

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建

作者：张唯，吉宸佳，李文凯，孙晓娜，梁天欣，韩松洁，卫鸿飞

DOI：10.13203/j.whugis20230013

收稿日期：2023-09-25

网络首发日期：2024-05-15

引用格式：张唯，吉宸佳，李文凯，孙晓娜，梁天欣，韩松洁，卫鸿飞. 降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230013>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

Doi: 10.13203/j.whugis20230013

引用格式:

张唯, 吉宸佳, 李文凯, 等. 降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20230013. (Zhang Wei, Ji Chenjia, Li Wenkai, et al. Spatial Super-Resolution Reconstruction of Remote Sensing Precipitation Products Using Generative Adversarial Network by Multi-Source Fused Precipitation Data Features[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20230013.)

降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建

张唯¹ 吉宸佳¹ 李文凯^{2,1} 孙晓娜¹ 梁天欣¹ 韩松洁¹ 卫鸿飞¹

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉, 430074

2 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉, 430061

摘要: 高分辨率降水资料是研究区域尺度水和能量循环的重要基础数据之一, 但现有降水产品的空间分辨率尚无法满足区域精细化研究的需要。本文充分利用全国智能网格实况分析产品中的降水融合数据(CMPA)的高空间分辨率(5 km)特征, 构建基于生成对抗神经网络的两倍超分辨率重建模型, 分别应用于IMERG(The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)日降水数据和ERA5(The fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis)日降水再分析资料的空间降尺度, 得到高分辨率的IMERG日降水产品(0.05°)和ERA5日降水产品(0.125°), 并使用实测气象站点数据对降尺度后的两种数据进行精度评价。结果表明:(1)基于CMPA的超分辨率重建模型能够用于其他降水产品的空间降尺度。重建后的IMERG和ERA5产品的各项精度指标均有不同程度的提升。(2)模型能够有效保留CMPA数据的基本数据特征。重建后的IMERG产品和ERA5产品在相似性、命中率和偏差方面都更贴合CMPA数据, 整体准确性更高。(3)模型重建效果受原始数据的空间分辨率、精度以及与CMPA数据的相关性等因素的影响。原始空间分辨率和精度越高, 与训练数据集的相关性越好, 降尺度效果也更佳。因而, IMERG产品上的应用效果明显优于ERA5产品。(4)本文构建的GAN模型在IMERG日降水数据上的适用性优于MF和RF模型, 细节重建效果更好。相较于原始的IMERG数据, GAN重建后的日降水在年、季、月三个时间维度上的精度统计结果大多有所改善, 模型稳定性较强。

关键词: 生成对抗网络; 超分辨率重建; CMPA; IMERG; ERA5; 降水空间降尺度

Spatial Super-Resolution Reconstruction of Remote Sensing Precipitation Products Using Generative Adversarial Network by Multi-Source Fused Precipitation Data Features

Zhang Wei¹ Ji Chenjia¹ Li Wenkai^{2,1} Sun Xiaona¹ Liang Tianxin¹ Han Songjie¹ Wei Hongfei¹

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430061, China

收稿日期: 2023-09-25

项目资助: 国家自然科学基金(41501584); 湖北省重点研发计划(2022BCA080)。

第一作者: 张唯, 博士, 副教授, 主要从事地理信息科学相关研究。weizhang@cug.edu.cn

Abstract: Objectives: High-resolution precipitation data is one of the important basic data for studying water and energy cycles at regional scales, but the spatial resolution of existing precipitation products cannot yet meet the needs of regional refinement studies. **Methods:** This paper makes full use of the high spatial resolution (5 km) feature of the fused precipitation data (CMPA) from the National Intelligent Grid Live Analysis product to construct a two sets of super-resolution reconstruction model based on Generative Adversarial Networks, which is applied to the spatial downscaling of the IMERG (The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) daily precipitation data and ERA5 (The fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis) daily precipitation reanalysis data, respectively. The final high-resolution IMERG daily precipitation product (0.05°) and ERA5 daily precipitation product (0.125°) were obtained and the accuracy of both downscaled data was evaluated using measured meteorological station data. **Results:** The results show that (1) The super-resolution reconstruction model based on CMPA data can be used for spatial downscaling of other precipitation products. The reconstructed IMERG products and ERA5 products show different degrees of improvement in all accuracy indicators. (2) The model is able to effectively retain the essential data characteristics of the CMPA data. The reconstructed IMERG product and ERA5 product are more closely matched to the CMPA data in terms of CC, POD and Bias, with higher overall accuracy. (3) The effect of model reconstruction is influenced by the spatial resolution and accuracy of the original data, as well as the correlation between the original data and the CMPA data. The higher the spatial resolution and accuracy of the raw data, the better the correlation between the raw data and the training data set, and the better the downscaling effect. As a result, the application on the IMERG product is significantly better than the EAR5 product. (4) The GAN model constructed in this paper outperforms the MF and RF models in terms of applicability to IMERG daily precipitation data, and its detailed reconstruction is better. Compared with the original IMERG data, the accuracy statistics of the GAN reconstructed daily precipitation in the three time dimensions of year, season and month are mostly improved, which indicates better model stability. **Conclusions:** Therefore, the GAN model constructed in this paper is able to provide a more refined precipitation distribution and is of some research value.

Key words: GAN; Super-Resolution Reconstruction; CMPA; IMERG; ERA5; Precipitation Spatial Downscaling

降水是研究气候变化和水文模拟的重要气象要素中之一，具有复杂的时空异质性，已经广泛应用于农业、海洋、生态、地质、大气环境等各行各业^{[1][2]}。高精度的降水空间分布是准确理解区域水文空间模拟和气候变化过程的关键因素，对于促进高质量的全球气象分析如洪水预报、极端气候预警等具有重要意义^[3]。因此，提高降水空间分布的分辨率已经成为气象、测绘、水文等领域的重点研究问题。目前，降雨量的空间估算方式主要包括地面站（如雨量计）插值、气象雷达、卫星遥感、大气再分析以及多源数据融合等^{[4][5][6]}。传统的降雨量估计（地面站插值和气象雷达）虽能较为真实地记录区域降水情况，但此测量方式受观测密度、间距、观测环境以及仪器设备等诸多因素限制，无法保证一些偏远山区能够获得准确的降水数据，在实际应用中面临着一些问题与挑战^[7]。现阶段，随着遥感卫星技术的发展，利用遥感卫星获取降水产品已成为降水观测的主要方式，能够提供覆盖面更广，普适性更强的气象降水资料^[8]。目前，已有许多卫星获取的降水资料广泛应用于气象遥感分析研究，如CMORPH（Climate Prediction Center morphing technique）^[9]，TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）^[10]，GPCP（Global Precipitation Climatology Project）^[11]，GPM（Global Precipitation Measurement）^[12]。然而，单一卫星反演降雨数据的误差特征和影响因素极其复

杂, 仍然难以直接应用于气象和水文实践^[7]。因此, 对历史观测资料、数值模式预报输出、卫星、地面等观测产品进行同化分析处理的再分析降水资料应运而生^[13]。但目前的区域水文分析已经对降水产品的精度提出了更高的要求。因此, 为了准确获取区域局部细节降水特征, 提高降水资料的空间分辨率就显得十分必要。

为此, 国内外已有诸多学者开展降水降尺度方面的研究。降尺度, 即为提高原始降水产品的分辨率, 或由大范围区域特征来推演局部细节降水特征。目前降尺度方式包括两大类: 动力降尺度和统计降尺度^[14]。动力降尺度能够保留物理过程, 但繁杂的计算量限制了其发展进程^[15]。然而, 统计降尺度凭借着其计算量小、方法灵活、开发相对简单等特点已经广泛应用于遥感降水数据降尺度研究中^[14]。Chen 等^[16]和 Wang 等^[17]考虑到降水和环境变量之间的关系随位置变化而变化, 将地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)应用于小尺度卫星降水数据。结果表明, GWR 提高了降水量空间估计的准确性。Zhan 等^[18]基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)分别构建地理加权回归模型和多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)模型, 将 GPM 年、月降水数据的空间分辨率提高至 1km。随着机器学习的快速发展, 随机森林(Random Forest, RF)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等机器学习回归模型在降尺度方面也产生了良好的效果。MA 等^[19]利用随机森林回归模型分别对 IMERG 和 TRMM 年降水数据进行降尺度, 分析得到 RF 在 IMERG 降水降尺度方面具有更好的效果。近年来, 有学者研究发现降尺度技术和图像超分辨率存在相似之处^[20]。Jiang 等^[21]构建卷积神经网络模型, 将 ERA5 再分析降水数据的空间分辨率提高至 0.0333°。随着计算机性能的大幅提高, 基于深度学习的超分辨率重建方法在高分辨率降水推算方面显示出较好的应用前景^[22]。

