

李嘉睿, 卢乃锰, 谷松岩. 青藏高原地区 TRMM PR 地面降雨率的修正. 应用气象学报, 2015, 26(5): 636-640.
doi:10.11898/1001-7313.20150513

青藏高原地区 TRMM PR 地面降雨率的修正

李嘉睿¹⁾ 卢乃锰^{2)*} 谷松岩²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081) ²⁾(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要

为掌握并改进青藏高原地区 TRMM 卫星降水雷达 (precipitation radar, PR) 地面降雨率准确度, 统计分析了 2005—2007 年 TRMM PR 2A25 资料和逐小时地面雨量计, 结果表明: 青藏高原地区 TRMM PR 地面降雨率在层云降水时平均偏低 35%, 在对流云降水时平均偏高 42%。Z-R 关系的适用性是 PR 产生偏差的原因之一, 研究将 TRMM PR 层云降水模型中 20℃层 Z-R 关系的初始系数 A 和 b 分别修正为 0.0288 和 0.6752, 对流云降水模型中 20℃层的初始系数 A 和 b 分别修正为 0.0406 和 0.5809, 得到两类降水模型 0℃层与 20℃层之间不同高度 Z-R 关系的更新系数。检验结果表明, 修正降水模型后能够提高青藏高原地面降雨率测量的准确度。

关键词: 青藏高原; 星载雷达; 雨量计; 地面降雨率; Z-R 关系

引 言

降水不仅是全球能量水循环中的重要过程, 也是最难精确观测的气象要素之一。青藏高原地形和下垫面特征复杂, 平均海拔高度约为 4500 m, 降水季节变化显著且受局地因子的影响较大^[1-2]。准确地获取青藏高原地区的降水信息对研究高原天气乃至全球气候变化具有重要意义。

一般认为常规地面雨量计测量结果精确, 但目前青藏高原地区现有雨量计站点分布比较稀疏。在这种情况下, 卫星观测成为获取青藏高原降水信息的主要手段。TRMM 卫星是由美国和日本共同研制的第 1 颗专门用于定量测量热带和亚热带降雨的低轨道卫星^[3-4], 轨道倾角约为 35°, 每天在 40°S~40°N 之间约有 16 条轨道。TRMM 卫星上搭载的降水雷达 (precipitation radar, PR) 为主动式相控阵雷达, 工作频率为 13.8 GHz, 垂直分辨率为 250 m。PR 的扫描宽度约为 220 km, 星下点分辨率约为 4.3 km^[5-7]。

国内外一些学者对 TRMM 卫星测量降水的精度进行了评价。Prat 等^[7]发现在美国南阿帕拉契

山地区 PR 总体上相对雨量计的测量结果偏低 27%, 在某些山区甚至偏低 59%。Barros 等^[8]指出 PR 在低海拔地区判识弱降水的表现好于高海拔地区。刘鹏等^[9]指出, 在我国南方地区地面雨量计测量的日降雨率较 PR 结果偏高。

1 资 料

研究中使用的 TRMM 资料为第 7 版降水雷达 2A25 逐轨数据, PR 2A25 数据集中包含每个像素的经纬度、扫描时间、降水类型以及不同高度的雷达反射率因子与降雨率等变量。雨量计数据采用逐小时的降水观测资料, 青藏高原地区 (25°~40°N, 70°~105°E) 的雨量计分布稀疏, 主要分布在青藏高原东部。在 PR 与雨量计资料匹配过程中, 空间匹配阈值为 0.02°, 并根据 PR 扫描过境时间完成与雨量计资料的时间匹配。

2 TRMM PR 地面降雨率的误差分析

TRMM PR 降水产品分为层云降水、对流云降水和其他降水 3 类。引入相关系数、均方根误差和

2015-01-09 收到, 2015-05-28 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (41475030), 公益性行业 (气象) 专项 (GYHY20130617)

* 通信作者, email: lunm@cma.gov.cn

相对误差等统计量分别研究层云及对流云降水时 PR 地面降雨率的误差特征。利用 2005—2007 年

TRMM PR 与雨量计匹配资料的计算结果见表 1。

表 1 PR 地面降雨率与雨量计资料对比

Table 1 The comparison of PR surface rainfall rates and rain gauge rainfall rates for different rain types

降水类型	相关系数 (显著性水平 $\alpha=0.05$)	均方根误差/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	相对误差/%
层云降水	0.64	1.02	-35
对流云降水	0.37	1.40	42

计算结果表明,在 2005—2007 年层云和对流云降水中,PR 降雨率总体上较雨量计偏低 13%,均方根误差为 $1.21 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,与雨量计测量结果的相关系数为 0.43。其中,层云降水时,PR 平均偏低 35%,同时 PR 与雨量计资料的相关性较好,均方根误差较小;对流云降水时,PR 观测结果偏高 42%,与雨量计测量结果相关性较差,均方根误差较大。

