

TRMM 降水数据在洞庭湖流域的精度评估和应用

杨东^{1,2}, 刘雯^{1,2}, 朱靖轩¹, 张洪涛¹, 李学章³, 徐宪立³

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2. 湖南师范大学

地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081; 3. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要: 高分辨率卫星降雨产品的出现为降水观测提供了良好的前景。然而这些产品在使用前需要经过全面的精度评估。评估了 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B43V7 降水数据在洞庭湖流域的精度和适应性。基于洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 降水数据和 27 个气象站点的实测降水数据, 采用相关系数、均方根误差和均方误差技能分数等指标在月和季尺度下评估其在流域内精度, 揭示各指标的空间分布特征。结果表明: (1) 在月尺度上, TRMM 数据与实测数据拟合良好, 相关系数为 0.89, 但 TRMM 数据在流域大部分地区高估降水。(2) 在季尺度上, TRMM 数据精度较月尺度有所提升, 相关系数达到 0.94, 并且可靠性更高。(3) 两种数据在流域降水时空分布上表现出一致性, 在春夏两季为湿润多雨期, 秋冬季节降水则相对匮乏。流域内降水分布不均匀, 整体呈从东南向西北减少趋势。

关键词: TRMM 3B43; 卫星降水产品; 精度评估; 洞庭湖流域

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0279-06

Accuracy Evaluation and Application of the TRMM Precipitation Data in Dongting Lake Basin

YANG Dong^{1,2}, LIU Wen^{1,2}, ZHU Jingxuan¹, ZHANG Hongtao¹, LI Xuezhong³, XU Xianli³

(1. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081,

China; 2. Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha 410081, China;

3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: The high-resolution satellite rainfall products provide a great opportunity to monitor precipitation. However, the accuracies of these products need assessment before use. The objective of this study is to evaluate the accuracies and adaptabilities of the application of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B43 V7 data in the Dongting Lake Basin. The TRMM data and 27 meteorological precipitation data in the Dongting Lake Basin were collected from 1998 to 2011. The indices including correlation coefficient (r), root-mean-square error (RMSE) and mean square skill score (MSSS) were used to assess the accuracy of the TRMM data at the monthly and seasonal scales, respectively, within the basin, and the spatial distribution characteristics of each index was investigated. The results showed that: (1) on the monthly scale, the TRMM data had a good fit with the observed precipitation data with the correlation coefficient of 0.89; overall, the TRMM data was higher than that of the observed precipitation data in most areas of the basin; (2) at the seasonal scale, the TRMM data were comparatively more accurate with the correlation coefficient of 0.94, and the reliability was higher; (3) the temporal distributions of the two kinds of data were similar in the Dongting Lake Basin, the precipitation was higher in spring and summer while it was lower in autumn and winter. The distribution of precipitation is uneven in the Dongting Lake Basin, which reduces from the southeast to the northwest.

Keywords: TRMM 3B43; satellite precipitation; accuracy evaluation; Dongting Lake Basin

收稿日期: 2018-08-26

修回日期: 2018-09-05

资助项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ6068); 国家自然科学基金(41501478); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502400); 湖南省重点学科地理学(2016001)

第一作者: 杨东(1993—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: yangtao9318@163.com

通信作者: 刘雯(1982—), 女, 浙江杭州人, 副教授, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: liuwenww@gmail.com

降水作为全球地表物质交换,生态系统,水文循环等过程的基础组成部分^[1],在多时空尺度的大气过程中扮演着极为重要的角色。降水数据广泛应用于水文,气象,生态等各方面的研究,是诸多研究所需的必要数据^[2-4]。由于降水具有高度的时空变异性,基于地面气象站点监测的点降水数据易受到地形、环境、人为因素的影响,站点分布不均,密度不足,精度受到限制,不能有效地反映降水的空间变化特征^[5-6]。相比之下,遥感数据以其覆盖范围广、高时空分辨率的特性在获取降水数据的时空分布方面具有十分明显的优势。高时空分辨率的卫星降水产品能够提供空间上连续的降水动态观测信息,大大提高了降水的实际观测质量,有效的弥补了传统降水数据的不足,同时为准确掌握降水时空分布特征提供了新的数据支持^[7-8]。

