

罗布坚参, 翟盘茂, 假拉, 等. 2015. 青藏高原测站降水与 TRMM 估测降水一致性评估. 气象, 41(9):1119-1125.

# 青藏高原测站降水与 TRMM 估测降水一致性评估<sup>\* 1</sup>

罗布坚参<sup>1</sup> 翟盘茂<sup>2</sup> 假拉<sup>1</sup> 吴璐<sup>3</sup> 赤曲<sup>1</sup> 次旦巴桑<sup>1</sup>

1 西藏自治区气象台, 拉萨 85000  
2 中国气象科学研究院, 北京 100081  
3 河南省气候中心, 郑州 450003

**提 要:** 利用 124 个测站 2011—2012 年 6—8 月逐小时降水资料, 分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  的 TRMM 估测降水和 DEM 高程数据, 采用相关系数、相对误差和准确性指标, 分析了青藏高原 TRMM 估测降水整体表现能力及海拔高度对降水估测影响。结果表明: TRMM 估测降水在青藏高原整体趋势较一致, 降水量级偏大, 次数偏多; 平均无降水准确率远高于平均有降水准确率, 漏测率低而空测率高, 降水量大的测站 TRMM 估测能力相对强。青藏高原上大部分测站处于相对低洼(河谷)地带, 海拔高度差较小的区域 TRMM 估测降水与测站降水误差小, 较大的区域误差则大。

**关键词:** 青藏高原, TRMM, 平均 3 h 降水量, 海拔高度差

**中图分类号:** P468      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.09.009

## Consistency Evaluation for Observation and TRMM Precipitation Estimation in Tibetan Plateau

LUO Bujiancan<sup>1</sup> ZHAI Panmao<sup>2</sup> JIA La<sup>1</sup> WU Lu<sup>3</sup> CHI Qu<sup>1</sup> CI Danbasang<sup>1</sup>

1 Tibet Meteorological Observatory, Lhasa 85000  
2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081  
3 Henan Climate Centre, Zhengzhou 450003

**Abstract:** Using hourly precipitation observation data from 124 stations during the period from June to August, 2011—2012, TRMM estimated precipitation data with  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  resolution, DEM elevation data, the correlation coefficient, relative error and accuracy index, the TRMM precipitation estimate ability in Tibetan and the elevation effect on precipitation estimation are analyzed. The results show that TRMM precipitation estimation trend in the plateau is consistent with larger precipitation intensity and more frequency. The average accuracy without precipitation is much higher than mean accuracy rate of precipitation, the missing rate is lower and false alarm is higher. The TRMM data have better estimate ability on the observation station with more rains. The observing sites of Tibetan are mostly located in relatively low-lying area (valley). When the elevation error between observing stations and surrounding areas is small, the precipitation error between TRMM and observation is small. On the contrary, precipitation error becomes larger when the elevation error is larger.

**Key words:** Tibetan Plateau, TRMM, 3 h mean precipitation, elevation error

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41175080)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417205)和气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011Z08)共同资助  
2014 年 6 月 11 日收稿; 2015 年 7 月 1 日收修定稿  
第一作者: 罗布坚参, 主要从事高原天气研究. Email: tbhen@163.com

