

# TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析

嵇涛<sup>1</sup>, 杨华<sup>1</sup>, 刘睿<sup>1,2</sup>, 何太蓉<sup>1</sup>, 吴建峰<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学重庆市 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 400047;

2. 华东师范大学上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

**摘要:**在地形复杂的川渝地区,利用72个气象站点的实测降水数据对TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)卫星降水数据的精度分别在年、季和月尺度上进行验证,并进一步分析了高程和坡度对月尺度验证结果的影响,同时借助主成分分析法,对比了高程与坡度对TRMM 3B43降水数据的影响程度。结果表明:TRMM 3B43估算的年降水量在川渝地区平均偏高5.38%,其中西部高原区估算结果比中东部地区相对精确。TRMM 3B43与气象站点的季尺度降水数据拟合优度较高,但各季拟合优度之间存在差异,其中春季降水的拟合优度高于其余季节。而TRMM 3B43的月数据与站点实测降水数据拟合优度 $R^2=0.7615$ ,相关系数 $R=0.87$ ,表明两者之间相关性显著,数据精度较高;就单个站点而言,大部分站点相关系数较高,误差较小,但叙永站相关系数相对较低,小金、雅安、雷波、盐源以及攀枝花站点数据误差相对较大。高程对数据精度的影响较坡度大,且呈现三次非线性回归的变化特征,随着高程的升高, $R$ 呈现增大的变化趋势, $|Bias(\%)|$ 则呈现出增大—减小—增大的变化趋势;坡度对降水数据精度的影响相对较小且变化规律也较复杂,整体上随坡度变化,TRMM 3B43数据精度受到明显的影响。

**关键词:**TRMM 3B43;降水;复杂地形;川渝地区

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.10.009

中图分类号:F293.35

文献标识码:A

## 1 引言

降水是全球水循环的关键过程之一,准确掌握降水信息对研究不同时空尺度下的大气循环和水循环过程都起着至关重要的作用(田文文等, 2008)。目前降水的观测手段主要包括地面气象站点观测和地面测雨雷达等。气象站点因直接测量降水因而具有较高的精度,但缺点是只能获得相应点的降水数据。基于气象站点降水数据的插值存在着站点数量与站点分布的问题,因此插值精度限制了其应用范围。地面测雨雷达可以间接地获取时空分辨率较高的降水信息,但其理论基础复杂,观测范围也存在较大限制。因此,上述两种降水观测手段很难满足区域应用对降水监测的需要。

近年来,遥感与地理信息系统的发展为降水观测提供了全新的方法与手段(Huffman et al, 1997)。遥感数据具有高时空分辨率、大覆盖范围以及不受地形地貌条件限制的特点,其提供的降水时空分布

信息具有明显的优势。由美、日联合研制并于1997年发射的热带测雨(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)遥感传感器能够覆盖全球 $50^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 的范围,10多年来已经积累了海量的高时空分辨率降水数据,广泛地应用于与降水相关的研究中,包括水文过程模拟(Collischonn et al, 2008; 杨传国等, 2009; 赵志轩等, 2011; Li et al, 2012)、降雨分布的特征分析(谢志清等, 2007; 穆振侠等, 2010; 刘俊峰等, 2011; 李相虎等, 2012)、天气过程分析(胡亮等, 2011; 毛江玉等, 2012)、潜热分析(傅云飞等, 2008)以及流域旱涝分析(李景刚等, 2010; 杜灵通等, 2012)与侵蚀力计算(朱强等, 2011)等。同时,其区域应用的可靠性与精度问题也受到了广泛的关注。

目前,国内外学者在TRMM降水资料验证等方面做了大量工作(Huffman et al, 2007; Islam et al, 2007; 白爱娟, 方建刚等, 2008; 白爱娟, 刘长海等, 2008; 李景刚等, 2010; 刘俊峰等, 2010; 曾红伟等, 2011; 吕洋等, 2013; 齐文文等, 2013; 王超等, 2013;

收稿日期:2014-04;修订日期:2014-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41271411, 40771135);重庆市科委软科学计划项目(CSTC2011CX-rkxA0280);科技基础性工作专项项目(2011FY110400)。

作者简介:嵇涛(1988-),男,江苏扬州人,硕士生,主要从事资源环境遥感与GIS研究,E-mail: taoji\_scholar@126.com。

通讯作者:杨华(1963-),男,重庆石柱人,副教授,主要研究方向为岩土工程、资源环境与GIS,E-mail: csyanghua@263.net。

吴雪娇等, 2013)。大量研究表明, TRMM降水数据与地面气象站点的数据具有良好的一致性; 同时, 随着时间和空间尺度的增大, 其精度更高。但学者们对该卫星产品的精度检验主要集中在下垫面相对较平坦的区域, 而对川渝地区这类下垫面较复杂的区域进行精度检验的研究相对匮乏; 并且大多检验仅考虑数据的区域适用性问题, 缺少对影响数据精度的相关因子进行分析。

基于此, 本文选择下垫面相对复杂的川渝地区为研究区域, 利用该区域内72个气象站的实测降水数据对TRMM 3B43产品年、季和月3个时间尺度下的空间分布进行分析, 验证数据在该区域的可靠性和代表性, 并进一步分析高程与坡度对数据精度的影响, 为TRMM卫星数据在西南地势与气候复杂区域的可靠性与适用性评估提供科学依据, 进而为更精确地应用该卫星数据对水文、气象等模拟及预报工作奠定坚实的基础。

## 2 研究区域、资料和方法

### 2.1 研究区域概况

川渝地区地处中国西南部, 位于 $97^{\circ}22' \sim 110^{\circ}12'E$ 、 $26^{\circ}02' \sim 34^{\circ}18'N$ 之间, 总面积约为56.74万 $km^2$ 。地势西高东低, 其中山地面积约占50%, 高原、丘陵其次, 平原仅为2.6%(图1)。受地貌和季风环流的影响, 该区域气候复杂多样、空间差异大。多年平均降水量在1000 mm左右, 但年内降水分配极不均匀, 存在水热同期的特点, 降水主要集中在夏季, 6-8月的降水量占全年降水量的45.54%(图2)。气象站点相对稀少, 且分布不均匀, 如图1所示。

### 2.2 研究数据

本文所用数据包括: 地面气象站点实测降水数据、TRMM 3B43数据和DEM数据。①降水观测数据来自中国气象数据共享服务中心, 选取2000-2011年川渝地区72个国家基准与基本站观测数据, 对卫星降水数据进行检验。尽管降水数据可以通过气象站观测、卫星遥感、大气模式模拟等获取, 但是地面气象站点观测的降水数据仍然是最准确的(Xie et al, 1997; New et al, 2001), 因此在本文中将该实测数据作为“真值”。②TRMM 3B43数据从<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>免费下载, 其时间分辨率为1个月, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 选取的时段与降水实测数据相同。③DEM数据为ASTER GDEM, 其

