

引用格式: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):1388-1395. [ Zhao N, Jiao Y M. Spatial downscaling simulation of TRMM satellite precipitation data[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1388-1395.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180169

# 基于TRMM降水数据的空间降尺度模拟

赵娜<sup>1,2</sup>, 焦毅蒙<sup>3</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

## Downscaling of TRMM Satellite Precipitation Data

ZHAO Na<sup>1,2\*</sup>, JIAO YiMeng<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract:** Precipitation data with high accuracy and high spatial resolution are very important for improving our understanding of basin-scale hydrology, agriculture and earth science, and are essential in characterizing the behavior of a catchment. Attaining accurate and high spatial resolution precipitation data is deemed necessary for environmental, meteorological, and hydrological applications. This study proposed a statistical downscaling method based on the geographical weighted regression method (GWR) and high accuracy surface modeling method (HASM) by selecting the optimal downscaling scale and considering the errors produced in the scale-change process. GWR can address the spatially heterogeneous relationships between precipitation and its influence factors, such as digital elevation model (DEM), normalized difference vegetation index (NDVI) and slope, at different spatial resolutions, whereas HASM is used to merge the cross-scale error fields that are produced from the downscaling process and meteorological observations. The method was used to downscale the TRMM precipitation dataset over the Heihe River basin (HRB) from 0.25° to 1 km. Cross-validation method was used to validate the developed method combined with the station observations. Results showed that the proposed downscaling method performed better than the traditional downscaling method, which directly downscaled the TRMM products without considering the optimal downscaling scale. Besides, it was found that residual correction is necessary after the GWR-based downscaling method. The method proposed in this research can be used to downscale precipitation dataset with coarse resolution and could be applied to the areas with data-scare network and complex topography.

**Key words:** precipitation; geographical weighted regression method; high accuracy surface modeling; downscaling; Heihe river basin

**\*Corresponding author:** ZHAO Na, E-mail: zhaon@lreis.ac.cn

**摘要:**本研究以黑河流域为例,通过在不同空间尺度上建立降水与影响因素的关系并选择最优尺度以此进行降尺度,建立了

收稿日期:2018-04-10;修回日期:2018-07-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(41701456、91425304)。[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41701456, 91425304. ]

作者简介:赵娜(1986-),女,副研究员,主要从事气候要素模拟及气候变化研究。E-mail: zhaon@lreis.ac.cn

基于地理加权回归(GWR)与高精度曲面建模方法(HASM)相结合的跨尺度统计降尺度方法,对TRMM降水数据进行了降尺度模拟。最后,结合站点观测数据采用交叉验证法对降尺度结果进行了验证。结果表明,与传统的降尺度方法相比,考虑最优尺度的降尺度方法在一定程度上提高了降尺度结果的精度,同时表明对跨尺度过程中产生的误差进行修正可进一步提高结果精度。本研究所提出的方法可用于粗分辨率降水数据的降尺度模拟,可为站点稀疏地区或地形复杂地区高分辨率高精度降水数据的获取提供方法上的支持。

**关键词:**降水;地理加权回归;高精度曲面建模;降尺度;黑河流域

## 1 引言

降水是描述某地区乃至全球气候系统变化的关键指标,是全球水分和能量循环的核心组成部分。作为流域生态水文过程的关键输入参数,降水分布的准确估算直接影响着流域内水文水资源分析、水资源规划与管理及生态环境治理等。高精度高分辨率的空间化降水信息对认识流域生态系统与水文过程及其相互作用的途径和机理、建立流域生态水文过程模拟模型和水资源决策支持系统、提高流域水-生态-经济耦合系统演变的综合分析预测能力等方面具有重要的科学意义和应用价值<sup>[1-3]</sup>。如何准确、精细化估算降水空间分布是近年来流域和全球生态水文等研究的关键,备受科研人员关注<sup>[4-6]</sup>。

由于降水时空分布的复杂性,单一方法的高精度、高时空分辨率降水空间分布模拟结果还存在较大的差异和不确定性<sup>[7]</sup>。目前,国内外研究人员从站点尺度、区域尺度及全球尺度,基于函数插值、物理过程模型模拟、遥感估算等方法对降水空间分布进行了大量的模拟研究。利用气象站点的降水观测值进行空间插值可以获得无站点地区的降水要素值。然而,研究表明只有在观测站点密度比较大的地区,插值方法的精度才比较可靠,而稀疏站点以及地表变化较大区域的降水插值结果成为水文生态模拟中重要的不确定性来源<sup>[8]</sup>。物理过程模型能够实时模拟降水空间分布,但存在对复杂的气候系统部分简化、参数不易确定等问题<sup>[9]</sup>。近年来,遥感在降水研究中得到了十分广泛的应用<sup>[10-11]</sup>。遥感降水在捕捉大范围降水空间分布特征方面具有明显优势,能较好地体现降水空间分布模式,其时空连续性好。但受云层影响、反演算法及设备误差等原因,遥感降水具有很大的不确定性<sup>[12-13]</sup>。2007年开始,世界气象组织下属的国际降水工作组开展了PEHRPP计划,对各种遥感降水、模式降水产品(如TRMM、CMORPH、PERSIANN、APHRODITE、ERA-Interim及CFSR)的精度进行比较,该计划推动了降水数据精度评价的研究<sup>[14-16]</sup>。高分辨率的降

