

# TRMM 降雨数据在湖南省长株潭地区的适用性

谢红霞<sup>1</sup>, 刘旭星<sup>1</sup>, 隋兵<sup>2</sup>, 贺红士<sup>3</sup>, 邓逸尘<sup>1</sup>, 覃超<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128,

2. 湖南省气象研究所, 湖南 长沙 410007; 3. 美国密苏里大学 自然资源学院, 密苏里州 哥伦比亚 65211)

**摘要:** [目的] 基于现有实测降雨数据和 TRMM 降雨数据, 探讨利用 TRMM 数据估测实际降雨的方法。[方法] 利用湖南省长株潭地区 12 个气象站点观测的降雨数据和 TRMM 降雨数据, 采用相关系数法、误差分析、相对偏差分析等方法, 分析长株潭地区 2002—2011 年 TRMM 降雨数据的精度。[结果] 长株潭地区的 TRMM 数据和站点数据的拟合程度较好, 年降雨量的拟合优度为 0.69, 春、夏、秋、冬 4 季降雨量的拟合优度依次为 0.68, 0.52, 0.66, 0.34, 月降雨量的拟合优度达 0.73, 各站点月降雨量的拟合优度更好。相对偏差分析与误差分析结果表明 TRMM 降雨数据普遍低于实测降雨数据, 这种偏差主要是因为单个观测站点实际代表面积远小于 TRMM 单个栅格的代表面积, 而相对偏差均为负值则可能是城市的降雨量和雨强大于农村所致。此外偏差和地形起伏存在一定的联系, 地形起伏越大的地区偏差越大。[结论] TRMM 降雨数据在长株潭地区有一定的适用性, 但在使用时需要用观测数据进行必要的修正, TRMM 数据也可作为历史降雨观测数据分析的一个参考以提高其空间精度。

**关键词:** 适用性; TRMM; 降雨观测数据; 长株潭地区

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)03-0295-07

**中图分类号:** P468.0, P468.0<sup>+</sup>24

**文献参数:** 谢红霞, 刘旭星, 隋兵, 等. TRMM 降雨数据在湖南省长株潭地区的适用性[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):295-301. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.051; Xie Hongxia, Liu Xuxing, Sui Bing, et al. Applicability of precipitation data from TRMM in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Region, Hunan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):295-301. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.051

## Applicability of Precipitation Data from TRMM in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Region, Hunan Province

XIE Hongxia<sup>1</sup>, LIU Xuxing<sup>1</sup>, SUI Bing<sup>2</sup>, HE Hongshi<sup>3</sup>, DENG Yichen<sup>1</sup>, QIN Chao<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha,

Hunan 410128, China; 2. Hunan Meteorological Institute, Changsha, Hunan 410007,

China; 3. School of Natural Resources, University of Missouri-Columbia, Columbia MO 65211, USA)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to testify the method of estimating the real precipitation with TRMM data with the aid of the observed precipitation and TRMM precipitation from 2002 to 2011. [Methods] The applicability of TRMM precipitation data in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region of Hunan Province from 2002 to 2011 was analyzed based on the precipitation data from 12 rainfall observation stations with the methods of correlation coefficient, error analysis, relative deviation analysis and statistical analysis. [Results] The fitting degree of TRMM data and observation station data in these regions were good. The goodness-of-fit of yearly rainfall was 0.69 and the ones of the spring, summer, fall and winter respectively were 0.68, 0.52, 0.66 and 0.34. The goodness-of-fit of monthly rainfall reached to 0.73 and that of the every station was good too. Methods of relative deviation analysis and error analysis indicated that the TRMM rainfall data was generally lower than the observed precipitation, which was mainly for that the area representativeness of the signal observational station was far smaller than that of the TRMM. This was because of that the cities' rainfall extensity was stronger than rural area caused by urbanization and that the rainfall observation

收稿日期: 2016-10-25

修回日期: 2016-11-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于高分遥感与 GIS 的我国南方农村空心化演进机制及调控研究”(41371184); 湖南省教育厅科研项目(13JC386); 湖南农业大学大学生研究性学习和创新性试验计划项目及科技创新资助项目

第一作者: 谢红霞(1973—), 女(汉族), 湖南省岳阳县人, 博士, 副教授, 主要从事区域水土保持、环境遥感与 GIS 研究。E-mail: xiehongxia136@sina.com.

stations are all located in the edge of cities. The deviation has some definite relations with topographic relief. The more the topographic relief is, the greater the deviation will be. [Conclusion] The TRMM rainfall data has some definite applicability in the region of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region. We can adopt it for different uses but we should have some indispensable correction with observational data. The TRMM data can also be a reference for the use of the limited previously rainfall observation data in order to improve the spatial accuracy.

