

TRMM 降雨数据在喀斯特地区的适用性分析

——以贵州省为例

周秋文, 李芳

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为验证 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 降雨数据在喀斯特地区的适用性, 以贵州省为研究区, 利用贵州省 19 个气象台站 1998-2015 年的降水数据, 在年尺度和月尺度上验证了 TRMM 卫星降水数据的精度, 并在此基础上基于 TRMM 月降水数据分析了贵州省的降水时空分布特征。结果表明 TRMM 降水数据基本能反映降水的空间分布及演变过程, 年尺度上 TRMM 降水数据与站点实测降水量相关系数 $R = 0.817$, 斜率 $K = 0.751$, 数据精度较高, 数值上比站点实测降水量略高。月尺度上 TRMM 降水数据与站点实测降水量相关系数最高, 达到 0.927, 斜率为 0.9127, 数值略高于站点实测降水量。分析表明: 坡度对 TRMM 降水数据精度的影响大于高程和坡向, 坡度小于 10° 的精度较高。总体而言, TRMM 降水数据在喀斯特地区具有一定精度, 但是降水量少或地形起伏大的地区精度相对较低。

关键词: TRMM; 降水; 年尺度; 月尺度; 时空分布特点; 适用性分析; 喀斯特地区

中图分类号: P468.0⁺24; P412.27

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0076-08

Applicability analysis of the TRMM precipitation data in Karst region: a case study in Guizhou Province, China

ZHOU Qiuwen, LI Fang

(School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to verify the applicability of rainfall data of TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) in karst area, this study takes Guizhou Province as the research area and uses the precipitation record of 19 meteorological stations in Guizhou Province from 1998 to 2015, and on the yearly and monthly scale the accuracy of precipitation data of TRMM satellite is verified, and the temporal and spatial distribution characteristics of precipitation in Guizhou Province are analyzed based on the monthly precipitation data of TRMM. The results show that the TRMM precipitation data can reflect the spatial distribution and evolution of precipitation. On the yearly scale, the correlation coefficient between the TRMM precipitation data and the observed data from metrological stations is $R = 0.817$ and, the slope is $K = 0.751$. The data accuracy is high, and the TRMM precipitation data value is slightly higher than the observed data from metrological stations. On the monthly scale, the correlation coefficient between TRMM precipitation data and site precipitation is 0.927, which is the highest, and the slope is 0.9127. The value of former is slightly higher than that of the measured precipitation. In areas with an altitude greater than 1 300 m and a slope less than 10° , TRMM precipitation data is more accurate. The analysis shows that the effect of elevation on the accuracy of TRMM precipitation data is greater than that of slope and aspect. In general, the TRMM precipitation data has a certain accuracy in the karst area, but the accuracy in the area with less precipitation or complex terrain is relatively low.

Key words: TRMM; precipitation; yearly scale; mothly scale; temporal and spatial distribution charac-

收稿日期: 2017-10-14; 修回日期: 2017-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761003); 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2015]2118 号); 贵州省本科教学工程建设项目(2016DC3); 贵州师范大学博士科研启动资金项目

作者简介: 周秋文(1986-), 男, 广西灵川人, 博士, 副教授, 主要从事喀斯特生态水文过程研究。

teristics; applicability analysis; Karst region

1 研究背景

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^[1]。地面雨量站观测是获取降水数据的传统方式,具有较高的精度。但降水量在时空分布上存在着较大的差异,有限的站点以及空间分布的不均匀性难以反映真实的降水时空分布状况^[2]。

随着航天和遥感技术的发展,出现了一系列具有高时空分辨率的卫星降水反演数据产品,包括 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission)、FY 等数据,这些卫星数据弥补了地面站点在空间分布上的不足,并在一定程度上满足了缺资料地区的数据需求^[3-4]。国内外已有研究表明,TRMM 数据与台站观测数据具有良好的一致性^[1-4,7-11]。然而,已有的研究多集中在地形相对平坦地区,而山区地形复杂,降水受地形等因素影响,空间变异显著^[5]。在地形平坦地区进行的 TRMM 数据精度验证与适用性分析结果,并不完全适用于地形复杂区。针对这一问题,不少学者也针对地形复杂区开展了一些工作。如嵇涛等^[1]分析了 TRMM 数据在川渝地区的适用性。王晓杰等^[7]分析了 TRMM 数据在天山地区的适用性。上述研究拓展了 TRMM 数据适用性研究的区域范围,是地形复杂区 TRMM 数据适用性分析的有益探索。

