

中国大陆 TRMM 降水多尺度精度评价

刘培^{1,2}, 吴凯^{1,2}, 许怡^{1,2}, 吴永祥^{1,2}, 王高旭^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据中国气象数据网中国大陆 2009—2014 年逐日降水格点数据, 在月、年时间尺度上, 采用误差、相关系数以及相对误差等指标, 对热带降水测量 (TRMM) 降水数据进行精度评价。结果表明在月、年尺度上 TRMM 降水数据精度均较高, 年均误差分布与年降水量相关; 月尺度相关系数达到了 0.99, 年尺度相关系数为 0.86; TRMM 精度主要受降水强度和海拔地形影响; 在干旱和高海拔地区 TRMM 降水数据精度较低。

关键词: TRMM 降水数据; 多尺度分析; 精度评价; 中国大陆

中图分类号: TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2018)03-0042-06

Multi-scale accuracy evaluation of TRMM precipitation data in mainland China//LIU Pei^{1,2}, WU Kai^{1,2}, XU Yi^{1,2}, WU Yongxiang^{1,2}, WANG Gaoxu^{1,2} (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China*)

Abstract: According to the 4 years (2009–2014) daily rainfall data of mainland china from the China Meteorological Data Service Center (CMDC), the precision of TRMM precipitation data is evaluated by indicators such as error, correlation coefficient, and relative error on the time scale of months and years respectively. The results show the TRMM precipitation data is of high accuracy on the monthly and annual scales. The monthly correlation coefficient is 0.99 and the annual correlation coefficient reaches to 0.86. The accuracy of TRMM precipitation data is mainly affected by precipitation intensity and altitudes. In arid and high-altitude regions the accuracy of the TRMM precipitation data is low.

Key words: TRMM precipitation; multi-scale analysis; accuracy evaluation; mainland China

降水是水循环过程的重要环节, 当前降水资料获取最主要、最直接的方式仍然是地面站点观测。然而, 由于降水分布的时空差异性, 有限的地面站点观测资料难以真实反映降水的空间异质性, 尤其在地面观测站点稀疏的地区。卫星遥感降水数据凭借其时效性强、时间周期短、空间分辨率高等特点, 已作为地面观测降水替代资料广泛应用于水文模拟、水旱灾害预报、水资源管理等方面^[1-5]。TRMM (tropical rainfall measuring mission) 是美国和日本于 1997 年联合开展的遥感降水观测计划, 其发布的 TRMM3B42 是一个准全球、准实时卫星降水产品, 也是当前精度最高的卫星遥感降水数据之一^[6]。TRMM 卫星已于 2015 年 6 月坠毁, 本次研究资料时间系列到 2014 年止。目前, TRMM 各系列产品已广泛应用于众多研究领域, 如降水特征分析^[7]、水文^[8-9]、农业^[10]、土壤水反演^[11-13]、火灾探测^[14]等。

最新发布的 TRMM3B42V7 降水数据扩大了空间覆盖范围, 从原先的南北纬 36° 延伸至 50°, 这个新覆盖区超越了 TRMM 卫星的最大观测范围。由于高密度气象站点降水资料相对匮乏, 且降水栅格数据产品时间系列较短, TRMM3B42V7 在中国大陆区的验证尚不充分, 亟须进一步结合高密度、长系列观测资料开展多尺度的 TRMM 降水数据质量评价。中国气象数据网的中国地面降水日值 0.5°×0.5° 格点数据集由全国 2474 个国家级水文站实测降水资料经重采样、插值获得, 数据经交叉验证和误差分析, 质量状况良好。目前国内对 TRMM 降水数据精度的相关研究都使用的是小区域站点实测资料且涉及站点数量较少, 尚未出现以中国地面降水日值 0.5°×0.5° 格点数据集对 TRMM 降水数据进行精度评价。本文采用精度较高的中国地面降水日值 0.5°×0.5° 格点数据集在全国尺度上开展 TRMM 降水精度评价,

