

TRMM 卫星降水数据在珠江流域的适用性评价*

刘晓林¹, 刘超群¹, 杨胜天², 李树波¹

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 利用珠江流域范围 74 个气象站点的实测降水量, 从年、月及日尺度上对流域范围内的 TRMM 卫星降水数据的精度进行了评价, 并在此基础上运用 TRMM 月降水数据统计分析了珠江流域的降水时空分布特征。结果表明: 整体上, 珠江流域内 TRMM 卫星降水数据, 在年和月尺度上精度较高, 相关系数分别为 0.918 和 0.940, 平均相对误差分别为 10.87% 和 22.01%; 在日尺度上精度较差, 相关系数仅为 0.457, 平均相对误差达到 113.62%。对于 TRMM 月降水数据在单个气象站点的精度而言, 大部分站点相关系数较高、误差较小, 相关系数在 0.9 以上, 相对误差在 15% 以内, 各子流域平均相对误差小于 13%, 但元江、南宁、白色、罗定以及龙州站点误差相对较大。TRMM 卫星和气象站点获取的流域年均降水空间分布特征及趋势一致, 差异主要分布在地形较为复杂的上游和沿海区域。珠江流域内 TRMM 卫星降水空间分布上, 年均降水整体上呈现由西北向东南逐渐递增的趋势, 不同区域间降水量差异明显; 时间分布上, 一年中大部分降水发生在汛期 4~10 月, 而 11 月至次年 2 月降水较少。

关键词: TRMM; 降水; 珠江流域; 精度评价; 时空分布

中图分类号: P95 **文献标志码:** AA **文章编号:** 0529-6579 (2020) 06-0070-10

The applicability of TRMM precipitation data in the Pearl River Basin

LIU Xiaolin¹, LIU Chaoqun¹, YANG Shengtian², LI Shubo¹

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;

2. Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The study used the measured precipitation of 74 meteorological stations in the Pearl River Basin to validate the accuracy of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) precipitation data on annual, monthly, and daily scales, and analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of TRMM monthly precipitation. The results show that the correlation coefficients of TRMM precipitation data in the Pearl River Basin are 0.918 and 0.940, and the average relative errors are 10.87% and 22.01% with higher accuracy on annual and monthly scales overall, while the correlation coefficient of daily precipitation data is 0.457 with poor accuracy and the average relative error is 113.62%. For the TRMM monthly precipitation data from a single station, most of the data have higher correlation coefficient and less error with correlation coefficient above 0.9 and relative error below 15%, and the average relative error of each sub-basin is less than 13% but the data errors from Yuanjiang, Nanning, Baise, Luoding and Longzhou stations are relatively large. The spatial distribution characteristics and trends of

* 收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 国家重点研发计划专题 (2018YFC0407804-2-1); 广东省自然科学基金 (2017A030313232)

第一作者: 刘晓林 (1991 年生), 男; 研究方向: 水文水资源遥感; E-mail: liuxiaolin25@163.com

通信作者: 杨胜天 (1965 年生), 男; 研究方向: 水资源与水环境遥感; E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

annual average precipitation in the Pearl River Basin from TRMM and meteorological stations are consistent, and the differences are mainly distributed in the upstream with complex terrain and coastal areas. In the spatial distribution of TRMM precipitation, the average annual precipitation in the Pearl River Basin generally increases from the northwest area to the southeast area, and the difference in precipitation between different regions is extremely obvious. In terms of temporal distribution, the precipitation is higher from April to October, and less from November to February.

Key words: TRMM; precipitation; the Pearl River Basin; accuracy validation; temporal and spatial distribution

降水作为水循环过程中的关键要素, 准确的空间化降水信息对于水资源管理、旱涝灾害管理、生态环境治理具有重要意义^[1-2]。目前对于降水资料的获取最直接、最有效的手段依然是地面观测站点, 然而由于降水的空间差异性, 使得地面有限的观测站点难以准确反应空间化的降水, 尤其在一些站点稀疏、地形起伏较大的地区^[3]。遥感与卫星技术的发展为空间化降水的获取提供了新的方法和途径^[4], 由于卫星遥感降水数据的时空分辨率较高、覆盖范围广以及不受地形地貌条件限制, 已作为地面观测站点的替代资料被广泛应用^[5]。

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星由美国和日本共同研发并于1997年发射成功, 其遥感传感器能够覆盖全球 $50^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 的范围, 至今已经积累了大量的高时空分辨率的遥感降水数据^[6]。为了更好的将其进行应用, 国内外在TRMM卫星降水数据精度评价方面做了大量的研究^[7-10], 结果表明: TRMM降水数据与地面观测站点具有很好的一致性, 并且随着时间尺度的增大, 其精度逐步提高^[7], 雨季(夏季和秋季)降水精度明显高于枯季(冬季和春季)^[11], 不同气候类型及降水类型下其精度也有所不同^[12]。珠江流域地处水循环最为活跃的中国南方沿海地区, 流域降水受东南季风和西南季风的影响, 时空分布不均^[13]。在全球气候变暖的背景下, 流域上游的干旱、下游的洪涝等气象灾害逐渐频发^[14]。将TRMM卫星降水应用到珠江流域与降水的相关研究中, 可弥补地面观测站点的不足。为了将TRMM卫星更好的进行应用, 其精度评价显得尤为重要, 目前已有部分与珠江流域相关的TRMM卫星降水的适用性研究。如刘少华等^[3]基于气象站点对中国大陆流域分区TRMM降水质量进行评价中有涉及到珠江流域的精度评价, 并与全国其他流域进行了对比, 发现珠江流域精度相对其他流域较高; 李麒崙

