

骆三, 苗峻峰, 牛涛, 等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1081-1090.

# TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料 在中国区域的对比分析<sup>\*1</sup>

骆 三<sup>1,2</sup> 苗峻峰<sup>1</sup> 牛 涛<sup>2</sup> 魏春秀<sup>3</sup> 王 霞<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 海南省琼海市气象局, 琼海 570203

4 贵州省气象局, 贵阳 550002

**提 要:** 本文利用 2004—2008 年 6—8 月中国 673 个气象站逐 6 小时降水资料检验同期 TRMM 测雨产品 3B42 的精度。经检验得出: 卫星资料日平均降水和降水频率空间分布与台站资料非常类似, 相关系数分别能达到 0.79 和 0.84, 降水频率与台站资料相比偏大; 从日降水相关空间分布看, 卫星资料在东部地区相关性较高, 日降水相关系数都在 0.6~0.9 之间; 从日降水和逐 6 小时降水平均绝对误差空间分布看, 卫星资料在华南地区误差最大, 长江流域次之; 从中国 8 个区域逐 6 小时降水总量日变化看, 卫星资料与台站资料有很好的一致性, 但在华南地区 20 时降水量偏小; 按不同雨量等级对比, 发现卫星资料绝对误差相对百分率空间分布有如下特点: 小雨全国普遍数值偏高, 中雨东部部分地区偏大, 大雨和暴雨整体上数值小于 1; 全国平均漏演率和空演率分别为 10% 和 14%。

**关键词:** TRMM, 降水频率, 平均绝对误差, 日变化

## A Comparison of TRMM 3B42 Products with Rain Gauge Observations in China

LUO San<sup>1,2</sup> MIAO Junfeng<sup>1</sup> NIU Tao<sup>2</sup> WEI Chunxiu<sup>3</sup> WANG Xia<sup>4</sup>

1 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Qionghai Meteorological Bureau in Hainan Province, Qionghai 570203

4 Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002

**Abstract:** The 6-hourly precipitation data from 673 rain gauge records are used to verify the accuracy of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 products from June to August (JJA) during 2004—2008 in China. The results show that the satellite products are similar to rain gauge data in revealing the spatial patterns of JJA mean precipitation amount and precipitation frequency during 2004—2008. The pattern correlation coefficients of daily rainfall amount and rainfall frequency are 0.79 and 0.84, respectively. The satellite product overestimates rainfall frequency. Based on the spatial distributions of correlation coefficients of daily rainfall amount, the correlation coefficients between TRMM products and rain gauge data range from 0.6 to 0.9 in eastern China. According to the spatial patterns of mean absolute error (MAE) of daily and 6-hourly precipitation amount, the MAE in South China is the largest, followed by the Yangtze River Basin. From diurnal cycle of the 6-hourly total precipitation amount over eight subregions, the TRMM product has a good resemblance with rain gauge observations except the big difference in the after-

\* 国家自然科学基金项目(编号:40875077)和国际科技合作项目(2009DFA21430)资助

2010 年 11 月 24 日收稿; 2011 年 4 月 13 日收修定稿

第一作者: 骆三, 主要从事资料融合方法研究. Email: luosan33@163.com

通讯作者: 牛涛, niutao2001@cams.cma.gov.cn

noon (1400—2000 LST) in South China. Based on the spatial patterns of mean relative error (MRE) of different rainfall amount, the TRMM product behaves as follows: light rains is overestimated nearly in whole country; moderate rain is larger in some regions of eastern China; the MREs of heavy rain and torrential rain are less than 1 in most areas of China. Mean rates of the missing retrieval and the vacancy retrieval are 10% and 14% respectively in China.

**Key words:** TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), precipitation frequency, mean absolute error (MAE), diurnal variation

## 引 言

1997年11月,由美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration)和日本国家空间发展局(National Space Development Agency)联合研制的低倾角轨道卫星——热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星发射成功,它是第一颗专门应用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星,其发射目的是观测和研究热带降水过程,更多地了解热带降雨对全球气候系统的影响。即将实施的多卫星全球降雨观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM)是TRMM的后续计划,近10多年中,一系列的高分辨率、准全球、近实时的TRMM测雨产品被免费提供给各研究团体。TRMM卫星测雨产品的出现,弥补了无资料地区雨量信息的不足,能够帮助我们准确认识降水在空间和时间上的分布,对于中小尺度天气分析、气候诊断研究(认识气候变化规律)、模式评估(改善模式性能)至关重要。TRMM卫星测雨产品还有各种各样的其他科学研究,例如农业和水电站的水资源管理、干旱缓解、洪水控制、洪水预测等等。国外,Adler等<sup>[1]</sup>,Chiu等<sup>[2-3]</sup>,Nicholson等<sup>[4-5]</sup>,Brown等<sup>[6]</sup>,Islam等<sup>[7]</sup>在TRMM卫星测雨产品检验与评估方面做了很多,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>[8-10]</sup>,但是在亚洲,特别是在东亚地区,对TRMM测雨产品的检验与评估还很少。检验评估TRMM卫星测雨产品在中国地区的精度可以为TRMM资料的提供者提供借鉴,在分析测雨误差产生原因的基础上,可以进一步提高TRMM卫星的测雨精度,国内对TRMM卫星测雨产品进行精度检验的文献还很少。黄蓉等<sup>[11]</sup>结合三维对流云模式和微波辐射传输模式对1998年7月武汉暴雨过

