

文章编号: 2096-1618(2018)02-0190-07

# 近16年秦巴山区 TRMM 降水资料的降尺度研究

雷 蕾<sup>1</sup>, 程志刚<sup>1</sup>, 冯冬蕾<sup>2</sup>, 香 薇<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 辽宁省本溪市桓仁满族自治县气象局, 辽宁 本溪 117200)

**摘要:**为获得秦巴山区高分辨率 TRMM 数据,采用近16年 TRMM 3B43 降水资料和 MODIS NDVI 植被数据,结合地理加权回归模型(GWR),采用统计降尺度方法获得高空间分辨率的降水数据。结果表明:TRMM 3B43 资料在秦巴山区具有较好的实用性,其与站点实测数据的相对偏差最大仅为0.13%,相关系数最小也达0.72。整体而言,GWR 模型呈现出秦巴山区降水由南到北逐渐减少的趋势,与实测值相关性较好(相关系数为0.71~0.90);尽管较原始 TRMM 数据相比,GWR 降尺度结果整体偏低,但就多年平均而言,后者明显优于前者(相关系数达0.92,通过0.001信度检验)。因此,利用 GWR 模型开展秦巴山区 TRMM 3B43 降水资料的降尺度研究具有一定可信度。

**关键词:**应用气象学;气候变化;秦巴山区;TRMM;GWR 模型

**中图分类号:**P468.0<sup>+</sup>24

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.014

## 0 引言

降水作为全球水循环的基本组成,是气象学、生态学和水文学的重要参数,是地气系统能量交换和物质循环的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。因此,获取高分辨率的降水数据对了解其空间变异特征,认识和理解陆地表面过程起着非常重要的作用<sup>[3]</sup>。

传统的降水数据主要是通过地面站点观测获得,这样的观测方式很大程度上受到地形条件的影响<sup>[4-5]</sup>,特别是高原地区以及地形复杂的山区,地面观测站点稀少导致降水数据相对缺乏。近年来,随着卫星观测的快速发展,在全球与区域尺度上已经形成了一系列的遥感降水数据产品,具有时间分辨率较高,覆盖范围广,受气候和地形限制较小等特点,使得遥感降水数据集得到广泛应用<sup>[6-7]</sup>。目前,气象领域较常使用的遥感降水数据为美国 NOAA 气候预测中心产生的 CMORPH 降水产品,全球降水气候计划(GPCP)<sup>[8-9]</sup>,全球卫星测绘降水计划(GSMaP)<sup>[10]</sup>,热带降水测量卫星(TRMM)<sup>[11-13]</sup>,以及最新的全球降水项目(GPM)<sup>[14]</sup>的各类产品。尽管如此,对于一些气候模型、流域水文模型等研究而言,现有产品的空间分辨率仍较粗。因此,进一步提高遥感降水数据产品的空间分辨率及其精度十分必要。

地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型是传统回归模型的扩展,与其他降尺度模型相比,强调了数据的局部特性,得到的回归结果更加

可信<sup>[17]</sup>。Chen 等<sup>[18]</sup>利用 GWR 模型对 TRMM 3B43 降水数据进行降尺度研究,结果表明 GWR 模型更适合 TRMM 数据的降尺度,可以得到更准确的高分辨率数据。Ceccherin 等<sup>[19]</sup>在 Chen 的 GWR 方法基础上提出了可以用于不同卫星降水产品的降尺度方法,得到南美洲和西非的1 km的年降水数据,并计划在研究月降水的降尺度方法基础上,建立适用全球的统计降尺度方法。Xu 等<sup>[20]</sup>在对比了降水与 NDVI、降水与 DEM 的空间异质性基础上,提出基于 GWR 的新降尺度算法。研究结果表明,较原数据相比,GWR 模型提高了降水数据精度,且高于传统的 MR 模型的结果。鉴于此,构建 GWR 模型对 TRMM 降水数据进行统计降尺度研究,得到秦巴山区高分辨率的 TRMM 降水数据,并检验 GWR 降尺度模型在秦巴山区的适用性,为秦巴山区的气象、水文等方面的研究提供高空间分辨率的降水数据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

秦巴山区是中国南北气候的交汇地带,包括河南、湖北、重庆、四川、甘肃、陕西6省市的80个县(图1)。以山地、盆地、丘陵、坪坝为主,气候类型多样,垂直变化显著,属于副热带西风急流、副热带高压以及低空急流复合影响的区域<sup>[21]</sup>。此外该区域水系发达,径流资源丰富,区域内生态地理环境类型复杂、多样,是中国重要的水源涵养生态功能区<sup>[22]</sup>。

