

doi: 10.6046/zrzyyg.2020395

引用格式: 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. (Fan T Y,Zhang X,Huang B,et al. Downscaling of TRMM precipitation products and its application in Xiangjiang River basin [J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):209 – 218.)

湘江流域 TRMM 卫星降水产品降尺度研究与应用

范田亿^{1,2}, 张翔², 黄兵¹, 钱湛¹, 姜恒¹

(1. 湖南省水利水电勘测设计研究总院洞庭湖研究中心,长沙 410007; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

摘要: 为满足各行业对高分辨率、高精度降水数据的需求,以湘江流域为例,分别建立了基于多元线性回归法(multiple linear regression,MLR)和地理加权回归法(geographic weighted regression,GWR)的 TRMM 卫星降水降尺度模型,采用留一交叉验证法对模型进行优选,反演得到 0.05° 卫星-地面融合降水产品,并在此基础上分析了湘江流域的时空变化特征。结果表明:相比热带降雨测量卫星(tropical rainfall measuring mission,TRMM)降水,降尺度后 TRMM 降水的空间分辨率得到大幅度提升,且与气象站点观测降水之间的决定系数平均提高了 0.27 以上,均方根误差和平均相对偏差平均降低了 28.42 mm 和 29.88 个百分点以上,表明考虑植被、地形和地理要素的回归降尺度模型能够较为准确地刻画降水的空间分布特征;相比 MLR 降尺度模型得到的降水,GWR 降尺度模型得到的降水与气象站点观测降水之间的决定系数平均提高了 0.06,均方根误差和平均相对偏差平均降低了 14.88 mm 和 8.83 百分点,表明 GWR 降尺度效果更好;2006—2017 年湘江流域不同时间尺度的降水时空变化特征迥异,表现在变化趋势及其显著性、对应区域的位置及面积上。

关键词: TRMM; 降尺度; 时空变化; 湘江流域

中图法分类号: TP 79; P 339 文献标志码: A 文章编号: 2097-034X(2021)04-0209-10

0 引言

降水作为水循环的基本要素,在全球物质和能量交换过程中发挥着重要作用,是气象、水文等领域的重要研究对象。受海陆位置、大气环流和下垫面条件等因素的影响,降水具有复杂的时空变化特征,因此精确地把握降水的时空变化特征对掌握全球和区域水循环规律、水资源规划和管理、农业生产和促进社会经济发展具有重要的现实意义^[1]。

目前,获取降水数据的方式主要有雨量站、地面反演雷达和卫星测雨 3 种^[2],其中卫星测雨由于覆盖范围广、时空连续性好,不受下垫面条件的限制,成为获取降水数据的重要手段^[3]。由于热带降雨测量卫星(tropical rainfall measuring mission,TRMM)集成了多源卫星数据,生产出的降水产品不仅时空分辨率较高且具有不同时效性^[4],在气象、水文等多个领域得到了广泛的应用^[5-8],但作为一种降水

的间接观测方法,TRMM 卫星降水的精度因研究区的地理位置、空间范围、地形地貌和气候条件的变化存在着极大的不确定性^[9-12],且 0.25° 的空间分辨率较粗,不能满足小流域水文模拟对降水数据的需求,往往需要对 TRMM 卫星降水产品进行空间降尺度研究,其中统计降尺度因其易操作,计算量也相对较小,模拟降水更加精确等特点,在国内外 TRMM 卫星降水产品空间降尺度研究中得到了广泛的应用^[13-18]。总结国内外研究可知,TRMM 卫星降水统计降尺度研究存在明显的局限:用于构建 TRMM 卫星降水降尺度模型的辅助变量选取普遍单一,主要依赖数字高程模型(digital elevation model,DEM)且/或归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI),对辅助变量的选取不够系统和全面;多数研究只对年尺度的 TRMM 卫星降水进行了空间降尺度,然后采用月比例分解法对降尺度结果进行展布,容易造成误差的传播和累积,导致最终得到的 TRMM 月降水量空间分辨率虽得以提升,但数

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划课题“变化环境下长江重大水问题综合分析与研判”(编号: 2019YFC0408901)和湖南省自然科学基金项目“苦草营养元素代谢与碳汇关键过程对气候变化的响应研究”(编号: 2020JJ5316)共同资助。

第一作者: 范田亿(1995-),女,硕士,助理工程师,主要从事变化环境下水资源水环境研究。Email: 1723257974@qq.com。

通信作者: 张翔(1969-),男,博士,教授,主要从事基于生态水文的可持续水资源管理、流域生态水文模型、河湖生态修复、同位素水文学研究。Email: zhangxiang@whu.edu.cn。

据精度下降。

为此,选择湘江流域作为研究区,选取了 DEM、NDVI、经度、纬度、坡度和坡向 6 个因子作为辅助变量,在对辅助变量相关性分析以及线性拟合方程多重共线性检验的基础上,分别建立了基于多元线性回归法(multiple linear regression, MLR)和地理加权回归法(geographic weighted regression, GWR)的 TRMM 卫星降水降尺度模型,并通过留一交叉验证法对降尺度模型进行优选,反演得到高分辨率、高精度的 0.05°卫星-地面融合月降水产品,在此基础上,分析不同时间尺度湘江流域降水量的时空变化趋势,以期为区域水资源开发利用提供数据支撑。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

湘江隶属长江流域洞庭湖水系,是湖南省最大的河流,干流全长 844 km,形成的流域是东、南、西三面环山的长条形盆地,介于 E110°51′~114°25′, N24°64′~28°56′,流域面积 94 660 km²。流域内大多是沿河平原和丘陵,所以整个流域的平均高程只有 351 m,流域内 DEM 见图 1。湘江流域夏季受西南、东南季风的影响,冬季受蒙古高压的控制^[19],光照充足、雨量丰沛,是亚热带季风湿润气候。流域多年平均降水量高达 1 450 mm,4—9 月是全年降水的集中期,该时段降水量占全年降水量的 70% 左右。年平均气温介于 17~20℃,流域内多年平均蒸发量 641 mm,多年平均径流深 815 mm^[19]。