**Keywords:** applicability; TRMM; rainfall observation data; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region

高质量的降雨数据在土壤侵蚀、灾害预报,以及生态环境等方面具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。传统的雨量数据主要依赖雨量站,而获取精确的降雨空间分布需要建立高密度的雨量站网。尽管中国已建立了相当多的遥测雨量站和气象站,其密度远不能满足现实的需求<sup>[2]</sup>。卫星观测由于其具时间和空间连续的观测能力,近年来已成为监测全球降雨的重要手段。其中,热带降雨计划卫星(tropical rainfall measurement mission, TRMM),因为其具有观测三维降雨信息的能力,在各种星载传感器中成为获取降雨数据的首选<sup>[3]</sup>。由于受地形、地理位置、反演算法、数据来源等因子的影响,TRMM 数据反演降雨的精度仍存在一定的系统偏差,而且数据精度存在明显的空间变异特性。

至今已有很多学者进行了 TRMM 降雨数据的精度验证及基于 TRMM 的区域降雨、干旱、洪涝等特征分析。国外,Adler 等<sup>[4]</sup>,Chiu 等<sup>[5-6]</sup>,Nicholson 等<sup>[7-8]</sup>,Brown<sup>[9]</sup>,Islam 等<sup>[10]</sup>在 TRMM 卫星测雨产品检验与评估方面做了很多研究,IPWG(the international precipitation working group)从逐日尺度对 TRMM 测雨产品在美国、欧洲、澳大利亚地区进行检验评估<sup>[11-13]</sup>。国内,朱国锋等<sup>[14]</sup>利用相关系数法和散点斜率法在横断山区对 TRMM 数据的精度进行了检验,发现 TRMM 3B43 降雨数据与实测数据相关性很强,但是比实测降雨量大 33.9%。季漩等<sup>[15]</sup>分析了中天山区域的 TRMM 降雨数据的精度,发现该降雨产品的质量总体上不高,但是其偏差在时间和空间上具有一定的规律性,该数据在干旱区的应用需要进一步校准处理。曲伟等<sup>[16]</sup>在伊洛瓦底江流域对 TRMM 日降雨数据进行了精度检验,提出了一种基于水量平衡的 TRMM 数据校正方法。校正前 TRMM 年降雨量和月降雨量与实测值有较高相关性,但偏差较大;校正后年降雨量与实测值基本一致;月降雨量与实测曲线吻合较好;日降雨量的预报等级从中等提高到了良好。

湖南省长株潭地区地处湖南省中东部,土地总面积为 28 088.12 km<sup>2</sup>,占全省的 13.26%<sup>[17]</sup>。2007 年 12 月该区被国务院批准为全国资源节约型和环境友

好型社会建设综合配套改革试验区。政府和学者都加强了对该区域生态环境的关注。但长株潭地区内气象站不多,难以获得该地准确的降雨数据,因此充分利用 TRMM 降雨数据将弥补气象站少的不足。本文拟基于长株潭地区 2002—2011 年 12 个气象站 10 a 的日实测降雨数据和 TRMM 日降雨数据,通过相关系数法、误差分析、相对偏差分析等方法来估算 TRMM 数据在长株潭地区的精度,探讨使用 TRMM 数据估测实际降雨的方法。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 研究区概况

长株潭地区位于湖南省东北部,包括长沙、株洲、湘潭 3 市,是湖南省经济发展的核心增长极,并呈品字形分布于湘江下游,3 市中心之间相距 49 km(长沙市—株洲市)、37 km(湘潭市—株洲市)和 51 km(长沙市—湘潭市),结构紧凑。长株潭地区属于亚热带季风气候区,气候温暖湿润,区域内地貌类型多样,有山地、岗地、丘陵和平原,以岗地和平原地貌为主。

