

基于 GPCC 月尺度降水产品的空间 降尺度适用性研究

岳凡¹, 李鹏^{2,3}, 夏朝辉¹, 吴亨^{2,3}, 曹永翔¹, 王添^{2,3}

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 卫星降水产品在弥补地面观测站空间覆盖不足方面起着关键作用,但其较低的空间分辨率和有限的精度限制了在水文学和气候学研究中的直接运用。通过评估全球降水气候中心(GPCC)不同分辨率降水产品,并应用空间降尺度技术提升数据质量,以提升数据应用价值。选取0.25°分辨率GPCC数据,融合多源地理信息,构建多元线性回归模型实施降尺度,成功将其分辨率提高至1 km × 1 km,模型依托内蒙古自治区实测降水数据进行验证。结果表明,所有模型的决定系数值均维持在0.881以上,均方根误差低于37.348 mm,偏差不超过0.041 mm,证明降尺度后数据精确可靠,具备良好地域适应性。研究成果可为深入研究内蒙古自治区水循环过程、指导农牧业生产实践、精准监测干旱状况等提供高分辨率、高质量的卫星降水数据支持。

关键词: 全球降水气候中心(GPCC); 降水; 多元线性回归模型; 空间降尺度

中图分类号: P407

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0190-10

Spatial Downscaling of Inner Mongolia Autonomous Region Based on GPCC Precipitation Data

YUE Fan¹, LI Peng^{2,3}, XIA Chaohui¹, WU Heng^{2,3}, CAO Yongxiang¹, WANG Tian^{2,3}

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in Northwest China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Key Laboratory National Forestry and Grassland Administration Ecological Hydrology and Disaster Prevention
in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Satellite precipitation products play a key role in compensating for the lack of spatial coverage of ground-based observatories, but their low spatial resolution and limited accuracy restrict their direct use in hydrological and climatological studies. Focusing on Inner Mongolia Autonomous Region, this work aims to enhance the value of data application by evaluating the Global Precipitation Climate Centre (GPCC) precipitation products at different resolutions and applying spatial downscaling techniques to improve data quality. This work adopted 0.25° resolution GPCC data, which is then fused by multi-source geographic information, constructed multiple linear regression models to implement downscaling, and successfully increased its resolution to 1 km × 1 km, and the models relied on the measured precipitation data for validation. The results show that the R^2 values of all models are maintained above 0.881, the root mean square error is lower than 37.348 mm, and the deviation does not exceed 0.041 mm, which proves that the downscaled data are accurate and reliable, and have good geographical adaptability. The research results can provide high-resolution and high-quality satellite precipitation data support for in-depth study of the water cycle process in Inner Mongolia Autonomous Region, guidance of agricultural and animal husbandry production practices, and accurate monitoring of drought conditions.

Keywords: global precipitation climate centre (GPCC); precipitation; multiple linear regression model; spatial downscaling

降水是全球水循环中最为关键的因素之一,其时空分布特征及变化直接影响着全球能量交换和物质循环^[1]。同时降水作为生态、水文、气象等学科研究中非常重要的一个变量,在水资源评价、水文模型、水量平衡和水文过程等方面也具有不可或缺的作用,其数据精度的高低直接影响到相关研究分析的准确性及结果的可靠性^[2-4]。故准确厘定不同地区的降水特征对以上研究过程以及相关模型的构建起到至关重要的作用。因此,高精度的空间降水数据便显得尤为重要^[5]。

目前,全球降水产品通过降尺度技术获得高精度降水数据的方法已成为趋势^[6-7]。各种降水产品开始被用于气象水文、生态水文、森林水文等过程的研究^[8-11]。现有的全球降水产品与传统的测站监测数据相比较,具有时间序列完整,时空连续性好和覆盖面广优点,弥补了传统测站分布稀疏,数据缺失,无法准确反应降水时空分布特征等不足^[12-13]。但降水产品自身还存在分辨率、精度较低等不足^[14]。据此,国内外诸多学者为提高降水产品精度进行研究,取得了系列成果^[15-20]。以往研究所用数据源主要是 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 降水数据,时间跨度较短(1998 年一至今),而近百年来全球普遍且持续的变暖趋势,使得降水的时空变化存在很大的不确定性^[21],TRMM 降水数据集无法支撑百年尺度周期下降降水变化的相关研究。目前,中国境内拥有百年观测记录的测站少之又少,使得单纯依靠站点资料进行百年尺度降水研究同样存在困难。在国内外的众多降水产品集中,GPCC (Global Precipitation Climatology Center, GPCC) 降水产品与其他降水产品相比,在同等分辨率下更加符合中国地区的降水空间分布^[22],同时其时间跨度更长(1900 年-至今),能够满足中国境内的百年尺度降水研究,但采用 GPCC 降水数据进行中国地区的适用性研究和空间降尺度的相关研究较少。

内蒙古自治区位于中国北部,草原植被是其主要植被覆盖类型,因其位于多种气候区的过渡带,是中国气候变化最为敏感的地区之一^[23-24],同时也面临着较为严重的生态问题^[25]。故本文以内蒙古自治区为研究区域,比较 GPCC 降水数据与站点观测数据的差异,评估 GPCC 降水数据在内蒙古自治区的适用性,以期为日后内蒙古自治区的气候、生态等相关研究提供数据基础和参考。

1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部,由东北向西南斜伸,呈狭长形,地理位置介于北纬 $37^{\circ}24'$ — $53^{\circ}23'$ 、东经 $97^{\circ}12'$ — $126^{\circ}4'$ 之间,见图 1。拥有森林、草原、湿地、河流和湖泊等多种生态系统,是中国北方的重要生态屏障^[26-27]。全区总面积 118.3 万 km^2 ,地势西高东低,平均海拔 $1\,000$ m 左右,海拔最高点为贺兰山主峰 $3\,556$ m。地貌以山地高平原为主,还包括山地、丘陵、沙漠等多种地貌类型,草地是该区的主要植被类型,草地面积 86.7 万 km^2 ,占自治区总面积的 73% 。河川径流受大气降水及下垫面因素的影响,年径流量空间分布不均,水资源也不平衡,局部地区水量富而有余,但大部分地区干旱缺水。气候以温带大陆性季风气候为主,年总降水量 50 mm ~ 550 mm,由东北向西南部递减^[28],年平均气温为 0 ~ 8°C ,蒸发量大部分地区都高于 $1\,200$ mm,无霜期在 80 d ~ 150 d,年日照量普遍在 $2\,700$ h 以上。

