIGPM 与雨量计降水空间分布非常相似，前者能准确反映甘孜南部和石渠地区的降水量高值，同样能反映丹巴地区的降水低值，其余地区的分布也较为类似。GPM 降水 (图 4b) 虽然也能反映石渠地区和甘孜南部的降水分布，但量级明显偏低，同时对其他地区的降水也存在显著低估的现象。因此，相比于原始 GPM 降水，OIGPM 降水与实测降水更为接近。

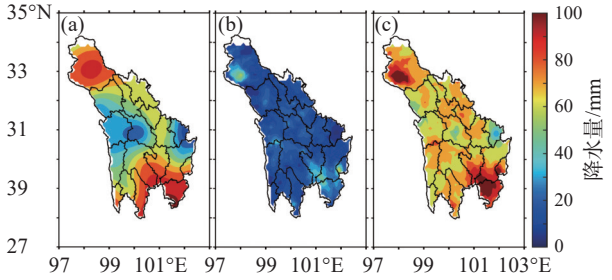


图 4 2016 年 8 月甘孜州雨量计降水 (a)、GPM 降水 (b) 和 OIGPM 降水 (c) 空间分布

Fig. 4 (a) Rainfall gauge, (b) GPM precipitation and (c) OIGPM precipitation spatial distribution map in Ganzi prefecture in August 2016

2.2 GWR 降尺度结果的精度检验

2.2.1 空间分辨效果评估

考虑到降水数据较多, 研究给出每月 GPM 降水、GWR 降尺度残差修正后的 OIGPM 降水 (以下称 RC-GOIGPM) 和无残差修正的 OIGPM 降水 (以下称 GOIGPM 降水) 的平均空间分布图 (图 5)。从图中可见, 经过了 NDVI 和高程数据的调节, 无论是 RC-GOIGPM 还是 GOIGPM, 其空间细节均更加完整, 降水信息也更加精细, 原图粗糙的分辨率得以改善。从图中还可以看到, 甘孜南部的九龙、泸定和康定等地区降水量更加充沛, 这与这些地区海拔相对较低, 且处于迎风坡存在一定联系。以上现象也说明, 降尺度数据可以反应真实降水的空间分布情况和特征, 并实现了空间分辨率的提升。

2.2.2 精度验证

为分析甘孜地区的 GWR 融合降尺度降水数据是否需要残差修正, 图 6 给出了 RC-GOIGPM 降水与 GOIGPM 降水与雨量计的均方根误差、相对偏差和相关系数时间序列图。相比于图 2, 可以明显看到三个参数得到了显著提升。整体而言, RC-GOIGPM 降水和 GOIGPM 降水的均方根误差有相似的时间序列形态, 前者曲线略高于后者, 均方根误差的均值显示, RC-GOIGPM 均值为 45.52 mm, GOIGPM 为 44.74 mm, 前者略高于后者, 但 RC-GOIGPM 的波动范围在 16~123 mm 之间, 而 GOIGPM 则在 15~105 mm 之间, 前者稳定性较差, 但相较于只经过 OI 插值的 OIGPM 降水, GWR 模型不但做到了空间分辨率的提升, 还做到了精度上的提升, 考虑到降尺度后数据的空间分辨率比降尺度前提高了 10 倍左