喀斯特地区是典型的地形复杂区,地表破碎、起伏度大。地形因素对降水产生显著影响,导致卫星降水反演结果难免在精度上有所欠缺^[6]。因而结合地面雨量站点数据对卫星反演的降水数据进行精度和误差分析,对 TRMM 数据在喀斯特地区的适用性进行评估就成为一项重要的工作。然而目前 TRMM 数据在喀斯特地区适用性的研究较少^[12]。且已有研究未分析 TRMM 数据在喀斯特地区空间分布的合理性,也未分析各地形因素对 TRMM 数据的影响。

本研究选取贵州省 1998-2015 年内 19 个气象站点与同期 TRMM 3B43 数据进行对比分析,探讨 TRMM 卫星降水数据产品在年、月尺度上的精度和质量。并以降水重心移动轨迹来揭示 TRMM 降水数据的空间精度及合理性。进而分析高程、坡度和坡向对 TRMM 数据精度的影响。研究旨在丰富 TRMM 降水数据在喀斯特地区的适用性评估研究,

从而为开展 TRMM 降水数据在该地区的空间降尺度和水文模拟应用提供基础。

2 研究区概况

贵州是一个高原山区省份,地势西高东低,平均海拔 1 100 m。地貌的显著特征是山地多,山地和丘陵占全省总面积的 92.5%,其中喀斯特地貌面积达 61.9%,是世界上喀斯特地貌发育最典型的地区之一(图 1)。

贵州属亚热带湿润季风气候。由于纬度较低,海拔较高,又多受东南季风的影响,气候地域差异较大,但总体是温暖湿润,雨热同季,降水丰富。由于受地质、地貌、气候、水文等自然因素的影响,降雨不仅是该地区生态环境状况的主要影响因素,而且是导致该地区土壤侵蚀和石漠化的主要动力因素。贵州山多坡陡,地表崎岖破碎,是全国地区唯一一个没有平原支撑的省份。区域内降水空间分布格局异常复杂,多年平均降水量约 1 183 mm,且空间分布差异大,年内分布不均。

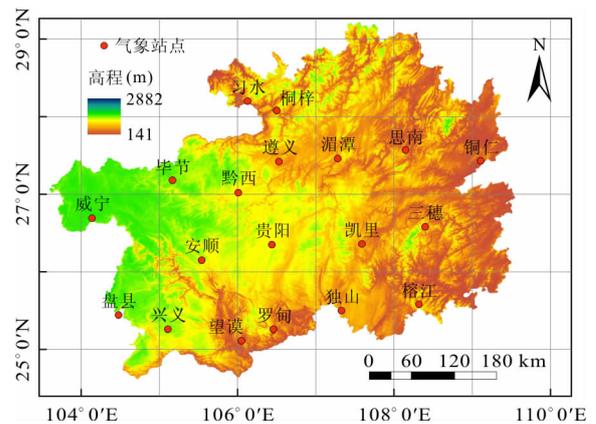


图 1 贵州省地理位置及气象站点分布

3 数据与方法

3.1 数据准备

本研究所采用的数据包括 TRMM 3B43 月降水数据,气象站点实测降水量数据以及 90m 空间分辨率的高程数据。TRMM3B43 降水数据来源于 NASA,选取了 1998-2015 年空间分辨率为 0.25° 的降雨数据,其数据格式为 HDF^[4]。地面气象站点实测降水数据来自中国气象数据共享服务中心,选取 1998-2015 年贵州省 19 个站点的气象数据,对卫星降水数据进行检验。尽管气象站点观测数据

代表范围有限,无法全面地反映出区域内降水的真实情况,但其依然是降水最直接、准确的测量方式^[13-14]。因此本研究以台站降水观测数据为降水的“真值”。

3.2 检验及分析方法

本研究采用相关系数(R)、相对误差($BIAS$)对 TRMM 降水数据进行精度检验,其计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=0}^n y_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 为总的样本数量; x_i 为 TRMM 卫星观测产品记录的降水量; y_i 为同一时间点同一位置地面气象站记录的降水量。相对误差反映了 TRMM 降水数据与站点实测降水值在数值上的偏离程度,相对误差越接近 0,则数据越精确。