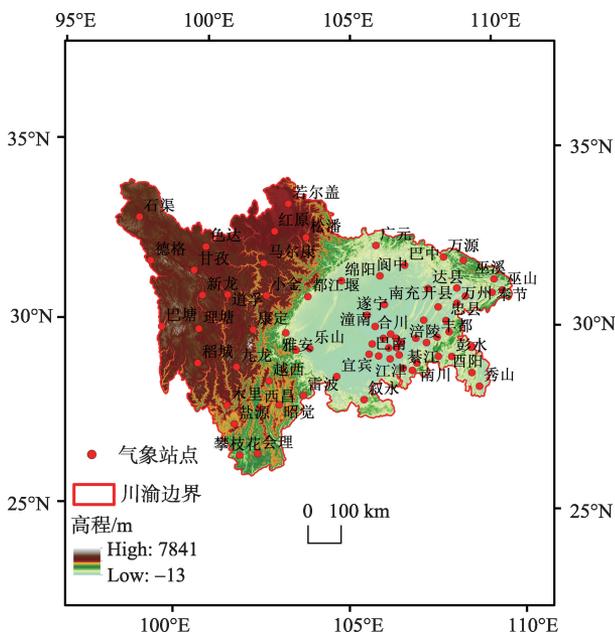


图1 川渝地区概况以及72个气象站点的分布

Fig.1 Sichuan-Chongqing region and the distribution of the 72 meteorological stations

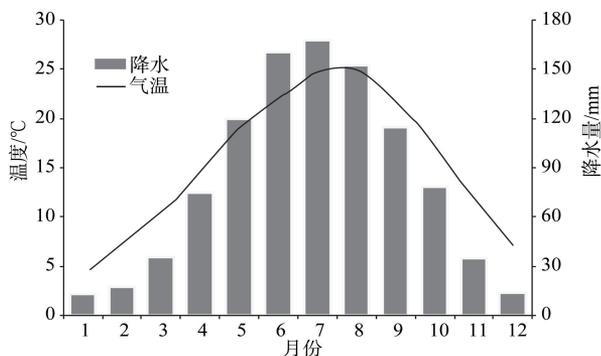


图2 川渝地区各月平均降水量和气温

Fig.2 Monthly average precipitation and temperature of Sichuan-Chongqing region

空间分辨率为1弧度秒(约30 m), 该数据是由美国航空局(NASA)与日本国际经贸商业部(METI)合作共同开发完成的。数据覆盖范围为 $83^{\circ}N \sim 83^{\circ}S$ 之间的所有陆地区域, 同时数据具有较高的可靠性和精度。

### 2.3 研究方法

#### (1) 基于相关系数和相对误差的精度检验

根据研究区地面气象站点2000-2011年降水实测数据, 及其对应格点的TRMM 3B43数据计算相关系数 $R$ 和相对误差 $Bias$ (式(1)-(2)), 利用这些指标检验TRMM降水数据的精度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

式中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ,  $n$  为样本容量,  $x_i$ 、 $y_i$  分别为气象站点实测数据和 TRMM 3B43 降水数据。 $R$  取值范围[0~1], 越接近于 1, 数据一致性越好。 $Bias$  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, 则说明数据越精确(下文提到的  $|Bias(\%)|$  表示的是绝对误差, 是  $Bias$  的绝对值, 也能反映 TRMM 降水数据与站点实测降水值在数值上的偏离程度)。

(2) 综合考虑研究区复杂的地形条件对降水产品的影响, 分别以高程(*Elevation*)和坡度(*Slope*)为自变量, 相关系数与相对误差绝对值为因变量进行回归分析, 得出高程和坡度对相关系数及绝对误差的影响, 最后采用主成分分析法得出川渝地区高程和坡度对 TRMM 3B43 降水数据的影响程度。

### 3 数据准确度检验

#### 3.1 年降水量检验

TRMM 3B43 降水数据对川渝地区所有站点年降水量的拟合优度较高,  $R^2$  达到 0.675, 并通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。研究区内 72 个站点平均的年降水量相对误差( $Bias$ )为 5.38%。同时, 卫星数据的年降水量大多数都高于气象站点的实测结果(表 1)。其中, 研究区中东部降水较多的区域相对误差更大, 平均最大的达到 46.75%; 而西部地区降水较少, 相对误差也较小, 平均最小的仅为 -0.55%。总体而言, TRMM 3B43 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。

#### 3.2 季降水量检验

对于川渝地区这样的中亚热带湿润季风气候区, 存在着雨热同期的特点, 因而需要通过实测各季降水数据对 TRMM 3B43 各季节降水数据进行精度验证。将整个研究区 2000-2011 年的 TRMM 3B43 降水数据按季节(春季: 3-5 月; 夏季: 6-8 月; 秋季: 9-11 月; 冬季: 12-翌年 2 月)进行计算, 并与 72 个地面

气象站点对应同期的实测降水数据进行线性拟合(图 3)。结果表明春季拟合优度最高( $R^2=0.703$ ), 其次为秋季、冬季, 夏季的拟合优度最低( $R^2=0.517$ )。4 个季节的拟合优度( $R^2$ )都大于 0.5, 说明 TRMM 3B43 降水数据能够较好地反映季节降水的特点。考虑到川渝地区降水主要集中在夏季, 且夏季降水受季风强弱和迟早的影响, 因而不稳定, 这就导致卫星在夏季估算时容易出现较大误差, 从而造成夏季降水量检验精度不高。

#### 3.3 月降水量检验

以 2000-2011 年研究区内 72 个气象站点的实测月降水数据作为自变量, 气象站点所对应的 TRMM 3B43 月降水数据作为因变量, 进行一元线性回归拟合(图 4)。经检验, TRMM 3B43 与气象站点实测数据拟合优度  $R^2=0.7615$ , 相关系数  $R=0.87$ , 并在  $\alpha=0.01$  置信度水平上通过检验, 这说明 TRMM 3B43 降水数据与地面气象站点实测数据之间具有显著的线性相关性。

#### 3.4 数据个体精度检验

从月、季及年尺度降水的检验结果可知, TRMM 3B43 降水数据在整体上精度较高, 但整体检验难免会掩盖少数站点数据与对应 TRMM 3B43 降水数据之间的差异, 尤其是降水作为复杂的天气现象, 本身要受到很多气象和地理要素如地形、经纬度、海拔、坡度、坡向、大气环流、海陆位置等的影响, 并表现出时空上的不连续性和高度非线性特征。因此, 仅仅对降水数据进行总体精度评估是不够的, 还需要对其各个站点进行验证, 尤其是在月尺度上。

以 72 个气象站点 2000-2011 年实测月降水数据为自变量, 以气象站点对应的 TRMM 3B43 降水数据为因变量, 作一元线性回归分析, 得到 TRMM 3B43 数据与气象站点之间的相关系数  $R$ (表 2)。从 72 个站点中选取 16 个站点(站点的选择主要考虑到空间分布相对均匀和地形特征两方面因素)进行散点分析(图 5)。

由表 2 可知: ①大部分气象站点的月降水实测数据与 TRMM 3B43 的月降水数据之间的相关性较好( $R>0.8$ ), 进一步论证了 TRMM 月降水数据精度较高, 在整个川渝地区具有普遍的适用性; ②气象站点实测数据与 TRMM 月降水数据之间的相关系数表现出不均匀性, 其中叙永站的相关系数最小, 仅为 0.701, 明显比研究区其他站点低, 说明该站点

表1 2000-2011年72个气象站点年均降水量与TRMM 3B43对应像元年平均降水量对比

Tab.1 Comparison of average annual precipitation between TRMM 3B43 and observed data from the 72 meteorological stations, 2000-2011

