

红河流域 TRMM 卫星降水数据精度评价

张月圆, 李运刚, 季漩, 罗贤

(云南大学 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091)

摘要: 利用红河流域及周边地区 45 个气象站点 1998 - 2015 年实测降水数据, 在不同时空尺度上对 TRMM 3B43V7 卫星降水数据进行精度评价, 并分析高程、坡度和坡向对降水数据精度的影响。结果表明: 在年尺度上, TRMM 降水数据与站点实测降水数据拟合优度 R^2 为 0.75, 整体上 TRMM 降水数据比站点实测降水数据偏高 7.73%, 月尺度上, TRMM 降水数据与站点实测降水数据拟合优度 R^2 为 0.84, 两者之间相关性显著, 季尺度上, 春季降水拟合优度 ($R^2 = 0.77$) 高于其余 3 个季节, 冬季降水拟合优度最差 ($R^2 = 0.64$); 流域尺度上, 降水重心移动轨迹表明 TRMM 降水数据基本能反映降水的空间分布及演变过程, 站点尺度上, 各站点的相关系数均大于 0.84, 相对偏差较大的站点主要分布在河谷和盆地地区; TRMM 降水数据在海拔大于 1 000 m、坡度小于 2° 以及东南方向上的精度较高; 主成分分析方法表明坡度和坡向对 TRMM 降水数据精度的影响大于高程。

关键词: TRMM 3B43; 降水; 时空尺度; 演变规律; 高程; 坡度和坡向; 精度评价; 红河流域

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)02-0001-08

Accuracy evaluation of TRMM satellite precipitation product over the Red River basin

ZHANG Yueyuan, LI Yungang, JI Xuan, LUO Xian

(Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The precision of TRMM 3B43V7 satellite precipitation data were evaluated at different temporal and spatial scales based on the observed data from 45 meteorological stations in the Red River Basin and surrounding areas from 1998 to 2015. The impact of elevation, slope angle and slope aspect on accuracy of TRMM precipitation data were also analyzed. The results showed that: at the annual scale, the goodness of fit between TRMM estimates and the measured precipitation data was 0.75, and the former was 7.73% higher than the latter overall. Meanwhile, at the monthly scale, the goodness of fit between the two data was 0.84, the significant correlation was found between them. At the seasonal scale, the goodness of fit of precipitation ($R^2 = 0.77$) in spring was higher than that in other three seasons, and goodness of fit for winter precipitation was the weakest ($R^2 = 0.64$). At the catchment scale, precipitation focus movement showed that TRMM precipitation data can basically reflect the spatial distribution and evolution process of precipitation. At the site scale, the correlation coefficients of all stations were higher than 0.84 and stations with relatively large bias were mainly distributed in valley and basin areas. The accuracy of TRMM data was relatively high over the region where elevation was higher than 1000 m, slope was less than 2° and in the southeast direction. Principal component analysis showed that the influences of slope and aspect on the accuracy of TRMM data were greater than that of elevation.

Key words: TRMM 3B43; precipitation; temporal and spatial scales; evaluation of precipitation; elevation; slope and aspect; accuracy evaluation; the Red River Basin

收稿日期: 2016-12-17; 修回日期: 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301099、41561063); 云南大学研究生科研创新基金项目(2012FD007)

作者简介: 张月圆(1992-), 女, 河南平顶山人, 在读硕士研究生, 主要从事遥感水文方面的研究。

通讯作者: 李运刚(1983-), 男, 云南大理人, 博士, 副研究员, 主要从事流域水文方面的研究。

1 研究背景

降水是参与全球水循环的关键过程之一,是全球地表物质交换、生态系统等过程的基础组成部分,准确掌握降水信息有助于研究不同时空尺度下的大气循环和水循环过程^[1-2]。降水通常也是各水文、气象等模型的重要输入参数,其精度决定着模型模拟结果的可靠程度^[3]。因此,快速获取高时空分辨率的降水数据,对于水循环、水文过程的模拟及准确的水文预报等具有重要意义^[4]。

目前降水的获取方式主要有气象站、降雨雷达和卫星测雨3种^[5]。近年来,基于卫星的遥感降水数据具有时空分辨率高、覆盖范围广、不受地形条件限制等优点,已成为降水数据的主要来源^[6-7]。热带降水测量卫星(Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM)于1997成功发射,是由美国国家航空航天局(NASA)和日本国家空间发展局(JAXA)共同研制的第一颗专门用于定量测量热带和亚热带地区降水的气象卫星^[8]。自发射以来,已积累了海量的覆盖大陆和海洋的高时空分辨率降水数据^[9]。