TRMM 降水数据是重要的全球卫星降水产品之一^[9],其系列产品 TRMM 3B43 V7 降水数据融合了地表雨量计降水信息和卫星遥感降水信息,降低了随机误差,精度得到有效提高,具有适宜的时空尺度,在国内各流域的降水研究中得到广泛验证^[10-16]。然而目前对于该降水反演数据产品在洞庭湖流域精度评估和适用性研究有所欠缺。洞庭湖流域地貌特征复杂多样,降水时空分布不均,近年来洪涝灾害日益频发^[17]。了解 TRMM 降水数据在洞庭湖流域的估算精度,分析 TRMM 降水数据在该地区的适应性,可为准确把握该流域降水时空分布特征,进行水文预报和过程模拟以及防洪减灾等方面提供可靠的科学依据。因此本研究以洞庭湖流域为研究对象,利用洞庭湖流域内 27 个气象站点的实测数据,对 TRMM 3B43 V7 降水数据在月和季尺度下进行精度评估并分析其在洞庭湖流域的降水时空分布特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖流域位于长江中游以南,南岭以北,西起东经 107°16',东至东经 114°17',南起北纬 24°38',北至北纬 30°26'(图 1)。流域总面积 26.3 万 km²,约为长江流域面积的 14%。其中湖南省境内占该流域总面积的 82.7%。洞庭湖流域东南西三面环山,向北开口,构成独特的"马蹄形"空间布局,地貌形态复杂多样,地表水系发达,河网密集,向南呈聚辐式(扇形)水系格局^[18]。流域地处东南季风和西北季风交换地带,属于典型的亚热带季风气候区。降水主要是受冷暖气流的盛衰及其交换过程和地理位置的制约,流域年均降水量为 1 427 mm,年均径流量为 2 016 亿 m³,大约占长江流域地表水资源的 21%。流域在地形、季风的共同作用下,降水时空分布不均、年际变化大^[19]。

1.2 数据来源

本文采用 1998—2011 年的 TRMM 3B43 V7 降水数据和气象站点的实测降水数据。其中 TRMM 3B43 V7 数据来自 NASA (<https://trmm.gsfc.nasa.gov/>),其空间分辨率为 0.25°×0.25°,该降水产品是 TRMM 卫星与其他卫星以及地面观测联合反演的准全球降水量估计数据,数据为月尺度。实测降水数据则来自中国气象局国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>),记录气象站点每日降水值。本研究中采用了洞庭湖流域内包括五峰、常德、郴州等在内共计 27 个气象站点(其中包括湖南 24 个,湖北 3 个),其空间分布见图 1。虽然气象站点的观测范围有限,但是作为降水最直接有效的测量手段,其数据具有可靠性,可以为其基准对 TRMM 数据精度进行评估。SRTM (shuttle radar topography mission) 高程数据,来自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m。