水数据对流域生态水文模拟质量具有决定性作用。然而,遥感估算降水及模式产品往往分辨率较低而不能满足精细尺度上生态水文模型的需求。为此研究者们提出和发展了多种降尺度方法,主要包括统计降尺度和动力降尺度。其中,统计降尺度由于简单易操作近年来得到了迅速发展<sup>[17-19]</sup>。但目前研究一般建立在大尺度上成立的统计关系在小尺度上仍然成立这一假设<sup>[20-21]</sup>。由于降水较强的空间异质性及地形的尺度效应,不同尺度下降降水的的影响因素复杂多样,高分辨率的降水空间分布信息需要在考虑跨尺度空间异质性的基础上对模式数据或遥感数据进行降尺度模拟<sup>[22]</sup>。

本研究拟以黑河流域为例,对目前被广泛使用的TRMM数据采用跨尺度降尺度方法进行降尺度模拟。通过综合考虑黑河流域特点,结合逐步回归法及地理加权回归法,在不同尺度上构建TRMM降水产品与其影响因素的关系,并选择最优尺度以此来降尺度,最后对跨尺度引入的误差采用高精度曲面建模方法(HASM)进行迭代修正。

## 2 研究区概况及数据源

### 2.1 研究区概况

黑河流域是中国第二大内陆河流域,是河西地区最大的内陆河流域,也是西北干旱区最具有代表性的流域。它发源于祁连山区,途径山前绿洲,抵达广阔的荒漠地带,形成了以水为主线的冰川-冻土-森林-草原-绿洲-荒漠等类型丰富的多元自然景观,成为水文、生态、土壤与人类活动相互作用研究的典型理想区域<sup>[23]</sup>。高分辨率降水空间分布的准确获取将为研究区生态水文社会经济状况研究提供必要的技术支持。黑河流域上游由于受东南季风的影响降水量相对较多,年平均降水超过350 mm,中游为河西走廊绿洲带,地形相对平坦,年平均降水为200 mm左右,下游为阿拉善高原,降水不足50 mm。降水量主要分布在5-9月,夏季降水占全年降水总量的58.29%。而黑河流域只有16个气象观测台站

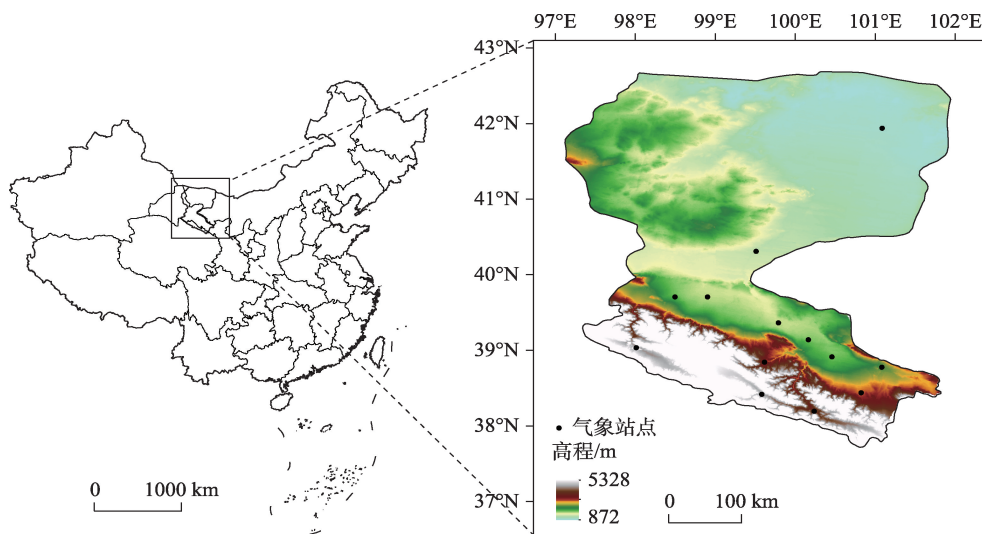


图1 研究区域及区域站点分布

Fig. 1 Study area and the distribution of meteorological stations

并且分布极不均匀(图1),由于地表信息具有高度空间异质性,难以将站点资料推广到整个黑河流域,因此站点资料在黑河流域生态-水文记成研究中使用范围有限。此外,研究表明黑河流域气象站点代表性不足<sup>[24]</sup>,故基于站点的方法得到的结果可信度差。