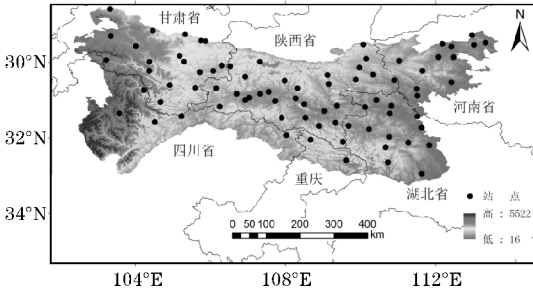


图 1 研究区域及气象站点分布

1.2 数据来源及处理

1.2.1 TRMM

研究使用的 TRMM 卫星数据为 NASA 数据分发中心提供的 TRMM 3B43 月降水量产品(资料等级: Level 3, 版本号: Version 7), 覆盖区域为 50°S ~ 50°N, 时间分辨率为 1 个月, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。数据通过 NASA 网站( <http://trmm.gsfc.nasa.gov> ) 获得, 选取的时间跨度为 2000 年 1 月-2015 年 12 月。

1.2.2 NDVI

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)能够有效地检测植被的生长状态, 是反映植被覆盖的重要指标, 也是目前使用最为广泛的植被指数之一<sup>[23]</sup>。研究使用的 NDVI 数据来自于 NASA Terra 卫星提供的 MOD13A2 产品, 时间分辨率为 16 天, 空间分辨率为 1 km×1 km, 其时间跨度为 2000 年 1 月-2015 年 12 月。为了更好地反应植被变化对降水的响应, 消除来自云影、雾、大气、地形阴影等因素的影响, 采用 MVC 最大合成法得到月最大 NDVI 值<sup>[24]</sup>。

1.2.3 气象数据

气象数据来自于中国气象局国家气象信息中心提供的秦巴山区 2000 年 1 月-2015 年 12 月 81 个气象站点观测的日降水量数据(图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 GWR 模型

降水具有典型的非平稳性, 其空间差异较大。GWR 模型相较传统回归模型而言, 强调了数据的局部特性, 其对降水的降尺度结果更为可行。因此选用 GWR 模型对 TRMM 3B43 降水数据进行降尺度研究。GWR 模型的一般形式:

$$y_i = \beta_{0i}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  个样本点因变量的观测值;  $x_{ik}$  为第  $k$  个自变量的第  $i$  个样本点的观测值;  $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个样本点的地理坐标;  $\beta_k(u_i, v_i)$  为在第  $i$  个样本点的第  $k$  个回归参数;  $\varepsilon_i$  为残差。式(1)可以化简为

$$y_i = \beta_{0i} + \sum_{k=1}^p \beta_{ik}x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

1.3.2 降尺度

利用 GWR 模型建立秦巴山区范围内 TRMM 数据

和 NDVI 之间的函数关系, 实现 TRMM 数据空间分辨率的尺度转换, 其具体步骤如下:

**步骤 1** 提取研究区域 2000 年 1 月-2015 年 12 月的 TRMM 3B43 月降水量数据及 MODIS NDVI 数据, 将数据分为高分辨率 HR (1 km) 和低分辨率 LR (0.25°)。

**步骤 2** 将 1 km 的 NDVI 数据重采样为 0.25°, 建立 TRMM<sup>LR</sup> 和 NDVI<sup>LR</sup> 的地理加权回归模型(GWR)得到常数项  $\beta_{0i}^{LR}$ , NDVI 对应系数  $\beta_i^{LR}$  及残差结果  $\varepsilon_i^{LR}$ 。

$$TRMM_i^{LR} = \beta_{0i}^{LR} + \beta_i^{LR} NDVI_i^{LR} + \varepsilon_i^{LR} \quad (3)$$

**步骤 3** 栅格化模型结果, 将常数项、NDVI 对应系数重采样为 1 km, 对残差值采用 Kriging 插值得到高分辨率的残差值  $\varepsilon^{HR}$ 。

**步骤 4** 最终得到 1 km 的模型预测降水值

$$TRMM^{HR} = \beta_0^{HR} + \beta_1^{HR} NDVI^{HR} + \varepsilon^{HR} \quad (4)$$

