

杨荣芳,杨彬云,康晓甫.TRMM 卫星降水数据在商洛地区的精度分析及订正[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):62-67.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



TRMM 卫星降水数据在商洛地区的精度分析及订正

杨荣芳^{1,2},杨彬云^{3*},康晓甫²

(1.河北省气象技术装备中心,河北 石家庄 050021;2.商洛市气候适应型城市重点实验室,陕西 商洛 726000

3.河北省气象科学研究所,河北 石家庄 050021)

摘要:利用商洛地区国家气象站点实测降水数据,从时间和空间尺度,运用相关分析、偏差、均方根误差等统计方法对 TRMM 卫星降水数据在商洛地区的适用性进行了分析,在此基础上采用比值系数法对 TRMM 卫星月降水产品进行订正。结果表明:(1)在时间尺度上,TRMM 月降水数据与站点实测月降水数据线性高度相关($R>0.9$)。(2)对月、季和年尺度的 TRMM 和站点降水量进行比较,决定系数均在 0.8 以上,拟合优度较高,季降水量拟合结果较月降水量有所提高。(3)利用比值系数法对 TRMM 降水产品进行偏差订正,验证结果表明,订正后的 TRMM 月降水结果均方根误差 <2.0 mm,平均绝对误差均 <1.5 mm,决定系数接近于 1。TRMM 月降水量与实测月降水量时间序列趋势一致,拟合性较高,分布规律相一致。总体上,降水量多的月份,TRMM 数据倾向于低估降水量,反之,高估站点降水量。通过对 TRMM 卫星降水产品在商洛地区的精度评估和订正,为该地区地面降水数据提供有效补充。

关键词:TRMM 降水;商洛地区;精度评估;比值系数法;订正

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)03-0062-06

商洛地区受气候影响灾害性天气频发,由于该地区地形复杂,布设气象站点困难,观测实况资料相对缺乏,不能准确监测降水的空间分布和强度变化,给该地区的预报预警研究带来困难。部署大量雨量计成本高、系统维护困难,数据质量难以保证,因此引入天气雷达以获取较为准确的降雨分布。天气雷达可以获得较高时空分辨率的降水分布,但是它探测面积有限,受下垫面和地理位置的影响严重,例如要处理波束遮挡、地物杂波、天气垂向结构变异性等

诸多潜在观测误差。为了弥补台站及天气雷达对降水观测的局限性和设备缺陷,填补资料缺乏的空白区域,引进高空间分辨率的热带降水测量卫星 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)测雨雷达 PR,可以在一定程度上弥补两种观测方式的不足。

热带降雨测量计划 TRMM 卫星^[1],是 1997 年由美国国家宇航局(NASA)与日本国家空间发展局(NASDA)联合研制发射,2001 年 8 月 TRMM 卫星轨道高度由 350 km 抬升至 402.5 km,可覆盖全球 50°N~50°S 的范围。

国内外学者在不同地域对 TRMM 卫星降水的适用性和精度做了大量统计分析,研究表明 TRMM 卫星降水产品在天山、浙江及京津冀地区均有良好表现,与地面气象站点观测降水相关性较高,随着时空尺度的增大,其精度有一定提高^[2-4],在流域精度评价与结果分析中,TRMM 降水产品能更好地反映流

收稿日期:2021-08-27;修回日期:2022-03-14

基金项目:商洛市气候适应型城市重点实验室开放研究基金项目(SLSYS2019009)