## 引言

青藏高原平均海拔高度 4000 m 以上,地形复杂多样,地势起伏很大,其独特的地貌形态和复杂的大气环流系统造成了降水的复杂性,年降水量空间分布由东南向西北递减。这种分布主要受大气环流和地形的共同影响,如雅鲁藏布江下游地区是因西南季风爬坡形成丰沛降水,喜马拉雅山脉北麓和怒江以东地区形成少雨区与大地形、山脉背风坡局部地形有关,同时高原四季降水分布特征与季节性大气环流有很大关系。在我国,许多学者对青藏高原地形对降水影响做过很多研究(李川等,2006;舒守娟等,2006;董海萍等,2007;张杰等,2008;王永杰等,2010;刘元波等,2011;徐德祥等,2014a;2014b;胡亮等,2010;王敏等,2012;Duo et al., 2007;周胜男等,2015;刘炜等,2014;庄薇等,2013)。比如舒守娟等(2005)研究表明在相对最大降水高度之下,所谓地形-降水分布剖面一致性,两种不同的地形-降水锁相关系即分别对应青藏高原两种地形-降水分布形态;李子良(2006)研究指出地形降水是水汽、气流和地形相互作用而形成的,小山脉地形降水主要发生在山脉的迎风坡,表现出典型的迎风降水和背风少雨特征;邹捍等(2007)研究表明了陡峭的地形和强烈的地表差异在高原山区形成特殊的局地大气环流系统,在地气交换中起着重要作用。地形局地大气环流是由地形与地表状态调整的大气辐射加热和冷却所驱动,包含多种不同的山地环流成分,与典型山谷风环流不同,具有很强的特殊性,对地气间的交换有重要影响,同时也影响着局地的降水分配。在 TRMM 等卫星估测降水应用方面,国内外很多学者从评估检验、日和月变化及垂直分布等方面做了很多研究(李锐等,2005;白爱娟等,2008;傅云飞等,2008;骆三等,2011;何会中等,2004;穆振侠等,2010;刘俊峰等,2011;郝振纯等,2011;刘元波等,2011;毛江玉等,2012;江志红等,2013;成璐等,2014;邵颖,2014),Wu 等(2012)认为 TRMM 估测降水反映日降水频数的能力优于月降水累积量,在地形相对平坦优于地形复杂区,尤其是青藏高原降水低估明显。以上大多数研究中采用的站点比较少,从而不能很好地反映西藏高原的整体情况,近 2

年西藏高原建立了 124 个自动气象站,对进一步评估 TRMM 估测降水在高原上适用性提供了基础。本文利用西藏 124 个自动站 2011—2012 年 6—8 月逐小时降水资料,研究 TRMM 估测降水与测站降水在 3 h 时间尺度上的一致性评估,结合 DEM 高程数据,研究 TRMM 估测降水对不同海拔高度测站降水的真实反映能力。

## 1 资料及处理方法

### 1.1 基本资料

#### 1.1.1 自动站降水资料

资料由西藏自治区气象局网络中心提供。考虑固态降水复杂性、建站时间不同和资料不稳定性等实际问题,采纳了 2011—2012 年 6—8 月 124 个自动气象站逐小时降水资料。质量控制方法引用了任芝花等(2010)适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法,具体方法为:(1)界限值检查:西藏高原区域界限值为  $0\sim 85\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,超越该界限值范围数据为错误。(2)内部一致性检验:指同一时间观测的气象要素记录之间关系必须符合一定规律的检查,比如每日逐小时降水量累加远远超出日降水量,则认为数据可疑。(3)时间一致性检验(连续无变化检查):由于测量仪器故障,雨量计漏斗部分堵塞,承水器收集的降水以匀速渗漏的方式进入翻斗计量,报文上传重复等因素导致连续多个时次出现同一个数据为错误。总样本有 1472 个,经质量控制 1420 个样本合格,故对 1420 各样本进行了统计分析。

#### 1.1.2 DEM 高程数据

DEM 高程数据由美国国家航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM 数据,经过处理制成的数字地形高程模型(DEM),该测量数据覆盖中国全境,分辨率达到 100 m。

#### 1.1.3 TRMM 估测降水资料

TRMM 测雨产品 3B42 是 TRMM 卫星与其他卫星联合反演的降水产品,提供全球格点降水资料。该数据的存档和分发由 Goddard 分布式数据档案中心负责,分发由美国国家航空航天局(NASA)的地球科学事业(ESE)战略计划资助。3B42 算法是由 TRMM 科学小组开发的一种综合降水评估算

法,它结合了 2B31、2A12、微波成像专用传感器(SSMI)、改进的微波扫描辐射计(AMSR)、高级微波探测器(AMSU)等多种被认为是高质量的降水评估算法,并对地球同步红外观测系统获得的红外辐射资料进行了校准。要素有 2 项,降雨量和相对误差。时间分辨率为 3 h,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,区域覆盖范围为准全球  $50^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{S}$ 、 $180^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 。