并结合地区降水情况与地形地势对 TRMM 降水精度进行了分析并探讨成因。

1 研究资料及方法

1.1 研究资料

中国地面降水日值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集 (V2.0) (简称格点) 来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn.html>), 包括: ①全国 2 474 个国家级台站近 50 年逐月、逐日降水量资料。②利用 GTOPO30 数据 (分辨率为 $30'' \times 30''$) 重采样生成的中国范围 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 数字高程模型数据, 建立了 1961 年以来中国区域地面降水日值和月值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集。从插值误差分析、降水量气候态空间特征、典型个例分析和插值试验三个方面对此降水格点数据集进行定量分析与评估, 结果显示, 格点分析与原始序列相关程度很高, 误差较小, 能够比较细致、准确地描述中国大陆年平均降水场的东南多、西北少的主要空间特征^[15-16]。

研究采用 TRMM3B42V7 (简称 TRMM) 2009—2014 年中国大陆降水资料, 资料来源于美国国家航空航天局, 由全球尺度 TRMM 降水资料经 ArcGIS 裁剪后得到。原始数据时间分辨率为 1d、空间分辨率为 0.25° , 并通过累加得到中国大陆区域逐日、逐月、逐年尺度的 TRMM 降水数据。

1.2 研究方法

将气象数据网的 ASCII 格式逐日降水数据经标准控制和可靠性分析后导入 ARCGIS 软件, 转换成栅格数据, 得到 0.5° 空间分辨率的中国大陆降水栅格图像, 再经三次卷积法重采样得到与 TRMM 相对应的 0.25° 空间分辨率栅格数据。采用误差 E (error)、平均误差 E_M (mean error)、相对误差 E_R (relative error)、相关系数 C (correlation coefficient) 指数对 TRMM 降水数据精度进行评价。

$$E_i = T_i - Z_i \quad (1)$$

$$E_M = \sum_{i=1}^n E_i / n \quad (2)$$

$$E_R = E_i / Z_i \quad (3)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(Z_i - \bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}} \quad (4)$$

式中: E_i 为第 i 时段 ($i=1, 2, \dots, n$ 为时段数) 的绝对误差; T_i 、 Z_i 分别为 i 时段的 TRMM 降水量与格点降水量; \bar{T} 为时段 TRMM 均值; \bar{Z} 为时段格点均值。

2 TRMM 降水数据精度评价

2.1 月尺度 TRMM 降水数据质量评价

选取 TRMM 降水数据与格点数据的月误差、月平均误差、月相对误差、月相关系数指标利用式(1)~(4)对 TRMM 降水数据的月精度进行评价。

2.1.1 月误差

月误差指 TRMM 降水量减去格点降水量的差值。选取 2009—2014 年的 1 月与 7 月作为代表月份进行误差分析, 结果如图 1、图 2 所示 (地图投影坐标系为 Xian_1980_3_Degree_GK_CM_120E, 下同)。由图 1 可知: TRMM 降水误差在 1 月主要分布在 $-20 \sim 20$ mm 区间, 其面积占比可达 90% 以上, 其中负误差主要分布在西藏西部、秦岭、武夷山等南方海拔变化剧烈的山地地区, 正误差主要分布在南方湿润多雨地区。在枯水期西北干旱地区和南方山区 TRMM 月降水值相对格点数值偏小, 而在南方湿润多雨的丘陵平原地区 TRMM 月降水监测值呈偏大态势。TRMM 降水数据在 7 月误差主要分布在 $-50 \sim 50$ mm 区间, 面积占比达到了 80% 以上, 在 2014 年更是达到了 92%。在东南、西南和西藏南部等降水充沛地区 TRMM 月降水监测值小于格点值, 表现为负误差; 而在云贵高原、内蒙西北部、西藏中部、新疆