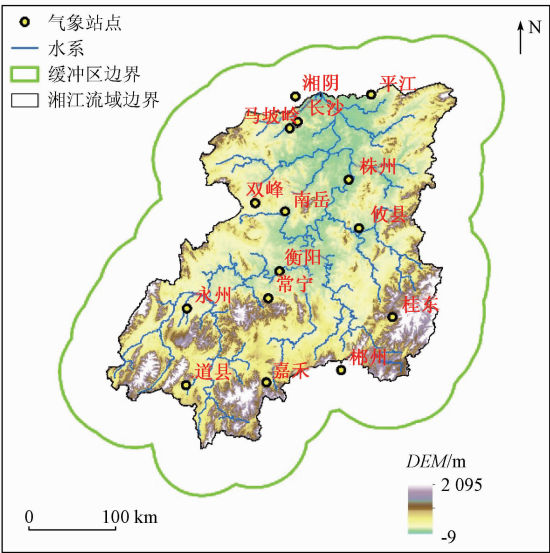


图 1 湘江流域数字高程和河网图

Fig. 1 Digital elevation and river network map of the Xiangjiang River basin

1.2 数据源及其预处理

研究数据资料清单见表 1。遥感数据包括 TRMM 3B42, NDVI 和 DEM 数据。TRMM 3B42 是空间分辨率为 0.25°的逐日降水数据(多年平均降水量空间分布图见图 2),采用美国 Goddard 中心(goddard space flight center)发布的最新版本 Version 7 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) (下文简称为 TRMM), NDVI 采用美国国家航空航天局和美国地质调查局共同构建的陆地产品分发中心 LP DAAC 网站上发布的 MOD13A3v006 版本数据(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a3v006>),是空间分辨率为 1 km 的逐月合成数据。DEM 数据是由美国航空航天局和国防部国家测绘局联合测量得到的 SRTM3(见图 1),空间分辨率为 90 m(<http://www.gscloud.cn/>),基于该数据,在 ArcGIS 软件中生成了坡度、坡向数据。气象站点观测降水数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),是位于湘江流域及其周边的 15 个气象站点逐日降水数据,具体位置见图 1。

表 1 研究数据及来源

Tab. 1 Research data and sources

数据类型	数据名称	空间分辨率	时间分辨率	数据来源
遥感数据	TRMM 3B42	0.25°	日	美国国家航空航天局
	NDVI	1 km	月	
	DEM	90 m	—	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台
气象数据	降水	—	日	中国气象数据网

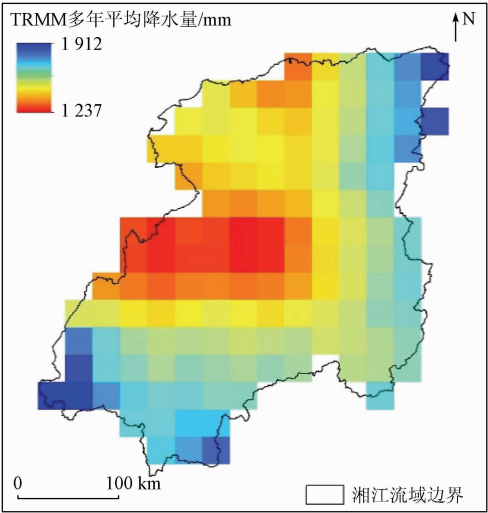


图 2 湘江流域 2006—2017 年 TRMM 多年平均降水量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of TRMM multi-year average precipitation in the Xiangjiang River basin from 2006 to 2017

2 研究方法

2.1 降尺度模型的构建

选择能够反映降水强弱和影响降水分布的 NDVI、经度、纬度、DEM、坡度、坡向 6 个因子作为降尺度模型的辅助变量^[20-23],而且为了最大限度地发挥站点观测数据精度高的优势,将气象站点观测降水“嵌入”TRMM 卫星降水网格中,即用气象站点观测的降水数据替代站点所在的 TRMM 网格中的降水数据,形成一套简单融合降水数据作为降尺度模型的因变量,最后引入 MLR 和 GWR 构建回归降尺度模型。降尺度方法对比见表 2。

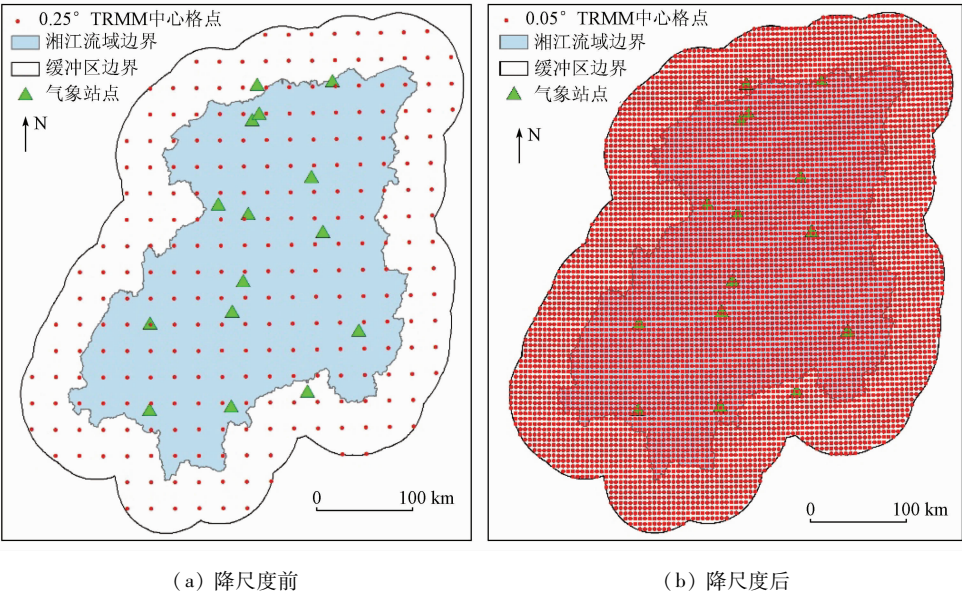


图3 湘江流域降尺度前后数据点的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of data points before and after downscaling in the Xiangjiang River basin