等^[15]对中国大陆的GPM与TRMM降水的精度进行了评估与对比, 其中涉及珠江流域的TRMM日和月尺度降水精度相对内陆河片的较高; 王兆礼等^[16]以珠江流域的东江和北江为例进行TRMM降水的适用性研究, 作为VIC水文模型的输入, TRMM降水模拟精度相对站点较高, 显示了TRMM降水在网格尺度应用中相对实测站点的优势。然而TRMM降水的精度验证大部分在全国及流域尺度进行, 只注重珠江流域与其他流域的精度对比, 对于整个流域及内部更为精细和全面的精度验证相对匮乏, 同时对于TRMM降水的时空分布特征分析较为薄弱, 因此亟需开展该方面的研究。

本文采用珠江流域内74个气象站点的实测降水量, 从年、月及日尺度上对该区域的TRMM卫星降水数据进行全面精度验证, 并着重分析TRMM月尺度降水站点及流域内部精度, 对比通过TRMM卫星和气象站点获取的空间化降水的差异, 然后基于1998~2015年的TRMM月降水数据统计分析了流域内年均降水量和各月平均降水量的时空分布特征, 为TRMM卫星数据在珠江流域的可靠性与进一步应用提供科学依据。

1 研究区概况

珠江流域片(本文简称“珠江流域”)地处中国南部沿海, 位于东经 $100^{\circ}05'\sim 117^{\circ}18'$ 、北纬 $5^{\circ}51'\sim 26^{\circ}52'$ 之间, 总面积约65万 km^2 , 多年平均水资源总量为5 201亿 m^3 (图1)。流域包括珠江流域(狭义)、韩江流域、红河流域(国内部分)、粤桂沿海诸河和海南诸河, 其中珠江流域(狭义)又分为南北盘江、红柳江、西江、北江、东江、珠江三角洲诸河, 地跨滇、黔、桂、粤、琼、湘、赣、闽等8个省区及港澳地区^[17]。

珠江流域属热带、亚热带气候区, 气候温和, 雨量丰沛, 流域多年平均气温 $14\sim 22^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量1 200~2 000 mm, 降水量分布总趋势由东向

西递减。降水量、径流年内分配不均匀, 每年 4-9 月为丰水期, 降水量与径流量约占全年的 80% [18]。流域地势北高南低, 西高东低, 总趋势由西北向东南倾斜, 地貌以山地、丘陵为主, 平原盆地较

少。自然土壤主要以红壤、砖红壤、砖红壤性红壤、黄壤为主, 一般按地带规律分布。植物种类繁多, 以绿阔叶林为主, 其次为针阔叶混交林, 森林覆盖率为 28%。

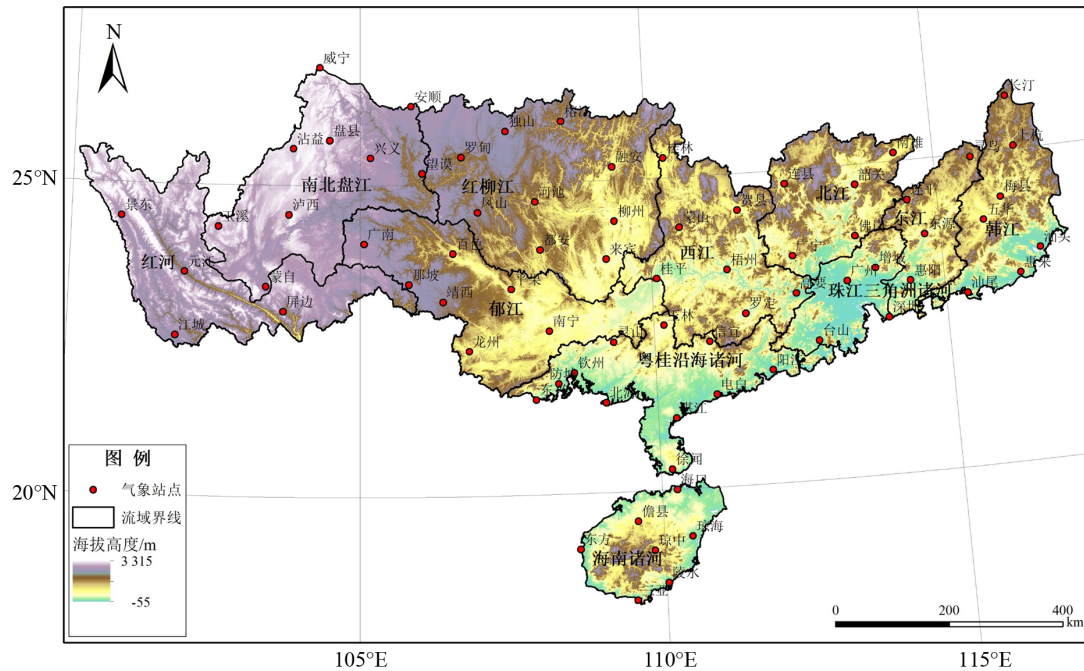


图1 珠江流域的地理位置及气象站点的分布

Fig. 1 The geographical location of the Pearl River Basin in China and its rain gauges