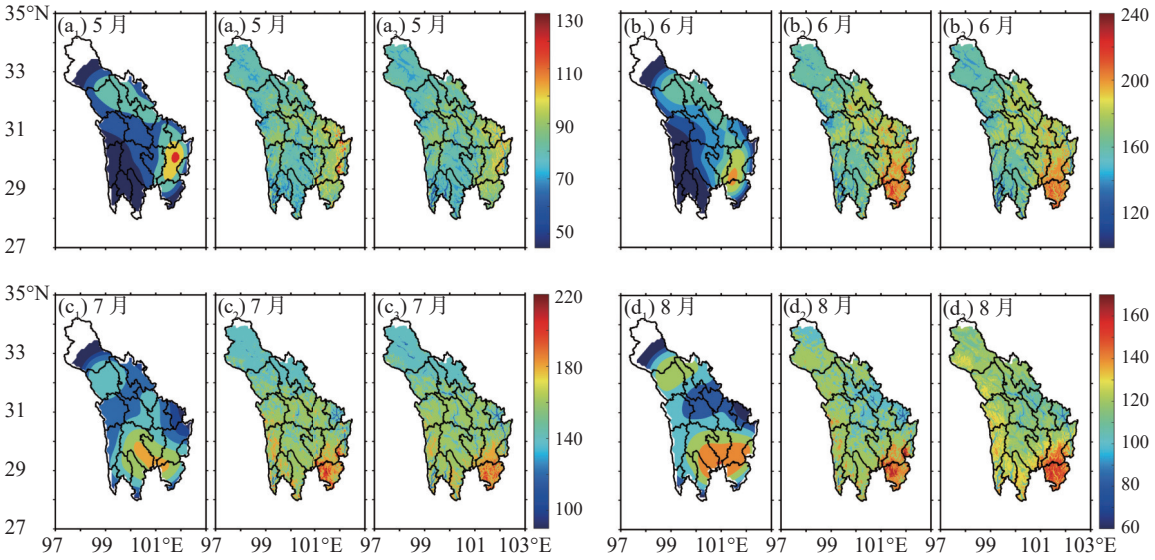


图 5 甘孜州 2013—2022 年 5—8 月 GPM (a_1—d_1)、RC-GOIGPM (a_2—d_2)、GOIGPM (a_3—d_3) 逐月平均降水量 (单位: mm) 分布

Fig. 5 Monthly average precipitation of (a_1—d_1) GPM, (a_2—d_2) RC-GOIGPM and (a_3—d_3) GOIGPM in Ganzi prefecture from (a—d) May to August during 2013–2022

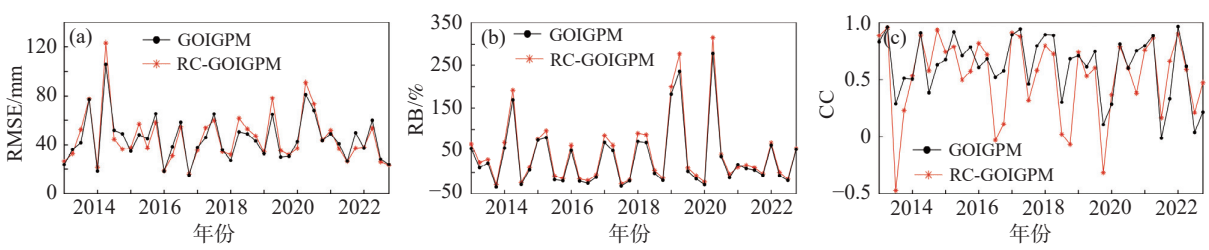


图 6 2013—2022 年甘孜州 GOIGPM、RC-GOIGPM 降水与雨量计的 RMSE (a)、RB (b) 及 CC (c) 时序图

Fig. 6 (a) RMSE, (b) RB and (c) CC time series diagrams of GOIGPM, RC-GOIGPM precipitation and rain gauges in Ganzi prefecture from 2013 to 2022

右 (0.1°到 1 km), 且挑选的是距离雨量计最近像元点的降水值, 这一结果也是较为理想的。从相对偏差看 (图 6b), 两者相对偏差差异较小, RC-GOIGPM 的相对偏差均值为 43.88%, GOIGPM 的相对偏差均值为 34.31%, 与 OIGPM 相比, 相对偏差均有降低, 若在 40 个月中去除掉相对偏差超过 150% 的 3 次, 两者的 RB 分别为 21.45% 和 14.07%, 这在月尺度降水研究中是非常低的值, 也说明了融合降尺度方法在多数情况下可有效降低偏差, 但在某些时候, 仍可能存在较大误差, 但这种几率相对偏低。相关系数上, RC-GOIGPM 和 GOIGPM 的曲线形态尽管接近, 但数值上前者在多数时候均低于后者, RC-GOIGPM 的相关系数均值为 0.53, 而 GOIGPM 则为 0.62, RC-GOIGPM 有 4 个月的相关系数小于 0, 并在 2013 年 7 月接近了−0.50, GOIGPM 则只有 1 个月小于 0; RC-GOIGPM 相关系数分别有 26 个月和 19 个月大于 0.50 和 0.60, GOIGPM 则是 30 和 26 个月。从以上系数的计算结果看, 经过 GWR 降尺度, 无残差修正的降水数据与雨量计数据更加接近。