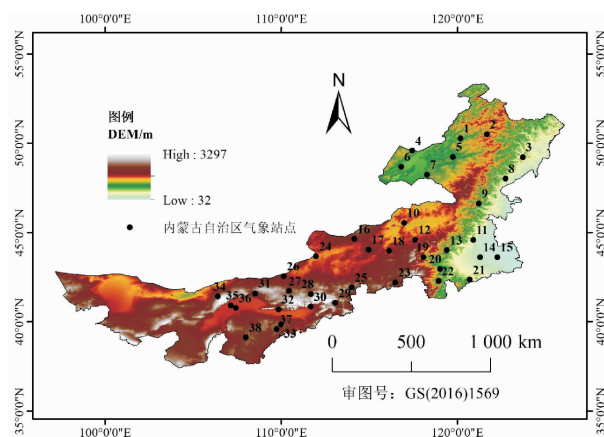


图1 内蒙古自治区及气象站点位置分布图

2 数据来源及方法

2.1 数据来源

2.1.1 GPCC 降水产品

GPCC 降水产品 (<http://gpcc.dwd.de>) 是基于全球 80000 多个气象气候观测站及其他相关区域资料,通过 SPHEREMAP 整合插值而成^[29]。月值数据的空间分辨率包括 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、 $0.50^{\circ} \times 0.50^{\circ}$ 、 $1.00^{\circ} \times 0.50^{\circ}$ 和 $2.50^{\circ} \times 2.50^{\circ}$ 四种。GPCC 降水产品为 NetCDF (Network Common Data Form) 文件格式,使用 ArcGIS 中的多维工具 (Multidimension tools) 打开提取出各实测站点所对应的降水及经纬度数据,用以模型搭建验证及预测。GPCC 降水产

品质量控制方式采用半自动质量控制系统,通过半自动检查将可疑数据标记,并对可疑数据进行人工复查,最终获得修订后的 GPCCC 降水产品,其对陆地年降水量最佳估计的不确定度为 ± 10 mm,主要来源于系统测量误差修正的不确定性^[30]。本文选用 GPCCC 完整月数据产品(2022 版本),空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,并将数据重采样到 0.50° 、 0.75° 、 1.00° 和 1 km 尺度下,时间跨度为 2001—2020 年。

2.1.2 气象站观测数据

中国地面气候资料月值数据集(<https://data.cma.cn/>)由中国 613 个基本、基准地面气象观测站及自动站 1951 年以来气候资料月值数据集,按照《全国地面气候资料(1961—1990)统计方法》进行处理得到,其内容包括气象站点的区间号、经度、纬度、海拔和 20:00—20:00 时降水量等。本文选用中国地面气候资料月值数据集中内蒙古自治区 38 个气象站的数据作为实测资料,时间跨度为 2001—2020 年。

2.1.3 DEM 数据

DEM 数据为 ASTER GDEM 全球数据高程产品,其产品基于“先进星载热发射和反辐射计(AS-TER)”数据计算生成,是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据。ASTER GDEM V2 版则采用了一种先进的算法对 V1 版 GDEM 影像进行了改进,提高了数据的空间分辨率精度和高程精度。初始 DEM 数据为条带状数据,需对其进行数据拼接合成处理,以获得整个研究区的 DEM 数据。本文选用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)中的 GDEM V2 数字高程数据,分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,分别重采样到 0.25° 、 0.50° 、 0.75° 、 1° 和 1 km 尺度下,大致覆盖 97°E — 126°E , 37°N — 60°N 的空间范围。经检查,研究区内无数据空洞。

2.1.4 NDVI 数据

NDVI 数据采用 MODIS 数据中的 MOD13A1 产品,其产品为 16 d 合成的 500 m 分辨率 L3 数据产品,可以准确反映陆地植被变化情况,并有较好的时间和空间适应性,应用较为广泛^[31]。但 NDVI 数据在制作过程中会受到云覆盖,大气干扰等因素的影响,同时在植被覆盖度较高的地方,NDVI 值会出现饱和现象,需要进行去燥平滑处理^[32]。采用传统的最大值合成法对其进行处理,并选取观测像元的最大 NDVI 值作为合成时期 NDVI 的月值和年值数据。数据从 NASA earth data(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)中下载得到,空间分辨率为

$500\text{ m} \times 500\text{ m}$,分别重采样到 0.25° 、 0.50° 、 0.75° 、 1° 和 1 km 尺度下,时间跨度为 2001—2020 年。

2.2 方法

目前广泛应用的降尺度方法主要有二种,分别为动力降尺度^[33]和统计降尺度^[34-36]。动力降尺度是以全球气候模式提供的初始和边界条件为基础,利用对下垫面信息描述更加准确的区域气候模式生成特定区域更高分辨率的大气物理信息,以达到降尺度的目的,此方法具有明确的动力学和物理学基础^[37]。但动力降尺度对降水空间差异模拟方面存在较大的偏差,且计算量大^[38]。统计降尺度即先确定大尺度气象要素与局部气象要素的线性或非线性关系,然后将这种关系应用于全球或区域的输出,以达到对栅格数据进行空间尺度上的转化,是由低分辨率资料获得高分辨率资料的重要方法^[39-40]。由于年降水量小于 1000 mm 的半湿润或干燥地区,NDVI 与降水量呈线性关系^[41],而研究区属于干旱半干旱地区,故本文采用统计降尺度的方法并建立线性回归模型。