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究数据包括 3 类: ① 气象站点实测降水数据; ② TRMM3B43-V7 月降水数据; ③ TRMM3B42-V7 日降水数据。其中, 实测降水数据来源于中国气象局国家气象数据中心 (<http://data.cma.cn>), 考虑到气象站数据的时间连续性, 选取了 1998~2015 年珠江流域范围的 74 个国家基准与基本站观测降水数据, 作为“真值”对卫星降水数据进行检验。TRMM3B43 及 3B42 降水数据源于 NASA 网站 (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>), 空间分辨率为 0.25° (约 25 km), 时间分辨率 TRMM3B43 为月, TRMM3B42 为日, 选取时段与降水实测数据相同。

2.2 检验及分析方法

首先整理 74 个气象站点的实测降水数据, 提取其所在 TRMM 卫星网格降水数据, 采用散点斜率法、相关系数 (R) 和相对误差 (BIAS) 指标, 从年、月及日尺度对 TRMM 卫星降水数据进行精

度检验。然后将气象站点的数据采用反距离方法插值到 TRMM 卫星分辨率的网格数据, 进行面尺度对比分析。

1) 散点斜率法: 以气象站点观测降水为自变量, 站点所在网格内 TRMM 卫星降水为应变量, 作一元线性回归, 线性函数的斜率 K 越接近 1, 代表两个数据偏差越小。若散点位于 1:1 线左侧, 说明降水实测数据小于 TRMM 卫星数据, 若散点位于 1:1 线右侧, 说明降水实测数据大于 TRMM 卫星数据。

2) 相关系数和相对误差计算公式

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \quad (1)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (2)$$

其中, $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$, $\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i$, n 为样本容量, A_i 为 TRMM 卫星提取的降水数据, B_i 为气象站点实测数据。 R 反映两组数据的一致性, 取值范围为

[0~1], 越接近1表明TRMM降水与站点实测降水一致性越好。BIAS反映了TRMM降水数据与站点实测降水值在数值上的偏离程度, BIAS越接近0则数据越精确。

3 结果分析

3.1 数据整体精度检验

3.1.1 年降水精度分析 采用TRMM3B43的月降水数据加和得到1998~2015年珠江流域TRMM年降水数据, 进行研究区TRMM卫星年降水精度评价。结果表明: TRMM年降水数据与站点实测年降水量的总体决定系数 $R^2=0.843$, 斜率 $K=0.7687$; 相关系数 $R=0.918$, 并通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验; 74个站平均相对误差 $BIAS=10.87\%$, 两者拟合度较高, 存在很好的一致性。相比其他区域已有的TRMM降水数据精度检验结果, 精度略高。从图2可以看出, 在降水低值区, 多数散点分布在线左侧, 即在年尺度上TRMM卫星高估了研究区的实际降水; 在降水高值区, 多数散点分布在1:1线右侧, 即在年尺度上TRMM卫星低估研究区的实际降水。总体而言, 在研究区内TRMM3B43估计的年降水数据精度较高, 能够满足在年尺度上应用的需要。

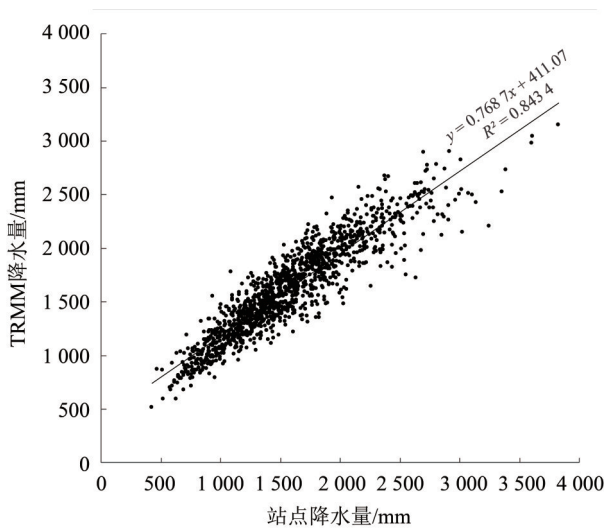


图2 1998~2015年珠江流域内TRMM年降水与地面观测站年降水量散点图

Fig. 2 Annual precipitation scatter diagram between TRMM and rain gauges in the Pearl River Basin during 1998-2015

3.1.2 月降水精度分析 基于1998~2015年珠江流域TRMM3B43的月降水数据, 进行研究区TRMM月降水精度评价。结果表明(图3): TRMM月降水数据与站点实测月降水量的总体决定系数 $R^2=0.883$, 斜率 $K=0.8695$; 相关系数 $R=0.940$, 通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验; 74个站平均相对误差 $BIAS=22.01\%$, 相比较年尺度TRMM降水, 其相关系数更高, 但相对误差有所增大。TRMM月降水低值区高估实际降水, 高值区低估实际降水, 与年尺度规律相似。总体而言, 在研究区内TRMM3B43的月降水数据与站点实测降水具有明显的相关性与一致性, 可作为与降水相关研究的数据来源。

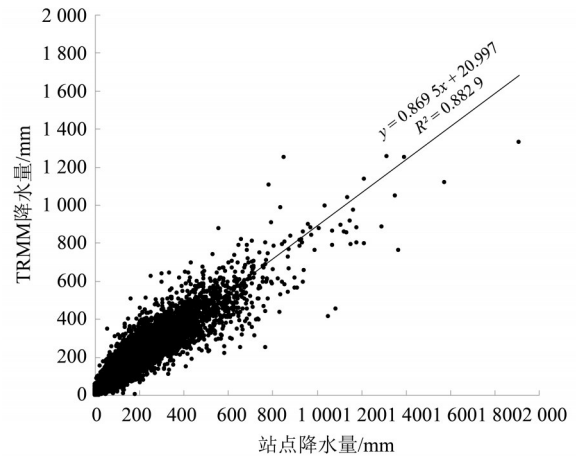


图3 1998~2015年珠江流域内TRMM月降水与地面观测站月降水量散点图

Fig. 3 Monthly precipitation scatter diagram between TRMM and rain gauges in the Pearl River Basin during 1998-2015