气象站	气象站年降水量/mm	TRMM年降水量/mm	Bias/%	气象站	气象站年降水量/mm	TRMM年降水量/mm	Bias/%
城口	1276.5	1269.5	-0.55	德格	601.0	580.6	-3.39
开县	1279.8	1360.9	6.34	甘孜	629.5	640.9	1.81
云阳	1164.2	1316.5	13.08	色达	663.5	678.0	2.20
巫溪	1112.6	1289.3	15.88	道孚	585.5	695.9	18.87
奉节	1070.6	1295.8	21.03	马尔康	766.3	835.6	9.05
巫山	1018.2	1244.3	22.21	红原	705.0	715.0	1.42
潼南	949.9	1006.1	5.92	小金	631.6	862.9	36.63
垫江	1123.2	1177.2	4.81	松潘	704.1	750.3	6.56
梁平	1154.5	1222.5	5.90	都江堰	1047.4	805.2	-23.13
万州	1147.7	1325.0	15.45	绵阳	836.8	840.9	0.50
忠县	1130.7	1233.7	9.12	巴塘	488.1	564.3	15.61
石柱	1025.2	1285.9	25.43	新龙	649.6	643.0	-1.00
大足	980.2	1004.1	2.43	理塘	765.1	634.0	-17.13
荣昌	957.6	986.2	2.99	雅安	1618.9	1127.5	-30.36
永川	923.5	988.6	7.05	稻城	663.2	657.5	-0.86
万盛	1237.7	1023.0	-17.35	康定	865.1	882.8	2.04
铜梁	1036.2	995.1	-3.97	峨眉山	1545.8	1321.1	-14.54
北碚	1099.7	1047.5	-4.75	乐山	1147.1	1288.1	12.30
合川	1095.4	1047.5	-4.37	木里	761.1	919.5	20.82
渝北	1091.0	1050.1	-3.75	九龙	926.8	892.1	-3.74
璧山	1069.0	1019.2	-4.66	越西	1074.8	1216.3	13.17
沙坪坝	1067.8	1050.1	-1.66	昭觉	1009.7	1044.5	3.45
江津	940.2	1028.1	9.35	雷波	809.6	1188.1	46.75
巴南	1015.4	1046.1	3.02	宜宾	914.1	1025.7	12.21
南川	1024.5	1050.0	2.48	盐源	740.1	1029.5	39.10
长寿	1061.4	1101.6	3.79	西昌	965.1	1090.3	12.98
涪陵	1041.2	1091.7	4.85	攀枝花	815.2	1171.8	43.74
丰都	970.5	1162.6	19.79	会理	1088.4	1181.1	8.52
武隆	991.4	1186.5	19.68	广元	907.9	856.4	-5.67
黔江	1140.4	1280.3	12.27	万源	1360.1	1268.1	-6.77
彭水	1180.1	1248.5	5.79	阆中	1062.1	1026.9	-3.31
綦江	964.8	1028.2	6.57	巴中	1150.7	1112.3	-3.33
酉阳	1302.2	1270.8	-2.42	达县	1261.8	1336.2	5.90
秀山	1318.8	1283.6	-2.68	遂宁	932.3	1003.4	7.62
石渠	563.1	516.7	-8.25	南充	1006.4	1021.1	1.46
若尔盖	627.2	621.9	-0.83	叙永	1078.3	949.3	-11.96

实测的降水与TRMM月降水之间的相关性较差。这可能与该站点所处的局部地势地貌有关,叙永地形起伏明显,海拔为247~1902 m,但该站点的高程为377.5 m,这就导致该站点实测降水数据不能全面代表站点周围的降水状况。

相关系数能够反映站点实测降水数据与TRMM月降水数据之间相关性的 大小,却容易掩盖两种降水数据之间实际的误差程度,这也说明研究相对误差的重要意义。因此,利用式(2)计算各站点的相对误差(表3)。

由表3可知:①在72个实测气象站点中,城口、万盛、铜梁等25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。开县、云阳、巫溪等

47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,卫星降水数据存在一定程度上的高估。②在72个实测气象站点中,有46个气象站点绝对误差在10%以内,说明多数气象站点的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降水数据的准确性。③各实测气象站点之间的相对误差具有不均匀性,差异明显。其中城口、若尔盖、绵阳、新龙、稻城这5个气象站点的相对误差 $\leq \pm 1\%$ ,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。而小金、雅安、雷波、盐源以及攀枝花的相对误差分别为36.85%、-30.32%、46.83%、39.13%和43.82%,说明这5个站点的TRMM月降水数据和气象站点实测降水之间相对

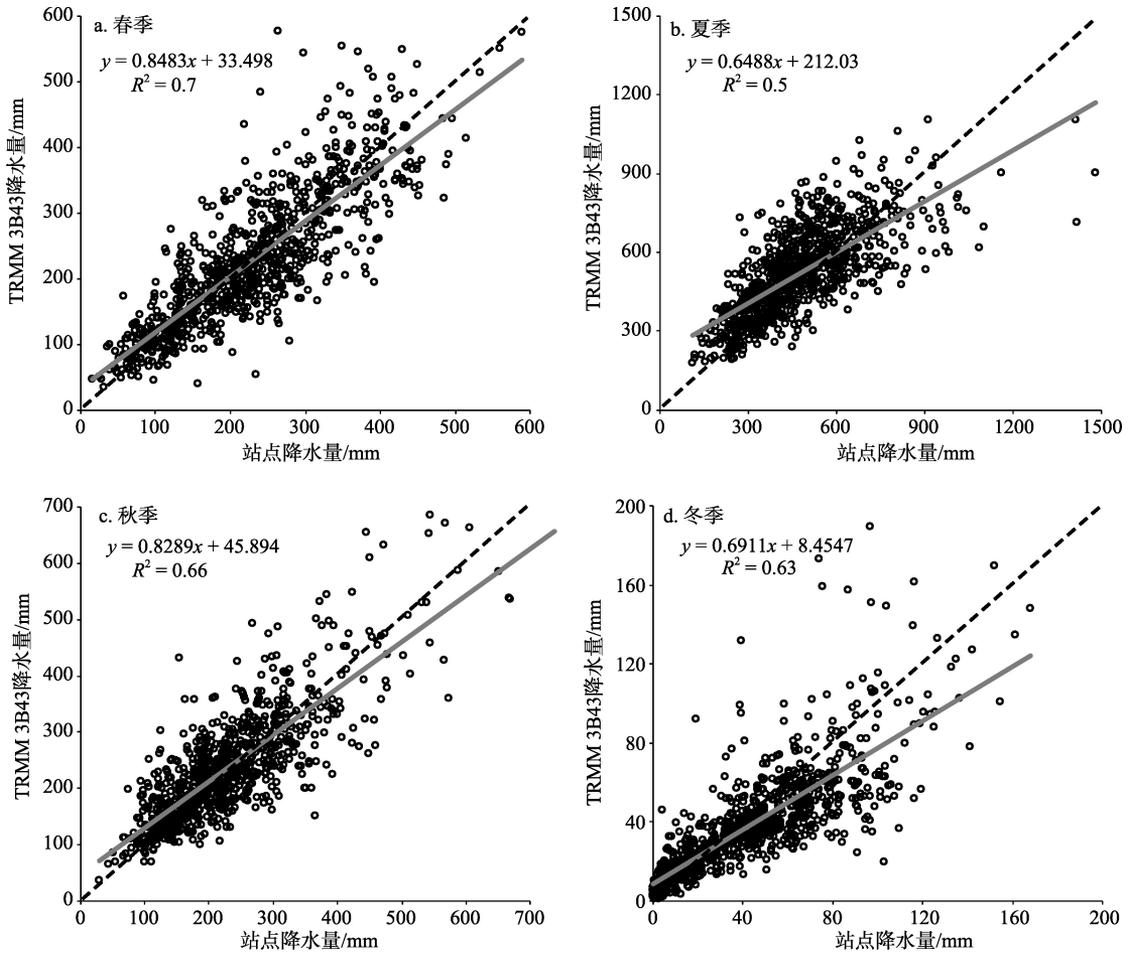


图3 2000-2011年TRMM 3B43与地面观测站各季降水量散点图

Fig.3 Scatter diagram of seasonal precipitation between TRMM 3B43 and corresponding meteorological stations data, 2000-2011