2)数据准备。统计简单融合月降水量($TRMM_v$),同 NDVI、经度、纬度、DEM、坡度、坡向分别重采样至 0.25° (建模数据集)和 0.05° (降尺度数据集)。

3)建立函数关系。对建模数据集中的 $TRMM_v$ 同 NDVI、经度、纬度、DEM、坡度、坡向建立回归关系 f :

$$TRMM_v^{LR} = f(X_1^{LR}, X_2^{LR}, \dots, X_6^{LR}) + \varepsilon^{LR}, \quad (1)$$

式中: $X_1 \sim X_6$ 分别为 NDVI、经度、纬度、DEM、坡度、坡向; ε 为模型的残差; LR 为 0.25° 空间分辨率数据; HR 为 0.05° 空间分辨率数据。

4)插值。采用三次样条插值(Spline)将残差 ε^{LR} 插值成 0.05° 空间分辨率,即 ε^{HR} 。

5)反推。根据函数关系 f ,反推得到 0.05° 空间分辨率的月降水量:

表 2 降尺度方法对比
Tab.2 Comparison of downscaling methods

方法	全局/局部回归	参数估计方法	计算量	优势
MLR	全局	普通最小二乘法	低	理论完善
GWR	局部	加权最小二乘法	高	动态建模,逐点赋权,减少“关系微弱”数据的干扰

具体步骤如下:

1)预处理。由于地形对气流的阻挡和抬升作用,会产生冷凝降雨,所以沿湘江流域边界向外拓展 0.5° 作为降尺度区域即缓冲区。经统计,降尺度前该区域覆盖 262 个地理网格,降尺度后覆盖 6 549 个地理网格,网格中心点见图 3。

$$TRMM_v^{HR} = f(X_1^{HR}, X_2^{HR}, \dots, X_6^{HR}) + \varepsilon^{HR}. \quad (2)$$

上述一般步骤均适用于 MLR 模型,GWR 模型的步骤 3)—5)与前述的一般步骤不同。GWR 模型在步骤 3)需建立 $TRMM_v$ 与 NDVI、DEM、坡度和坡向之间的“局部”回归关系,不需要选取经、纬度,这是因为 GWR 模型已考虑地理信息^[23],计算公式如下:

$$TRMM_v^{LR} = \beta_0^{LR} + \sum_{k=1}^4 \beta_k^{LR} X_k^{LR} + \varepsilon^{LR}, \quad (3)$$

式中 β_0^{LR} 和 β_k^{LR} ($k=1,2,3,4$) 为模型参数。此外,在步骤 4)中还需要将 $\beta_0^{LR} \sim \beta_4^{LR}$ 插值成 0.05° 空间分辨率,然后将其全部代入步骤 5)中进行反推。

2.2 降尺度模型优选

留一交叉验证法是一种没有任何前提假设、直接估计误差的模型选择方法,应用普遍、操作简

单,行之有效^[24],本文以单个气象站的全部月降水数据为单元划分成 15 个样本,依次减少 1 个样本,使用剩余的样本作为训练样本进行建模并估算该样本的降水量,重复 15 次,得到 15 个气象站点处的降尺度降水数据。然后以气象站点观测降水数据作为真值,选取决定系数 R^2 、均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和平均相对偏差 (average relative error, ARE) 作为精度评价指标 (表 3),分析各降尺度模型对 TRMM 降水精度评价指标的改善程度,最终选出一个能够显著提高 TRMM 卫星降水数据精度的降尺度方法。

表 3 精度评价指标
Tab. 3 Accuracy evaluation index

精度评价指标	公式 ^①	最优值
R^2	$R^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}} \right)^2$	1
RMSE/mm	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}{n}}$	0
ARE/%	$ARE = \frac{\sum_{j=1}^n x_j - \bar{y} }{n \times \bar{y}}$	0

① x_j 为 TRMM 降水量/降尺度模型降水量; y_j 为气象站点观测降水量; n 为气象站个数。

2.3 线性回归法

线性回归法是构建变量与时间之间的一元线性回归方程^[25]:

$$y = a + bt \quad , \quad (4)$$

式中: y 为样本量为 n 的变量; t 为时间; a 为截距; b 为斜率,可反映变量的变化速率,其显著性可通过 t 检验进行判断,构造统计量 T :

$$T = \frac{r \sqrt{n - 2}}{1 - r^2} \quad , \quad (5)$$

式中: r 为 y 与 t 之间的线性相关系数; T 服从自由度为 $n - 2$ 的 t 分布,给定显著性水平 α_1 ($P < 0.05$) 和 α_2 ($P < 0.01$), $|T| \geq t_{\alpha_1}$ 和 $|T| \geq t_{\alpha_2}$ 分别代表变量的变化速率显著和极显著。

3 结果与分析

3.1 降尺度结果

利用 MLR 和 GWR 降尺度模型成功将空间分辨率为 0.25° 的 TRMM 月降水量数据降尺度到 0.05° ,图 4 给出了降尺度前、后 TRMM 月均降水量的空间分布情况。从图 4 中可知:①整体上 TRMM 月均降水量在降尺度前、后的空间分布特征基本一致,呈现东北、西南部偏高和中部、北部偏低的空间分布特征,个别区域存在明显的差异,尤其是在南岳站、长沙站、株洲站和桂东站附近,这是由于用气象站点观测降水代替了所在 TRMM 网格处的降水再进行回归降尺度,而这些站点的观测月降水量明显高于 TRMM 网格处月降水量的缘故;② TRMM 卫星降水产品空间分辨率低,同一栅格覆盖面积较大 (图 4(a)),无法反映栅格内部降水的空间异质性,而降尺度后的 TRMM 降水产品空间分辨率得以大大提升,空间分布更加精细化,格点之间均匀过渡,分布光滑,能更好地刻画流域内降水的空间分布特征;③图 4(b)、(c)与图 4(a)对比发现,GWR 降尺度模型较 MLR 降尺度模型得到的降水在数值上更加接近 TRMM 卫星降水,这是由于 GWR 通过将局部参数的拟合结果加权至采样点,从而建立了鲁棒性较强的局部回归函数,避免了 MLR 降尺度模型得到的降水量局部异常现象^[23]。