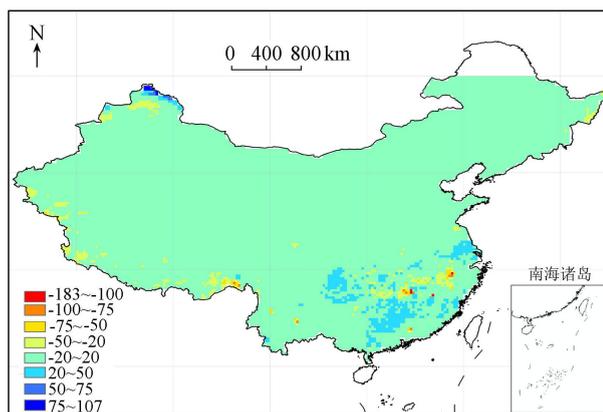


图 1 2009—2014 年 1 月降水误差 (单位: mm)

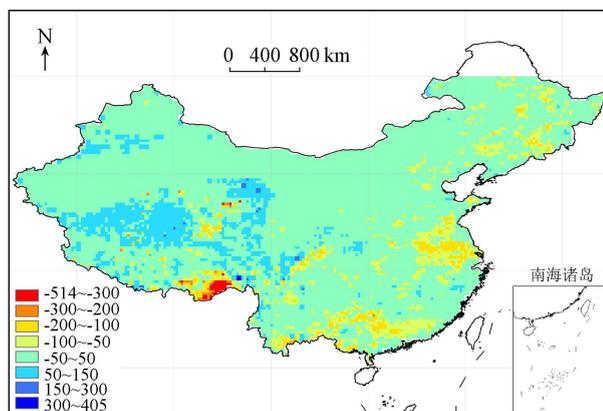


图 2 2009—2014 年 7 月降水误差 (单位: mm)

北部等降水稀少地区,TRMM 月降水监测值高于格点值,表现为正的误差。

2.1.2 月相对误差

选取 1 月和 7 月作为降水典型月份,计算 2009—2014 年 1 月和 7 月的月均相对误差值。分析 1 月和 7 月平均相对误差值(图 3、图 4)可知:在东北、华北、西北等地区 1 月降水较少,相对误差均值较大;在中部、东部以及南部地区相对误差均值基本在 50% 左右,总体来说 1 月相对误差均值较大,这与该月降水量少有关。在西北以及新疆与西藏的中部等干旱地区在 1 月没有发生降水,图中表现为空白区域,栅格属性为 no data。在 7 月相对误差均值总体分布在 25% 上下,面积占比约为 60%,主要分布在二、三级阶地的地势相对平缓地区;在青藏高原、昆仑山、祁连山、巴颜喀拉山等第一级阶地的高山高原干旱地带相对误差均值较大,约为 75%,可见 TRMM 降水监测精度受地形影响较大。而在青藏高原的喜马拉雅山脉南部相对湿润地区,误差值也较大,但表现出负值,即 TRMM 监测值小于格点值。

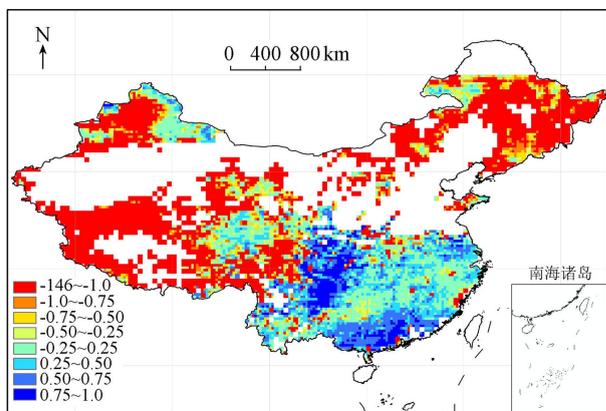


图 3 2009—2014 年 1 月降水相对误差均值(单位:%)