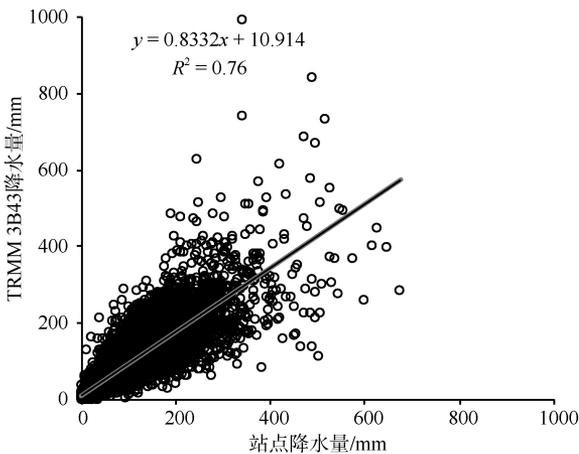
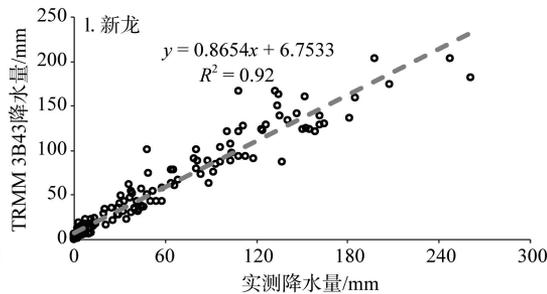
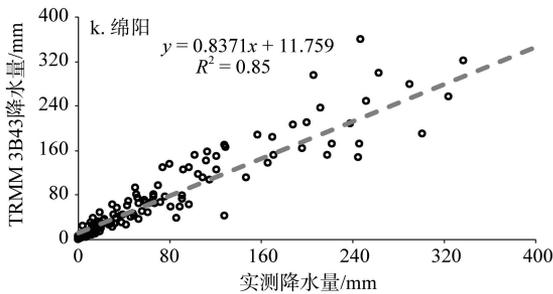
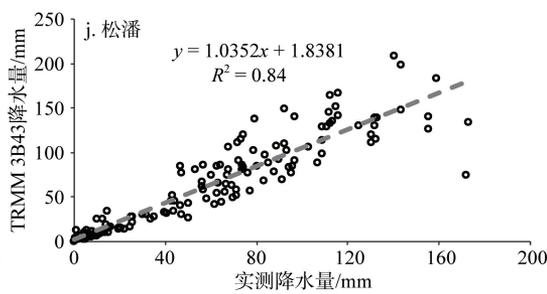
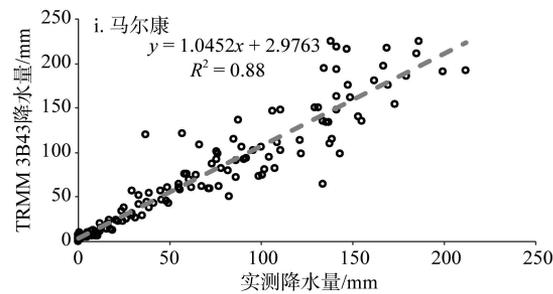
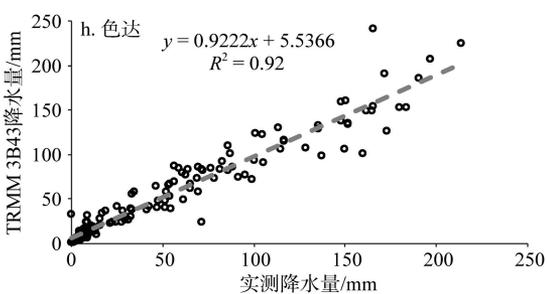
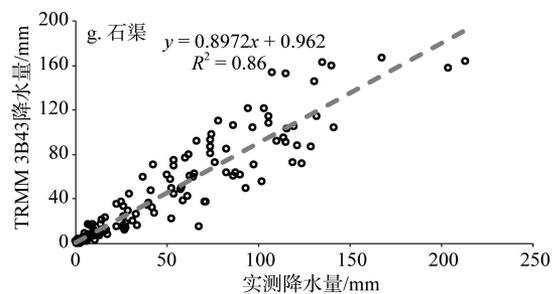
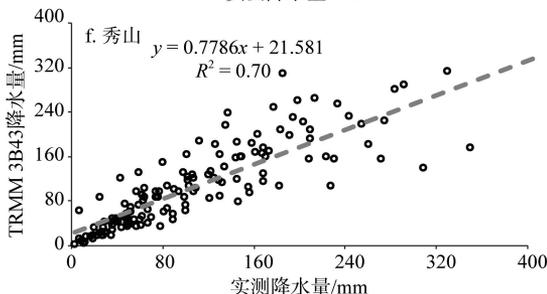
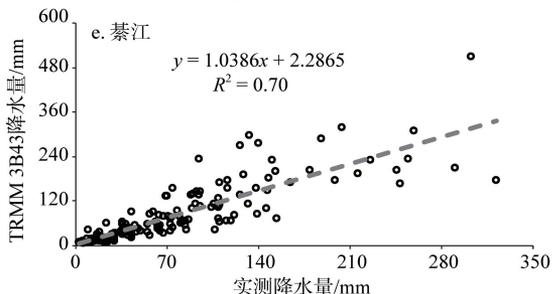
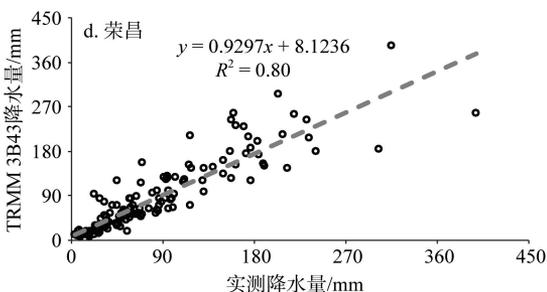
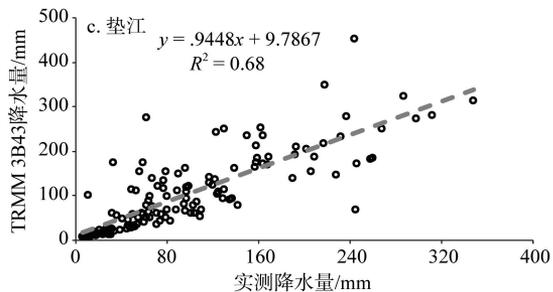
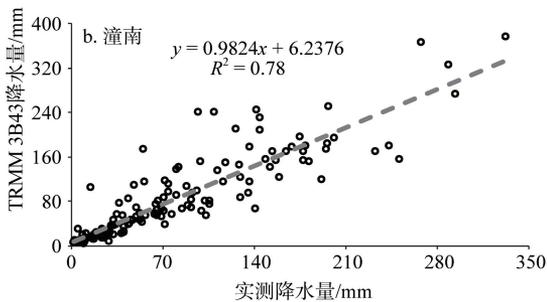
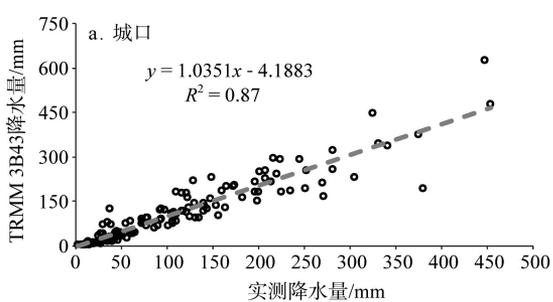