## 2.2 数据源

本研究采用的数据主要包括2013年的TRMM 3B43降水数据、站点降水数据、归一化植被指数(NDVI)数据、高程数据等。TRMM3B43数据来源于NASA (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)<sup>[25-26]</sup>,首先将该数据的降水率根据各月降水天数及时间计算得到逐月降水量值,其空间分辨率为0.25°。站点降水数据<sup>[27]</sup>来源于国家气象中心经过均一化校正后的逐月降水观测值。NDVI数据采用2013年的MODIS13A3产品(<http://www.spot-vegetation.com/>)<sup>[28]</sup>,空间分辨率为1km,经最大值合成得到年均最大NDVI。高程数据来源于SRTM数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>)<sup>[29]</sup>,采用AunDEM软件将其从90 m分辨率重采样成1km空间分辨率。其它地形指标如坡度(Slope)、坡向(Aspect)及地形起伏度(Relief)均由DEM数据经过ArcGIS软件生成。

## 3 研究方法

黑河流域降水由南向北呈减少趋势,上游降水

由东南向西北递减,降水垂直地带性明显。由于降水受地形、气候、经纬度等因素的影响,使降水与DEM、NDVI等影响因子间的关系存在时空上的不连续与非线性特征。本研究在前人研究基础上<sup>[30-31]</sup>,以NDVI表示区域植被信息,以DEM、坡度、坡向、地形起伏度表示区域地形信息。首先引入影响黑河流域月降水的地理地形因素,主要包括经度(Lon)、纬度(Lat)、高程(DEM)、高程的二次方(DEM<sup>2</sup>)、坡度(Slope)、坡度的二次方(Slope<sup>2</sup>)、坡向(Aspect)、坡向的二次方(Aspect<sup>2</sup>)、地形起伏度(Relief)、地形起伏度的二次方(Relief<sup>2</sup>)及归一化植被指数(NDVI)和NDVI的二次方等。对逐月降水采用逐步回归的方法筛选降水的主要影响因素,继而采用地理加权(GWR)的方法对逐月降水在1°、0.75°、0.5°、0.25°及0.1°上进行降尺度模拟,并根据不同尺度上GWR模型的最优拟合优度指标R<sup>2</sup>构建最优GWR降尺度模型,得到降尺度后的逐月降水背景趋势值,并进而得到对应站点残差;同时,结合中尺度天气过程及局地地形交互作用,对站点残差采用高精度曲面建模方法HASM进行迭代修正,最终得到高分辨率降水空间分布场,该方法计算流程如图2所示。

具体来讲,首先构建地理加权回归GWR的计算公式如下:

$$Y_j = \alpha_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^p \alpha_i(u_j, v_j) X_{ij} + \varepsilon_j \quad (1)$$

式中:  $\alpha_0(u_j, v_j)$  及  $\alpha_i(u_j, v_j)$  为回归方程的常数项及



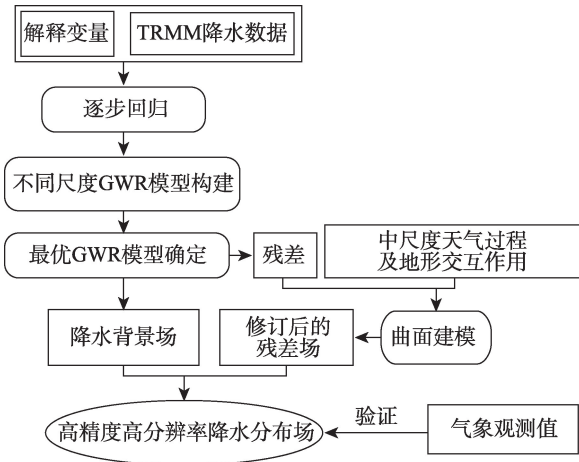


图2 降尺度方法计算流程图

Fig. 2 The computing process of the developed downscaling method

回归系数;  $\varepsilon_j$  为第  $j$  个网格点的回归残差;  $(u_j, v_j)$  为第  $j$  个网格点的经纬度值; 回归系数可由式(2)求得。

$$\alpha(u_j, v_j) = (X^T(W(u_j, v_j))X)^{-1}X^TW(u_j, v_j)Y \quad (2)$$

式中:  $X$ ,  $Y$  分别为解释变量及模拟变量;  $W(u_j, v_j)$  为权重系数; 权重系数的计算主要依赖于核函数的选取。一般选择高斯核函数, 即  $W_i = \exp[-(d_{ij}/h)^2]$ , 其中  $d_{ij}$  表示数据点  $j$  与样本点  $i$  之间的欧氏距离;  $h$  为权重带宽; GWR 一般通过交叉验证、AIC 法则等优化准则选择最优带宽<sup>[32]</sup>。本文采用交叉验证优化带宽。

