

# 结合 TRMM 数据的区域降水高精度 曲面建模研究

张 涛<sup>1,2</sup>, 李宝林<sup>1,3\*</sup>, 赵 娜<sup>1</sup>, 许丽丽<sup>1,2</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, 北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

**摘要** 高精度曲面建模方法(High Accuracy Surface Modeling, HASM),从理论上解决了传统方法在插值过程中峰值削平和边界震荡等问题。其模拟精度相对于经典插值方法有很大提高,已成功应用于人口密度、土壤属性,以及气候要素等领域的空间制图。然而,由于地面气象站点数量和分布的限制,使得HASM仅依靠站点数据难以得到高精度的空间降水估计数据,因此,本文以地貌与气候类型复杂多样的我国中西部地区2010年年降水量空间分布模拟为例,采用混合插值法进行HASM区域降水模拟。结果表明,TRMM作为背景场的HASM模拟的年降水量精度,在全局和局部明显优于IDW、Spline和Kriging等经典插值方法的结果,作为背景场的HASM模拟精度,MAE和RMSE分别为125.15 mm和155.80 mm,其他方法最好的模拟结果比其误差值分别高出53.6%和54.5%;其模拟误差在不同子区域都较小;各种方法在平原的精度都高于山区的精度。

**关键词** 高精度曲面建模(HASM); TRMM; 空间插值; 降水

**DOI:**10.3724/SP.J.1047.2015.00895

## 1 引言

准确的降水空间分布信息对流域水文过程模拟、地质灾害预报、水资源管理与评价,以及生态环境治理等研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。空间插值是进行空间降水估计的主要方法之一,其实质是根据给定样点属性值及其空间位置关系,建立充分逼近要素空间分布特征的函数,从而估计未知点属性值。传统的降水插值方法主要有反距离权重法(Inverse distance weighting, IDW)、样条函数法(Spline)和克里金法(Kriging)等<sup>[3-5]</sup>。由于这些方法并未考虑空间曲面自身的特点,在建模过程中未考虑曲面的内蕴因素对曲面重建的约束作用,因而难以控制模型的误差<sup>[6]</sup>。高精度曲面建模方法(High Accuracy Surface Modeling, HASM)根据微分几何原理,以曲面论基本定理,从理论上解决了传统方法,在插值过程中存在的峰值削平和边界震荡等问题,并已成功应用于人口分布、土壤属性制图、气候要素制

图等领域<sup>[7-10]</sup>,其模拟精度相对于IDW、Spline和Kriging等经典插值方法有很大提高。然而,HASM受到地面观测站点分布和数量的限制,尤其对于缺少降水地面观测数据的地区,仅靠站点观测数据,难以捕捉到准确的降水空间变化信息。

近年来,以TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星降水产品为代表的降水产品数据集已得到广泛应用,但是,这些数据集都存在空间分辨率较低,降水估计绝对值不准确的问题,具有较大的不确定性<sup>[11-14]</sup>。同时,在气象要素的空间插值研究中,混合插值法可在整体插值的基础上,通过修正残差以进一步提高精度,并已在HASM模型中得到应用<sup>[6,9]</sup>。因此,本文尝试采用混合插值法,即将TRMM数据作为背景场(趋势面),HASM用于修正残差场(去除趋势后),以提高HASM对区域降水空间结构细节的模拟能力,进而提高区域降水空间模拟精度。

收稿日期 2015-01-18;修回日期:2015-03-05.

基金项目 国家“973”计划项目(2015CB954101、2015CB954103);国家科技支撑计划项目(2012BAH33B01)。

作者简介 张 涛(1987-),男,四川泸县人,博士生,研究方向为遥感环境变化检测。E-mail: zhangtao@lreis.ac.cn

\*通讯作者:李宝林(1970-),男,辽宁辽中人,博士,研究员,研究方向为遥感环境变化检测。E-mail: libl@lreis.ac.cn

## 2 研究区概况与数据预处理

(1)研究区位于我国中西部地区( $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ),包括重庆、贵州、湖南、湖北、河南大部 and 四川东部及陕西南部和甘肃的东南部(图1),总面积约 $1.06\times 10^6\text{ km}^2$ 。研究区地形复杂多样,北部为秦岭山地,中部为武陵山区,西南部为贵州高原,东部为两湖平原,西部为四川盆地东部。气候属亚热带与暖温带过渡区,从东部湿润区过渡到西北部的半干旱区,降水逐渐递减,多年平均降水量主要在400~2000 mm之间。