降水重心是研究范围内指定时刻降水分布在空间平面上达到力矩平衡的点,用于体现降水在研究范围内的分布特征^[15-16]。本研究运用降水重心指标来衡量 TRMM 卫星观测产品对降水空间分布格局估算的准确程度。计算公式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (4)$$

式中: n 为研究范围内的样点数,对于实测数据而言为地面气象站数量,对于 TRMM 卫星观测产品而言是研究范围内栅格数量; (x_i, y_i) 为各样点的地理坐标; p_i 为样点的降水量。

4 结果与分析

4.1 TRMM 年尺度数据精度检验

4.1.1 数据整体精度检验 以 1998-2015 年研究区内 19 个气象站点的年实测降水量为自变量,对应年份各气象站点所在的网格内 TRMM 3B43 年降水数据为因变量,进行一元线性回归分析(图 2)。经

检验,TRMM 年降水数据与站点实测降水量的决定系数 $R^2 = 0.668$,相关系数 $R = 0.817$,斜率 $K = 0.751$,年降水量相对误差为 5.12%,显示了两者之间存在显著的相关性。TRMM 年降水数据的降水值比站点实测降水量略微偏高。其中,研究区中东部降水较多的区域相对误差更大,最大相对误差达到 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。

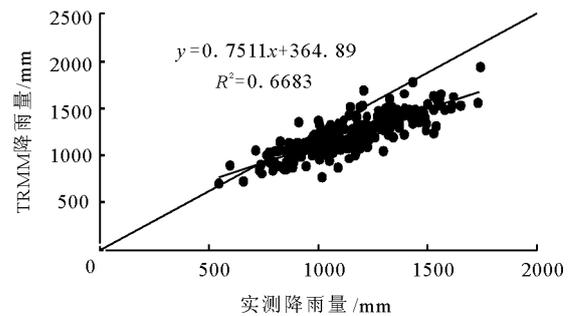


图 2 贵州省 1998-2015 年 TRMM 年降水数据与站点实测降水量散点图

4.1.2 单个站点数据精度检验 降水时空分布受到地形、气候、经纬度、海拔、海陆位置等诸多因素的影响,整体检验结果掩盖了个别站点上 TRMM 降水数据与站点实测降水量之间的差异^[12]。仅仅对数据进行整体精度检验是不全面的,还需要对单个站点进行精度检验(表 1)。利用公式(2)计算得到研究区内各站点的相对误差(表 1)。由表 1 可知,大部分气象观测站点实测年降水量与 TRMM 年降水数据之间的相关系数在 0.8 以上,相关性较好。该结论与数据精度整体验证的结论相一致,进一步表明了喀斯特地区,TRMM 年降水数据与站点实测降水量存在明显的线性关系,数据精度较高。但各气象站点与 TRMM 年降水数据的相关系数分布并不均匀,不同区域的气象站相关系数差异明显。

19 个观测站点中,盘县、习水和湄潭 3 个站点的相对误差为负值,表明在这些站点上,TRMM 年降水数据在整体上相比于站点实测降水量存在一定程度的低估。其余 16 个站点的相对误差为正值,表明在这些站点上,TRMM 月降水数据在整体上相比于站点实测降水量存在一定程度的高估。19 个观测站点中,有 15 个站点相对误差在 $[-10\%, 10\%]$ 之间,表明大多数站点上 TRMM 月降水数据跟站点实测降水量在数值上差异很小。各观测站点的相对误