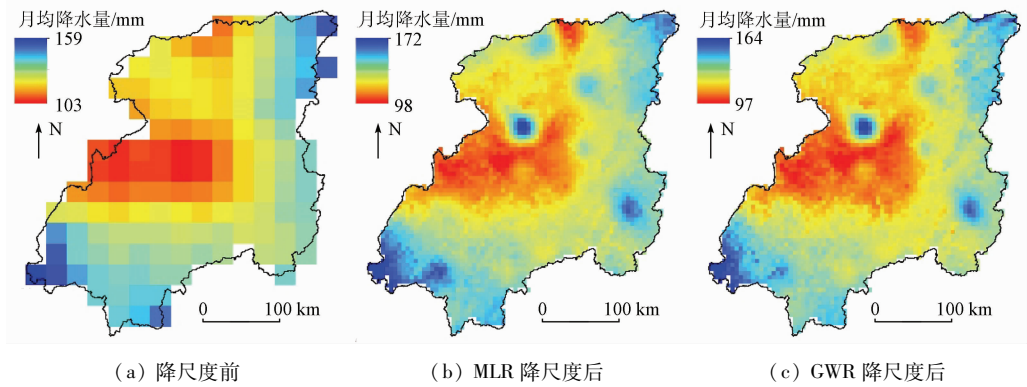


图 4 降尺度前后 TRMM 月均降水量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of TRMM monthly average precipitation before and after downscaling

为深入分析两种降尺度模型在刻画 TRMM 卫星降水方面的表现,利用两种降尺度模型建立的回归关系所预测的 0.25°空间分辨率的月降水同 TRMM 月降水进行相关性分析,并计算了二者之间的 R^2 和 RMSE,结果见图 5,从图中可以看出:①MLR 降尺度模型同 TRMM 卫星降水在绝大部分月份 R^2 高于 0.64, RMSE 低于 15,表明考虑了植被、地形和地理等多重要素的 MLR 降尺度模型能

够较为准确地刻画 TRMM 月降水;②GWR 降尺度模型较 MLR 降尺度模型的 R^2 平均提高了 0.15, RMSE 平均降低了 2.45 mm,这是由于 MLR 的全局回归会忽视降水的空间异质性,容易产生偏差,而 GWR 局部回归能够避免这些缺陷,所以 GWR 降尺度模型能够更好地刻画 TRMM 月降水量的分布特征^[23]。

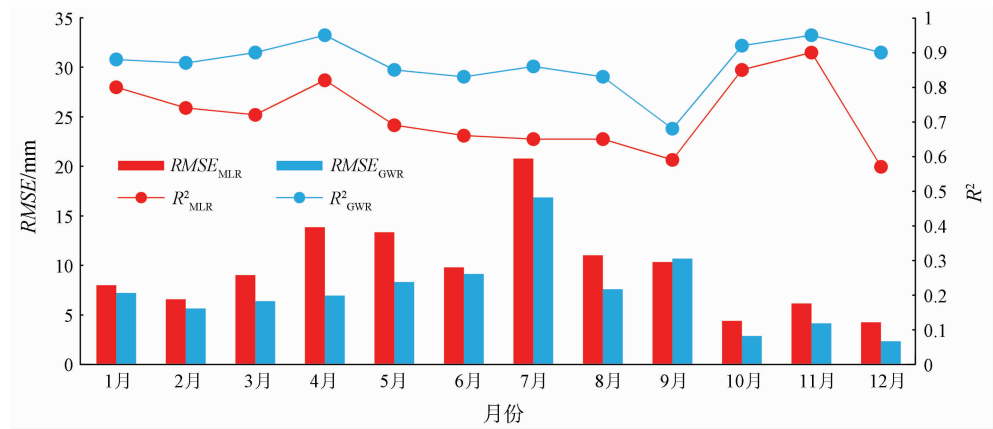


图 5 降尺度模型预测月降水量结果验证

Fig.5 Verification of the results of the downscaling models predicting monthly precipitation

3.2 降尺度精度评价及模型优选

MLR 和 GWR 降尺度后 TRMM 月降水量交叉验证后的精度评价结果见表 4,从表 4 中可以看出:相比 TRMM 降水,降尺度模型得到的降水同气象站点观测降水之间的 R^2 平均提高了 0.27 以上, RMSE 和 ARE 分别平均降低了 28.42 mm 和 29.88 个百分点以上,而且相比 MLR 降尺度模型得到的降水, GWR 降尺度模型得到的降水同气象站点观测降水之间的 R^2 平均提高了 0.06, RMSE 和

ARE 平均降低了 14.88 mm 和 8.83 百分点,这是由于选取了分辨率较高、能够较为全面地反映降水大小和分布的陆表环境变量作辅助变量,而且 GWR 能够考虑降水的空间差异性,所以 GWR 降尺度效果最好,这与诸多学者的研究成果相一致^[20,23,26]。最终选取 GWR 降尺度模型反演 0.05°卫星-地面融合月降水数据产品,得到湘江流域多年平均月降水量的空间分布如图 6。

表 4 降尺度前、后 TRMM 月降水量精度评价结果统计

Tab.4 Statistics of TRMM monthly precipitation accuracy evaluation results before and after downscaling