(2)研究数据包括区域内96个国家标准气象站和25个地方气象站,在2010年的年降水量观测数据,TRMM 3B43 (Version 7)同期降水估值产品,以及30 m分辨率的DEM数据。国家标准气象站点观测数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。地方气象站点位于研究区中部的湖北省恩施州境内,共获得58个地方气象站点的地面降水量观测数据;原始数据为逐小时记录,整理后得到年降水量数据,本文只选用了其中25个无缺测站点的数据。TRMM 3B43降水数据下载自美国国家航空航天局(NASA)数据共享网站(<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>),其空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。原始TRMM 3B43数据是以HDF文件格式按月存储的降水率数据(mm/h),使用IDL编程语言读取并

换算成每月降水量,最终计算得到2010年年降水量数据。DEM数据下载自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),原始分辨率为30 m。以该数据为基础,在ArcGIS软件中生成30 m分辨率的坡度数据,然后统计出每个TRMM格网内相应的坡度均值。

## 3 基于TRMM数据的区域降水高精度曲面建模方法

### 3.1 基于HASM的混合插值法

本文采用HASM的混合插值法,对区域降水进行模拟。经过近十几年的发展,该方法已基本成熟<sup>[6]</sup>。在气象要素空间插值研究中,混合插值法通过修正趋势面中存在的残差来提高插值精度,兼具有整体插值法和局部插值法的优点,与HASM方法结合后能得到较好的模拟结果<sup>[15]</sup>。混合插值法首先采用整体插值法,对空间中变化平稳的部分(低频振荡部分)进行插值(生成趋势面),然后根据采样点的值计算去除趋势面后的残差值(生成残差场),再采用局部插值法对变化剧烈(高频振荡部分)的残差场进行插值,最后将趋势面与插值后的残差场相加得到最终插值结果。本文采用HASM的混合插值方法,即在混合插值中将HASM用于残差场的模拟,趋势面则通过TRMM估值产品数据,以及