作者简介:杨荣芳(1978—),女,高级工程师,从事数据处理和应用研究。E-mail:464322028@qq.com

通信作者:杨彬云(1964—),男,正高级工程师,主要从事生态气象研究。E-mail:Kysyby@163.com

域真实降水信息,作为其他降水产品的有效补充^[5-7]。卫星具有探测范围广,时空分辨率较高的优势,因此 TRMM 卫星降水资料在干旱特征分布、水文研究、暴雨研究、预报模式的数据同化、热带气旋等方面得到较好应用。如利用 TRMM 卫星高时空分辨率降水对区域尺度的干旱进行监测和特征分析^[8-9],唐国强等^[10]通过 TRMM 卫星产品评估,证明 TRMM 卫星数据在赣江流域具有替代地面站点观测的潜力。卢怡等^[11]利用 TRMM 的微波成像仪(TMI)观测到的亮温资料分析了亮温与热带气旋强度之间的关系。傅云飞等^[12]基于 TRMM 卫星探测资料对东亚降水云结构特征进行了研究。Cesar 等^[13]对 TRMM 版本质量在巴西南部进行了评估,结果表明 TRMM 极大地提高了对极端降水事件的定量识别,Savtchenko 等^[14]利用 17 a TMPA 降水产品分析了在美国加利福尼亚州地区的降水变异。商洛地区山地多平地少,地势起伏大,气象站点分布稀少,很难直接通过插值手段获取高时空分辨率的栅格化降水数据。因此引入基于 TRMM 卫星的遥感降水观测数据弥补和订正地面观测站点的不足,以此提高商洛市降水的观测质量。

TRMM 降水数据精度及分布规律因研究区域所处地形、气候条件等不同而有所差异,本文以商洛地区为研究区域,通过对比分析 TRMM 卫星降水数据与商洛地区 7 个国家站点的实测降水数据,评估卫星降水数据在商洛地区的精度及其与季节、地形等相关因子的关系,分析 TRMM 降水数据在该区域的探测误差,并采用比值系数法对 TRMM 月降水数据产品进行订正,为 TRMM 卫星降水产品在商洛地区的研究与应用提供可信依据。

1 研究区概况

商洛位于陕西东南部,地跨长江、黄河两大流域,总体上西北部海拔高,东南部海拔低。位于暖温带和北亚热带过渡地带,受冬夏季风和青藏高原环流的影响,商洛气候呈现四季分明,雨热同季,冬干夏湿,干湿分明的气候特征,干旱、连阴雨、暴雨、冰雹、霜冻等灾害性天气时有发生。商洛自动站分布基本覆盖镇办及大部分自然村(图 1),站点大部分部署在山区沟壑之中自然条件较好区域,平均间距在 10 km 以上,严重影响对灾害性天气的精细结构探测能力。

2 数据与方法

2.1 数据预处理

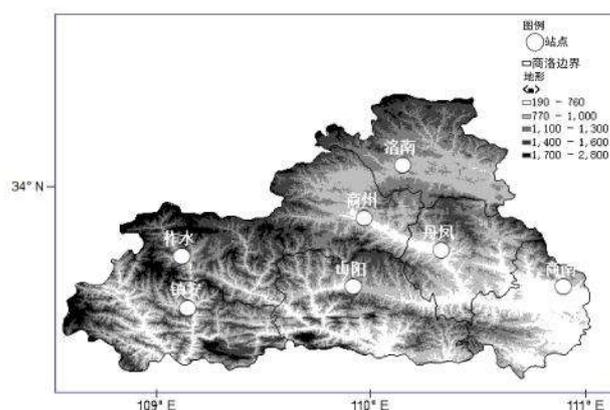


图 1 商洛地形及国家地面站点分布

首先从降水测量计划 NASA 网站(<https://pmm.nasa.gov/>)下载 TRMM 卫星降水数据产品资料,时间为 2006—2015 年,时间分辨率为月,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,版本为 TRMM 3B43 V7,是由 TRMM 3B42 数据产品、NOAA 气候异常监测系统(CAMS)的全球格点雨量测量器资料、全球降水气候中心(GPCC)的全球降水资料联合反演的降水产品。TRMM 数据是卫星观测月平均降水量产品,但数据记录是每月的平均小时降水量(mm/h),本文通过 Matlab 编程解析 HDF 格式的降水资料,从中提取 TRMM 降水速率层,利用经纬度范围从全球格网数据中裁剪出商洛地区的降水数据,通过小时累积计算得到研究时段内各月区域格点平均降水量,对地面气象站点和 TRMM 卫星格点数据按经纬度进行时空匹配^[15],得到商洛地区各气象站点所在格网的 TRMM 月降水数据,国家站点月平均降水量由日降水量累积计算得到。