2.2.1 降尺度过程

根据已有研究,不同尺度下降水、DEM 和 NDVI 的相关关系存在差异^[42-43]。因此,在降尺度过程中,要建立多个尺度下的降尺度模型以寻求最优解。本文同时考虑经纬度对降水的影响建立模型,降尺度流程如图 2 所示。先分别建立 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、 $0.50^\circ \times 0.50^\circ$ 、 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 和 $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ 分辨率下的降水与 NDVI 和 DEM 等相关因子多年平均值之间的多元线性回归预测模型 M1、M2、M3 和 M4,表达式见下式,计算得到不同分辨率下的预测降水,并对模型进行验证。

$$P_e = aNDVI + bDEM + cLON + dLAT + C \quad (1)$$

其中: P_e 为模型预测降水结果; LON 为经度, ($^\circ$); LAT 为纬度, ($^\circ$); C 为常数项; a 、 b 、 c 、 d 为不同尺度下的拟合系数。

计算残差公式为:

$$\Delta R = GPCC - P_e \quad (2)$$

根据式(2),分别计算 GPCCC 降水产品(0.25° 、 0.50° 、 0.75° 、 1.00°)与预测降水(0.25° 、 0.50° 、 0.75° 、 1.00°)的差值(ΔR),即残差,用以补偿多元线性回归模型预测值而产生的误差,并将各分辨率下的残差通过最邻近内插法重采样到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率,得到 1 km 尺度下的各模型残差 ΔR 。

最后将各模型 1 km 尺度预测结果与 1 km 尺度残差 ΔR 相加即为 1 km 高精度降尺度结果:

$$P = P_e + \Delta R$$

(3)

其中: P 为降尺度结果。

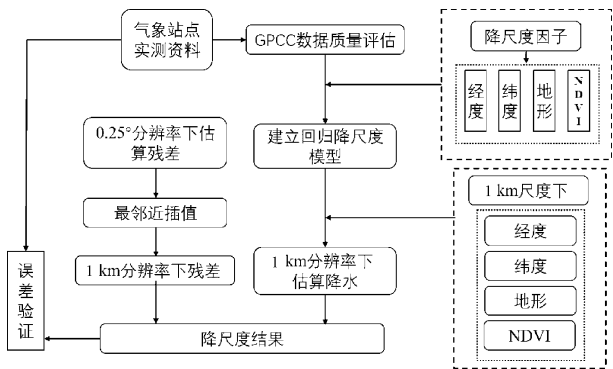


图 2 降尺度流程图

2.2.2 评价指标

本文选用决定系数(R^2), 偏差($Bias$), 均方根误差($RMSE$) 三个指标进行验证^[44-45]。 R^2 越接近 1, 表示两者之间的拟合程度越高。 $Bias$ 表示预测结果与实际观测结果之间的偏离程度, 越接近 0, 表示两者之间的一致性越好。取偏差的绝对值以方便对比。 $RMSE$ 表示预测结果与实际观测结果之间的误差程度, 取值越小, 表示数据之间的误差越小。

验证主要分以下几方面:(1) 分别计算 0.25°、0.50°和 1.00°尺度下原始 GPCC 降水产品与实测数据的 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 指标, 用以对不同尺度 GPCC 降水产品进行质量评估。(2) 对四个不同尺度下的模型进行拟合验证, 分别计算四个模型预测值与原始 GPCC 降水产品之间的三个验证指标。(3) 对降尺度结果进行验证, 判断结果的合理性。

采用 MATLAB R2018a 进行模型搭建, Excel 2010 进行验证计算, ArcGIS Desktop 10.2 软件进行数据预处理与提取, 空间降尺度处理, 图形绘制等。

3 结果与分析

3.1 不同尺度下 GPCC 降水产品质量评估

原始 GPCC 降水产品与实测数据如表 1 所示, 由表 1 中的 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 指标可知, 0.25°与 0.50°尺度下的 GPCC 降水产品质量评估结果良好, 1.00°尺度下平均 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 分别为 0.915、0.008、29.621, 较 0.25°与 0.50°的决定系数减小, 均方根误差增大, 但偏差稳定, 表明 GPCC 降水产品随着分辨率的降低, 与实测数据的相关性逐渐减弱, 误差增加, 但偏离程度稳定。

表 1 不同分辨率下 GPCC 降水产品质量评估

分辨率/(°)	指标	年份									
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
0.25 × 0.25	R^2	0.955	0.956	0.971	0.966	0.976	0.976	0.928	0.964	0.990	0.965
	$Bias$	0.003	0.011	0.003	0.009	0.008	0.008	0.007	0.003	0.004	0.014
	$RMSE/mm$	18.012	20.367	21.747	17.806	20.120	16.660	18.655	17.368	11.361	23.013
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.962	0.959	0.974	0.967	0.978	0.973	0.962	0.965	0.985	0.961
	$Bias$	0.005	0.01	0.004	0.007	0.006	0.009	0.003	0.012	0.008	0.005
	$RMSE/mm$	19.489	22.735	18.033	16.978	20.892	12.587	17.754	21.009	19.136	15.423
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	R^2	0.955	0.926	0.970	0.943	0.974	0.968	0.902	0.948	0.979	0.962
0.50 × 0.50	$Bias$	0.003	0.012	0.001	0.010	0.007	0.007	0.010	0.003	0.005	0.017
	$RMSE/mm$	18.272	25.978	22.515	22.993	20.761	19.673	21.821	21.025	16.219	23.809
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.938	0.959	0.992	0.971	0.966	0.923	0.987	0.949	0.997	0.976
	$Bias$	0.004	0.009	0.002	0.011	0.006	0.008	0.005	0.013	0.003	0.001
	$RMSE/mm$	21.489	22.972	25.345	23.891	18.237	20.678	24.013	22.764	20.895	26.123
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	R^2	0.895	0.920	0.954	0.917	0.942	0.920	0.795	0.928	0.962	0.905
	$Bias$	0.010	0.006	0.002	0.015	0.016	0.008	0.005	0.001	0.007	0.008
1.00 × 1.00	$RMSE/mm$	27.336	27.493	28.227	27.779	31.147	28.491	31.594	25.246	21.715	36.886
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.902	0.876	0.939	0.911	0.898	0.924	0.915	0.950	0.907	0.940
	$Bias$	0.003	0.010	0.005	0.012	0.007	0.004	0.019	0.002	0.009	0.008
	$RMSE/mm$	28.563	33.277	29.841	37.489	26.734	27.958	32.315	34.097	25.724	30.513