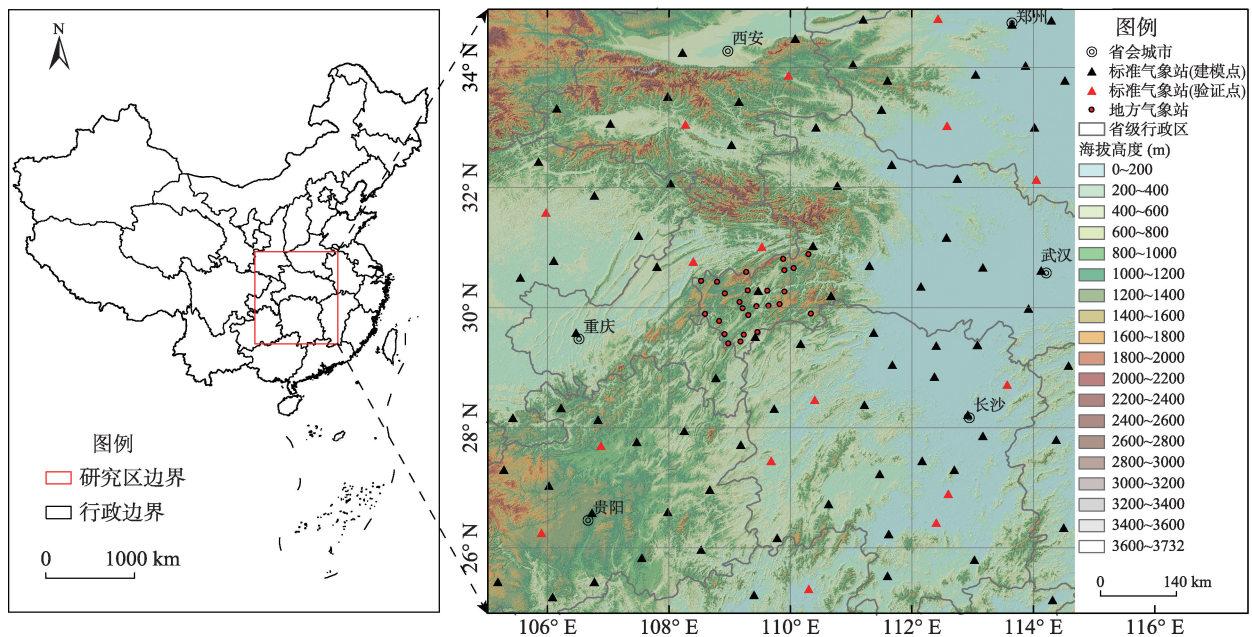


图1 研究区位置与气象站点分布

Fig. 1 Locations of the study area and meteorological stations



IDW、Spline 和 Kriging 插值结果得到。计算时采用预处理共轭梯度法(PCG)<sup>[16]</sup>,进行 HASM 模型方程组的迭代求解。PCG 方法的初值为残差场对应的列向量,迭代收敛阈值(容差)为  $10^{-12}$ 。上述 HASM 方程组的构建和求解,以及结果精度验证在 Matlab 2010 平台实现,其他数据处理过程(如趋势面的生成)主要在 ArcGIS 10.0 平台完成。

### 3.2 模型精度验证

本文采用 2 组验证点进行模型模拟精度的检验(图 1):(1)在 96 个标准气象站中随机选取 80 个站点为建模点(黑色三角形),其余 16 个站点作为全局验证点(红色三角形),用于检验大尺度范围的模型模拟精度;(2)建模点不变,将 25 个地方气象站点作为局部验证点(红色圆点),用于检验小尺度范围的模型模拟效果。分别运用 TRMM 数据产品, IDW、Spline 和 Kriging 插值结果,作为背景场进行 HASM 模拟(分析单元大小为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ),并比较结果精度。

选取平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)评价模拟结果精度。MAE 和 RMSE 的计算如式(1)、(2)所示。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tilde{p}_i - p_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tilde{p}_i - p_i)^2} \quad (2)$$

式中,  $p_i$  和  $\tilde{p}_i$  分别为第  $i$  个验证点的降水观测值和模拟值; $n$  为验证点个数。

## 4 HASM 模型模拟结果与分析

在全球和局部上,以 TRMM 为背景场的 HASM 模拟精度都最高(表 1)。HASM\_I、HASM\_S、HASM\_K 和 HASM\_T 分别表示采用 IDW、Spline 和 Kriging 插值结果,以及 TRMM 数据作为背景场的 HASM 模拟结果。

在全球上(采用国家标准站的独立验证点进行

精度检验), HASM\_T 的 MAE 和 RMSE 分别为 125.15 mm 和 155.80 mm,明显优于其他方法;它们中 HASM\_K 模拟精度最高,其 MAE 和 RMSE 分别为 192.27 mm 和 240.69 mm,比 HASM\_T 的模拟误差分别高出 53.6% 和 54.5%;HASM\_S 模拟精度最低, MAE 和 RMSE 分别为 233.59 mm 和 327.75 mm,比 HASM\_T 的模拟误差分别高出 86.6% 和 110.4%。

在局部上(采用地方气象站的独立验证点进行精度检验), HASM\_T 的 MAE 和 RMSE 分别为 167.53 mm 和 228.81 mm;其他方法的 MAE 和 RMSE 都较为接近,其中, HASM\_I 模拟精度略高,但仍低于 HASM\_T 的模拟精度。HASM\_I 的 MAE 和 RMSE 分别为 195.95 mm 和 262.61 mm,比 HASM\_T 的模拟误差分别高出 17.0% 和 14.8%。因此, TRMM 作为背景场的 HASM 降水模拟精度,无论在全球还是局部都明显优于 IDW、Spline 和 Kriging 等经典方法插值结果作为背景场的 HASM 模拟精度。