全国智能网格实况分析产品中的降水融合产品(CMPA)于 2017 年进行发布推广^[23], 空间分辨率高达 5km, 数据质量较好。本文以中国大陆地区为研究区域, 借助 CMPA 数据构建两倍的超分辨率重建模型, 对 IMERG 日降水数据和 ERA5 日降水再分析资料进行降尺度, 分别将其空间分辨率提升至 0.05°和 0.125°, 对比分析各模型结果的优劣, 提供实用性更强的降水空间降尺度方法。

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

中国大陆地区(73° 29' E-135° 02' E, 18° 10' N-53° 33' N)位于亚洲东部、太平洋西侧。如图 1 所示。中国大陆地貌多以山地、丘陵以及高原为主, 盆地和平原占地面积较少, 西部地势高, 东部地势低, 自西向东呈三级阶梯状分布。受地形地貌复杂多样、河湖泊散状分布、幅员广阔等因素的影响, 中国大陆的气候复杂多样, 从南到北跨五个温度带。由于中国西北部地区距海遥远, 全年降水量较少, 整体降水量呈现从东南部向西北部递减的趋势。

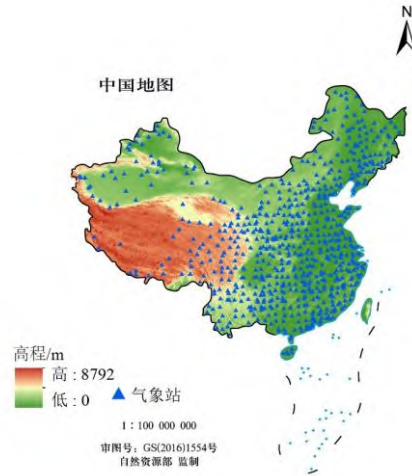


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the Study Area

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

1.2 实验数据

1.2.1 站点数据

本文采用的气象站点观测数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的全国地面气候数据日值数据集 V3.0 (数据集代码为: SURF_CLI_CHN_MUL_DAY)。此数据集在中国大陆区域内共有 699 个观测站点, 密集程度从东南向西北递减, 分布如图 1 所示。本文对该数据集的两个 12 小时观测结果 (20 时至 8 时, 8 时至 20 时) 进行合成以提供 8 时至 8 时的逐日气象站点观测数据, 用于评价基于 GAN (Generative Adversarial Network, GAN) 超分辨率重建后降水数据的数值统计精度。

1.2.2 全国智能网格实况分析产品

全国智能网格实况融合分析产品能够提供空间分辨率为 5km 的产品, 整点十五分钟内发布风速、降水等产品, 主要用于为全国智能网格预报业务提供预报检验和滚动订正^[23]。本文采用的全国智能网格实况分析产品中的降水融合产品 (以下称为 CMPA) 是在原有的 CLDAS (CMA Land Data Assimilation System)、CMPAS (CMA Multi-source Precipitation Analysis System) 等成熟业务系统基础上, 通过多源数据融合方法制作而成的空间分辨率为 5km 的降水产品。CMPA 降水数据的空间覆盖范围为整个中国区域 (70-140°E, 0-60°N)。本文选取 2018 年至 2019 年的 24 小时 CMPA 降水数据作为超分辨率重建模型的高分辨率端。

1.2.3 GPM 卫星降水数据

全球降水测量 (GPM) 作为 TRMM 的后续卫星降水观测计划, 自 2014 年起可以提供时间分辨率为 30min 的降水产品, 其空间分辨率高达 0.1°, 覆盖范围增至南北极圈^[24]。相较于 TRMM, GPM 的轨道倾角增大, 能够获得覆盖面更广的降水数据, 并且提高了 GPM 在微量降水和固态降水的观测上的敏感性, 能够获取更加精细化的降雨分布^[25]。现阶段, GPM-IMERG 数据已经被广泛应用于降水研究中^{[26][27]}。IMERG 中包含“Early Run”、“Later Run”、“Final Run”三类降水产品。本文选用 Final 降水产品, 从 GES DISC 官方网站 (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGM_06/summary) 下载 V06B 日降水数据。

1.2.4 ERA5 再分析数据集

ERA5 数据集是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 最新一代的再分析数据集, 其空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间范围从 1950 年 1 月至今。ERA5 降水再分析数据采用 4VDAR 系统, 利用同化系统对降水数据进行同化分析处理, 获得更加精准的降水再分析数据集

[28]。本文采用 ECMWF 官网(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-daily-era5-statistics?tab=app>)提供的日降水再分析数据集计算器, 获得中国区域内的 ERA5 日降水数据。

1.2.5 归一化植被指数

本文采用的 NDVI 数据来自 LAADS DAAC 官网提供的 MOD13A3 产品, 在 ArcGIS 中去除异常值, 乘以 0.0001 后得出 -1 至 1 之间的 NDVI 值, 并分别重采样为 0.1° 和 0.05° , 将其作为 RF 模型对 IMERG 日降水数据降尺度时的影响因子。网址为: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>

2 研究方法

2.1 图像超分辨率重建

2.1.1 生成对抗网络模型

图像超分辨率重建技术是计算机图像视觉领域的一个经典问题, 旨在利用已有的低分辨率图像重建所需的高分辨率图像^{[29][30]}。2015 年, Dong 等^[31]首次将卷积神经网络应用到超分辨率重建中, 提出超分辨率卷积神经网络模型 (Super-Resolution Convolutional Neural Network, SRCNN), 主要分为图像放大和图像质量修复两个部分。首先对输入端的低分辨率图像进行预处理, 采用双三次插值的方法放大图像尺寸, 再通过三层卷积层提取特征信息, 训练得到低分辨率和高分辨图像之间的非线性映射关系, 完成高分辨率图像的重建工作。

随着 Goodfellow 等^[32]提出 GAN 的概念, 基于生成对抗网络的超分辨率重建就有了广泛的研究应用。GAN 模型包括生成器 (Generator, G) 和判别器 (Discriminator, D) 两个部分, 如图 2 和图 3 所示。生成器 G 用来重建高分辨率图像, 并将生成的高分辨率图像输入判别器 D 中, 与真实的高分辨率图像进行判别比较, 不断迭代优化至判别器无法辨别真伪, 即完成高分辨率图像的重建^[33]。生成器主要由 6 个组织结构相同的残差单元 (Residual blocks) 组成, 每个残差单元都包含卷积层 (2 个)、激活层 (2 个) 和残差连接层 (1 个)。前三个残差单元采用 ReLU 函数作为激活函数, 后三个残差单元采用 LeakyReLU 函数作为激活函数。此外, 生成器还包含两个卷积层、一个全连接层、一个上采样层 (双线性插值) 和一个激活层 (sigmoid 函数)。在本文中, 所有卷积层的卷积核大小为 3×3 , 步长为 1, 低分辨率端输入图像尺寸为 64×64 , 高分辨率端输出图像尺寸为 128×128 。

判别器主要包括 12 个残差结构, 每个残差单元都包含两个卷积层、两个激活层 (激活函数为 LeakyReLU 函数) 和一个残差连接层。除了全连接层外, 判别器还包括全局平均池化层 (Global Average Pooling, GAP) 和紧密连接层 (Dense Block, DB) 各两个。卷积层的卷积核尺寸 (K)、步长 (s) 和特征图维数 (n) 等参数设置如图 3 所示。