差值差异明显。

湄潭、兴义两个站点的相对误差分别为 -0.19%、2.1%，表明 TRMM 卫星估算产品和气象

站实测数据具有非常好的一致性。而榕江站点的相对误差分别为 20.54%，榕江站 TRMM 卫星估算产品和气象站实测数据有一定的差异。

表 1 1998 - 2015 年各站点年均降水量与 TRMM 数据降水量对比

气象站	气象站年降水量/mm	TRMM 年降水量/mm	R	BIAS /%	气象站	气象站年降水量/mm	TRMM 年降水量/mm	R	BIAS /%
威宁	1037.94	912.17	0.895	5.81	安顺	1208.77	1283.85	0.857	6.21
盘县	1280.61	1135.32	0.808	-11.35	贵阳	1111.61	1169.62	0.933	5.22
桐梓	989.13	1022.82	0.823	3.41	凯里	1189.31	1246.39	0.840	4.80
习水	1063.42	1011.99	0.675	-4.84	三穗	1092.16	1193.12	0.733	9.24
毕节	860.73	953.72	0.890	10.80	兴义	1235.38	1261.32	0.953	2.10
遵义	946.06	985.05	0.849	4.12	望谟	1193.33	1267.03	0.779	6.18
湄潭	1102.01	1099.93	0.631	-0.19	罗甸	1143.91	1279.64	0.953	11.87
思南	1112.79	1154.12	0.806	3.71	独山	1267.52	1334.90	0.866	5.32
铜仁	1238.43	1284.71	0.711	3.74	榕江	1168.33	1408.30	0.907	20.54
黔西	911.36	1008.43	0.734	10.65					

4.2 TRMM 月尺度数据精度检验

4.2.1 数据整体精度检验 以研究范围内 1998 - 2015 年 19 个气象站月尺度实测数据为自变量,各气象站点对应地理位置的网格内 TRMM 月尺度卫星估算降水产品为因变量进行一元线性回归分析(图 3)。结果表明,TRMM 卫星估算降水产品与气象站实测数据的决定系数为 0.86,相关系数 $R = 0.927$,斜率 $K = 0.9127$,显示了两之间具有较高的一致性。总体而言,TRMM 月降水数据比站点实测降水量偏大。

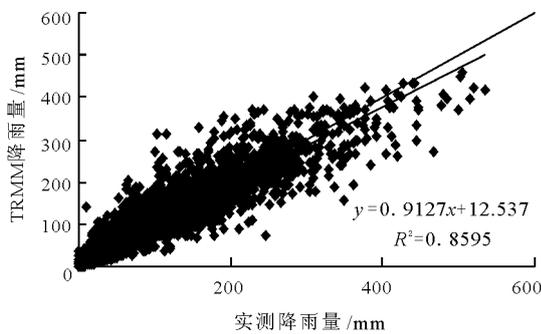


图 3 贵州省 1998 - 2010 年 TRMM 3B43 月降水数据与站点实测降水量散点图

4.2.2 单个站点数据精度检验 由于总体检验会掩盖局部站点卫星观测数据与气象站实测数据的差异,因此对单个气象站点的 TRMM 数据精度进行逐一检验。以 19 个气象站点 1998 - 2015 年实测月降水数据为自变量,以气象站点对应的 TRMM 降水数

据为因变量,作一元线性回归分析,得到 TRMM 数据与气象站点之间的相关系数 R 。由表 2 可知,大部分气象站点的月降水实测数据与 TRMM 卫星观测产品之间的相关性较好 ($R > 0.9$),分析结果进一步说明 TRMM 卫星观测产品精度较高,在喀斯特地区具有较好的适用性;气象站观测结果与 TRMM 卫星观测产品之间的相关系数在不同站点存在一定差异,其中习水站的相关系数最小,为 0.871。虽然比其他站点低,但相比较其他研究区,该点精度较高,相关性也较好。

由表 2 可知,在研究范围内 19 个气象站点中,相对误差指标有盘县、习水、湄潭 3 个站小于 0,表明上述站点的 TRMM 月尺度卫星观测降水小于气象站实测降水,TRMM 卫星一定程度上低估了降水量。其余 16 个气象站的相对误差大于 0,表明这 16 个站点的 TRMM 月降水数据高于气象站实测降水量,TRMM 卫星一定程度上低估了降水量。在 19 个实测气象站点中,有 15 个气象站点绝对误差不超过正负 10%,表明大部分气象站点位置上的 TRMM 月尺度卫星观测降水数据与气象站实测降水相近,能够一定程度上表明 TRMM 卫星观测降水数据的准确性。虽然总体上研究区内的相对误差较小,但是各站相对误差存在一定差异。湄潭站的相对误差 -0.19%,说明该站 TRMM 卫星观测降水数据和气象站实测降水之间有非常好的一致性。而榕江站的相对误差达到 20.54%,说明该站点的 TRMM 月降

水数据和气象站点实测降水之间差异明显。而榕江站对应的相关系数却分别为0.933,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。

将各站点位置上多年月均 TRMM 降水数据与气象站实测数据数据绘制折线图(图4)。由图4可

知,研究区内19个气象站点位置上 TRMM 观测与气象站实测多年月均降水数据总体上较为一致,TRMM 数据在大部分站点上均略高于气象站实测降水量。研究范围内年内降水分配不均,全年降水主要由夏季降水构成,冬春两季降水所占比重很小。在数值上,冬季 TRMM 数据与气象站点观测站差异明显,桐梓站的达到了36.8%,其他季节两者差异较低。

