

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0090

顾晶晶, 冶运涛, 董甲平, 等. 滦河流域遥感反演降水产品高精度空间降尺度方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 862-873. GU J J, YE Y T, DONG J P, et al. A high-precision spatial downscaling method for remotely sensed precipitation data in the Luanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 862-873. (in Chinese)

# 滦河流域遥感反演降水产品高精度空间降尺度方法

顾晶晶<sup>1,2,3,4</sup>, 冶运涛<sup>1,4</sup>, 董甲平<sup>1,2,3,4</sup>, 曹引<sup>4</sup>, 赵红莉<sup>4</sup>, 蒋云钟<sup>4</sup>

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070; 4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:**以滦河流域为研究对象,对流域 2018 年 GPM(global precipitation measurement mission)降水产品适用性进行评估;利用降水与海拔、经纬度和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)之间的相关性,构建基于 PSO-BP(particle swarm optimization-back propagation)的 GPM 降水空间降尺度模型,得到 2018 年滦河流域空间分辨率 1 km 的降水数据。结果表明:原始 GPM 降水产品可以较准确地表达滦河流域降水,但总体存在降水量高估现象;以国家气象中心降水产品 CGDPA(China gauge-based daily precipitation analysis)数据为基准,对空间降尺度前后的降水数据进行精度评估,发现在年、季和月不同时间尺度上,空间降尺度后的降水数据与 CGDPA 数据相关性更高,均方根误差更小,相对偏差值控制在±10%以内,这说明降尺度后降水数据空间分辨率和精度都更高。

**关键词:**滦河流域;降水降尺度;PSO-BP 模型;GPM

中图分类号:TP79; P339 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



降水作为地球水循环系统的关键组成部分,在水圈、大气圈、生物圈的相互作用中扮演着重要角色<sup>[1-2]</sup>,受大气环流和下垫面的影响,降水具有高度时空异质性<sup>[3-4]</sup>。传统降水数据主要来源于雨量站观测,精度较高,但由于站点密度低、空间分布不均,插值结果无法准确重现站点缺乏地区降水空间分布<sup>[5]</sup>。

随着遥感技术快速发展,卫星降水产品因其时间和空间连续性优势,在水文研究中得到广泛应用<sup>[6-7]</sup>,且站点数据可替代性研究表明,在缺少雨量站点降水数据区域,卫星降水产品可替代站点数据进行区域水文研究和模拟<sup>[8-10]</sup>。自热带降水测量任务卫星发射以来,大量降水产品陆续出现,目前最常用的全球遥感降水产品主要包括全球降水卫星制图

(global satellite mapping of precipitation, GS-MaP)、CMORPH (climate prediction center morphing technique)和全球降水观测计划 GPM(global precipitation measurement mission)等<sup>[3]</sup>。GPM 作为新一代遥感降水产品是目前最先进的降水观测产品,它不仅继承了 TRMM(tropical rainfall measuring mission)的优势,且在微量降水和固态降水方面有更高的观测精度,覆盖范围已扩展至全球<sup>[11]</sup>。IMERG (integrated multi-satellitE retrievals for GPM)作为 GPM 的三级产品,时间和空间分辨率分别为 30 min 和 0.1°(约 10 km),虽然相较于大多数降水产品空间分辨率较高,但对于精细化模拟研究,空间分辨率仍然太低<sup>[12]</sup>。为解决这一问题,国内外

收稿日期:2021-01-27 修回日期:2021-06-15 网络出版时间:2021-06-24

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210624.0942.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407705;2017YFC0405804);中国博士后科学基金项目(2019M660092XB);兰州交通大学优秀平台支持(201806)

作者简介:顾晶晶(1994—),男,甘肃天水人,主要从事水资源遥感研究。E-mail:gjj1311923511@163.com

通信作者:冶运涛(1982—),男,河南许昌人,正高级工程师,博士,主要从事水信息学、水资源遥感及流域水循环模拟研究。E-mail:yeyun-tao@iwhr.com

学者<sup>[2-6]</sup>已建立了大量的遥感反演降水产品的空间降尺度方法。

降水空间降尺度可概括为动态降尺度和统计降尺度两类。动态降尺度主要通过全球环流模式和区域气候模式来达到降尺度目的,这类方法往往需要大量的计算资源来完成,且气候数据本身分辨率较低,因此对遥感降水的空间降尺度效果不佳。统计降尺度方法通过建立降水与高空间分辨率影响因子之间非线性关系,提高降水的空间分辨率和精度,相对而言,此方法在国内外应用广泛且效果较好<sup>[13]</sup>。统计降尺度常用方法包括地理加权回归、多元线性回归、BP神经网络、深度学习等,已被广泛应用于太行山区<sup>[2]</sup>、雅鲁藏布江流域<sup>[6]</sup>、黄河源区<sup>[14]</sup>以及中国东北地区<sup>[15]</sup>等,在众多降水降尺度研究中,海拔和 NDVI 被认为是降水的主要解释变量<sup>[16]</sup>。

近年来,国内学者<sup>[17-20]</sup>已经对卫星降水产品适用性进行了大量的研究,研究区多集中在全国尺度(如:中国中东部、中国南方地区等)或典型区域(如:青藏高原、太行山等),而在流域尺度评估较少。滦河流域地形复杂,降水的空间变异性大,近年来学者<sup>[21-23]</sup>对滦河流域蒸散发、降水和相对湿度等方面已经开展了相关研究,但研究中降水

数据通常利用滦河流域内及流域附近雨量站点数据插值得到,结果难以准确再现流域内降水空间分布。

综上所述,以滦河流域为研究区,在对 GPM 降水产品适用性评估基础上,基于海拔、经纬度和 NDVI(normalized difference vegetation index),在多时间尺度(年、季和月)构建 GPM 降水产品 PSO-BP(particle swarm optimization-back propagation)空间降尺度模型,并以 CGDPA(China gauge-based daily precipitation analysis)作为基准数据,对空间降尺度前后的 GPM 降水产品进行精度对比。

## 1 研究区概况和数据源

### 1.1 研究区概况

滦河( $39^{\circ}1'N\sim 42^{\circ}40'N, 115^{\circ}30'E\sim 119^{\circ}45'E$ )地处华北平原,是渤海独流入海河流,发源于内蒙古坝上高原,流经冀北山地丘陵,中游过燕山山地,下游为河北平原,全长 888 km,流域地势呈现北高南低。滦河是河北省第二大河,河流沿途的潘家口水库和大黑汀水库是引滦入津工程的重要水源地。流域面积约 54 580 km<sup>2</sup>,多年平均径流量为 46.1 亿 m<sup>3</sup>,常出现连续丰水和枯水现象,年均降水量 500~800 mm。滦河流域位置及海拔见图 1。