为进一步比较降尺度降水的精度, 研究给出了每月所有 GOIGPM 降水和 RC-GOIGPM 降水与雨量计数据的 Taylor 图和散点密度图(图 7)。Taylor 图结果显示, GOIGPM 比 RC-GOIGPM 有着更高的相关系数及更低的均方根误差。散点密度图结果则表明, 降水较为集中在 0~150 mm 之间, 但两种数据均对真实降水存在一定的高估, 这可能和 OIGPM 中引入了站点数据及 GPM 提升了对微量降水的探测能力有关, 如高原地区存在微量降水未落地即蒸发的情况, 但卫星却将其记为真实存在的降水事件, 或尽管是 5—8 月, 高原地区仍常有降雪事件, 使得卫星高估了降水量。尽管存在这些情况, GOIGPM 的参数仍优于 RC-GOIGPM, 再次表明甘孜地区更适合不经过残差修正的结果。

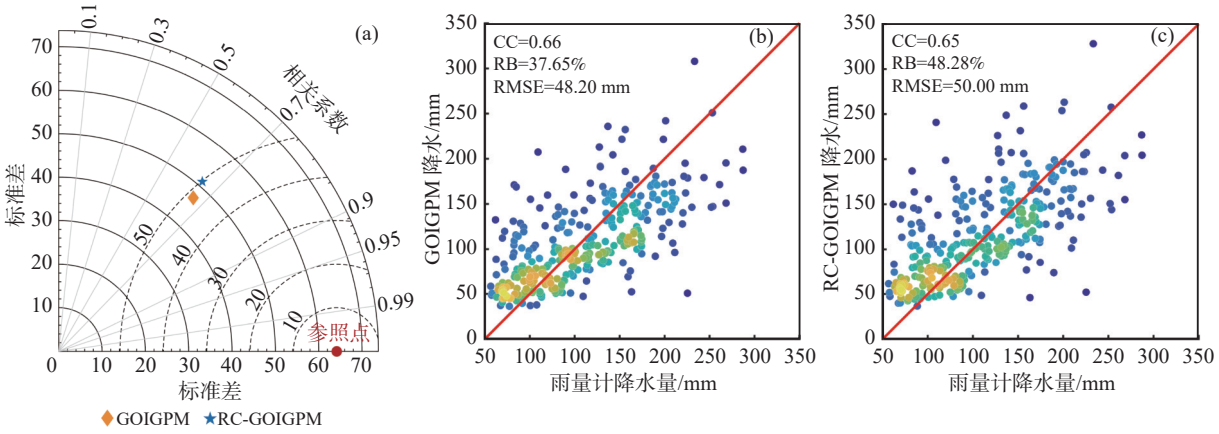


图 7 甘孜州 GOIGPM 降水、RC-GOIGPM 降水与雨量计降水量的 Taylor 图 (a) 及散点密度图 (b、c)

Fig. 7 The Taylor plots of GOIGPM, RC-GOIGPM with rain gauges (a), and the scatter density plots of (b) GOIGPM, (c) RC-GOIGPM with rain gauges in Ganzi prefecture

3 结论与讨论

本文利用 GPM 降水数据、雨量计降水数据和 NDVI 及 DEM 数据, 在甘孜地区开展了卫星降水数据降尺度研究。首先使用雨量计数据, 根据最优插值法对 GPM 数据进行了修正; 再结合 NDVI 和 DEM 数据, 利用 GWR 方法对修正后的数据进行降尺度处理, 将原始 0.1°×0.1°的数据降尺度到了 1 km×1 km, 同时选用多个参数对降尺度前、后的数据质量进行评估, 得到如下主要结论:

(1) 经过最优插值法校正的 GPM 数据 (OIGPM) 可更准确反映降水的空间分布特征; 能够显著降低 GPM 数据的均方根误差, 平均量达到 45.49 mm; OIGPM 能改善 GPM 数据普遍低估降水量的现象, 尽管 OIGPM 对真实降水存在高估, 但量级并不大; 此外, OIGPM 与雨量计降水的相关系数也高于 GPM 数据。

(2) 经过降尺度后的 RC-GOIGPM 和 GOIGPM 数据能显著提升 GPM 数据的空间分辨率, 能更好反映降水在空间上的细节, 也能很好体现降水丰沛区域的降水情况。

(3) GOIGPM 降水数据能更好反映甘孜地区的真实降水情况。尽管 GOIGPM 与 RC-GOIGPM 均对真实降水存在的一定的高估, 但均方根误差的大小和波动范围、相对偏差及相关系数均显示, 甘孜地区更适合使用未经过残差修正的 OIGPM 降尺度结果。

无论从空间或时间序列角度看, 本次研究的结果均较为理想, 可为甘孜地区获取高分辨率降水数据提供新的参考。同时, 本次研究所用的站点数据量较少, 分别要将其拆分到最优插值和精度验证中,

这或许会给最后的结果带来一定影响。如图 4 中，白玉地区的数据用于验证，最优插值后的结果就不能很好刻画这一区域的降水情况；对于九龙、泸定、康定等地区，最优插值结果和雨量计类似，一方面可能和这一区域降水量较多有关，另一方面或许也和这一区域 3 个雨量计有 2 个用于最优插值相关；此外，雅江、丹巴等地的最优插值结果显示，雅江作为校正站点能较好记录降水情况，而未用作校正的丹巴地区，也和雨量计结果类似，考虑到两地地形以高山峡谷为主，雨量计监测范围有限，则说明区域降水结果或多来自原始 GPM 数据，也表明 GPM 同样具有记录降水的能力；对其他区域，如道孚、炉霍、色达等，最优插值前后区域降水均较为均匀，这可能和区域多为高海拔的草原，地形较为平整相关。下一步应尝试把融合降尺度结果放到业务中进行检验，在实践中改善融合方法，以得到更好的效果。

参考文献 (References):

陈汉清,鹿德凯,周泽慧,等.2019. GPM 降水产品评估研究综述[J].水资源保护,35(1):27−34. Chen H Q, Lu D K, Zhou Z H, et al. 2019. An overview of assessments on Global Precipitation Measurement (GPM) precipitation products [J]. Water Resources Protection, 35(1):27−34 (in Chinese). doi:10.3880/j.issn.1004−6933.2019.01.006

杜懿,王大洋,张智,等.2021. GPM IMERG 降水产品在珠江流域的适用性分析[J].水文,41(6):1−6. Du Y, Wang D Y, Zhang Z, et al. 2021. Applicability of GPM IMERG satellite precipitation product in pearl river basin [J]. Journal of China Hydrology,41(6):1−6 (in Chinese). doi:10.19797/j.cnki.1000−0852.20200318

傅云飞,罗晶,罗双,等.2022. GPM 卫星 DPR 和 GMI 探测的 2018 年 5 月重庆超级单体云团降水结构特征分析[J].暴雨灾害,41(1):1−14. Fu Y F, Luo J, Luo S, et al. 2022. Rainstorm structure of a supercell cloud occurred in Chongqing in May 2018 measured by GPM DPR and GMI [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):1−14 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.001

胡实,韩建,占车生,等.2020.太行山区遥感卫星反演降雨产品降尺度研究[J].地理研究,39(7):1680−1690. Hu S, Han J, Zhan C S, et al. 2020. Spatial downscaling of remotely sensed precipitation in Taihang Mountains [J]. Geographical Research,39(7):1680−1690 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj020190545