1.3.3 结果检验

利用研究区域 81 个气象站点对应时间的实测数据, 采用相关系数( $R$ )、相对偏差( $Bias$ )、均方根误差( $RMSE$ )3 个指标对统计降尺度结果进行验证。相关系数反映了降尺度降水和实测降水线性相关的程度; 相对偏差反映了模型降尺度结果与实测降水的偏差; 均方根误差用来衡量降尺度结果与观测值之间的差异。对应计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_i^N (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_i^N (M_i - \bar{M})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

$$Bias = \frac{\sum_i^N P_i}{\sum_i^N M_i} - 1 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (P_i - M_i)^2}{N}} \quad (7)$$

式中:  $P_i$  表示气象站点实测降水量;  $M_i$  为原始 TRMM 3B43 降水量数据或 GWR 模型降尺度得到的高空间分辨率降水数据;  $N$  为样本容量。

2 降尺度结果分析

2.1 TRMM 数据适用性分析

为验证 TRMM 3B43 降水数据在研究区域的可靠性, 在进行 GWR 模型降尺度之前, 首先对其进行适用性检验。经检验年尺度上 TRMM 降水数据与气象站点实测降水量之间的存在显著的线性相关(图 2), 相关系数  $R$  最小也达到 0.719, 并通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。研究区内各年的相对偏差也较小(图 3), 最大仅为 0.13% 精度较高。总体而言, 利用 TRMM 3B43 数据在秦巴山区进行年尺度降水的统计降尺度研究是可行的。

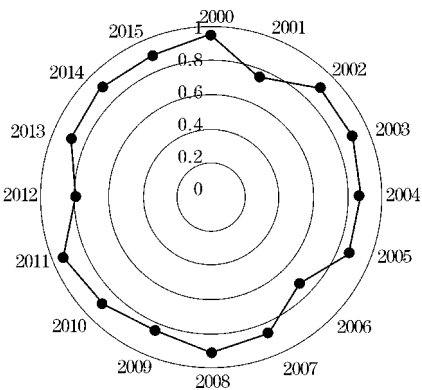


图 2 TRMM 3B43 降水数据与站点实测数据多年平均降水相关系数  $R$

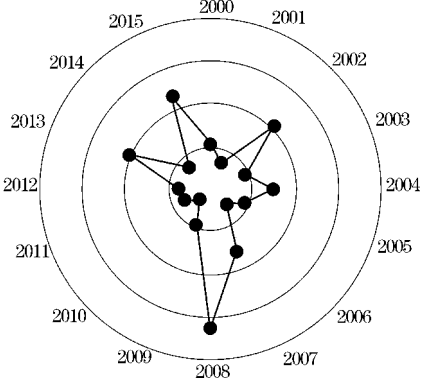
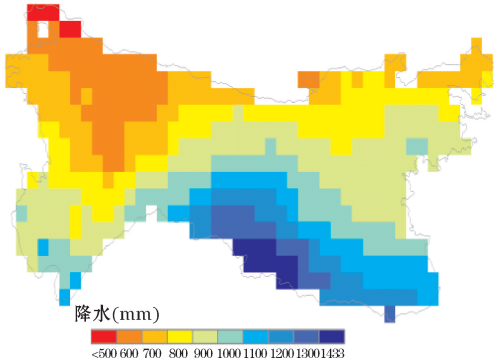
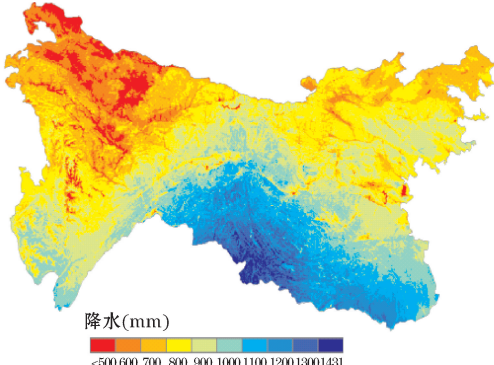


图 3 TRMM 3B43 降水数据与站点实测数据多年平均降水相对偏差

2.2 多年平均降水量



(a) TRMM 3B43 (分辨率:  $0.25^{\circ}$ )

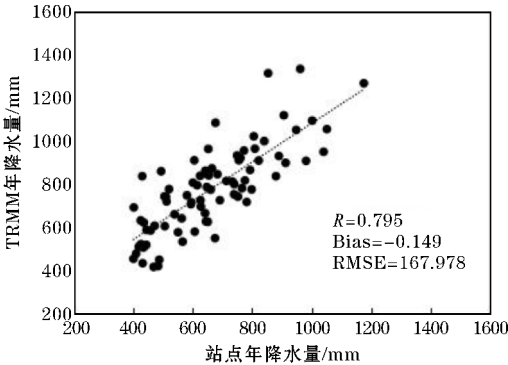


(b) GWR 模型降尺度结果 (分辨率: 1 km)