各种背景场下 HASM 模拟结果,反映的降水总体空间分布格局较为相似,都展现出降水量自东南向西北递减的趋势,但 TRMM 作为背景场的 HASM 模拟结果更能准确地反映降水分布的基本格局(图 2、3)。从图 3 可看出, A 处为我国湿润半湿润地区向半干旱区急剧过渡区,最北端延伸到甘肃天水渭河北部的黄土高原,降水由东南向西北迅速减少<sup>[17]</sup>,只有在 HASM\_T 方法模拟得到的降水空间分布格局中才反映出这个变化规律。B 处为渭河平原区,也只有在 HASM\_T 方法模拟得到的降水分布格局中,才反映出渭河平原降水过程的相对一致性。C 处为武陵山脉北支的澧水上游,为湖南省一个主要降水中心, D 处为衡阳-邵阳丘陵区,是湖南省主要“干旱区”<sup>[18]</sup>,且这 2 个区域只有在 HASM\_T 方法模拟得到的降水分布格局中,才能较明确地判定为降水的局部低值与高值中心。因此,以 TRMM 作为背景场的 HASM 模拟结果的空间格局分布更为合理。

TRMM 作为背景场的 HASM 模拟结果,能更有效地避免传统空间插值算法中,由个别站点观测高值导致的“牛眼睛”现象(图 2、3)。在以 HASM\_I、HASM\_S 和 HASM\_K 等方法模拟得到的降水空间分布格局中, E 处高值区的空间范围均明显大于 HASM\_T 方法模拟结果。从相邻的独立样本误差结果来看,在紧邻 E 点南部的站点(衡阳), HASM\_I、HASM\_S、HASM\_K 和 HASM\_T 的相对误差,分别为 45.6%、77.5%、49.5% 和 20.4%。因此,降水量以

表 1 不同背景场的 HASM 计算精度(mm)

Tab. 1 Accuracy of HASM with different trend surfaces

验证点	指标	HASM_I	HASM_S	HASM_K	HASM_T
全局	MAE	212.32	233.59	192.27	125.15
	RMSE	260.27	327.75	240.69	155.80
局部	MAE	195.95	197.77	196.84	167.53
	RMSE	262.61	259.71	256.39	228.81