3.1.3 日降水精度分析 基于1998~2015年珠江流域TRMM3B42的日降水数据, 进行研究区TRMM日降水精度评价。结果表明(图4), TRMM日降水数据与站点实测日降水量的总体决定系数 $R^2=0.209$, 斜率 $K=0.4531$; 相关系数 $R=0.4531$, 未通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验; 74个站平均相对误差 $BIAS=22.01\%$, 相比较年尺度TRMM降水, 其相关系数更高, 但相对误差有所增大。TRMM日降水低值区高估实际降水, 高值区低估实际降水, 与年尺度规律相似。总体而言, 在研究区内TRMM3B43的月降水数据与站点实测降水具有明显的相关性与一致性, 可作为与降水相关研究的数据来源。

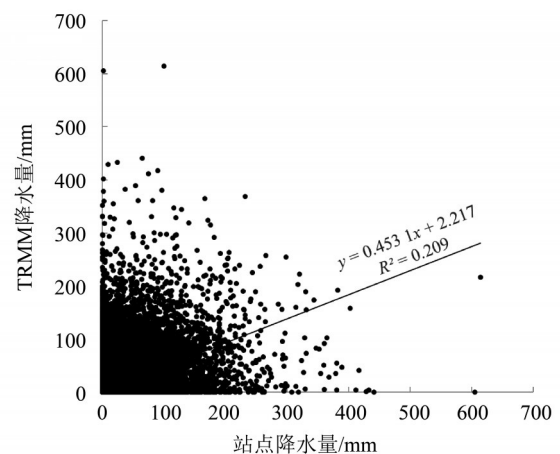


图4 1998~2015年珠江流域内TRMM日降水与地面观测站日降水量散点图

Fig. 4 Daily precipitation scatter diagram between TRMM and rain gauges in the Pearl River Basin during 1998-2015

$R^2=0.209$, 斜率 $K=0.4531$; 相关系数 R 仅为 0.457 ; 74 个站平均相对误差 BIAS 达到 113.62% , 两者的一致性较差。总体而言, TRMM 日降水数据在研究区内的精度较差, 这可能是由于遥感本身的特点导致的, 由于卫星主要通过微波传感器等设备探测云内降水粒子和云粒子与微波的相互作用达到测量降水的目的^[19], 而珠江流域属热带、亚热带气候区, 水循环剧烈、云层移动速度快, 使得卫星探测日降水结果时效性较差。所以在珠江流域内使用 TRMM3B42 的日降水数据进行相关研究之前需对该数据进行精度影响分析和相应的校正。

3.2 数据个体精度检验

从年、月及日尺度 TRMM 降水的检验结果可知, 基于 1998~2015 年 TRMM3B43 的年和月降水数据在研究区内整体上精度较高, 但整体检验难免掩盖少数站点数据与对应 TRMM 降水数据之间的差异性, 无法全面客观地反映出 TRMM 降水数据在各站点间验证精度的不均一性。尤其降水作为所有气象要素中最活跃的变量, 其分布受到地形、气候、经纬度、海拔和海陆位置等诸多因素的影响^[6], 具有时间和空间上的高度不连续性与非线性特征。因此, 仅仅对数据进行整体精度检验是不全面的, 还需要对单个站点的精度进行检验。由于 TRMM 年降水数据是由月降水数据加和所得, 日降水数据总体精度较差, 所以着重在月尺度上进行单个站点精度分析。

以珠江流域内各气象观测站点的月降水量为自变量, 相应时间上站点所在网格内的 TRMM 月降水数据为因变量进行一元线性回归分析, 得到 TRMM 月降水数据与各站点实测降水量之间的相关系数 R , 并计算各站点两组数据的相对误差 BIAS (表 1); 同时统计流域内各个子流域内气象站点相关系数 R 和相对误差 BIAS 的平均值 (表 2)。

从相关系数来看 (表 1 和表 2), 全流域 74 个气象站点的月降水实测数据与 TRMM 月降水数据的相关系数平均值为 0.946 , 其中最大的为汕尾和江城站, R 达到 0.984 , 最小的为罗定站, R 为 0.865 ; 在各个子流域中, 韩江流域的相关系数平均值最大, R 为 0.961 , 海南诸河的相关系数平均值最小, R 为 0.923 。全流域中绝大部分站的相关系数在 0.9 以上, 只有 4 个站 (罗定、琼中、电白、陵水) 的相关系数小于 0.9 , 进一步说明了 TRMM 月降水数据与站点实测降水量存在明显的