图4 2000-2011年TRMM 3B43与地面观测站月降水量散点图

Fig.4 Scatter diagram of monthly precipitation between TRMM 3B43 and corresponding meteorological stations data, 2000-2011

误差明显,而对应的相关系数却分别为0.898、0.917、0.891、0.948及0.904,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。

综合以上精度检验结果可知:总体上,川渝地区TRMM月降水数据和气象站点实测降水之间具有良好的一致性,研究区范围内的相关系数R达到了0.89左右,叙永站相对于其他站点的相关系数较低,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,降水绝对误差都在10%以内,但也存在误差较大的站点,尤其是小金、雅安、雷波、盐源以及攀枝花这5个站点,绝对误差达到了30%以上。



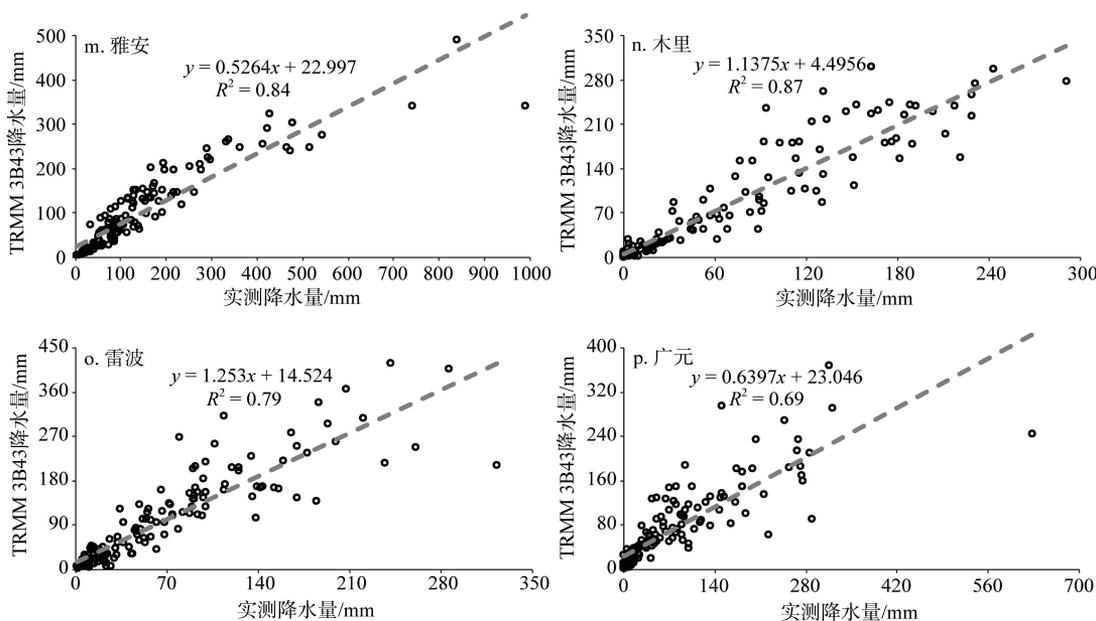


图5 川渝地区部分站点2000-2011年TRMM 3B43与实测月降水量散点图

Fig.5 Scatter diagram of monthly precipitation between TRMM 3B43 and observed corresponding meteorological station data in Sichuan-Chongqing region, 2000-2011

表2 2000-2011年川渝地区基于月平均降水量的TRMM 3B43数据与站点实测值的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient of average monthly precipitations between TRMM 3B43 and corresponding meteorological station data in Sichuan-Chongqing region, 2000-2011

站点	R	站点	R	站点	R	站点	R
城口	0.936	合川	0.882	德格	0.972	木里	0.934
开县	0.846	渝北	0.861	甘孜	0.960	九龙	0.978
云阳	0.869	璧山	0.904	色达	0.962	越西	0.942
巫溪	0.911	沙坪坝	0.877	道孚	0.967	昭觉	0.911
奉节	0.884	江津	0.831	马尔康	0.942	雷波	0.891
巫山	0.856	巴南	0.844	红原	0.843	宜宾	0.898
潼南	0.888	南川	0.834	小金	0.898	盐源	0.948
垫江	0.828	长寿	0.823	松潘	0.918	西昌	0.948
梁平	0.925	涪陵	0.811	都江堰	0.859	攀枝花	0.904
万州	0.828	丰都	0.800	绵阳	0.925	会理	0.961
忠县	0.869	武隆	0.842	巴塘	0.920	广元	0.835
石柱	0.807	黔江	0.844	新龙	0.962	万源	0.942
大足	0.871	彭水	0.803	理塘	0.973	阆中	0.914
荣昌	0.897	綦江	0.839	雅安	0.917	巴中	0.893
永川	0.850	酉阳	0.909	稻城	0.968	达县	0.931
万盛	0.869	秀山	0.856	康定	0.940	遂宁	0.845
铜梁	0.848	石渠	0.928	峨眉山	0.907	南充	0.865
北碚	0.872	若尔盖	0.932	乐山	0.853	叙永	0.701

表3 2000-2011年川渝地区TRMM 3B43与各地面实测站点月降水的相对误差

Tab.3 Bias of monthly precipitation between TRMM 3B43 and observed corresponding meteorological station data in Sichuan-Chongqing region, 2000-2011

站点	Bias/%	站点	Bias/%	站点	Bias/%	站点	Bias/%
城口	-0.43	合川	-4.21	德格	-3.36	木里	20.84
开县	6.47	渝北	-3.62	甘孜	1.92	九龙	-3.73
云阳	13.21	璧山	-4.52	色达	2.24	越西	13.30
巫溪	16.00	沙坪坝	-1.53	道孚	18.93	昭觉	3.50
奉节	21.17	江津	9.49	马尔康	9.18	雷波	46.83
巫山	22.33	巴南	3.15	红原	1.53	宜宾	12.31
潼南	6.12	南川	2.60	小金	36.85	盐源	39.13
垫江	4.93	长寿	3.94	松潘	6.65	西昌	13.01
梁平	6.01	涪陵	4.97	都江堰	-23.05	攀枝花	43.82
万州	15.56	丰都	19.92	绵阳	0.57	会理	8.55
忠县	9.23	武隆	19.91	巴塘	15.63	广元	-5.57
石柱	26.20	黔江	12.54	新龙	-0.99	万源	-6.65
大足	2.59	彭水	5.96	理塘	-17.12	阆中	-3.19
荣昌	3.15	綦江	6.71	雅安	-30.32	巴中	-3.19
永川	7.22	酉阳	-2.30	稻城	-0.85	达县	6.02
万盛	-17.25	秀山	-2.50	康定	2.07	遂宁	7.79
铜梁	-3.80	石渠	-8.23	峨眉山	-14.49	南充	1.61
北碚	-4.59	若尔盖	-0.75	乐山	12.37	叙永	-11.83

### 4 高程和坡度对 TRMM 3B43 数据的影响

川渝地区地势西高东低,地貌类型复杂,既有山地、高原,又有丘陵和平原,高程落差较大(图1)。考虑到地形因素对降水数据也有一定程度的影响,以下将分析高程及坡度对 TRMM 3B43 降水数据精度的影响。