目前,TRMM降水数据在水文气象领域得到广泛的应用,国内外学者开展了许多TRMM降水数据的验证和评价工作。主要包括:(1)TRMM数据与气象站数据的比较。Islam等^[10]利用孟加拉国31个气象站点降水数据对TRMM 3B42日降水产品进行验证,表明TRMM反演降水值达到了观测值的96%,能够很好地反映降水状况;刘俊峰等^[11]针对中国大陆50°N以南地区,利用650个气象站点降水数据分析了TMPA 3B42在日、月、年尺度上的数据精度,结果表明时间尺度越大,TRMM数据的精度越高。(2)TRMM数据与其他遥感降水数据的比较。Simons等^[12]在越南红河流域利用地面站点数据对TRMM 3B43V7、CHIRPSv1.8、CMORPH 3种降水产品进行对比评估,结果表明TRMM数据精度最高;陈举等^[13]对比TRMM 3A25数据、CAMP数据和观测数据在南海地区的差异,发现TRMM数据能更好地体现降水的时空变化特征。(3)TRMM不同版本数据的比较。Fensterseifer等^[14]在巴西南部评估了TRMM 3B42产品V6与V7版本的精度,发现相对于V6来说,V7产品优势主要体现在对极端降水事件的定量识别上;刘军志等^[15]在鄱阳湖借助气象站点数据评估了TRMM 3B42数据V6和V7产品,结果表明两者在日尺度上的精度均较差,在月和年尺度上精度均较高。

以上研究表明:TRMM降水数据在各类卫星遥感降水数据中精度相对较高,与站点观测数据具有较高的一致性,而且V7版本数据精度较V6版本进一步提高。然而目前TRMM降水数据的验证评估研究中还存在以下问题:(1)检验尺度多为大区域或全国,掩盖了较小空间尺度上的数据差异;(2)检验多集中在下垫面相对平坦的区域,而对下垫面复杂区域检验不足;(3)大多数检验仅考虑数据的区域适用性问题,缺少对数据精度影响因子的分析。

因此本文以中国境内的红河流域作为研究区,选取45个气象站点1998-2015年降水实测数据,在不同时空尺度上对同期的TRMM 3B43降水数据进行精度评价,并分析高程、坡度和坡向对数据精度的影响。旨在丰富TRMM降水数据在地形和气候复杂区域的适用性评估研究,进而为开展TRMM降水数据的空间降尺度和水文模拟应用提供基础。

2 研究区概况

红河流域位于中国西南地区,地理位置为22°21'~25°36'N和100°07'~105°42'E,干流全长677 km,流域面积约 7.6×10^4 km²。流域地势由西北向东南倾斜,分布着近似南北走向的巨大山脉(哀牢山、无量山)和河谷(李仙江、元江),形成南北纵列的高山与深谷相间的地形。由于境内地形复杂、岭谷交错,加之夏季又同时受印度季风和东亚季风的影响,导致流域降水量时空分异复杂^[16]。流域年降水量从700~3 000 mm不等,大部分地区介于1 000~1 600 mm。降水空间分布由下游向上游递减,从河谷向山地递增。降水年内分配不均,5-10月为雨季,降水量可达年降水量的85%以上,11月-次年4月为干季,降水量不及15%。研究区45个气象站点与高程分布如图1所示。

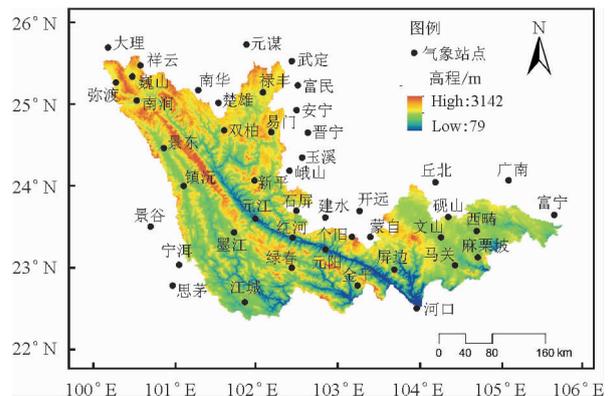


图1 红河流域高程及气象站点分布图

3 数据和研究方法

3.1 数据

数据主要包括气象站点实测降水数据、TRMM 3B43V7 数据和 DEM 数据。

(1) 红河流域 45 个气象站点 1998 - 2015 年降水观测数据来源于云南省气象局。尽管可以通过气象站观测、卫星遥感和大气模式模拟等方式获取降水数据^[17],但气象站点观测的降水数据最为准确^[18],因此本研究将站点实测数据作为“真值”。