线性关系, 遥感数据精度较高, 在整个珠江流域具有普遍的适用性。

从相对误差来看 (表 1 和表 2): ① 全流域 74 个气象站中, 惠来、琼中、汕尾、桂平等 20 个站点的相对误差小于 0, 说明这些站点的 TRMM 月降水数据小于实测站点降水, 卫星降水数据存在一定的低估。罗甸、平果、儋县、蒙山等 54 个实测气象站点的相对误差大于 0, 表示这些站点的 TRMM 月降水数据比实测站点降水要高, 卫星数据存在一定程度的高估。② 在 74 个气象站中, 有 61 个气象站点相对误差在 15% 以内, 其中 48 个气象站点相对误差在 10% 以内, 说明大多数气象站点的 TRMM 月降水数据与实测站点降水差异不大, 一定程度上能够反映出 TRMM 月降水数据的准确性。③ 各气象站点之间的相对误差具有不均匀性, 差异性明显。其中深圳、凤山、融安、台山、增城这 5 个气象站点的相对误差 $< \pm 1\%$, 说明 TRMM 月降水数据和气象站点实测降水之间有非常好的一致性。而元江、南宁、白色、罗定以及龙州的相对误差分别为 31.63% 、 24.16% 、 23.07% 、 21.98% 和 20.98% , 说明这 5 个气象站点的 TRMM 月降水数据和气象站点实测降水之间相对误差明显, 而对应的相关系数却分别为 0.926 、 0.922 、 0.956 、 0.865 及 0.947 , 可见, 单从相关系数来考虑 TRMM 月降水数据和站点实测降水之间的相关性, 容易忽略相关系数高的降水数据之间可能存在较大误差的现象, 因而需要考虑两者之间的相对误差。④ 各个子流域中, 郁江的平均相对误差最大, 达到 12.16% , 其它流域平均相对误差在 10% 以内, 其中海南诸河、珠江三角洲诸河、粤桂沿海诸河及韩江 4 个流域的平均相对误差在 5% 以内, TRMM 月降水精度较高。11 个子流域中只有粤桂沿海诸河的平均相对误差小于 0, TRMM 卫星低估降水; 其它流域的平均相对误差都大于 0, TRMM 卫星高估降水。

从精度检验结果可知, 总体上, 珠江流域内 TRMM 月降水数据和气象站点实测降水之间有良好的 consistency, 研究区范围内的相关系数基本在 0.9 以上, 最小的也达到了 0.865 , 11 个子流域相关系数平均值介于 $0.923\sim 0.961$, 气象站点实测降水要比 TRMM 月降水数据整体上略微偏低。就个体比较而言, 大多数站点的 TRMM 月降水数据和气象站点实测降水差异不明显, 有 61 个气象站点相对误差都在 15% 以内, 11 个子流域平均相对误差小于

表1 1998~2015年珠江流域内TRMM月降水与观测站月降水量的相关系数和相对误差
Table 1 Correlation coefficient and relative error on monthly precipitation between TRMM and rain gauges
in the Pearl River Basin during 1998-2015

站点	相关系数	相对误差/%	站点	相关系数	相对误差/%	站点	相关系数	相对误差/%
威宁	0.954	8.49	柳州	0.977	9.66	龙州	0.947	20.98
沾益	0.972	5.25	蒙山	0.963	2.29	南宁	0.922	24.16
盘县	0.951	-10.87	贺县	0.952	7.86	灵山	0.923	3.12
景东	0.945	1.61	连县	0.976	3.57	玉林	0.904	8.26
玉溪	0.940	5.15	韶关	0.967	10.51	信宜	0.955	4.79
泸西	0.955	9.77	佛岗	0.977	-2.02	罗定	0.865	21.98
元江	0.926	31.63	连平	0.974	5.43	台山	0.951	0.58
江城	0.984	-10.53	寻乌	0.954	6.80	深圳	0.948	-0.63
蒙自	0.962	18.06	梅县	0.965	15.37	汕尾	0.984	-3.15
屏边	0.909	7.80	那坡	0.971	4.17	东兴	0.941	-19.17
安顺	0.941	1.74	百色	0.956	23.07	防城	0.943	-16.15
兴义	0.975	2.15	靖西	0.941	-10.41	钦州	0.975	-1.94
望谟	0.929	6.24	平果	0.928	7.36	北海	0.963	8.37
罗甸	0.966	11.72	来宾	0.900	15.87	湛江	0.958	-3.77
独山	0.963	2.60	桂平	0.959	-1.24	阳江	0.955	-14.33
榕江	0.946	17.92	梧州	0.969	9.12	电白	0.889	3.95
融安	0.928	0.23	广宁	0.917	7.21	徐闻	0.908	7.81
桂林	0.983	2.32	高要	0.959	13.72	海口	0.924	-1.74
南雄	0.923	8.93	广州	0.966	3.61	东方	0.912	13.62
长汀	0.977	6.81	东源	0.974	7.07	儋县	0.957	4.57
上杭	0.945	2.67	增城	0.957	0.88	琼中	0.887	-10.34
广南	0.951	15.81	惠阳	0.931	7.28	琼海	0.947	-12.32
凤山	0.938	-0.20	五华	0.916	16.74	三亚	0.939	10.92
河池	0.950	10.92	汕头	0.979	-3.62	陵水	0.899	-1.85
都安	0.906	-9.92	惠来	0.958	-11.42			

表2 1998~2015年珠江流域内各子流域TRMM月降水与观测站月降水量的平均相关系数和相对误差
Table 2 Average correlation coefficient and relative error on monthly precipitation between TRMM and rain gauges
in the Pearl River various sub basins during 1998-2015

区域	相关系数均值	相对误差平均值/%	区域	相关系数均值	相对误差平均值/%
海南诸河	0.923	0.41	北江	0.952	5.64
粤桂沿海诸河	0.938	-1.73	南北盘江	0.953	5.11
红河	0.941	7.63	珠江三角洲诸河	0.955	1.11
红柳江	0.941	6.53	东江	0.958	6.64
郁江	0.945	12.16	韩江	0.961	3.34
西江	0.950	8.01			