#### 4.1 高程对 TRMM 3B43 数据的影响

从高程的空间分布来看(图1),总体上从西部的石渠—德格—巴塘一带的向东部递减的规律,其中石渠一线的高程最大,中部四川盆地的海拔最低,东部巫山—万盛一线高程又有略微升高。

以研究区站点所在网格的海拔高程为自变量,分别以 TRMM 3B43 降水数据与地面气象站点实测数据之间的相关系数  $R$  和绝对误差  $|Bias(\%)|$  为因变量,进行三次非线性回归分析(表4,图6)。

从表4可知,高程与相关系数  $R$  的相关性显著,通过了  $\alpha=0.01$  的置信度检验,拟合优度  $R^2$  也达到了0.462,呈现出较强的三次关系特征。从图6则可以明显看出,随着海拔的升高,相关系数也在不断增大,并且增大速度有由快变慢的趋势。高程与绝对误差  $|Bias(\%)|$  的相关系数  $R$  仅为0.45,但通过了  $\alpha=$

0.01 的相关性检验,相关关系显著。图6显示两者之间的相关关系比较复杂,随着海拔的升高,绝对误差呈现出增大—减小—增大的趋势,显示了波动变化的特征。

从图6a、6b的对比分析可知,高程在0~1500 m及4000 m以上的相关系数  $R$  增大,绝对误差  $|Bias(\%)|$  也呈增大趋势;而高程在1500~4000 m时,  $R$  缓慢增加,绝对误差却不断减小。其原因可能是:海拔在0~1500 m的站点多集中在四川盆地东部(包括重庆地区),而四川盆地东部干旱、暴雨以及洪涝等极端天气现象发生的频率较高,尤其东部地区暴雨降水量对全年降水的贡献率达到15%以上;同时由于 TRMM 卫星的不连续测量,易导致难以完全准确获取极端气候现象的降水数据,因而两者之间的偏差较大。海拔在1500~4000 m的站点多集中在西部山区,相应的极端天气现象出现频次较少,因而降水的偏差较小。海拔大于4000 m的站点处于一、二阶梯过渡带的青藏高原边缘地区,站点海拔高度为2000 m左右,而周边海拔高度为4000 m左右,高程落差都达到1000 m以上,周边高大的地形阻碍了水汽的输送,使得这些地区实际获得的水汽比其他相同海拔的地方要少得多,导致这些地区降水误差明显。综上所述,TRMM 3B43 降水与地面气象站点实测降水受海拔影响较为明显。

表4 川渝地区高程与相关系数、 $|Bias(\%)|$ 的回归模型检验及参数估算值

Tab.4 Model summary and parameter estimates of elevation,  $R$  and  $|Bias(\%)|$  in Sichuan-Chongqing region

方程	回归模型检验					参数估算值			
	$R^2$	$F$	$df1$	$df2$	$Sig.$	Constant	$b1$	$b2$	$b3$
三次方	0.462	19.439	3	68	.000	0.836	8.667E-5	-2.536E-8	2.673E-12
三次方	0.202	5.739	3	68	.001	-0.745	0.034	-1.588E-5	1.911E-9

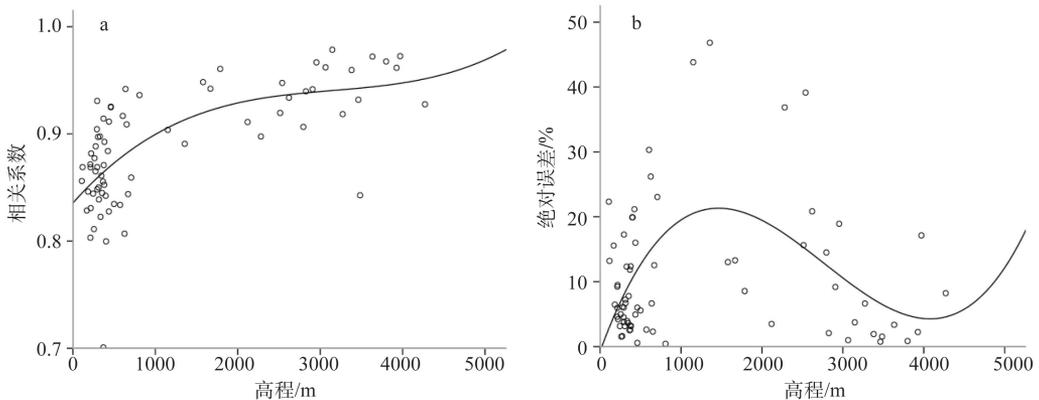


图6 川渝地区高程与相关系数  $R$ 、绝对误差  $|Bias(\%)|$  的散点图

Fig.6 Scatter diagram of Elevation,  $R$  and  $|Bias(\%)|$  in Sichuan-Chongqing region

### 4.2 坡度对 TRMM 3B43 数据的影响

坡度的空间分布呈现出西高东低的趋势,其中西部高原区的坡度呈现出高值,四川盆地底部的坡度较缓,巫山—万盛一线的坡度较大。总体而言,坡度以四川盆地的盆底为极小值中心向外增大(图7)。

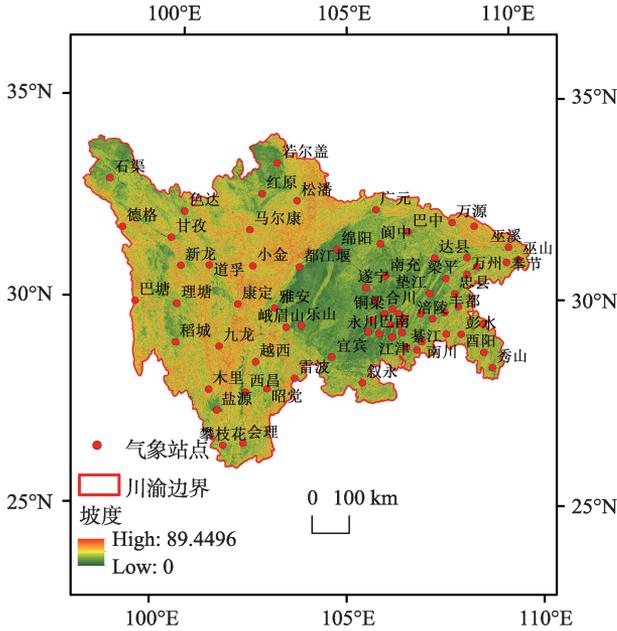


图7 川渝地区坡度空间分布

Fig.7 Distribution of slope in Sichuan-Chongqing region

以研究区站点所在网格的坡度为自变量,分别以 TRMM 3B43 降水数据与地面气象站点实测数据之间的相关系数  $R$  和绝对误差  $|Bias(\%)|$  为因变量,进行回归拟合分析(表5)。

从表5可知,坡度与相关系数  $R$  的相关性显著,通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验,拟合优度  $R^2$  为 0.133,三次关系特征不明显。由图8可知:随着坡度的增大,相关系数  $R$  先有小幅减小,然后再增大,最后又呈现出小幅较小的态势。坡度与  $|Bias(\%)|$  的相关系数  $R$  仅为 0.16,但通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验,相关关系较为显著。图8中反映了两者之间的相关关系呈现出反比例特征,即随着坡度的增大,绝对误差呈现出减小的趋势,并且坡度在  $0\sim 10^\circ$  之间,  $|Bias(\%)|$  减小幅度非常明显;坡度大于  $10^\circ$  之后的绝对误差减幅明显放缓。总体而言,坡度的变化,对 TRMM 3B43 数据的精度影响明显。