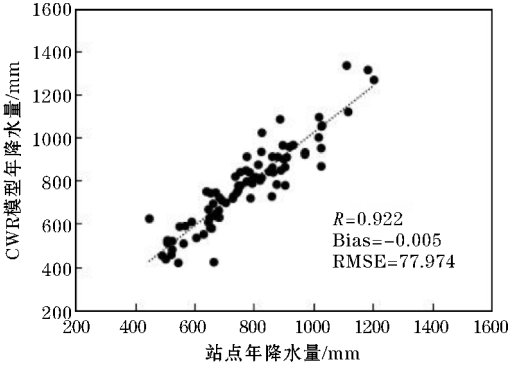
图 4 2000–2015 年平均年降水量空间分布

以秦巴山区为研究区,将 2000–2015 年的 TRMM 降水数据求平均,得到 TRMM 多年平均降水量图 4(a);将对应年份的 MODIS NDVI 数据求平均,得到 NDVI 多

年平均数据。通过构建  $0.25^{\circ}$  尺度下的 GWR 模型最终得到 GWR 模型 1 km TRMM 多年平均降水量 (图 4b)。由图 4 可知:通过 GWR 模型得到的 1 km TRMM 降水数据与原始的数据具有一致的空间分布特征,多年降水量均为南多北少;GWR 模型 1 km TRMM 降水数据的多年平均降水为 222 ~ 1430 mm,原始 TRMM 多年平均降水为 452 ~ 1433 mm,降水区间范围变大,且能反映研究区域更为细致的降水特征,特别是一些地形复杂的区域。



(a) TRMM 与站点数据年降水量散点图



(b) GWR 模型与站点数据年降水量散点图

图 5 多年平均 TRMM、GWR 模型降尺度及实测降水量比较

为进一步验证 GWR 模型 1 km TRMM 数据的准确性和精度,利用研究区域 81 个站点的多年平均降水,与对应的 GWR 模型 1 km TRMM 数据和原始 TRMM 数据,进行一元线性回归分析,并计算二者的相关系数 ( $R$ )、相对偏差 ( $Bias$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 等 (如图 5 所示)。从验证的结果来看:GWR 模型 1 km 多年平均降尺度结果和站点实测多年平均降水量的相关系数 ( $R$ ) 达到 0.922 ( $P < 0.001$ ) 有所提高;相对偏差 ( $Bias$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 均有减小,但相对偏差均为负值,说明 GWR 模型估算的结果比实际降水量偏低。整体而言,GWR 模型的多年平均降尺度结果有着较高的准确性和精度,说明 GWR 模型降尺度方法在秦巴山区是可行的。

2.3 年降水量

将 16 年 (2000–2015 年) TRMM 数据和重采样的 NDVI 数据构建 GWR 模型,利用模型计算得到 1 km 降尺度结果。图 6 ~ 8 为 2000–2015 年各年的 GWR 模型 1 km TRMM 年降水量、 $0.25^{\circ}$  TRMM 原始降水数据年降水量和站点年降水量的空间分布。