$$cv(h) = \sum_{i=1}^n [y_i - y_{(\neq i)}(h)]^2 \quad (3)$$

式中:  $y_i$  为因变量在空间位置  $i$  处观测值;  $y_{(\neq i)}(h)$  表示  $h$  带宽下, 回归点周围的模拟点。通过一系列  $h$ , 计算相应  $cv(h)$ , 选择出最佳带宽  $h_0$ , 使得:

$$cv(h_0) = \min_{h>0} cv(h) \quad (4)$$

GWR 可以看做是通过权重矩阵  $W$  对普通最小二乘回归方法的扩展, 进而生成空间局部变化的回归系数, 从而刻画出空间非平稳趋势。

根据不同尺度下 GWR 生成的降尺度结果所对应的最优拟合优度值  $R^2$ , 选择最优尺度, 并以此最优尺度所对应的 GWR 权重函数构建方式, 将原始 TRMM 月尺度数据从  $0.25^\circ$  降尺度到  $1 \text{ km}$  分辨率网格:

$$GWR_{downscaling} = Optimal \{GWR_{1^\circ}, GWR_{0.75^\circ}, GWR_{0.5^\circ}, GWR_{0.25^\circ}, GWR_{0.1^\circ}\} \quad (5)$$

本文假定 GWR 降尺度后的随机误差为一不规

则曲面, 可由微分几何学原理结合站点残差构建。最后, 对于降尺度过程中引入的误差, 采用高精度曲面建模方法 (HASM) 进行迭代修正。HASM 具体表达式可表示为:

$$\begin{cases} \min \left\| \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} x^{n+1} - \begin{bmatrix} d \\ q \\ p \end{bmatrix} \right\| \\ s.t. Sx^{n+1} = k \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $S(l, (i-1)J+j) = 1$ ,  $k(l) = \bar{f}_{i,j}$ ;  $S$  为气象站点位置构成的采样矩阵;  $k$  为站点处的值减去 GWR 降尺度值得到的差值向量; 矩阵  $A$ 、 $B$  及  $C$  为微分几何学里关于曲面的基本方程的系数矩阵;  $d$ 、 $q$  及  $p$  为曲面的基本方程的右端项。利用法方程组方法将式(6)转为如下线性方程组求解。

$$\bar{A}x^{n+1} = \bar{b} \quad (7)$$

式中:  $\bar{A} \in R^{m \times m}$ ;  $\bar{A} = A^T A + B^T B + C^T C + \lambda^2 S^T S$ ;  $\bar{b} = A^T d + B^T q + C^T p + \lambda^2 S^T k$ ;  $\lambda$  为拉格朗日参数, 由于黑河流域地形复杂, 本文中参数  $\lambda$  取值  $2^{109}$ 。对上述方程组进一步采用预处理共轭梯度法求解即可得最终模拟结果。

## 4 结果

本研究以黑河流域为例, 选择 2013 年 1、4、7、10 月对 TRMM3B43 月尺度降水数据由  $0.25^\circ$  降尺度为  $1 \text{ km}$  分辨率。通过利用 GWR 方法建立不同尺度 ( $1^\circ$ 、 $0.75^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.25^\circ$  及  $0.1^\circ$ ) 上降水与影响因素的关系, 得到各月份最优降尺度分辨率分别为  $0.25^\circ$ 、 $0.1^\circ$ 、 $0.5^\circ$  及  $0.1^\circ$ 。传统降尺度方法直接对 TRMM 数据在原始分辨率  $0.25^\circ$  上进行降尺度得  $1 \text{ km}$  分辨率结果, 本文比较了所提出的跨尺度降尺度 (GWR<sub>optimal</sub>-HASM) 与传统降尺度 (GWR-HASM) 结果差异。采用交叉验证法, 逐次从站点中剔除一个值, 如此循环, 直到所有站点值都被剔除一遍后, 求解各站点上误差的平均值。误差指标采用平均绝对误差 (MAE), 均方根误差 (RMSE) 及偏差百分比 (PBIAS) 表示。公式如下:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1, \dots, N} |Pre_i - Pre_i^*| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1, \dots, N} (Pre_i - Pre_i^*)^2} \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{k=1, \dots, N} (Pre_i^* - Pre_i)}{\sum_{k=1, \dots, N} Pre_i^*} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $Pre_i$  为第  $i$  个站点上的降尺度值;  $Pre_i^*$  第  $i$  个