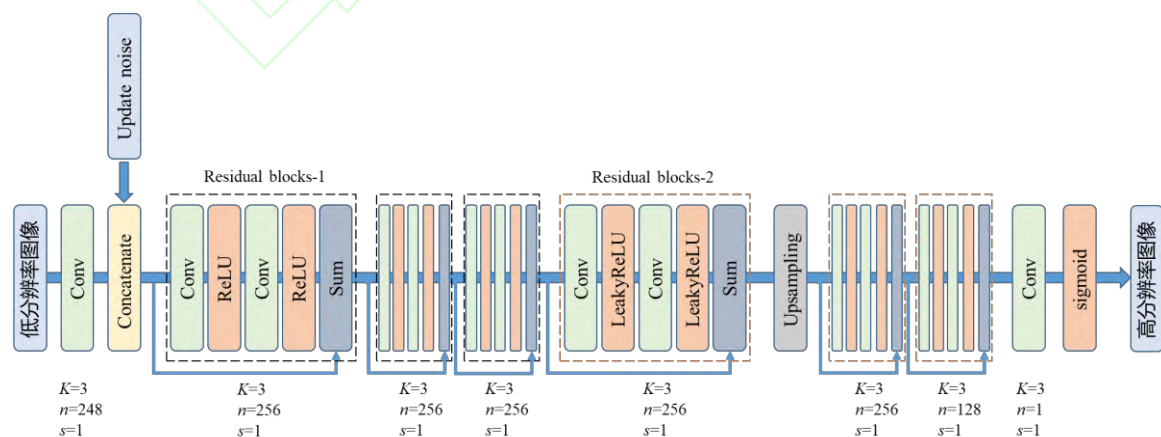


图 2 生成器架构

Fig.2 Architecture of the Generator

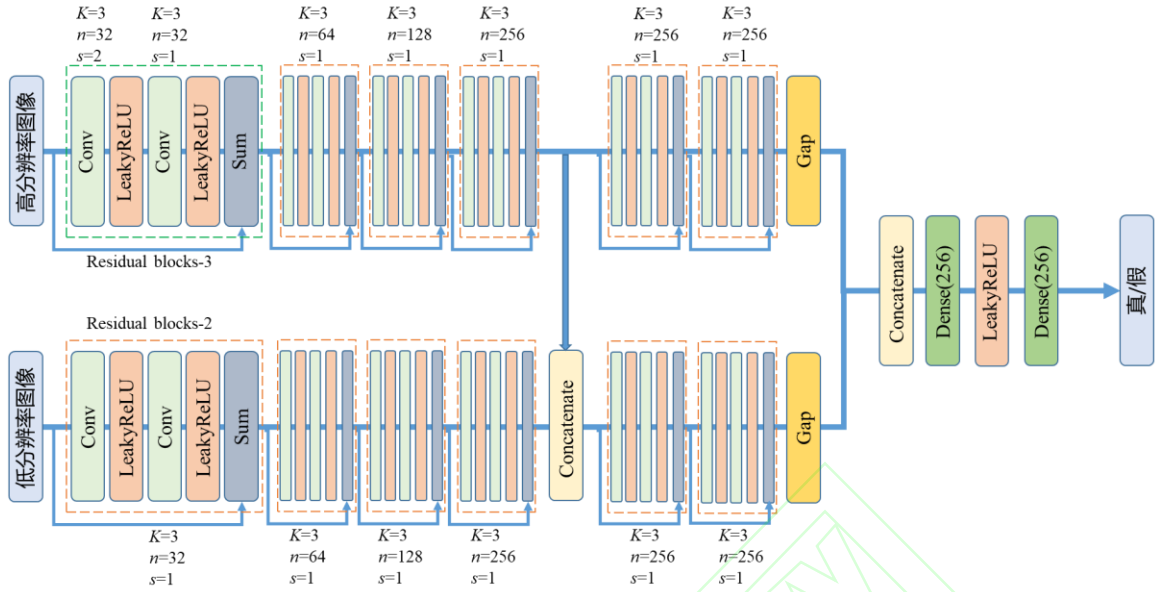


图 3 判别器架构

Fig.3 Architecture of the Discriminator

2.1.2 CMPA 降水样本集的构建

本文基于中国大陆区域 2018—2019 年的 CMPA 日降水数据构建样本集，制作流程如下：

通过窗口遍历制作初始切片。在 0.1° 的低分辨率端选用 64×64 的窗口，步长设置为 32；在 0.05° 的高分辨率端选用 128×128 的窗口，步长设置为 64。低分辨率端和高分辨率端一一对应。

样本质量筛选。若样本的无降水数据过多或存在异常值，会对网络模型的输出造成影响，因此需进行样本筛选，剔除无降水样本对以及降水异常值。当像元值小于 0.1mm/d ，即认定此像元为无降水像元；若样本对中无降水像元占比大于 90%，即认定此样本对为无降水样本对，予以剔除。此外，一个样本对中可能会出现少许降水异常值，本文将像元值小于 0mm/d 和 1000mm/d 的降水值以 0 值替代，完成样本对的制作。最终本文共选取 47814 对 CMPA 降水样本用于训练模型，并分别制作 76495 个 IMERG 测试切片和 29 个 ERA5 测试切片。

2.1.3 模型训练

本文采用轮流训练（生成器一个批次、判别器五个批次）的方式，每个 Batch 的大小设置为 8。训练起始阶段，本文采用自适应矩估计（Adaptive moment estimation, Adam）优化算法来更新模型参数，判别器和生成器的学习率为 10^{-5} ；在训练接近结束时（training sequences=36800）更换优化算法为随机梯度下降（Stochastic Gradient Descent, SGD）算法，并且将判别器和生成器的学习率设置为 10^{-6} 。训练一次需 20 个小时。

2.2 多重分形模型（Multifractal, MF）

多重分形分析是描述分形空间质量分布的定量工具。降雨由于其空间不连续性和空间变异质等特点，可以表示为一个多重分形过程。多重分形模型将降水的空间变化特征描述为随机级联过程。均质化的多重分形降水如公式（1）所示。

$$M_{(i,j)}^l = \begin{cases} M_{((i/2^l, j/2^l)}^{l-1} \times W_{(i,j)} & , l > 0 \\ M_{(i,j)}^0 & , l = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 i 表示网格中的行索引，而 j 表示网格中列索引，并且 $i, j = 0, 1, 2, \dots$ ； $M_{(i,j)}^l$ 表示在 (i, j) 位置第 l 次均质化多重分形的降水量； $W_{(i,j)}$ 表示在 (i, j) 位置以获得第 l 次均质化多

重分形降水量的权重； $M_{(i,j)}^0$ 表示分辨率为 0.1° 时所代表的第一级均匀多重分形降水量。

随机级联权重 $W_{(i,j)}$ 的计算如公式 (2) - (4) 所示。

$$W_{(i,j)} = BY_{(i,j)} \quad (2)$$

$$P[B = 0] = 1 - b^{-\beta}, \quad P[B = b^\beta] = b^{-\beta} \quad (3)$$

$$Y_{(i,j)} = b^{-\delta^2 \frac{\ln b}{2} + \delta X_{(i,j)}} \quad (4)$$

其中， β 和 σ 分别是 β 模型和 Lognormal 模型的未知参数； b 在本文中值为 4； X 是遵循标准正态分布的随机变量。

2.3 随机森林模型 (Random Forest, RF)

随机森林算法是一种基于集成学习思想的机器学习算法，其基本构建单元是可用于分类和回归的决策树。随机森林回归是为连续随机变量构建的多元回归树，其最终预测结果是所有决策树输出的平均值。计算过程如公式 (5) 所示。

$$g(x_t) = \frac{1}{S} \sum_{f=1}^S h_f(x_t) \quad (5)$$

其中， x_t 、 $h_f(x_t)$ 和 S 分别表示要测试的样本数据、每棵回归树的预测结果以及树的数量。本文选取 100 棵树来构建随机森林回归模型。该模型基于 Python 提供的 scikit-learn 实现。

2.4 评价指标

本文基于气象站点观测数据对 IMERG 日降水数据、ERA5 日降水数据及两种数据的超分辨率重建结果进行精度评价，选择相关系数 (CC)、偏差 ($Bias$)、命中率 (POD) 作为评价指标。 CC 表示栅格降水数据和站点数据之间的相关程度，越靠近 1 则相关性越强； $Bias$ 表示栅格降水数据相对于站点数据的数值偏差，反映了栅格降水数据被高估或低估的程度，越靠近 0 则偏差越小，大于 0 表示高估，小于 0 表示低估； POD 表示栅格降水产品正确检测到降水事件且误差小于 5mm 的概率。计算如公式 (6) - (8) 所示：

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (8)$$

其中， x 代表栅格降水产品检测到的降水量； y 代表地面站点观测到的降水量； n 代表样本总数； H 为栅格降水产品及地面站点均探测到降雨，并且二者之间的数值误差小于 5mm 的天数； M 为栅格降水产品及地面站点均探测到降雨，但二者之间的数值误差大于等于 5mm 的天数。

3 结果分析

3.1 IMERG 和 ERA5 重建结果对比分析

本文以 2019 年 7 月 16 日为例，对 IMERG 日降水数据和 ERA5 日降水数据进行超分辨率重建。原始的 IMERG 降水场和超分辨率重建后的降水场横向对比如图 4 所示。从图中可以看出，重建后降水场整体的空间结构与原始降水场基本保持一致，降水高值区域也有较准确地对应，表明模型重建后基本还原了原始降水场的空间分布趋势。原始的 ERA5 降水场和超分辨率重建后的降水场横向对比如图 5 所示。通过对比可以看出，重建后降水场的空间分

分辨率有一定程度的提升，强降水区域的分布形式与原始 ERA5 降水场高度相似。此外，之前的研究显示 ERA5 再分析资料在横断山脉和青藏高原区域过高的估计了降水量^[34]，而重建后的降水场在这个两个区域出现较明显的降水高值减少现象，微量降水（蓝色区域）占比增加，这表明本文构建的 GAN 模型可以获得更加精准的降水分布。