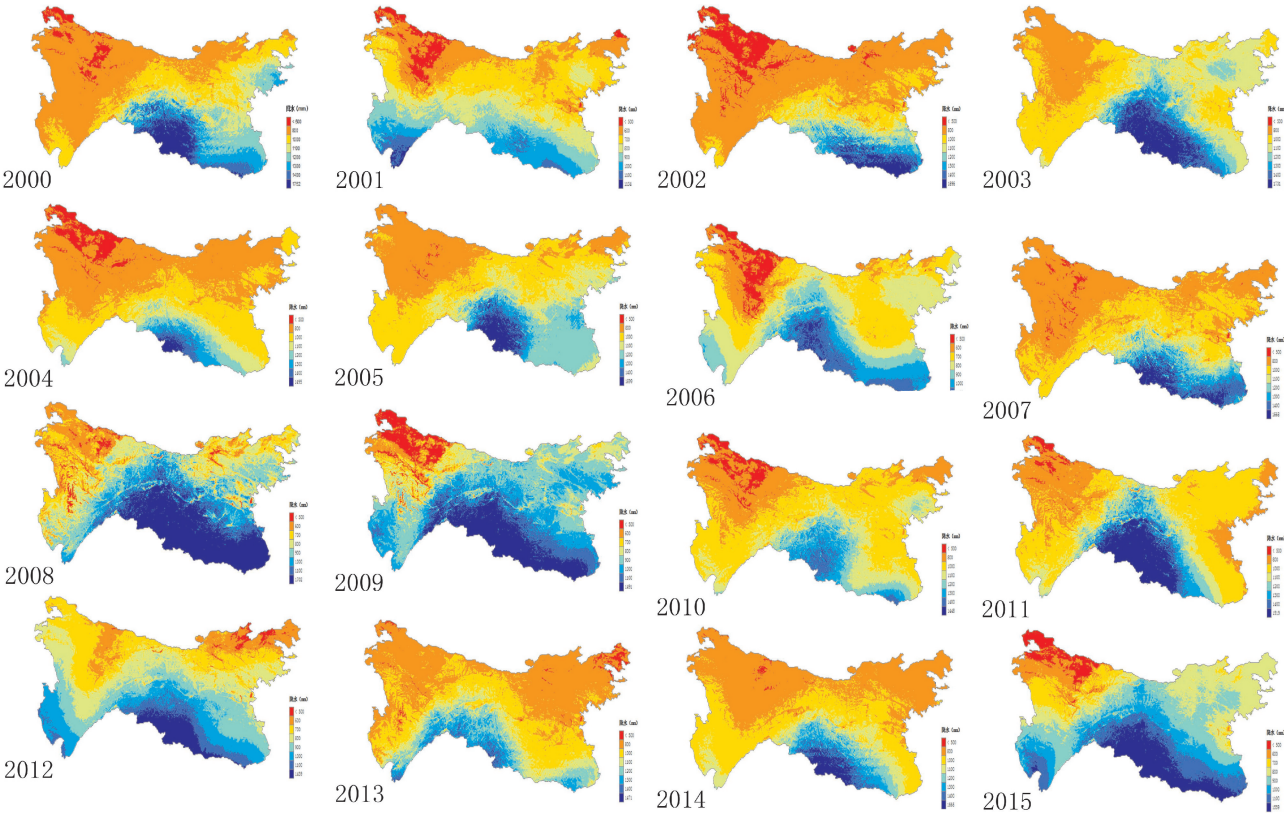


图 6 2000-2015 年年降水量 GWR 模型降水尺度结果

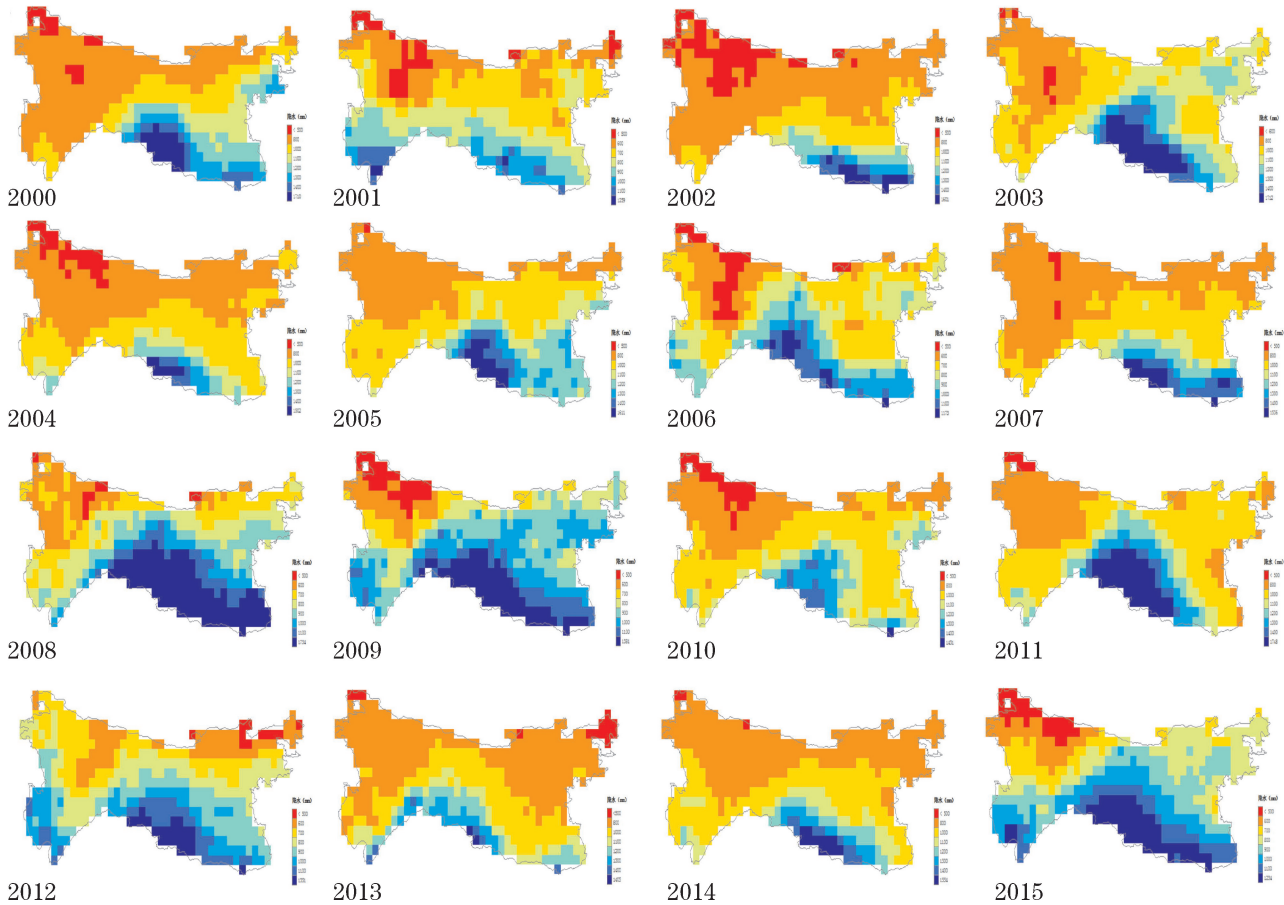


图 7 2000-2015 年年降水量 TRMM 降水



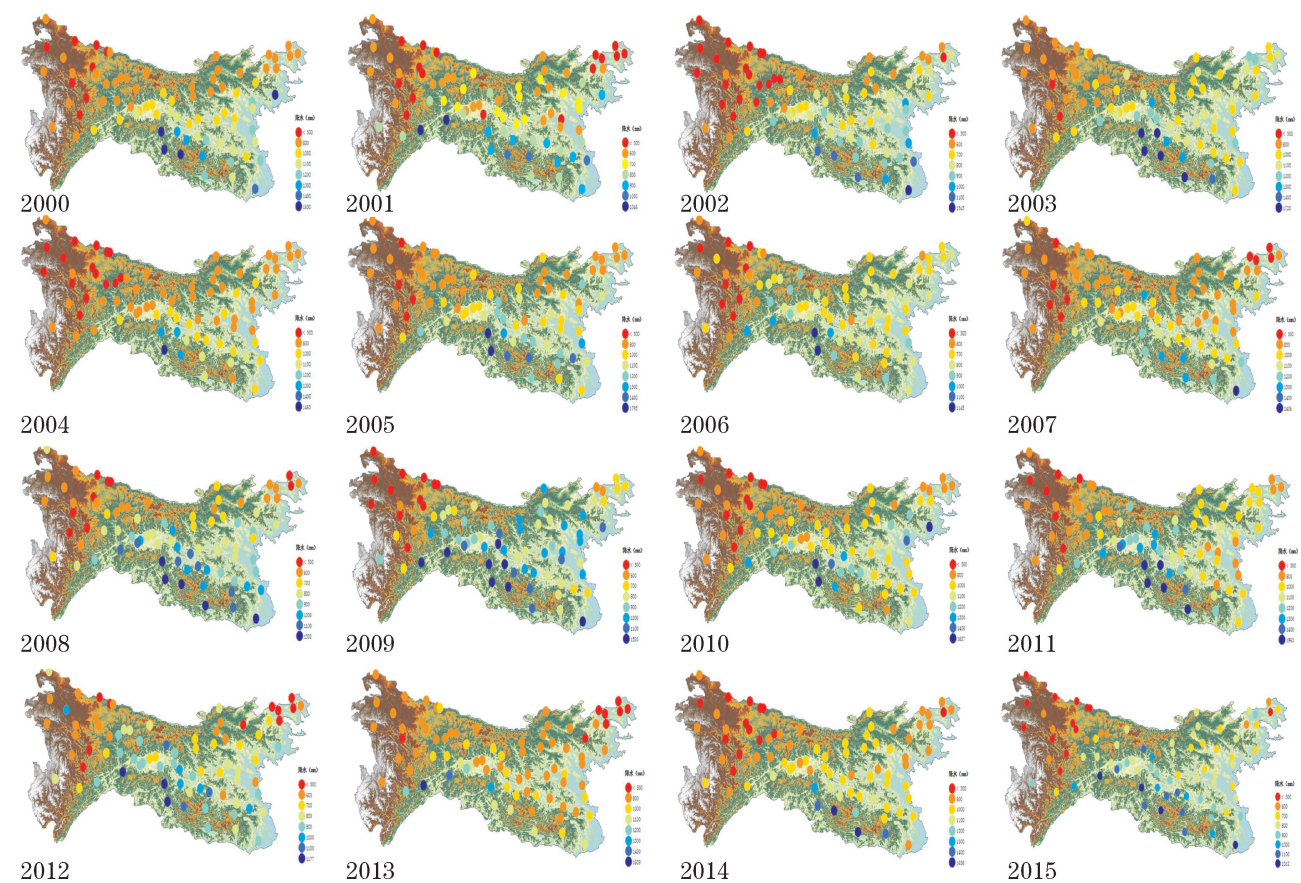


图 8 2000–2015 年年降水量站点降水

表 1 2000–2015 年各年 GWR 模型降尺度结果与实测结果间的误差统计

年份	<i>R</i>	<i>Bias</i> /%	<i>RMSE</i> /mm
2000	0.8901	−0.04	133.9707
2001	0.7369	−0.03	106.4379
2002	0.829	−0.04	130.9866
2003	0.8987	0	111.9331
2004	0.8276	−0.03	126.9837
2005	0.8391	−0.05	150.6195
2006	0.7075	−0.05	114.4232
2007	0.7815	−0.10	163.2642