(2) TRMM 3B43V7 卫星遥感降水数据来自于美国国家航空航天局(NASA)网站,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 个月,时段为 1998 年 1 月至 2015 年 12 月。

(3) DEM (Digital elevation model) 数据来自 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据库,由美国国家航空航天局(NASA)和国家空间信息情报局(NGA)共同合作完成,空间分辨率为 90m,重采样得到 1km 分辨率的高程数据。

3.2 研究方法

(1) 相关系数和相对偏差。相关系数(R)用于分析 TRMM 3B43 降水数据与站点实测降水数据之间的相关性,相对偏差($Bias$)则用于评价两者在数值上的偏离程度。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

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

式中: n 为样本容量; G_i 、 S_i 分别为气象站点实测降水数据和 TRMM 3B43 降水数据,mm。 R 的取值范围为 $[0, 1]$,越接近 1,数据一致性越好; $Bias$ 越接近 0,说明 TRMM 数据精度越高, $Bias$ 若大于或小于 0,则表明 TRMM 数据的高估或低估。

(2) 降水重心。降水重心定义为研究区域内某时刻降水分布在空间平面上达到力矩平衡的点,用来反映降水在整个空间上的分布情况^[19]。本文采用降水重心来定量评价 TRMM 数据对降水空间分布的刻画能力。计算公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i};$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3)$$

式中: n 为研究区域的基本单元数,对于实测数据而言为站点总数,对于 TRMM 数据而言为网格总数;各基本单元的地理位置为 (x_i, y_i) ,对实测数据而言为站点坐标,对 TRMM 数据而言为网格中心点坐标; P_i 为相应基本单元的降水量,mm。

(3) 综合考虑研究区复杂地形条件对 TRMM 降水产品精度的影响,分别以各站点高程、坡度和坡向为自变量,月尺度相关系数 R_{g-s} 、相对偏差的绝对值 $|Bias|$ 为因变量进行回归分析,得出高程、坡度和坡向变化与 R_{g-s} 及 $|Bias|$ 关系,采用主成分分析法探讨高程、坡度和坡向对 TRMM 降水数据精度的影响程度。

4 结果与分析

4.1 时间序列精度评估

红河流域所有气象站点 TRMM 数据和实测数据年降水量和月降水量的拟合如图 2 所示。年降水量的拟合优度 $R^2 = 0.745$,相关系数为 0.863,通过了 0.01 水平上的显著性检验;研究区 45 个站点年降水量的相对偏差为 7.73%,TRMM 年降水量整体上高于气象站点的实测结果。TRMM 月降水量与气象站实测的月降水量拟合优度 $R^2 = 0.841$,相关系数为 0.917,并通过了置信度 100% 的检验,说明 TRMM 数据与站点观测数据之间具有显著的线性相关关系。

红河流域属于典型的亚热带季风气候,具有明显的干湿季特征,且降水季节分布不均,夏季降水多于冬季,因此有必要对 TRMM 降水产品进行季节尺度上的精度评价。对 45 个地面气象站点 18 a 的降水数据分别按春季(3 - 5 月)、夏季(6 - 8 月)、秋季(9 - 11 月)、冬季(12 - 翌年 2 月)进行统计,并与同期的 TRMM 降水数据进行线性拟合,结果如图 3 所示,表 1 为不同季节 TRMM 数据与实测数据的误差统计结果。从图 3 和表 1 可以看出:4 个季节的拟合优度 R^2 都大于 0.6,均通过了 0.01 水平上的显著性检验,说明 TRMM 降水数据能够较好地反映季节降水的特征。其中,春季拟合优度最高 $R^2 = 0.77$,其次为夏季和秋季,冬季拟合优度最差;另外,从相对偏差来看,冬季的相对偏差最大,这与 TRMM 反演冬季降水本身的缺陷有关^[20],冬季地表温度太低进一步影响微波降水反演。