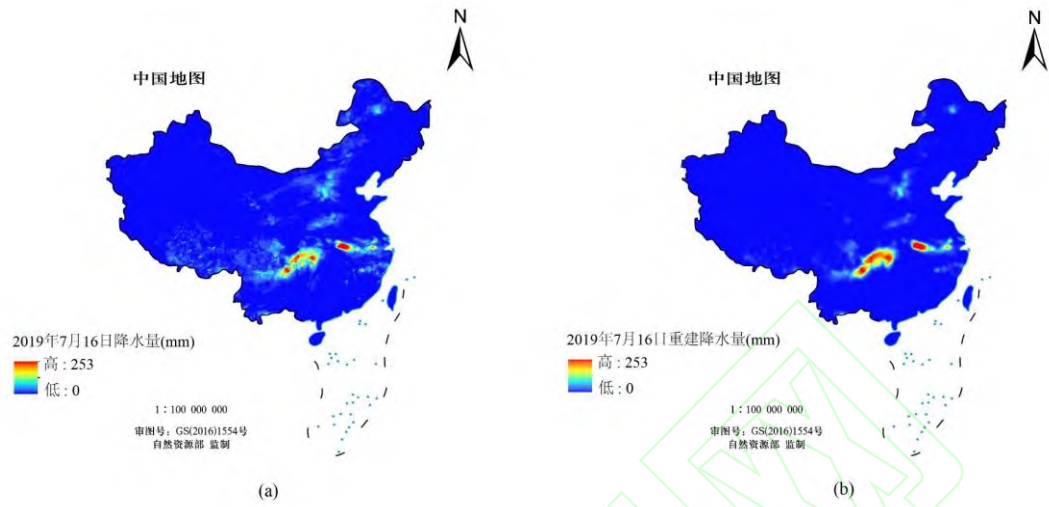


图 4 2019 年 7 月 16 日中国大陆区域原始 IMERG (0.1°) 和重建后 IMERG (0.05°) 降水场的空间分布图
Fig.4 Original IMERG (0.1°) and Downscaled IMERG (0.05°) Precipitation Fields in the Chinese Mainland on 16 July 2019

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

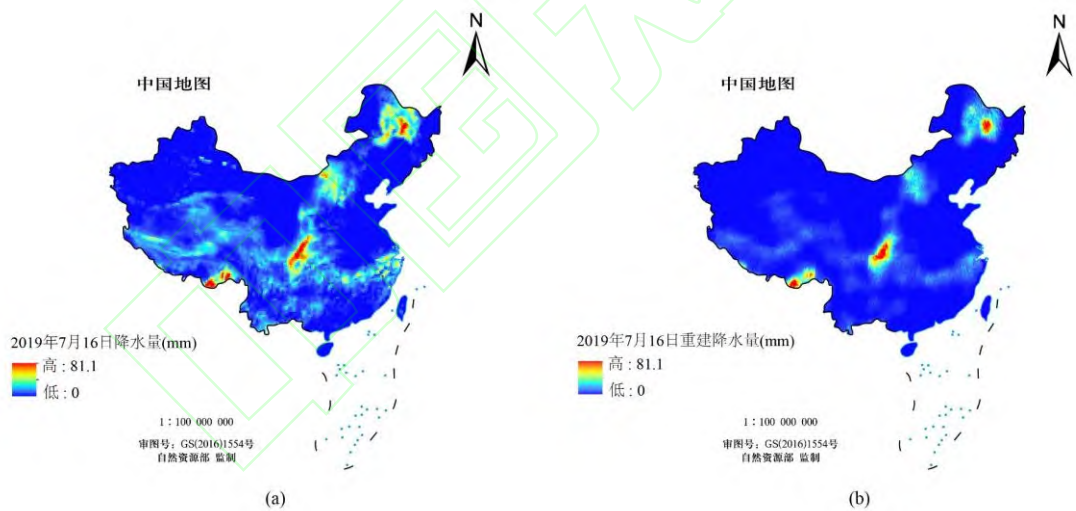


图 5 2019 年 7 月 16 日中国大陆区域原始 ERA5 (0.25°) 和重建后 ERA5 (0.125°) 降水场的空间分布图
Fig.5 Original ERA5 (0.25°) and Downscaled ERA5 (0.125°) Precipitation Fields in the Chinese Mainland on 16 July 2019

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

本文基于全国 699 个气象站点的观测数据，验证了 CMPA 数据、原始 IMERG 数据、原始 ERA5 数据和相应的 GAN 模型重建结果的数值精度。精度评估如表 1 所示。从评价结果来看，重建后 IMERG 降水场的数值精度大幅提升，*CC* 和 *POD* 分别增加了 3.1%和 9%，*Bias* 减少了 14.8%，甚至超过了 CMPA 数据，表明本文构建的 GAN 模型可以在提高空间分辨率的同时，获得数据准确性更高的 IMERG 日降水场；相比于原始的 ERA5 降水场，重建后 ERA5 降水场的各项精度指标均有明显的改善，其中 *CC* 和 *POD* 分别增加了 4%和 11.2%，

Bias 降低了 38%，表明重建后的降水场与观测站点数据之间的误差大幅减少，并且能够更加精准地检测到降水事件，在一定程度上增强了数据一致性和准确性。然而，受限于原始 ERA5 数据的空间分辨率和数值精度，重建后 ERA5 降水场的整体精度低于 IMERG，且未能超过 CMPA 数据，其重建效果不如 IMERG 降水数据。

表 1 2019 年 7 月 16 日数值评价表
Tab.1 Accuracy Assessment for 16 July 2019

	CMPA	IMERG		ERA5	
		原始 IMERG	重建后 IMERG	原始 ERA5	重建后 ERA5
<i>CC</i>	0.702	0.685	0.716	0.480	0.520
<i>Bias</i>	0.063	0.153	-0.005	0.464	-0.084
<i>POD</i>	0.668	0.592	0.682	0.531	0.643

为进一步评估本文构建的 GAN 模型对两种降水数据的降尺度效果，以 CMPA 数据为基准，重新计算 IMERG 日降水数据和 ERA5 日降水数据的各项精度指标如表 2 所示。结果表明，重建后 IMERG 降水数据和 ERA5 降水数据与 CMPA 的相关性均有升高，其中，IMERG 数据的 *CC* 和 *POD* 分别增加了 4.2%和 3.9%，*Bias* 减少了 2%；ERA5 数据的 *CC* 和 *POD* 分别增加了 1.9%和 13.5%，*Bias* 减少了 23.8%。从整体来看，相较于 ERA5 降水数据，重建后 IMERG 降水数据的数值精度更高，与 CMPA 数据的一致性更强，重建效果更好。实验结果也从另一方面证实，使用目前公认数据质量较好的 CMPA 数据进行其他降水产品校正的可行性。

表 2 2019 年 7 月 16 日 CMPA 与 IMERG 和 ERA5 之间的数值评价表
Tab.2 Accuracy Assessment of CMPA with IMERG and ERA5 Respectively on 16 July 2019

	IMERG-CMPA		ERA5-CMPA	
	原始 IMERG	重建后 IMERG	原始 ERA5	重建后 ERA5
<i>CC</i>	0.698	0.740	0.435	0.454
<i>Bias</i>	0.084	-0.064	0.377	-0.139
<i>POD</i>	0.737	0.776	0.586	0.721

考虑到训练数据对重建效果的影响，本文从这三种日降水数据中选取 2019 年 1 月至 10 月全国 699 个站点所对应的数据，剔除缺测值和异常值，共保留 198383 对降水数据，进一步计算 CMPA 数据与 IMERG 日降水数据和 ERA5 日降水数据长时间序列的相关性。结果对比如图 6 所示。从图中可以看出，相较于 IMERG 降水数据，CMPA 数据与 ERA5 降水数据之间的相关性仅为 55.6%，这也是导致重建效果不如 IMERG 降水数据的原因之一。综上，GAN 模型重建后两种降水数据的空间分辨率和数值精度都有不同程度的提升，但在 IMERG 降水数据上的适用性更好，整体精度更高，分析原因是原始 ERA5 日降水数据的空间分辨率较低，相较于原始 IMERG 降水数据，ERA5 降水数据精度较差，并且 CMPA 数据与 ERA5 降水数据之间的相关性不够高，这对重建后的结果产生了一定的影响。