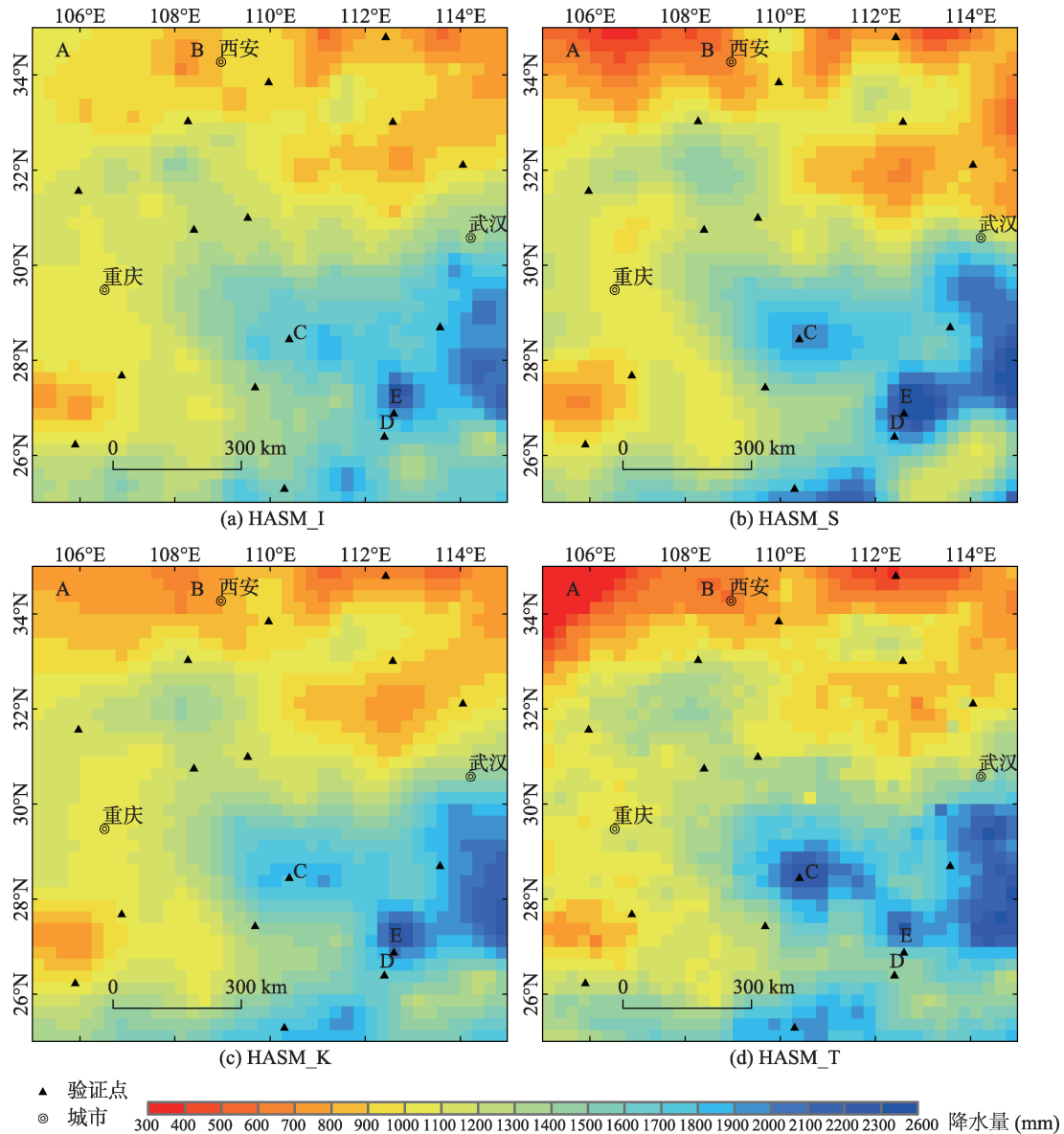


图2 不同背景场HASM模拟的降水量分布

Fig. 2 Spatial distribution of rainfall data obtained using HASM model with different background fields

TRMM作为背景场的HASM模拟结果的误差要远小于其他3种方法的模拟误差(图3),同时可看出这个地区并不存在大范围的降水高值区。

从降水空间分布来看,各种方法其相对误差在山区高于平原地区,且以TRMM为背景场的HASM模拟误差,比其他背景场下的HASM模拟误差在不同子区域都较低(图3、4和表2)。各种方法的降水模拟误差,在研究区中、北部山区高于边缘平原地区,在中部山区相对误差大部分在20%~40%之间,主要表现为高估降水量(图3)。用平均坡度代表格网内的地形起伏大小程度,对平均坡度分级后可得到不同地形起伏状况的子区域(图4)<sup>[19]</sup>,研究区东部为平均坡度较小的平原区(G1),研究区西部及南部

为平均坡度中等大小的山区(G2),研究区中、北部为平均坡度较大的山区(G3)。根据各子区内验证点相对误差统计的均方根值(表2)来看,各种方法的均方根值大小顺序都为G3>G1>G2,且相对于其他方法,HASM\_T的均方根值在各子区域都最小,具有更好的适应性。

尽管TRMM降水估计绝对量不够准确,但TRMM数据能较好地反映降水的空间分布差异,而这种降水分布差异很难从稀疏的气象站观测数据中反映出来。以TRMM降水数据为背景场,利用HASM模型对气象站点实测值与TRMM估计值的残差进行曲面模拟,充分利用了HASM在曲面建模方面的优势。结合TRMM采用HASM模型进行降



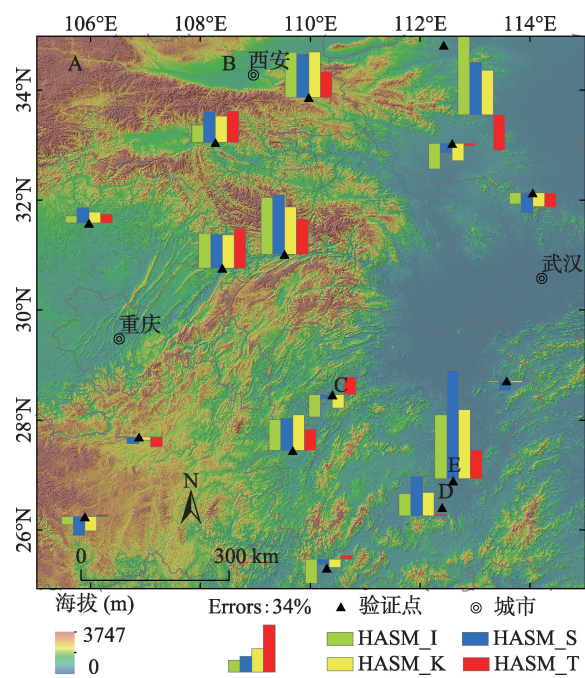


图3 验证站点处不同背景场的HASM降水模拟相对误差

Fig. 3 Relative errors of HASM rainfall modeling with different background fields at validation stations