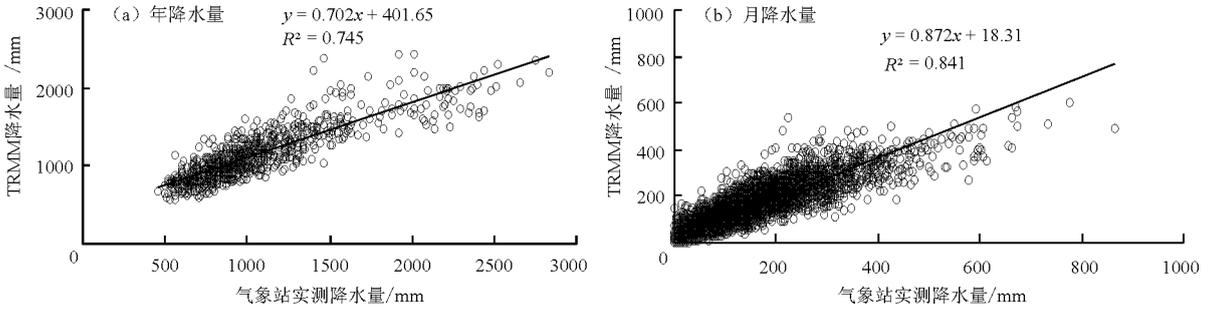


图2 1998 - 2015年 TRMM 3B43与地面观测站年降水量和月降水量散点图

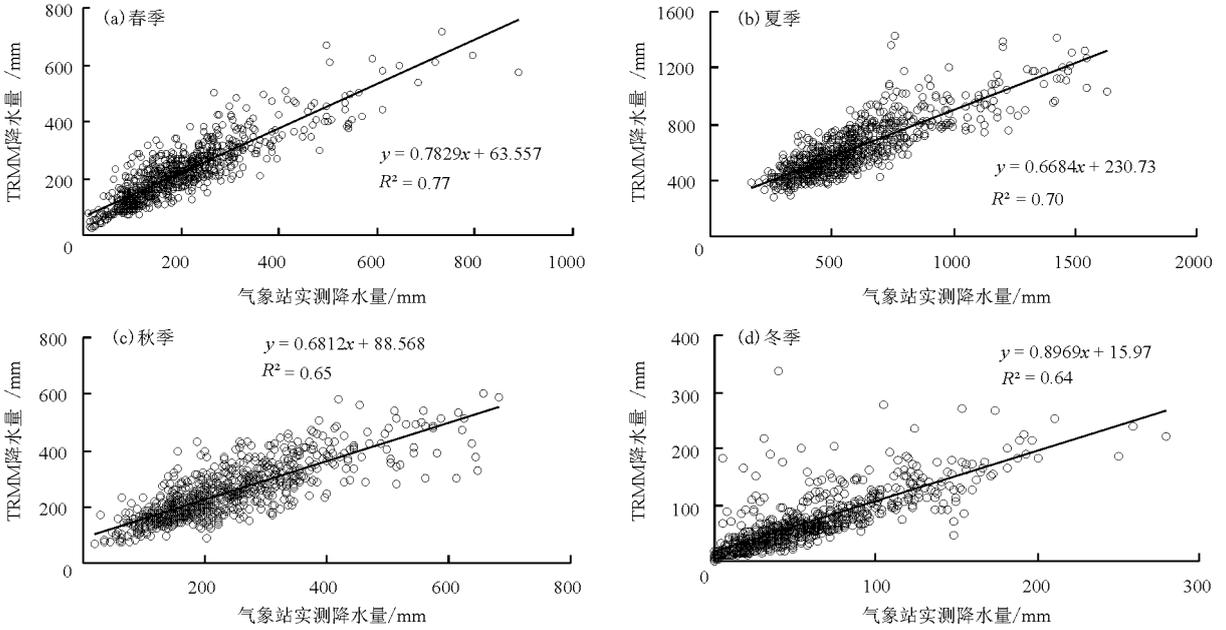


图3 1998 - 2015年 TRMM 3B43与地面观测站季降水量散点图

表1 不同季节 TRMM 3B43 与实测降水误差统计

季节	R^2	R	$Bias$
春季	0.77	0.876	0.107
夏季	0.70	0.839	0.063
秋季	0.65	0.807	0.063
冬季	0.64	0.797	0.180

4.2 降水空间分布评估

4.2.1 流域尺度降水空间分布 降水重心移动轨迹可以揭示降水分布变迁状况,若 TRMM 数据和气象站点数据的降水重心分布及变动规律相似,则可以验证两者在时间和空间上的一致性^[21]。利用 1998 - 2015 年 45 个站点实测降水数据和 TRMM 数据,根据公式(3)分别计算两种数据的年降水重心位置,获得 1998 - 2015 年降水重心的变迁轨迹和迁移方向(图 4 和表 2)。从多年平均来看,实测数据和 TRMM 数据的降水重心分别为(102.52°E, 23.83°N)和(102.43°E, 23.59°N),TRMM 数据的降