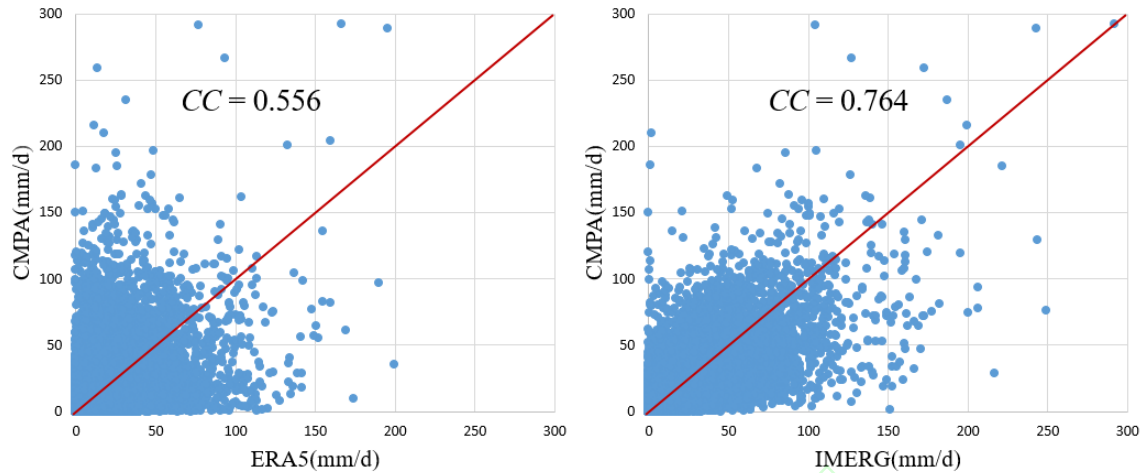


图 6 CMPA 与 ERA5 以及 CMPA 与 IMERG 日降水散点图

Fig.6 Daily Precipitation Scatter Plots for CMPA with ERA5 and CMPA with IMERG

3.2 基于 GAN 的 IMERG 降水产品的改进

3.2.1 多模型降尺度效果对比

为了进一步检验本文构建的 GAN 模型在 IMERG 日降水产品上的适用性，本文统计 2020 年全国 699 个气象站点月平均降水量，选取降水量较大的月份（2020 年 7 月）作为研究时段，在该月的中旬和下旬各选取一个降水过程（2020 年 7 月 12 日—2020 年 7 月 15 日，2020 年 7 月 27 日—2020 年 7 月 31 日），对 IMERG 日降水数据进行 GAN 超分辨率重建，获得更加精确的 IMERG ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) 降水空间分布。同时，选择多重分形模型 (MF) 以及考虑 NDVI 和经纬度影响的随机森林模型 (RF) 进行降尺度效果对比，并利用站点数据进行精度评价。

本文以 2020 年 7 月 29 日为例，将其原始的 IMERG 降水场与不同模型降尺度后的降水场横向对比如图 7 所示。从降水场的比较可以看出，这三种降尺度后的降水场都基本保留了原始 IMERG 降水场的整体分布特征，较为准确地再现了强弱降水的空间分布。细节对比如图 8 所示，相较于原始的 IMERG 数据，GAN 重建后的降水场细节特征最为丰富，降水信息的空间连续性更好；MF 降尺度后出现了“马赛克”现象，细节特征不明显；RF 降尺度后存在一定的“块状效应”^[35]，无法反映更真实的降水细节。为深入分析 GAN 重建后的细节重建情况，本文从九天的测试样本中再随机选取两对，将其原始 IMERG 和重建后的降水场进行横向对比，结果如图 9 所示。如图所示，重建后的 IMERG 降水空间分布图像出现了一些斑状细节特征。综合来看，本文构建的 GAN 模型可以在提高降水空间分辨率的同时，在空间分布图像上获得更加细致的局部纹理特征。

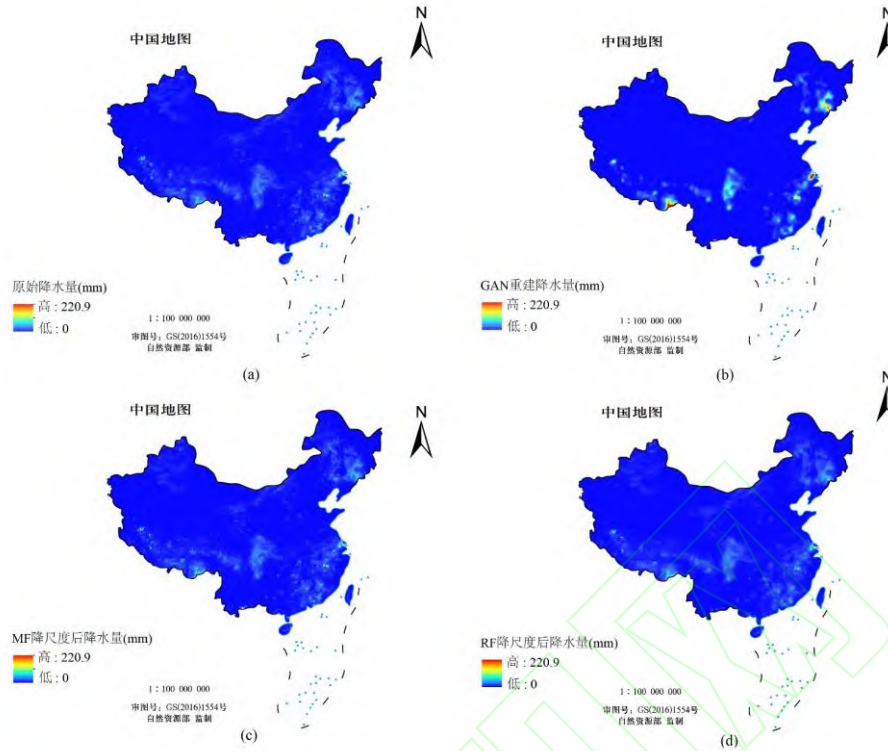


图 7 2020 年 7 月 29 日(a)中国大陆区域原始 IMERG (0.1°)、(b) GAN 重建后 IMERG (0.05°) 降水场、(c) MF 降尺度后 IMERG (0.05°) 降水场和(d) RF 降尺度后 IMERG (0.05°) 降水场的空间分布图

Fig.7 (a)Original IMERG (0.1°), (b) Downscaled IMERG (0.05°) by GAN, (c) Downscaled IMERG (0.05°) by MF and (d) Downscaled IMERG (0.05°) by RF in the Chinese Mainland on 29 July 2020

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

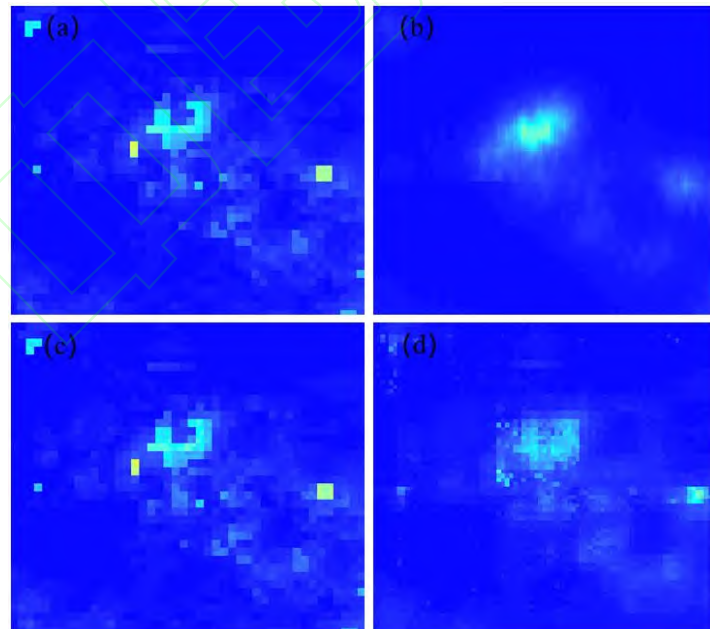


图 8 (a)原始 IMERG、(b)GAN 模型、(c)MF 模型和(d)RF 模型降水场的细节对比图

Fig.8 Comparison of the Details of the Precipitation Fields of (a) the Original IMERG, (b) the GAN, (c) the MF and (d) the RF