程中的对流云的微物理特性及其对应的微波辐射特性进行了模拟,并将模拟的结果与TRMM所提供的产品做比较,结果显示云模式模拟的云中各种微物理量除云水的分布比TRMM产品反演的要高以外,其他各种量在高度的分布上比较一致。卢山等<sup>[12]</sup>用TRMM3B42(V6)降水资料较精确地描述了季风槽伴随“碧利斯”登陆造成降水增幅过程和降水分布特征。何会中等<sup>[13]</sup>把热带测雨卫星(TRMM)上降水雷达(Precipitation Radar)与香港地面雷达资料进行对比分析,发现用PR测量降水与地面雷达测量降水具有非常好的一致性。Yu等<sup>[14]</sup>指出中国夏季降水在不同的区域有很强的日循环特征,由于中国地区的大部分降水主要发生在6—8月且日循环在夏季最强烈<sup>[15]</sup>,因此本文研究集中在6—8月。Zhou等<sup>[16]</sup>用2000—2004年6—8月逐小时台站资料对TRMM测雨产品3B42进行了检验,指出3B42资料在中国地区日平均降水和降水频率空间分布与台站资料有很好的一致性,但是在大部分地区高估了降水频率。2004年以后对TRMM测雨产品3B42的检验在国内还很少,因此本文选取2004—2008年6—8月逐6小时地面降水资料对同期TRMM测雨产品3B42进行检验评估。

## 1 资料与分析方法

### 1.1 台站资料介绍

本文研究中用到的地面降水资料是从中国气象局得到的,它包括2004—2008年6—8月经过质量控制的673个气象站逐6小时雨量计记录。大部分台站位于中部和东部地区,西部站点覆盖较少,特别是西藏西部地区(图1)。

### 1.2 卫星资料介绍

TRMM测雨产品3B42是TRMM卫星与其他

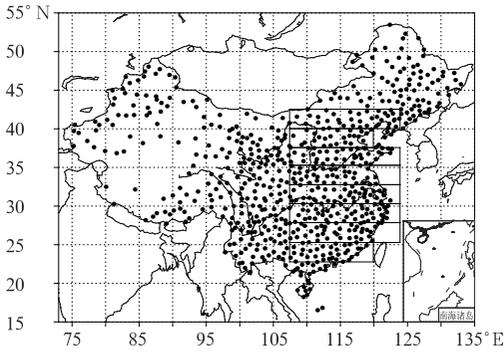


图1 本文所用资料所在气象站空间分布及8个区域所在位置

Fig.1 Spatial distributions of meteorological stations used in this paper eight subregions are outlined for regional averaging

卫星联合反演的降水产品,提供全球格点降水资料。该产品首先订正热带测雨卫星(TRMM)微波成像仪(TMI)资料,并联合SSM/I, AMSR-E, AMSU-B资料估值降水,其次利用全球降水气候计划(GPCP)的红外降水估值订正微波降水,再进行微波和红外资料联合估值,最后再与逐月的雨量计观测资料匹配。它的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为3小时,覆盖全球纬度 $50^\circ\text{S} \sim 50^\circ\text{N}$ 。在时间上本文把卫星资料的世界时间转换为北京时,在空间上,本文用双线性插值方法把卫星资料处理为与站点相同经纬度位置的673个点的资料,卫星日累计降水和逐6小时累计降水均是通过累加逐3小时降水估计得到的。

2004—2008年夏季(6—8月)TRMM3B42产品<sup>[17]</sup>在本工作中被应用。对于2004—2008年6—8月降水频率,本文将逐6小时雨量计资料累加处理为逐日降水资料与卫星日累计降水资料对比。降水频率与临界值有关系,Dai等<sup>[18]</sup>用 $1.0\text{ mm}$ 为临界值研究了全球的日降水频率,Dai等<sup>[19]</sup>还用过 $0.1\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $2.4\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )来研究美国逐小时降水,本文把每个格点或每个站点在一定时间内日降水大于 $1.0\text{ mm}$ 的天数占总天数的百分比称为降水频率,同时本文也用 $2.4\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 为临界值做了测试,这时降水频率会降低一些,但结果没有明显差异,所以下文仅给出取临界值为 $1.0\text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的对比分析结果。

### 1.3 统计方法

为了更好的比较,下列统计量被用到:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - G_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_i - G_i| \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_i - G_i}{G_i} \right| \quad (4)$$

$r$ 为相关系数, $RMSE$ (Root Mean Square Error)为均方根误差, $MAE$ (Mean Absolute Error)为平均绝对误差, $MRE$ (Mean Relative Error)为平均相对误差, $N$ 为样本的总数, $i=1, \dots, N$ ,  $T_i$ 为插值后的3B42降水量, $G_i$ 为每个台站的降水量。平均相对误差讨论的是某种资料在某个点或某区域在一段时间内相对误差绝对值的平均状况,最优值为0。

## 2 日平均降水量和降水频率空间分布

TRMM卫星产品已经被应用于研究热带降水和对流,评估气候模式等等,然而它们在呈现东亚地区降水量、降水频率的能力方面很少被地面观测资料验证,图2为2004—2008年6—8月3B42卫星资料和台站资料日平均降水量、降水频率的比较。从图2b上可以看到典型的夏季风雨带位于 $100^\circ\text{E}$ 以东,从西南向东北延伸,主要降水中心位于云南南部、华南以及福建东北部,次降雨中心主要在青藏高原的东部地区,一些较弱的降水中心沿着长江流域的中游到下游分布。卫星雨量分布与雨量计观测结果在分布型上十分类似,但很显然卫星数据在大部分区域还是高估了6—8月的降水量,高估值在 $1 \sim 4\text{ mm}$ 左右,特别在广西大部分区域和长江中游地区降水量存在高估,但福建东南部地区低估了降水量,这与华南、长江流域和福建东南部夏季多对流雨有关。Furuzawa等<sup>[20]</sup>针对雨顶高度与TMI资料和降水雷达资料间差异关系的研究表明,由于在陆面TMI降水算法强烈依赖于固态降水粒子散射所导致的高频通道亮温衰减量,TMI往往对深对流性降水以及层云降水表现为地表降水率的高估,而对浅对流降水系统则因上层冰粒子的不足而有较明显