水重心在气象站点数据的西南方向 27.4 km 处,两种数据的降水重心位置较为接近。由图 4 和表 2 可知,大多数年份站点数据和 TRMM 数据降水重心的迁移方向完全一致;2009 - 2010 年、2010 - 2011 年,两者重心迁移方向表现为纬向上一致;1998 - 1999 年表现为经向上一致;只有 1999 - 2000 年和 2000 - 2001 年两者迁移方向不同。以上研究结果表明 TRMM 降水数据基本能反映降水的空间分布变化情况。

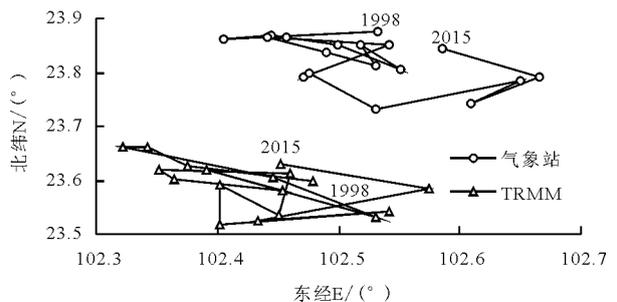


图4 年降水重心位置及变迁路线

4.2.2 单个站点 TRMM 数据精度检验 降水作为所有气象要素中最活跃的变量,本身要受到很多气象和地理要素的影响,并表现出时空上的不连续性和高度非线性特征^[9]。尽管在流域尺度上 TRMM 降水数据能反映降水的空间分布情况,但整体检验

难免会掩盖某些站点数据与对应 TRMM 降水数据之间的差异,因此仅对数据进行总体检验还不够全面,还需要对单个站点进行检验,尤其是在月尺度上。研究区 45 个气象站点 TRMM 3B43 数据与实测数据之间的相关系数 R_{g-s} 和相对偏差 $Bias$ 见表 3。

表 2 降水重心迁移方向对比

年份变化	降水重心迁移方向		年份变化	降水重心迁移方向	
	站点数据	TRMM 数据		站点数据	TRMM 数据
1998 - 1999 年	西	西北	2007 - 2008 年	东南	东南
1999 - 2000 年	东	西北	2008 - 2009 年	西南	西南
2000 - 2001 年	东	西	2009 - 2010 年	东北	西北
2001 - 2002 年	东南	东南	2010 - 2011 年	东南	南
2002 - 2003 年	东南	东南	2011 - 2012 年	东北	东北
2003 - 2004 年	西北	西北	2012 - 2013 年	西南	西南
2004 - 2005 年	东南	东南	2013 - 2014 年	东北	东北
2005 - 2006 年	西北	西北	2014 - 2015 年	西北	西北
2006 - 2007 年	西北	西北			

表 3 1998 - 2015 年 TRMM 3B43 数据与站点实测值的相关系数和相对偏差

站名	R_{g-s}	$Bias/\%$	站名	R_{g-s}	$Bias/\%$	站名	R_{g-s}	$Bias/\%$
金平	0.939	-21.64	石屏	0.923	3.14	文山	0.921	20.96
绿春	0.930	-20.02	双柏	0.945	3.64	安宁	0.902	21.62
江城	0.984	-10.68	南华	0.932	4.84	开远	0.921	22.25
武定	0.898	-9.17	玉溪	0.942	5.69	红河	0.917	22.77
墨江	0.944	-9.13	景谷	0.933	6.01	祥云	0.957	24.73
丘北	0.907	-6.87	思茅	0.964	6.79	大理	0.942	25.39
个旧	0.944	-6.40	峨山	0.927	7.74	元江	0.932	27.98
镇沅	0.915	-5.99	新平	0.923	7.84	弥渡	0.949	28.14
禄丰	0.947	-5.51	易门	0.938	12.45	元谋	0.953	29.25
屏边	0.914	-3.86	砚山	0.921	14.23	马关	0.915	29.45
宁洱	0.942	-2.79	建水	0.890	14.47	巍山	0.931	29.99
景东	0.944	-0.86	广南	0.954	15.54	元阳	0.893	33.69
楚雄	0.967	0.04	蒙自	0.962	17.99	南涧	0.931	33.91
富民	0.941	0.35	富宁	0.923	18.45	麻栗坡	0.939	39.26
西畴	0.936	1.56	河口	0.902	20.46	晋宁	0.842	44.01

由表 3 可知:(1)91% 以上站点的相关系数 R_{g-s} 都大于 0.9,其中江城站的相关系数 R_{g-s} 高达 0.98。(2)45 个气象站点中,晋宁、建水、元阳、武定 4 个站点的相关系数 R_{g-s} 小于 0.9,但均达到了 0.84,全都通过了 0.01 水平上的显著性检验。说明 TRMM 数据与气象站观测数据之间存在显著的线性关系,