### 4.3 主成分分析

为反映坡度与高程对数据精度影响的程度,用  $R$ 、 $|Bias(\%)|$ 、 $Elevation$  与  $Slope$  来表示 TRMM 3B43 数据的精度,将4个变量进行标准化处理,采用主成分分析法,得到两个主成分  $F1, F2$ , 累计贡献率分别为 47.383%、72.429%,特征值分别为 1.895、1.002,其中  $F1=0.443R + 0.008|Bias(\%)| - 0.468Elevation +$

表5 川渝地区坡度与相关系数、 $|Bias(\%)|$ 的回归模型检验及参数估算值

Tab.5 Model summary and parameter estimates of slope,  $R$  and  $|Bias(\%)|$  in Sichuan-Chongqing region

方程	回归模型检验					参数估算值			
	$R^2$	$F$	$df1$	$df2$	$Sig.$	Constant	$b1$	$b2$	$b3$
三次方	0.133	3.485	3	68	.020	0.909	-0.009	0.001	-8.630E-6
反函数	0.080	6.076	1	70	.016	8.886	6.756		

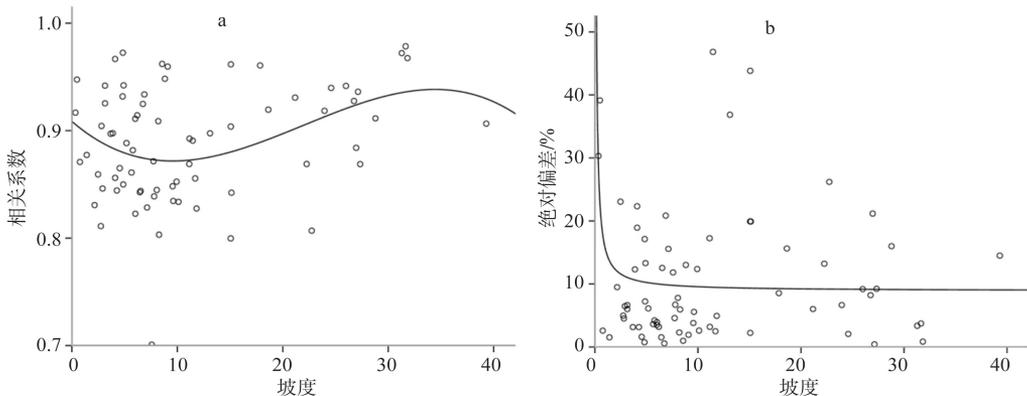


图8 川渝地区坡度与相关系数  $R$ 、 $|Bias(\%)|$  的散点图

Fig.8 Scatter diagram of Slope,  $R$  and  $|Bias(\%)|$  in Sichuan-Chongqing region

$0.335Slope$ ,  $F^2 = -0.054R + 0.996|Bias(\%)| + 0.01Elevation + 0.052Slope$ 。由主成分分析的累计贡献率可以看出: $Elevation$ 和 $Slope$ 对TRMM 3B43降水的贡献程度分别为19.265%、8.263%,因此,可以认为在川渝地区海拔高程对数据精度的影响要大于坡度。

## 5 结论

利用川渝地区的72个气象站点实测降水数据对TRMM 3B43的降水数据在年、季和月尺度上进行了精度检验,并对影响降水数据精度的高程和坡度进行分析,得到如下结论:

(1) TRMM 3B43的降水数据在川渝地区具有较高的精度,在年、季和月时间尺度上,TRMM和实测数据的相关系数 $R$ 较高,普遍达到了0.8以上;同时相对误差( $Bias$ )控制得也较好。TRMM 3B43降水数据在川渝地区展现出良好的适用性。

(2) 川渝地区72个站点平均年降水量相对误差( $Bias$ )为5.38%,卫星数据的年降水量普遍高于气象站点的实测结果,而且整个区域呈现出中东部误差大,西部地区误差较小的特征。研究区季降水数据的拟合优度( $R^2$ )都大于0.5,表明TRMM 3B43降水数据能够较好地反映季节降水的特点,但各季之间仍存在差异,其中春季降水的拟合优度优于其他季节。而TRMM 3B43的月数据与站点实测月降水数据的拟合优度 $R^2=0.7615$ ,相关系数 $R=0.87$ ,说明两者之间相关性显著,月降水数据精度较高。

(3) 对72个气象站点的TRMM 3B43月降水数据进行逐一精度验证,发现大部分气象站点的月降水实测数据与TRMM 3B43的月降水数据之间的相关性较好( $R>0.8$ ),但个别站点的 $R$ 值偏低,其中叙永站 $R=0.701$ ,明显低于区域内的其他站点;各站点的相对误差( $Bias$ )与相关系数 $R$ 值的趋势相似,大部分站点的误差较小,其中有46个气象站点绝对误差在10%以内,但小金、雅安、雷波、盐源以及攀枝花站点的误差较大,TRMM 3B43的月降水数据与站点实测降水差异明显。

(4)  $R$ 、 $|Bias(\%)|$ 、高程与坡度之间的关系进行比较研究发现,高程对数据精度的影响较坡度大,且呈现三次非线性回归的变化特征。随着高程的升高, $R$ 呈现出增大的变化趋势, $|Bias(\%)|$ 呈现出增大

—减小—增大的变化趋势;坡度对数据精度的影响相对较小且变化规律也较复杂,随着坡度的增大, $R$ 呈现出波动变化趋势;而坡度与 $|Bias(\%)|$ 的相关关系呈现出反比例特征,即随着坡度的增大,绝对误差呈现出减小的趋势,并且在整体上表现为随着坡度变化,对TRMM 3B43数据的精度影响明显。

## 参考文献(References)

- 白爱娟,方建刚,张科翔. 2008. TRMM 卫星资料对陕西及周边地区夏季降水的探测. 灾害学, 23(2): 41-45. [Bai A J, Fang J G, Zhang K X. 2008. Summer rainfall in Shaanxi and its neighborhood regions observed by TRMM satellite. Journal of Catastrophology, 23(2): 41-45.]
- 白爱娟,刘长海,刘晓东. 2008. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化. 地球物理学报, 51(3): 704-714. [Bai A J, Liu C H, Liu X D. 2008. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis. Chinese Journal of Geophysics, 51(3): 704-714.]
- 杜灵通,田庆久,黄彦,等. 2012. 基于TRMM数据的山东省干旱监测及其可靠性检验. 农业工程学报, 28(2): 121-126. [Du L T, Tian Q J, Huang Y, et al. 2012. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong Province. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28(2): 121-126.]
- 傅云飞,刘奇,自勇,等. 2008. 基于TRMM卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析. 高原山地气象研究, 28(1): 8-18. [Fu Y F, Liu Q, Zi Y, et al. 2008. Summer precipitation and latent heating over the Tibetan Plateau based on TRMM measurements. Plateau and Mountain Meteorology Research, 28(1): 8-18.]
- 胡亮,李耀东,杨松,等. 2011. 东亚热带与副热带季风区对流降水和层云降水季节变化特征对比分析研究. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1182-1191. [Hu L, Li Y D, Yang S, et al. 2011. Seasonal variability in tropical and subtropical convective and stratiform precipitation of the East Asian monsoon. Science China: Earth Sciences, 41(8): 1182-1191.]
- 李景刚,李纪人,黄诗峰,等. 2010. 基于TRMM数据和区域综合Z指数的洞庭湖流域近10年旱涝特征分析. 资源科学, 32(6): 1103-1110. [Li J G, Li J R, Huang S F, et al. 2010. Characteristics of the recent 10-year flood/drought over the Dongting Lake Basin based on TRMM precipitation data and regional integrated Z-index. Resources Science, 32(6): 1103-1110.]
- 李相虎,张奇,邵敏. 2012. 基于TRMM数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价. 地理科学进展, 31(9):