1.2 处理方法

1.2.1 地形处理

通过 Arcgis + Envi 软件对 DEM 数据进行分析。首先通过测站所在位置的经纬度在 DEM 数据上进行定位,以测站所在点为中心,选取半径为 40 km 圆形范围(由于高原地区大部测站之间直线距离大于 25 km)(图 1),提取该圆形范围内所包含的每个格点高度数据(图 1 左下角),计算平均高度值,得出与测站高度值之差。

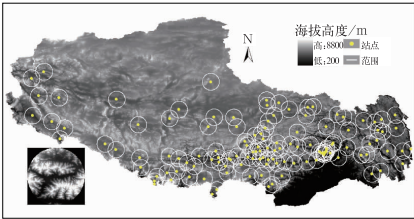


图 1 西藏高原测站及周围  
40 km 圆形范围分布

Fig. 1 Distribution diagram of the Tibetan Plateau sites and their 40 km circular range

1.2.2 TRMM 估测降水与测站降水时空匹配

由于 TRMM 估测降水是格点数据,而测站降水资料是站点资料,无法直接把 TRMM 估测降水资料与测站降水资料进行对比检验。本文参考翟盘茂等(1997),将格点与该格点所包含测站进行固定网格“Frozen Grid”比对方法。但是考虑西藏高原测站所处地形复杂,受山顶与山谷、迎风坡与背风坡、局地对流性降水及空间分布不均等影响而降水量级不同,本文对该方法进行了修改。具体方法如下:如果格点内所包含的测站个数  $\geq 1$ ,则不同测站降水资料与同一个格点数据进行分别比较。这样可以保证复杂地形对测站本身降水的影响,更好地检验 TRMM 估测降水准确性。由于 TRMM 产品 3B42 降水数据为平均 3 h(GMT)降水量,为了保证

与测站降水量级一致,对测站逐小时降水量进行了平均 3 h 降水量计算,把 1 天 24 h 按照 3 h 分为 8 个时间段,分别为 02 时刻(01—03 时)、05 时刻(04—06 时)、08 时刻(07—09 时)、11 时刻(10—12 时)、14 时刻(13—15 时)、17 时刻(16—18 时)、20 时刻(19—21 时)、23 时刻(22—00 时,即次日),并把 TRMM 估测降水资料时间调整为 GMT + 8,这样可以保证降水量和时间一致性。

1.2.3 统计方法

采用相关系数( $R$ )、相对偏差( $Bias$ )、有降水准确率( $POD$ )、空测率( $FAR$ )、无降水准确率( $PODN$ )、漏测率( $FARN$ )等统计方法,计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}) \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}}$$
$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n S - \sum_{i=1}^n G}{\sum_{i=1}^n G}$$
$$POD = \frac{A}{A + C}$$
$$FAR = \frac{B}{A + B}$$
$$PODN = \frac{D}{B + D}$$
$$FARN = \frac{C}{C + D}$$

式中,  $S_i$  代表第  $i$  个 TRMM 估计降水量,  $G_i$  代表第  $i$  个测站降水量,  $\bar{S}$  代表 TRMM 估测平均降水,  $\bar{G}$  代表测站平均降水,  $N$  代表样本数量,  $(A + C)$  表示测站降水总次数,  $(A + B)$  表示 TRMM 估测降水总次数,  $(B + D)$  表示测站无降水总次数,  $(C + D)$  表示 TRMM 估测无降水总次数。

表 1 测站降水与 TRMM 估测降水对照表

Table 1 Comparison between site observed precipitation and TRMM estimated precipitation

测站		有	没有
TRMM	有	A	B
	没有	C	D

注: A: TRMM 估测有降水,测站有降水; B: TRMM 估测有降水,测站无降水; C: TRMM 估测无降水,测站有降水; D: TRMM 估测无降水,测站无降水

Note: A: TRMM estimates of precipitation and ground observed precipitation; B: TRMM estimates of precipitation, and ground observation without precipitation; C: TRMM estimates without precipitation, and ground observed precipitation; D: TRMM estimates without precipitation, and ground observation without precipitation