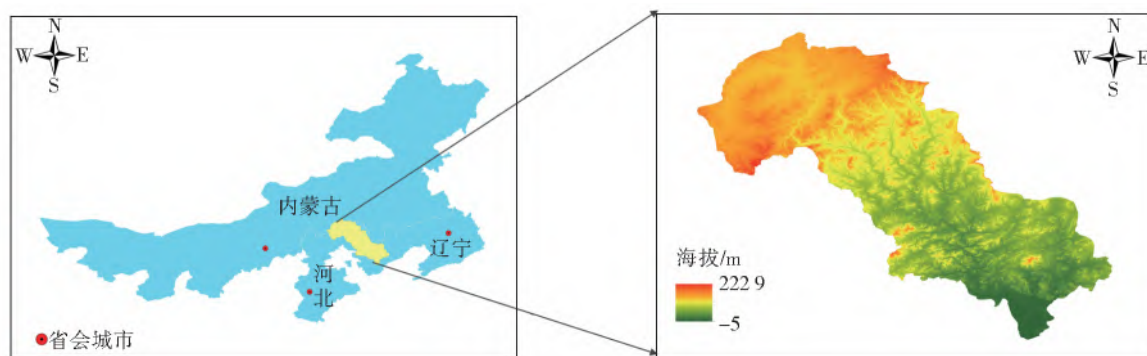


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

### 1.2 数据源

基础数据包括遥感反演降水产品 GPM、降水再分析产品 CGDPA、DEM(digital elevation model)和 NDVI。

GPM 降水产品的 IMERG 数据集包括近实时产品 Early、Late 和后处理产品 Final,其中 Final 产品已通过地面观测降水校正,在陆地区域有更高的精度<sup>[24]</sup>。本研究使用的降水产品是 GPM-3 IMERG Final 数据集(简称 GPM),空间分辨率 0.1°,由 NASA 官网(<https://search.earthdata.nasa.gov/>)

免费提供。

CGDPA 数据是以中国国家 2 419 个地面雨量站点数据为基础,利用“基于气候背景场”的最优插值方法制作的格点数据,空间分辨率 0.25°。该数据集精度高,可用于评估遥感反演降水产品适用性及降水降尺度数据精度<sup>[25-27]</sup>,数据来源于国家气象数据共享服务中心(<http://data.cma.cn/>)。

NDVI 数据是美国航天局(<https://lpdaac.usgs.gov/>)免费提供的 MOD13A3 数据集,空间分辨率为 1 km,时间间隔为 1 月。DEM 数据来源于

STRM DEM 数据集 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>), 空间分辨率 30'。上述数据中, 原始 GPM 和 CGDPA 产品为 2018 年逐日数据, NDVI 为 2018 年逐月数据。

## 2 研究方法

### 2.1 GPM 产品适用性及降尺度后精度评估方法

滦河流域 GPM 产品适用性及降尺度后降水数据精度评估基本思路: 利用双线性内插方法将 CGDPA 数据重采样为 0.1° 和 1 km, 以重采样后数据作为基准, 通过定量分析指标评估 GPM 降水产品适用性及降尺度后降水数据精度。定量分析指标包含: 相关性 (correlation coefficient, CC), 用来表示数据间相关程度高低, 区间 0~1; 均方根误差 (root mean square error, RMSE), 表征待评价数据与基准数据间的离散程度; 相对偏差 (relative deviation, DR), 反映遥感对降水高估或低估现象<sup>[28]</sup>。各指标计算公式为

$$R_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (2)$$

$$R_D = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^n X_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $R_{CC}$ 、 $R_{MSE}$ 、 $R_D$  分别表示相关性、均方根误差和相对偏差;  $X_i$ 、 $Y_i$  分别表示 CGDPA 和遥感反演降水量, mm;  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别表示 CGDPA 和遥感反演降水量平均值, mm;  $n$  表示研究区内栅格数量。

### 2.2 遥感降水产品空间降尺度方法

#### 2.2.1 BP 和 PSO 算法原理

BP(back propagation) 神经网络的模型是一种误差反向传递的多层前馈算法, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一<sup>[29]</sup>。网络拓扑结构由输入层 ( $I$ )、隐含层 ( $H$ ) 和输出层 ( $O$ ) 组成, 其算法包括信号正向传递和误差反向传播两部分, 具体训练过程如下。

隐含层输出计算。假设输入层和隐含层的神经元个数分别为  $n$  和  $l$ , 则  $H$  计算公式为

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i - a_j\right) \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

式中:  $j=1, 2, 3, \dots, l$ ;  $x_i$  代表输入层第  $i$  个节点值;  $\omega_{ij}$  表示输入层到隐含层的连接权重;  $a_j$  表示隐含层第  $j$  个节点的阈值;  $f$  为隐含层激励函数, 本文选择式(5)。

输出层输出计算。假设输出层节点数为  $m$ , 则  $O$  计算公式为

$$O_k = f\left(\sum_{j=1}^l (\omega_{jk}H_j - b_k)\right) \quad (6)$$

式中:  $k=1, 2, 3, \dots, m$ ;  $\omega_{jk}$  表示隐含层到输出层连接权值;  $b_k$  表示输出层第  $k$  个节点的阈值; 其中激励函数  $f$  选择式(5)。

误差计算。本文根据网络预测  $O$  和期望输出  $Y$  计算网络误差  $e$ , 此误差可作为粒子寻优算法优化 BP 神经网络的适应度函数。网络误差  $e$  为

$$e_k = Y_k - O_k \quad (7)$$

式中:  $e_k$  表示第  $k$  个节点的网络误差;  $Y_k$  表示第  $k$  个节点的网络期望输出;  $O_k$  表示第  $k$  个节点的网络预测。

最后将网络预测误差逆向传递, 并对网络权值和阈值进行调整, 直至网络误差  $e$  达到预先设置误差后迭代停止。

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种模拟鸟类觅食的仿生算法, 具有全局寻优能力<sup>[30]</sup>。算法基本原理: 在随机生成的粒子群中, 每一个粒子都是一个潜在最优解, 基于适应度函数计算每个粒子的适应度值, 在每一次迭代中, 比较个体极值与群体极值, 根据公式(8)和(9)更新粒子速度和位置, 直到达到条件结束循环<sup>[31]</sup>。

$$V_i = \omega V_i + c_1 r_1 (p_{best_i} - x_i) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i) \quad (8)$$

$$x_i = x_i + V_i \quad (9)$$

式中:  $V_i$  表示更新后粒子速度;  $x_i$  表示更新后的粒子位置;  $\omega$  为惯性因子, 一般大于零;  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数, 一般为正数;  $r_1$  和  $r_2$  为 0 到 1 之间的随机数;  $p_{best}$  和  $g_{best}$  分别为个体极值和群体极值。

PSO 算法优化 BP 神经网络模型。BP 神经网络训练大多采用梯度下降法, 训练精度与初始值参数设定、激励函数和学习速率等关系密切, 这使得模型存在极强的不确定性, 且训练容易陷入局部最优解。故利用 PSO 寻优算法对 BP 神经网络

模型进行优化,利用 PSO 算法的全局寻优能力,将最优权值和阈值赋予 BP 神经网络,提高 BP 神经网络模型的稳定性和预测精度<sup>[32]</sup>。PSO-BP 模型的基本思路:首先确定 BP 神经网络拓扑结构,即输入层、隐含层和输出层节点数,然后以每个粒子的速度和方向向量代表 BP 神经网络的初始权值和阈值,本文以 BP 神经网络模型中预测输出与期望输出的误差[式(7)]绝对值和作为适应度函数,通过迭代计算,直到寻找到最优粒子停止计算,得到 BP 神经网络模型的最优权值和阈值。PSO-BP 模型流程见图 2。

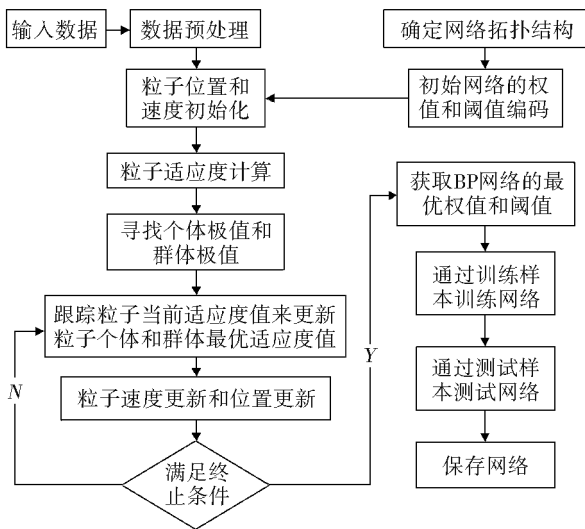


图 2 PSO 优化 BP 神经网络模型流程

Fig. 2 BP neural network model optimized by particle swarm optimization algorithm