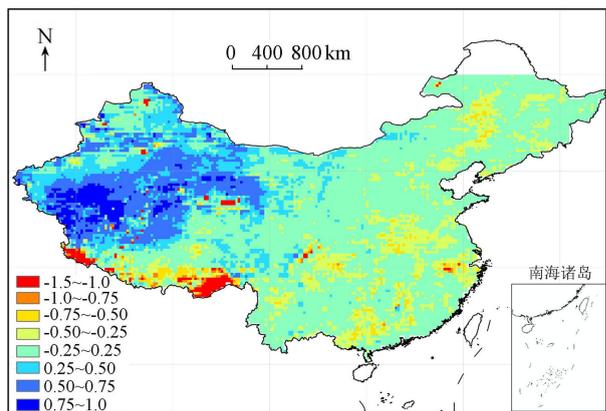


图 4 2009—2014 年 7 月降水相对误差均值(单位:%)

统计 2009—2014 年的各月相对误差均值,其月相对误差变化如图 5 所示,其图形分布呈下凹抛物线状,月相对误差随着月降水量的增多而减少,在 4—10 月的汛期月相对误差变幅较小,保持在 $\pm 15\%$

上下。而在 11 月至次年 3 月的枯水月份月相对误差均值较大,最大值出现在 2014 年 2 月,达到了 28%。综上可知 TRMM 月降水精度受地形和降水强度影响较大。

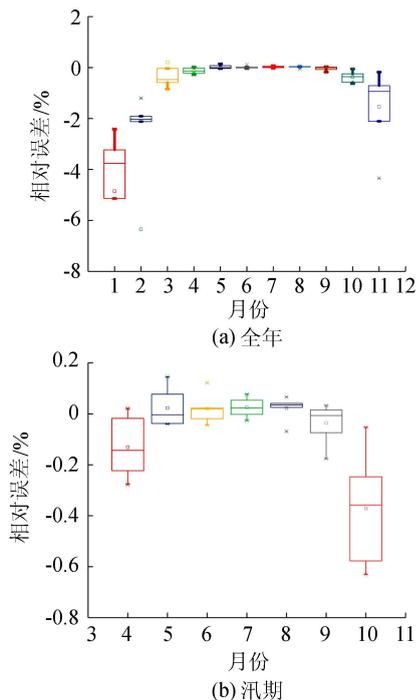


图 5 月相对误差均值

2.1.3 月平均误差

将 2009—2014 年共计 72 个月栅格计算得到误差均值分布图(图 6、图 7),结合月均降水量情况分析可知:时间尺度上 TRMM 月均降水量总体上大于格点值,在干旱月份尤其明显。空间尺度上在东南、西南以及喜马拉雅南麓等湿润山区,TRMM 监测值小于格点值,表现出负误差;在内蒙古西北部、西藏中部、新疆北部等干旱地区 TRMM 监测值大于格点值,表现为正误差。从整体来看月均误差分布在 $-20 \sim 20 \text{ mm}$ 之间,占总面积的 91%。

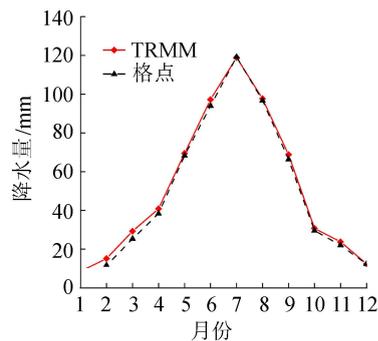


图 6 2009—2014 年月均降水量

2.1.4 月降水相关性

统计 TRMM 与格点的 2009—2014 年 72 个月的月均降水量,作相关性分析可知:在月尺度上,TRMM 降水与格点降水呈正线性相关(图 8, $y =$

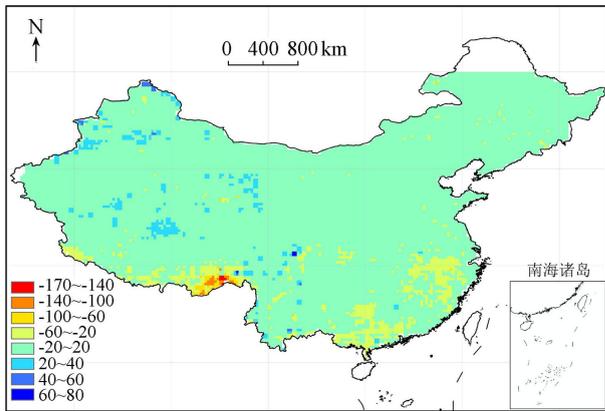


图7 2009—2014年月均降水误差(单位:mm)