站点上的模拟值;  $\overline{Pre}^*$  所有站点观测值的平均值;  $N$  为观测站点个数。

由表1可知,1月单独采用GWR进行降尺度后结果精度优于TRMM原始数据。由MAE、RMSE及PBIAS得出经过跨尺度后的降尺度GWR<sub>optimal</sub>-HASM方法要好于单独采用GWR方法,且好于传统的GWR-HASM降尺度方法。4月,降尺度后的结果精度比原始TRMM数据有了明显改善。且误差指标表明,GWR<sub>optimal</sub>-HASM方法好于单独采用

GWR方法及传统的GWR-HASM方法。7月,传统的降尺度方法GWR-HASM结果精度要低于原始TRMM数据,而采用跨尺度后的GWR<sub>optimal</sub>-HASM方法模拟精度最高。10月,3种降尺度方法结果精度较TRMM原始数据有了明显改善,但各方法差别较大,精度最高的为GWR<sub>optimal</sub>-HASM方法。整体而言,考虑了跨尺度后的GWR<sub>optimal</sub>-HASM方法精度优于传统的GWR-HASM方法,也好于单独采用GWR的降尺度方法。

表1 不同降尺度方式及降尺度前后结果误差  
Tab. 1 Errors of downscaling methods and the original TRMM data

	误差	TRMM	GWR	GWR <sub>optimal</sub> -HASM	GWR-HASM
1月	MAE/mm	0.9282	0.9259	0.9271	0.9488
	RMSE/mm	1.2213	1.1860	1.1759	1.2285
	PBIAS/%	-0.2071	-0.3033	-0.2005	-0.2602
4月	MAE/mm	4.6879	2.1075	2.0107	2.7614
	RMSE/mm	7.5588	2.6821	2.5658	4.1456
	PBIAS/%	-2.2401	-1.0159	-1.0002	-1.2880
7月	MAE/mm	43.5698	43.000	42.1283	44.9397
	RMSE/mm	54.4638	53.7348	52.5625	55.6298
	PBIAS/%	0.4971	0.4967	0.4817	0.5051
10月	MAE/mm	4.2226	2.7978	2.4975	3.1629
	RMSE/mm	5.7366	3.4299	2.8917	4.0989
	PBIAS/%	-1.5358	-0.9615	-0.8491	-1.1724