月份	R^2			RMSE/mm			ARE/%		
	TRMM	MLR	GWR	TRMM	MLR	GWR	TRMM	MLR	GWR
1 月	0.56	0.58	0.84	35.50	10.41	5.91	61.91	13.51	6.71
2 月	0.38	0.87	0.84	42.15	13.64	7.75	46.51	13.30	7.08
3 月	0.63	0.94	0.94	35.99	16.13	4.53	25.51	7.99	2.31
4 月	0.72	0.94	0.95	51.76	21.51	7.62	37.45	8.95	3.02
5 月	0.44	0.84	0.91	80.32	36.35	11.62	29.23	14.01	3.99
6 月	0.54	0.84	0.91	76.22	40.40	12.83	29.14	13.40	3.75
7 月	0.70	0.90	0.94	63.05	23.57	7.01	49.58	13.07	3.80
8 月	0.52	0.84	0.80	65.13	38.61	10.57	34.16	16.26	5.04
9 月	0.38	0.82	0.93	55.04	27.58	8.08	37.79	22.13	6.98
10 月	0.61	0.90	0.96	31.40	13.84	4.03	63.02	12.42	4.80
11 月	0.82	0.89	0.96	39.19	17.40	7.60	50.92	12.60	4.73
12 月	0.60	0.88	0.94	40.90	16.15	9.58	62.34	21.26	10.74
平均值	0.58	0.85	0.91	51.39	22.97	8.09	43.96	14.08	5.25

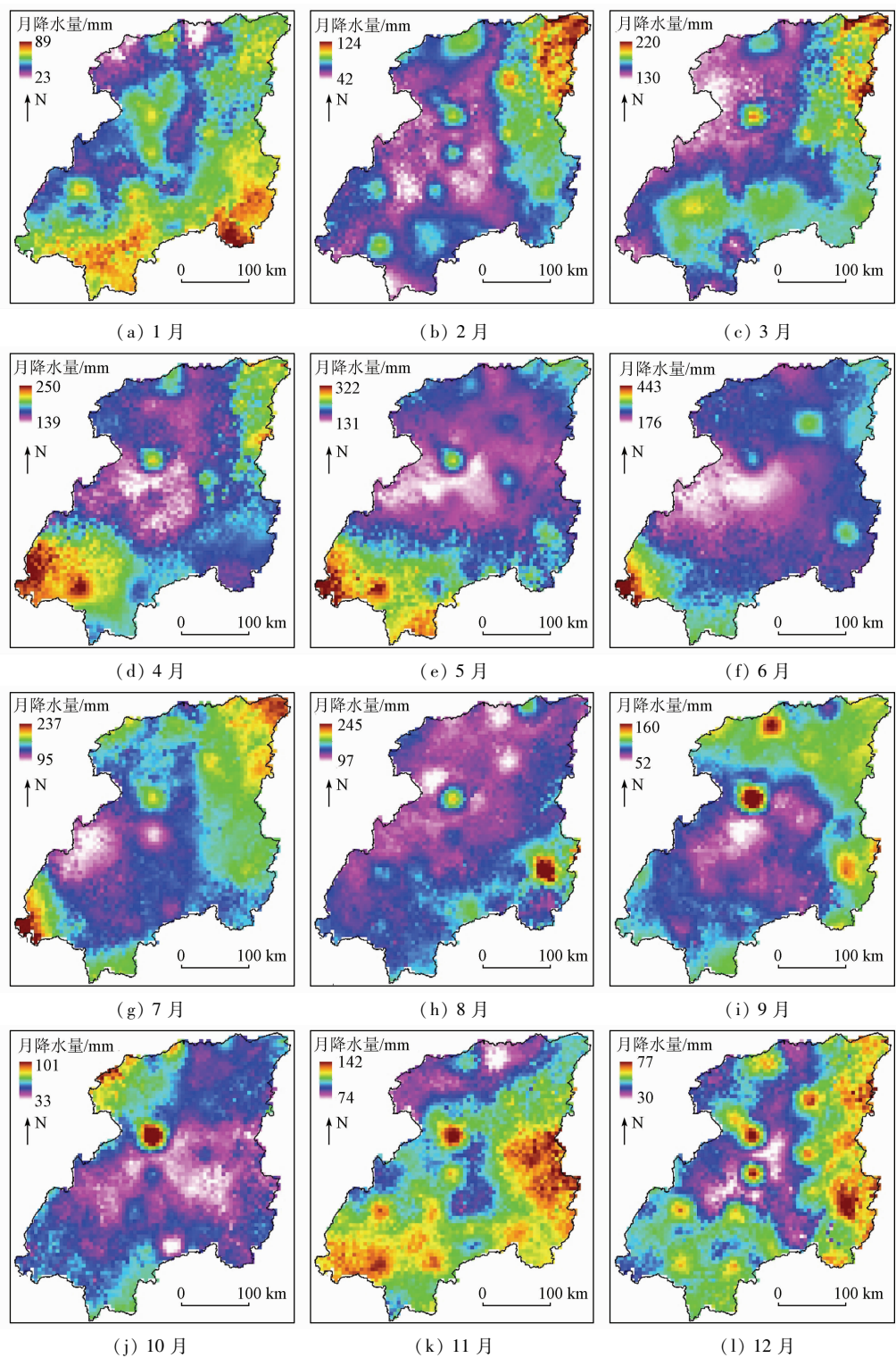


图 6 湘江流域多年平均月降水量空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of multi - year average monthly precipitation in Xiangjiang River basin

3.3 湘江流域降水时空变化特征

图 7 是不同时间尺度湘江流域降水量的时空变化趋势图,左上角的插图是不同时间尺度湘江流域降水量的多年变化趋势图(季节按照气象学标准划分:春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12 月—次年 2 月、粮食作物生长季 3—10 月^[27])。从图 7(a)可以看出,2006—2017 年湘江流域年降水量以 26.95 mm/a 的速率增长,多年平均

降水量为 1 479.25 mm,2011 年降水量最小,2015 年降水量最大,全流域年降水量呈增长趋势的区域面积占比为 98.08%,增长显著的区域面积占比为 4.16%,极显著增长的区域面积占比为 0.09%,主要分布在长沙和株洲,而面积占比仅 1.92%的区域年降水量呈减少趋势,主要分布在衡阳和郴州。从图 7(b)可以看出,2006—2017 年湘江流域春季降水量以 18.51 mm/a 的速率增长,多年平均降水量