## 2 结果分析

### 2.1 平均 3 h 降水量分布

西藏年降水量为 66.3~894.5 mm,呈自东南向西北递减分布,其中东部的波密大于 800 mm,西部的阿里地区不足 200 mm。西藏降水高度集中在 5—9 月,占全年降水量的 80%~95%。大部分地区最长连续降水(连续每天出现 $\geq 0.1$  mm 降水)时段最早开始于 6 月中旬,最迟结束在 8 月下旬,把 6—8 月定义为西藏主汛期。图 2 给出 2011—2012 年 6—8 月西藏平均 3 h 降水量分布,可以看出西藏高原平均 3 h 降水量不到 1 mm,西藏西南部和西藏东南部大于 0.19 mm。西部地区不足 0.07 mm。平均 3 h 降水量分布与年降水量分布基本一致,大致代表了西藏主汛期(6—8 月)降水量分布特征。

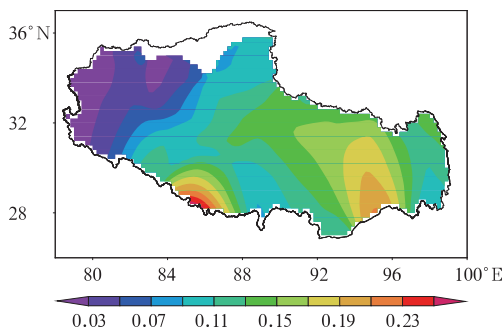


图 2 西藏高原 2011—2012 年(6—8 月)

平均 3 h 降水量(单位: mm)分布

Fig. 2 3 h average of precipitation (unit: mm)

from 2011 to 2012 (from June to August)

in Tibetan Plateau

### 2.2 海拔高度差分布

以 40 km 圆形区域范围内所有 DEM 格点海拔高度的平均值与测站海拔高度的差值定义为海拔高度差。从海拔高度差情况来看(图 3),西藏高原上 98.39% 的测站处于相对低洼(河谷)地带,平均海拔高度差为 745 m。从整体来看海拔高度差自西北向东南和南部逐渐加大,喜马拉雅山脉和东部地区(除色季拉山高山站外)大于 1000 m,其中西藏东南部达到 1500 m 以上;西藏东北部和雅鲁藏布江一线及西部地区为 500~1000 m;西藏北部和西北部在 0~500 m;西藏东部林芝地区色季拉山测站为高

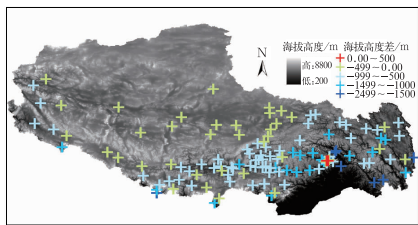


图 3 测站海拔与周围地形平均海拔落差分布

Fig. 3 Distribution of average elevation difference between the elevation of station and the surrounding terrain

山站,该测站海拔高于周围海拔。

为了进一步分析西藏高原测站周围地形复杂性,选取位于西藏西部、中部、东部和东南部的改则(图 4a)、拉萨(图 4b)、八宿(图 4c)和墨脱(图 4d)4 个站为代表,以测站为中心半径 40 km 圆形范围 DEM 高程数据 14 万个格点高度值进行了分析。由图可见,4 个站基本能表现测站周围地形的复杂性,西北部地区海拔高度差不大,西藏中部、东部和东南部地区高于测站海拔的格点数远远大于接近测站海拔格点数,尤其是东南部地区更为突出,其中墨脱站周围格点最大高度与最小高度相差达到 7100 m,说明高原内部呈现出自西北向东部和南部地形落差逐渐加大的情况,特别是中东部和南部高山交错复杂的地貌反映明显。显然,这种局地复杂地形,势必导致测站降水和 TRMM 估测面元降水量之间出现差异。

### 2.3 TRMM 估测降水与测站降水相关性评估

TRMM 估测降水评估检验相关系数和相对偏差分布(图 5)上看,西藏高原平均相关系数为 0.35,相关系数大于 0.30 以上测站数占总测站的 73%。所有测站相关系数通过了 0.01 的显著性水平检验。西藏中北部、沿喜马拉雅山脉北坡及东南部地区相关系数低于 0.30,最低为 0.08;西藏西北部、东北部和沿雅鲁藏布江一带相关系数大于 0.30,其中西藏东部的个别测站最大可以达到 0.50~0.59。西藏高原平均相对偏差为 52%,TRMM 总体估测偏大,主要在高原西部、沿雅鲁藏布江以南和高原东北部偏大显著,其中有 8 个站大于 200%;冈底斯山至念青唐古拉山以北相对偏差在 -15%~15%,为正常范围;TRMM 估测降水偏小的测站较少且分布较散,但相对偏差在 50%以内。