的低估。TRMM 卫星资料与雨量计观测资料日平均降水空间分布型相关系数为 0.79, 均方根误差为  $1.83 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

对比 TRMM 卫星资料与台站资料降水频率分布图(图 2c, d), 其结果十分相似, 相关系数达到 0.84, 均方根误差为 4.26%。TRMM 卫星资料的降水频率在大部分地区都大于台站资料, 这与 Zhou 等<sup>[16]</sup>用逐小时台站降水资料做出的结果是一致的。例如: 在东北地区, TRMM 卫星资料显示大部分地区降水频率超过 16%, 而台站资料显示除了辽宁和吉林少部分地区超过 16%, 其他地区都在 10%~16%之间; 在华北地区, TRMM 卫星资料为 14%~24%, 而台站资料为 10%~14%; 在长江与黄河之间的地区, TRMM 卫星资料降水频率普遍大于 16%, 而台站资料除了少部分地区大于 16%, 其他地区都在 10%~16%之间; 在华南, TRMM 卫星资料降水频率为 20%~30%, 而台站资料为 16%~24%。

### 3 降水相关和降水绝对误差空间分布

本文先对 TRMM 测雨资料用双线性方法进行插值, 得到与台站经纬度位置对应的降水资料, 然后再与台站资料相比较。从 2004—2008 年夏季(6—8 月)TRMM3B42 测雨资料与雨量计观测资料日降水相关空间分布看, 中部和东部地区相关性很高, 相关系数能达到 0.6~0.9 (图 3)。

图 4 和图 5 分别显示的是 TRMM 卫星资料的日降水和逐 6 小时降水平均绝对误差空间分布, 从图 4 可以看出 TRMM 卫星资料在华南地区日降水平均绝对误差最大, 长江流域次之, 图 5 显示的结果与图 4 非常吻合, 但在西藏东南部、四川盆地也存在较大的误差。由于卫星产品与常规地面观测的时间、空间的不一致性, 存在误差是必然的, TRMM/TMI 资料是基于其通道所观测的微波亮温, 并结合云数值模式和辐射传输模式得到的反演结果, 不同的下垫面都会有影响, 华南和长江流域夏季降水量级相对较大, 因而其平均绝对误差比较大。图 5a 显示 02 时西藏东南部和四川盆地逐 6 小时降水平均绝对误差也较大, 其中西藏东南部最大值达到  $4.5 \text{ mm} \cdot 6 \text{ h}^{-1}$ , 这与青藏高原大地形有关, Fu

等<sup>[21]</sup>利用 TRMM-PR 对青藏高原的最新研究结果表明, 高原夏季降水相对周边地区形成独特的塔状结构, 因而其降水潜热释放也将更为直接地加热中层大气, 特别是在高原西侧和南侧呈现出降水向上伸展的极大值区, 考虑到这种大地形所直接导致的深对流效应, 同等降水率条件下降水系统上部冰粒子含量必然增多, 很容易导致 TMI 误估降水并获得偏高的地表降水率。由于四川盆地经常有云和大雾天气, 这一地区高层部分被大陆性层云覆盖<sup>[22]</sup>, 而低层与降水有关的层云很难被卫星探测到, 因而误差较大。

### 4 降水日变化

中国夏季雨带位置是短期气候预测的核心问题, 国家气候中心(NCC)至今仍沿用 3 类雨带的分类, 即 I 北方类、II 黄河长江之间、III 长江及其以南地区。这个分类抓住了雨带的主要特征, 因此得到广泛采用, 但在应用中也发现, 有的降水过程是这 3 个雨带未能概括的情况, 王绍武等<sup>[22]</sup>按最大降水距平百分率提出把中国东部夏季雨带位置划分为 8 类的方案: 内蒙古( $40^{\circ} \sim 42.5^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ )、华北( $37.5^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ )、黄河下游( $35^{\circ} \sim 37.5^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ )、淮河( $32.5^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ )、长江( $30^{\circ} \sim 32.5^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ )、江南北部( $27.5^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ )、江南南部( $25^{\circ} \sim 27.5^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$ )、华南( $22.5^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ ,  $107.5^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ) (其位置在图 1 中标出), 建立了 1470—2005 年 8 类雨带的档案。从图 6 可以看出 TRMM 测雨资料除了华南 20 时降水量与台站资料有很大的差异, 在其他各地区的日变化都与雨量计观测资料有很好的一致性, 其中在华北地区 TRMM 测雨资料与雨量计观测资料一致性最好。整体上 TRMM 测雨资料逐 6 小时降水总量比台站资料偏大, 但在江南北部与台站资料相比偏小。

从表 1 中可以看出 TRMM 测雨产品在黄河下游、淮河、长江和江南北部四区域的日降水平均绝对误差明显要小于内蒙古、华北、江南南部、华南四区域, 黄河下游日降水平均绝对误差最小, 5 年平均为  $0.78 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 江南南部和华南最大, 每年夏季日降水平均绝对误差均大于  $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 5 年平均分