2008	0.7637	−0.07	167.1374
2009	0.7531	−0.10	181.8028
2010	0.8038	−0.11	194.1882
2011	0.8388	−0.09	185.3006
2012	0.6885	−0.04	144.1867
2013	0.7523	−0.06	154.0985
2014	0.8168	−0.08	157.1954
2015	0.8439	0.01	117.5156

从图 6~8 可以看到,3 种降水数据的时空分布存在明显的一致性,年降水整体呈由北到南逐渐增加的

趋势,重庆境内降水较多,四川和陕西境内降水相对较少,甘肃境内降水最少;GWR 模型 1 km TRMM 数据与原始数据相比能提供更多细节性的降水信息,特别是一些年降水量偏少的地区。

以站点实测降水数据为真值,对年尺度上 GWR 模型估算的 1 km TRMM 数据的进行精度检验,得到表 1。由表 1 可知:GWR 模型 1 km TRMM 数据与实测降水数据存在显著的线性关系,相对偏差较小,均方根误差率略大,但相对于原始 TRMM 数据与实测降水数据的比较,GWR 模型得到的结果与其十分接近。结合图 6 可以看出降水多的年份 GWR 模型降尺度的数据精度略高于降水较少的年份。因此从整体而言,利用 GWR 模型提高 TRMM 数据的空间分辨率,在秦巴山区是可行的,数据在提高空间分辨率的同时能较好地保持数据的精度和准确性。

### 3 结论与讨论

研究的目的是获得秦巴山区年尺度 1 km×1 km 空间分辨率 TRMM 降水数据,为实现这一目标,选用地理加权回归(GWR)模型对 TRMM 降水数据进行降尺度,充分利用 GWR 模型对局部细化的优势,从而提高原始 TRMM 数据的空间分辨,并利用秦巴山区地面观

测的实际降水对降尺度结果进行验证。主要研究结论如下:

(1) TRMM 3B43 降水数据在研究区表现出较好的适用性。TRMM 降水数据与气象站点实测降水量之间存在较好的一致性,其相关系数最小为0.72,相对偏差最大仅为0.13%。

(2) GWR 模型能较好地适用于秦巴山区的 TRMM 3B43 降水数据的降尺度研究。秦巴山区 2000–2015 年 GWR 模型降尺度结果与实测降水数据之间具有明显的线性关系(相关系数达0.92,通过0.001信度检验)。尽管 GWR 模型降尺度降水较实测值整体偏小,但大多数年份,其相关系数和相对偏差均优于原始 TRMM 数据。