2001 年—2020 年 GPCC 降水产品与内蒙古实测站点数据的相关性随 GPCC 降水产品分辨率的降低而减弱,但三个分辨率下 GPCC 降水产品的决定系数除 2007 年外,均达到 0.876 以上,均方根误差都在 37.489 以下,偏差都低于 0.019,表明 GPCC 降水产品能很好地表征 2001 年—2020 年内蒙古自治区降水变化,可用于内蒙古自治区的相关研究。

3.2 不同模型拟合验证

建立了不同尺度下基于 GPCC 降水产品的内蒙古自治区多元线性回归降尺度模型,如表 2 所示。

表 2 不同尺度下模型及决定系数

模型	多元线性模型	R^2
M1	$P_e = 0.0381DEM + 258.8003NDVI + 9.7861LON - 8.6054LAT - 625.1086$	0.820
M2	$P_e = 0.0451DEM + 240.7887NDVI + 10.5888LON - 9.1112LAT - 690.4062$	0.814
M3	$P_e = 0.0366DEM + 245.5710NDVI + 10.3382LON - 8.1821LAT - 695.0103$	0.818
M4	$P_e = 0.0607DEM + 180.2435NDVI + 13.6906LON - 11.6245LAT - 922.9817$	0.745

注:模型均通过显著性检验($p < 0.05$)。

M1 模型决定系数(R^2)为 0.820,其次是 M3(R^2)为 0.818,M2(R^2)为 0.814,而 M4 模型决定系数(R^2)为 0.745。

由于不同尺度下的降水与 NDVI,DEM 的关系存在差异,故模型在不同尺度下的拟合情况也不同,根据不同尺度下 GPCC 降水产品多年平均降水量与模型预测多年平均降水量的散点图如图 3 所示,可直观看出模型预测值与原始数据的相关性,图中散点基本均匀分布在拟合线两侧,趋势明显,表明模型预测效果较好。

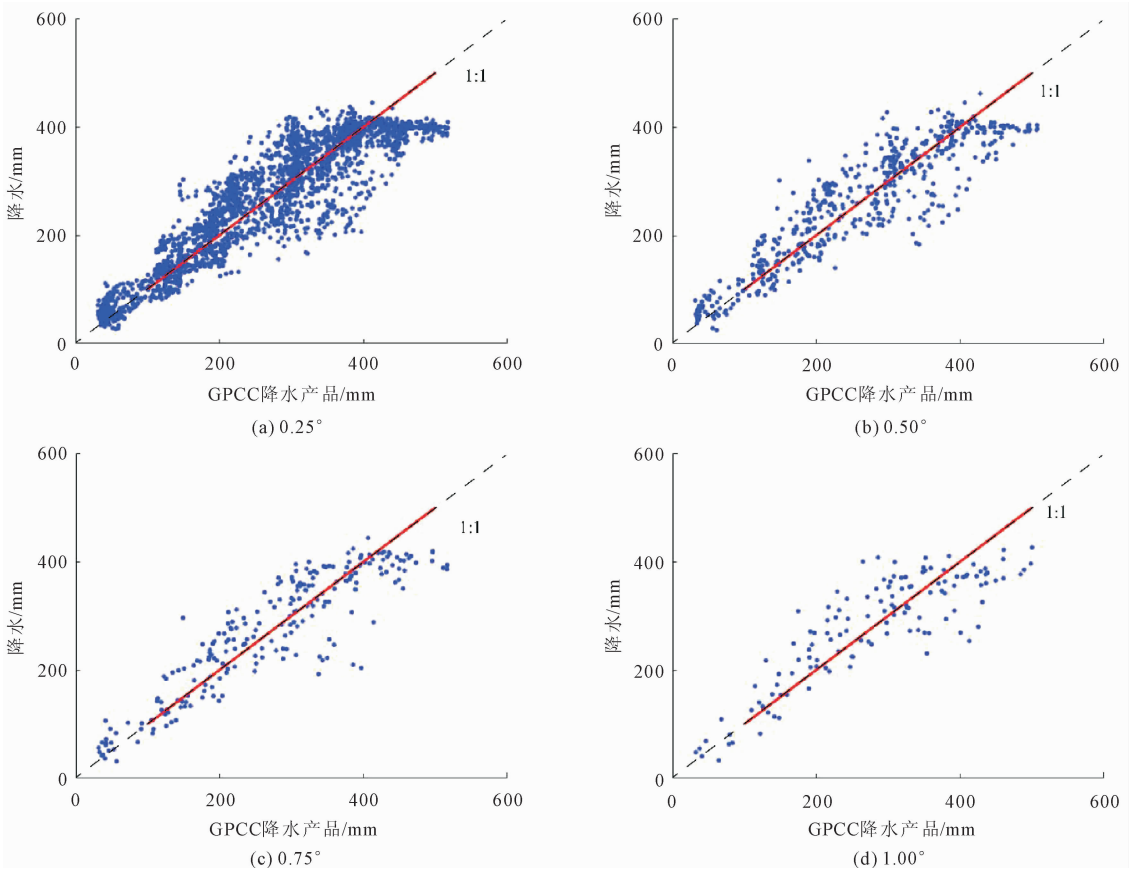


图 3 GPCC 降水产品多年平均降水量与模型预测多年平均降水量散点图

不同尺度下各模型决定系数均大于 0.740,结果良好。为进一步了解不同尺度下模型的预测精度,计算模型预测结果与实测值之间的决定系数,判断模型适用性^[46]。故使用 0.25°下 NDVI、DEM