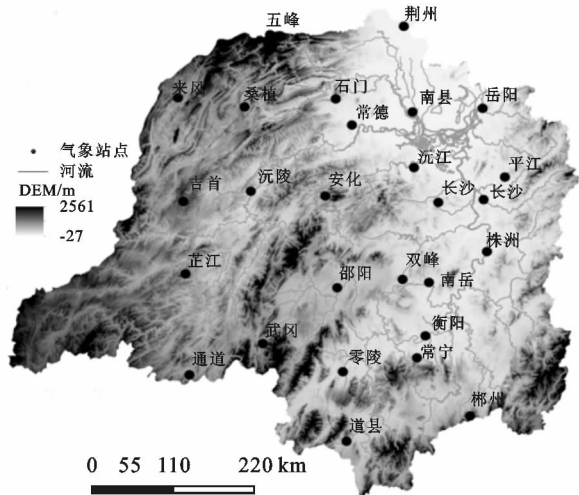


图 1 洞庭湖流域地形及气象站点分布

1.3 研究方法

首先通过 ArcGIS 提取 TRMM 降水数据中气象站点所在像元的降水值,以研究区内 27 个气象站点的实测降水数据为基准,对 TRMM 3B43 V7 降水数据在月和季尺度下进行精度评估并分析了其在洞庭湖流域的降水时空分布特征。本研究主要通过计算相关系数(r)、均方根误差(RMSE)以及均方技能分数(MSSS)等指标^[20-21]来评估 TRMM 降水数据在不同时间和空间尺度上的精度和可靠性。并结合地理位置以及洞庭湖流域高程数据得到各精度评估指标的空间分布图。其中相关系数反映了 TRMM 降水数据与气象站点实测数据的一致性,范围 0~1,越接近 1 说明相关性越高。均方根误差反映 TRMM 降水数据的随机误差,其值越小说明误差越低。均方误差技能分数表示用来评价误差的得分,即得分越高测量结果越可靠。各指标具体计算过程如下:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^n(F_i-\overline{F})(G_i-\overline{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(F_i-\overline{F})^2\sum_{i=1}^n(G_i-\overline{G})^2}}\tag{1}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(F_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(F_i-G_i)-G_i\right)^2}{\sum_{i=1}^nG_i}}\times100\%\tag{2}$$

$$MSSS=1-\frac{\sum_{i=1}^n(F_i-G_i)^2}{\left(\frac{n}{n-1}\right)^2\sum_{i=1}^n(G_i-\overline{G_i})^2}\tag{3}$$

式中： F_i 是卫星降水产品降水估计值； G_i 是气象站点实测降水值； F 和 G 分别是卫星降水产品和气象站点降水的平均值； n 为记录数据的总个数。

2 结果与分析

2.1 TRMM 月尺度精度评估

从表 1 及图 2 中可知,TRMM 降水数据在月尺度上与气象站点实测降水数据之间的相关性较好,其中 r 值最大的站点为通道站点 0.95,而最小则出现在衡阳站点为 0.79,平均值达到 0.89。 r 值较高的站点主要分布在流域南部,同时, RMSE 值较小的站点也主要分布在流域的南部,这与 r 值的空间分布保持了一致性。分析结果进一步说明 TRMM 月降水数

据精度较高,在洞庭湖流域具有较好的适用性。从 MSSS 值分布图可以看出,流域大多数站点的 MSSS 值均超过了 0.7,说明结果具有一定的可靠性。图 3 为洞庭湖流域 1998—2011 年部分站点 TRMM 降水数据和气象站点实测数据的月平均降水量折线图,其中包括相关系数值最大的站点沅陵和最小的站点南岳,从图中可以看出 TRMM 降水数据和实测降水数据拟合良好。但绝大部分站点的 TRMM 月平均降水值在大部分月份都是略大于实际降水量的,这表明 TRMM 数据大部分地区都整体略高估了降水。仅有个别站点安化和南岳存在一定的低估,这可能是由于安化和南岳地区地形地貌多样,境内群山起伏,岭谷相间,高程落差巨大,使得 TRMM 在这一区域对降雨探测精度出现较大偏差。从图 3 中还可以看出洞庭湖流域降水所存在的较大的季节性差异,其中以夏季降水最为丰富,冬季则最为贫乏。在全年中, TRMM 数据大多在降水较为丰富的 6—8 月高估降水,但是在降水匮乏的 12 月和 1 月低估降水。

表 1 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 数据与气象站点实测降水月尺度指标

| 统计值 | r | RMSE/% | MSSS |
|-----|------|--------|------|
| 最大值 | 0.95 | 0.29 | 0.90 |
| 最小值 | 0.79 | 0.15 | 0.56 |
| 平均值 | 0.89 | 0.22 | 0.76 |

