

南京雷达数据的一致性分析和订正^{*1}

朱艺青^{1,2} 王振会^{1,2} 李南² 徐芬³ 韩静² 楚志刚² 张晗昀² 焦鹏程²
ZHU Yiqing^{1,2} WANG Zhenhui^{1,2} LI Nan² XU Fen³ HAN Jing²
CHU Zhigang² ZHANG Hanyun² JIAO Pengcheng²

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室, 南京, 210044
2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044
3. 江苏省气象科学研究所, 南京, 210009

1. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, CMA Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
2. *Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
3. *Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009, China*

2015-11-18 收稿, 2016-02-03 改回.

朱艺青, 王振会, 李南, 徐芬, 韩静, 楚志刚, 张晗昀, 焦鹏程. 2016. 南京雷达数据的一致性分析和订正. 气象学报, 74(2): 298-308

Zhu Yiqing, Wang Zhenhui, Li Nan, Xu Fen, Han Jing, Chu Zhigang, Zhang Hanyun, Jiao Pengcheng. 2016. Consistency analysis and correction for observations from the radar at Nanjing. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(2): 298-308

Abstract The geometry-matching method is applied to analyze the reflectivity from the radar deployed at Nanjing (GR) and that from the Precipitation Radar (PR) onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). In total 245 match-up cases for the period from 2008 to 2013 are obtained and compared using statistical analysis methods. Based on the stability characteristic of TRMM PR, the consistency of radar measurements at Nanjing during the 6-year period is evaluated. The results reveal that the TRMM PR is well corresponding to GR in detecting rainfall. However, GR demonstrated a certain degree of unstable performance from 2008 to 2013. The below-BB-height data from the radar at Nanjing show a "three-stage" feature, i. e., Stage I from January 2008 to March 2010, Stage II from March 2010 to May 2013, and Stage III from May 2013 to October 2013. Distinct differences in overall reflectivity factor can be found among the three stages, and overall reflectivity factor in Stage II is smaller than Stages I and III by 2–3 dB, but overall reflectivity within each stage remains relatively stable. The difference in reflectivity factor between measurements from the radar at Nanjing and that from the TRMM PR varies with increases in echo intensity and shows a linear relationship. The reflectivity factor of TRMM PR surpasses that of radar measurements at Nanjing when intensity echoes are low, while for high intensity echoes the reflectivity factor from the radar at Nanjing surpasses that from TRMM PR. Based on the fitting relationship between reflectivity factors of the two radars, a multiple-segment piecewise linear correction is applied to the reflectivity from the radar at Nanjing. This method can effectively improve the consistency of data from the radar at Nanjing. The difference in overall reflectivity among the three stages is reduced to less than 0.75 dB, while correlation coefficients of mean reflectivity factor for the 245 match-up cases and the 105894 match-up points are both improved. Standard deviations of reflectivity differences (GR-TRMM PR) for the 245 match-up cases and the 105894 match-up points are reduced, too.

Key words TRMM PR, Nanjing Radar, Reflectivity factor, Fitting correction

* 资助课题: 公益性行业科研专项(GYHY201306078)、国家自然科学基金(41275043、41305031)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介: 朱艺青, 主要从事遥感与雷达气象研究。E-mail: 1316jessica@sina.com