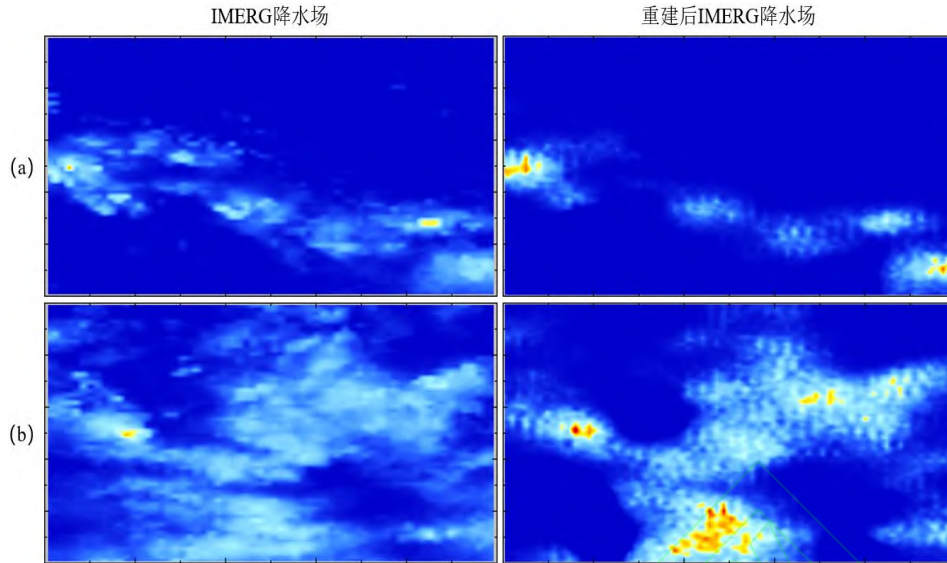


图 9 样本及其重建降水场的对比图

Fig.9 Comparison of Samples and Their Reconstructed Precipitation Fields

本文基于全国 699 个气象站点的观测数据，验证了原始 IMERG 数据和三种模型降尺度后结果的数值精度。九天的平均数值评估如表 3 所示。从验证结果来看，GAN 模型提高了原始 IMERG 降水数据的数值精度，*Bias* 减少了 10%，虽仍存在一定的高估现象，但相比原始 IMERG 数据，重建后的降水场与站点观测数据更加贴合，数据整体准确性更高；*CC* 和 *POD* 提高了 0.2%和 7.1%，其中有 67%的天数 *CC* 效果变好，且在选取的两个降水事件中，重建后每一天的降水命中率都有一定改善，表明 GAN 模型能够在基本保持数据相关性的同时，提升降水场的命中率。MF 和 RF 降尺度效果不如 GAN。MF 降尺度后各项精度指标均低于原始降水数据，而 RF 虽在 *CC* 和 *POD* 上有一定的提升效果，但 *Bias* 却高于原始 IMERG 数据。综合来看，本文构建的 GAN 模型能构建数据准确性更强的高分辨率降水场。图 10 给出了原始 IMERG 数据及三种模型降尺度结果相对于站点数据的平均偏离程度。从图中可以看出，GAN 粉色圆点覆盖区域多于 MF 和 RF 模型，表明 GAN 重建后的降水场在减少或基本保持数据偏离情况方面表现最佳；此外，这两种模型在我国中西部地区和东北地区的蓝色圆点覆盖区域明显多于 GAN 模型，表明本文构建的 GAN 模型重建后数据准确性更好，更加贴合原始降水数据。综合来看，相比于 MF 模型和考虑 NDVI 和经纬度影响的 RF 模型，本文构建的 GAN 模型可以在原始 IMERG 数据的基础上重建出更精细的降水场，将 IMERG 降水数据的空间分辨率从 0.1°提升至 0.05°，同时在提升原有 IMERG 精度的情况下，有效降低偏差，提升准确率，适用价值更高。

表 3 IMERG 的平均数值评价表

Tab.3 Average of Accuracy Assessments for IMERG

指标	原始 IMERG	GAN	MF	RF
<i>CC</i>	0.574	0.576	0.554	0.582
<i>Bias</i>	0.227	0.127	0.242	0.253
<i>POD</i>	0.547	0.618	0.540	0.574

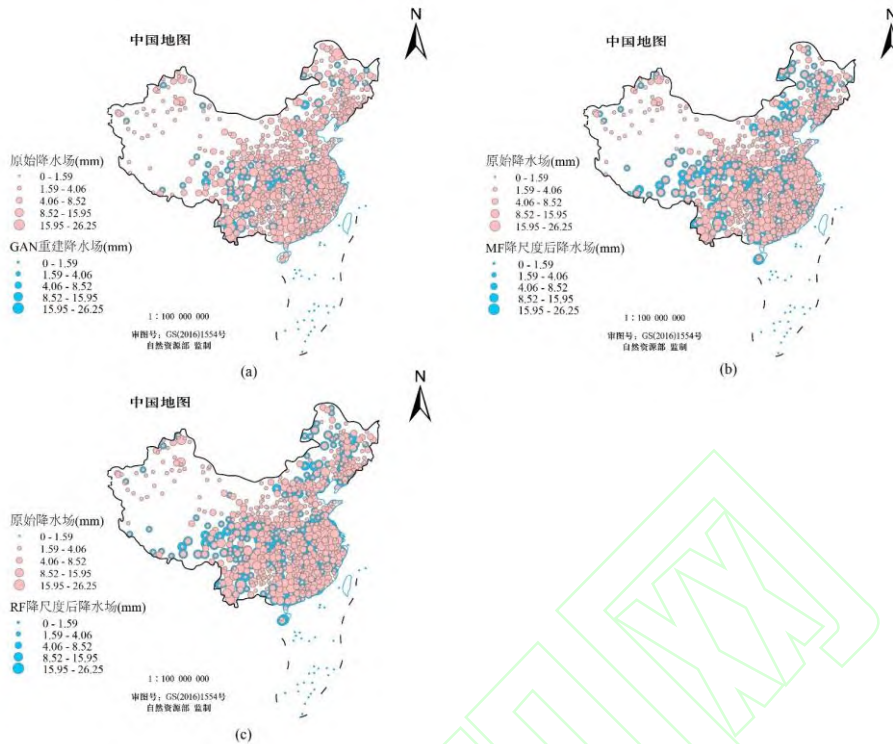


图 10 原始 IMERG 数据及三种降尺度结果相对于站点数据的平均偏离程度图

Fig.10 Average Deviation of the Original IMERG Data and Three Downscaling Results Relative to the Site Data

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

3.2.2 年、季、月尺度 GAN 降尺度效果的统计分析

为深入分析验证 GAN 模型的适用性，本文对 2020 年 IMERG 日降水数据进行 GAN 重建，生成中国大陆地区 2020 年逐日高分辨率降水数据集 ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$)，并从年、季、月三个时间维度对降尺度效果进行精度评价。

年尺度的精度统计分析如图 11 所示。从图中可以看出，CC 整体变化趋势与原始降水数据基本保持一致，其中有超过 73% 的天数 CC 提升或与原始数据的 CC 差距在 0.05 以内，表明本文构建的 GAN 模型可以提升或基本维持原始降水数据的一致性；相较于原始降水数据，重建后 Bias 更加平稳，其中有 76 天偏差的提升效果超过 20%，表明模型能够有效减少降水数据的异常值，极大增强数据准确性；GAN 重建后降水数据的命中率明显高于原始降水数据，其中有超过 87% 的天数 POD 提升。

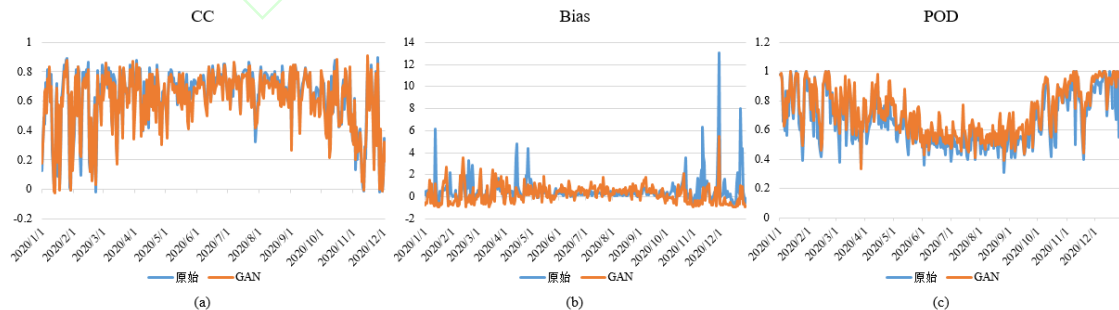


图 11 2020 年原始 IMERG 数据及其重建结果的精度评价指标

Fig.11 Evaluation Indexes of the Original IMERG and Its Reconstruction Results in 2020

在季节尺度上，GAN 重建后，每个季度均有超过 65% 的天数 CC 提升或与原始数据差距在 0.05 以内，其中第四季度有将近 86% 的天数相关性增强，整体提升效果最佳；相较于

原始降水数据，重建后每个季度的 *POD* 都有明显的提升，均有超过 79% 的天数降水命中率增加。图 12 给出了每个季度原始 IMERG 数据及其重建结果相对于站点数据的平均偏离程度。从图中对比可以看出，每个季度重建后降水场相对于站点数据的偏离程度均低于或基本维持原始数据的偏离度，其中第四季度偏离程度明显低于其他季度，数据准确性最高。