### 2.2.2 遥感降水产品空间降尺度模型

降水是气象和环境因子综合作用的结果,在众多的降水空间降尺度研究中,海拔、经纬度和 NDVI 被认为是降水的主要影响因子<sup>[6]</sup>。通过文献调研和分析,基于降水与其影响因子在粗尺度上的统计关系,并假设在细尺度上这种关系保持不变<sup>[33-36]</sup>,对卫星反演降水产品进行空间降尺度。利用 PSO-BP 模型对 GPM 降水产品空间降尺度包括以下步骤。

(1) 数据准备。将 GPM、CDGPA、NDVI 和 DEM 数据重分别采样至 1 km 和 0.1°分辨率,重采样方法均为双线性插值,并利用 ArcGIS 提取不同空间分辨率下像元的中心经纬度值。

(2) 构建 PSO-BP 降尺度模型。以 0.1°分辨率的 GPM、海拔、经纬度和 NDVI 作为 PSO-BP 的模型输入,以 0.1°CGDPA 数据作为模型期望输出,分别训练在 0.1°空间分辨率下的年、季和月尺度 PSO-BP 模型。

(3) GPM 降水空间降尺度。基于已训练的 PSO-BP 降尺度模型,以 1 km 分辨率的 GPM、海拔、经纬度和 NDVI 作为模型输入,估算 1 km 分辨率的 GPM 降水数据。图 3 给出了基于 PSO-BP 的 GPM 降水降尺度流程。

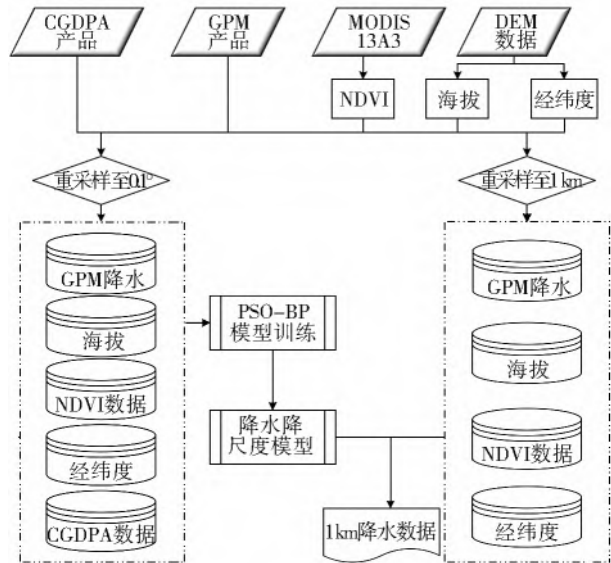


图 3 GPM 降水降尺度流程

Fig. 3 Flow chart of GPM precipitation downscaling

## 3 结果分析

### 3.1 GPM 降水适用性评估

由于降水具有明显的时空变异性,卫星降水产品的适用性和精度在不同时间尺度上也存在差异,因此分别在年、季和月尺度上评估了 GPM 卫星降水产品在滦河流域的适用性及精度。

#### 3.1.1 年、季尺度 GPM 降水适用性评估

图 4 给出了以 CGDPA 为基准的 GPM 降水产品在年和季尺度适用性评估散点图。从图 4(a)可以看出,两种产品年均降水量相关性为 0.59,且图中大部分点分布在 1:1 线之上,即 GPM 产品降水估算量偏高,相对偏差值(12.09%)也反映出 GPM 产品对降水的高估现象。

依照常用季节划分,图 4(b)、4(c)、4(d)和 4(e)分别是 2018 年春、夏、秋、冬 GPM 降水适用性评估散点图。从图 4(b)~4(e)可以看出,相关性从高到低依次为春、冬、秋、夏,均大于 0.62,相关性较好。滦河流域降水主要集中在夏季且常出现强降雨,导致数据异常值较多,均方根误差最大。相对偏差除了春季小于 0 外,其余均大于 0,这说明除了春季外,在其他季节 GPM 降水量都存在高估现象,其中秋季最大(26.70%),其次为夏季(12.84%),这与许凤林等<sup>[24]</sup>对黄淮海平原研究结果一致。



### 3.1.2 月尺度 GPM 降水适用性评估

图 5 给出了逐月的降水量适用性评估散点图, 统计适用性评估指标数据见表 1。从图 5 可以看出, 4、5、7 和 12 月相关系数在 0.85 以上, 3、6、9 和 11 月相关系数在 0.70~0.80, 整体相关性较好。表 1 可以看出, 夏季(6、7 和 8 月)的均方根误差相较于其他季节较高, 降水集中且暴雨频发是主要原因<sup>[2,20]</sup>。

相对偏差除了 1、3 和 4 月外, 其余月份都大于 0, 符合大多数研究中 GPM 降水产品存在一定程度高估的结论<sup>[19,21]</sup>。整体上, 由于 GPM 数据在降水量较大或较小时都存在较大的误差<sup>[2]</sup>, 因此, 在滦河流域, 1 月和 8 月与 CGDPA 产品的相关性较低, 且相对偏差在 1、2、10 和 11 月较大。