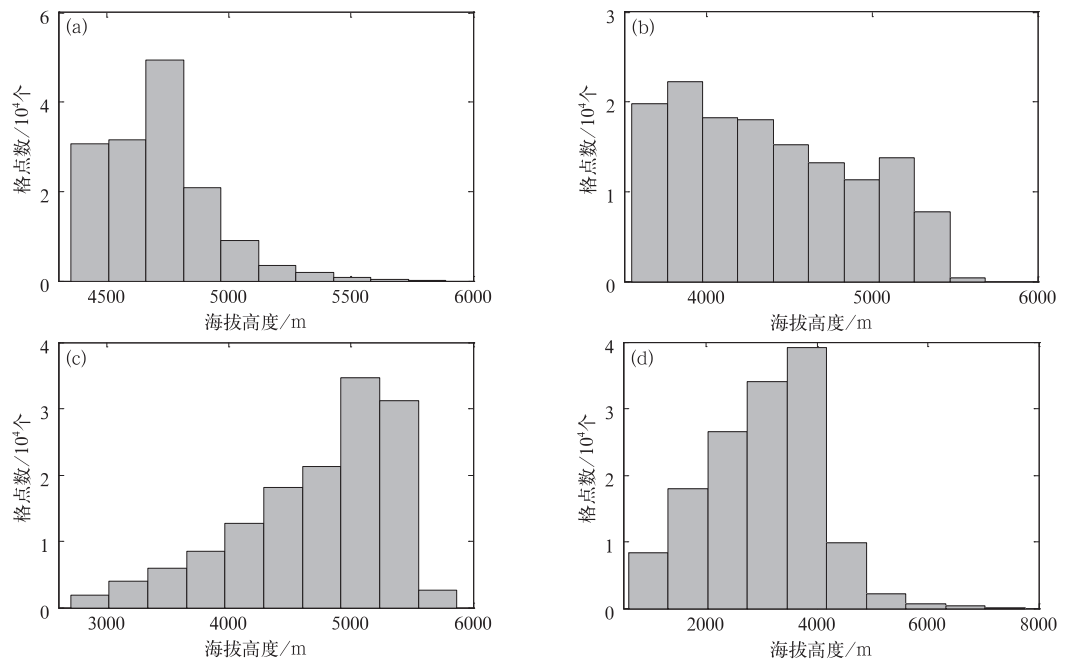


图 4 代表站(a)改则、(b)拉萨、(c)八宿和(d)墨脱 40 km 范围内格点的高度分布  
Fig. 4 Elevation distribution of representative stations near the 40 km circular range of the grids  
(a) Gerze, (b) Lhasa, (c) Baxoi, (d) Motuo

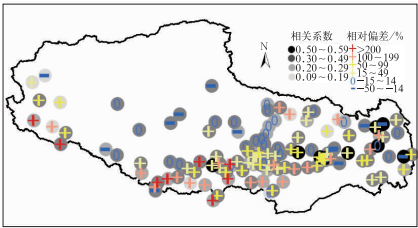


图 5 TRMM 估测降水评估检验  
相关系数和相对偏差分布  
Fig. 5 The correlation coefficient and  
relative deviation distribution of TRMM  
estimation of precipitation

以上分析表明, 西藏高原中北部、西北部、雅鲁藏布江东段和东北部相关系数 $\geq 0.3$ , 相对偏差在 $-50\% \sim 15\%$ , TRMM 估测降水与测站降水一致性较高, 其余地区差异比较大。