图3-6给出了1、4、7、10月TRMM原始资料及降尺度后的降水空间分布。结合站点实测数据可以看出TRMM数据在个别站点处出现了低估与高

估现象。基于GWR的方法在4个月中的结果与对应的TRMM原始数据空间分布差异较大,经过HASM修正后的降尺度降水空间分布模式与

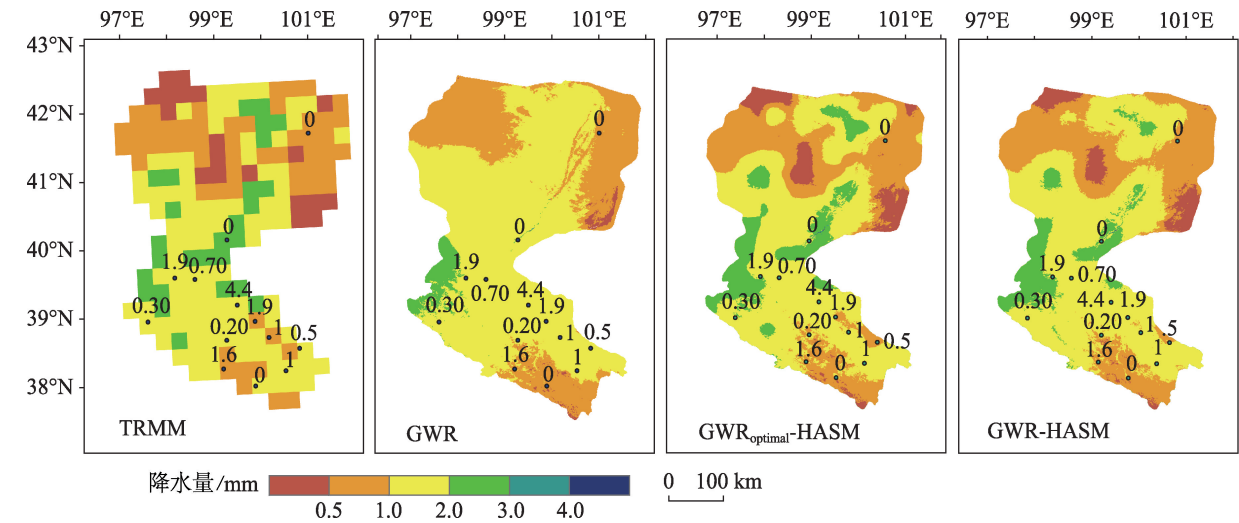


图3 1月降水空间分布  
Fig. 3 Precipitation in January

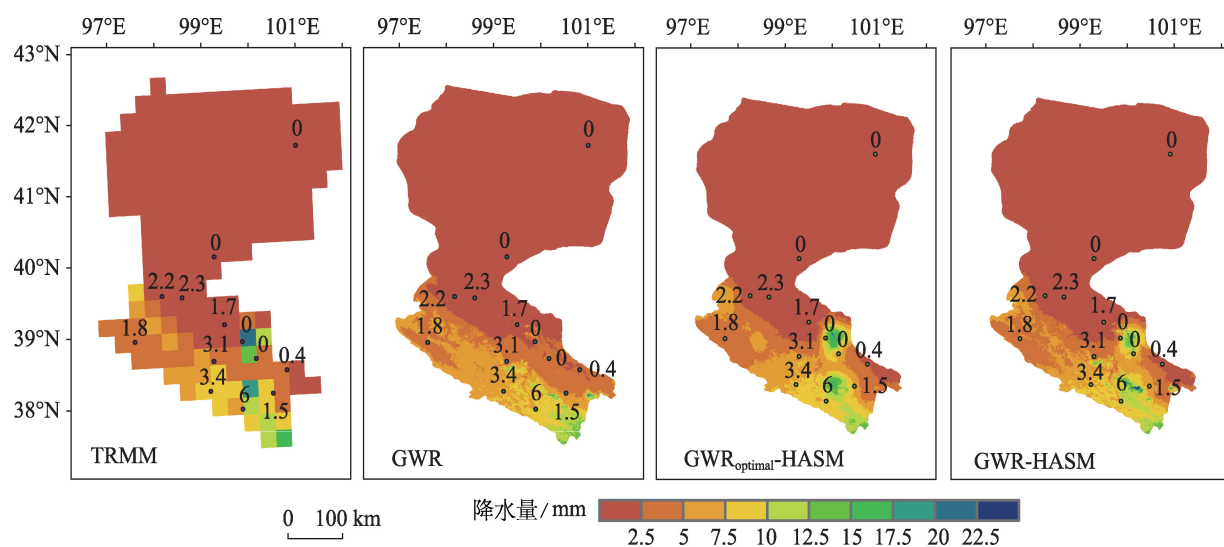


图4 4月降水空间分布  
Fig. 4 Precipitation in April

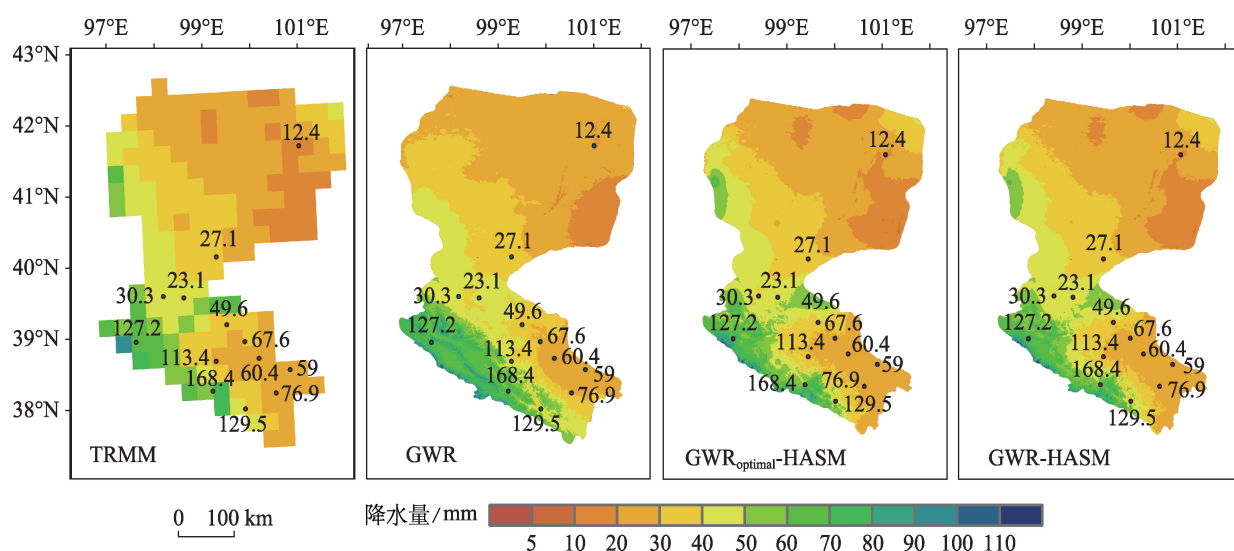


图5 7月降水空间分布  
Fig. 5 Precipitation in July

TRMM原始资料整体上的一致,但GWR<sub>optimal</sub>-HASM和GWR-HASM方法在个别地区细节差异明显。例如,1月及4月上游祁连县西北部地区、7月在肃北地区及10月的额济纳旗地区,相比GWR-HASM方法,GWR<sub>optimal</sub>-HASM较好地还原了TRMM原始资料在该地区的观测信息。

