

湘江流域 TRMM 降水数据精度检验

黄 萍^{1,2,3}, 路京选^{1,2}, 李德龙³, 宋文龙^{1,2}, 曲 伟^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

摘要: 数据精度检验是卫星遥感降水数据应用中的关键问题之一。目前对 TRMM 数据精度检验多以偏差和相关性分析方法为主, 对不同雨量等级的估计检验比较缺乏。针对湘江流域, 引入模糊综合评分方法以解决不同雨量等级降水估计的检验, 同时利用泰森多边形法、模糊综合评分方法、相关系数法和散点斜率法, 以研究区内 14 个气象站点实测降水数据为“真值”, 对 TRMM 3B42 降水数据在日、月尺度分别进行了定性和定量精度检验。结果表明: 研究区 TRMM 3B42 降水数据在月、日尺度上相关系数分别达到了 0.93、0.48, 前者偏差值 Bias 比后者低 84%, 精度更优; 在不同降水量级的预测中, 精度由好到差依次为小雨、暴雨、大雨、中雨, 其中小雨预报精度最好, 达到良好水平, 其他雨量级预报精度为中等水平。

关键词: 湘江流域; 降水数据; TRMM 3B42 产品; 精度检验

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0401-05

Accuracy validation of TRMM precipitation data in Xiang River Basin

HUANG Ping^{1,2,3}, LU Jingxuan^{1,2}, LI Delong³, SONG Wenlong^{1,2}, QU Wei^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;
3. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: The precipitation data predicted by satellite remote sensing technique are widely used, and the accuracy test of precipitation data is one of the key problems in application. Deviation and correlation analyses are the main methods for the accuracy test of TRMM data, and the accuracy test of different levels of precipitation is lacked. The fuzzy comprehensive evaluation was introduced to perform the accuracy test of different levels of precipitation in the Xiang River Basin. Based on Thiessen polygons method, fuzzy comprehensive evaluation, correlation coefficient method, and scatter points slope method, the accuracy of TRMM 3B42 data at the monthly and daily time scales from 1998 to 2009 was validated using the measured precipitation data at 14 gauge stations. The results showed (1) the correlation coefficients of TRMM 3B42 precipitation data reach 0.93 at monthly time scale and 0.48 at daily time scale, and the Bias of former data is 84% lower than that of latter data; and (2) for different levels of precipitation data, the prediction accuracy of light rain is the best, followed by heavy rain, rainstorm, and moderate rain.

Key words: Xiang River Basin; precipitation; TRMM 3B42; accuracy test

降水是地球水循环的重要组成部分, 连接着大气循环过程与地表循环过程, 具有重要的气象学、气候学和水文学意义^[1-4]。理论上, 密集布置地面观测站点是获得较为精确降水数据的一个重要手段, 但由于自然条件和经济水平的差异, 地面观测站点分布严重不均, 海洋上更加稀少^[5]。此外, 降水在时空尺度上变化差异非常大, 常呈现非正态分布, 这

也给获得准确降水数据带来了一定的困难。随着电子技术和卫星遥感技术不断进步和发展, 基于卫星遥感技术对降水的时空分布进行精准测量, 成为近年来科学研究热点之一。

1997 年 11 月发射的热带降雨观测卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 搭载了世界上第一台星载降水雷达, 开创了全球降水监测新时代^[6-7]。TRMM 是由

收稿日期: 2014-08-18 修回日期: 2015-04-27 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1522.011.html>

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2012AA12A309); 中国水利水电科学研究院科研专项(减集1314; 减集1350)