为 529.16 mm,而 2011 年降水最少,2016 年降水最多。全流域春季降水均呈增长趋势,其中增长显著的区域面积占比 22.28%,主要分布在湘江流域的东北部和南部。从图 7(c)可以看出,2006—2017 年湘江流域夏季降水量以 3.76 mm/a 的速率减少,多年平均降水量为 528.03 mm,2011 年降水最少,2006 年降水最多。流域大部分地区夏季降水量呈减少趋势,面积占比为 63.20%,其中减少趋势显著的面积占比 4.97%,主要分布在流域南部,面积占比 36.80%的区域夏季降水量呈增长趋势,主要分布在流域北部和西部,其中增长较为明显的区域面积占比为 1.53%,分布在北部边缘地区和株洲西北部。从图 7(d)中可以看出,2006—2017 年湘江流域秋季降水量以 11.52 mm/a 的速率增长,多年平

均降水量为 240.29 mm,而 2009 年降水最少,2015 年降水最多。流域绝大部分地区秋季降水量呈增长趋势,但增长趋势不明显,只有分布在流域中部、面积占比仅 0.57%的区域秋季降水量增长趋势较为明显。从图 7(e)中可以看出,2006—2017 年湘江流域冬季降水量以 2.34 mm/a 的速率减少,多年平均降水量为 171.07 mm,而 2008 年降水最少,2015 年降水最多。面积占比 93.41%的地区冬季降水量呈减小趋势,减小趋势明显的区域主要分布在流域北部,其中减小趋势显著的区域面积占比为 5.15%,减小趋势极显著的区域面积占比为 1.32%。流域西部和中部部分地区冬季降水略为增长,面积占比为 6.59%。从图 7(f)中可以看出,2006—2017 年湘江流域生长季降水量以 18.79 mm/a 的速率增长,多年

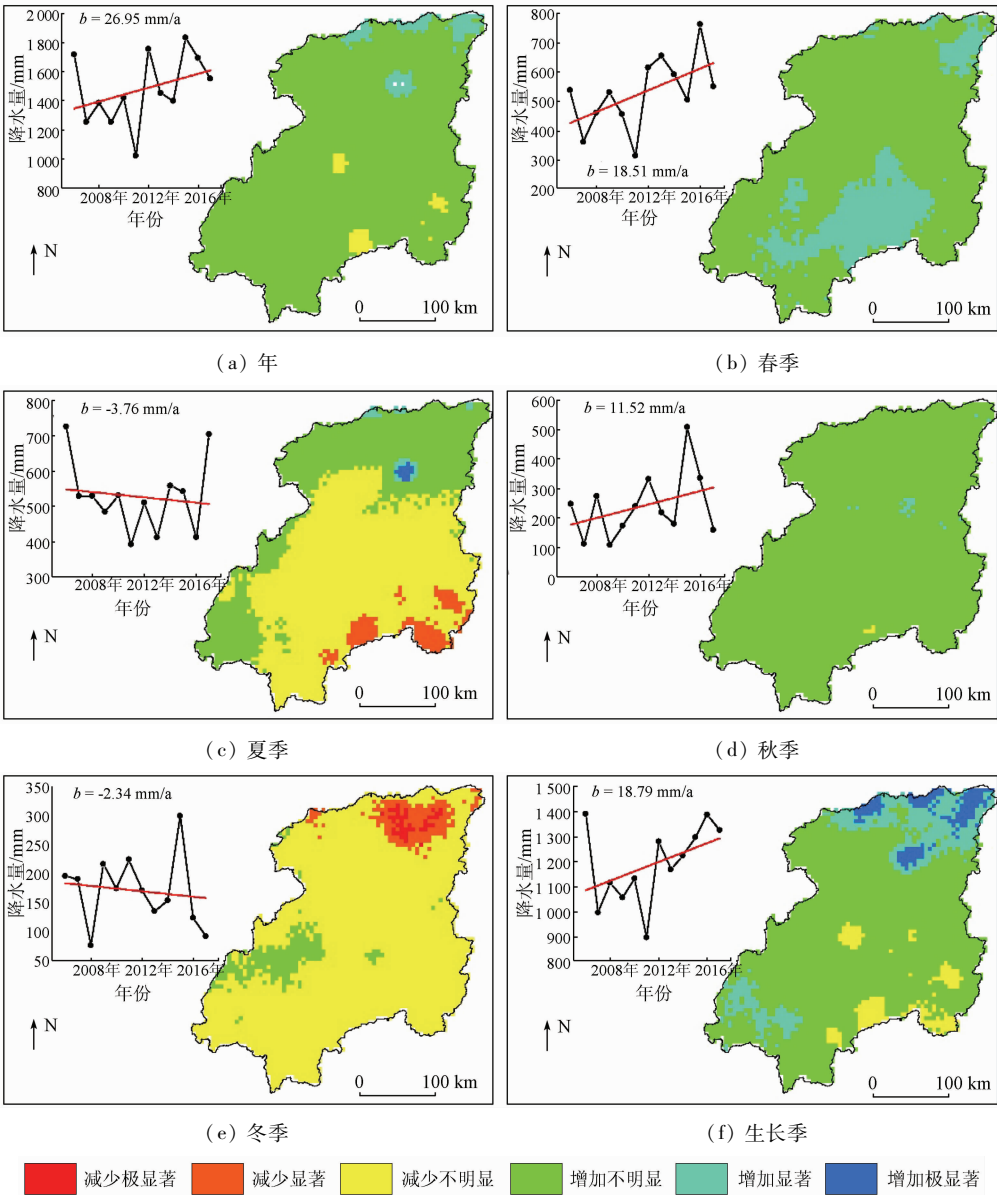


图 7 湘江流域降水时空变化趋势分布图

Fig. 7 Distribution map of temporal and spatial variation trend of precipitation in the Xiangjiang River basin

平均降水量为 1 190.22 mm,而 2011 年降水最少,2006 年降水最多。流域 94.49% 的地区生长季降水量呈增长趋势,其中降水显著增长的区域主要分布在流域西南部和北部,面积占比 13.68%,降水增长极为显著的区域主要分布在长沙、岳阳和株洲。