通讯作者: 王振会, 主要从事大气探测与大气遥感研究。E-mail: eiap@nuist.edu.cn

摘要 运用几何匹配法处理了南京雷达和热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)上搭载的测雨雷达(Precipitation Radar, PR)的反射率因子探测资料,统计分析了2008—2013年共245个时次的匹配数据。以TRMM PR工作多年持续稳定特征为参照,揭示了南京雷达6 a的探测资料情况。结果表明,南京雷达和TRMM PR探测降水具有较强的一致性,6 a时间里南京雷达存在一定的运行不稳定情况,南京雷达0℃层以下数据存在“3段特征”:时段Ⅰ2008年1月—2010年3月,时段Ⅱ2010年3月—2013年5月,时段Ⅲ2013年5—10月。3个时段之间整体回波强度有差异,时段Ⅱ整体回波强度比时段Ⅰ、Ⅲ偏小2—3 dB;而3个时段内的回波整体保持相对的稳定,南京雷达与TRMM PR的回波强度差值随回波强度的变化呈线性关系;在中低回波值时TRMM PR比南京雷达成大,在中高回波值时南京雷达成比TRMM PR大。基于两种雷达回波强度值的拟合关系,对南京雷达的反射率因子进行分段线性订正,有效地改善了南京雷达的一致性;3个时段回波强度的整体差异减小到0.75 dB以内;在245个匹配时次和105894个匹配点上南京雷达和TRMM PR的反射率因子的相关系数增大,南京雷达-TRMM PR值的标准差减小。

关键词 TRMM PR,南京雷达,反射率因子,拟合订正

中图法分类号 P407

1 引言

中国是暴雨、台风、冰雹等中尺度灾害性天气多发国家,联合多种探测手段对中尺度强降水进行实时监测可提高降水预报的准确性和精确度。随着大气探测技术的发展,新一代多普勒雷达、气象卫星技术的推广应用对降水监测的能力有了很大的提升。由于单站雷达的探测范围有限,多部天气雷达组网联合探测是提高对中尺度灾害性天气的研究以及预警能力有效的手段之一。但各站点雷达受到如雷达参数欠定标、波束阻挡、杂波干扰、雷达测雨空间不均匀(张凌等,2003)、探测目标物的方向不同等众多因素的影响,导致各站点雷达观测结果的不同,参与组网的多部雷达的数据一致性很差。尤其中国天气雷达组网的各雷达之间没有做统一标定,雷达资料一致性较差,雷达拼图效果不好,在数值模式同化的业务应用中受到限制(史锐等,2004)。

1997年发射成功的热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)上携带的测雨雷达(Precipitation Radar, PR),可提供三维降水信息,其覆盖面积广,可覆盖38°N以南的区域(王振会,2001;何会中等,2004),工作持续稳定运行多年,经过了美国地基主动式雷达定标系统的精确定标(GSFC,2011),星载雷达测量数据一致性好、可靠性较高(Kim, et al, 2014),为TRMM PR和中国多部地基雷达多年探测的降水回波资料比较提供了可能。

中国,TRMM PR资料已经被用于与地面观测资料的对比分析,例如:对武汉(Cheng, et al, 2001)、青藏高原(冯锦明等,2001)、阜阳(王成刚等,

2003)、香港(何会中等,2002)、上海(王振会等,2015)等地降水个例的回波结构、强度等特征分析;联合其他探测资料如TRMM上搭载的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)、地面雨量计等分析中国南方多年降水特性(刘鹏等,2010,2012;成璐等,2014)、暴雨个例(傅云飞等,2003;李德俊等,2010;周森等,2014)、冰雹个例(何文英等,2006)、雷电和降水个例(马明等,2012)等。这些研究主要是集中在使用TRMM PR资料分析天气过程个例或气候降水特征,对TRMM PR和地基雷达进行长期稳定性和偏差对比分析目前在中国还很少。

国际上,有大量的关于美国雷达WSR-88D与TRMM PR的对比验证工作,尤其是Texas、Florida、Kwajalein、Darwin四个验证站中WSR-88D雷达数据。TRMM PR与地基雷达的匹配方法主要有两种:网格匹配法(Bolen, et al, 2000; Heymsfield, et al, 2000; Anagnostou, et al, 2001; Liao, et al, 2001; Wang, et al, 2009)和空间匹配法(Schumacher, et al, 2000; Houze, et al, 2004)。2008年以后,全球降水测量计划(Global Precipitation Measurement, GPM)组建的校验网络(Validation Network, VN)系统采用更优越的几何匹配法(Schwaller, et al, 2011; GSFC, 2011; 王振会等, 2015)。Kim等(2014)使用校验网络系统对韩国境内多部地基雷达和TRMM PR进行匹配。