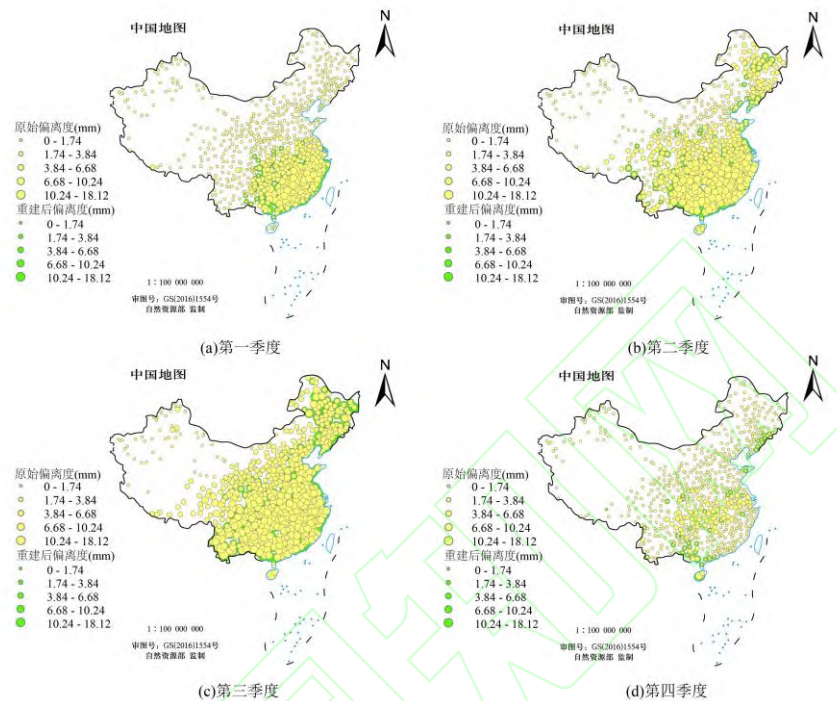


图 12 2020 年每个季度原始 IMERG 数据及其重建结果相对于站点数据的平均偏离程度图

Fig.12 Average Deviation of the Original IMERG Data and Its Downscaling Results Relative to the Site Data for Each Quarter of 2020

注：本图基于审图号为 GS(2016)1554 号的标准地图制作，底图无修改

为检验分析 GAN 模型在不同月份的适用性，本文统计了 2020 年每个月的精度评价指标如图 13 所示。相较于原始 IMERG 数据，GAN 重建后降水场的相关性与原始数据基本保持一致，其中每个月均有超过 50% 的天数 *CC* 提升或与原始数据的差距小于 0.05，且有八个月超过 67%，表明本文构建的 GAN 模型在改善数据一致性方面表现较稳定；重建后的 *Bias* 大多低于原始降水数据，且更加平稳，尤其是在 4 月、10 月、11 月和 12 月改善较为明显，表明模型对枯水月偏差的改进效果更好；相较于原始降水数据，重建后降水数据的命中率明显增加，每个月都有超过 60% 的天数 *POD* 提升，其中有八个月超过 90%。综上所述，本文构建的 GAN 模型在 IMERG 日降水上的适用性较强，能够提供数据质量更好的高分辨率日降水数据，具有一定的研究意义。

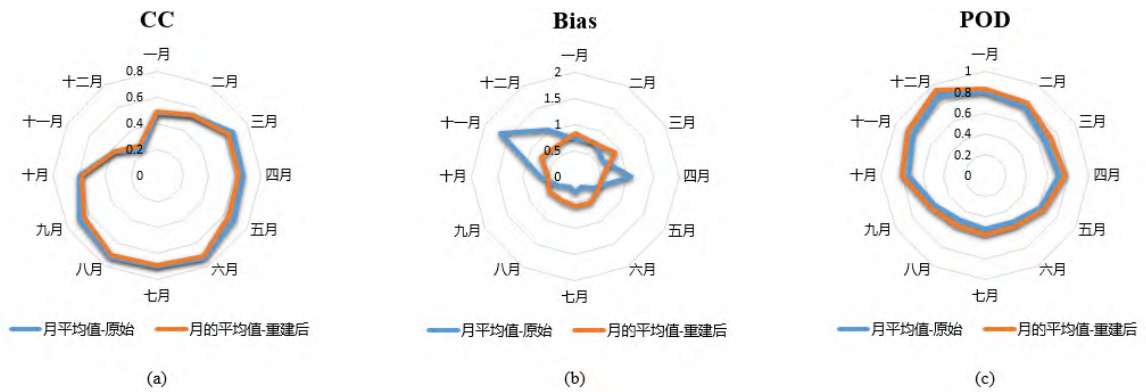


图 13 2020 年逐月原始 IMERG 数据及其重建结果的精度评价指标

Fig.13 Evaluation Indexes of the Original IMERG and Its Reconstruction Results at Monthly Scale in 2020

4 结论

本文以中国大陆地区为研究区域，基于全国智能网格实况分析降水产品，构建两倍的 GAN 模型，分别应用在 IMERG (0.1°) 和 ERA5 (0.25°) 日降水数据中，实现两种数据的空间降尺度，分别将空间分辨率提升至 0.05° 和 0.125° 。最后，本文对比分析了 GAN 模型、MF 模型和 RF 模型在 IMERG 日降水数据上的降尺度效果，并基于站点降水从年、季、月三个角度统计验证了 GAN 模型重建后降水数据的数值精度，生成 2020 年中国大陆区域高分辨率日降水数据集($0.05^\circ \times 0.05^\circ$)。主要结论如下：

(1) 本文所构建的 GAN 模型能够很好地应用于其他降水产品的超分辨率重建，但在卫星降水数据上的适用性更好。重建后 IMERG 降水场的各项精度指标都有大幅提升，数据一致性和可靠性增强，并且在空间分布图像上出现了一些细节纹理特征，表明本文制作的 CMPA 降水样本集在卫星日降水数据降尺度中具有很好的适用价值。重建后的 ERA5 降水场在提高空间分辨率的同时，保留了降水的空间分布结构，全面提升了降水场的总体精度，*Bias* 和 *POD* 分别改善了 38% 和 11.2%，但整体精度要低于 IMERG 降水数据。

(2) 模型可以保留 CMPA 产品的基本数据特征。重建后两种降水数据的各项精度指标都更贴近 CMPA 数据，而 CMPA 作为目前数据质量较好的高精度降水产品，即表明本文构建的 GAN 模型能够在一定程度上提升数据的精确性。

(3) 整体来看，不论是基于站点数据或是基于 CMPA 数据的精度检验，重建后 ERA5 降水数据的数值精度都低于 IMERG 降水数据，表明降尺度效果受原始数据的空间分辨率和精度的影响。此外，ERA5 降水数据与 CMPA 数据之间的相关性不够高，致使 GAN 模型重建效果不佳。

(4) 本文构建的 GAN 模型在 IMERG 日降水数据上的降尺度效果比 MF 模型要好，也优于考虑 NDVI 和经纬度影响的 RF 模型。在空间分布方面，GAN 重建后的高分辨率降水场基本保留了原始降水的空间分布趋势，降水细节特征更明显，没有出现 MF 模型的“马赛克”现象和 RF 模型的“块状效应”；在数值评价方面，GAN 重建后精度指标大多优于其他两种模型。RF 模型虽在相关性方面有些许提升，但其 *Bias* 远不如 GAN 模型。

(5) 综合年、季、月三个维度的统计分析结果，本文构建的 GAN 模型在 IMERG 日降水数据上的适用性较强，模型表现较稳定，重建后的各项精度指标大多提升或保持原有数据的精度，表明本文生成的高分辨率日降水数据集具有一定的实用价值。

本文构建的 GAN 模型受限于 CMPA 数据的空间分辨率，空间降尺度效果无法达到最优，之后的研究可以考虑使用更高分辨率的数据作为模型高分辨率端的输入数据，以期获得更精细化的降水分布。