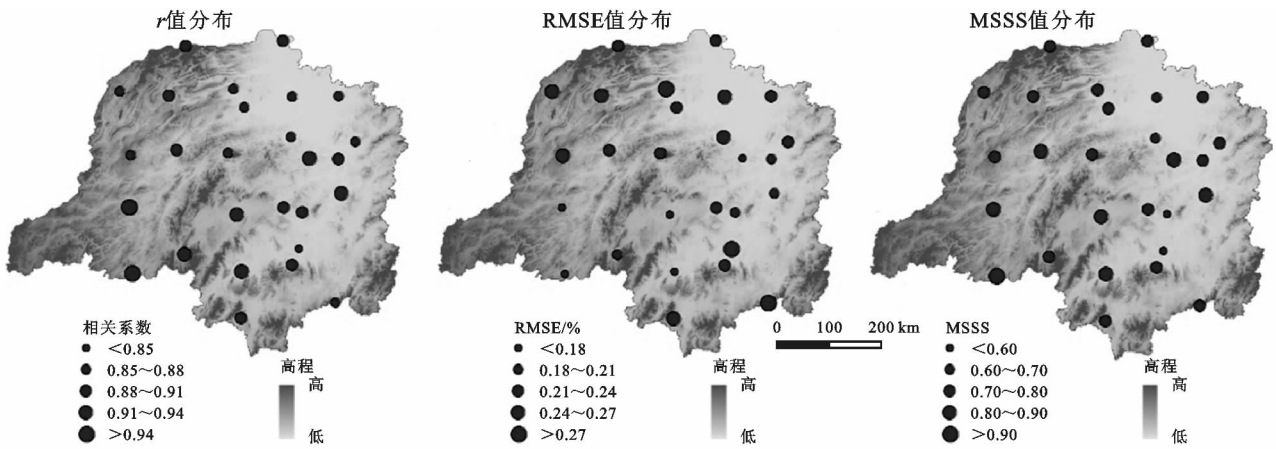


图 2 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 降水数据基于气象站点实测数据在月尺度上的 r 、RMSE 和 MSSS 值的分布

综合以上各指标的评估分析来看,在月尺度上, TRMM 降水数据与气象站点实测数据之间具有较高的一致性,平均相关系数 r 值为 0.89。RMSE 为 0.22, MSSS 值为 0.76,同时也证明了 TRMM 降水数据的可靠性。从图二中各指标空间分布的整体一致性也证明了 TRMM 降水数据的可靠性与合理性。

2.2 TRMM 季尺度精度评估

从表 2,图 4 以及图 5 分析可知,在季尺度上 TRMM 降水数据精度较月尺度有所提高,平均相关系数 r 值达到 0.94,最低的衡阳站点也有 0.85。相较于月尺度,季尺度 TRMM 数据的随机误差 RMSE

值有小幅增长,最大出现在衡阳站点为 0.57%,最小则出现在芷江站点为 0.25%,平均值为 0.39%。但是整体仍然较小,数据的可靠性仍可保证。而 MSSS 值相对有所提升,平均值达到 0.84,其中通道站点最大为 0.94。大部分站点 MSSS 值相差不大,仅南岳站点最低为 0.5,其次是衡阳站点为 0.67,其他站点的 MSSS 值均大于 0.8。与月尺度相比,季尺度的 TRMM 降水数据整体表现更好,相关性以及可靠性均有所提升,与站点实测数据具有更好的一致性。这表明在季尺度上,TRMM 降水数据能够更好地应用于洞庭湖流域的降水观测。