韩焱红,郜静静,苗蕾,等.2019.基于最优插值的雷达定量降水估测订正及应用—以广元市为例[J].高原山地气象研究,39(3):82−85,96. Han Y H, Gao J J, Miao L, et al. 2019. Correction for radar-derived quantitation precipitation estimation based on the optimum interpolation and Its application-taking Guangyuan as an example [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,39(3):82−85,96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2019.03.013

刘洁,黄本胜,陈晓宏,等.2023. GPM 遥感降水产品在广东省的极端降水事件适用性分析[J].南水北调与水利科技 (中英文),21(1):87−94. Liu J, Huang B S, Chen X H, et al. 2023. Applicability analysis of GPM remote sensing precipitation products in extreme precipitation events in Guangdong province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,21(1):87−94 (in Chinese). doi:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0010

李林,张鹏亮,申红艳,等.2021.三江源地区水汽输送的时空变化特征及其机理研究[J].高原山地气象研究,41(1):9−16. Li L, Zhang P L, Shen H Y, et al. 2021. Spatial and temporal variation characteristics and mechanism of water vapor transport over the three rivers source region [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,41(1):9−16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2021.01.002

林书睿,顾恒竹,路明月.2022.基于 GWR 模型的典型区域 GPM 数据降尺度研究——以浙江省为例[J].气象科学,42(6):793−803. Lin S R, Gu H Z, Lu M Y. 2022. Downscaling research of GPM data in typical region based on GWR model: a case study of Zhejiang province [J]. Journal of the Meteorologica,42(6):793−803 (in Chinese). doi:10.12306/2022jms.0003

李炎坤,高黎明,张乐乐,等.2022.青海湖流域及周边区域 TRMM 3B43 降水数据降尺度方法对比分析[J].干旱区研究,39(6):1706−1716. Li Y K, Gao L M, Zhang L, et al. 2022. Comparison of downscaling methods for TRMM 3B43 precipitation data in the Qinghai Lake basin and its surrounding areas [J]. Arid Zone Research,39(6):1706−1716 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2022.06.02

潘旸,沈艳,宇婧婧,等.2012.基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J].气象学报,70(6):1381−1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(6):1381−1389 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.116

曲学斌,付亚男,袁秀芝,等.2020. GPM-IMERG 日降水数据在内蒙古地区的适用性分析[J].暴雨灾害,39(3):293−299. Qu X B, Fu Y N, Yuan X Z, et al. 2020. Applicability analysis of GPM-IMERG daily precipitate on data in Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):293−299 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.03.010

史岚,何其全,杨娇,等.2019.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,21(10):1642−1652. Shi L, He Q Q, Yang J, et al. 2019. Downscaling modeling of the GPM IMERG precipitation product and comparative analysis in the Fujian-Zhejiang-Jiangxi region [J]. Journal of Geo-information Science, 21(10):1642−1652 (in Chinese). doi:10.12082/dqxxkx.2019.180603

施丽娟,冯婉悦,雷勇,等.2022. GPM 日降水产品在中国大陆的准确性评估[J].气象,48(11):1428−1438. Shi L J, Feng W Y, Lei Y, et al. 2022. Accuracy evaluation of daily GPM precipitation product over Mainland China [J]. Meteorological Monthly,48(11):1428−1438 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.091601

盛夏,石玉立,丁海勇.2021.青藏高原 GPM 降水数据空间降尺度研究[J].遥感技术与应用,36(3):571−580. Sheng X, Shi Y L, Ding H Y. 2021. Spatial downscaling of GPM precipitation over the Tibetan plateau [J]. Remote Sensing Technology and Application,36(3):571−580 (in Chinese). doi:10.11873/j.issn.1004−0323.2021.3.0571

温伯清,刘戎,庞国伟,等.2021. GPM 卫星降水数据的降尺度研究——以陕西省为例[J].干旱区地理,44(3):786−795. Wen B Q, Liu R, Pang G W, et al. 2021. Downscaling study of GPM satellite precipitation data: A case study of Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography,44(3):786−795 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000−6060.2021.03.21