0.9996x - 1.7086, C = 0.993)。可见在月尺度上 TRMM 降水数据精度较高,对丰枯月份都能很好地拟合,在对缺乏水文资料月份进行研究时可以移用 TRMM 降水数据。

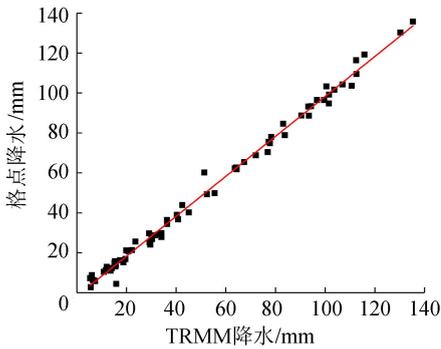


图8 TRMM 与格点降水相关性

2.2 年尺度 TRMM 降水精度评价

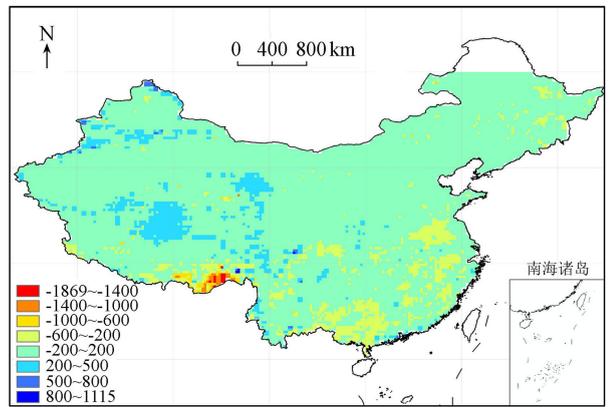
2.2.1 年降水误差

中国大陆 TRMM 降水的年误差总体分布在 -200 ~ 200 mm 区间,面积占比达 80% 以上。在东部、华南以及喜马拉雅山脉南麓等相对湿润地区 TRMM 年降水监测值偏小,年降水误差表现为负值;在阿尔泰山脉、天山山脉、昆仑山脉、巴颜喀拉山脉、祁连山脉等高山高原区 TRMM 降水监测值偏大,年降水绝对误差表现为正值(图9)。

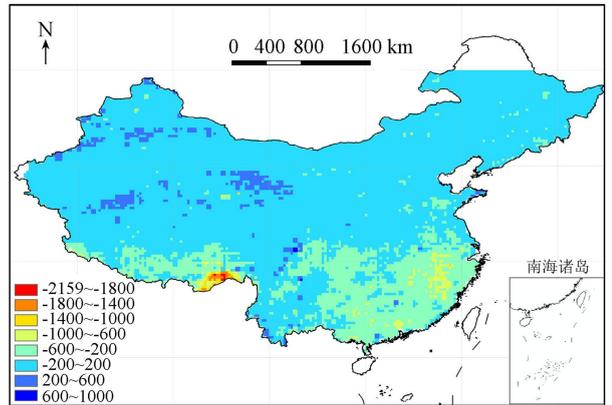
在年降水最小值上,TRMM 降水值明显小于格点值;在年降水最大值上,TRMM 降水值高于格点值(图10、图11)。

2.2.2 年降水相对误差

年降水相对误差以东经 100° 为基准线。东经 100° 以西的第一级阶地相对误差较大,在内蒙古西北部、甘肃北部、青海中北部、新疆中部、西藏北部等地区出现了较大的正相对误差,而在新疆的西北部、西藏西南部出现了较大的负误差。东经 100° 以东的大陆二、三级阶地相对误差较小,大致在 -25% ~ 25% 区间,但在长白山、武夷山、南岭等山区相对误差较大。综合可知相对误差大小主要受高程和降水



(a) 2009年



(b) 2014年

图9 年降水误差(单位:mm)