表2 1998-2015年月尺度TRMM 3B43数据与站点实测值的相关系数与相对误差

站点	R^2	R	k	BIAS/%	站点	R^2	R	k	BIAS/%
威宁	0.8794	0.938	0.9137	6.51	安顺	0.8773	0.937	0.9583	6.21
盘县	0.8245	0.908	0.8506	-8.03	贵阳	0.9336	0.966	1.0027	5.22
桐梓	0.8532	0.924	0.8582	3.41	凯里	0.8537	0.924	0.9061	4.80
习水	0.758	0.871	0.8272	-4.84	三穗	0.8170	0.904	0.9624	9.24
毕节	0.9142	0.956	1.0072	10.80	兴义	0.9516	0.975	0.9636	2.10
遵义	0.8317	0.912	0.8554	4.12	望谟	0.8627	0.929	0.8831	6.18
湄潭	0.7726	0.879	0.8003	-0.19	罗甸	0.9254	0.962	0.9942	11.87
思南	0.8606	0.928	0.8046	3.71	独山	0.8955	0.946	0.9502	5.32
铜仁	0.8101	0.900	0.8048	3.74	榕江	0.8702	0.933	1.0133	20.54
黔西	0.7978	0.893	0.8642	10.65					

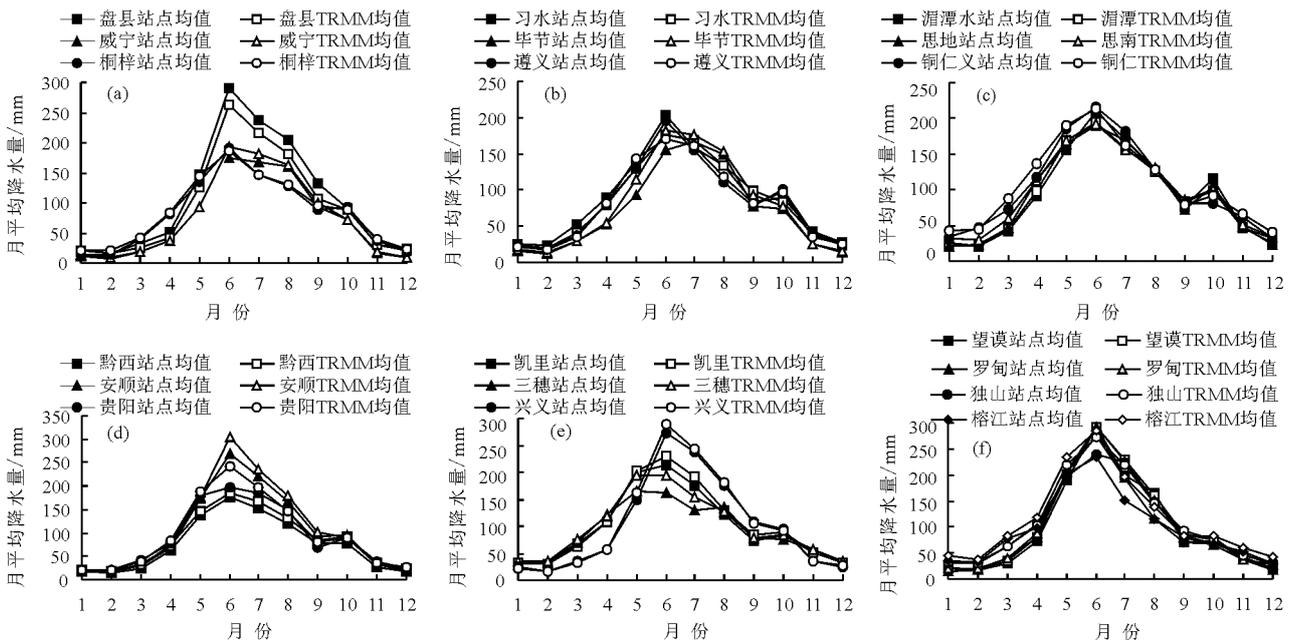


图4 贵州省1998-2015年TRMM与站点实测月降水量折线图

综合以上精度检验结果可知,总体上,贵州地区TRMM月降水数据和气象站点实测降水之间具有较高的一致性,研究区范围内的相关系数 R 约为0.9,湄潭站的相关系数低于其它站点,TRMM卫星观测月降水数据整体上略高于气象站点实测降水。从单