魏鸣. 2023. 灾害性对流天气的双偏振多普勒雷达监测与机理研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Wei M. 2023. Severe convective weather monitoring and analysis of the mechanisms with Dual-polarization doppler weather radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Information and Technology

吴琼,仰美霖,窦芳丽.2017. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析[J].气象,43(3):348−353. Wu Q, Yang M L, Dou F L. 2017. Study of GPM dual frequency radar in detecting snow [J]. Meteorological Monthly,43(3):348−353 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.03.011

王庆莉,韩玉江,郭斌,等.2019.近 57 年甘孜州气候干湿状况的时空演变[J]. 中国农业气象,40(7):435−443. Wang Q L, Han Y J, Guo B, et al. 2019. Temporal and spatial evolution of climate dry and wet conditions in Ganzi in the past 57 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,40(7):435−443. (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−6362.2019.07.003

王智敏,施丽娟,汪会,等.2022.基于 GPM/DPR 数据的北疆地区降雪云宏观结构和微物理特征分析[J].气象,48(9):1140−1152. Wang Z M, Shi L J, Wang H, et al. 2022. Analysis of macro structure and microphysical characteristics of snow clouds in Northern Xinjiang based on GPM/DPR Data [J]. Meteorological Monthly,48(9):1140−1152 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.051602

杨荣芳,杨彬云,康晓甫.2022. TRMM 卫星降水数据在商洛地区的精度分析及订正[J].沙漠与绿洲气象,16(3):62−67. Yang R F, Yang B Y, Kang X F. 2022. Accuracy analysis and correction of TRMM precipitation data in Shangluo area [J]. Desert and Oasis Meteorology, 16(3):62−67 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.03.010

谢劭峰,魏朋志,黄良珂,等.2021.基于地理加权回归张力样条函数的广西 PM2.5 浓度插值[J].科学技术与工程,21(21):8807−8813. Xie S F, Wei P Z, Huang L K, et al. 2021. Regional PM2.5 concentration interpolation based on GWR-TSF [J]. Science Technology and Engineering,21(21):8807−8813 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−1815.2021.21.011

张羿祺,傅云飞.2018. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J].大气科学,42(1):33−51. Zhang A Q, Fu Y F. 2018. The structural characteristics of precipitation cases detected by Dual-Frequency radar of GPM satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(1):33−51 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1705.16220

Cahill M, Mulligan G. 2007. Using geographically weighted regression to explore local crime patterns [J]. Social Science Computer Review, 25(2):174−193. doi:10.1177/0894439307298925

Immerzeel W W, Rutten M M, Droogers P. 2009. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula [J]. Remote Sensing of Environment,113(2):362−370. doi:10.1016/j.rse.2008.10.004

Kamarianakis Y, Feidas H, Kokolatos G, et al. 2008. Evaluating remotely sensed rainfall estimates using nonlinear mixed models and geographically weighted regression [J]. Environmental Modelling and Software,23(12):1438−1447. doi:10.1016/j.envsoft.2008.04.007

Lu X, Tang G, Wang X, et al. 2020. The development of a Two-Step merging and downscaling method for satellite precipitation products [J]. Remote Sensing,12(398):1−22. doi:10.3390/rs12030398

Shen J, Liu P, Xia J, et al. 2022. Merging multisatellite and gauge precipitation based on geographically weighted regression and Long Short-Term Memory Network [J]. Remote Sensing,14(3939):1−20. doi:10.3390/rs14163939

Sheng S, Chen H, Lin K, et al. 2023. An integrated framework for spatiotemporally merging multi-sources precipitation based on F-SVD and ConvLSTM [J]. Remote Sensing,15(3135):1−19. doi:10.3390/rs15123135

Zhang W, Liu D, Zheng S, et al. 2020. Regional precipitation model based on Geographically and Temporally Weighted Regression Kriging [J]. Remote Sensing,12(2547):1−19. doi:10.3390/rs12162547

(责任编辑 闵爱荣)