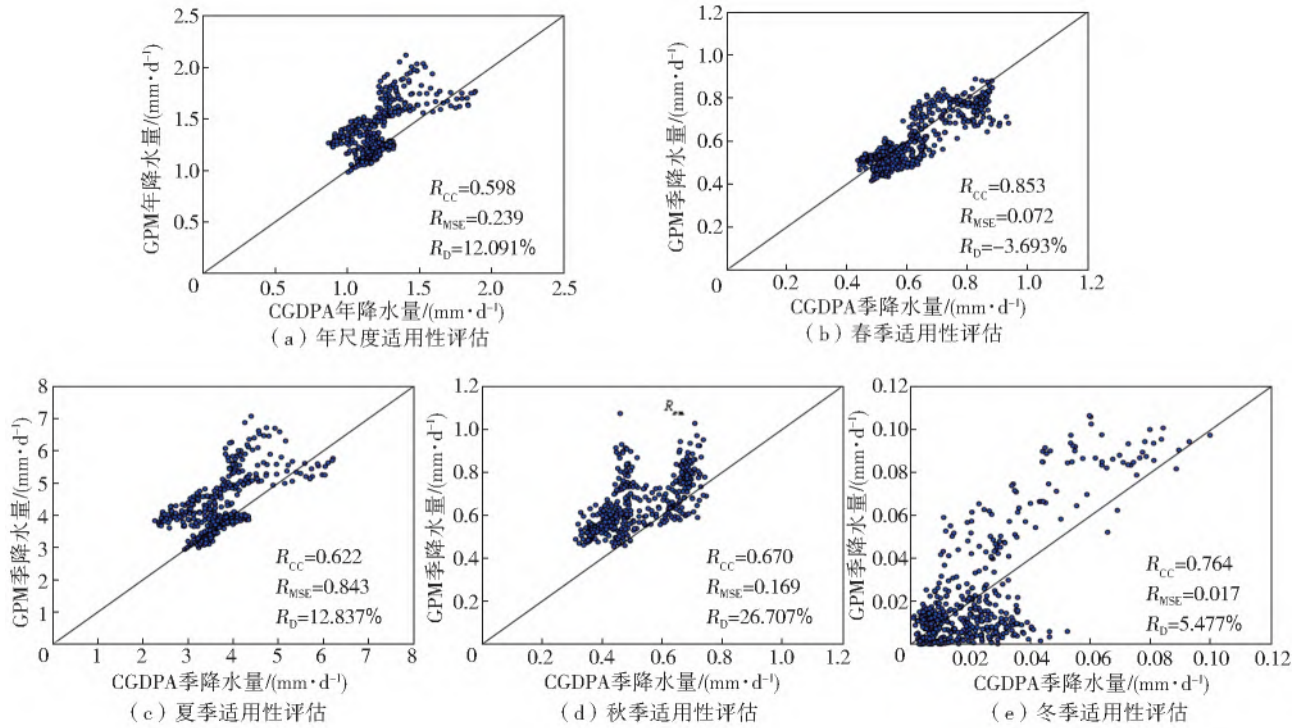


图 4 GPM 产品年、季尺度适用性评估

Fig. 4 Suitability evaluation of GPM at annual and seasonal scales

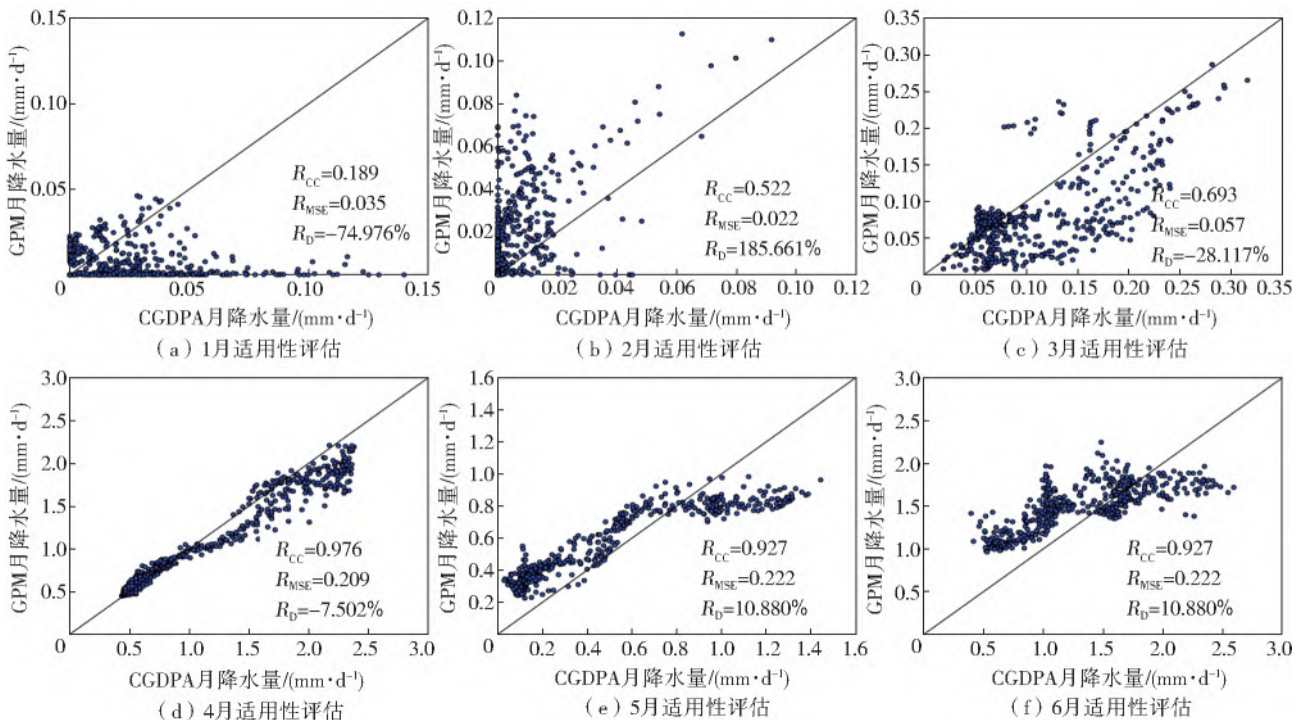


图 5 GPM 产品月尺度适用性评估

Fig. 5 Suitability evaluation of GPM at monthly scale

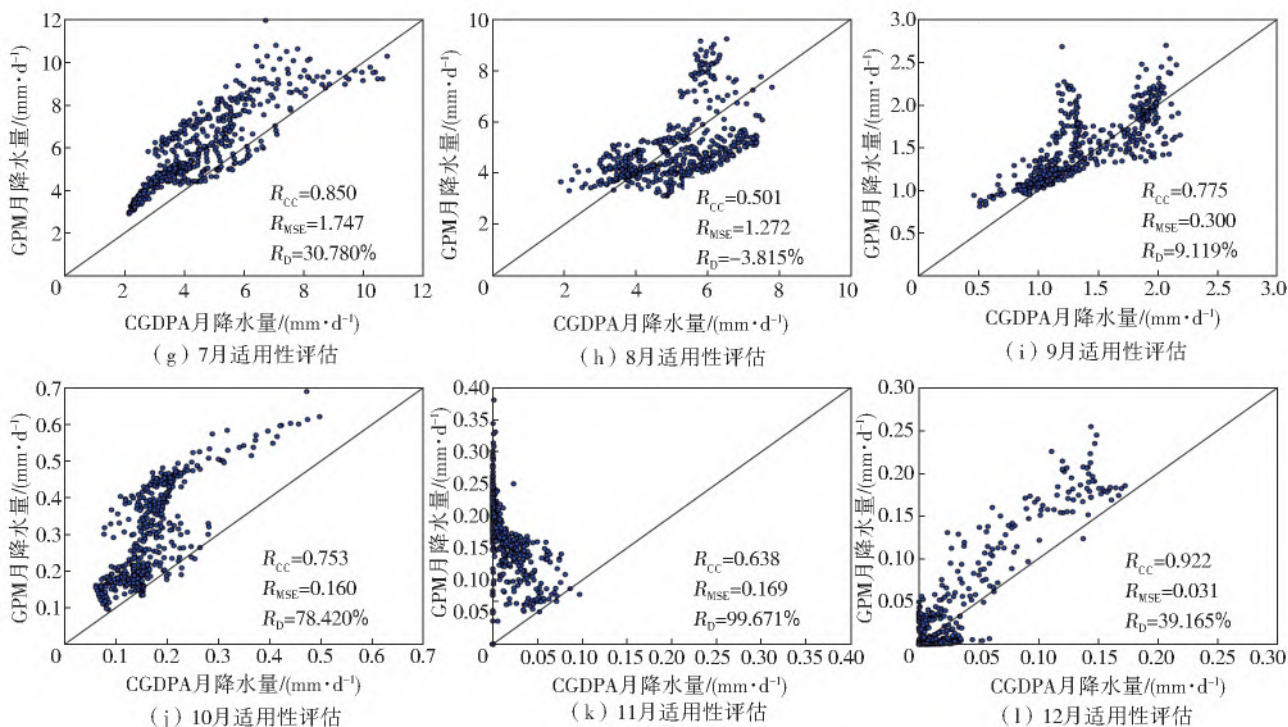


图5 (续)

Fig. 5 (Continued)