13%，但也存在误差较大的站点，尤其元江、南宁、白色、罗定以及龙州这5个站点，相对误差达到了20%以上。

3.3 降水空间分布对比

通过 TRMM 卫星气象站点的整体及个体精度检验，可得卫星降水在站点所在位置的精度，然而空间化的降水对于流域水资源相关的研究有重要意义，因此还需对比分析卫星获取的空间化降水和气象站点获取的空间化降水之间的差异。统计1998~2015年TRMM年平均降水与珠江流域内气象站点插值获取的年平均降水，用站点的降水减去TRMM降水，对比分析两者的差异。

结果显示（图5），TRMM和气象站点获取的年平均降水空间分布总体特征及趋势一致，但局部

区域存在一定的差异。流域内TRMM年均降雨量最高为2306mm，最低为780mm，年均降雨极差值为为1526mm。气象站点年均降雨量最高为2503mm，最低为827mm，年均降雨极差值为1676mm。气象站点的降水在最高、最低、极差和均值上都要大于TRMM降水，但是不同区域差异不同，尤其海南诸河、红河下游等降雨中心有所差异。差异最大的为流域南部区域，特别是西南区红河下游，差异值达到-769mm，TRMM数据远高于站点数据；海南岛南部差异值为462mm，气象站数据高于TRMM数据，其它区域差异介于这两个数据区间。总体而言两个数据的差异区域主要为珠江流域地形较为复杂的上游和沿海区域，而其产生的原因可能与地形及站点数据的插值方法有关。

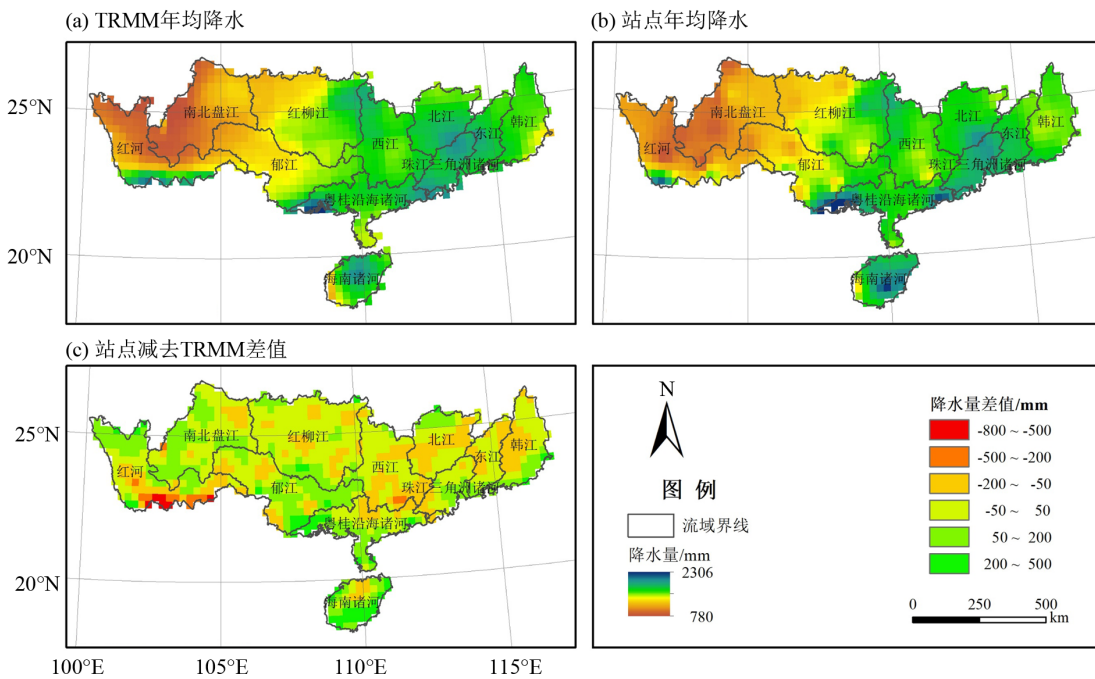


图5 1998~2015年珠江流域内TRMM年均降水与气象站点年均降水差异分布图
Fig. 5 Distribution difference of average annual precipitation between TRMM 3B43 and meteorological stations in the Pearl River Basin during 1998-2015

3.4 基于TRMM降水数据的降水时空分布特征

珠江流域TRMM降水整体和个体精度验证及空间分布对比结果表明：TRMM3B43的月降水数据与站点实测降水的一致性较好，虽然个别站点数值上差异较大，在定量测量流域降水方面具有一定欠缺，但大部分站点TRMM月降水数据与站点实测降水量的偏差较小，因此TRMM月降水数据可以定量地反映珠江流域降水的时空分布规律和空间异质性。

3.4.1 降水的空间分布特征 利用1998~2015年的TRMM月降水数据计算得到珠江流域的多年平均降水分布。如图5a所示，珠江流域内年均降水量整体上呈现由西北向东南逐渐递增的趋势，不同区域间降水量差异明显。流域内年均降水量最小的区域位于流域西北部红河和南北盘江上游，仅为780mm，向东逐渐递增到红柳江、郁江区域的1300~1500mm。在西江、粤桂沿海诸河区域的年均降水量为1600~1700mm，流域内年均降水量

最大的区域位于北江、东江、珠江三角洲诸河及海南诸河, 年均降水量达到 1 800~2 000 mm。流域最东边的韩江地区年均降水量反而比珠三角地区有所降低。造成上述降水分布特征的原因是红河、南北盘江的海拔相比珠三角地区较高, 同时该区域距离海洋远; 韩江地区处在海拔相对较高的岭南山脉, 使得来自太平洋的水汽在海拔较低的珠三角地带产生大量降水。