## 5 结论

传统的降尺度方法建立大尺度气候要素(预报因子)和区域气候要素(预报量)之间的统计关系,

然而这种关系即使充分考虑了最佳预报因子,也未必在空间尺度上最优。由于地理地形因素对降水的影响具有尺度效应,本研究首先考虑在不同尺度上建立统计关系,并选取最优尺度以此来降尺度,继而对降尺度后引入的误差采用HASM方法进行迭代修正。模拟结果表明,考虑了跨尺度后的降尺度方法优于传统的直接降尺度方法。且研究表明误差修正在降尺度中是不可缺少的一步。本研究提出的方法将为粗分辨率气候数据特别是地形复杂地区的降水降尺度提供方法上的支持。

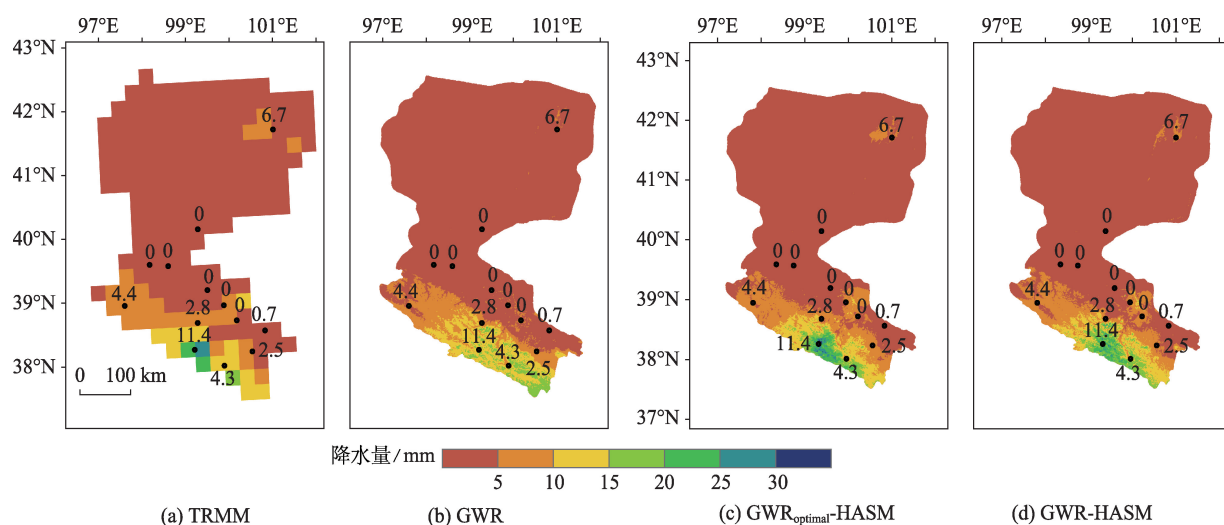


图6 10月降水空间分布

Fig. 6 Precipitation in October

## 参考文献(References):

- [1] Renard B, Kavetski D, Leblois E, et al. Toward a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modeling: characterizing rainfall errors using conditional simulation[J]. *Water Resources Research*, 2011,47:11516.
- [2] 夏军,石卫,雒新萍,等.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].*水科学进展*,2015,26(2):279-285. [ Xia J, Shi W, Luo X P, et al. Revision on water resources vulnerability and adaption measures under climate change [J]. *Advance in Water Science*, 2015,26(2):279-285. ]
- [3] Zubieta R, Getirana A, Espinoza J C, et al. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall-runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,528:599-612.
- [4] Hancock P A, Hutchinson M F. Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2006,21:1684-1694.
- [5] Teegavarapu R S V, Meskele T, Pathak C S. Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods[J]. *Computers & Geosciences*, 2012,40:28-39.
- [6] Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2014,119: 3063-3075.
- [7] Gebremichael M, Bitew M M, Hirpa F A, et al. Accuracy of satellite rainfall estimates in the Blue Nile Basin: lowland plain versus highland mountain[J]. *Water Resources Research*, 2014,50:8775-8790.
- [8] Zhao T B, Yatagai A. Evaluation of TRMM 3B42 product using a new gauge-based analysis of daily precipitation over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34:2749-2762.
- [9] Silva V B S, Kousky V E, Higgins R W. Daily precipitation statistics for South America: An intercomparison between NCEP reanalyses and observations[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011,12:101-117.
- [10] Vergara H, Hong Y, Gourley J J, et al. Effects of resolution of satellite-based rainfall estimates on hydrologic modeling skill at different scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014,15:593-613.
- [11] Famiglietti J S, Cazenave A, Eicker A, et al. Satellites provide the big picture[J]. *Science*, 2015,349(6249):684-685.
- [12] 李德仁,童庆禧,李荣兴,等.高分辨率对地观测的若干前沿科学问题[J].*中国科学:地球科学*,2012,42(6):805-813. [ Li D R, Tong Q X, Li R X, et al. Several frontier scientific problem about high resolution earth observation[J]. *Science China: Earth Science*, 2012,42(6):805-813. ]
- [13] Gosset M, Viarre J, Quantin G, et al. Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013,139(673):923-940.
- [14] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等.赣江流域高分辨率卫星降水数据的精度特征与时空变化规律[J].*中国科学:技术科学*,2013,43(4):447-459. [ Hu Q F, Yang D W, Wang Y T, et al. Spatio-temporal change characteristics and accuracy of high resolution satellite remote sensing precipitation in Ganjiang river basin[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2013,43(4):447-459.]
- [15] Sun R C, Yuan H L, Liu X L, et al. Evaluation of the lat-