结合 GWR 模型和 TRMM 降水数据,开展了统计降尺度模型在秦巴山区的适用性研究。秦巴山区地形复杂,站点资料偏少,且构建 GWR 模型时,仅从年降水量出发,考虑对降水影响较大的植被因素(NDVI),难免有所欠缺。其次,模型构建过程中插值和重采样方法的选取可能对降尺度结果具有一定的影响。因此,今后研究过程中,应进一步比较不同降水产品,不同影响因子,不同插值和重采样方法等对降尺度结果的影响。与此同时,为满足不同研究需求,应进一步考虑不同时间尺度降水资料的降尺度研究,以得到更高分辨率的降水数据。

## 参考文献:

- [1] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1): 113–129.
- [2] Li M, Shao Q X. An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385, 51–64.
- [3] Duan Z, Bastiaanssen W G M. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131(5): 1–13.
- [4] Goodrich D C, Faures J M, Woolhiser D A, et al. Measurements and analysis of small-scale convective storm rainfall variability[J]. *Journal of Hydrology*, 1995: 173, 283–308.
- [5] Wheeler H S, Isham V S, Cox D R, et al. Spatial-temporal rainfall fields: Modeling and statistical aspects[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2000, 4(4), 581–601.
- [6] Schaake J C, Duan Q, Koren V, et al. An intercomparison of soil moisture fields in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D1): 19–34.
- [7] Luo L, Robock A, Mitchell K E, et al. Validation of the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) retrospective forcing over the southern Great Plains[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(D22): 8843.
- [8] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): 153–159.
- [9] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) [M]. Springer Netherlands, 2010: 3–22.
- [10] Kubota T, Shige S, Hashizume H, et al. Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2259–2275.
- [11] Zeng H W, Li L J. Accuracy validation of TRMM3B43 data in Lancang River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 994–1004.
- [12] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809–817.
- [13] 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(3): 28–38.
- [14] 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.
- [15] Gebremichael M, Krajewski W F, Over T M, et al. Scaling of tropical rainfall as observed by TRMM precipitation radar [J]. *Atmospheric Research*,

- 2008,88(3-4):337-354.
- [16] 张涛,李宝林,何元庆,等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征[J]. 自然资源学报,2015,30(2):261-270.
- [17] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted regression[M]. New York: Wiley,2002.
- [18] 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.
- [19] Ceccherini G, Amezttoy I, Hernández C, et al. High-Resolution Precipitation Datasets in South America and West Africa based on Satellite-Derived Rainfall, Enhanced Vegetation Index and Digital Elevation Model[J]. Remote Sensing, 2015,7(5):6454-6488.
- [20] 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.
- [21] 杨波,张勃,安美玲,等. 1961-2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(1):110-116.
- [22] 任志远,李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评[J]. 地理学报,2003,58(4):503-511.
- [23] Barati S, Rayegani B, Saati M, et al. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas[J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science,2011,14(1):49-56.
- [24] 王正兴,刘闯,HUETE Alfredo. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报,2003,23(5):979-987.
- [25] 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.
- [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.

## Statistical Downscaling of TRMM Precipitation Data in Qinling-Daba Mountains Area in Recent 16 Years

LEI Lei<sup>1</sup>, CHENG Zhi-gang<sup>1</sup>, FENG Dong-lei<sup>2</sup>, XIANG Wei<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Sichuan Provincial Key Laboratory of Plateau atmosphere and Environment, Chengdu 610225, China; 2. Huanren Manchu Autonomous County Meteorological Bureau of Benxi, Benxi 117200, China)

**Abstract:** In order to obtain high resolution TRMM data from Qinling-Daba Mountains, based on TRMM 3B43 precipitation data and MODIS NDVI vegetation data in the past 16 years, and combined with geographic weighted regression model (GWR), Qinling-Daba Mountains region was used as the object study in this paper, and the precipitation data with high spatial resolution were obtained by statistical downscaling method. The results are as follows: (1) TRMM 3B43 data has good practicability in Qinling-Daba Mountains. The maximum Bias is 0.13% and the minimum  $R$  is 0.72; (2) the GWR model shows that a trend of precipitation decrease from south to north, and a good correlation with the measured values ( $R$  is 0.71-0.90); (3) Compared with the original TRMM data, the GWR downscaled results are lower as a whole, but the latter is better than the former in terms of multi-year average obviously ( $R$  is 0.92,  $P < 0.001$ ). Therefore, using GWR model for studying downscaling TRMM 3B43 data has some credibility in Qinling-Daba Mountains.

**Keywords:** applied meteorology; climate change; Qinling-Daba Mountains; TRMM; GWR model