### 1.2 数据来源

本研究中采用的 TRMM 降雨数据来自 NASA (<http://www.nasa.gov/topics/earth>),其空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 3 h,日降雨量数据累加得到月降雨量,月降雨量累加得到年降雨量,时段为 2002—2011 年。与 TRMM 降雨数据进行对比分析的长株潭地区 12 个地面气象站实测降雨资料来自于湖南省气象科学研究所。

### 1.3 研究方法

利用相关系数法、误差分析、相对偏差分析对长株潭地区的 TRMM 数据精度进行分析验证,基于长株潭地区 12 个气象站点及其站点所在的 TRMM 栅格进行对比(如果一个 TRMM 栅格中有 2 个或 2 个以上气象观测值,则取各站点均值与 TRMM 数据进行对比),分析 TRMM 数据与站点观测数据之间的差异,各方法计算过程如下:

$$(1) \text{ 相关系数法: } R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $n$ ——样本容量;  $x_i$ ,  $y_i$ ——气象站点实测数据和 TRMM 降雨数据。

(2) 误差分析:  $B = (K - 1) \times 100\%$  (2)

式中:  $B$ ——实际误差, 正值表示高估, 负值表示低估 (%);  $K$ ——线性回归方程的斜率。而绝对误差  $|B|$ ——实际误差的绝对值。本文采用误差指标来描述 TRMM 与站点降雨间的差异。

(3) 相对偏差分析:  $Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i}$  (3)

式中:  $n$ ——样本容量;  $x_i, y_i$ ——气象站点实测数据和 TRMM 降雨数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 年均降雨量对比分析及偏差分析

TRMM 与长株潭地区 12 个站点 10 a 的年降雨量的拟合程度较高,  $R^2$  达到 0.69(图 1), 年降雨量相对偏差(Bias)为 -4.42%, TRMM 的平均年降雨量普遍低于气象站点的实测结果, 且相对偏差均为负值(表 1)。这种偏差主要是由于长株潭地区降雨空间分异性大, 单个观测站点代表面积远小于 TRMM 单个栅格的面积。而观测降雨较高、相对偏差均为负值

则与城区温度高、局地气流辐合上升及对降雨系统的阻隔效应, 城市的降雨量和降雨强度大于农村有关<sup>[18]</sup>, 因为文中使用的降雨的气象观测站点都位于城市边缘。相对偏差的大小与研究区站点的空间位置没有显著的联系, 而在地形起伏较大的地区降雨变化大, 不确定性高, 在研究区内地形起伏最大的南部山区的炎陵, 年降雨量相对偏差最大, 达到 -12.04%, 而起伏较小的韶山相对偏差最小, 只有 -0.87%。TRMM 估计的年降雨量数据精度较高, 能够满足在年的尺度上应用的需要。

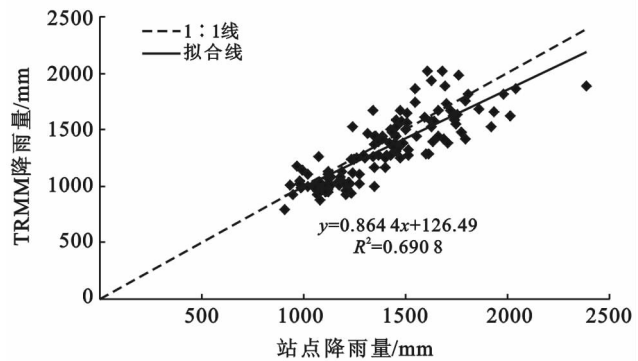


图 1 长株潭地区 2002—2011 年 TRMM 与地面气象站年降雨量关系

表 1 2002—2011 年 12 个气象站点年均降雨量与 TRMM 对应像元年平均降雨量对比

气象站	气象站年降雨量/mm	TRMM 年降雨量/mm	Bias/%	气象站	气象站年降雨量/mm	TRMM 年降雨量/mm	Bias/%
宁乡	1 367.5	1 338.2	-2.14	株洲	1 385.1	1 335.9	-3.55
长沙站	1 313.0	1 279.4	-2.56	攸县	1 410.4	1 353.7	-4.02
马坡岭	1 369.0	1 310.7	-4.26	醴陵	1 482.5	1 373.3	-7.37
浏阳	1 430.9	1 390.7	-2.81	湘潭	1 384.2	1 324.7	-4.30
茶陵	1 362.8	1 338.8	-1.77	韶山	1 336.3	1 324.7	-0.87
炎陵	1 565.4	1 377.0	-12.04	湘乡	1 420.0	1 316.6	-7.29