作者简介: 黄萍(1990-), 女, 陕西安康人, 主要从事 3S 技术在水文水资源中的应用研究。E-mail: huangping_scu@163.com

通讯作者: 路京选(1961-), 男, 陕西大荔人, 教授级高级工程师, 主要从事水文遥感方面的研究。E-mail: lujx@iwhr.com

NASA(National Aeronautic and Space Administration) 和日本宇宙开发事业 NASDA(日本宇宙航空研究开发机构 JAXA 前身)合作开展的热带降雨测量计划。随着 TRMM 卫星的发射,卫星降水数据得到广泛应用^[1,8-10],与此同时数据精度问题也成为了很多研究学者关注的热点。Nazrul Islam^[11]利用实测雨量站资料验证了 TRMM 3B42 在孟加拉的测雨精度,结果表明该数据对暴雨的测量值明显偏小;刘俊峰等^[12]利用中国 650 个站点降水数据,在日、月、年尺度上分析了 TMPA 3B42 数据在中国大陆 50°N 以南的适用性,发现该降水数据精度存在时空不稳定性,且精度随时间尺度增加而增加;朱国锋等^[4]利用 TRMM 数据对横断山区降水精度进行检验,发现 TRMM 数据与实测数据相关性很强,但受高海拔地区气象站点稀少和复杂的下垫面环境的影响,仍有 33.9% 的偏差;齐文文等^[5]分析了青藏高原范围内 114 个气象站点与 TRMM 数据的决定系数,结果表明二者的决定系数高达 0.828,具有很强的线性正相关性。

TRMM 卫星降雨产品的出现,弥补了无资料地区雨量信息的不足,并为无资料地区的水文模拟和预报提供了良好的契机。对卫星测雨数据精度进行检验与评价,一方面可以检验 TRMM 卫星估测降水的准确程度,及时纠正测雨误差,从而进一步提高测雨精度,为相关的水文工作做好准备;另一方面可以通过降水预报精度评估,使用不同的评分方法进行对比分析、拟合运算,从而选出 TRMM 卫星测雨产品最优评分方法,提高 TRMM 数据使用效率。国内外学者们对 TRMM 数据精度检验研究大多数选用的空间尺度太大,只能代表整体平均水平,而忽略了小尺度上地区数据的差异;而且目前对 TRMM 数据精度检验多以偏差和相关性分析等为主,缺乏对不同雨量等级的估计检验;同时,针对于湘江流域 TRMM 测雨数据精度检验研究相对较少。因此,本文以湘江流域作为研究区,分析 TRMM 数据在该流域日、月尺度数据精度,以及不同雨量等级 TRMM 数据预报精度,以期 TRMM 数据在湘江流域的有效利用提供参考,进而为更精确地应用该卫星数据进行水文模拟及预报工作奠定基础。

1 研究区概况

湘江是长江的一级支流,也是洞庭湖水系最大的支流(图 1)。湘江流域位于北纬 24°-29°,东经 110°30'-114°,地处长江之南,南岭山地之北,属于亚热带湿润季风气候地区,流域内雨量丰沛,水系发达,支流众多。全流域面积达 94 660 km²,干流全长 856 km,平均坡降 0.134‰^[13]。流域年平均温度均在 17℃ 以上,多年平均雨量为 1 458 mm,多年平均蒸发量为 1 162~1 502 mm,多年日照时数为 1 625~1 796 h,全年无霜期为 234~268 d,多年平均径流深为 815 mm^[14]。湘江流域范围包括了长沙、株洲、湘潭、衡阳、郴州等重要城市,是湖南省最重要的经济带之一,也是我国非常重要的一个粮食生产基地^[15]。