4 结论与讨论

4.1 结论

以往学者们针对 TRMM 卫星降水空间分辨率较粗的特点进行了大量的空间降尺度研究,但由于 TRMM 卫星降水本身的数据精度存在着极大的不确定性,加上使用的降尺度方法各异,导致降尺度结果存在着明显的差异。本文以湘江流域作为研究区,通过“嵌入”气象站点观测降水,并基于 MLR 和 GWR 构建了 TRMM 空间降尺度模型,利用反演得到的高分辨率、高精度的 0.05° 卫星-地面融合降水产品模拟了湘江流域降水的时空分布特征:

1)降尺度后 TRMM 空间分辨率由 0.25°×0.25° 提高到 0.05°×0.05°,在提升空间分辨率的同时,还大幅度提升了数据精度,反演出的 0.05° 卫星-地面融合降水产品在刻画流域降水时空分布特征方面具有一定的优势。

2)MLR 和 GWR 降尺度模型均能够较为准确地刻画 TRMM 降水,但相比 MLR 降尺度模型得到的降水,GWR 降尺度模型得到的降水同 TRMM 卫星降水的 R^2 平均提高了 0.15, RMSE 平均降低了 2.45 mm,表明了考虑降水空间异质性的 GWR 局部回归模型在刻画 TRMM 卫星降水时表现更优。

3)考虑了植被、地形和地理等多重要素的 MLR 和 GWR 降尺度模型得到的降水数据精度均优于 TRMM,表明 MLR 和 GWR 在湘江流域 TRMM 卫星降水空间降尺度研究中具有良好的适用性,同时揭示了植被、地形和地理等综合因素对降水具有良好的解释能力。

4)相比 MLR 降尺度模型得到的降水,GWR 降尺度模型得到的降水同气象站点观测降水之间的 R^2 平均提高了 0.06, RMSE 和 ARE 平均降低了 14.88 mm 和 8.83 百分点,表明 GWR 降尺度模型的降尺度效果最好,这与诸多学者的研究成果相一致^[20,23,28]。

5)2006—2017 年湘江流域不同时间尺度的降水时空变化趋势具有明显的空间异质性。年、春季、夏季、秋季、冬季和生长季降水呈增长趋势的区域面积占全流域面积的比例分别为 98.08%, 100%, 36.80%, 99.88%, 6.59% 和 94.49%,其中

年、春季、夏季、秋季和生长季降水呈显著增长趋势的区域面积占比分别为 4.16%, 22.28%, 1.08%, 0.57% 和 13.68%。只有年、夏季、生长季有部分区域降水增长极为明显,区域面积占比分别为 0.09%, 0.45% 和 4.52%,主要分布在长沙、株洲附近。夏季流域南部区域降水显著减少,区域面积占比为 4.97%。冬季流域北部区域降水明显减少,区域面积占比为 6.47%。

4.2 讨论

本文将气象站点观测降水数据“嵌入”卫星降水中进行了空间降尺度,有效发挥了站点观测降水数据精度高的优势,丰富了降水数据资料库。但由于收集到的气象数据资料有限,导致将气象数据“嵌入”TRMM 数据做降尺度因变量的优势渲染辐射范围受到一定的限制。直接对月尺度的 TRMM 卫星降水进行空间降尺度,有效避免了月比例分解法展布年尺度 TRMM 卫星降水空间降尺度数据过程中产生的误差传播和累积,但降尺度过程中重采样和插值方法也会产生误差,因此有待进一步的对比分析。此外,降尺度方法极大地依赖辅助变量的分辨率和精度,普适性有待进一步检验。

参考文献 (References):

[1] 胡庆芳. 基于多源信息的降水空间估计及其水文应用研究 [D]. 北京:清华大学,2013.
Hu Q F. Rainfall spatial estimation using multi-source information and its hydrological application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

[2] 袁 飞,赵晶晶,任立良,等. TRMM 多卫星测雨数据在赣江上游径流模拟中的应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(7):611-616.
Yuan F, Zhao J J, Ren L L, et al. Streamflow simulation in the Upper Ganjiang River Basin using the TRMM multi-satellite precipitation data [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(7): 611-616.

[3] 李 哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用 [D]. 北京:清华大学,2015.
Li Z. Multi-source precipitation observations and fusion for hydrological applications in the Yangtze River Basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[4] 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):4-12.
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): 4-12.

[5] Hamid E Y, Kawasaki Z, Mardiana R. Impact of the 1997—98 El Niño Event on lightning activity over Indonesia [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 147-150.

[6] Chen Y, Genio A D, Chen J. The tropical atmospheric El Nino signal in satellite precipitation data and a global climate model [J].