个站点看,大部分站点位置的气象站点实测降水与TRMM卫星观测月降水数据相近,相对误差均在 $\pm 10\%$ 以内。

4.3 TRMM降水数据空间分布可靠性评估

降水重心移动轨迹可以揭示降水分布变迁状

况,若 TRMM 卫星观测降水和气象站实测数据的重心分布及迁移特征相似,则可证明两者在空间尺度上具有一定的相似性^[15-16]。利用 1998 - 2015 年 19 个站点 TRMM 卫星观测数据和气象站点实测数据,根据公式(3)、公式(4)得到上述数据的逐年降水重心位置,从而得到研究时段内年降水重心的迁移轨迹和方向(图 5、表 3)。多年尺度上,TRMM 卫星观测数据和气象站实测降水重心分别为 (106.6°E,26.5°N)和(105.1°E,26.1°N),TRMM 卫星观测数据的降水重心在气象站观测降水重心的西南方向 17.82 km 处,TRMM 数据和气象站观测数据的降水

重心位置相似。由表 3 可知,只有 2001 - 2002、2003 - 2004、2004 - 2005 年站点数据和 TRMM 卫星观测数据降水重心的迁移方向完全一致;1998 - 1999 年、2000 - 2001 年、2005 - 2006 年、2006 - 2007 年、2007 - 2008 年两者重心迁移方向表现为经向上一致;2012 - 2013 年、2013 - 2014 年、2014 年 - 2015 年表现为纬向上一致;只有 1999 - 2000 年、2002 - 2003 年、2008 - 2009 年、2009 - 2010 年两者迁移方向不同。上述结果说明,TRMM 卫星观测降水数据产品基本能反映贵州省降水空间分布格局及其迁移特征。

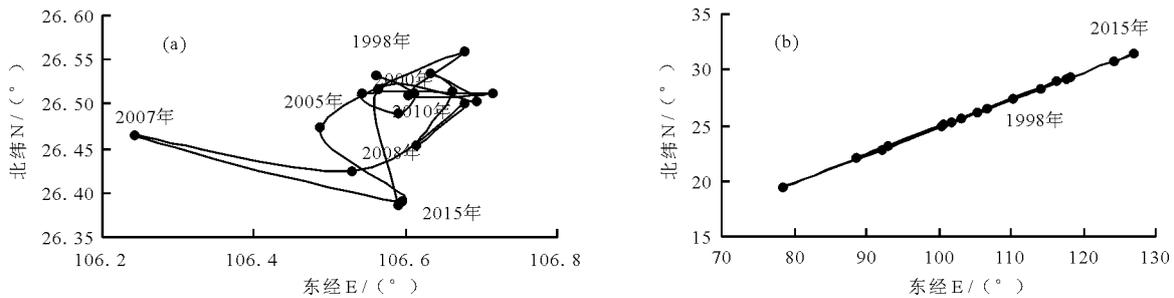


图 5 气象站点、TRMM 年降水重心位置及变迁路线

表 3 降水重心迁移方向对比

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

4.4 地形因素对 TRMM 降水数据精度的影响

4.4.1 高程对数据的影响 贵州省高程范围为 272 ~ 2 570 m,地势西北高、东南低。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 和相对误差的绝对值 $|BIAS|$ 为因变量,进行回归分析,结果如图 6。由图 6(a)可知,高程与相关系数 R 的相关性较差, R^2 为 0.09,从拟合曲线可以看出,高程与相关系数之间无明显相关关系。由图 6(b)可知,高程与 $|BIAS|$ 的相关系数

$R = 0.319$ 。拟合曲线的特征表明高程与 $|BIAS|$ 之间的关系较为复杂,总体上随着海拔的升高, $|BIAS|$ 表现出减小 - 增大的趋势,但是这种特征并不十分显著。从图 7(a)、7(b)的对比分析可知,高程在 1 300 m 以上时, $|BIAS|$ 呈增大趋势。而高程在 0 ~ 1 300 m 时, $|BIAS|$ 却不断减小。其原因可能是,海拔在 0 ~ 1300 m 的站点多集中在东部地区,相应的极端天气现象出现频次较少,因而降水的误差较小。海拔大于 1 300 m 的站点处于贵州西北部边缘地区,气象站所处海拔高度普遍低于区域平均海拔,使得该区域的气象站点的区域代表性不足。综上所述,TRMM 卫星观测降水产品经度受海拔影响较小。