和经纬度相关因子的数据通过 M1、M2、M3 和 M4 模型分别预测 0.25°下的降水,计算预测值与实测值间的决定系数(R^2)如表 3 所示,用以量化模型精度。

表 3 计算模型预测结果与实测值的决定系数

年份	模型			
	M1	M2	M3	M4
2001	0.683	0.684	0.677	0.669
2002	0.684	0.688	0.682	0.689
2003	0.686	0.688	0.685	0.682
2004	0.734	0.739	0.731	0.745
2005	0.777	0.771	0.777	0.744
2006	0.735	0.730	0.738	0.704
2007	0.540	0.540	0.530	0.528
2008	0.787	0.787	0.789	0.774
2009	0.760	0.746	0.764	0.679
2010	0.738	0.738	0.736	0.735
2011	0.735	0.715	0.726	0.718
2012	0.768	0.759	0.767	0.772
2013	0.718	0.712	0.720	0.717
2014	0.736	0.741	0.738	0.746
2015	0.773	0.776	0.774	0.747
2016	0.733	0.731	0.735	0.707
2017	0.702	0.706	0.708	0.711
2018	0.786	0.788	0.785	0.776
2019	0.758	0.749	0.763	0.682
2020	0.737	0.736	0.734	0.733
平均值	0.729	0.726	0.728	0.713

M1、M2、M3 模型拟合效果较好,仅在 2007 年拟合效果较差,三个模型在 2007 年的 R^2 值均小于 0.6,为最低,其他年份均大于 0.6。M4 模型相对于其他分辨率下的模型拟合效果较差,模型拟合的平均决定系数小于其它三个模型,但与其他三个模型年实际拟合趋势一致,2007 年出现 R^2 最低值 ($R^2 = 0.528$),其他年份均大于 0.6。M1、M2、M3、M4 四个模型均在 2007 年相关性最差,由对 GPCC 降水数据的质量评估(表 1)可知,2007 年的数据质量在同一分辨率数据下均为最低,因此导致模型在 2007 年拟合效果最差。

根据国家《水文基本术语和符号标准》(GB/T 50095—98)中的规定,在水资源分析中常将河川径流分为丰水年、平水年和枯水年。其中,研究期内的 2001 年为枯水年,2003 年为丰水年。表明在丰水年模型拟合效果更好,而枯水年模型拟合效果较差^[47]。丰水年拟合结果优于枯水年,也证明本文所建立的多元线性回归模型可靠,且在丰水年预测效果更好,可以用于空间降尺度。

根据模型 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 的验证结果,M1 模型拟合效果为最优,其次为 M2、M3 和 M4 模型,但模型间差异性较小,故用各模型分别进行降尺度研究。

3.3 降尺度结果及验证

3.3.1 降尺度结果

将四个不同尺度下建立的多元线性回归模型应用于整个研究区域,得到内蒙古自治区的降尺度结果,限于篇幅,研究结果以 2005 年的降尺度过程为例进行展示。图 4(a)是模型预测在 0.25°尺度的降水,图 4(b)是回归模型预测 1 km 的降水。可以看出,模型预测的降水能反映出降水的空间变化情况,从东北向西南递减。其中 1 km 尺度预测结果较 0.25°尺度预测结果更能精细的反映降水空间变化,但在中东部地区,模型预测结果偏大,对于部分东北部极值点,预测结果偏小。

图 5(a)和图 5(b)分别为 0.25°和 1 km 尺度的残差图。可以看出在东北部残差值较大,而中部残差值较小,为负值。这与预测结果产生的误差相符,证明了残差的必要性,以及模型的合理性。

图 6(a)为原始 0.25°GPCC 降水产品,图 6(b)是 1 km 预测值和插值后 1 km 残差值相加的结果,即降尺度结果。最终结果显示,本文所建立的多元线性回归降尺度模型结果能够精细表征降水空间分布情况,并与实测数据具有较好的空间一致性。