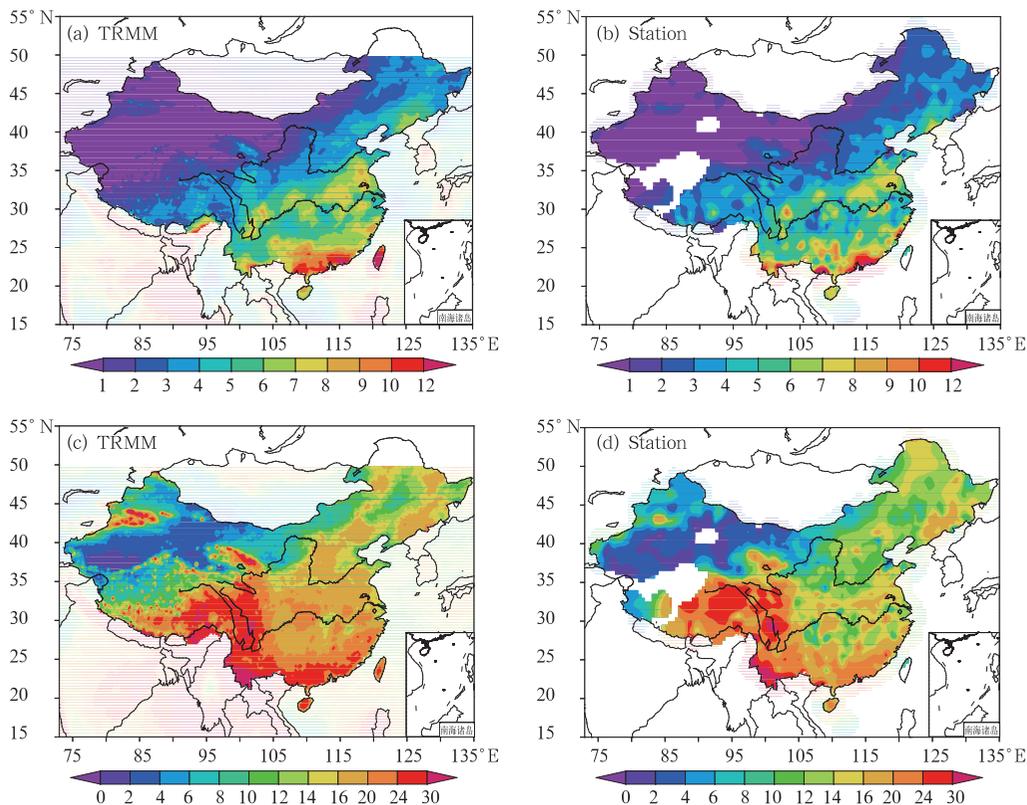


图 2 2004—2008 年夏季(6—8 月)TRMM3B42 卫星资料和台站资料日平均降水量(a,b; 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )和降水频率(c,d; 单位:%)的比较

Fig. 2 Spatial distributions of the 2004—2008 mean summer (June—August) precipitation amount (a,b, unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and frequency (c,d, unit:%) by TRMM product (a,c) and station rain gauge (b,d)

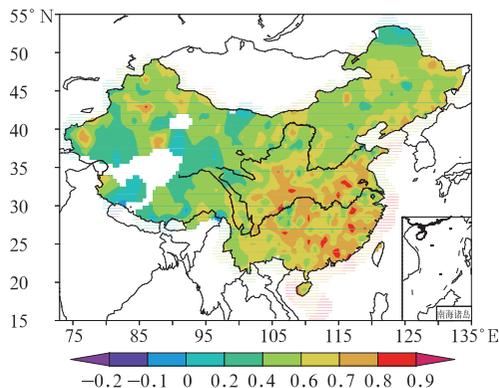


图 3 2004—2008 年夏季(6—8 月)TRMM 卫星资料与雨量计观测资料日降水相关系数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of correlation coefficients of daily rainfall during the 2004—2008 summer (June—August) between rain gauges and the TRMM product

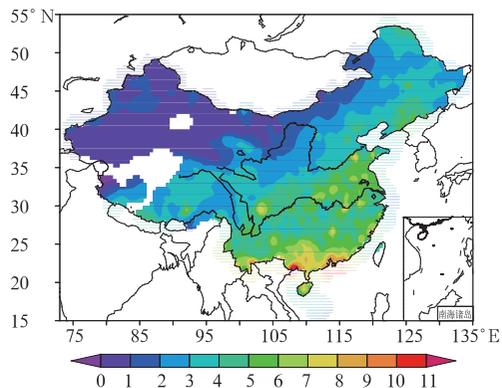


图 4 2004—2008 年夏季(6—8 月)TRMM 卫星资料日降水平均绝对误差(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of MAE of daily rainfall (unit:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) during the 2004—2008 summer (June—August) between rain gauges and the TRMM product