- est satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe river basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,536:302-319.
- [16] Sharigi E, Steinacker R, Saghaian B. Assessment of CPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(2):135-159.
- [17] Sachindra D A, Huang F, Barton A F, et al. Issues associated with statistical downscaling of general circulation model outputs: a discussion[C]. In *Proceedings of Practical Responses to Climate Change National Conference*, 2012, Canberra, Australia.
- [18] 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*, 2015,162:119-140.
- [19] Zhao N, Yue T X, Zhou X, et al. Statistical downscaling of precipitation using local regression and high accuracy surface modeling method[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016,1:1-12.
- [20] 王晨亮,岳天祥,范泽孟,等.高精度曲面建模的中国气候降尺度模型[J].*地球信息科学学报*,2012,14(5):599-611. [ Wang C L, Yue T X, Fan Z M, et al. HASM-based climatic downscaling model over China[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2012,14(5):599-611. ]
- [21] 马金辉,屈创,张海筱,等. 2001-2010年石羊河流域上游TRMM降水资料的降尺度研究[J].*地理科学进展*,2013,32(9):1423-1432. [ Ma J H, Qu C, Zhang H X, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on DEM in the upstream of Shiyang river basin during 2001-2010[J]. *Progress in Geography*, 2013,32(9):1423-1432.]
- [22] Hall A. Projecting regional change[J]. *Science*, 2014,346(6216):1461-1462.
- [23] 程国栋,肖红浪,徐中民,等.中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J].*冰川冻土*,2006,28(3):406-413. [ Cheng G D, Xiao H L, Xu Z M, et al. Water issue and its countermeasure in the inland river basins of northwest china-a case study in Heihe river basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006,28(3):406-413. ]
- [24] 许宝荣,邹松兵,刘勇,等. GIS支持下黑河流域降水台站的地形代表性[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,2015,51(2):166-172. [ Xu B X, Zou S B, Liu Y, et al. Terrain representation for the precipitation stations in Heihe river basin based on GIS[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2015,51(2):166-172. ]
- [25] Duan Z, Bastiaanssen WGM. 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.
- [26] Barnes HC, Zuluaga MD, Houze RA. Latent heating characteristics of the MJO computed from TRMM Observations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,120:1322-1334
- [27] 李庆祥,彭嘉栋,沈艳. 1900-2009年中国均一化逐月降水数据集研制[J].*地理学报*,2012,67(3):301-311. [ Li Q X, Peng J D, Shen Y. Development of homogenized monthly precipitation dataset in Chin during 1900-2009[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(3):301-311. ]
- [28] Stow D, Hope A, McGuire D. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,89:281-308.
- [29] 汤国安,龚健雅,陈正江,等.数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J].*测绘学报*,2001,30(4):361-365. [ Tang G A, Gong J Y, Chen Z J, et al. A simulation on the accuracy of DEM terrain representation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001,30(4):361-365. ]
- [30] 李海燕,王可丽,江灏,等.黑河流域降水的研究进展与展望[J].*冰川冻土*,2009,31(2):334-341. [ Li H Y, Wang K L, Jiang H, et al. Study of the precipitation in the Heihe river basin: Progress and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009,31(2):334-341.]
- [31] 孙佳,江灏,王可丽,等.黑河流域气候平均降水的精细化分布及总量计算[J].*冰川冻土*,2011,33(2):318-324. [ Sun J, Jiang H, Wang K L, et al. The fine spatial distribution of mean precipitation and the estimation of total precipitation in Heihe river basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011,33(2):318-324. ]
- [32] 覃文忠.地理加权回归基本理论与应用研究[D].上海:同济大学2007. [ Tan W Z. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. ]