地面气象站点日降水量数据来源于全国综合气象信息共享平台(CIMISS)数据环境,时间为 2006—2015 年,根据数据结构说明文档,批量将站点日降水数据资料统计得到月降水数据。由于区域自动站没有经过质控,经检查数据质量较差,为准确评估 TRMM 卫星降水量的精度,以商洛地区 7 个国家地面站点实测降水数据作为真值来检验 TRMM 数据在商洛地区的有效性,通过建立 TRMM 卫星与国家地面站的关系进一步订正区域自动站。

2.2 方法与指标

本文采用统计分析指标^[15]:决定系数(R^2)、相关系数(R)、相对偏差($Bias$)和均方根误差($RMSE$)来评价 TRMM 降水数据的精度。决定系数(Goodness of Fit)表示 TRMM 卫星降水回归直线对观测值的拟合程度,决定系数 R^2 的值越接近 1,TRMM 降水数

据回归直线对站点观测值的拟合程度越好; 相关系数 R 越大, TRMM 降水数据与站点降水数据的相关程度越高。相对偏差 $Bias$ 用来衡量 TRMM 卫星观测结果与雨量站点实测值之间的偏离程度, $Bias$ 越小准确度越高; 平均绝对偏差 MAE 和均方根误差 $RMSE$ 表示 TRMM 降水数据与站点降水数据在数值上的差异和离散程度。其中相对偏差 ($Bias$) 的正负值表示 TRMM 数据高估 (低估) 站点降水。

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

$$R = \frac{\sum (T_i - \bar{T})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T})^2 \sum (G_i - \bar{G})^2}}, \quad (2)$$

$$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%, \quad (3)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - G_i)^2}. \quad (4)$$

其中, G_i 表示地面观测站点的观测值, T_i 表示 TRMM 卫星降水, \bar{G}_i 表示真实观测值的平均值, \bar{T}_i 表示卫星降水拟合值, B_{IAS} 为相对偏差, R_{MSE} 为均方根误差。

分析 TRMM 降水数据与站点降水数据评估结果, 采用比值系数法来订正 TRMM 降水格点数据, 以国家站点数据 (经过严格的质量控制) 作为真值, 计算站点与对应 TRMM 产品对应栅格的关系^[16]; 利用两者之间的关系作为订正因子, 并将订正因子空间化; 利用空间化的订正因子与原始 TRMM 数据对之前的关系进行反推, 得到订正后的 TRMM 数据。比值系数订正公式如下:

$$T_i^d = \max(P_i \times (T_i - 10), 0), \quad (5)$$

$$P_i = \text{interpolate}(S_i + \frac{10}{T_i} + 10). \quad (6)$$

式中, T_i^d 为比值系数法订正后的 TRMM 降水数据, T_i 为 TRMM 降水数据, S_i 为气象站点降水数据。

3 结果分析

以商洛市国家地面气象站点为代表性个例, 分析 2006—2015 年的 TRMM 降水数据在商洛地区的精度及订正效果。

3.1 时间尺度 TRMM 卫星降水精度

3.1.1 月尺度

由 2006—2015 年研究区域内地面站点与 TRMM 卫星月平均降水量的统计 (图 2) 可知, TRMM 月降水量数据与实测站点降水量数据在时间序列趋势保持一致, 呈明显的周期性特征。研究区内降水量主要集中在夏季, 尤其是 7、8 月, 月平均降水量达 150 mm, 而冬季降水量总体偏小。整体而言, 站点实测降水量较大时, TRMM 降水量产品往往会低估降水量。这是由于 TRMM 卫星测雨雷达 PR 能源和重量的限制, 无法提供大范围降水测量, 另外 PR 发射电磁波波长大于地面雷达波长, 波长越长对降雨的感知衰减程度越小, 传感器的分辨率变大敏感度随之降低, 因此卫星感知不到 <0.7 mm/h 的降雨, 从而导致卫星观测降水结果相对偏小。当地面站点实测降水量为 0 时, 卫星观测往往显示存在降雨, 结果通常不为 0, 这是由于 TRMM 卫星降水是联合反演均降水量, 当气象站点实测降水为 0 时, 网格内其他区域可能有降水。商洛地区 TRMM 月降水量产品存在高估站点降水量的现象, 可能与研究区的山地高原地形有关。通常地面雨量站点多部署在地势平坦的地区, 地形越复杂地区, 探测受到降水垂直结构、云型等多重因素干扰, 卫星探测降水量误差往往越大。另外, TRMM 卫星观测降水产品空间分辨率为 0.25°, 分辨率比较低, 在地形比较复杂的山区, 雨量观测站点降水与 TRMM 卫星观测降水数据匹配不准。