量影响,随高程增加和降水量的减小而增加,在干旱地区主要为正的相对误差,湿润地区主要表现负的相对误差(图12)。

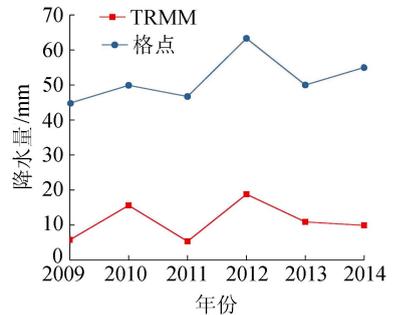


图10 年最小降水过程

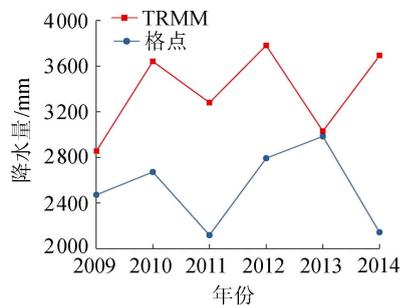
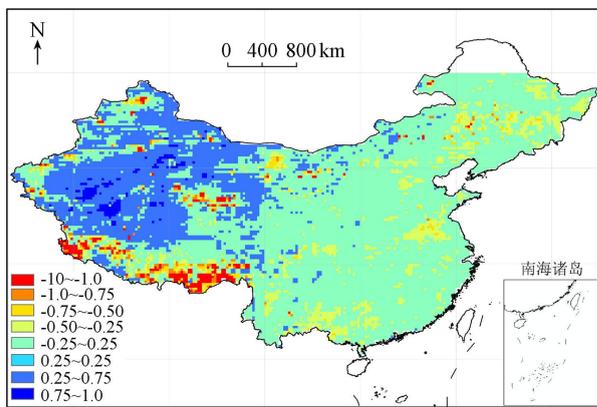


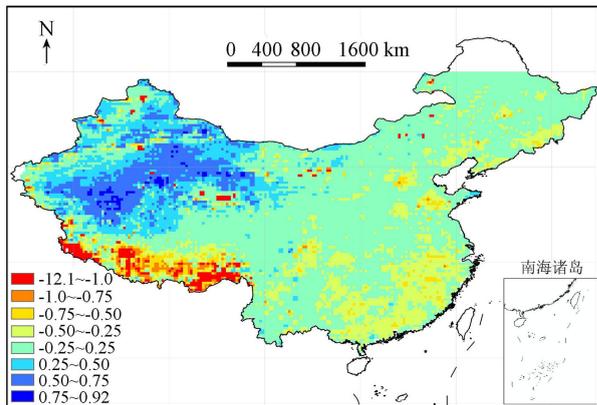
图11 年最大降水过程

2.2.3 年降水平均误差

将 2009—2014 年的降水误差栅格数据经栅格计



(a) 2009年



(b) 2014年

图 12 年降水相对误差 (单位: %)

算得到年均误差分布图(图 13), 年均误差分布大致呈现两个规律: ①年均误差分布与年降水量相关。年均误差从西北到东南呈现出由负变正趋势。在西北、华北等干旱地区年均误差表现为正误差, 在华南地区、青藏高原南部等降水较多地区误差表现为负值。②年均误差的分布与高程相关。在中国大陆第一级阶地误差表现出正值, 且在阿尔泰山、天山、昆仑山等山区误差相对较大; 在大陆二三级阶地年均误差表现出负值, 在横断山脉、武夷山脉等山区误差相对偏大。

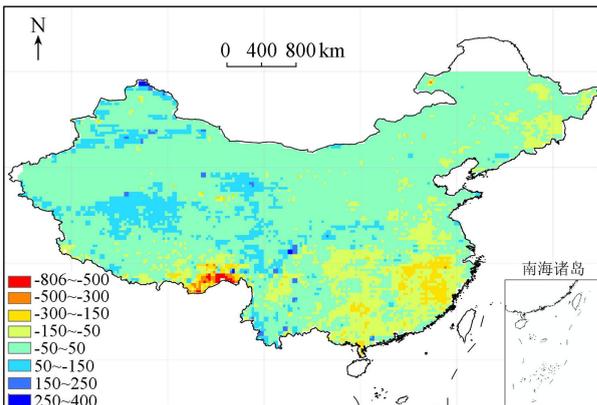


图 13 年降水平均误差 (单位: mm)