2 数据说明

2.1 气象站监测数据

选取研究区内 14 个气象监测站点,分别为安化、长沙、

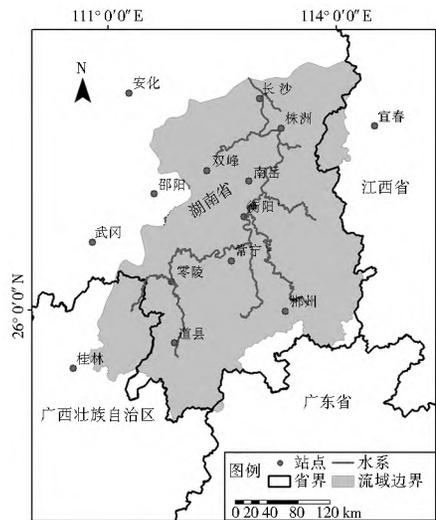


图 1 研究区空间信息

Fig. 1 Spatial information of the study area

邵阳、双峰、南岳、株洲、宜春、武冈、零陵、衡阳、常宁、桂林、道县、郴州。数据均来自中国地面气候资料日值数据集(下载自中国气象科学数据共享服务网,网址 <http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),数据长度为 1998 年 1 月到 2009 年 12 月日尺度数据,数据精度为 0.1 mm,所用资料经过了严格的质量控制,且所选序列无缺测^[16]。所选取的气象站点数据,在整个流域上分布较为均匀,资料比较完整。

2.2 TRMM 数据

TRMM 数据来自 NASA 每月发布一次的热带降雨观测卫星(TRMM) 3B42 格点化数据产品,数据水平分辨率为 0.25°×0.25°。选用的数据包括自 1998 年 1 月到 2009 年 12 月日尺度降水数据,由 NASA 网站(<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)免费获取。3B42 产品融合了多个微波遥感数据,包括 TRMM 卫星上的 T-MI(Microwave Imager),以及 DMS-P(Defense Meteorological Satellite Program)上的 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager),2004 年 3B42 产品融合了 Aqua 卫星上的 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer—Earth Observing System)以及 NOAA 系列卫星上的 AMSU-B(Advanced Microwave Sounding Unit B)^[12],且数据质量高于以往数据产品,从而被推荐为用于科学研究的数据产品^[17]。

3 研究方法

3.1 模糊评分法

为了较为客观的检验 TRMM 数据精度,选取模糊综合评分法对 TRMM 数据进行定性检验^[18]。该方法是根据模糊综合评分原理,分别对不同预报等级的降水量进行评分。对于第 i 级的降水预报的模糊评分公式,定义如下:

$$P = 60 + 40 \left[1 - \frac{T_i - G_i}{\max(i)} \right] \quad (1)$$

式中:第一项 60 为规定的预报基础分;第二项为强度预报的加权分; T_i 、 G_i 分别为 TRMM 降水数据和站点实测降水数据; $\max(i)$ 为降水量的水量极差值。

根据气象部门行业规范^[19],将各个量级的降水量分级,

24 h 降水量 0.1~ 9.9 mm 分为小雨, 10~ 24.9 mm 定为中雨, 25~ 49.9 mm 为大雨, 50~ 99.9 mm 为暴雨, 100~ 249.9 mm 为大暴雨, 250 mm 以上为特大暴雨。本文主要分析小雨、中雨、大雨、暴雨四个雨量级的降水数据。四个降水量级的 max(i) 值分别为 9.9、14.9、24.9、49.9。由式(1)可知, 当 TRMM 值和站点实测值一致时, 该预报评分为 100, 即为最优值。根据评分的大小, 依次将各个分值范围分为四个等级: 80~ 100(含)分为优秀, 70~ 80(含)分为良好, 60~ 70(含)分为中等, 60分以下为差。

3.2 相关系数法

以气象站点实测降水数据为“真值”, 与对应的 TRMM 降水日、月尺度数据进行对比分析, 得到相关系数 r 。 r 的取值范围为 $-1 \sim 1$, $r > 0$ 表明两个变量正相关, $r < 0$ 表明负相关, $r = 0$ 则表明不相关; r 绝对值越接近 1, 一致性越好。一般定义 $0.8 < |r| \leq 1$ 为极强相关, $0.6 < |r| \leq 0.8$ 为强相关, $0.4 < |r| \leq 0.6$ 为中等程度相关, $0.2 < |r| \leq 0.4$ 为弱相关, $0.0 < |r| \leq 0.2$ 为极弱相关。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}_i)(T_i - \bar{T}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2}} \quad (2)$$

式中: r 为相关系数; \bar{G}_i, \bar{T}_i 分别为气象站点实测平均降水量和 TRMM 测雨数据平均降水量; G_i, T_i 分别为站点实测降水数据和 TRMM 降水数据。