3 TRMM PR 2A25 降水模型的修正与检验

星载降水测量雷达主要利用 $Z-R$ 关系获取地面降雨率。 $Z-R$ 关系的形式为 $R = AZ^b$,其中, Z 的单位为 mm^6/m^3 , R 的单位为 mm/h , A 和 b 为系数,不同类型降水 A 和 b 系数不同^[10-12]。TRMM 卫星降水雷达降水反演算法中使用的雨滴谱模型通过收集测量热带地区洋面附近不同位置降水的 $Z-R$ 关系得到^[13],而青藏高原地区的降水特征与热带地区差别很大,直接将热带地区雨滴谱模型和 $Z-R$ 关系应用于青藏高原地区反演降雨率时会遇到非适用问题。

TRMM 2A25 资料在垂直方向上包含 80 层雷达反射率因子和降雨率信息,垂直分辨率为 250 m,对应 80 个不同的 $Z-R$ 关系。但在 PR 的降水模型中没有预先定义所有高度上的 $Z-R$ 关系系数,而是预设了 6 个不同高度上 $Z-R$ 关系中 A 和 b 的初始值(第 7 版 2A25 资料)^[14],其他高度上的参数值 A 和 b 利用这 6 个预设的高度上的初始值通过线性插值得到。其中,由于青藏高原地表温度通常低于 20°C ,这时 PR 降水模型的 20°C 高度层位于地表以下,而 PR 降水模型在近地面高度的 $Z-R$ 关系系数仍按照 0°C 高度层与 20°C 高度层初始的 $Z-R$ 关系系数根据线性插值计算。

为修正 PR 降水模型,研究中在保持 0°C 层 $Z-R$ 初始参数不变的前提下,通过结合降水高度信息调整降水模型中 20°C 高度层初始的 A 和 b ,从而调整 0°C 层与 20°C 层之间不同高度上具体的 $Z-R$ 关系系数,找到总体上 PR 与雨量计测量结果偏差最小的情况,达到 PR 地面降雨率估计结果优化的目的。

选取 2005—2006 年降水样本对降水模型中 20°C 层初始的 A 和 b 进行修正,首先将降水资料按降水类型分类,然后不断调整 20°C 层初始 A 和 b (在初始值 ± 0.1 的范围内,以 0.0001 为步长),并结合降水样本中的高度信息,计算每种 A 和 b 组合时的 F , F 定义^[15]为

$$F = \min \left\{ \sum_i [(S_i - G_i)^2 + |S_i - G_i|] \right\}. \quad (1)$$

式(1)中, G_i 表示雨量计的每小时降水量, S_i 表示根据这种 A 和 b 组合及 PR 近地面雷达反射率因子等信息计算的 PR 地面降雨率。 F 越小,PR 估算地面降雨率结果与雨量计越接近。

最后迭代筛选出使 F 值最小的 20°C 层的 A 和 b ,这时 PR 降水模型估算的地面降雨率与雨量计结果的总体偏差最小,得出 20°C 层最优的 A, b ,再通过插值更新 0°C 层与 20°C 层之间不同高度的 A 和 b ,实现模型修正的目的。表 2 列出修正前与修正后 PR 层云与对流云降水模型中 20°C 高度层初始 A 和 b 。

利用 2007 年降水样本对调整降水模型后的计算结果进行检验,检验样本和参与统计调整降水模型的样本在时间上相互独立。检验过程中,利用调整后的降水模型结合 2007 年 PR 的近地面雷达反射率因子及高度信息等参数能够得到修正降水模型对地面降雨率的估算结果。图 1 是 2007 年 PR 2A25 降水模型与修正 PR 降水模型中 $Z-R$ 关系的对比情况。

表2 PR降水模型中20℃层初始Z-R关系系数

Table 2 Initial Z-R parameters at 20℃ level in the PR rain-profiling model

降水模型	层云降水		对流云降水	
	A	b	A	b
修正前 ^[14]	0.0246	0.6680	0.0421	0.6311
修正后	0.0288	0.6752	0.0406	0.5809