2.4 TRMM 估测降水准确性评估

西藏高原平均有降水准确率为 50%, 大于平均值区域与相关系数较大、相对偏差较小分布结果较一致, 西藏高原西部、雅鲁藏布江中游和东部有降水准确率小于 50% (图 6a); 空测率总体平均为 62%, 其中雅鲁藏布江一线、东北部和东部空测率较小, 相对高值位于西藏高原北部、与不丹交界附近及西部

(图 6b); 无降水准确率在雅鲁藏布江大拐弯下游、西藏南部与不丹国交界附近和西北部较小, 其余地区都在 70% 以上, 特别是西部和东部在 90% 以上 (图 6c); 漏测率除雅鲁藏布江大拐弯东侧相对高外, 其他地区低于 18% (图 6d)。从以上对比评估情况看, 指标的高低与西藏主汛期平均降水量和测站海拔高度差等有一定关系。

2.5 TRMM 估测能力与地形、平均降水量关系

不同海拔高度差上相关系数和相对偏差分布 (图 7) 可以看出, 低于周围环境 600~750 m 区域测站降水与 TRMM 估测降水之间的相关系数在 0.35 以上, 相对偏差也小, 说明该海拔高度差范围内 TRMM 估测降水与测站降水较为一致; 海拔高度差在 200~400 m 的相对平缓地带相关系数较高, 相对偏差 $\leq 50\%$ , 两者分布趋势比较一致; 从海拔高度差 $< 200$  m 开始, 相关系数振幅比较大, 相对偏差为负值的占多数, 但在一致性较好的范围内; 在海拔高度差 $> 1500$  m 以上测站, 相关系数平均达到 0.4, 而 TRMM 估测降水从异常偏大迅速向明显偏小过渡, 由于海拔高度差 $> 1500$  m 以上测站主要位于西藏的东南部 and 沿喜马拉雅山脉南坡, 这些区域降水量明显比其他测站多。因此, 在分析海拔高度差影



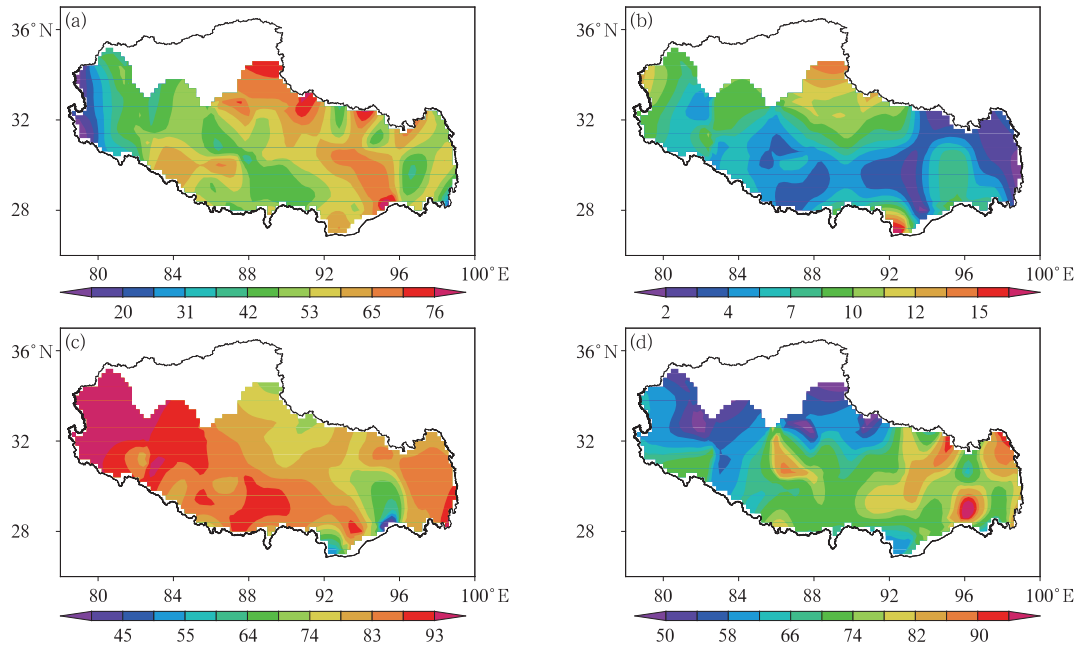


图 6 青藏高原 2011—2012 年(6—8 月)TRMM 估测降水能力  
(a) 有降水准确率, (b) 空测率, (c) 无降水准确率, (d) 漏测率