表1 月尺度适用性评估指标

Tab. 1 Suitability assessment index of GPM at monthly scale

月份	相关性(排序)	均方根误差(排序)	相对偏差/%
1	0.189(12)*	0.035(3)	-74.976*
2	0.522(10)*	0.022(1)	185.661*
3	0.693(9)	0.057(9)	-28.117
4	0.976(1)	0.209(7)	-7.502
5	0.927(2)	0.222(8)	10.880
6	0.751(7)	0.398(10)*	13.939
7	0.850(4)	1.747(12)*	30.780
8	0.501(11)*	1.272(11)*	-3.815
9	0.775(5)	0.300(4)	9.119
10	0.753(6)	0.160(5)	78.420*
11	0.638(9)	0.169(6)	99.671*
12	0.922(3)	0.031(2)	39.165

注:表中“\*”代表各指标较差统计值。

### 3.2 GPM降尺度精度评估

#### 3.2.1 年、季尺度GPM降水降尺度精度评估

以年降水量为例,图6给出GPM降水数据降尺度前后空间分布对比,可以看出降尺度后降水数据的空间分辨率相对于原始GPM产品得到显著提高,而降尺度前后降水空间分布一致。为进一步验证降尺度后降水数据精度,以插值后1 km的CGDPA为基准数据,计算降尺度后降水数据与CGDPA的相关性、均方根误差和相对偏差指标。图7给出

了降尺度后降水数据精度评估散点图。

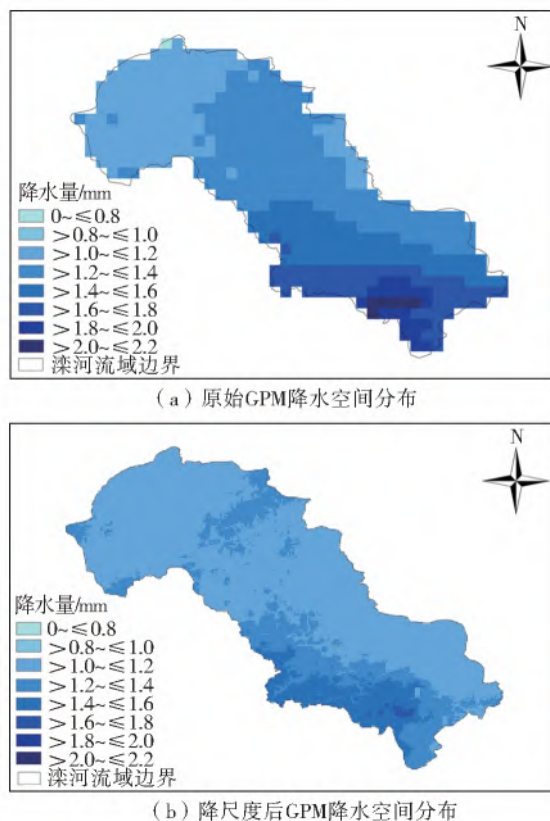


图6 原始GPM(a)和降尺度后GPM(b)年均降水空间分布

Fig. 6 Spatial pattern of original GPM data(L) and downscaling GPM data(R) at annual

从图7可以看出,降尺度后降水数据与CGDPA产品相关性均在0.800以上,相关性较好,相较



于 GPM 原始数据,在年尺度上,相关性提高了 0.217,在春、夏、秋和冬季,相关性分别提高了 0.041、0.208、0.288 和 0.141。对比降尺度前后均方根误差和相对偏差,降尺度前为 0.017~0.840,而降尺度后为 0.009~0.373,数据离散程度明显减小,尤其在夏季,由于原始 GPM 数据存在较多异常值<sup>[2,24]</sup>,均方根误差高达 0.843,而降尺度后均方根

误差明显减小。降尺度前相对偏差为-3.693%~26.707%,而降尺度后减小到-1.018%~2.017%,在各时间尺度上都不同程度地降低。从图 7 散点图可以直观看出,降尺度后的降水数据聚集在 1:1 线上,这说明提出的降尺度方法可以在年尺度和季节尺度上有效改善 GPM 降水精度。

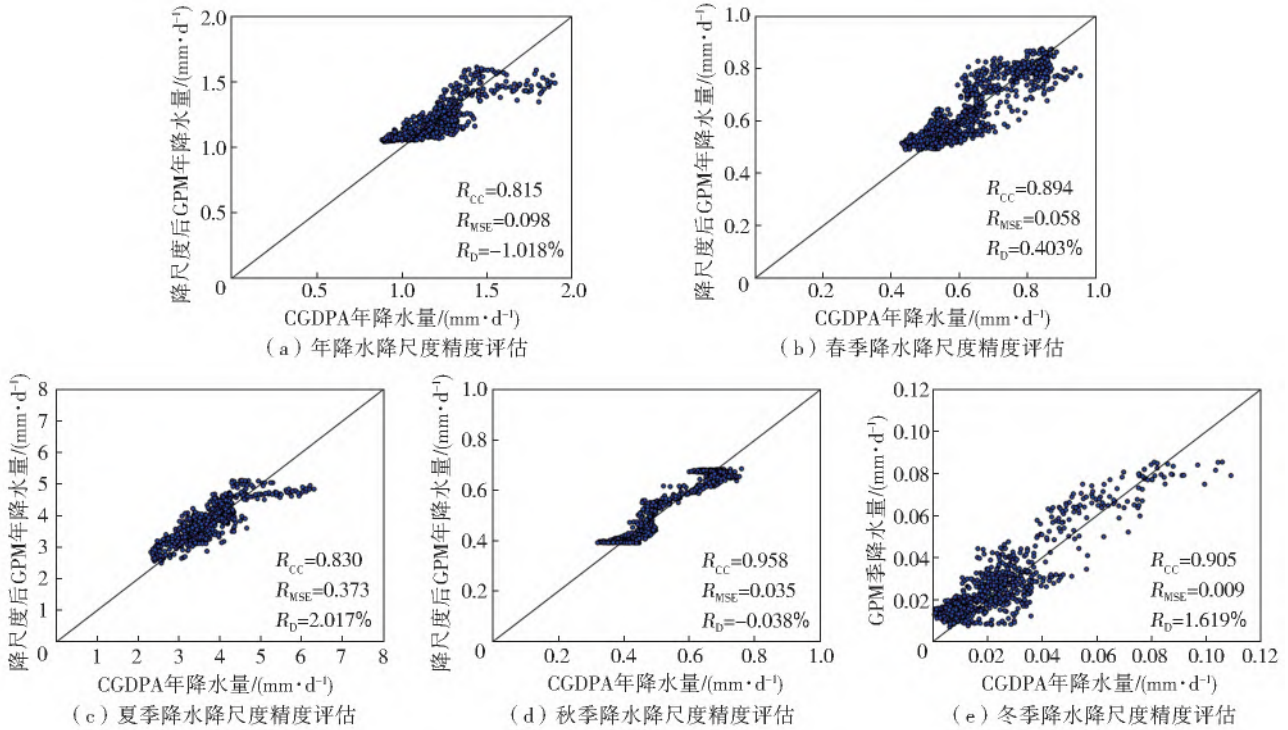


图 7 年、季尺度降水降尺度后精度评估

Fig. 7 Accuracy evaluation of downscaling precipitation at annual and seasonal scale

### 3.2.2 月尺度 GPM 降水降尺度精度评估

逐月降尺度后降水精度评估散点图见图 8,统计降尺度前后降水数据精度评估指标见图 9。从图 9 可以看出,与原始 GPM 数据和 CGDPA 产品精度评估相比,降尺度后相关性都有一定程度的提高,均方根误差和相对偏差有所下降。从图 9(a)可以看出,降尺度后相关性均提高到 0.8 以上,且大于 0.9 的有 7 个月,其中 1、2、3、8 和 11 月提升显著。如图 9(b)和