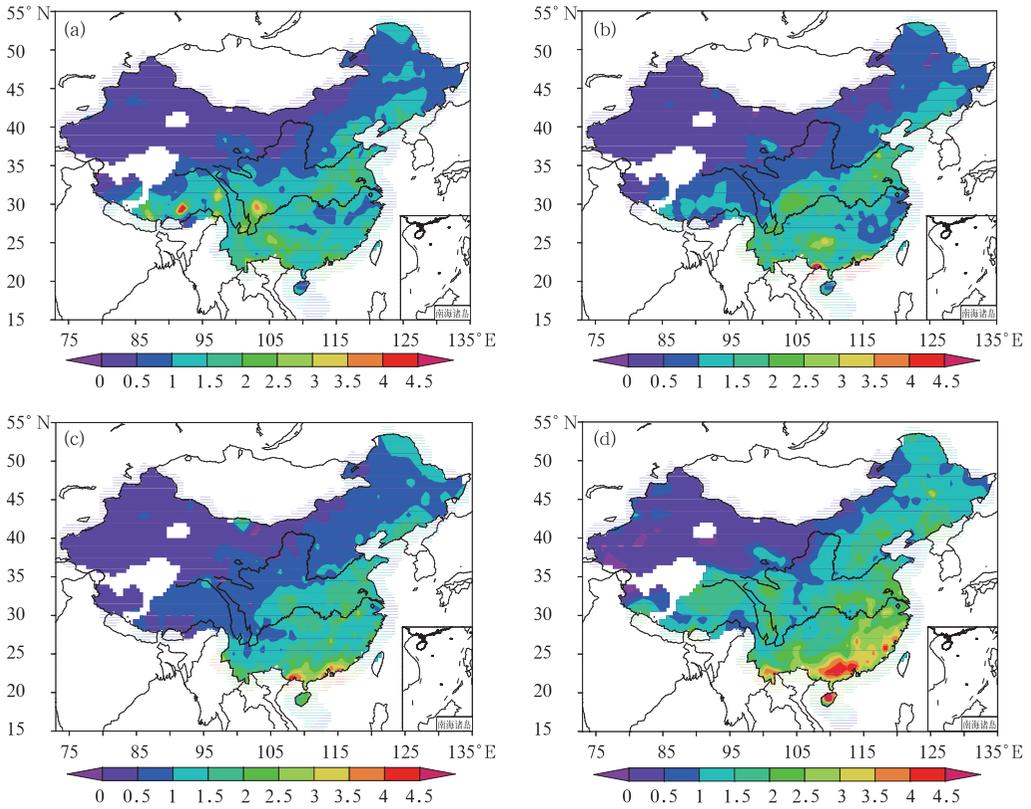


图 5 2004—2008 年夏季(6—8 月)TRMM 卫星资料逐 6 小时降水平均绝对误差( $\text{mm} \cdot 6 \text{h}^{-1}$ )空间分布

(a) 02 时;(b) 08 时;(c) 14 时;(d) 20 时

Fig. 5 Spatial distributions of MAE of 6-hourly rainfall amount ( $\text{mm} \cdot 6 \text{h}^{-1}$ ) during the 2004—2008 summer (June—August) between rain gauges and the TRMM product

(a) 02 BT, (b) 08 BT, (c) 14 BT, (d) 20 BT

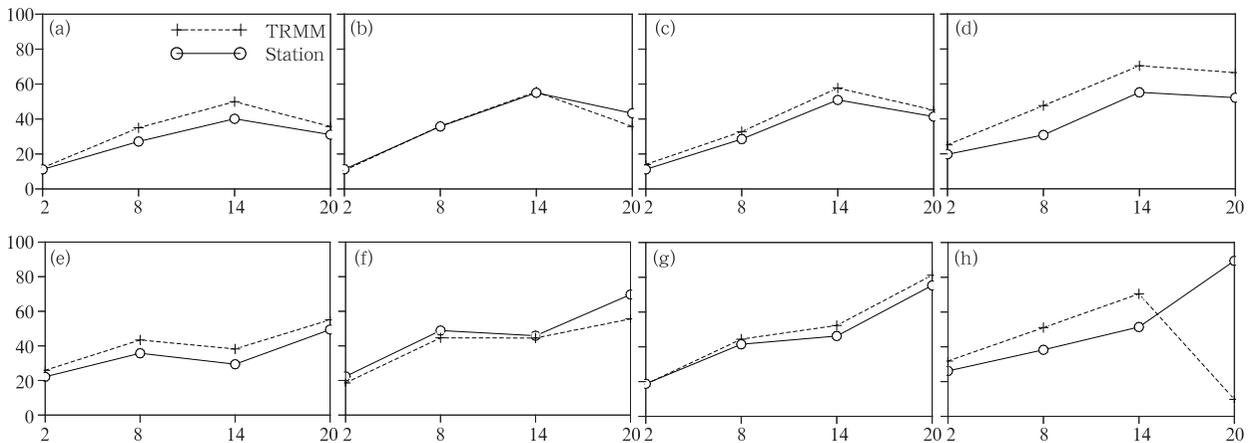


图 6 中国 8 个区域逐 6 小时降水总量(单位: mm)日变化

TRMM 测雨产品 8 个区域的位置已在图 1 中用矩形框标出,横坐标为北京时间

(a) 内蒙古,(b) 华北,(c) 黄河下游,(d) 淮河,(e) 长江,(f) 江南北部,(g) 江南南部,(h) 华南

Fig. 6 Diurnal variation of June to August 6-hourly total precipitation amount (unit: mm) over the eight selected regions outlined in Fig. 1 from rain gauge measurements and the TRMM products. The unit of  $x$  axis is BT in hours.

(a) Inner-Mongolia, (b) North China, (c) Lower Reaches of Yellow River, (d) the Huaihe River, (e) the Yangtze River, (f) northern Jiangsu south of the Yangtze River, (g) Southern Jiangsu, (h) South China

表 1 TRMM 测雨产品在中国 8 个区域逐年夏季日降水平均绝对误差 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和与台站资料的逐年日降水相关系数以及各区域 5 年内的平均值 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Table 1 MAE ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and correlation coefficients during the 2004—2008 summer (June—August) between rain gauges and the TRMM product over the eight selected regions outlined in Fig. 1 and their mean values of 5 years ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