注: Bias 为降雨量相对偏差。下同。

为了更进一步分析对 TRMM 数据与站点数据存在一定偏差的原因, 将 12 个站点的绝对偏差和 TRMM 栅格高差、TRMM 栅格平均高程与站点高程差进行分析, 通过散点图(图 2)可以看出, TRMM 栅格内高差、TRMM 栅格平均高程与站点高程差和降雨绝对偏差的拟合优度较好, 前者的拟合优度为  $R^2 = 0.48$ , 后者的拟合优度为  $R^2 = 0.57$ 。这说明偏差的产生和高程的变化有一定的联系, 而长株潭地区地貌类型多样, 有山地、岗地、丘陵和平原, 使得 TRMM 数据与站点数据存在一定偏差。

### 2.2 季节降雨量对比分析

长株潭地区季节降雨差异大, 春季、夏季降雨量

高于秋季和冬季, 而春季和夏季之间, 秋季和冬季之间降雨量差异相对较小。对长株潭地区 12 个气象站点 2002—2011 年的降雨量按 4 个季节(春季: 3—5 月; 夏季: 6—8 月; 秋季: 9—11 月; 冬季: 12 月至翌年 2 月)计算季节降雨量并与 TRMM 相应时期的降雨数据进行相关性分析(图 3)。结果表明春、夏、秋 3 季的拟合优度都大于 0.5, 其中春季的拟合优度最高 ( $R^2 = 0.68$ ), 而冬季的拟合优度最低 ( $R^2 = 0.34$ )。这主要是因为长株潭地区冬季降雨较少, 且时而出现冰雪, 这就导致卫星在冬季估算时容易出现较大误差, 从而造成冬季降雨量检验精度不高。总体而言, TRMM 降雨数据能较好地反映长株潭地区的季节降雨特点。