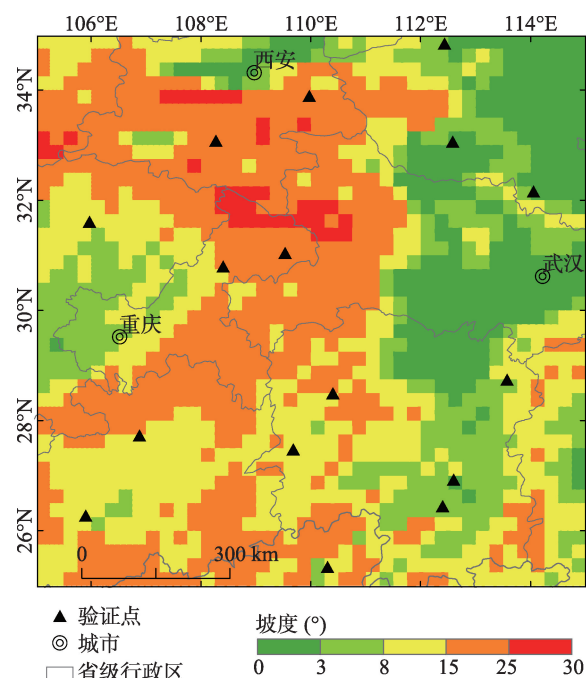


图4 研究区平均坡度

Fig. 4 Average slope in the study area

表2 按平均坡度分级后各组验证点相对误差的均方根值

Tab. 2 Root mean square of the relative errors for validation station groups classified by mean slope

区域类型	坡度范围(°)	验证点数(个)	HASM_I(%)	HASM_S(%)	HASM_K(%)	HASM_T(%)
G1	0~8	6	31.38	37.72	25.79	13.89
G2	8~15	6	13.68	12.16	12.66	9.05
G3	15~30	4	29.40	30.88	27.91	23.78

水空间分布模拟,既能反映区域降水的基本空间结构,又能获得较为准确的降水绝对量,因此,其明显提高了降水空间分布的模拟效果。

5 结论与展望

本文以中国中西部地区为例,模拟了2010年降水量空间分布,采用混合插值法将TRMM 3B43卫星降水数据作为背景场,利用HASM模型修正残差场进行区域降水模拟,结果表明:

(1)TRMM作为背景场的HASM模拟精度,在全局和局部都明显优于IDW、Spline和Kriging等经典方法插值结果作为背景场的模拟精度。在全局尺度上,MAE和RMSE分别为125.15 mm和155.80 mm,其他方法最好的模拟结果,比其误差值高出53.6%和54.5%;在局部尺度上,MAE和RMSE分别为167.53 mm和228.81 mm,其他方法最好的模拟结

果比其误差值高出17.0%和14.8%。

(2)各种背景场下HASM模拟结果反映的降水总体空间分布格局相似,且在山区的误差都高于平原地区的误差,但在局部区域TRMM作为背景场的HASM模拟结果更能反映降水分布基本空间规律。在不同子区域,以TRMM为背景场的HASM模拟误差,比其他背景场下的HASM模拟误差低,具有更好的适应性。

(3)在类似气象要素插值等实际应用中,难以有足够数量的实测样点数据,来准确刻画待推测要素的空间结构。因此,将能反映待推测要素空间结构的其他相关辅助数据与HASM模型结合,以弥补采样点数量与分布的不足,是HASM在实际应用过程中应深入研究的方向。

参考文献:

[1] 何红艳,郭志华,肖文发.降水空间插值技术的研究进展

- [J].生态学杂志,2005,24(10):1187-1191.
- [2] 郭伦,吴小娟,肖晨超,等.五种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究——以深圳市为例[J].地理与地理信息科学,2010,26(3):19-24.
- [3] Daly C, Helmer E H, Quiones M. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra[J]. *International Journal of Climatology*, 2003,23(11):1359-1381.
- [4] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines-part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation[J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998,2(2): 139-151.
- [5] Vicente-Serrano S M, Saz-Sánchez M A, Cuadrat J M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature[J]. *Climate Research*, 2003,24(2): 161-180.
- [6] 赵娜.高精度曲面建模(HASM)的鲁棒性分析[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [7] Tian Y Z, Yue T X, Zhu L F, *et al.* Modeling population density using land cover data[J]. *Ecological Modelling*, 2005,189(1-2):72-87.
- [8] Shi W J, Liu J Y, Du Z P, *et al.* Surface modeling of soil PH[J]. *Geoderma*, 2009,150(1-2):113-119.
- [9] 赵娜,岳天祥,王晨亮.1951-2010年中国季平均降水高精度曲面建模分析[J].地理科学进展,2013,32(1):49-58.
- [10] Yue T X. Surface modeling: high accuracy and high speed methods[M]. London: CRC Press, 2011.
- [11] 曾红伟,李丽娟.澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J].地理学报,2011,66(7):994-1004.
- [12] 杨云川,程根伟,范继辉,等.四川盆地及周边地区 TRMM 3B42 数据精度检验[J].气象科学,2013,33(5):526-535.
- [13] Feidas H. Validation of satellite rainfall products over Greece[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010,99: 193-216.
- [14] Karaseva M O, Prakash S, Gairola R M. Validation of high-resolution TRMM-3B43 precipitation product using rain gauge measurements over Kyrgyzstan[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012,108:147-157.
- [15] Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, *et al.* Climate change trend in China, with improved accuracy[J]. *Climatic Change*, 2013,120:137-151.
- [16] Golub G H, Van Loan C F. Matrix computations[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009.
- [17] 赵鑫,马金珠,聂中青,等.天水地区降水时空特征及其对印度洋偶极子的响应[J].干旱区研究,2009,26(6):917-922.
- [18] 游兴,李昌,喻妮厚.湖南省降水特性分析[J].湖南水利水电,2004(6):41-43.
- [19] 汤国安,宋佳.基于DEM坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J].水土保持学报,2006,20(2):157-160.

## Analysis on High Accuracy Surface Modeling in Regional Rainfall Estimation Combined with TRMM Data

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, LI Baolin<sup>1,3\*</sup>, ZHAO Na<sup>1</sup> and XU Lili<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** High Accuracy Surface Modeling (HASM) method has theoretically solved issues of hill peak smoothing and oscillation phenomenon at edges, and its modeling accuracy is much better than the traditional interpolation methods such as Inverse Distance Weighting (IDW), Spline and Kriging. HASM has been successfully applied to the spatial mapping in multiple fields, such as population density, soil properties and climatic elements, etc. However, as the number and distribution of meteorological rain gauges are limited, getting the accurate precipitation distribution maps based on HASM is still a challenge. Additionally, remote sensing rainfall estimation data, which can provide better spatial information of the precipitation, but without accurate rainfall values, may play an important role. Therefore, in this study, we combine these two data sets together based on HASM model

to estimate regional rainfall. Central and western China ( $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ ), which are featured by extensive high mountains and plains, is chosen as the study area to model the spatial distribution of its total precipitation in 2010. Using satellite rainfall estimation, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B43 data is chosen as the background field for HASM modeling. Then, we compare its results with respect to the classical methods (including IDW, Spline and Kriging) based (also used as background fields) HASM modeling. Results show that TRMM based HASM method has higher accuracy and its results exhibit a better spatial pattern for precipitation simulation than those from the other methods. The MAE and RMSE of TRMM based HASM simulation results are 125.15 mm and 155.80 mm, respectively. The simulation errors of the best simulation results using the other methods are respectively 53.6% and 54.5% higher than TRMM based HASM simulation results. Besides, its relative error in each sub-region is also smaller than the other methods. In the multiple applications of spatial elements modeling, e.g. meteorological elements modeling, where there is not enough sampling sites to characterize the spatial structure of an element, the accuracy of HASM modeling will be limited. Therefore, combining it with supplementary information to compensate the deficiency of limited sampling sites will contribute to the production of better results for HASM applications.

**Key words:** high accuracy surface modeling (HASM); TRMM; spatial interpolation; precipitation

**\*Corresponding author:** LI Baolin, E-mail: libl@lreis.ac.cn