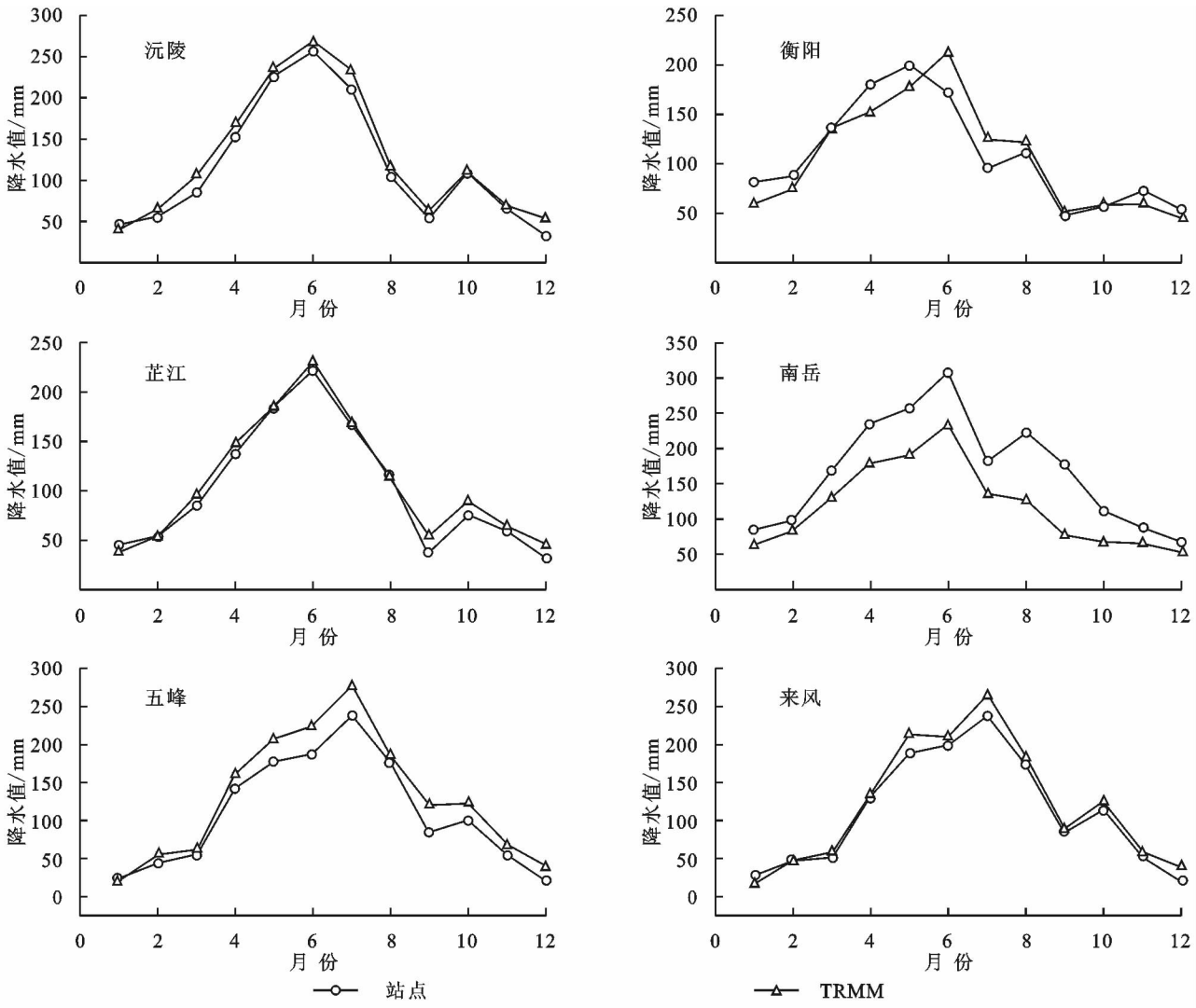


图 3 洞庭湖流域 1998—2011 年部分站点 TRMM 降水数据和气象站点实测数据的月平均降水量

2.3 基于 TRMM 降水数据的洞庭湖流域降水时空分布特征

在上述月尺度和季尺度 TRMM 降水数据与站点实测降水数据的比较之后,通过各种指标的评估分析,表明 TRMM 降水数据在洞庭湖流域具有较高的精度。因此本节利用 TRMM 降水数据并结合气象站点实测数据

对洞庭湖流域的降水时空分布进行分析。

表 2 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 数据与站点实测降水季尺度指标

| 统计值 | <i>r</i> | RMSE/% | MSSS |
|-----|----------|--------|------|
| 最大值 | 0.97 | 0.57 | 0.94 |
| 最小值 | 0.85 | 0.25 | 0.50 |
| 平均值 | 0.94 | 0.39 | 0.84 |