9(c)所示,均方根误差在 4、7 和 8 月得到明显改善,相对偏差除 1 月和 2 月外,其余月份均降低到±10%以内。其中除 1、2 和 11 月外,其他月份相对偏差均小于 0,即降尺度后的降水量在一定程度上低估了实际降水,这与熊俊楠等<sup>[37]</sup>研究结果一致。就平均而言,降尺度后相关性提高了 0.21,均方根误差降低了 0.28,综上所述,相较于原始 GPM 数据,降尺度后数据空间分辨率和精度都更高。

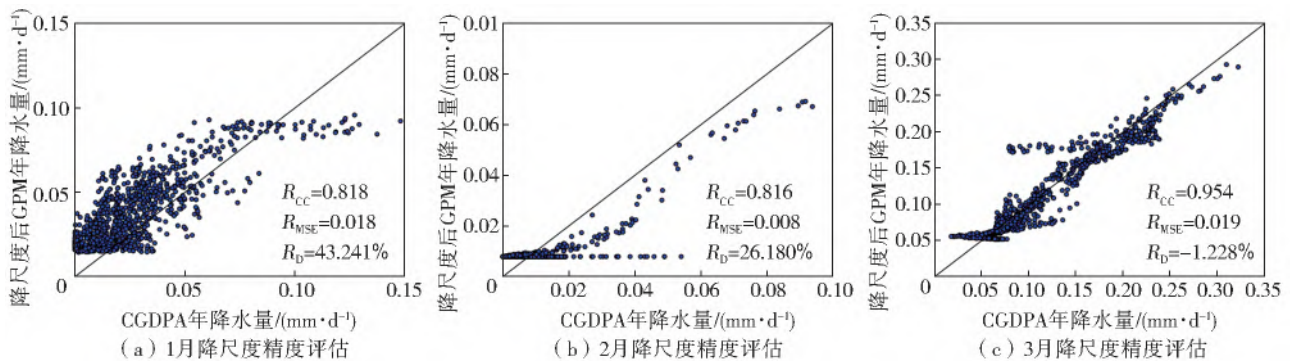


图 8 GPM 月尺度降水降尺度前后精度对比

Fig. 8 Accuracy comparisons with original GPM and downscaling GPM at monthly scale

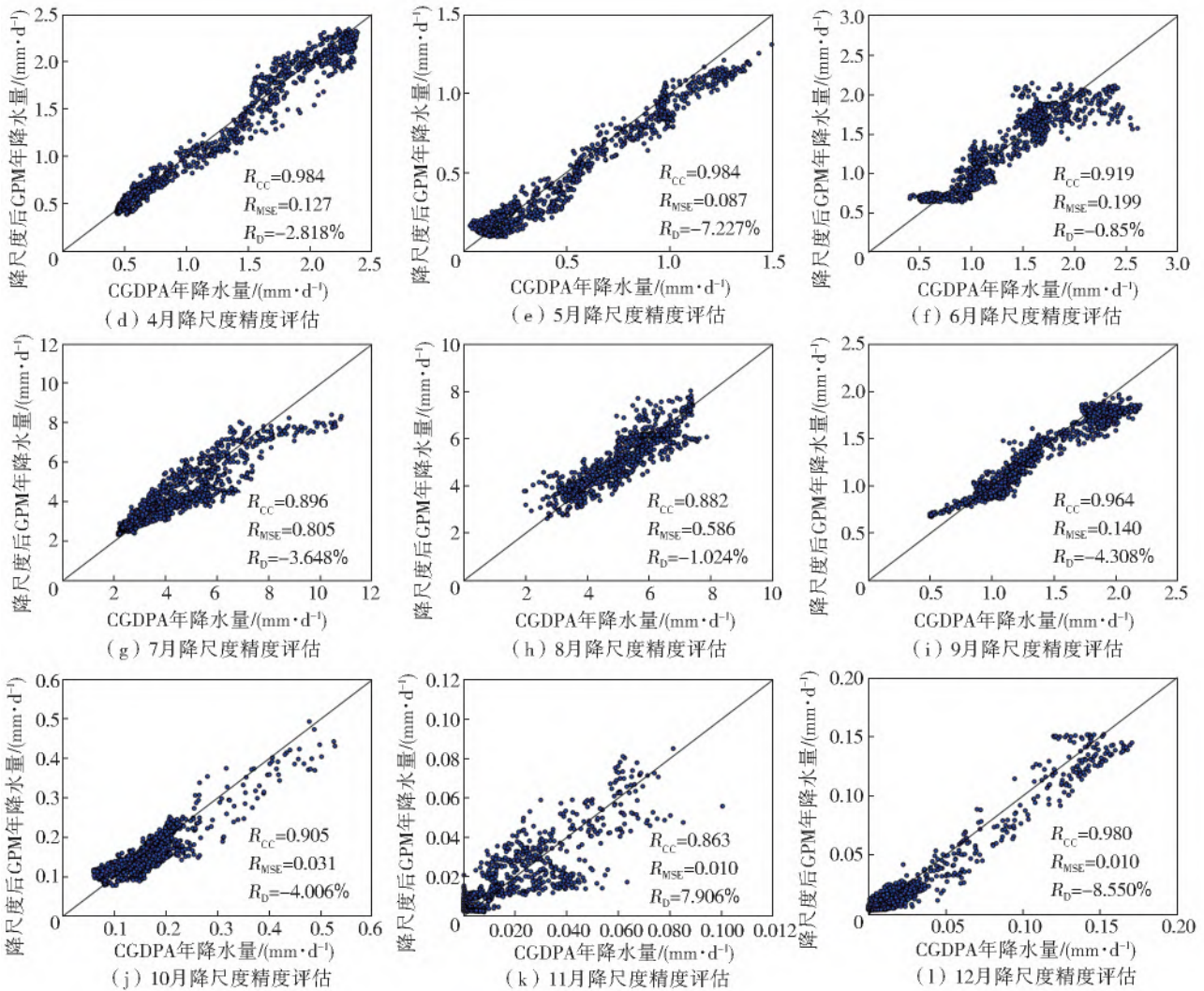


图8 (续)

Fig. 8 (Continued)

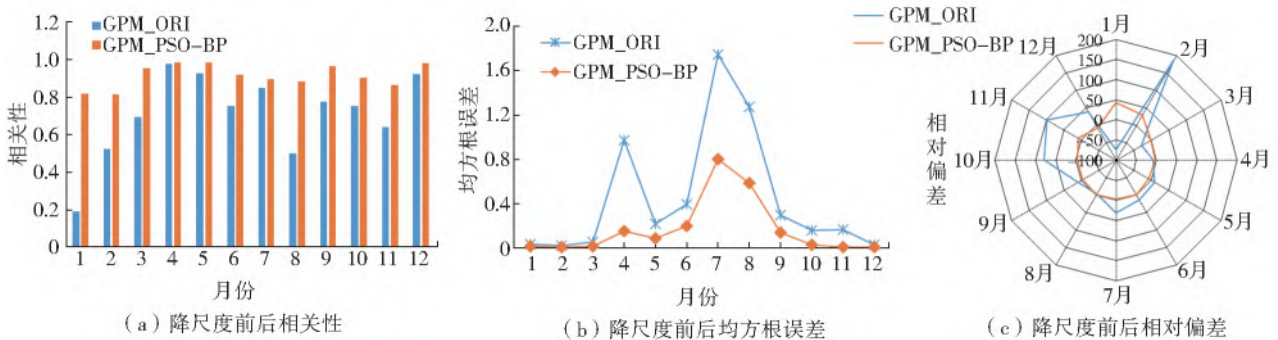


图9 降尺度前后定量评价指标对比

Fig. 9 Comparison of quantitative evaluation indexes with original GPM and downscaling GPM