然后, 采用 F 检验法对所求得 r 进行 $\alpha = 0.01$ 水平下的显著性检验。

相对误差绝对值的平均值 MRE 是反映预报误差大小的评分指标, 理论最优值为 0。计算公式如下:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_i - G_i}{G_i} \right| \quad (3)$$

3.3 散点斜率

以气象站点观测数据作为自变量, TRMM 数据为因变量, 做一元线性回归分析。用二者构成的线性回归方程斜率 K 值来揭示各气象站点所对应 TRMM 数值偏离“真值”的程度: 若 $K = 1$, 说明无偏差; $K > 1$, 则 TRMM 数据大于“真值”; $K < 1$, 则小于“真值”。再由 $|K - 1| = Bias$ 计算各个站点偏差 $Bias$ 值, 可得到 TRMM 数据对降雨预报低估与高估的程度。

3.4 泰森多边形

泰森多边形法又称垂直评分法或加权平均法。通过该方法, 利用测站“真值”和从 TRMM 数据中提取的数据, 分别计算湘江流域的面雨量值^[20]。首先求得各测站面积权重系数, 然后利用各测站雨量与该测站面积权重系数相乘后累加得到面雨量值, 即:

$$P = f_1 p_1 + f_2 p_2 + \dots + f_n p_n \quad (4)$$

式中: P 为流域面雨量; f_1, f_2, \dots, f_n 分别为各测站面积权重系数; p_1, p_2, \dots, p_n 分别为各站点同期降雨量值。

4 结果与分析

4.1 定性分析

根据模糊评分方法对研究区各个气象站点的实测日数据进行评分, 结果见表 1。可以看出, TRMM 日尺度的降水数据在预报降水量为小雨(0.1~ 9.9 mm)时的模糊评分平均值为 79 分, 中雨(10~ 24.9 mm)时为 63 分, 大雨(25~ 49.9 mm)时为 64 分, 暴雨(50~ 99.9 mm 以上)时为 69 分, 即小雨的平均预报精度为良好以上, 而其他雨量级平均预报精度都为中等。各降水量级的预报精度由好到差依次是: 小雨、暴雨、大雨、中雨。整体上, TRMM 3B42 测雨数据的预报精度为中等水平。

表 1 站点模糊评分统计

Tab. 1 Fuzzy score statistics of all stations

站点	小雨		中雨		大雨		暴雨	
	评分	等级	评分	等级	评分	等级	评分	等级
1 安化	78	良	66	中	68	中	61	中
2 长沙	79	良	63	中	66	中	67	中
3 邵阳	79	良	62	中	63	中	71	良
4 双峰	79	良	63	中	67	中	71	良
5 南岳	79	良	59	差	59	差	66	中
6 株洲	79	良	62	中	64	中	71	良
7 宜春	78	良	61	中	66	中	70	良
8 武冈	80	优	65	中	62	中	70	良
9 零陵	81	优	63	中	65	中	64	中
10 衡阳	79	良	64	中	63	中	70	良
11 常宁	81	优	62	中	63	中	68	中
12 桂林	76	良	59	中	62	中	70	中
13 道县	79	良	66	中	64	中	69	中
14 郴州	82	优	62	中	64	中	72	良
平均值	79	良	63	中	64	中	69	中

4.2 定量分析

4.2.1 面雨量分析

对于研究区内 14 个雨量站的测雨资料和 TRMM 测雨数据, 流域面的平均雨量采用泰森多边形计算。以 14 个气象台站为基准, 采用泰森多边形剖分的方式将研究区剖分成 14 个多边形, 使每个多边形内任何一点到该多边形内气象站的距离都小于到其他气象站的距离, 因此 14 个多边形表示 14 个气象站点最大的影响范围。根据各站点的权重计算结果(表 2), 分别计算 1998 年 1 月到 2009 年 12 月的湘江流域平均日、月尺度的降水量, 结果见图 2、图 3。实测值与 TRMM 数据的整体变化趋势相同, 但在月尺度上两者的相关系数达到 0.986 9, 远高于日尺度 0.656 7。根据 TRMM 和地面站点 1998 年~ 2009 年间日、月尺度降水量的散点图和线性趋势线(图 3)可知, 受空间尺度差异的影响, TRMM 与实测站点数据间存在一定的偏差, 但总体上存在明显的线性相关性。