基于以上的研究,可以把多年稳定运行的TRMM PR作为中国地基雷达数据一致性分析的参考标准,通过对单站地基雷达和TRMM PR进行时空匹配,分析地基雷达的一致性、稳定性和偏差,提高星载雷达和单站地基雷达的一致性,从而可

以提高中国目前雷达网资料的一致性。

文中使用 2008—2013 年南京龙王山雷达和 TRMM PR 资料,利用几何匹配法对两雷达进行时空匹配,验证两雷达探测回波的一致性以及多年工作的稳定性,定量分析两雷达的反射率因子差异,拟合两雷达反射率因子的偏差订正关系并对南京雷达回波值做线性订正。统计分析多年南京雷达数据的订正效果,并对 2010 年 6 月 8 日 16 时 08 分(世界时,下同)和 2010 年 3 月 23 日 07 时 03 分两个匹配时次 TRMM PR 与订正前后的南京雷达回波特征进行对比分析。

2 雷达数据和匹配方法

2.1 雷达数据

2.1.1 TRMM PR

TRMM 的轨道倾角约为 35° ,在高度为 350 km (2001 年 8 月调整为 403 km)的圆形轨道上运行,探测纬度范围 38°S — 38°N ,每天环绕地球 16 圈。TRMM PR 探测时以 $\pm 17^\circ$ 天顶角、垂直于轨道的方向进行扫描,扫描宽度为 215 km,发射波长为 2.2 cm 的电磁波(Ku 波段),最小可测的反射率因子值为 18 dBz (Kozu, et al, 2001),探测精度在 ± 1 dBz。

本研究使用的 TRMM PR 探测数据产品是 2008—2013 年第 7 版的 1C21 和 2A25,分辨率均为 $4.5\text{ km} \times 4.5\text{ km} \times 250\text{ m}$,数据以地球坐标系下的经度、纬度和高度的格式保存。其中,一级产品 1C21 是 TRMM PR 探测得到的反射率因子;二级产品 2A25 是经过衰减订正的反射率因子(王振会, 2001),2A25 是 1C21 经过 Hitschfeld-Bordan 方法 (Hitschfeld, et al, 1954)和地面参考法 (Meneghini, et al, 2000)衰减订正等处理方法得到的。在比较 TRMM PR 和地基雷达的反射率因子时,需要充分考虑 TRMM PR 的衰减、质量控制等方面的影响。因此,使用经过衰减订正、质量控制、波束订正以及地物杂波剔除等方面处理的 2A25 与地基雷达的反射率因子作对比,1C21 仅作为备查资料。文中所使用的 TRMM PR 数据产品以及数据说明均可通过 TSDIS (TRMM Science Data and Information System) 下载。

2.1.2 地基雷达

南京雷达(CINRAD-SA,记为 GR)位于龙王山

(32.19°N , 118.64°E)上,海拔高度为 138.2 m,发射波长为 10 cm 的电磁波(S 波段),以体扫模式得到三维空间回波资料,在有效探测半径(230 km)内反射率因子产品的分辨率约为 $1^\circ \times 1\text{ km}$,数据以极坐标格式存储。

文中使用的 2008—2013 年南京地基雷达的反射率因子产品经过了 SWAN (Severe Weather Nowcast System)系统的质量控制处理,有效地过滤了孤立噪声回波并抑制了非气象回波(吴涛等, 2013),提高了地基雷达数据的准确性和可靠性。