2.2.4 年降水相关系数

将 TRMM 降水数据与气象格点资料做相关性分析(图 14)可知, 在空间尺度上相关系数分布呈现

两极化现象。其中阿尔泰山脉、天山山脉、昆仑山脉、喜马拉雅山脉、祁连山脉、秦岭等高山地区 TRMM 年降水相关系数表现出较大的负值, 上述地区平均海拔在 2 000 m 以上; 在华北、东北、华中、华南等地势相对平缓地区 TRMM 年降水相关系数表现出较大的正值。即在高海拔的山区 TRMM 年降水数据精度较差, 而在平原区或矮山丘陵区 TRMM 年降水数据精度较高, 年降水相关系数可达 0.9 以上。

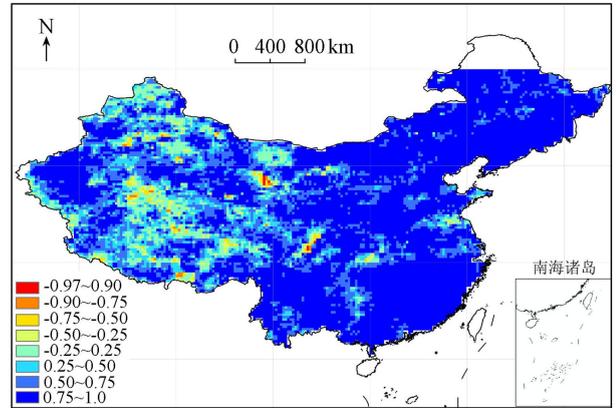


图 14 年降水相关系数分布

3 结论

a. 在月尺度上看, 在降水较小的干旱月份和降水丰富的多雨月份降水误差分布规律不同。在干旱月份 TRMM 监测值表现为北方地区偏小南方地区偏大, 在多雨月份 TRMM 监测值表现为湿润地区偏小干旱地区偏大。在低海拔地区精度较高, 高山高原地区精度较差。

b. 在年尺度上看, 在低海拔湿润地区 TRMM 降水监测值表现偏小现象, 在高海拔的山地 TRMM 监测值表现偏大。在新疆、甘肃、内蒙古西部等干旱地区 TRMM 监测值偏大, 在喜马拉雅南麓湿润地区 TRMM 监测值偏小。

c. 空间尺度上看, 在西藏、新疆、青海等高山高原区 TRMM 降水数据误差较大, 而在南方平原丘陵地区精度较高。综上可知 TRMM 降水观测卫星对高海拔复杂地形环境和大雨强降水观测精度还有不足, 因此对上述地形复杂区和场次大暴雨运用 TRMM 降水资料进行水科学研究时应持审慎态度。

参考文献:

[1] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价 [J]. 水科学进展, 2016, 27 (5): 639-651. (LIU Shaohua, YAN Denghua, WANG Hao, et al. Evaluation of TRMM 3B42V7 at the basin scale over mainland China [J]. Advances in Water Science 2016, 27 (5): 639-651. (in Chinese))