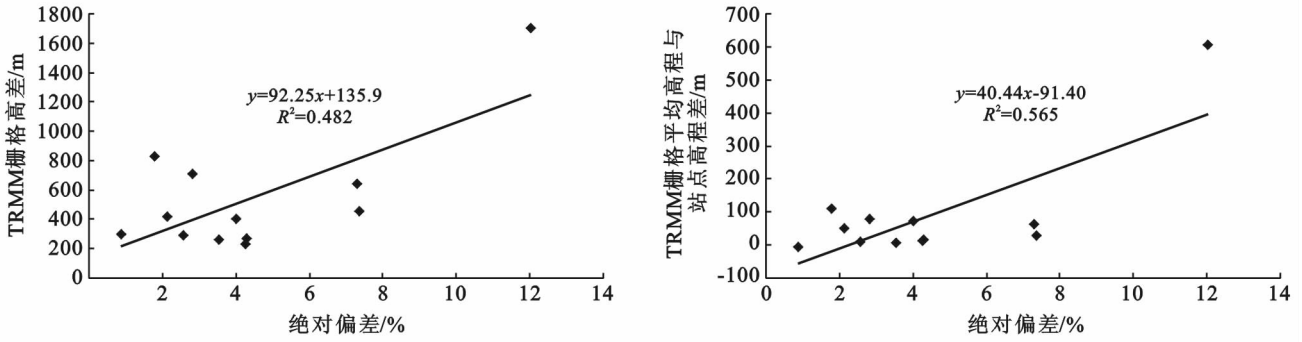


图 2 长株潭地区降雨绝对偏差与地形起伏的关系

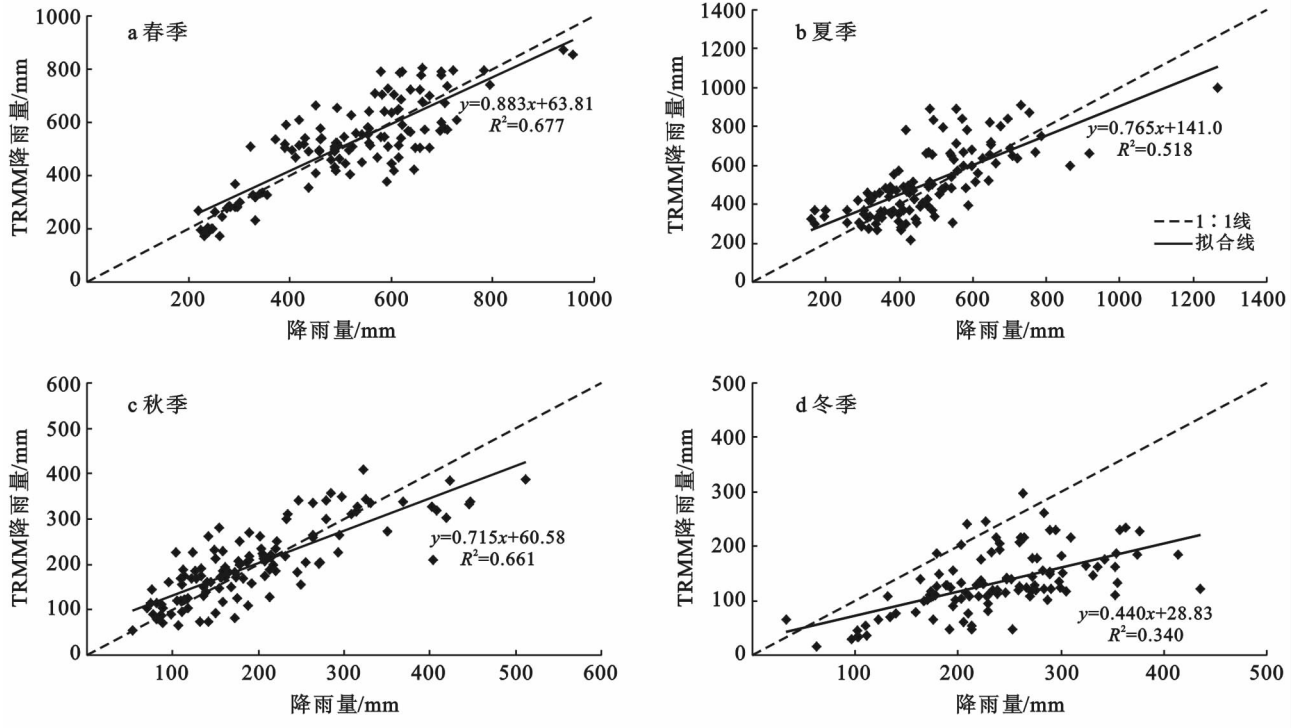


图 3 长株潭地区 2002—2011 年 TRMM 与地面气象站四季降雨量关系

2.3 月降雨量对比分析

将 2002—2011 年研究区内 12 个气象站的月降雨量实测数据与对应时期的 TRMM 月降雨量数据进行相关性分析(图 4)。

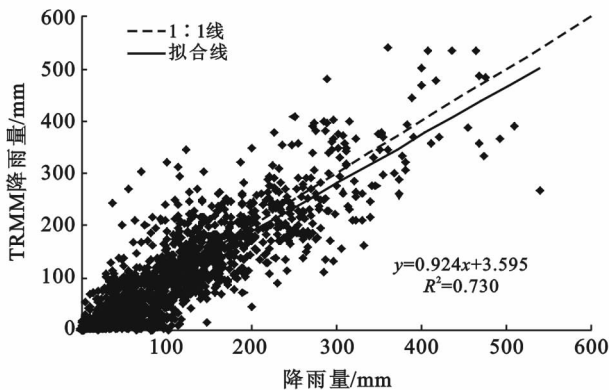


图 4 长株潭地区 2002—2011 年 TRMM 与地面气象站逐月降雨量关系

结果显示,TRMM 与气象站实测数据的拟合度为  $R^2=0.73$ , 相关系数为  $R=0.86$ , 这表明 TRMM 降雨数据与地面气象站实测数据之间具有显著的线性相关性。对各个站点进行验证分析,尤其是在月尺度上。

对 12 个气象站点 2002—2011 年实测月降雨数据与相对应的 TRMM 降雨数据进行相关性分析(表 2)。

表 2 2002—2011 年长株潭地区基于月降雨量的 TRMM 数据与气象站点实测值的相关系数

站点	相关系数 R	站点	相关系数 R
宁乡	0.74	株洲	0.88
长沙站	0.84	攸县	0.89
马坡岭	0.86	醴陵	0.88
浏阳	0.90	湘潭	0.87
茶陵	0.87	韶山	0.84
炎陵	0.84	湘乡	0.89