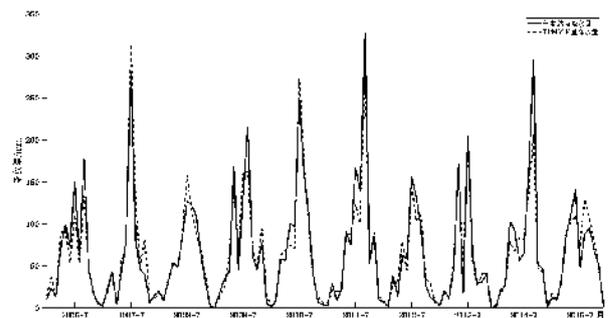


图 2 2006—2015 年各月平均降水量

图 3 为地面站点月降水量与 TRMM 卫星月降水量的散点斜率图, 其中 2006—2015 年 7 个国家站点的有效拟合点数为 840 个。由图 3 可知, 拟合结果的决定系数相对较高, R^2 为 0.805, 表明 TRMM 月降水量数据与地面实测站点基本吻合, 时间序列可以较好地描述地面降水的趋势; 偏差 $Bias$ 为 0.005, >0 , 说明 TRMM 降水量结果值略高估站点实测值, TRMM 卫星观测结果与雨量站点实测值之间的偏离程度较小。 $RMSE$ 和 MAE 相对较大, 说明 TRMM 月

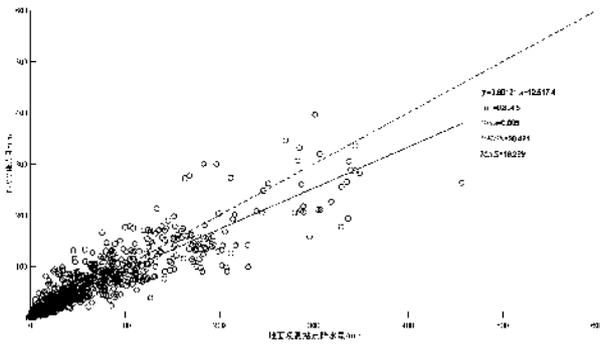


图3 站点平均月降水量和 TRMM 卫星降水量的拟合结果

降水量数据与站点实测降水仍存在较大的偏差。

3.1.2 季尺度

在月降水量分析的基础上,对各个月的结果按季度统计,分为春、夏、秋、冬4个季度,春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12月—次年2月。

图4为4个不同季度雨量站点降水量资料与TRMM卫星降水资料的拟合结果。由图4可知,不同季度拟合结果不同,其中秋季拟合结果的 R^2 最大,表明TRMM卫星在秋季探测降水的能力最强,春季和夏季的 R^2 结果也相对较大,而冬季的 R^2 则明显较低, R^2 为0.75,说明降水量较小时TRMM卫星观测与实测站点的相关程度较低。 R^2 表示的是两

组数据之间的密切程度,反映的是趋势上的关系,并不能准确的反映数据之间的偏差情况。冬季站点降水量与TRMM卫星降水量的决定系数最低,但是由于冬季降水量整体很小,因此冬季TRMM降水量的均方根误差和绝对误差相较其他季节较小。