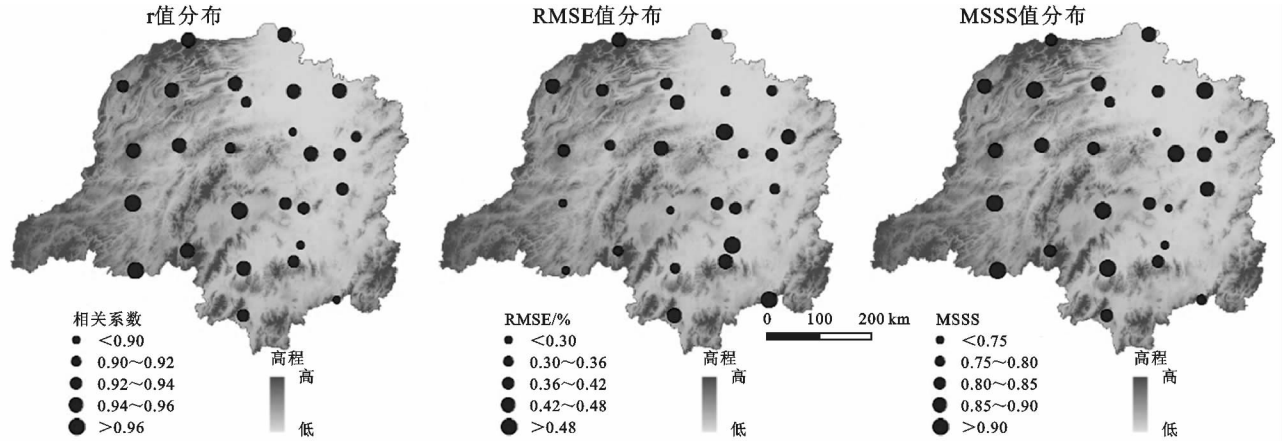


图 4 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 降水数据基于站点实测数据在季尺度上的 *r*, RMSE 和 MSSS 值的分布