		内蒙古	华北	黄河下游	淮河	长江	江南北部	江南南部	华南
2004	相关系数	0.56	0.62	0.60	0.64	0.49	0.52	0.41	0.49
	平均绝对误差	1.17	1.00	0.93	0.98	0.95	1.02	1.33	1.23
2005	相关系数	0.63	0.63	0.61	0.56	0.48	0.52	0.60	0.63
	平均绝对误差	1.05	1.05	0.82	0.90	0.85	0.84	1.01	1.04
2006	相关系数	0.41	0.53	0.65	0.66	0.24	0.59	0.50	0.44
	平均绝对误差	1.07	0.88	0.73	0.82	0.96	0.90	1.19	1.17
2007	相关系数	0.74	0.80	0.86	0.67	0.78	0.64	0.69	0.68
	平均绝对误差	0.97	0.88	0.63	0.88	0.83	0.89	1.06	1.01
2008	相关系数	0.60	0.62	0.70	0.65	0.69	0.65	0.58	0.56
	平均绝对误差	1.09	0.99	0.79	0.90	0.84	0.92	1.07	1.15
平均	相关系数	0.61	0.64	0.68	0.65	0.54	0.58	0.56	0.56
	平均绝对误差	1.07	0.96	0.78	0.90	0.89	0.91	1.13	1.12

别为  $1.13 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $1.12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。对于 TRMM 测雨产品与雨量计观测资料的日降水相关系数,则长江以北 4 个区域要比长江以南的 4 个区域高,相关系数平均值都在 0.60 以上,其中黄河下游相关系数最高,5 年均值为 0.68,而长江以南的 4 个区域相关系数平均值在 0.54~0.58 之间,其中长江相关系数最低,5 年平均只有 0.54。

## 5 降水分级与空演和漏演检验

### 5.1 降水分级检验

以台站资料为基准,按国家气象部门分级标准日降水量  $0.1 \sim 9.9 \text{ mm}$  为小雨,  $10 \sim 24.9 \text{ mm}$  为中雨,  $25 \sim 49.9 \text{ mm}$  为大雨,大于等于  $50 \text{ mm}$  为暴雨。相对误差公式已经在 1.3 节中给出,最优值为 0。

从 2004—2008 年夏季 TRMM 卫星资料小雨、中雨、大雨、暴雨相对误差空间分布图看(图 7), TRMM 卫星资料小雨全国普遍偏高,中雨东部部分地区数值偏大,大雨和暴雨除西部少数地区外,整体上数值小于 1。其中从小雨相对误差空间分布图看,TRMM 测雨资料相对误差总体上大于 2,在辽宁西部、河南北部、长江流域、江南北部、广西东南部都出现了一些高值中心,其中广西东南部最大,达到 16;从中雨相对误差空间分布图看,TRMM 卫星资料相对误差在中国大部分地区数值小于 1,高值中心出现在山东西部、江苏北部、辽宁东南部、广西北部以及长江流域部分地区;从大雨和暴雨相对误

差空间分布图看,TRMM 卫星资料相对误差在中国东部地区总体上小于 1,大雨大于 1 的高值中心在内蒙古、甘肃和青海地区,特别是在青海出现大片大于 1 的高值中心,低值中心出现在西藏东南部、四川西北部、重庆东北部和湖北西部交界地带、陕西北部和山西部分地区,数值为 0.2~0.4。而暴雨大于 1 的高值中心出现在西藏东部地区,低值中心出现在吉林东北部、陕西北部和南部、贵州北部,数值为 0.1~0.2,其他一些比较弱的低值中心分布在东北部分地区、内蒙古北部、山东南部、广东以及沿长江流域部分地区。

由于 TRMM 卫星降水雷达的工作波长为 Ku 波段,波长较短,对衰减敏感,尤其在垂直方向上经过强衰减后,订正值仍偏小,这是大雨、暴雨绝对误差相对百分率较小的主要原因。PR 在水平方向不存在衰减问题,因此对产生小雨、中雨的层云性降水的测量效果较好,但 PR 测量的是近地面雨量信息,而非真实的地面雨量,这就造成了 PR 近地层反演的雨量在沉降过程中被蒸发或大雨滴发生破碎,使得 PR 测得的雨量值比地面雨量站测得的值偏大,这是 TRMM 卫星对小雨、中雨测量值偏大的原因<sup>[23]</sup>。

### 5.2 空演率和漏演率

在这里定义漏演率和空演率:反演无降水,实况出现降水,定义为漏演,用  $LY$  表示漏演次数,  $LS$  表示漏演率,  $Z$  为总天数,则有:  $LS = (LY/Z) \times 100\%$ ;反演有降水,实况无降水,定义为空演,用  $KY$  表示空演次数,  $KS$  表示空演率,则有  $KS =$

$(KY/Z) \times 100\%$ 。

从漏演率空间分布图来看,全国平均漏演率为 10%,高值中心在甘肃、青海,特别是在青海漏演率最高达到 35%,漏演率的低值中心出现在西藏南部和东部、四川西部和东部以及陕西南部地区,数值为 0~5%之间。从空演率空间分布图来看,全国平均

空演率为 14%,总体上空演率都在 0~25%之间,高值中心出现在甘肃和长江中游,最大值在 40%~50%之间,一些较弱的高值中心出现在陕西南部 and 河南西部,空演率的低值中心出现在东北和西北大部分地区、内蒙古北部、云南、贵州、广东、江苏中部和北部地区,数值为 0~10%(图 8)。