3.4.2 降水的时间分布特征 利用 1998~2015 年的 TRMM 月降水数据计算得到珠江流域 1~12 月的每月平均降水分布。由图 6 可见: ① 流域内 1~12 月的月平均降水分布规律与年均降水分布规律相似, 整体上均呈现出由西北向东南逐渐递增的趋势, 其中个别月份出现异常。② 各月流域内最低降水量和最高降水量分布位置不同。1~6 月、11~12 月流域内最低降水量区域均分布在红河和南北盘江上游, 7 月流域内最低降水量区域分布在北江

和韩江上游, 8 月流域内最低降水量区域分布在红柳江和西江上游, 9 月流域内最低降水量区域分布在红柳江和西江上游, 10 月流域最低降水量区域分布在韩江流域; 1~4 月、12 月流域内最大降水量区域分布在北江、西江一带, 5~6 月流域内最大降水量区域分布在珠江三角洲, 7 月流域最大降水量区域分布在红河和郁江下游及粤桂沿海诸河, 8 月流域内最大降水量区域分布在红河和粤桂沿海诸河下游, 9~10 月流域内最大降水量区域分布在海南诸河, 11 月流域内最大降水量区域分布在海南诸河及西江上游。③ 流域内降水在各月份的分布极不均匀, 12 月份降水最少, 流域内最大月降水量仅为 84 mm; 7 月份降水量最大, 流域内最大月降水量为 583 mm。大部分降水集中在每年 4~10 月, 流域下游区域极易发生洪涝灾害; 11 月至次年 2 月, 流域内很少有降水发生, 上游容易发生干旱灾害。

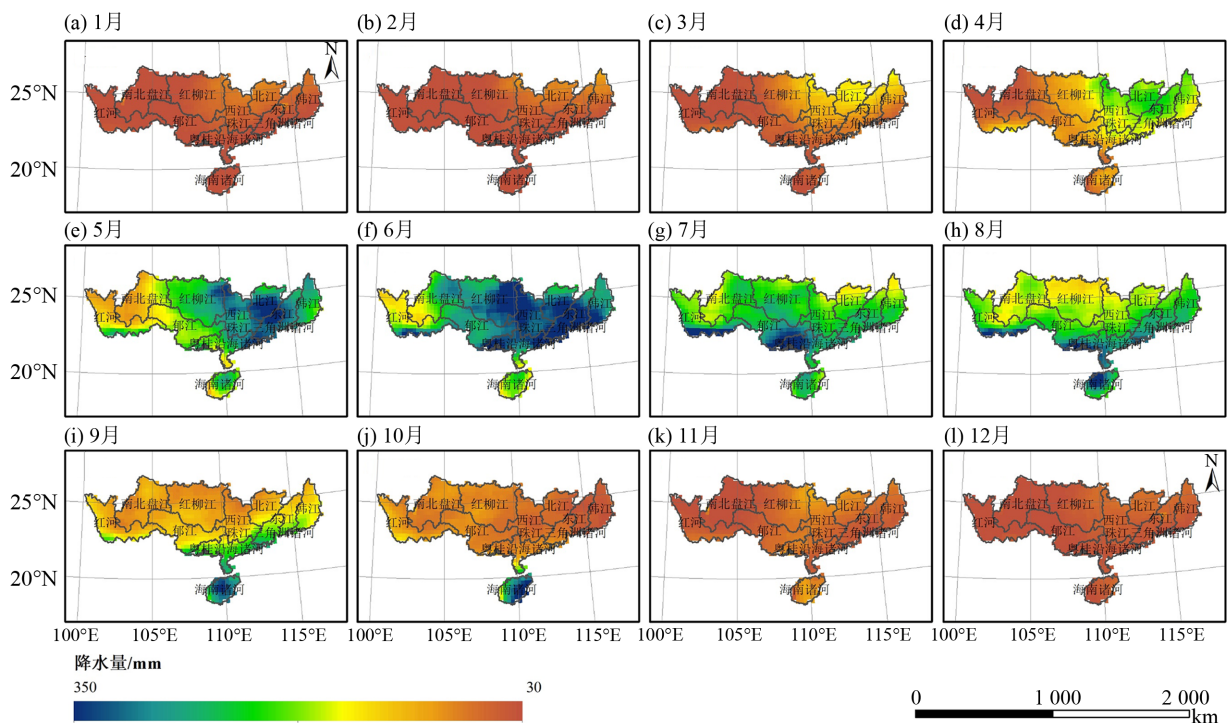


图 6 1998~2015 年珠江流域内 TRMM 月平均降水分布图

Fig. 6 Distribution of average monthly precipitation from TRMM 3B43 in the Pearl River Basin during 1998-2015

4 结 论

利用珠江流域内 74 个气象站点实测降水数据对 TRMM 卫星降水数据从年、月及日尺度上进行了精度检验和年均降水空间分布对比, 并通过计算 1998~2015 年的 TRMM 年均降水量和各月平均降水量对珠江流域 TRMM 卫星降水的空间和时间分

布特征进行了分析, 得到如下结论:

1) 1998~2015 年珠江流域内 TRMM 卫星降水数据与站点实测降水量在年、月及日尺度上的相关系数分别为 0.918、0.940 和 0.457; 平均相对误差分别为 10.87%、22.01% 和 113.62%。表明在年和月尺度上 TRMM 卫星降水数据在研究区内精度