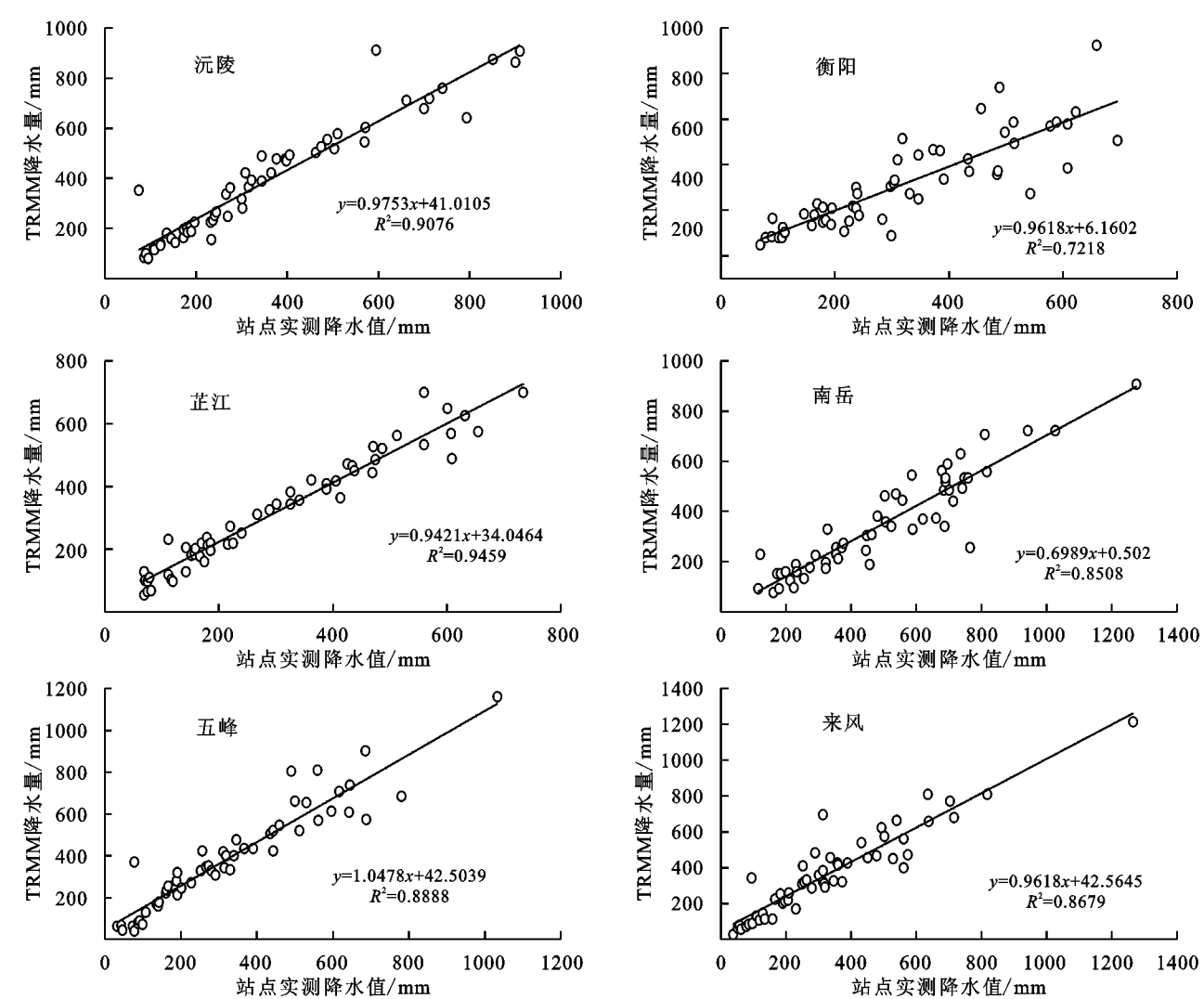


图 5 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 降水数据与站点实测数据在季尺度上部分站点散点

基于洞庭湖流域 27 个气象站点的实测数据,用反距离加权法插值生成洞庭湖流域 1998—2011 年平均年降水量空间分布图,与 TRMM 降水数据的年降水量空间分布图对比。如图 6 所示,两种数据的降水空间分布大体一致,均表现出在流域中部,南部和东

部的降水比较充沛,流域西部和北部地区降水偏少,其中安化、平江、株洲等地年降水量相较于其他各地较多,年平均降水量超过 1500 mm。但相较于实测数据,TRMM 降水数据在无论在最大值还是最小值都有明显的高估。