总体上来看,降尺度后的降水数据相对于原始GPM数据,在空间分辨率和精度方面都得到了明显改善,但在不同时间尺度下,降水降尺度效果存在一定差异,主要原因包括2个方面:不同时间尺度下,降水空间分布存在明显差异,且随着时间尺度增加,GPM降水数据误差不断累计;研究在进行降水空间降尺度时,仅认为高程、经纬度和NDVI是降水主要影响因素,但事实上,温度、季风和人类活动的差

异对降水也有明显影响<sup>[38]</sup>。

## 4 结论

以滦河流域为研究区,首先分析了GPM降水产品在流域内适用性,在此基础上,基于降水与高程、经纬度和NDVI之间相关性,分别构建年、季和月尺度上的PSO-BP降水空间降尺度模型对GPM数据进行空间尺度下延,并以CGDPA产品为基准,对降尺度



后的 GPM 降水数据进行精度验证。得到如下结论。

(1) 基于高程、经纬度和 NDVI 对降水的影响, 以 CGDPA 数据为期望输出, 利用 PSO 算法自动优化 BP 网络参数, 构建 GPM 降水产品空间降尺度模型, 实验结果表明研究提出的降水降尺度方法具有较高精度。

(2) 原始 GPM 降水产品在年、季和月时间尺度上, 相关性均较高, 但整体仍存在对降水高估, 尤其在冬季最为显著。由于滦河流域降水量主要集中在 6—9 月, 所以在汛期均方根误差较大。总体而言, 虽然 GPM 降水产品存在误差, 但能较准确表达滦河流域降水情况。

(3) 基于 PSO-BP 降尺度模型对 GPM 降水产品进行空间尺度下延效果良好, 降尺度前后降水空间分布特征保持一致。在各时间尺度上, 降尺度后的 GPM 数据与实测降水相关性系数均在 0.8 以上, 均方根误差和相对偏差相较于原始 GPM 数据都得到改善。模型在冬季预测效果不佳, 虽相关性和均方根误差得到改善, 但是相对偏差值较大。

#### 参考文献(References):

- [1] 廖爱民, 刘九夫, 张建云, 等. 基于多类型水量计的降水特性分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 852-861. (LIAO A M, LIU J F, ZHANG J Y, et al. Analysis of rainfall characteristics based on multiple types of rain gauges[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 852-861. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2020. 06. 005.
- [2] 胡实, 韩建, 占车生, 等. 太行山区遥感卫星反演降水产品降尺度研究[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1680-1690. (HU S, HAN J, ZHAN C S, et al. Spatial downscaling of remotely sensed precipitation in Taihang Mountains [J]. Geographical Research, 2020, 39(7): 1680-1690. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlyj020190545.
- [3] 曾岁康, 雍斌. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1305-1318. (ZENG S K, YONG B. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1305-1318. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201907003.
- [4] HE X G, CHANEY N W, SCHLEISS M, et al. Spatial downscaling of precipitation using adaptable random forests[J]. Water Resources Research, 2016, 52(1): 8217-8237. DOI: 10. 1002/2016WR019034.
- [5] 杜文涛, 周萍, 赵萌醒, 等. CMORPH 数据在吉林省降水侵蚀力计算中的应用[J]. 中国水土保持, 2019(6): 31-33, 47, 69. (DU W T, ZHOU P, ZHAO M X, et al. Application of CMORPH data to the calculation of rainfall erosivity of Jilin Province [J]. Soil And Water Conservation in China, 2019(6): 31-33, 47, 69. (in Chinese)) DOI: 10. 14123/j. cnki. swcc. 2019. 0140.
- [6] XU S G, WU C Y, 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(1): 119-140. DOI: 10. 1016/j. rse. 2015. 02. 024.
- [7] 蔡明勇, 吕洋, 杨胜天, 等. 雅鲁藏布江流域 TRMM 降水数据降尺度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 111-119, 2. (CAI M Y, LYU Y, YANG S T, et al. TRMM precipitation downscaling in the data scarce Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(1): 111-119, 2. (in Chinese)) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2017. 01. 019.
- [8] SHARIFI E, SAGHAFIAN B, STEINACKER R. Downscaling satellite precipitation estimates with multiple linear regression, artificial neural networks, and spline interpolation techniques [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(2): 789-805. DOI: 10. 1029/2018JD028795.
- [9] 石晓燕, 郑庆康, 杨涛. 基于 BP 神经网络对黄河源区降水的降尺度模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 37-41. (SHI X Y, ZHENG Q K, YANG T. Downscaling analysis of precipitation in source region of Yellow River simulated by using BP neural [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, 35(5): 37-41. (in Chinese)).
- [10] 杜方洲, 石玉立, 盛夏. 基于深度学习的 TRMM 降水产品降尺度研究: 以中国东北地区为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 145-153. (DU F Z, SHI Y L, SHENG X. Research on downscaling of TRMM precipitation products based on deep learning: Exemplified by northeast China [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(4): 145-153. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 04. 19.
- [11] 张桐华. 基于多源遥感数据的黄河流域干旱特征分析 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020. (ZHANG T H. Analysis of drought characteristics in the Yellow River basin based on multi-source remote sensing data [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese)).
- [12] GAN F W, GAO Y, XIAO L, et al. An applicability evaluation of version 05 IMERG precipitation products over a coastal basin located in the tropics with hilly and karst combined landform, China [J]. Interna-

- tional Journal of Remote Sensing, 2020, 41 (12), 4568-4587. DOI:10.1080/01431161.2020.1723174.
- [13] 王存光,洪阳. 卫星遥感降水的反演、验证与应用综述[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 1-9. (WANG C G, HONG Y. Review on inversion, verification and application of satellite remote sensing of precipitation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (8): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.08.001.
- [14] 董满宇,王磊鑫,李洁敏,等. 1960—2017年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 468-475. (DONG M Y, WANG L X, LI J M, et al. Spatial-temporal variations in intra-annual precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Luanhe River basin from 1960 to 2017[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55 (4): 468-475. (in Chinese)) DOI: 10.16360/j.cnki.bnuns.2019.04.008.
- [15] 王腾飞,苏布达,翟建青,等. 1961—2012年滦河流域干旱演变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 180-185. (WANG T F, SU B D, ZHAI J Q, et al. Variation of droughts in Luanhe River basin, 1961-2012 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (5): 180-185. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.173.
- [16] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 水利大数据研究现状与展望[J]. 水力发电学报, 2020, 39 (10): 1-32. (JIANG Y Z, YE Y T, ZHAO H L, et al. Research status and prospects on water conservancy big data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (10): 1-32. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20201001.
- [17] 王汉涛,张潇潇. 渠溪河流域 GPM IMERG 卫星降水对地面站点降水的可替代性研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 9-11. (WANG H T, ZHANG X X. Study on Substitution of GPM IMERG satellite precipitation for ground station precipitation in Quxi River basin [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (6): 9-11. (in Chinese)).
- [18] 唐国强,李哲,薛显武,等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 340-346. (TANG G Q, LI Z, XUE X W, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (3): 340-346. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.005.
- [19] 陈凤娇,李迎新,高金兰,等. IMERG 和 TMPA 降水产品在夏季中国中东部的检验[J]. 气象, 2019, 45 (12): 1680-1690. (CHEN F J, LI Y X, GAO J L, et al. Evaluation of IMERG and TMPA precipitation datasets over summer mid-eastern China[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45 (12): 1680-1690. (in Chinese)).
- [20] 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. (CHEN X H, ZHONG R D, WANG Z L, et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (10): 1147-1156. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170202.
- [21] 任英杰,雍斌,鹿德凯,等. 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (2): 560-572. (REN Y J, YONG B, LU D K, et al. Evaluation of the Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) mission over the mainland China at multiple scales[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 (2): 560-572. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2019.0224.
- [22] 俞琳飞,张永强,张佳华,等. 卫星降水产品在太行山区的适用性初步评估[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 819-829. (YU L F, ZHANG Y Q, ZHANG J H, et al. Preliminarily evaluate the applicability of satellite precipitation products over the Taihang Mountains [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39 (4): 819-829. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00007.
- [23] 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. (XU B R, WEI A A. Spatial statistics of TRMM precipitation in the Tibetan Plateau using random forest algorithm [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30 (3): 181-188. (in Chinese)) DOI: 10.6046/gtzyyg.2018.03.25.
- [24] 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. (XU F L, GUO B, YE B, et al. Applicability of GPM Satellite precipitation product in the Huang-Huai-Hai plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17 (4): 79-86. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbj.2019.0087.
- [25] WU Z Y, ZHANG Y L, SUN Z L, et al. Improvement of a combination of TMPA (or IMERG) and ground-based precipitation and application to a typical region of the east China plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640 (1): 1165-1175. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.272.
- [26] 陈爱军,孔宇,陆大春. 应用 CGDPA 评估中国大陆地区 IMERG 的降水估计精度 [J]. 大气科学学报,