- Journal of Climate, 2007, 20(14): 3580–3601.
- [7] Li X H, Zhang Q, Xu C Y. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang Lake Basin[J]. Journal of hydrology, 2012, 426–427: 28–38.
- [8] 陈 诚, 赵书河. 基于 TRMM 降雨数据的中国黄淮海地区干旱监测分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 122–129. doi: 10.6046/gtzyyg. 2016. 01. 18.
- Chen C, Zhao S H. Drought monitoring and analysis of Huanghuai Hai plain based on TRMM precipitation data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(1): 122–129. doi: 10.6046/gtzyyg. 2016. 01. 18.
- [9] 魏志明, 岳官印, 李 家, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 171–176.
- Wei Z M, Yue G Y, Li J, et al. Comparison study on accuracies of precipitation data using GPM and TRMM product in Haihe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 171–176.
- [10] 甘富万, 余膳男, 黄宇明, 等. TRMM 卫星降水产品在南流江流域的精度评估[J]. 水力发电, 2018, 44(11): 21–25, 43.
- Gan F W, Yu S N, Huang Y M, et al. Accuracy evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis over Nanliu River Basin[J]. Water Power, 2018, 44(11): 21–25, 43.
- [11] 李 蒙, 秦天玲, 刘少华, 等. 怒江上游 TRMM 3B42V7 降水产品资料时空验证及降水特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 950–959.
- Li M, Qin T L, Liu S H, et al. Spatial-temporal validation of TRMM 3B42V7 precipitation products and analysis of precipitation characteristics in the upper reaches of Nujiang River[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 950–959.
- [12] 李运龙, 熊立华, 闫 磊. 基于地理加权回归克里金的降水数据融合及其在水文预报中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1359–1368.
- Li Y L, Xiong L H, Yan L. A geographically weighted regression Kriging approach for TRMM-rain gauge data merging and its application in hydrological forecasting[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1359–1368.
- [13] 王晓杰. 基于 TRMM 的天山山区降水降尺度方法及其空间变异特征研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- Wang X J. Downscaling method and spatial variability of precipitation in Tianshan Mountain based on the TRMM data[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [14] 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.
- [15] Duan Z, Bastiaanssen W. 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.
- [16] 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. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 12.
- 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 and Resources, 2019, 31(4): 88–95. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 12.
- [17] 曾昭昭, 王晓峰, 任 亮. 基于 GWR 模型的陕西秦巴山区 TRMM 降水数据降尺度研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 26–36.
- Zeng Z Z, Wang X F, Ren L. Spatial downscaling of TRMM rainfall data based on GWR model for Qinling-Daba Mountains in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 26–36.
- [18] Zeng Q, Chen H, Xu C Y, et al. Feasibility and uncertainty of using conceptual rainfall-runoff models in design flood estimation[J]. Hydrology Research, 2016, 47(4): 701–717.
- [19] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于 TRMM 卫星降水的太行山区降水时空分布格局[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 1–13.
- Du J K, Jia Y W, Li X X, et al. Study on the spatial-temporal distribution pattern of precipitation in the Taihang Mountain region using TRMM data[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 1–13.
- [20] 赵 娜, 焦毅蒙. 基于 TRMM 降水数据的空间降尺度模拟[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 20–27.
- Zhao N, Jiao Y M. Downscaling of TRMM satellite precipitation data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(10): 20–27.
- [21] 范雪薇, 刘海隆. 天山山区 TRMM 降水数据的空间降尺度研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 478–488.
- Fan X W, Liu H L. Spatial downscaling of TRMM precipitation data in Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 478–488.
- [22] 何其全, 史 岚, 谭璐璐, 等. 中国中东部区域 TRMM 降水产品降尺度研究及其时空特征分析[J]. 气象科学, 2019, 39(3): 312–321.
- He Q Q, Shi L, Tan L L, et al. Downscaling research and temporal and spatial characteristics of TRMM precipitation products in the central and eastern regions of China[J]. Meteorological Science, 2019, 39(3): 312–321.
- [23] Chen C, Zhao S, Duan Z, et al. An improved spatial downscaling procedure for TRMM 3B43 precipitation product using geographically weighted regression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(9): 4592–4604.
- [24] 范永东. 模型选择中的交叉验证方法综述[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- Fan Y D. A summary of cross-validation in model selection[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.
- [25] 姜 瑶, 徐宗学, 王 静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 845–857.
- Jiang Y, Xu Z X, Wang J. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 845–857.
- [26] 刘小婵, 张洪岩, 赵建军, 等. 东北地区 TRMM 数据降尺度的 GWR 模型分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1055–1062.
- Liu X C, Zhang H Y, Zhao J J, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on GWR model in Northeast China[J].

Journal of Geo – Information Science, 2015, 17(09) :1055 – 1062.

[27] 范田亿,张 翔. 2000—2014 年中国粮食主产区植被水分利用效率时空演变特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3) :99 – 107.

Fan T Y, Zhang X. Analysis of the spatial – temporal characteristics of water use efficiency of vegetation in the main grain production area of China from 2000 to 2014 [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3) :99 – 107.

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

Ning S, Zhang Z Y, Liu L, et al. Adaptability of precipitation estimation method based on TRMM data combined with partial least squares downscaling in different landforms of Xinjiang, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(12) :99 – 109.

Downscaling of TRMM precipitation products and its application in Xiangjiang River basin

FAN Tianyi^{1,2}, ZHANG Xiang², HUANG Bing¹, QIAN Zhan¹, JIANG Heng¹

(1. Research Center of Dongting Lake, Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha 410007, China; 2. State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To meet the demand of various industries for high – resolution and high – precision precipitation data, this study establishes the downscaling models of the TRMM precipitation data of the Xiangjiang River basin based on the methods of multivariate linear regression (MLR) and geographically weighted regression (GWR). The leave – one – out cross – validation method was adopted to select the optimal model, and a satellite – ground fusion precipitation product with a resolution of 0.05° was obtained through inversion. On this basis, the spatial – temporal change characteristics of the precipitation in the Xiangjiang River basin were analyzed. The results are as follows. The spatial resolution of the TRMM precipitation data was greatly improved after downscaling. As verified using the precipitation observed at meteorological stations, the coefficient of determination of the TRMM precipitation data increased by more than 0.27, and the root mean square error and average relative error of the TRMM precipitation data decreased by more than 28.42 mm and 29.88 percentage points, respectively on average after downscaling. All these indicate that the regression downscaling model that takes account of vegetation, terrain, and geographic elements can accurately describe the spatial distribution characteristics of precipitation. According to the verification using the precipitation observed at meteorological stations, the coefficient of determination of the GWR downscaling model increased by 0.06 compared to the MLR downscaling model. Meanwhile, the root mean square error and average relative error of the precipitation data obtained using the GWR downscaling model decreased by 14.88 mm and 8.83 percentage points, respectively on average compared to precipitation data obtained using the MLR downscaling model. These indicate better effects of the GWR downscaling model. The spatial – temporal change characteristics of the precipitation in the Xiangjiang River basin during 2006—2017 are greatly different on different time scales, which is reflected in the changing trend and its significance and the locations and area of corresponding zones.

Keywords: TRMM; spatial downscaling; spatiotemporal variation; Xiangjiang River basin

(责任编辑: 张 仙)