由表 2 可知:11 个站点月降雨实测数据与 TRMM 月降雨数据之间的相关系数  $R > 0.8$ , 这 11 个站点的平均相关系数达 0.87, 仅宁乡站的相关系数  $R < 0.8$ , 为 0.74, 这也进一步论证了 TRMM 月降雨数据的精度较高, 在整个长株潭地区具有普遍适用性。

### 2.4 年度降雨量变化对比分析

通过对长株潭各地区年降雨量变化的分析(图 5), 可以看出其中茶陵、湘乡、醴陵、湘潭的吻合情况相对较好, 各站点的实际降雨量与 TRMM 的值的的变化趋势基本一致。其中, 整个长株潭地区 2002—2011 年的年降雨量介于 1 000~2 000 mm。

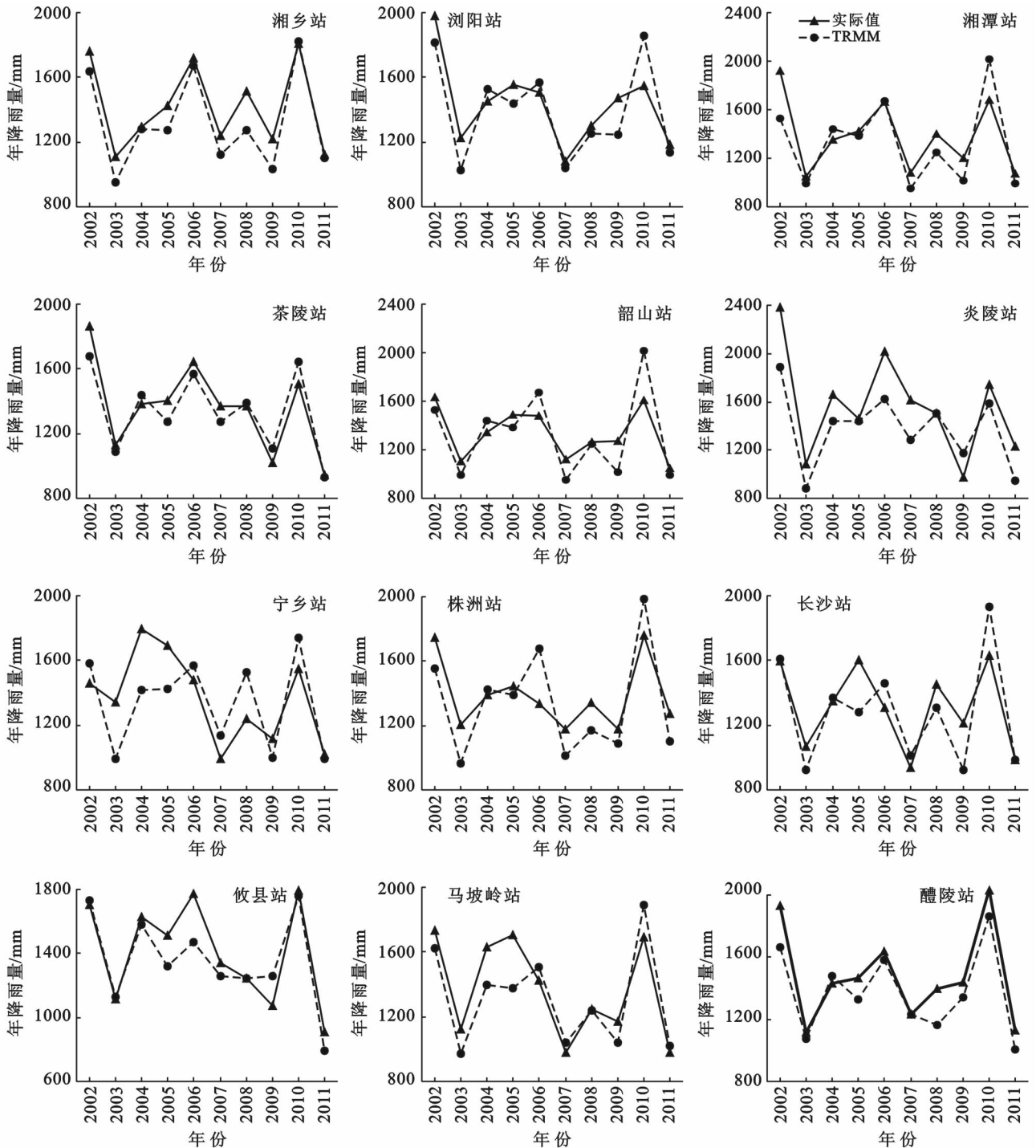


图 5 长株潭地区 TRMM 与站点观测年降雨量变化趋势

### 2.5 TRMM 与站点降雨差异分析

对研究区内 12 个站点的平均年、季节降雨量

进行差异分析(详见表 3), 可以得出春季、夏季、秋季、冬季、年平均绝对误差(|B|)依次为 17.12%,

12.93%, 24.34%, 54.75%, 15.28%, TRMM 数据与站点数据在夏季范围内误差最小, 在春季、夏季、秋季和年范围内误差相差不大, 在冬季范围内误差最大。

从整体上来看, TRMM 数据相比站点数据偏小, 这与年降雨量对比分析和月降雨量对比分析的结果一致。

表 3 TRMM 与站点降雨的差异

站点	春季	夏季	秋季	冬季	年	站点	春季	夏季	秋季	冬季	年
宁乡	-27.38	-28.58	-48.28	-84.04	-35.74	湘乡	-5.24	13.14	-31.58	-56.95	6.61
长沙站	-11.74	-6.43	-29.73	-55.46	4.25	茶陵	-5.33	-12.41	-33.65	-36.67	-12.77
马坡岭	-29.65	-2.20	-16.51	-56.03	-14.57	炎陵	-43.07	-33.14	-27.70	-71.72	-15.82
浏阳	-13.85	0.03	1.69	-42.49	0.11	株洲	21.80	-22.27	-0.27	-35.41	-12.31