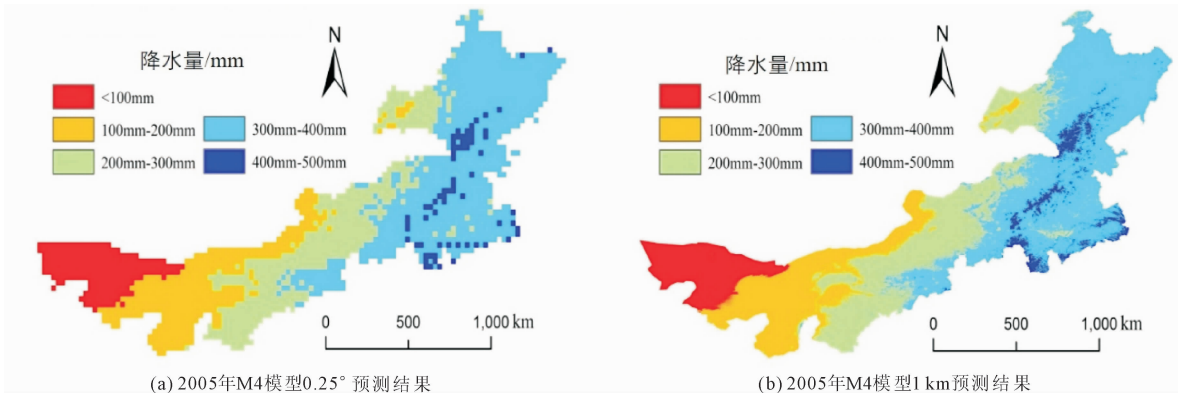


图 4 模型预测降水

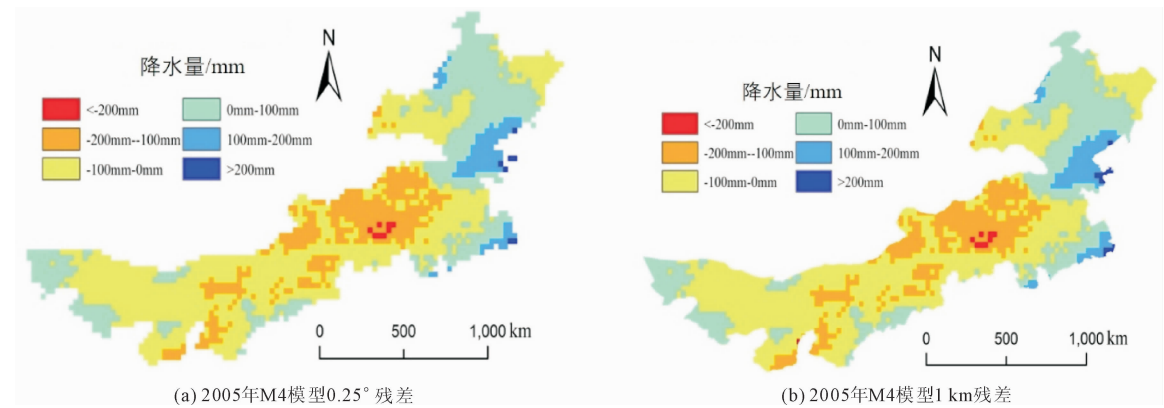


图 5 模型残差

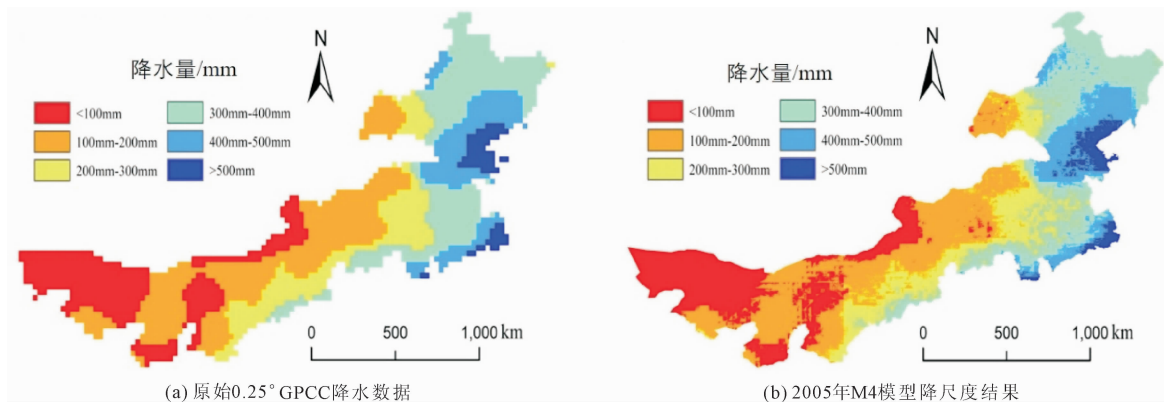


图 6 降尺度前后对比

3.3.2 结果验证

降尺度结果验证如表 4 所示。各个模型结果精度均在年际间变化较大,但丰水年模型精度依然高于枯水年模型精度。各模型的 R^2 都在 0.834 以上, $Bias$ 都在 0.072 之下, $RMSE$ 均低于 42.897。同时 M4 模型的 R^2 高于 M1 模型,且 $Bias$ 和 $RMSE$ 均低于 M1 模型,表明 M4 模型的精度高于 M1 模型。而 M2 和 M3 模型结果精度区别较小,介于 M1 和 M4 模型之间。因此,根据四个模型的 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 可以明显看出 M4 模型精度高于其他三个模型。

与原始 GPCP 降水产品质量验证结果相比,各模型降尺度结果的 R^2 、 $Bias$ 、 $RMSE$ 均比原始数据拟合结果差,但三个验证指标显示, R^2 平均值都在 0.881 之上, $RMSE$ 值都在 37.348 之下, $Bias$ 值都低于 0.041。据此分析,模型最终降尺度结果提高了数据的分辨率,拓宽了 GPCP 降水产品的使用范围,且验证结果依然处于较高可靠性范围内,故认为结果可靠。

综上,M4 模型空间降尺度结果最优,其次为 M2、M3 和 M1 的模型。

4 讨论

M4 模型的降尺度结果最优,而 M1 模型结果最差,与模型拟合验证时的结果相反。这与 Duan 等^[42]研究结果相一致。故本文对降尺度过程中进行重采样的各自变量数据进行了对比,发现分辨率为 $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ 的各自变量数据较分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的各自变量数据波动范围缩小,表明随着重采样数据分辨率的降低,数据之间的空间差异性也随着降低。这与王雷等^[48]的研究结果相似。高分辨率模型受重采样数据空间差异性影响较小,但低分辨率的模型所受影响则较大,故低分辨率模型在预测过程中会出现预测值波动性较弱,与观测值偏差较大的问题,这也是高分辨率模型的拟合结果经验证优于低分辨率模型的原因。但由于随着分辨率的降低,数据的空间差异性逐渐降低,也使得模型的计算残差对结果的影响程度不断提高。对于低分辨率模型,由于数据空间差异性降低,使得残差更能准确的描述数据的波动情况,使其更接近实际观测值,而高分辨率模型则相反。因此,验证结果显示低分辨率模型反而取得了更好的降尺度结果。