- 1164-1170. [Li X H, Zhang Q, Shao M. 2012. Spatio-temporal distribution of precipitation in Poyang Lake Basin based on TRMM Data and precision evaluation. *Pogress in Geography*, 31(9): 1164-1170.]
- 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 2010. 多卫星遥感降水数据精度评价. *水科学进展*, 21(3): 343-348. [Liu J F, Cheng R S, Han C T, et al. 2010. Evaluation TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products. *Advances in Water Science*, 21(3): 343-348.]
- 刘俊峰, 陈仁升, 卿文武, 等. 2011. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征. *水科学进展*, 22(4): 447-454. [Liu J F, Chen R S, Qing W W, et al. 2011. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous regions using TRMM data. *Advances in Water Science*, 22(4): 447-454.]
- 吕洋, 杨胜天, 蔡明勇, 等. 2013. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析. *自然资源学报*, 28(8): 1414-1425. [Lv Y, Yang S T, Cai M Y, et al. 2013. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Natural Resources*, 28(8): 1414-1425.]
- 毛江玉, 吴国雄. 2012. 基于 TRMM 卫星资料揭示的亚洲季风区夏季降水日变化. *中国科学: 地球科学*, 42(4): 564-576. [Mao J Y, Wu G X. 2012. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data. *Science China: Earth Sciences*, 42(4): 564-576.]
- 穆振侠, 姜卉芳. 2010. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水研究. *干旱区资源与环境*, 24(7): 115-119. [Mu Z X, Jiang H F. 2010. Research of precipitation in the Western Tianshan Mountain based on TRMM/TMI. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24(7): 115-119.]
- 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 2013. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征. *地理科学*, 33(8): 999-1005. [Qi W W, Zhang B P, Pang Y, et al. 2013. TRMM-Data-Based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 33(8): 999-1005.]
- 田文文, 宋星原, 廖为民. 2008. 集对分析在雷达定量测量降雨中的应用研究. *水电能源科学*, 26(2): 20-23. [Tian W W, Wang X Y, Liao W M. 2008. Application of Set Pair Analysis (SPA) in quantitative precipitation estimation by radar. *Water Resources and Power*, 26(2): 20-23.]
- 王超, 赵传燕. 2013. TRMM 多卫星资料在黑河上游降水时空特征研究中的应用. *自然资源学报*, 28(5): 862-872. [Wang C, Zhao C Y. 2013. A study of the spatio-temporal distribution of precipitation in upper reaches of Heihe River of China using TRMM data. *Journal of Natural Resources*, 28(5): 862-872.]
- 吴雪娇, 杨梅学, 吴洪波, 等. 2013. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用. *冰川冻土*, 35(2): 310-319. [Wu X J, Yang M X, Wu H B, et al. 2013. Verifying and applying the TRMM TMPA in Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(2): 310-319.]
- 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 2007. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. *地理学报*, 62(7): 717-727. [Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al. 2007. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 62(7): 717-727.]
- 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 2009. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程. *水科学进展*, 20(4): 461-466. [Yang C G, Yu Z B, Lin Z H, et al. 2009. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products. *Advances in Water Science*, 20(4): 461-466.]
- 曾红伟, 李丽娟. 2011. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验. *地理学报*, 66(7): 994-1004. [Zeng H W, Li L J. 2011. Accuracy validation of TRMM 3B43 data in Lancang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 66(7): 994-1004.]
- 赵志轩, 严登华, 王浩, 等. 2011. 基于 WEP 模型和 TRMM\_PR 的唐家山堰塞湖入湖径流预报. *水利学报*, 42(7): 848-856, 861. [Zhao Z X, Yan D H, Wang H, et al. 2011. Predicting inflows to Tangjiashan Barrier Lake based on WEP model and TRMM precipitation data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 42(7): 848-856, 861.]
- 朱强, 陈秀万, 樊启祥, 等. 2011. 基于 TRMM 的降雨侵蚀力计算方法. *中国科学: 技术科学*, 41(11): 1483-1492. [Zhu Q, Chen X W, Fan Q X, et al. 2011. A new procedure to estimate the rainfall erosivity factor based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data. *Science China: Technological Sciences*, 54(9): 2437-2445.]
- Collischonn B, Collischonn W, Tucci C E M. 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon Basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360(1): 207-216.
- Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1): 5-20.
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1): 38-55.
- Islam M N, Uyeda H. 2007. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh. *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 264-276.
- Li X H, Zhang Q, Xu C Y. 2012. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang Catchment,

Poyang Lake Basin. *Journal of Hydrology*, 426: 28-38.

New M, Todd M, Hulme M, et al. 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15): 1889-1922.

Xie P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(11): 2539-2558.

## Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region

JI Tao<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>1,2</sup>, HE Tairong<sup>1</sup>, WU Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecology and Sustainability, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Precipitation data is often needed for hydrological, meteorological, ecological, and other environmental and geographic applications. Currently there are mainly two sources of precipitation estimates: observation at meteorological stations and remote sensing data. However, a large number of studies has demonstrated that measurements at conventional meteorological stations are point data and they cannot reflect the spatial variation of precipitation effectively, especially in areas of more complex terrain. Remote sensing technology, on the other hand, is able to produce reasonably high resolution gridded precipitation fields. Precipitation products obtained by satellites have been widely used in previous studies in the world. The Sichuan-Chongqing region is a typical area with complicated terrain and climate characteristics. The meteorological stations are very unevenly distributed in this region, especially in the western area. Precipitation estimation using satellite data provides potential alternatives to precipitation measurements in this region. In this study, the performance of the TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 3B43 monthly precipitation data over 2000-2011 was evaluated in the Sichuan-Chongqing region with rainfall records from 72 meteorological stations at different time intervals. The influence of elevation and slope on the verification result was analyzed at the monthly scale. Finally, principal component analysis was used to compare the effects of elevation and slope on the accuracy of TRMM 3B43 precipitation estimates. The results show that: (1) Regional average annual precipitation estimated by TRMM 3B43 is higher than the observed data from meteorological stations by 5.38%, and the eastern area estimation results are less accurate than the western plateau. Goodness of fit of seasonal precipitation between TRMM 3B43 estimates and observed data is high, but varies between the seasons—the goodness of fit of spring precipitation is higher than other seasons. Correlation between observations at the 72 stations and TRMM 3B43 estimates is high and shows little numerical biases in the whole study area at the monthly scale. (2) For individual stations, at most stations the correlation coefficients are reasonably high and the estimation biases are small, but the correlation coefficient at the Xuyong Station is comparatively low and the estimation biases at the Xiaojin Station, Yaan Station, Leibo Station, Yanyuan Station, and Panzhihua Station are comparatively high. (3) Compared with slope, elevation has greater influence on the accuracy of TRMM 3B43 estimates, which can be characterized by a cubic nonlinear relationship. With the increase of *Elevation*, *R* shows an increasing trend and  $|Bias(\%)|$  increases-decreases-increases. (4) The influence of slope on the accuracy of TRMM 3B43 estimates is more complicated. Generally speaking, slope significantly affects the accuracy of TRMM 3B43 estimates

**Key words:** TRMM 3B43; precipitation; complex terrain; Sichuan-Chongqing region