3.2 误差指标

表1为国家站降水量与TRMM月降水量数据拟合的统计结果。拟合优度 R^2 均在0.8左右,说明国家站与TRMM卫星拟合程度较好, R^2 值最大的站为商州,其站点年平均降水量为734.84 mm,而 R^2 值最小的站为商南和柞水,其年均降水量分别为842.39和794.18 mm。站点降水量与TRMM卫星观测值存在较小的偏差Bias,从Bias的数值可以看出,商州、洛南和镇安3个站为负值外,其余站均为正值,表明商州、洛南和镇安3个站上TRMM卫星观测的降水结果低估了实际的降水量,而其余站均高估了实际的降水量,总体呈现高估实际降水量的现象。RMSE和MAE在数值上基本保持一致,最大值出现在商南站,此站位于陕西省东南部,地处中纬度偏南地带,北部和西北部属暖温带气候区,中部和南部属于北亚热带气候区,由于北有秦岭天然屏障,阻挡寒潮不易侵入,雨量充沛,受地形影响较大。柞水和镇安位于秦岭南麓,商洛市西南,受地形影响误差也较大,地形复杂地区站点的代表性较差。TRMM

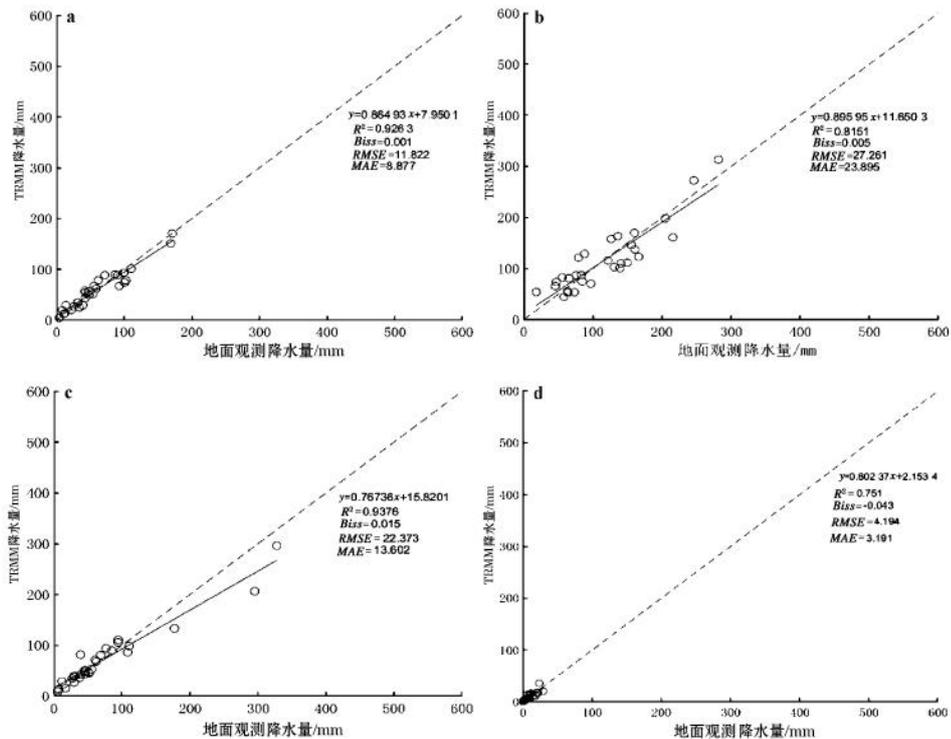


图4 TRMM卫星与站点季降水数据散点
(a为春季,b为夏季,c为秋季,d为冬季)

降水量数据一个网格的大小约为 27.5 km×27.5 km, 而一个雨量站往往只能表示其站点 2 km 范围内的降水情况, 站点匹配时也存在偏差。

表 1 国家站各雨量站点拟合结果统计

站点	相关系数	R^2	Bias	RMSE	MAE	海拔/m	站点年降水量/(mm/a)	TRMM 年降水量/(mm/a)
丹凤	0.91	0.82	0.03	28.69	18.47	584	748.15	729.44
商州	0.93	0.86	-0.04	23.86	15.49	743.8	734.84	768.63
洛南	0.91	0.83	-0.05	26.04	17.37	961.8	733.26	771.11
山阳	0.91	0.83	0.07	28.66	18.12	661	765.43	714.26
镇安	0.9	0.81	-0.04	31.28	19.68	696.2	809.44	841.55
商南	0.87	0.76	0.06	36.83	23.71	523.8	842.39	797.13
柞水	0.87	0.76	0.02	35.37	22.26	818.8	794.18	778.08