- 2018, 41(6): 797-806. (CHEN A J, KONG Y, LU D C. Evaluation of the precipitation estimation accuracy of IMERG over mainland China with CGDPA[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(6): 797-806. (in Chinese)) DOI: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20161207001.
- [27] LI C, TANG G, HONG Y. Cross-evaluation of ground-based, multi-satellite and reanalysis precipitation products; Applicability of the triple collocation method across mainland China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 71-83. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2018. 04. 039.
- [28] SUN R, YUAN H, LIU X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin [J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 302-319. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 02. 054.
- [29] 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. DOI: 10. 1080/01431161. 2014. 902550.
- [30] 肖文平, 叶家玮. 混沌粒子群优化神经网络算法应用于 SRG 建模[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 238-241. (XIAO W P, YE J W. CPSO-BPNN algorithm and its application of SRG modeling[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27): 238-241. (in Chinese)) DOI: 1002-8331(2010)27-0238-04.
- [31] AVCIBAS I, SANKUR B, SAYOOD K. Statistical evaluation of image quality measures [J]. Journal of Electronic Imaging, 2002, 11(2): 206-223. DOI: 10. 1117/1. 1455011.
- [32] 宋发兴, 高留洋, 刘东升, 等. 基于粒子群优化的 BP 神经网络图像复原方法 [J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(6): 149-152. (SONG F X, GAO L Y, LIU D S, et al. A method of image restoration based on particle swarm optimization for BP neural network [J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(6): 149-152. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-629X. 2014. 06. 037.
- [33] IMMERZEEL W W, RUTTEN M M, DROOGERS P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(2): 362-370. DOI: 10. 1016/j. rse. 2008. 10. 004.
- [34] 李净, 张晓. TRMM 降水数据的空间降尺度方法研究 [J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1164-1169. (LI J, ZHANG X. Downscaling method of TRMM satellite precipitation data [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(9): 1164-1169. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2015. 09. 013.
- [35] SHI Y L, 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. DOI: 10. 3390/rs70505849.
- [36] 李麒嵩, 张万昌, 易路, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比 [J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 303-313. (LI Q L, ZHANG W C, YI L, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over mainland China [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 303-313. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 03. 001.
- [37] 熊俊楠, 李伟, 刘志奇, 等. 基于 GWR 模型的青藏高原地区 TRMM 数据降尺度研究 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 88-95. (XIONG J N, LI W, LIU Z Q, et al. Research on downscaling of TRMM data in the Tibetan Plateau based on GWR model [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(4): 88-95. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2019. 04. 12.
- [38] 郭晓芳, 李旭东, 程东亚. 云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 159-163, 170. (GUO X F, LI X D, CHENG D Y. Spatial distribution of temperature and precipitation and its influencing factors in the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 159-163, 170. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2021. 01. 021.

### A high-precision spatial downscaling method for remotely sensed precipitation data in the Luanhe River basin

GU Jingjing<sup>1,2,3,4</sup>, YE Yuntao<sup>1,4</sup>, DONG Jiaping<sup>1,2,3,4</sup>, CAO Yin<sup>4</sup>, ZHAO Hongli<sup>4</sup>, JIANG Yunzhong<sup>4</sup>

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Accurate acquisition of precipitation data is very important for regional meteorological, hydrological, and water resources research. Precipitation data from meteorological stations are highly accurate, but the application of measured precipitati-



on data is limited due to the uneven spatial distribution of stations. With the rapid development of satellite remote sensing technology, a large number of precipitation inversion products have developed. Precipitation products represented by TRMM are widely used in the fields of meteorology and water conservancy due to their high temporal and spatial resolution. Although remote sensing inversion precipitation products can effectively restore regional precipitation characteristics, there is still a problem of insufficient spatial resolution for refined water cycle simulation research.

Taking the Luanhe River basin (LRB) as the research area, the applicability of the Global Precipitation Measurement Mission of 2018 was evaluated. Under the assumption of the unity of the relationship between data of different resolutions in the model simulation and based on the correlation between precipitation and impact factors that are elevation, latitude, longitude, and normalized difference vegetation index (NDVI), a product space downscaling model of GPM precipitation based on PSO-BP (particle swarm optimization-back propagation) was built. GPM precipitation products with a spatial resolution of 1 km in the LRB were obtained.

In the evaluation of the applicability of GPM precipitation products, the correlation is only 0.59 at the annual scale. The correlation is the highest in spring and the lowest in summer at the seasonal scale. The root mean square error is the highest in summer and smaller in other seasons. The relative deviation values were greater than 0 on all time scales except spring. On the monthly scale, the correlation was greater than 0.6 in 9 months and reached more than 0.9 in April, May, and December. As June to September is the rainy season in the Luanhe River basin, the root mean square error was higher in July and August. The relative deviations were greater than 0 in all months except January, March, and April. Through analyzing original GPM and downscaling of GPM precipitation at different time scales, the correlation between the downscaling of GPM spatial data and the measured precipitation data increased to more than 0.85 at the annual and seasonal scales. The relative deviation values were close to 0 on all scales except winter. Compared with the precipitation measured by original GPM and downscaling GPM, the monthly correlation mean value increased by 0.25 and achieved above 0.8. The mean monthly root mean square error was reduced by 0.16 and the relative error was controlled within  $\pm 10\%$ .

The original GPM precipitation product can accurately express the precipitation in the LRB. However, there is a phenomenon of overestimation of precipitation and this is especially obvious in winter. At different time scales, the spatial downscaling of GPM precipitation based on the PSO-BP model has a higher correlation with the measured precipitation at the station. The root mean square error and relative deviation were smaller. This indicated that the GPM precipitation product obtained by the spatial downscaling method established could more accurately express the spatial distribution characteristics of precipitation in the LRB with higher accuracy.

**Key words:** Luanhe River basin; downscaling of precipitation; PSO-BP model; GPM