湘潭	8.89	-2.61	-13.87	-51.07	-0.41	攸县	-15.94	-11.92	0.72	-55.21	-16.56
韶山	10.72	22.11	-29.46	-46.06	48.00	醴陵	-11.80	-0.34	-58.62	-65.83	-16.16

### 3 讨论与结论

本文通过相关系数法、误差分析、相对偏差分析等方法对长株潭地区 12 个雨量站点观测的降雨数据和 TRMM 降雨数据进行精度验证, 并对长株潭 3 市进行了日面平均降雨量的分析, 更进一步验证 TRMM 数据在长株潭地区的适用性。结果表明:

(1) 长株潭地区的 TRMM 数据和站点数据在年、季节及月尺度上的拟合程度均较好, 两者具有良好的相关性。其中, 冬季拟合程度稍差, 主要是因为长株潭地区冬季降雨较少, 且时而出现冰雪, 使得降雨不稳定, 这就导致卫星在冬季估算时容易出现较大误差, 从而造成冬季降雨量检验精度不高。

(2) 长株潭地区 12 个站点 10 a 的年降雨量相对偏差为 -4.42%, 各站点年降雨量的相对偏差均为负值, 说明 TRMM 数据普遍低于气象站点的实测结果, 差异分析也表明 TRMM 数据相比站点数据偏小, 这主要是因为单个观测站点代表面积远小于 TRMM 单个栅格的代表面积, 且偏差和地形起伏有一定的联系, 而长株潭地区地貌类型多样, 地形起伏较大的地区降雨变化大, 不确定性高, 此外还与降雨具有空间分异性有关, 长株潭地区“河东日出河西雨”的现象时有发生(河在此指的湘江), 而南方城市化使得城市的降雨量和雨强大于农村, 文中使用的降雨的气象观测站点都位于城市边缘, 因此 TRMM 数据小于站点观测数据。

在长株潭地区, TRMM 降雨数据有一定的适用性, 但和位于城市边缘的气象站点的观测值相比仍有一定的偏差, 普遍低估了降雨量, 因此, 使用 TRMM 数据估测降雨量时需要参考现有观测资料, 使用合理的方法让其与实际降雨情况更为接近, TRMM 数据也可作为历史降雨观测数据分析的一个参考以弥补观测数据空间精度不足。

致谢: 浙江大学史舟教授、马自强博士为本研究提供了经编程处理好的 TRMM 数据, 在此表示衷心的感谢!