参考文献

- [1] Zhang Hanbo, Xu Yong, Dou Shiqing, et al. TRMM Downscaling Data of Yangtze Based on GWR Model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2021,28(3):149-155+162. (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+162.)
- [2] Li Guoping, Chen Jiaona, Hao Liping. Case Study of the Rainfall Processes in Different Cloud Systems Based on GPS-PWV Data in Chengdu Plain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 384-388. (李国平,陈娇娜,郝丽萍.基于 GPS-PWV 的不同云系降水个例的综合分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(4):384-388.)
- [3] LIU Shuya, ZHENG Shengjie, ZHANG Wei. Simulation of Spatial Distribution of Monthly Average Precipitation Driven by Temporal Variation Function[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1043-1051. (刘舒雅,郑胜杰,张唯.时序变差函数特征驱动下的月平均降水空间分布模拟[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(7):1043-1051.DOI:10.13203/j.whugis20200142.)
- [4] Duan Z, Liu J, Tuo Y, et al. Evaluation of Eight High Spatial Resolution Gridded Precipitation Products in Adige Basin (Italy) at Multiple Temporal and Spatial Scales[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1536-1553.
- [5] Li Z, Yang D, Gao B, et al. Multiscale Hydrologic Applications of the Latest Satellite Precipitation Products in the Yangtze River Basin using a Distributed Hydrologic Model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 407-426.
- [6] Tang Guoqiang. Validation, Application and Improvement of Satellite Remote Sensing Precipitation in the Globe and Typical Regions[D].Tsinghua University,2019. (唐国强. 卫星遥感降水在全球及典型区域的检验、应用和改进[D].清华大学,2019.)
- [7] Hu Q, Li Z, Wang L, et al. Rainfall Spatial Estimations: A Review From Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging[J]. *Water*, 2019, 11(3): 579.
- [8] TANG QiuHong, ZHANG Xuejun, QI Youcun, et al. Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle: Progress and Perspectives[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1872-1884. (汤秋鸿,张学君,戚友存,等.遥感陆地水循环的进展与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1872-1884.DOI:10.13203/j.whugis20180174.)
- [9] Joyce R, Janowiak J E, Arkin P, et al. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5 (3): 487-503.
- [10] Mantas V M, Liu Z, Caro C, et al. Validation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) Products in the Peruvian Andes[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 163: 132-145.
- [11] Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. The Version2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979 Present) [J]. *Journal of Hydro - meteorology*, 2003, 4 (6): 1147-1167.
- [12] Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. An Overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and It's Latest Development[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30 (4): 607-615.
- [13] Wang Yurong, Zhou Jianzhong, Yang Xin, et al. Applicability Evaluation and Deviation Correction of Reanalysis Precipitation Data: Case of Middle and Lower Reaches of Changjiang River[J]. *YANGTZE RIVER*, 2021, 52(9): 93-100. (王彧蓉,周建中,杨鑫,等.再分析降水资料的适用性评估与偏差校正——以长江中下游地区为例[J].人民长江,2021,52(9):93-100.)
- [14] Shi Lan, He Qiquan, Yang Jiao, et al. Downscaling Modeling of the GPM IMERG Precipitation Product and Comparative Analysis in the Fujian-Zhejiang-Jiangxi Region[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019,

- 21(10): 1642-1652. (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.)
- [15] Wright D B, Knutson T R, Smith J A. Regional Climate Model Projections of Rainfall from US Landfalling Tropical Cyclones[J]. *Climate dynamics*, 2015, 45(11): 3365-3379.
- [16] Chen F, Liu Y, Liu Q, et al. Spatial Downscaling of TRMM 3B43 Precipitation Considering Spatial Heterogeneity[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(9): 3074-3093.
- [17] Wang M, He G, Zhang Z, et al. Comparison of Spatial Interpolation and Regression Analysis Models for an Estimation of Monthly Near Surface Air Temperature in China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1278.
- [18] Zhan C, Han J, Hu S, et al. Spatial Downscaling of GPM Annual and Monthly Precipitation using Regression-based Algorithms in a Mountainous Area[J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018.
- [19] Ma Z, He K, Tan X, et al. Comparisons of spatially downscaling TMPA and IMERG over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1883.
- [20] Cheng Jianxin. Research on Meteorological Forecast System Based on Deep Learning Super Resolution[D]. Wuhan University,2021. (程建新. 基于深度学习超分辨率的气象预报系统研究[D].武汉大学,2021.)
- [21] Jiang Y, Yang K, Shao C, et al. A Downscaling Approach for Constructing High-resolution Precipitation Dataset over the Tibetan Plateau from ERA5 Reanalysis[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 256: 105574.
- [22] Watson C D, Wang C, Lynar T, et al. Investigating Two Super-resolution Methods for Downscaling Precipitation: Esrgan and Car[J]. *arXiv preprint arXiv:2012.01233*, 2020.
- [23] Shi Chunxiang, Gu Junxia, Han Shuai, et al. Advances in National Intelligent Grid Live Fusion Analysis Products [C]// 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S20 Deep informatization: application support and intelligent development. ,2018:66-70. (师春香,谷军霞,韩帅,等. 全国智能网格实况融合分析产品进展[C]//第 35 届中国气象学会年会 S20 深度信息化: 应用支持与智能发展.,2018:66-70.)
- [24] Lu Xinyu. Merging Method of Precipitation based on Multi-source Remote Sensing Data and Ground Observation in Xinjiang[D]. Nanjing University of Information Science & Technology,2019. (卢新玉. 融合多源遥感数据与地面观测的新疆地区降水量估算方法研究[D].南京信息工程大学,2019.)
- [25] XU Zhiming, WANG Zhengtao. Detect Songhua River Basin Groundwater Spatiotemporal Variation Characteristics by GRACE and Multi-source Hydrological Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. (许智铭,王正涛.联合 GRACE 和多源水文数据探测松花江流域地下水时空变化特征 [J/OL].武汉大学学报(信息科学版):1-11[2023-05-21].DOI:10.13203/j.whugis20210120.)
- [26] Chen F, Gao Y, Wang Y, et al. Downscaling Satellite - derived Daily Precipitation Products with an Integrated Framework[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(3): 1287-1304.
- [27] Gemtzi A, Koutsias N, Lakshmi V. A Spatial Downscaling Methodology for GRACE Total Water Storage Anomalies using GPM IMERG Precipitation Estimates[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5149.
- [28] Ye Mengshu. Reasearch on the Applicability of Precipitation Reanalysis Data in CRA-interim of Climate and Weather Characters in China[D]. Lanzhou University,2018. (叶梦姝. 中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D].兰州大学,2018.)
- [29] LU Xuan, WANG Dingwen, SHI Wenxuan. Image Super-resolution with On-line Dictionary Learning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 719-725. (鹿璇,汪鼎文,石文轩.利用在线字典学习实现图像超分辨率重建的算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(5):719-725.DOI:10.13203/j.whugis20150753.)
- [30] CHEN Hang, LUO Bin. Multi-angle Remote Sensing Images Super-Resolution Reconstruction Using Dynamic Upsampling Filter Deep Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1716-1726. (陈行,罗斌.利用动态上采样滤波深度网络进行多角度遥感影像超分辨率重建[J].武

汉大学学报(信息科学版),2021,46(11):1716-1726.DOI:10.13203/j.whugis20200651.)

- [31] Dong C, Loy C C, He K, et al. Image Super-resolution using Deep Convolutional Networks[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2015, 38(2): 295-307.
- [32] Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative Adversarial Nets[J]. *Advances in neural information processing systems*, 2014, 27.
- [33] LU Chuanwei, SUN Qun, ZHAO Yunpeng, et al. A Road Extraction Method Based on Conditional Generative Adversarial Nets[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 807-815. (陆川伟, 孙群, 赵云鹏, 等. 一种基于条件生成式对抗网络的道路提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 807-815. DOI: 10.13203/j.whugis20190159.)
- [34] Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. Daily Variation of Precipitation in China[M]. Beijing: Science Press, 2021: 148-149. (宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 中国降水日变化[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 148-149.)
- [35] Weiwei Tan. Spatial Downscaling of Satellite-based Precipitation Data over the Yangtze River Economic Belt[D]. Wuhan University, 2020. (谭伟伟. 长江经济带卫星遥感降水数据空间降尺度研究[D]. 武汉大学, 2020. DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.000314.)

网络首发:

标题: 降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建

作者: 张唯, 吉宸佳, 李文凯, 孙晓娜, 梁天欣, 韩松洁, 卫鸿飞

Doi: 10.13203/j.whugis20230013.

收稿日期: 2023-09-25

引用格式:

张唯, 吉宸佳, 李文凯, 等. 降水融合数据特征驱动下基于生成对抗网络的遥感降水产品空间超分辨率重建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, Doi:10.13203/j.whugis20230013. (Zhang Wei, Ji Chenjia, Li Wenkai, et al. Spatial Super-Resolution Reconstruction of Remote Sensing Precipitation Products Using Generative Adversarial Network by Multi-Source Fused Precipitation Data Features[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, Doi:10.13203/j.whugis20230013.)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

基于 XGBoost 模型的高分辨率遥感滑坡快速提取与分析研究

林娜, 冯珊珊, 王斌, 唐菲菲, 朱洪洲, 张迪, 潘鹏, 何静

武汉大学学报(信息科学版). doi: 10.13203/j.whugis20220296

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220296>

数据融合视角下的遥感参量空间降尺度

景映红, 沈焕锋, 李星华, 吴金橄, 邱中航

武汉大学学报(信息科学版). doi: 10.13203/j.whugis20220549

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220549>

智能优化学习的高空间分辨率遥感影像语义分割

邵振峰, 孙悦鸣, 席江波, 李岩

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 234-241.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200640>