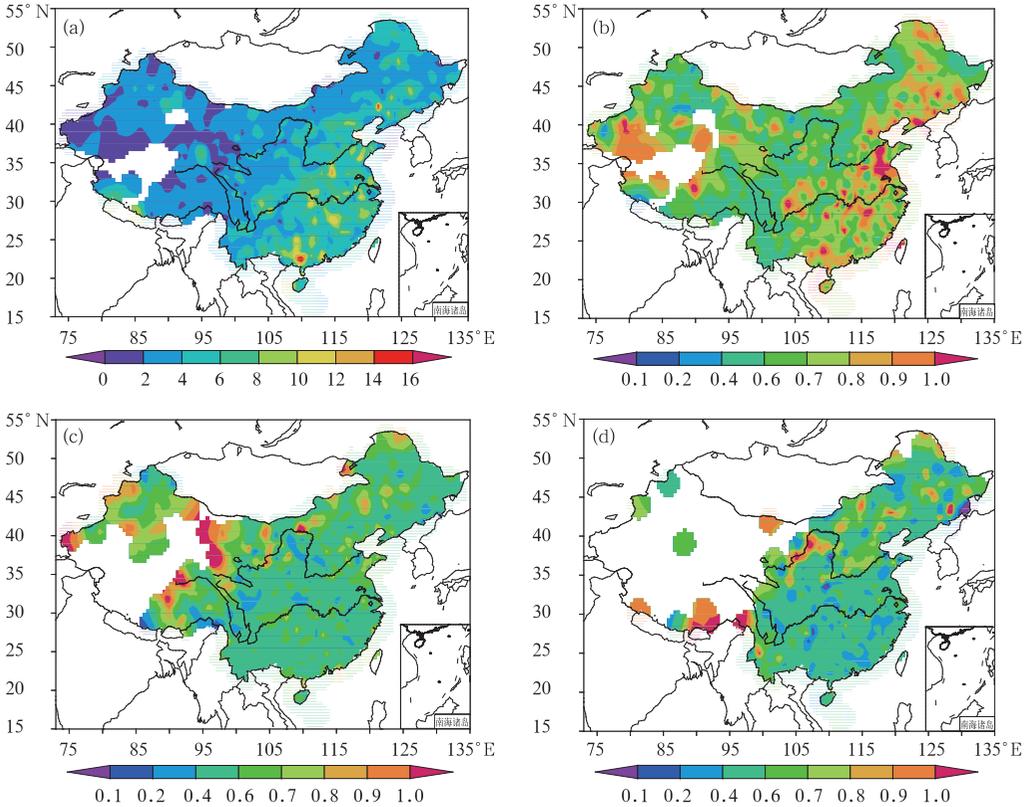


图 7 2004—2008 夏季(6—8 月)TRMM 卫星资料相对误差空间分布

(a) 小雨, (b) 中雨, (c) 大雨, (d) 暴雨

Fig. 7 Spatial distributions of MRE of the TRMM product during the 2004—2008 summer (June—August)

(a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain, (d) torrential rain

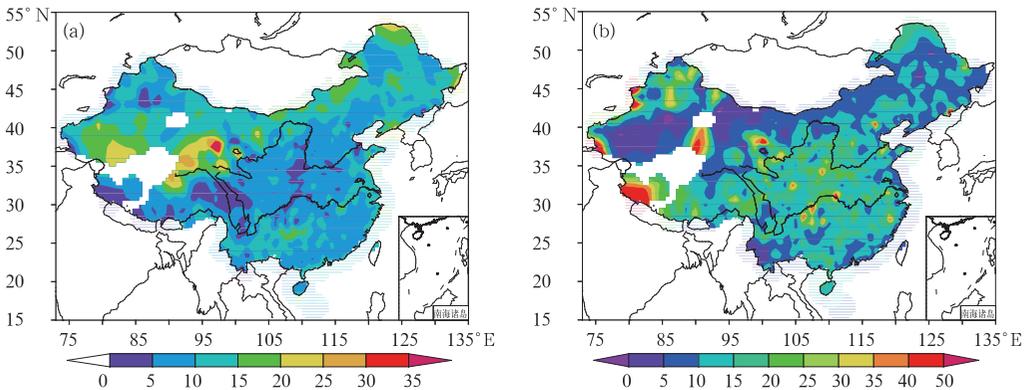


图 8 2004—2008 年夏季(6—8 月)资料: (a)漏演率, (b)空演率(单位: %)

Fig. 8 Rates of missing retrieval (a, unit: %) and vacancy retrieval (b, unit: %) of the TRMM product during the 2004—2008 summer (June—August)

## 6 结 论

本文用 2004—2008 年 6—8 月夏季中国 673 个气象站逐 6 小时降水资料来检验同期 TRMM 测雨产品 3B42 的精度, 结果显示:

(1) TRMM 测雨资料在 2004—2008 年 6—8 月夏季日平均降水和降水频率在分布形上和雨量计非常类似, 相关系数分别能达到 0.79 和 0.84, 卫星数据在大部分区域还是高估了 6—8 月的降水量, 高估值在 1~4 mm 左右; 从 TRMM3B42 测雨资料与雨量计资料日降水相关空间分布看, 中部和东部地区相关性很高, 日降水相关系数能达到 0.6~0.9; 从日降水和逐 6 小时降水平均绝对误差空间分布看, TRMM 测雨资料在华南地区日降水平均绝对误差最大, 长江流域次之。

(2) TRMM 测雨资料在中国地区的降水频率与台站资料相比偏大。例如: 在东北地区, TRMM 卫星资料显示大部分地区降水频率超过 16%, 而台站资料为 10%~16%; 在华北地区, TRMM 卫星资料降水频率为 14%~24%, 而台站资料为 10%~14%; 在长江与黄河之间的地区, TRMM 卫星资料显示的降水频率普遍大于 16%, 而台站资料为 10%~16%; 在华南, TRMM 卫星资料显示降水频率 20%~30%, 而台站资料为 16%~24%。

(3) 从中国 8 个区域 2004—2008 年 6—8 月逐 6 小时降水总量日循环来看, TRMM 测雨资料除了和华南地区 20 时降水量与台站资料有很大的差异, 在其他各地区的日循环都与雨量计资料有很好的一致性。TRMM 卫星资料在黄河下游、淮河、长江和江南北部四区域的日降水平均绝对误差明显要小于内蒙古、华北、江南南部、华南四区域, 黄河下游日降水平均绝对误差最小, 5 年平均为  $0.78 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。江南南部和华南最大, 每年均大于  $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 5 年平均分别为  $1.13$  和  $1.12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。对于 TRMM 测雨资料与雨量计观测的日降水相关系数, 则长江以北 4 个区域要比长江以南的 4 个区域高, 相关系数平均值在 0.60 以上, 其中黄河下游相关系数最高, 5 年平均为 0.68, 长江相关系数最低, 平均值只有 0.54。