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [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.
- [3] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 a 旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1103-1110.
- [4] Adler R F, Kummerow C, Bolvin D, et al. Status of TRMM monthly estimates of tropical precipitation[M] // Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). American Meteorological Society, 2003: 223-234.
- [5] Chiu Lius, Liu Zhong, Vongsaard J, et al. Comparison of TRMM and water district rain rates over New Mexico [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 1-13.
- [6] Ferraro R R, Peters-Lidard C D, Hernandez C, et al. An evaluation of microwave land surface emissivities over the continental United States to benefit GPM-era precipitation algorithms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 378-398.
- [7] Nicholson S E, Some B, McCollum J, et al. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa (Part I): Validation of GPCP rainfall product and pre-TRMM satellite and blended products [J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(10): 1337-1354.
- [8] Nicholson S E, Some B, McCollum J, et al. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa (Part II): Validation of

- TRMM rainfall products[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003,42(10):1355-1368.
- [9] Brown J E M. An analysis of the performance of hybrid infrared and microwave satellite precipitation algorithms over India and adjacent regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,101(1):63-81.
- [10] Islam M, Uyeda H. TRMM observed vertical structure and diurnal variation of precipitation in south Asia[C] // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on. IEEE, 2006:1292-1295.
- [11] Ebert E E. Verifying satellite precipitation estimates for weather and hydrological applications[C] // *Proceedings of the 1st International Precipitation Working Group(IPWG) Workshop*. 2002.
- [12] Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007,88(1):47-64.
- [13] Turk F J, Bauer P, Arkin P A. Satellite-derived precipitation verification activities within the International Precipitation Working Group (IPWG)[C] // *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2005.
- [14] 朱国锋,蒲焘,张涛,等. TRMM 降水数据在横断山区的精度[J]. *地理科学*, 2013,33(9):1125-1131.
- [15] 季璇,罗毅. TRMM 降水数据在中天山区域的精度评估分析[J]. *干旱区地理*, 2013,36(2):253-262.
- [16] 曲伟,路京选,宋文龙,等. TRMM 遥感降水数据在伊洛瓦底江流域的精度检验和校正方法研究[J]. *地球科学进展*, 2014,29(11):1262-1270.
- [17] 郭荣中,杨敏华. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. *农业工程学报*, 2014,30(5):238-246.
- [18] 李杨. 城市化对中国区域降水变化特征的影响及模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.

(上接第 294 页)

- [3] Kuniansky E L, Halford K J, Shoemaker W B. Permeameter data verify new turbulence process for MODFLOW[J]. *Ground water*, 2008,46(5):768-771.
- [4] Shoemaker W B, Birk S, Bauer S, et al. Documentation of a conduit flow process (CFP) for MODFLOW-2005[M] // *Techniques & Methods*, 2008.
- [5] Reimann T, Hill M E. MODFLOW-CFP: A new conduit flow process for MODFLOW-2005 [J]. *Ground Water*, 2009,47(3):321-325.
- [6] 张蓉蓉,束龙仓,闵星,等. 管道流对非均质岩溶含水系统水动力过程影响的模拟[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012(S2):386-392.
- [7] 水兵.《地下水不稳定混合抽水的渗流—管流耦合模型及其应用》研究成果简介[J]. *水文地质工程地质*, 1994, 21(1):49-49.
- [8] 陈崇希,林敏,叶善士,等. 地下水混合井流的理论及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [9] Chen Chongxi, Jiao Jiujimmy. Numerical simulation of pumping tests in multilayer wells with non-darcian flow in the well bore [J]. *Ground Water*, 1999, 37 (3): 465-474.
- [10] 陈崇希,胡立堂. 渗流—管流耦合模型及其应用综述[J]. *水文地质工程地质*, 2008,35(3):70-75.
- [11] 王玮. 渗流井取水计算模型及其应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2010.
- [12] 杜京浓,宋汉周,霍吉祥,等. 大坝基础渗流数值模拟参数灵敏度探讨[J]. *低温建筑技术*, 2014,36(11):90-92.
- [13] 吴雯倩,靳孟贵. 淮北市地下水流数值模拟及水文地质参数不确定性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41 (3):21-28.