Fig. 6 TRMM estimated rainfall capacity of the Tibetan Plateau in 2011—2012 (from June to August)  
(a) accuracy rate of precipitation, (b) false alarm, (c) accuracy rate of no precipitation, (d) missing rate

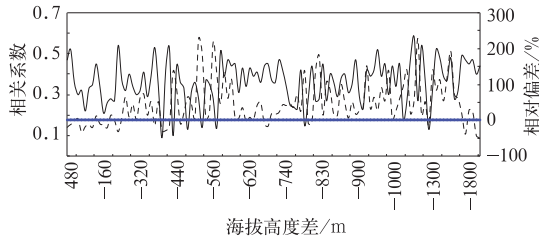


图 7 海拔高度差与相关系数、相对偏差关系  
(黑色实线为相关系数,点线为相对偏差,  
黑色直线为相对偏差 0 线)

Fig. 7 Relationship diagram of elevation difference, correlation coefficient and relative deviation  
(Black solid line is the correlation coefficient, dotted line is the relative deviation, solid blue line is the 0 line of relative deviation)

响时也需要进一步研究相关系数、相对偏差与测站平均降水量的关系。

从主汛期平均降水量与相关系数、相对偏差情况看(图 8),TRMM 估测降水与测站降水之间相关系数随着降水量增加而增加,相对偏差随降水量增加而减小。测站平均降水量在 200 mm 以下,相关系数和相对偏差振幅很大; $>200$  mm 以上开始相关系数小幅升高,相对偏差逐渐减小,在 300 mm 开始

相对偏差减小得更加明显,主要以零附近正偏差占主导,相关系数保持在高值区。平均降水量 $>500$  mm 出现了负偏差,说明 TRMM 估测降水比测站降水偏小,但偏小范围在 50%之内。总之,TRMM 估测降水整体偏大,在实际测站平均降水量大的区域 TRMM 估测降水与测站降水之间具有较好的一致性。

总之,西藏西北部有降水准确率较高,这与该区域海拔高度差较小,地势较为平坦有关,同时由于该区域平均降水量少,也会导致空测率高。西藏东南部(尤其是雅鲁藏布江大拐弯及下游区域)是平均降

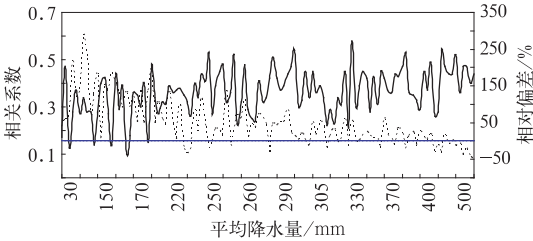


图 8 主汛期平均降水量与相关系数、相对偏差关系  
(说明同图 7)

Fig. 8 Relationship diagram of mean precipitation, correlation coefficient and relative deviation in the main rainy season  
(Illustration is same as Fig. 7)

水量最大的区域,这与该区域有降水准确率高、无降水准确率低和漏测率高的指标相一致。西藏其余地区受海拔高度差和降水量的共同影响有降水准确率较西北部和东南部小。西藏西北部测站分布稀疏,今后利用 TRMM 估测降水对天气气候分析具有一定的参考依据。

3 结论与讨论

(1) 西藏高原上绝大多数测站处于低洼(河谷)地带,海拔高度差平均为 745 m。西藏西北部小于 500 m,东部地区和沿喜马拉雅山脉南坡大于1500 m,个别地方达到 2400 m,从整体来看海拔高度差自西北向东南和南部逐渐加大。西藏高原中东部和南部高于测站海拔的格点数远远大于接近测站海拔格点数,表现出了明显的谷地和高山交错复杂地貌。

(2) 西藏高原上 TRMM 估测降水与测站降水平均相关系数为 0.35,东部地区大于中西部地区,最大可以达到 0.50~0.59;平均相对偏差为 52%,总体估测偏大;西藏高原中北部、西北部、雅鲁藏布江东段和东北部相关系数≥0.3,相对偏差在-50%~15%,说明以上区域 TRMM 估测降水量与测站降水一致性较高,其余地区差异性比较大。

(3) TRMM 估测降水与测站降水之间,在海拔高度差较小的区域误差小,较大的区域误差则大;相关系数随着降水量增加而增加,相对偏差随降水量增加而减小。

参考文献

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.