3.3 TRMM 降水数据订正

卫星反演降水量数据具有覆盖范围广、时间序列长等优势, 能够在一定程度上弥补雨量站点不足, 但其精度还需进一步订正。针对误差指标分析结果, 利用 2006—2015 年商洛各国家站降水数据对研究区内 TRMM 降水产品分别进行了比值系数订正, 对订正结果进行误差对比分析, 结果见表 2。利用比值系数订正得到的 TRMM 降水数据精度有很大提高, 订正后的 TRMM 与气象站点的决定系数 R^2 均接近于 1, 平均相对误差、偏差及均方根误差均在一定程度上减小, 分析比较表明, 利用气象站点对 TRMM 数据进行订正的方法具有一定的可靠性。

表 2 国家站点比值系数订正前后误差比较

站点	订正前				比值系数订正后			
	R^2	Bias	RMSE	MAE	R^2	Bias	RMSE	MAE
洛南	0.83	-0.05	26.04	17.37	1	-0.0007	1.29	0.95
柞水	0.76	0.02	35.37	22.26	0.99	0.0003	1.20	0.91
商州	0.86	-0.04	23.86	15.49	0.99	-0.0006	1.32	1.13
镇安	0.81	-0.04	31.28	19.68	1	-0.0005	1.32	1.19
丹凤	0.82	0.03	28.69	18.47	0.99	0.0003	1.42	1.23
商南	0.76	0.06	36.83	23.71	0.98	0.0006	1.53	1.24
山阳	0.83	0.07	28.66	18.12	0.99	0.001	1.57	1.36

4 结论

对比商洛地区国家气象站 2006—2015 年实测月降水数据与气象站所在格点 TRMM 月降水数据, 从月和季时间尺度上对 TRMM 降水数据精度进行了评估。采用决定系数、相对误差等统计分析方法,

研究了精度评价指标的时间分布特征, 同时分析了地形、降水强度等因素对精度的影响, 对 TRMM 遥感降水量产品的时空适用性和站点误差进行了探讨。利用比值系数法对 TRMM 月降水量进行了订正。主要结论如下:

(1) TRMM 月降水量数据与实测站点数据相关程度较高, 国家站决定系数 $R^2 > 0.8$, 表明国家站降水和 TRMM 月降水量有较好的拟合性; 对月、季和年尺度的降水量结果进行比较, 季降水量结果的拟合结果较月降水量有所提高, TRMM 卫星观测降水与站点实测降水吻合度随着时间累积有所越高。

(2) 研究区内 TRMM 降水量产品存在明显低估实际降水量的现象, 利用比值系数法对 TRMM 降水量产品进行偏差订正。验证结果表明, 订正后的 TRMM 月降水结果偏差更小, 决定系数更高。

(3) 通过研究 TRMM 降水产品在商洛的精度, 选择与气象站相关性较好、均方根误差较小的山区, 利用实测降水资料与 TRMM 降水产品建立关系模型, 利用校准系数对该区域内所有的 TRMM 格点资料进行订正, 最终求得该区域平均面雨量。

综上所述, TRMM 卫星降水产品数据在商洛地区的精度较高, 适用性较强。通过实测站对 TRMM 数据进行精度误差订正, 为其在商洛地区的水文模拟预报、农业及气候研究的应用提供参考价值。

参考文献:

- [1] 何会中, 崔哲虎, 程明虎, 等. TRMM 卫星及其数据产品应用[J]. 气象科技, 2004, 32(1): 13-18.
- [2] 季璇, 罗毅. TRMM 降水数据在天山区域的精度评估分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 253-262.
- [3] 邱金晶, 余贞寿, 陈锋. 2000—2013 年 5—10 月 TRMM 测雨产品 3B42RT 在浙江地区的评估检验 [J]. 暴雨灾害, 2017, 36(5): 467-474.
- [4] 杨荣芳, 曹根华, 张婧. TRMM 3B43 卫星降水数据在京津冀地区的适用性研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 1-8.
- [5] 黄桂平, 曹艳萍. TRMM 卫星 3B43 降水数据在黄河流域的精度分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 1111-1120.
- [6] 杨环, 马金辉. GSMaP_Gauge 卫星降水数据在流域尺度的精度评估——以白龙江流域为例[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(1): 44-52.
- [7] 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.
- [8] 胡蝶, 郭锐, 王丽娟, 等. TRMM 降雨数据在甘肃省干旱监测中的应用[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 374-382.

- [9] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.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[J].资源科学,2010,32(6):1103-1110.
- [10] 唐国强,李哲,薛显武,等.赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J].水科学进展,2015,26(3):340-346.
- [11] 卢怡,周顺武,赵兵科,等.TRMM/TMI 资料在热带气旋强度估计中的应用研究[J].暴雨灾害,2012,31(4):336-341.
- [12] 傅云飞,宇如聪,崔春光,等.基于热带测雨卫星探测的东亚降水云结构特征的研究[J].暴雨灾害,2007,26(1):9-20.
- [13] CESAR F,DANIEL G,ALLASIA D G,et al.Assessment of the TRMM 3B42 Precipitation Product in Southern Brazil [J].JAWRA Journal of the American Water Resources Association,2016,52:367-375.
- [14] SAVTCHENKO A K,HUFFMAN G,VOLLMER B. Assessment of precipitation anomalies in California using TRMM and MERRA Data [J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2015,120(16):8206-8215.
- [15] 王思梦,王大钊,黄昌.GPM 卫星降水数据在黑河流域的适用性评价[J].自然资源学报,2018,33(10):1847-1860.
- [16] 商建,范学花,杨汝良.TRMM 卫星测雨雷达与地基雷达的数据匹配问题研究[J].遥感技术与应用,2009,24(2):164-166.

Accuracy Analysis and Correction of TRMM Precipitation Data in Shangluo Area

YANG Rongfang^{1,2}, YANG Binyun³, KANG Xiaopu²

(1.Hebei Meteorological Technology Equipment Center, Shijiazhuang 050021, China;

2.Shangluo Laboratory of Climate Adaptive City, Shangluo 726000, China;

3.Hebei Institute of Meteorological Science, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract Based on the observational precipitation data of national meteorological stations and TRMM satellite data in Shangluo area, the applicability of TRMM satellite precipitation data in Shangluo area is analyzed by using statistical analysis methods, such as correlation analysis, deviation and root mean square error for time and space scales. On this basis, the ratio coefficient method is used to correct the monthly precipitation products of TRMM satellite. The results showed that: (1) On the time scale, the monthly precipitation data of TRMM is highly linearly correlated with the observational monthly precipitation data of the stations ($R > 0.9$). (2) Comparing the monthly, seasonal and annual TRMM precipitation with station precipitation, the determination coefficient R^2 is more than 0.8 with a higher goodness of fit, and the seasonal precipitation has a better fit result than monthly precipitation. (3) The ratio coefficient method is used to correct the deviation of TRMM precipitation products, and the results show that the $RMSE$ and MAE of the TRMM monthly precipitation are less than 2.0 mm and 1.5 mm, respectively, the determination coefficient is close to 1. The TRMM monthly precipitation have the same trends of time series and distribution regularities with the observations, and with a higher goodness of fit. In general, the TRMM monthly precipitation tend to underestimate precipitation in month with high precipitation, on the contrary, overestimate the precipitation. Through the accuracy evaluation and revision of TRMM satellite precipitation products in Shangluo area, it provides an effective supplement for the surface precipitation data in this area.

Key words TRMM precipitation; Shangluo area; accuracy evaluation; ratio coefficient method; correction