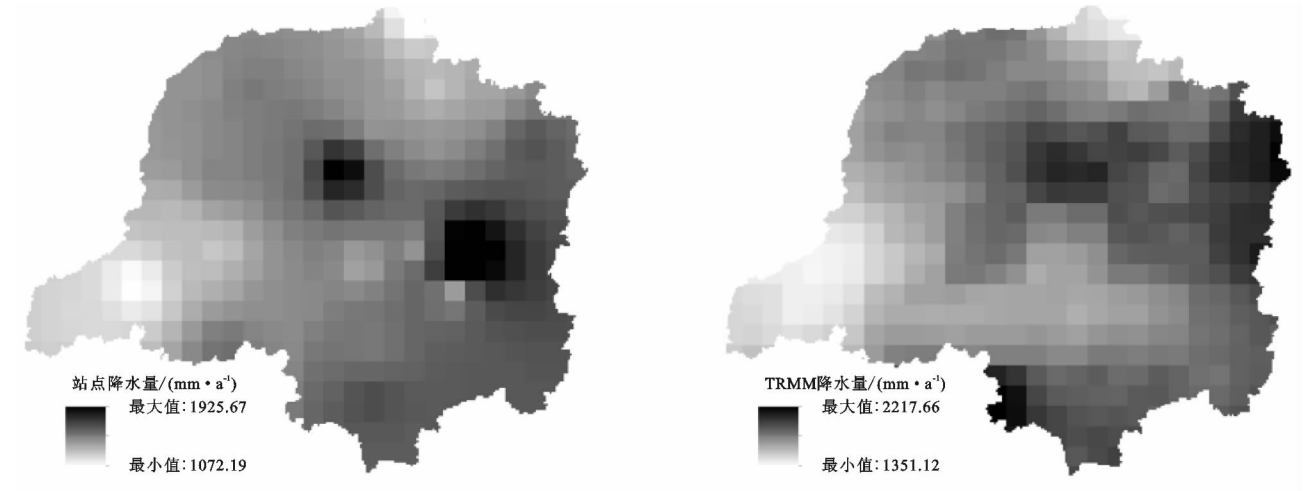


图 6 洞庭湖流域 1998—2011 年 TRMM 降水数据与气象站点实测数据的年平均降水空间分布对比

3 结论

(1) 在月尺度上, TRMM 降水数据与站点数据拟合良好, 且误差较小, 相关系数为 0.89, 相关性较高的站点主要分布在流域南部。但 TRMM 降水数据在大部分地区普遍高估了降雨量。

(2) 在季尺度上, TRMM 降水数据精度较月尺度有所提升, 相关系数达到 0.94, 并且可靠性更高。

(3) 洞庭湖流域降水十分充沛, 但是季度之间降水分配不均, 差异十分明显。总体而言, 降水量主要集中在春夏两季, 秋冬季节降水则相对匮乏。在空间上, 流域内降水分布不均, 整体呈从东南向西北减少趋势。

综上所述, TRMM 3B43 V7 降水数据在月、季尺度上具有较高精度, 可为准确把握该流域降水时空分布特征, 进行水文预报和过程模拟等方面提供可靠的科学依据。同时 TRMM 降水数据空间分辨率相对较高, 合理利用 TRMM 降水数据与气象站点实测数据相结合, 能够更为可靠的反映流域降水情况。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. TRMM 卫星降水数据在沱水流域径流模拟中的应用[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 641-649.
- [3] 邱冰, 姜加虎, 孙占东. 基于 MODIS 数据的降水估算在博斯腾湖流域的应用[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 675-679.
- [4] 吴雪娇, 杨梅学, 吴洪波, 等. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 310-319.
- [5] 周李磊, 杨华, 刘睿, 等. 基于 TRMM 数据的西南地区年降水时空特征研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 114-122, 142.
- [6] 石志华, 刘梦云, 常庆瑞, 等. 基于优化参数的陕西省气温、降水栅格化方法分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1141-1152.
- [7] Sorooshian S, Hsu K L, Gao X, et al. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(9): 2035-2046.
- [8] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 487-503.
- [9] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1): 38-55.
- [10] 吴建峰, 陈阿林, 嵇涛, 等. TRMM 降水数据在复杂山地的精度评估: 以重庆市为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 201-207.
- [11] 曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3 B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.
- [12] 张月圆, 李运刚, 季璇, 等. 红河流域 TRMM 卫星降水数据精度评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 1-8.
- [13] 赵军, 刘原峰, 朱国锋, 等. 热带测雨卫星数据在黑河流域的精度及应用[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 309-315.
- [14] 王维琛, 张唯, 谭伟伟, 等. 融合时空异质特征的 TRMM 3B43 降水产品适宜性分析: 以湖北省为例[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 59-66.
- [15] 沈彬, 李新功. 塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估[J]. 干旱区地理: 汉文版, 2015, 38(4): 703-712.
- [16] 秦福莹, 贾根锁, 杨劼, 等. 基于 TRMM 卫星数据的蒙古高原降水精度评估与季节分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 395-403.
- [17] 田玉刚, 覃东华, 杜渊会. 洞庭湖地区洪水灾害风险评估[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 56-60.
- [18] 孙葭, 章新平, 黄一民. 不同再分析降水数据在洞庭湖流域的精度评估[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1850-1859.
- [19] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人, 等. 1960—2008 年洞庭湖流域降水变化时空特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(4): 275-280.
- [20] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. Evaluation of high-resolution satellite rainfall products using rain gauge data over complex terrain in southwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1/2): 203-219.
- [21] 任亮, 王晓峰, 曾昭昭. 陕西秦巴山区 TRMM 3 B42 卫星降水数据精度评价[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2017, 45(1): 87-97.