TRMM 降水数据精度较高。

相关系数能够反映站点实测降水数据与 TRMM 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,因此对两者进行相对偏差的研究,从而客观反映 TRMM 数据和站点实测数据之间的降水差异大小。

由表3可知:(1)在45个气象站点中,金平、绿春、江城等12个站点的相对偏差小于0,说明TRMM月降水小于实测站点降水,卫星降水数据存在一定的低估;楚雄、富民、西畴等33个站点的相对偏差大于0,表示TRMM月降水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45个气象站点中,有27个站点的 $|Bias|$ 在20%以内,说明多数站点的TRMM月降水数据与实测站点降水数据在数值上差异不大,一定程度上能够反映出TRMM数据的准确性。(3)各气象站点的相对偏差在数值和空间上存在着不同程度上的差异。在数值上,景东、楚雄、富民这3个站点的相对偏差小于 $\pm 1\%$,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。元阳、南涧、麻栗坡、晋宁的相对偏差分别为33.69%、33.91%、39.26%、44.01%,都在30%以上,说明这4个站点的TRMM月降水数据和气象站点实测降水之间相对偏差明显;在空间上,相对偏差较大的站点主要分布在河谷和盆地地区。

4.3 空间要素对TRMM降水数据精度的影响

红河流域地处我国西南地区,境内地形复杂,岭谷交错,高程落差较大,考虑到降水在一定程度上受地形因素的影响,以下将分析高程、坡度和坡向对TRMM 3B43降水数据精度的影响。

4.3.1 高程对TRMM降水数据精度的影响 红河流域高程范围为79~3142m,地势西北高、东南低,流域内分布着近似南北走向的山脉和河谷,下垫面复杂。以气象站点高程为自变量,分别以TRMM数据与站点实测数据之间的相关系数 R_{g-s} 和相对偏差的绝对值 $|Bias|$ 为因变量,进行多项式回归分析,回归结果如图5。由图5(a)可知,高程与相关系数 R_{g-s} 的相关性不强, R 仅为0.291,未通过0.01水平上的显著性检验。从拟合曲线可以看出:当高程小于1000m时,相关系数 R_{g-s} 先逐渐增加,之后基本

保持不变;由图5(b)可知,高程与 $|Bias|$ 的相关系数 $R = 0.43$,通过了0.01水平上的显著性检验。从拟合曲线可以看出:当高程小于1000m左右时, $|Bias|$ 大多大于20%;当高程大于1000m时,大多数站点 $|Bias|$ 在20%以下。综上所述,海拔对TRMM数据精度的影响表现为:在海拔小于1000m时,大部分站点都分布在河谷和盆地地带,地形对降水的影响较大,所以TRMM数据精度较差;海拔介于1000~2000m之间时,地形较为平坦,地形起伏度小,因此TRMM数据精度相对较高。

4.3.2 坡度对TRMM降水数据精度的影响 以气象站点坡度为自变量,分别以TRMM数据与站点实测数据之间的相关系数 R_{g-s} 和相对偏差的绝对值 $|Bias|$ 为因变量,进行多项式回归分析,回归结果如图6。由图6(a)可知,坡度与相关系数 R_{g-s} 的相关性在0.05水平上显著($R = 0.32$),具体表现为随着坡度的增加,相关系数 R_{g-s} 先减小再增加;从图6(b)可知,坡度与 $|Bias|$ 的相关系数 R 仅为0.21,相关性不显著,总体上表现为随着坡度的增加, $|Bias|$ 先增加再减小。总的来看:当坡度在 2° 以下时,相关系数 R_{g-s} 较高,相应的 $|Bias|$ 较小,即在地势比较平坦的区域,TRMM数据精度较高。

4.3.3 坡向对TRMM降水数据精度的影响 以气象站点坡向为自变量,分别以TRMM数据与站点实测数据之间的相关系数 R_{g-s} 和相对偏差的绝对值 $|Bias|$ 为因变量,进行多项式回归分析,回归结果如图7。由图7(a)可知,坡向与相关系数 R_{g-s} 的相关性在0.05水平上显著($R = 0.35$),具体表现为相关系数 R_{g-s} 在东南方向上达到最高,在西北方向上最低;从图7(b)可知,坡向与 $|Bias|$ 的相关性较弱,未通过0.1水平上的显著性检验,相关性不显著,主要表现为 $|Bias|$ 在东南方向上最小,西北方向上最大。总体来说,TRMM数据在东南方向精度较高,西北方向精度较低。