较高,具有良好的适用性;在日尺度上 TRMM 卫星降水数据在研究区内精度较差,在应用之前需对该数据进行相应的校正。

2) 对 74 个气象站点的 TRMM 月降水数据逐一进行精度检验,站点实测月降水数据与 TRMM 月降水数据之间的相关系数界于 0.865~0.984,大部分站点相关系数均在 0.9 以上,只有 4 个站相关系数小于 0.9;各站点相对误差与相关系数的趋势类似,大部分站点误差较小,有 61 个气象站点相对误差在 15% 以内,11 个子流域平均相对误差小于 13%,但元江、南宁、白色、罗定以及龙州站点误差较大,相对误差达到了 20% 以上。

3) 通过 TRMM 卫星和气象站点获取的年均降水空间分布总体特征及趋势一致,但局部区域存

在一定的差异,气象站点的降水在最高、最低、极差和均值上都要大于 TRMM 卫星降水,两个数据的差异主要分布在珠江流域地形较为复杂的上游和沿海区域。

4) 珠江流域内年均降水整体上呈现由西北向东南逐渐递增的趋势,不同区域间降水量差异明显,年均降水量最小的区域位于红河和南北盘江上游,最大的区域位于北江、东江、珠江三角洲及海南诸河;流域内 1~12 月的月平均降水分布规律与年均降水分布规律相似,由西北向东南逐渐递增,个别月份出现异常。流域内 12 月降水量最小,7 月降水量最大,且降水在各月份的分布很不均匀,流域内大部分降水发生在汛期 4~10 月,11 月至次年 2 月很少有降水发生。

参考文献:

- [1] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1375-1386.
- JI T, YANG H, LIU R, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region [J]. Progress in Geography, 2014, 33(10): 1375-1386.
- [2] 吕洋,杨胜天,蔡明勇,等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1414-1425.
- LU Y, YANG S T, CAI M Y, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1414-1425.
- [3] 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 S H, YAN D H, WANG H, et al. Evaluation of TRMM 3B42V7 at the basin scale over mainland China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 639-651.
- [4] HUFFMAN G J, ADLER R F, ARKIN P, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(1): 5-20.
- [5] 郝振纯,童凯,张磊磊,等. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. 水文, 2011, 31(5): 18-23.
- HAO Z C, TONG K, ZHANG L L, et al. Applicability analysis of TRMM precipitation estimates in Tibetan Plateau [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 18-23.
- [6] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM3B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.
- ZENG H W, LI L J. Accuracy validation of TRMM 3B43 data in Lancang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 994-1004.
- [7] CAI Y C, JIN C J, WANG A Z, et al. Spatio-temporal analysis of the accuracy of tropical multisatellite precipitation analysis 3B42 precipitation data in mid-high latitudes of China[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0120026.
- [8] JOSHI M K, RAI A, PANDEY A C. Validation of TMPA and GPCP 1DD against the ground truth rain-gauge data for Indian region[J]. International Journal of Climatology, 2012, 33(12): 2633-2648.
- [9] 李琼,杨梅学,万国宁,等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 620-633.
- LI Q, YANG M X, WAN G N, et al. Analysis of the accuracy of TRMM 3B43 precipitation data in the source region of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 620-633.

- [10] 李威,蒋平,赵卫权,等. TRMM卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 97-102.
- LI W, JIANG P, ZHAO W Q, et al. Analysis on applicability of TRMM precipitation data in Karst areas—A case study in Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 97-102.
- [11] VILLARINI G, KRAJEWSKI W F, SMITH J A. New paradigm for statistical validation of satellite precipitation estimates: application to a large sample of the TMPA 0.25° 3-hourly estimates over Oklahoma [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114 (D12): 106.
- [12] QIAO L, HONG Y, CHEN S, et al. Performance assessment of the successive Version 6 and Version 7 TMPA products over the climate-transitional zone in the southern Great Plains, USA [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 446-456.
- [13] 唐亦汉,陈晓宏. 近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 476-482.
- TANG Y H, CHEN X H. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River Basin during the last 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4): 476-482.
- [14] 谢毅文,李娟,陈伟荣,等. 1959-2013年珠江流域平均气温时空变化特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 30-38.
- XIE Y W, LI J, CHEN W R, et al. Spatio-temporal variation of average temperature over the Pearl River Basin during 1959-2013 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016, 55(3): 30-38.
- [15] 李麒崙,张万昌,易路,等. GPM与TRMM降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 303-313.
- LI Q L, ZHANG W C, YI L, et al. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over Mainland China [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 303-313.
- [16] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRMM卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 174-182.
- WANG Z L, ZHONG R D, LAI C G, et al. Evaluation of TRMM 3B42-V7 satellite-based precipitation data product in the Pearl River Basin, China: Dongjiang River and Beijiang River Basin as examples [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 174-182.
- [17] 王申芳,王丽,杨晓灵,等. 珠江流域片省界缓冲区最严格水资源管理的研究[J]. 人民珠江, 2015, 36(2): 16-19.
- WANG S F, WANG L, YANG X L, et al. Study on the most strict water resources management of provincial boundary buffer in the Pearl River Valley [J]. Pearl River, 2015, 36(2): 16-19.
- [18] 吴孝情,陈晓宏,唐亦汉,等. 珠江流域非平稳性降雨极值时空变化特征及其成因[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1055-1063.
- WU X Q, CHEN X H, TANG Y H, et al. Spatiotemporal variations and the causes of non-stationary extreme precipitation in the Pearl River Basin [J]. Journal of Hydraulic, 2015, 46(9): 1055-1063.
- [19] 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 343-348.
- LIU J F, CHEN R S, HAN C T, et al. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 343-348.

(责任编辑 秦社彩)