4.4.2 坡度对 TRMM 数据的影响 贵州省坡度的空间分布复杂,北部与南部坡度较其他地方高,其中北部地区的坡度呈现出高值,在黔中地区地势都较为平坦。总体而言,坡度以黔中地区为极小值中心向外增大。以气象站点所处位置的坡度为自变量,以 TRMM 卫星观测数据与气象站观测数据之间的相关系数 R 和 $|BIAS|$ 为因变量,分别进行回归分析。由图 7(a)可知,相关系数与坡度的相关性较差, R^2 仅为 0.15。表现为相关系数随着坡度增加而增加,但随着坡度增加。从图 7(b)可知,坡度与 $|BIAS|$ 的相关系数仅为 0.3079,相关性不显著。

总体上表现为 $|BIAS|$ 随着坡度的增加先略微减小再增加。总体而言,坡度与相关系数之间的相关性较低,坡度低于 10° 时 $|BIAS|$ 较小,说明在 TRMM 数据在地势相对平坦的区域精度较高。

4.4.3 坡向对数据的影响 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 和 $|BIAS|$ 为因变量,进行回归分析,结果如图 8。由图 8(a)可知,坡向与相关系数间的 R^2 为

0.10,二者之间的相关性较差。由图 8(b)可知,坡向与 $|BIAS|$ 的相关性较弱,仅为 0.115,相关性不显著;总体而言随着坡向的增加, $|BIAS|$ 值在逐渐减小。说明喀斯特地区山坡方向对降水会产生影响。山体的迎风坡和背风坡的降水有明显的差异,来自海洋的暖湿气流,在山脉的迎风坡,暖湿气流被迫抬升,容易成云致雨。背风山坡因空气下沉,气温升高,降水就少。

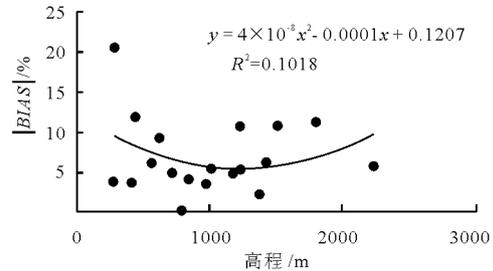
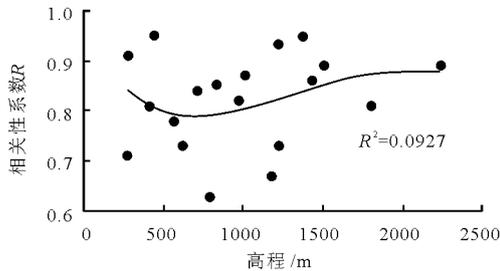


图 6 贵州省高程与相关系数 R 、 $|BIAS|$ 散点图

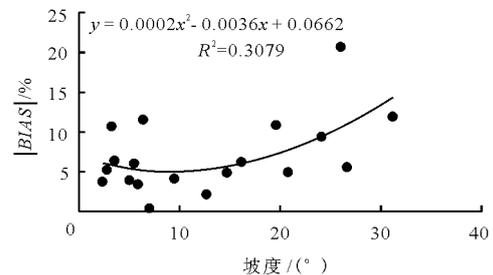
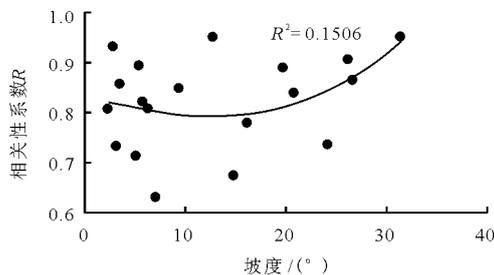