表 4 降尺度结果验证

模型	指标	年份									
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
M1	R^2	0.834	0.853	0.911	0.867	0.930	0.884	0.822	0.843	0.925	0.915
	$Bias$	0.040	0.010	0.028	0.059	0.052	0.052	0.044	0.033	0.031	0.020
	$RMSE/mm$	35.090	40.071	40.859	39.203	37.038	36.883	34.388	39.091	32.069	35.294
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.889	0.890	0.943	0.815	0.902	0.851	0.928	0.876	0.907	0.833
	$Bias$	0.064	0.037	0.072	0.031	0.060	0.023	0.049	0.039	0.018	0.056
	$RMSE/mm$	38.456	41.921	36.710	33.278	42.897	37.564	34.152	39.843	31.485	40.673
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
M2	R^2	0.850	0.864	0.919	0.877	0.936	0.895	0.837	0.856	0.934	0.922
	$Bias$	0.037	0.009	0.026	0.056	0.048	0.049	0.040	0.031	0.028	0.018
	$RMSE/mm$	33.105	38.035	38.726	37.363	35.079	34.836	32.219	37.010	29.753	33.647
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.883	0.869	0.921	0.872	0.938	0.892	0.845	0.862	0.932	0.919
	$Bias$	0.023	0.012	0.030	0.053	0.046	0.043	0.035	0.029	0.032	0.014
	$RMSE/mm$	34.567	37.983	38.456	37.234	35.102	34.789	32.345	36.876	30.098	33.578
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
M3	R^2	0.846	0.862	0.916	0.875	0.935	0.893	0.834	0.852	0.931	0.921
	$Bias$	0.038	0.009	0.027	0.056	0.049	0.050	0.041	0.031	0.029	0.018
	$RMSE/mm$	33.677	38.495	39.475	37.716	35.445	35.312	32.784	37.730	30.492	33.957
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.883	0.859	0.907	0.898	0.871	0.923	0.865	0.889	0.910	0.842
	$Bias$	0.033	0.046	0.024	0.039	0.017	0.040	0.030	0.055	0.026	0.048
	$RMSE/mm$	36.248	38.921	34.875	37.503	32.289	39.342	36.064	38.111	33.530	35.097
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
M4	R^2	0.900	0.899	0.941	0.908	0.954	0.930	0.882	0.896	0.959	0.942
	$Bias$	0.028	0.005	0.019	0.045	0.035	0.038	0.029	0.023	0.020	0.011
	$RMSE/mm$	27.105	31.668	32.247	31.820	29.059	28.398	25.720	30.651	22.624	28.992
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	R^2	0.962	0.959	0.974	0.967	0.978	0.973	0.932	0.965	0.985	0.961
	$Bias$	0.005	0.010	0.004	0.007	0.006	0.009	0.003	0.012	0.008	0.005
	$RMSE/mm$	19.489	22.735	18.033	16.978	20.892	12.587	17.754	21.009	19.136	15.423
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010

本文所用 GPCC 降水产品由前人进行了与 CRU 降水产品在中国地区的对比及适用性评估,结果显示 GPCC 降水产品在中国地区适用性更好^[22],故本文只对不同分辨率的 GPCC 降水产品进行了质量评估。而内蒙古自治区的测站存在时空分布不均,在内蒙古西北部测站较少的问题,使得测站所获得的数据在时空分布上缺乏一定代表性,由此也限制了对 GPCC 降水产品的有效评估。在不同尺度下,降水的影响因子不同^[47]。在大尺度上,降水主要受到气象因素的影响,而在中小尺度下,降水受到气象和地形等因素的综合影响。内蒙古自治区平均海拔 1 000 m 左右,属于高原地带,高原地形对降水的形

成涉及到动力和热力等多个方面作用,影响因子众多^[49]。本文所选地理因子较少,仅有 DEM 与经纬度两个相关指标,可能不足以表征气候地形等因素对降水的影响。还可考虑温度、坡向等因子的影响,以提升模型精度。

降水与 NDVI 之间呈正相关关系是本文的基础假设之一,研究区大部分属于干旱半干旱区,植被生长严重依赖于降水,故上述关系在大部分地区依然成立。但由于降水与 NDVI 之间的关系还受到人类活动、地质条件和水文条件等因素的影响,且在内蒙古西北部一些拥有较大绿洲的沙漠地区影响更加显著^[50-51]。这些影响因素的共同作用使得降水与

NDVI 之间的显著性关系降低,进而影响到空间降尺度的结果精度。同时植被的生长还受到了降水,温度,日照等多种因素的影响,但植被生长对降水的响应存在一定的滞后性^[52],本文研究区选在了内蒙古自治区,该区域植被类型以草地为主,考虑到数据的时间尺度为年,草地的青草期一般为 140 d~150 d^[53],故没有考虑 NDVI 对降水的滞后性,由此可能导致模型精度降低。

综上,GPCC 降水产品在内蒙古自治区进行的降尺度结果取得了较高的精度,尤其 1.00° 尺度下的模型预测结果为最优。降尺度结果大幅度提高了降水数据的空间分辨率,使其能更加精细的表征降水空间分布情况,表明基于 GPCC 降水产品的空间降尺度方法在内蒙古自治区具有可行性,其结果可以用于内蒙古自治区的空间降尺度研究。

5 结 论

本文进行了基于 GPCC 降水产品的空间降尺度研究,在前人的研究基础上将 GPCC 降水产品成功运用于内蒙古自治区降尺度研究上。

(1) $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、 $0.50^\circ \times 0.50^\circ$ 和 $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ 分辨率下 GPCC 降水产品的决定系数除 2007 年外,均达到 0.876 以上,均方根误差都在 37.489 以下,偏差都低于 0.019。其中 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率数据精度为最高,决定系数均在 0.928 以上,均方根误差都在 23.031 以下,偏差都低于 0.014。表明 GPCC 降水产品能很好地表征 2001 年—2020 年内蒙古自治区降水变化。

(2) GPCC 降水产品在内蒙古自治区进行的降尺度研究取得了很好的成果,尤其 $1.00^\circ \times 1.00^\circ$ 分辨率下的模型预测结果为最优,并成功获得高精度降水数据(1 km),其结果能很好地表征的内蒙古自治区空间降水变化特征。

参考文献:

- [1] Andy P Dobson, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology[J]. Science, 1997,277:5325.
- [2] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rain fall[J]. Journal of Hydrology, 2000,228(1-2):113-129.
- [3] Langella G, Basile A, Bonfante A, et al. High-resolution space-time rainfall analysis using integrated ANN inference systems[J]. Journal of Hydrology(Amsterdam), 2010,387(3-4):328-342.
- [4] Yang Q Y, Zhang F W, Jiang Z C, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75:37.
- [5] Su F, Hong Y, Lettenmaier D P. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis(TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008,9(4):622-640.
- [6] Wilheit T T. Some comments on passive microwave measurement of rain[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986,67(10):1226-1232.
- [7] Guo J, Liang X, Leung L R. Impacts of different precipitation data sources on water budgets[J]. Journal of Hydrology(Amsterdam), 2004,298(1-4):1-334.
- [8] 王 霞,尹文杰,张梦琳,等. 空间降尺度下云南滇中地区陆地水储量时空变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2023(12):68-76.
- [9] Blyth K. Remote sensing in hydrology[J]. Remote Sensing in Hydrology, 1991,159(1):89.
- [10] 杜 懿,林泽群,庄胜杰,等. GPM 卫星降水产品在长江流域的空间降尺度研究[J]. 遥感技术与应用, 2023,38(3):697-707.
- [11] 黎扬兵,张洪波,杨天增,等. 基于 MGWR 的渭河流域 TRMM 降水产品空间降尺度分析[J]. 农业工程学报,2022,38(23):141-151.
- [12] Chen F R, Gao Y Q, Wang Y G, et al. A downscaling-merging method for high-resolution daily precipitation estimation[J]. Journal of Hydrology, 2020,581:124414.
- [13] 董甲平,冶运涛,顾晶晶,等. 滦河流域遥感降水降尺度多时间特性分析[J]. 水力发电学报,2022,41(8):77-91.
- [14] Allan, Soden. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. Science, 2008,321:1481-1484.
- [15] 达瓦次仁,赵珂珂,古 玉,等. 高海拔地区 TRMM 降水数据空间降尺度分析与模拟——以拉萨河为例[J]. 人民珠江,2022,43(7):120-125.
- [16] 范田亿,张 翔,黄 兵,等. 湘江流域 TRMM 卫星降水产品降尺度研究与应用[J]. 自然资源遥感,2021,33(4):209-218.
- [17] Shi Y, Song L, Xia Z, et al. Mapping annual precipitation across mainland China in the period 2001—2010 from TRMM3B43 product using spatial downscaling approach[J]. Remote Sensing, 2015;7:5849-5878.
- [18] Fang J, Du J, Xu W, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area[J]. Advances in Water Resources, 2013,61(11):42-50.

- [19] Xu S, Wu C, Wang L, et al. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,162:119-140.
- [20] Zheng D, Wang G M, Bastiaanssen. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,131:1-13.
- [21] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. *地理研究*, 2006(6):1031-1040,1148.
- [22] 王丹,王爱慧. 1901—2013年GPCC和CRU降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. *气候与环境研究*, 2017,22(4):446-462.
- [23] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,等. 内蒙古地区近25年植被对气温和降水变化的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11):1594-1601.
- [24] 张清雨,赵东升,吴绍洪,等. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究[J]. *地理科学*, 2013,33(5):594-601.
- [25] 顾西辉,张强,张生. 1961—2010年中国农业洪旱灾害时空特征、成因及影响[J]. *地理科学*, 2016, 36(3):439-447.
- [26] Du B Z, Zhen L, Hu Y F, et al. Comparison of ecosystem services provided by grasslands with different utilization patterns in China's Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(10):1399-1414.
- [27] 王玉华,高学磊,白力军,等. 内蒙古北方生态安全屏障建设研究[J]. *环境与发展*, 2019,31(9):202-205.
- [28] Haiyan Z, Jiangwen F, Wei C, et al. Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015[J]. *Science of The Total Environment*, 2018,639:1038-1050.
- [29] Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present[J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2013,5(2):921-998.
- [30] Schneider U, Becker A, Peter Finger, et al. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2014,115(1-2):15-40.
- [31] Han J C, Huang Y, Zhang H, et al. Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,232:1037-1048.
- [32] 李艳,张成才,罗蔚然,等. 基于改进最大值法合成NDVI的夏玉米物候期遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2019,35(14):159-165.
- [33] Hemer M A, Fan Y, Mori N, et al. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(5):471-476.
- [34] Villarini G, Vecchi G. Twenty-first-century projections of North Atlantic tropical storms from CMIP5 models[J]. *Nature Clim Change*, 2012:604-607.
- [35] 黄玉莹,赵银军,谢琼英,等. 北部湾经济区TRMM降水数据空间降尺度研究[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2019,37(4):163-169.
- [36] 盛夏,石玉立,丁海勇. 青藏高原GPM降水数据空间降尺度研究[J]. *遥感技术与应用*, 2021,36(3):571-580.
- [37] Hong S Y, Kanamitsu M. Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014,50(1):83-104.
- [38] Jacob D, B Rring L, Christensen O B, et al. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate[J]. *Climatic Change*, 2007,81(1):31-52.
- [39] 陈杰,许崇育,郭生练,等. 统计降尺度方法的研究进展与挑战[J]. *水资源研究*, 2016,5(4):299-313.
- [40] 胡保健,李伟,陈传法,等. 利用空间随机森林方法提升GPM卫星遥感降水质量[J]. *遥感学报*, 2024,28(2):414-425.
- [41] Martiny N, Camberlin P, Richard Y, et al. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006,27(23-24):5201-5223.
- [42] Duan L, Fan K, Li W, et al. Spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on multiple high-resolution satellite data for Inner Mongolia, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017(4):1-15.
- [43] 董甲平,冶运涛,顾晶晶,等. 影响滦河流域降水空间分布的多元环境因子作用机制[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023,51(3):38-47.
- [44] 谢伊娜,张洪波,张润云,等. 喀斯特山区TRMM降水数据降尺度研究[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2024,41(3):31-38,48.
- [45] 旷兰,田茂举,李强,等. 多源降水融合分析产品在重庆复杂地形下的精度评价[J]. *中国农业气象*, 2023,44(1):71-81.