表 2 各站点权重

Tab. 2 Weights of all stations

站点	安化	长沙	邵阳	双峰	南岳	株洲	宜春	武冈	零陵	衡阳	常宁	桂林	道县	郴州
权重(%)	10.51	5.48	5.48	4.30	3.18	5.05	12.96	10.37	4.58	3.77	3.75	5.88	6.59	18.11

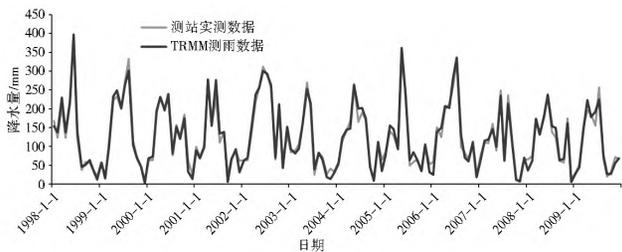


图 2 站点测站实测平均月降水量与 TRMM 测雨数据对比(1998 年- 2009 年)

Fig. 2 Comparison of the measured and TRMM predicted monthly precipitation data from 1998 to 2009

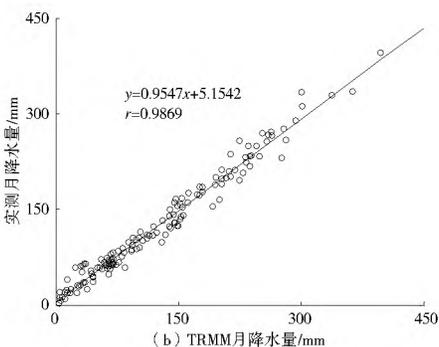
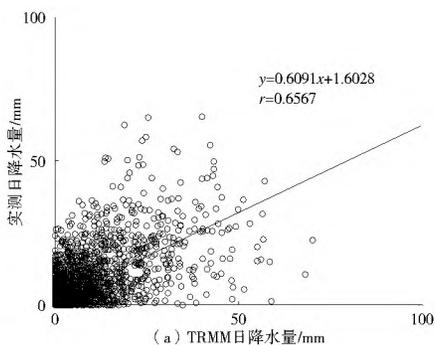


图 3 1998 年- 2009 年 TRMM 与地面观测站点日、月尺度降水量散点图

Fig. 3 TRMM predicted and measured daily and monthly precipitation scatter data from 1998 to 2009

4.2.2 站点雨量分析

根据相关系数法计算可得湘江流域及周边的 14 个站点的降雨日、月尺度评价指标(表 3), 结果显示, 14 个站点平均相关系数都高于 0.4, 且均在 1% 水平(单侧)上显著相关, 说明 TRMM 数据和各个站点的实测数据都是显著相关的。其中, 日尺度的平均相关系数为 0.4786, *MRE* 值平均为 1.9609; 而月尺度的平均相关系数达到了 0.9307, *MRE* 值平均达到了 0.395。可见, 在研究区内 TRMM 数据月尺度的精度远远高于日尺度, 误差也小很多, 这与刘俊峰^[12]等利用中国 650 个站点的降水数据分析中国大陆 50°N 以南地区的日、月、年尺度上的结论是一致的。

为了揭示各个气象站点所对应的 TRMM 数据值偏离气象观测数据的程度, 本文以气象站点观测数据为自变量, TRMM 3B42 降水数据为应变量, 进行一元线性回归分析, 获得线性回归方程斜率 *K*(表 4)。可以看出, TRMM 卫星数据在日尺度上都低估了降水量, 低估水平在 42%~62% 之间, 平均低估量为 50%; 月尺度上数据明显优于日尺度, 但也存