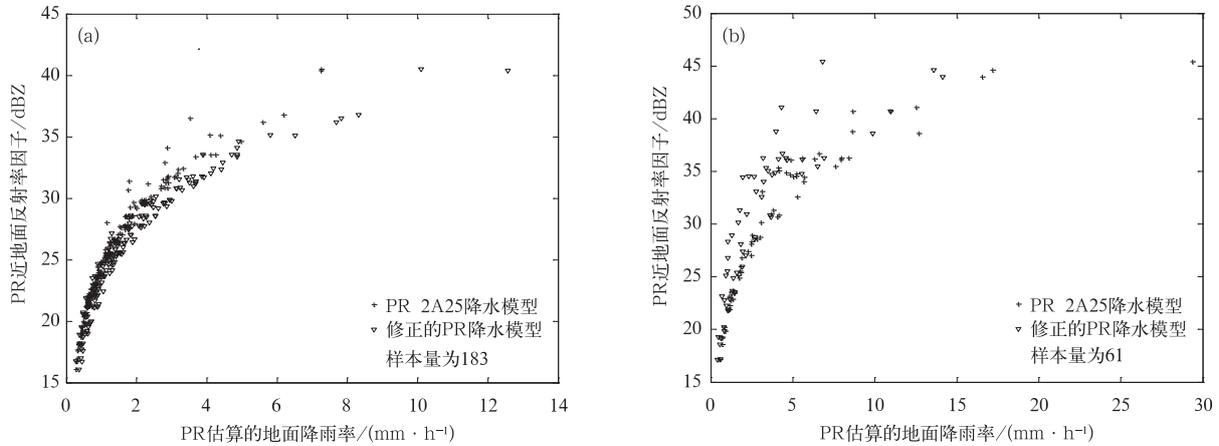


图1 TRMM PR降水模型调整前后近地面雷达反射率因子Z与估算地面降雨率R的关系
(a)层云降水,(b)对流云降水

Fig. 1 The Z-R relationship of TRMM PR at near-surface level before and after the correction
(a)stratiform rain,(b)convective rain

图1反映了Z-R关系的具体变化,对于相同的近地面雷达反射率因子Z,在层云降水时,调整后的PR降水模型倾向于提高地面降雨率的估算值;而

在对流云降水时,调整后的降水模型倾向于降低地面降雨率的估算值。

图2是2007年PR地面降雨率的均方根误差

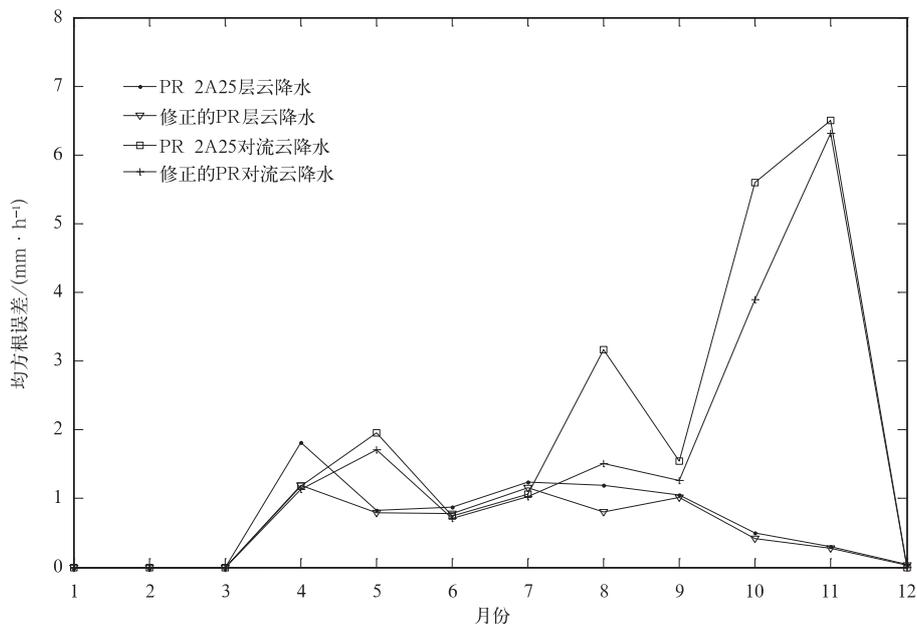


图2 2007年TRMM PR地面降雨率的均方根误差在降水模型修正前与修正后变化特征
Fig. 2 Average root mean square error of TRMM PR surface rainfall rates

before and after the correction in 2007

分别在降水模型修正前与修正后的变化情况。需要说明的是,青藏高原地区 PR 与雨量计的非零降水匹配样本主要集中在 2007 年 5 月、6 月、7 月、8 月和 9 月,而在其他月份样本量较少。尤其是在 1 月、2 月、3 月及 12 月,PR 与雨量计的非零降水匹配样本数几乎为零,图 2 中将其均方根误差标为零值。由图 2 可见,10 月和 11 月对流云降水时平均均方根误差较大,与该月份非零降水匹配样本量较少存在一定关系。此外,对流云降水时 PR 的均方根误差较大且变化较剧烈,层云降水时其值较小且变化相对平缓。利用 2007 年降水匹配样本计算得到,降水模型修正前 PR 地面降雨率的均方根误差在层云与对流云降水时分别为 $1.03 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.63 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,修正 PR 降水模型估算结果的均方根误差在层云与对流云降水时分别降低至 $0.94 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.33 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对于两种类型的降水而言,利用修正 PR 降水模型估算的地面降雨率,总体上更加接近雨量计结果,修正的降水模型可有效减小 TRMM PR 在青藏高原地区估算地面降雨率误差。