- [2] CAI Y, JIN C, WANG A, et al. Comprehensive precipitation evaluation of TRMM3B42 with dense rain gauge networks in a mid-latitude basin, northeast, China [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2015, 1(1): 1-13.
- [3] 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(7): 28-38.
- [4] DU L, TIAN Q, YU T, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2013, 23(1): 245-253.
- [5] 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 Guoqiang, LI Zhe, XUE Xianwu, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River Basin [J]. Advance in Water Science, 2015, 26(3): 340-346. (in Chinese))
- [6] SIMPSON J, ADLER R F, NORTH G R. A proposed rainfall measuring mission (TRMM) satellite of America [J]. Meteorological Society, 1988, 69: 278-295.
- [7] HIROSE M, NAKAMURA K. Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by the TRMM precipitation radar [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110. doi: 10. 1029/2004JD004815.
- [8] 毛红梅. TRMM 雨量在汉江上游大尺度水文模型中的应用 [J]. 水利水电快报, 2008, 29(8): 22-26. (MAO Hongmei. TRMM rainfall applied in flow prediction of LSHM in upper Hanjiang River Basin [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(8): 22-26. (in Chinese))
- [9] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程 [J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 461-466. (YANG Chuanguo, YU Zhongbo, LIN Zhaohui, et al. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 461-466. (in Chinese))
- [10] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 121-126. (DU Lingtong, TIAN Qingjiu, HUANG Yan, et al. The test of drought monitoring and reliability in Shandong Province based on TRMM data [J]. Agricultural Engineering Journal, 2012, 28(2): 121-126. (in Chinese))
- [11] 武胜利. 基于 TRMM 的主被动微波遥感结合反演土壤水分算法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院遥感应用研究所, 2006.
- [12] 杨立娟, 武胜利, 张钟军. 利用主被动微波遥感结合反演土壤水分的理论模型分析 [J]. 国土资源遥感, 2011, 23(2): 53-58. (YANG Lijuan, WU Shengli, ZHANG Zhongjun. A model analysis using a combined active/passive microwave remote sensing approach for soil moisture retrieval [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2011, 23(2): 53-58. (in Chinese))
- [13] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法 [J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 89-98. (TIAN Guoliang. Methods for monitoring soil moisture using remote sensing technique [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 6(2): 89-98. (in Chinese))
- [14] GIGLIO L, KENDALL J D, TUCKER C J. Remote sensing of fires with the TRMM VIRS [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21: 203-207.
- [15] 赵煜飞, 朱江. 近 50 年中国降水格点日值数据集精度及评估 [J]. 高原气象, 2015(1): 50-58. (ZHAO Yifei, ZHU Jiang. The accuracy and evaluation of the data sets of China's precipitation grid in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology 2015(1): 50-58. (in Chinese))
- [16] 中国气象数据网. 《中国地面降水日值格点数据集误差分析报告》[DB/OL]. [2017-05-28]. <http://data.cma.cn/site/index.html>, 2012-09.
- (收稿日期: 2017-05-28 编辑: 郑孝宇)

· 简讯 ·

《水利水电科技进展》在宁编委座谈会在河海大学召开

《水利水电科技进展》首届在宁编委座谈会于 2018 年 3 月 28 日在河海大学顺利召开。会议由河海大学水利水电学院院长、《水利水电科技进展》主编顾冲时教授主持。南京水利科学研究院水工水力学研究所所长吴时强教授、河流海岸研究所所长陆永军教授、南京工业大学交通学院陈国兴教授, 以及河海大学水利水电学院、土木与交通学院、水文水资源学院、地球科学与工程学院等 16 位在宁编委出席会议。

会议主要研讨期刊组约稿工作、专辑专栏策划组织以及期刊影响力提升计划。编辑部主任骆超总结了 2017 年编辑部主要工作, 分析了期刊的现状、取得的成绩及存在的问题。顾冲时主编认为期刊应以内容为王, 虽然《水利水电科技进展》稿源较为丰富, 但为争取被 EI 收录, 还需争取更加充足的优质稿件, 号召编委们以实际行动支持期刊的发展。编委们针对期刊发展存在的问题展开了热烈的讨论, 部分编委还分享了他们兼任 SCI 期刊主编或编委的办刊经验, 如完善编委会章程、实行副主编负责制等。编委们还就编委参与稿件初审及送审、高影响力论文奖励、期刊会议宣传等方面进行了讨论和交流。编委们对《水利水电科技进展》的发展提出了很多真知灼见, 将对期刊的未来发展起重要的指导作用。

(本刊编辑部供稿)