(4) 从 2004—2008 夏季 TRMM 测雨资料小雨、中雨、大雨、暴雨相对误差空间分布来看, TRMM 卫星资料小雨全国普遍偏高, 中雨东部部分地区数值偏大, 大雨和暴雨除西部少数地区外, 整体

上数值小于 1, 大雨低值中心出现在西藏东南部、四川西北部、重庆东北部和湖北西部交界地带、陕西北部和山西部分地区, 数值为 0.2~0.4, 而暴雨低值中心出现在吉林东北部、陕西北部和南部、贵州北部, 数值为 0.1~0.2, 其他一些比较弱的低值中心分布在东北部分地区、内蒙古北部、山东南部、广东以及沿长江流域部分地区。

(5) 从漏演率空间分布图来看, 全国平均漏演率为 10%, 高值中心在甘肃、青海, 特别是在青海北部漏演率最高达到 35%, 低值中心出现在西藏南部和东部、四川西部和东部以及陕西南部地区, 数值为 0~5% 之间。从空演率空间分布图来看, 全国平均空演率为 14%, 总体上空演率都在 0~25% 之间, 高值中心出现在甘肃和长江中游最大值在 40%~50% 之间, 一些较弱的高值中心出现在陕西南部和河南西部。

## 参考文献

- [1] Adler R F, Kummerow C, Bolvin D, et al. Status of TRMM monthly estimates of tropical precipitation. Cloud Systems, Hurricanes, and TRMM[J]. Meteor Monogr, Amer. Meteor. Soc., 2003, 51: 223-234.
- [2] Chiu L, Vongsaard J, Morain S, et al. Comparison of TRMM and water division rain rates over New Mexico[J]. Adv Atmos Sci, 2006, 23: 1-13.
- [3] Chiu L, Shin D-B, and Kwaiktowski J. 2006c: Surface rain rate from TRMM algorithms. Earth Science Satellite Remote Sensing I[M]. J. Qu et al., Eds., Springer and Tsinghua University Press, 2006: 317-336.
- [4] Nicholson S E, and Coauthors. 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]. J Appl Meteor, 2003, 42: 1337-1354.
- [5] Nicholson S E, and Coauthors. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa. Part II: Validation of TRMM rainfall products[J]. J Appl Meteor, 2003, 42: 1355-1368.
- [6] Brown J E M. An analysis of the performance of hybrid infrared and microwave satellite precipitation algorithms over India and adjacent regions[J]. Remote Sens Environ, 2006, 101: 63-81.
- [7] Islam M N, and Uyeda H. TRMM observed vertical structure and diurnal variation of precipitation in South Asia. Proc. IGARSS'06, Denver, CO, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2006, 1292-1295.
- [8] Ebert E E. Verifying satellite precipitation estimates for weather and hydrological applications. Proc. First IPWG Workshop, Madrid, Spain, International Precipitation Working Group. 2002,

- [Available online at [http://www.isac.cnr.it/\\_ipwg/meetings/madrid/pdf/ebert.pdf](http://www.isac.cnr.it/_ipwg/meetings/madrid/pdf/ebert.pdf).]
- [9] Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. Comparison of near-realtime precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 47-63.
- [10] Turk F J, Bauer P, Ebert E, et al. Satellite derived precipitation verification activities within the International Precipitation Working Group (IPWG)[C]. Preprints, 14th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, GA. Amer Meteor Soc, 2006:2-15.
- [11] 黄容,程明虎,崔哲虎,等. 用云和辐射传输模式研究对流性降水云微物理及辐射特性[J]. *气象*, 2004,30(3):7-11.
- [12] 卢山,吴乃庚,薛登智. 南海季风槽影响下热带气旋暴雨增幅的研究[J]. *气象*, 2008,34(6):53-59.
- [13] 何会中,程明虎,周康军,等. TRMM/PR 与香港雷达资料对比分析[J]. *气象*, 2002,28(10):32-36.
- [14] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L01704, doi:10.1029/2006GL028129.
- [15] Tao S, Chen L. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China// *Monsoon Meteorology*[M], C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Eds., Oxford University Press, 1987:60-92.
- [16] Zhou T, Yu R, Chen H, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. *J Climate*, 2008, 21:3997-4010.
- [17] Huffman G J, Coauthors. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *J Hydrometeor*, 2007, 8:38-55.
- [18] Dai A, Lin X, Hsu K. The frequency, intensity, and diurnal cycle of precipitation in surface and satellite observations over low- and mid-latitudes[J]. *Climate Dyn*, 2007, 29:727-744.
- [19] Dai A, Giorgi F, and Trenberth K E. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104:6377-6402.
- [20] Furuzawa, Fumie A, Kenji Nakamura. Differences of rainfall estimates over land by Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar (PR) and TRMM Microwave Imager (TMI)-difference on storm height[J]. *J Appl Meteor*, 2005, 44: 367-383.
- [21] Fu Y, Liu G, Wu G, et al. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L05802, doi:10.1029/2005GL024713.
- [22] 王绍武,黄建斌. 近千年中国东部夏季雨带位置的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2006,2(3):117-121.
- [23] 李永涛. TRMM 卫星测雨产品精度检验及其应用[D]. 南京: 河海大学,2008.