在平均大约 8% 的低估量。

表 3 TRMM 降雨日、月数据评价指标统计表

Tab. 3 Evaluation index statistics of TRMM predicted daily and monthly precipitation data

站点编号	站点	日数据		月数据	
		相关系数 <i>r</i>	<i>MRE</i>	相关系数 <i>r</i>	<i>MRE</i>
1	安化	0.5451	2.3140	0.9266	0.2340
2	长沙	0.4601	1.3829	0.9374	0.3010
3	邵阳	0.4118	2.1376	0.9522	0.3220
4	双峰	0.5136	2.3743	0.9039	0.3770
5	南岳	0.4347	1.7882	0.9284	0.3170
6	株洲	0.4910	1.6468	0.9139	0.4320
7	宜春	0.4999	1.8663	0.9432	0.3210
8	武冈	0.4270	2.1141	0.9561	0.2680
9	零陵	0.4653	1.9423	0.9547	0.3780
10	衡阳	0.4901	1.9188	0.8691	0.4360
11	常宁	0.4451	1.8503	0.9069	0.3550
12	桂林	0.5140	2.2827	0.9832	1.0320
13	道县	0.4858	2.2016	0.9189	0.4120
14	郴州	0.5170	1.6331	0.9349	0.3470
平均值		0.4786	1.9609	0.9307	0.3950

表 4 TRMM 数据与各站点实测数据偏离程度

Tab. 4 Deviation between TRMM predicted and measured precipitation data

站点	<i>K</i> 值		<i>Bias</i>	
	月数据	日数据	月数据	日数据
安化	0.8422	0.5100	-0.1578	-0.4900
长沙	0.9299	0.4903	-0.0701	-0.5097
邵阳	0.9530	0.4691	-0.0470	-0.5309
双峰	0.9332	0.5841	-0.0668	-0.4159
南岳	0.7347	0.3821	-0.2653	-0.6179
株洲	0.9178	0.5513	-0.0822	-0.4487
宜春	0.9694	0.5480	-0.0306	-0.4520
武冈	1.0603	0.5048	0.0603	-0.4952
零陵	0.9682	0.4956	-0.0318	-0.5044
衡阳	0.9305	0.5516	-0.0695	-0.4484
常宁	0.9761	0.4938	-0.0239	-0.5062
桂林	0.9148	0.4873	-0.0852	-0.5127
道县	0.8613	0.4534	-0.1387	-0.5466
郴州	0.8606	0.4883	-0.1394	-0.5117
平均值	0.9180	0.5007	-0.0820	-0.4993

5 结论

以湘江流域为研究区, 分别利用泰森多边形法、模糊综合评分方法、相关系数法和散点斜率法, 基于区内 14 个气象站点实测降水数据, 对 TRMM 3B42 降水数据在日、月尺度分别进行精度定性和定量检验。得到以下结论。

(1) TRMM 3B42 测雨数据精度较高, 显示出很好的适用性, 但月尺度数据精度优于日尺度。其中月尺度测雨数据与实测数据相关系数数值达 0.93, 而日尺度数据相关系数数值只有 0.48; 其他相关评价指标相对误差绝对值的平均值 *MRE*、

偏差值 *Bias*、斜率 *K* 在各个气象站点变化趋势都是一致的, 只有少数站点相关系数数值较高, 但 *MRE* 和 *Bias* 值较大。

(2) TRMM 日尺度测雨数据的模糊评分结果显示, 各降水量级预报精度由好到差依次是小雨、暴雨、大雨、中雨。整体来说, TRMM 3B42 测雨数据预报精度为中等水平。

总体上, TRMM 3B42 测雨数据在湘江流域的适用性较高, 并且可以有效地克服地面观测站点资料缺失、站点分布不均等问题, 从而为开展水文工作提供可靠地保证。但是, 由于湘江流域受东亚季风活动的影响, 极易出现大范围的洪涝灾害, 因此精确测量和预报大雨、暴雨, 对于防灾减灾具有重要意义。从这个角度上说, TRMM 3B42 测雨数据在大雨和暴雨精度方面上还有待提高。