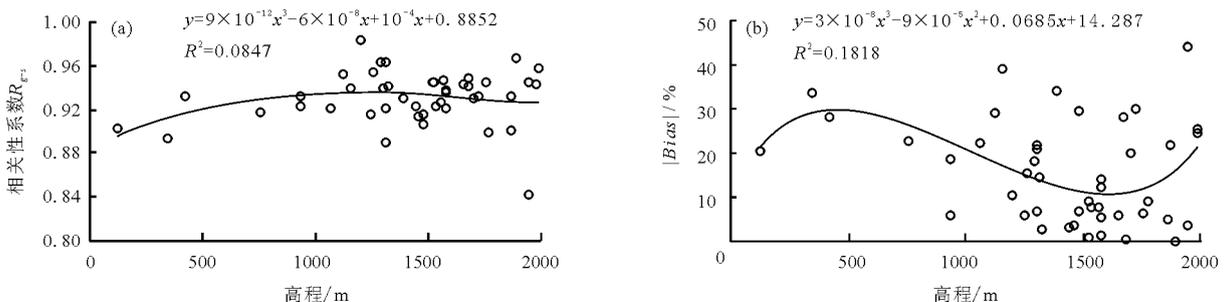
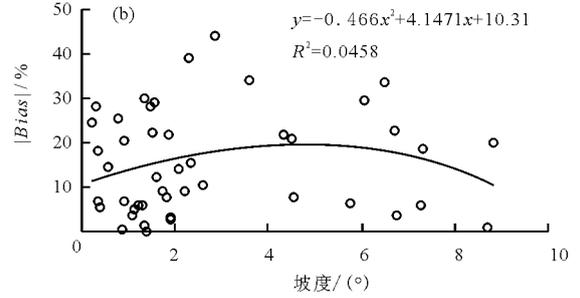
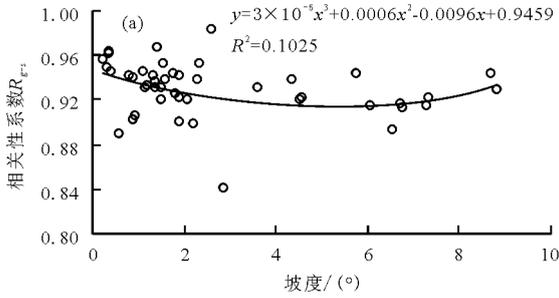
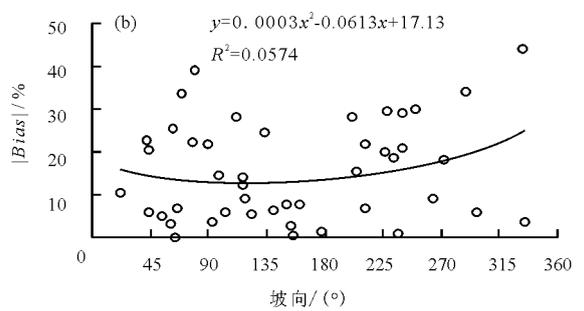
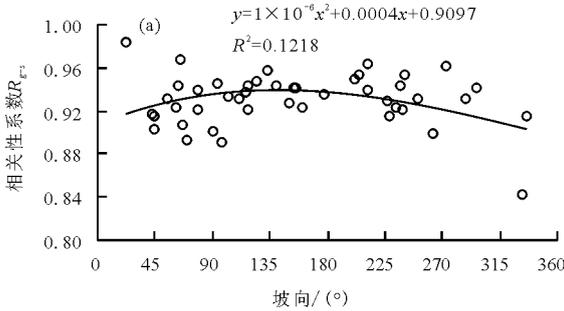


图5 红河流域高程与相关系数 R_{g-s} 、 $|Bias|$ 散点图

图 6 红河流域坡度与相关系数 R_{g-s} 、 $|Bias|$ 散点图图 7 红河流域坡向与相关系数 R_{g-s} 、 $|Bias|$ 散点图

4.3.4 主成分分析 为反映高程、坡度和坡向对 TRMM 数据精度的影响程度,用 R_{g-s} 、 $|Bias|$ 、Elevation (E)、Slope (S)、Aspect (A) 来表示 TRMM 数据的精度,将 5 个变量进行标准化处理,采用主成分分析法,得到 4 个主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 , 累计贡献率分别为 32.87%、57.63%、76.46%、91.01%, 特征值分别为 1.643、1.238、0.941、0.728, 其中:

$$F_1 = -0.561R_{g-s} + 0.546|Bias| - 0.344E + 0.443S + 0.269A$$

$$F_2 = -0.008R_{g-s} - 0.054|Bias| + 0.667E + 0.131S + 0.732A$$

$$F_3 = 0.164R_{g-s} - 0.571|Bias| - 0.178E + 0.784S - 0.019A$$

$$F_4 = 0.762R_{g-s} + 0.338|Bias| - 0.393E + 0.007S + 0.390A$$

主成分综合模型为 $F = -0.049R_{g-s} + 0.118|Bias| - 0.042E + 0.359S + 0.355A$ 。由综合模型可知,坡度和坡向对 TRMM 降水数据精度的影响要大于高程。