4 结 论

青藏高原地区 TRMM PR 2A25 降雨率与雨量计资料存在一定差异,修正 TRMM PR 降水模型可以改善其结果。主要结论如下:

1) 青藏高原地区 TRMM PR 与雨量计降水资料在层云降水时相关性较好,均方根误差较小;在对流云降水时相关性较差,均方根误差较大。2005—2007 年层云和对流云降水中,PR 降雨率总体上较雨量计偏低 13%。其中,层云降水时,PR 平均偏低 35%;对流云降水时,PR 平均偏高 42%。

2) 基于 TRMM PR 地面降雨率在青藏高原地区的偏差特征,通过迭代筛选可以得到 20℃ 层 Z-R 关系新的初始系数,进而更新 0℃ 层与 20℃ 层之间不同高度上 Z-R 关系系数。

3) 地面雨量计测雨结果的独立样本检验表明:修正 PR 降水模型后,青藏高原地区地面降雨率估算的准确度得到改善,为青藏高原地区降水分析奠定了基础。

本文只考虑了星载降水测量雷达在青藏高原地区的降雨测量应用,未来业务工作中星载主、被动微

波载荷联合测量降水将进一步提高青藏高原地区的降水测量精度,有效弥补青藏高原地区测雨能力的不足。

参 考 文 献

- [1] 徐祥德,陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 756-772.
- [2] 杨明,李维亮,刘煜,等. 近 50 年我国西部地区气象要素的变化特征. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 198-205.
- [3] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J Atmos Ocean Technol*, 1998, 15(3): 809-817.
- [4] 游然,卢乃锰,邱红,等. 用 PR 资料分析热带气旋卡特里娜降水特征. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 203-213.
- [5] 陈廷娣,王连仲,窦贤康. TRMM 卫星与机载雷达在降雨反演中的数据对比个例研究. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 454-462.
- [6] 吴庆梅,程明虎,苗春生. 用 TRMM 资料研究江淮、华南降水的微波特性. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 206-214.
- [7] Prat O P, Barros A P. Assessing satellite-based precipitation estimates in the Southern Appalachian mountains using rain gauges and TRMM PR. *Advances in Geosciences*, 2010, 25: 143-153.
- [8] Barros A P, Joshi M, Putkonen J, et al. A study of the 1999 monsoon rainfall in a mountainous region in central Nepal using TRMM products and rain gauge observations. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(22): 3683-3686.
- [9] 刘鹏,傅云飞,冯沙,等. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析. *气象学报*, 2010, 68(6): 822-835.
- [10] Stout G E, Mueller E A. Survey of relationships between rainfall rate and radar reflectivity in the measurement of precipitation. *J Appl Meteor*, 1968, 7(3): 465-474.
- [11] Prat O P, Barros A P. Exploring the transient behavior of Z-R relationships: Implications for radar rainfall estimation. *J Applied Meteor & Climatology*, 2009, 48(10): 2027-2143.
- [12] 史锐,程明虎,崔哲虎,等. 用反射率因子垂直廓线联合雨量计校准估测夏季区域强降水. *应用气象学报*, 2005, 16(6): 737-745.
- [13] Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J Applied Meteor*, 2000, 39(12): 2038-2052.
- [14] Iguchi T, Kozu T, Kwiatkowski J, et al. Uncertainties in the rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *气象集誌*, 2009, 87(2): 1-30.
- [15] 郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验. *热带气象学报*, 2004, 20(2): 192-197.

Correction of TRMM PR Surface Rainfall Rates over the Tibetan Plateau

Li Jiarui¹⁾ Lu Naimeng²⁾ Gu Songyan²⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

In order to reveal and improve the accuracy of surface rainfall rates derived from precipitation radar (PR) on TRMM satellite over the Tibetan Plateau, TRMM PR 2A25 products and hourly rain gauge data from 2005 to 2007 are compared. Results show that PR has a relative error of -35% in stratiform rain and 42% in convective rain over the Tibetan Plateau. The applicability of $Z-R$ relation is one of the cause for the bias of PR. Based on the analysis, the initial coefficients A and b in $Z-R$ relations at 20°C level are modified to 0.0288 and 0.6752 for stratiform rain, respectively, also modified to 0.0406 and 0.5809 for convective rain, thus the $Z-R$ relation at different altitudes between 0°C and 20°C height are updated. Results suggest that the modified models can achieve better accuracy in estimating surface rainfall rates over the Tibetan Plateau.

Key words: the Tibetan Plateau; TRMM PR; rain gauge; surface rainfall rates; $Z-R$ relation