图 7 贵州省坡度与相关系数 R 、 $|BIAS|$ 散点图

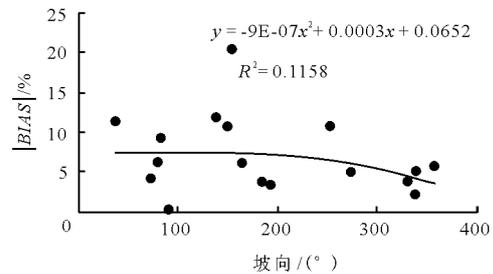
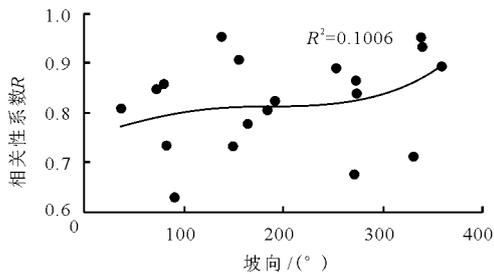


图 8 贵州省坡向与相关系数 R 、 $|BIAS|$ 散点图

5 结论

贵州省 TRMM 年数据与站点实测降水量的相关系数 $R = 0.817$,斜率 $K = 0.751$,显示了两者之间存在很好的线性相关性,数据质量较高。TRMM 月数据与站点实测降水量的相关系数 $R = 0.927$,斜率 $K = 0.9127$,表明 TRMM 月数据精度较高。总体而言,TRMM 数据的降水值在年和月尺度上均比站点实测降水量偏高。年尺度上,大多数站点的相关系数 R 均在 0.8 以上,个别站点 R 值较低。对各站点计算相对误差 $BIAS$ 的结果与 R 值计算结果趋

势类似,大部分站点相对误差较小。月尺度上,大多数站点的相关系数均在 0.9 以上,相对误差的结果与 R 值计算结果趋势类似,大部分站点相对误差较小。分析表明坡度对 TRMM 降水数据精度的影响大于高程和坡向。

综上所述,总体而言,TRMM 降水数据在喀斯特地区具有一定精度,但是降水量少或地形起伏大的地区精度相对较低。在喀斯特地区应用该数据时,应针对不同地区进行精度检验,必要的情况下进行数据同化或空间降尺度处理,以提高数据精度。

参考文献:

- [1] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.
- [2] 田苗,童杨辉. TRMM 卫星降水数据在江苏省的适用性分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):440-444.
- [3] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例[J]. 水科学进展,2017,28(2):174-182.
- [4] 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.
- [5] PRAKASH S, MITRA A K, MOMIN I M, et al. Comparison of TMPA-3B42 versions 6 and 7 precipitation products with gauge-based data over India for the southwest monsoon period[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1):346-362.
- [6] AGHAKOUCHAK A, NASROLLAHI N, HABIB E. Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates[J]. Remote Sensing,2009,1(3):606-619.
- [7] 王晓杰,刘海隆,包安明. TRMM 降水产品在天山及周边地区的适用性研究[J]. 水文,2014,34(1):58-64.
- [8] 蔡研聪,金昌杰,王安志,等. 中高纬度地区 TRMM 卫星降雨数据的精度评价[J]. 应用生态学报,2014,25(11):3296-3306.
- [9] 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.
- [10] 穆振侠,姜卉芳,刘丰. 基于 TRMM/TMI 与实测站点的降水垂直分布差异性探讨[J]. 干旱区研究,2010,27(4):515-521.
- [11] 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.
- [12] 李威,蒋平,赵卫权,等. TRMM 卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水土保持研究,2016,23(1):97-102.
- [13] XIE 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张月圆,李运刚,季漩,等. 红河流域 TRMM 卫星降水数据精度评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):1-8.
- [30] 姜欣,许士国,练建军,等. 北方河流动态水环境容量分析与计算[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(4):409-414.
- [31] 王思文. 基于 WASP 模型的松花江哈尔滨段水环境容量模拟及总量控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2015.
- [32] 曹晓慧. 牡丹江段动态水环境容量及污染源总量控制对策[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [33] 张剑,付意成,韩会玲. 浑太河流域动态水环境容量设计水文条件研究[J]. 中国农村水利水电,2017(3):75-80.
- [34] 陈慧敏. 清渭河流域(许昌段)动态水环境容量研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [35] 卫志宏,杨振祥,吕兴菊,等. 洱海动态水环境容量模拟研究[J]. 生态科学,2013,32(3):282-289.
- [36] LI Keqiang, ZHANG Li, LI Yan, et al. A three-dimensional water quality model to evaluate the environmental capacity of nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015,91(1):306-316.
- [37] 周孝德,郭瑾珑,程文,等. 水环境容量计算方法研究[J]. 西安理工大学学报,1999,15(3):1-6.

(上接第75页)