5 结论

利用红河流域及周边地区 45 个气象站点 1998–2015 年实测降水数据,在不同时空尺度上对 TRMM 3B43V7 降水数据进行了精度检验,并分析高程、坡度和坡向对 TRMM 降水数据精度的影响,得到以下结论:

(1) 年尺度上,TRMM 降水数据比站点实测降水数据偏高 7.73%;月尺度上,TRMM 降水数据与站点实测降水数据拟合优度 R^2 为 0.84,两者之间相关性显著;季尺度上,TRMM 降水数据与站点实测降水数据的拟合优度 (R^2) 均大于 0.6,表明 TRMM 数据能较好地反映季节降水的特点,但各季节之间存在差异,其中春季拟合优度 ($R^2 = 0.77$) 高于其余 3 个季节,冬季拟合优度最差 ($R^2 = 0.64$)。

(2) 流域降水重心移动轨迹表明 TRMM 降水数据基本能反映降水的空间分布及演变过程;各站点 TRMM 降水数据与站点实测降水数据的相关系数均大于 0.84,相对偏差较大的站点主要分布在河谷和盆地地区。

(3) TRMM 降水数据在海拔大于 1 000 m、坡度小于 2° 以及东南方向上的精度较高;主成分分析方法表明坡度和坡向对 TRMM 降水数据精度的影响大于高程。

总的来说,TRMM 降水数据能够反映红河流域降水的空间分布特征,在年、季、月尺度上与站点实测数据具有较高的一致性,除少数站点相对偏差较大外,多数站点相对偏差较小,说明 TRMM 降水数据在红河流域具有较好的适用性。然而受地形和季风气候的影响,流域降水时空分异复杂,利用降水与地形因子及植被指数的关系构建相关模型对 TRMM 降水数据进行空间降尺度和校准,为流域干旱和水文模拟等提供基础,是今后研究的主要内容。

参考文献:

- [1] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1-2): 113-129.
- [2] 杨云川, 程根伟, 范继辉, 等. 四川盆地及周边地区 TRMM 3B42 数据精度检验[J]. *气象科学*, 2013, 33(5): 526-535.
- [3] 宋蕾. 基于 TRMM 3B43 青藏高原区域性高时空分辨率降水探究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [4] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. TRMM 卫星降水数据在沱水流域径流模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 641-649.
- [5] 杨雨蒙, 杜鹃, 程琳琳. TRMM 卫星降雨数据在湖南省的精度和可靠性评定[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 26-32.
- [6] 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.
- [7] 李剑锋, 余文婧, 江善虎, 等. TRMM 卫星降水数据在老哈河流域的精度评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5): 89-92.
- [8] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809-817.
- [9] 曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 994-1004.
- [10] Islam M N, Uyeda H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 264-276.
- [11] 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.
- [12] Simons G, Bastiaanssen W, Ngô L, et al. Integrating global satellite-derived data products as a pre-analysis for hydrological modelling studies: A case study for the Red River Basin[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 279.
- [13] 陈举, 施平, 王东晓, 等. TRMM 卫星降雨雷达观测的南海降雨空间结构和季节变化[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 29-35.
- [14] Fensterseifer C, Allasia D G, Paz A R. Assessment of the TRMM 3B42 precipitation product in southern Brazil[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2016, 52(2): 367-375.
- [15] 刘军志, 朱阿兴, 段峥. TRMM 3B42 降水产品在鄱阳湖流域梅川江子流域的精度评价[J]. *资源与生态学* (英文版), 2012, 3(4): 359-366.
- [16] 吴绍洪, 潘韬, 曹杰, 等. 西南纵向岭谷区地形对季风的“通道-阻隔”作用[J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 1-13.
- [17] Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [18] New M, Todd M, Hulme M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(15): 1889-1922.
- [19] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. TMPA 卫星降水数据的评估与校正[J]. *水利学报*, 2014, 46(10): 1135-1146.
- [20] Kidd C, Bauer P, Turk J, et al. Intercomparison of high-resolution precipitation products over northwest Europe[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 67-83.
- [21] 罗火钱, 李成伟, 魏加华, 等. TRMM 降水数据在沙溪流域的精度验证[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(4): 69-76.