成璐,沈润平,师春香,等. 2014. CMORPH 和 TRMM3B42 降水估计产品的评估检验. 气象,40(11):1372-1379.

董海萍,赵思雄,曾庆存. 2007. 低纬高原地形对强降水过程影响的数值试验研究. 气候与环境研究,12(3):381-396.

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.

郝振纯,童凯,张磊磊,等. 2011. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析. 水文,31(5):18-23.

何会中,崔哲虎,程明虎,等. 2004. TRMM 卫星及其数据产品应用. 气象科技,32(1):13-18.

胡亮,杨松,李耀东. 2010. 青藏高原及其下游地区降水厚度季、日变化的气候特征分析. 大气科学,34(2):387-398.

江志红,卢尧,丁裕国. 2013. 基于时空结构指标的中国融合降水资料

质量评估. 气象学报,71(5):891-900.

李川,陈静,何光碧. 2006. 青藏高原东侧陡峭地形对一次强降水天气过程的影响. 高原气象,25(3):442-450.

李锐,傅云飞. 2005. Gpcp 和 TRMMpr 热带月平均降水的差异分析. 气象学报,63(2):146-160.

李子良. 2006. 地形降水试验和背风回流降水机制. 气象,32(5):10-15.

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.

刘炜,周顺武,智海. 2014. 1998 年夏季青藏高原东南部降水 30~60 d 低频振荡特征. 气象,40(5):530-540.

刘元波,傅巧妮,宋平,等. 2011. 卫星遥感反演降水研究综述. 地球科学进展,26(11):1162-1172.

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

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.

穆振侠,姜卉芳,刘丰. 2010. 基于 TRMM/TMI 与观测测站的降水垂直分布差异性探讨. 干旱区研究,27(4):515-521.

任芝花,赵平,张强,等. 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. 气象,36(7):123-132.

邵颖,史岚,张狄,等. 2014. 雨量计与星载测雨雷达资料结合的降水估算方法. 气象科学,34(4):390-396.

舒守娟,喻自凤,王元,等. 2005. 西藏地区复杂地形下的降水空间分布估算模型. 地球物理学报,48(3):535-542.

舒守娟,王元,李艳. 2006. 西藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究. 水科学进展,17(5):585-591.

王敏,周才平,吴良,等. 2012. 遥感估算降水在青藏高原中的应用研究. 高原气象,31(5):1215-1224.

王永杰,马耀明,朱志鹏,等. 2010. 藏东南地区鲁朗河谷近地层气象要素变化特征. 高原气象,29(1):63-69.

徐祥德,王寅钧,赵天良,等. 2014a. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征. 气象,40(10):1165-1173.

徐祥德,赵天良, Lu Chungu, 等. 2014b. 青藏高原大气水分循环特征. 气象学报,72(6):1079-1095.

翟盘茂,任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化. 气象学报,55(4):418-429.

张杰,李栋梁,王文. 2008. 夏季风期间青藏高原地形对降水的影响. 地理科学,28(2):235-240.

周胜男,罗亚丽,汪会. 2015. 青藏高原、中国东部及北美副热带地区夏季降水系统发生频次的 TRMM 资料分析. 气象,41(1):1-16.

庄薇,刘黎平,胡志群. 2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用. 气象,39(8):1004-1013.

邹捍,周立波,马舒坡,等. 2007. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变化的观测研究. 高原气象,26(6):1123-1140.

Duo Chu, Tundrop Pubu, Ghancan Norbu. 2011. Validation of the satellite-derived rainfall estimates over the Tibet. Acta Meteor Sin,25(6):734-741.

Wu Lu, Zhai Panmao. 2012. Validation of daily precipitation from two high-resolution satellite precipitation datasets over the Tibetan Plateau and the Regions to Its East. Acta Meteor Sin,26(6):735-745.