参考文献(References):

- [1] S Michaelides, V Levizzani, E Anagnostou, et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [2] Shuoyu Xiang, Yueqing Li, Dian Li, et al. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 122(1-2): 33-45.
- [3] Aaron Yair, Naama Raz Yassif. Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length [J]. *Geomorphology*, 2004, 61(1): 155-169.
- [4] 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. (ZHU Guofeng, PU Tao, ZHANG Tao, et al. The accuracy of TRMM precipitation data in Hengduan Mountainous Region, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(9): 1125-1131. (in Chinese))
- [5] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. *地理科学*, 2013, 33(8). (QI Wenwen, ZHANG Baiping, PANG Yu, et al. TRMM-Data Based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(8): 1000-1005. (in Chinese))
- [6] Christian Kummerow, William Barnes, Toshiaki Kozu, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1998, 15(3).
- [7] Joanne Simpson, Robert F Adler, Gerald R North. A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69(3): 278-295.
- [8] Chris Kidd. Satellite rainfall climatology: A review [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(9): 1041-1066.
- [9] Guofeng Zhu, Yuanqing He, Tao Pu, et al. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 71-85.
- [10] Andrew J Negri, Thomas L Bell, Liming Xu. Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2002, 19(9).
- [11] Nazrul Islam, Hiroshi Uyeda. Comparison of TRMM 3B42 products with surface rainfall over bangladesh [C]. // Comparison of TRMM 3B42 products with surface rainfall over bangladesh. IGARSS. 4112-4115.
- [12] 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, (03): 343-348. (LIU Junfeng, CHEN Rensheng, HAN Chuntan et al. Evaluating TRMM multi satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow cover products [J]. *Advancing in Water Science*, 2010, 21(3): 343-348. (in Chinese))
- [13] 杨纫章. 湘江流域水文地理 [J]. *地理学报*, 1957, (02): 161-182. (YANG Renzhang. Hydrography of the Xiang River Basin Hunan Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1957, 23(2): 161-182. (in Chinese))
- [14] 罗伯良, 张超, 林浩. 近 40 年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征 [J]. *气象*, 2008, 34(1): 80-85. (LUO Borliang, ZHANG Chao, LIN Hao. Characteristics of climatic changes and catastrophe of extreme precipitation in Hunan in recent 40 years [J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(1): 80-85. (in Chinese))
- [15] 杜鹃, 徐伟, 赵智国, 等. 湘江流域近 30 年径流量与水位的长期变化规律研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(3): 369-378. (DU Juan, XU Wei, ZHAO Zhiguo, et al. Trends of runoff and water level over the past thirty years in Xiang River Basin [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(3): 370-378. (in Chinese))
- [16] 任芝花, 熊安元, 邹凤玲. 中国地面月气候资料质量控制方法的研究 [J]. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 516-523. (REN Zhihua, XIONG Anyuan, ZOU Fengling. The quality control of surface monthly climate data in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(4): 516-523. (in Chinese))
- [17] Dorothy K Hall, James L Foster, Vincent V Salomonson, et al. Development of a technique to assess snow cover mapping errors from space [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2001, 39(2): 432-438.
- [18] 周国兵. 三峡库区流域面雨量预报模糊检验 [J]. *气象科技*, 2005, 33(2): 120-123. (ZHOU Guobin. Fuzzy assessment of area rainfall forecast in Three Gorges reservoir valley [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(2): 120-123. (in Chinese))
- [19] 陈桂英, 赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估 [J]. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 178-185. (CHEN Guiying, ZHAO Zhenquo. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1998, 9(2): 178-185. (in Chinese))
- [20] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用 [J]. *气象*, 2001, (11): 13-16. (XU Jing, LIN Jian, YAO Xuexiang et al. Calculating method of area rainfall over seven river valleys and its application [J]. *Meteorological Monthly*, 2001, 27(11): 13-16. (in Chinese))