2.2 几何匹配法介绍

在 TRMM PR 探测的纬度范围内,任意给定地基雷达地理位置每天会有 1—3 次的观测轨道在其附近经过(Negri, et al, 2002)。地基雷达和 TRMM PR 的扫描方式和数据存储格式不同,使用几何匹配法对两种雷达的反射率因子数据进行重采样,地基雷达和 TRMM PR 的扫描波束在几何空间上重合的且回波均匀的空间即为有效匹配点(图 1)。每一个匹配空间的水平分辨率是 TRMM PR 星下点的水平分辨率(PR 波束展宽),垂直分辨率是南京雷达探测资料距雷达中心不同距离处的垂直分辨率(南京雷达波束展宽)。匹配算法由全球降水计划(GPM)的校验网络系统完成,具体介绍可参考 Schwaller 等(2011)和王振会等(2015)。

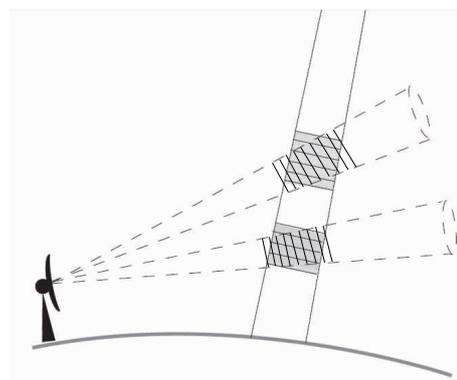


图 1 几何匹配法示意图(Schwaller, et al, 2011)

(实线是 PR 扫描波束,虚线是地基雷达波束,阴影部分是重合区域)

Fig. 1 Schematic program of the geometry-matching method (Schwaller, et al, 2011) (Solid lines represent PR scanning beam, and dotted lines represent GR sweeps; the shaded area represents overlap area)

文中南京雷达与 TRMM PR 的匹配在以南京雷达为中心、半径为 100 km 的区域内进行。当一

个时次里两雷达的有效匹配点超过 100 个,该时次即为有效匹配时次。匹配点的 TRMM PR 和南京雷达反射率阈值分别设为 18 和 15 dBz (Morris, et al, 2011), 否则为无效匹配点。对南京雷达和 TRMM PR 进行时间匹配时,根据 TRMM PR 飞过南京雷达位置的时间(精确到秒)以及南京雷达体扫的开始时间(精确到分),尽可能挑选与 TRMM PR 飞过时间最邻近的南京雷达体扫数据。由于地基雷达 6 min 产生一个体扫数据,因此 TRMM PR 扫过匹配区域的时间与南京雷达开始体扫时间的差在 ± 6 min 内才可能有效。6 min 时间窗是指理论上 TRMM PR 和南京雷达探测的时间差最大为 6 min。文中统计的 6 a 的匹配时次南京雷达和

TRMM PR 的探测时间差平均值为 1.5 min。

0℃层亮带及 0℃层以上的回波强度会因为粒子形状、波束相交重合度低等因素而影响地基雷达与星载雷达对比的复杂性。因此,主要研究 0℃层亮带以下的有效匹配数据。

3 统计分析

3.1 六年样本数据

经资料海选以及校验网络系统的匹配,6 a (2008—2013 年)中 0℃层亮带以下共有 260 个有效匹配的时次,具体的每年有效匹配时次数见表 1,平均每年的有效匹配时次数约 40 个。

表 1 2008—2013 年每年有效匹配的时次数
Table 1 Effective match-up cases from 2008 to 2013

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
时次数	29	33	47	64	49	38

对单一有效的匹配时次里所有匹配对应点的 TRMM PR 和南京雷达的反射率因子分别求平均,可得该时次的 TRMM PR 和南京雷达的平均反射率因子。同时,求出对应时次的南京雷达与 TRMM PR 的平均反射率因子差,记作 Z_{GR-PR} 。图 2 是 2008—2013 年共 260 个时次的 TRMM PR 和南京雷达的平均反射率因子以及 Z_{GR-PR} 的时间序列。

图 2a 和 b 对比表明,南京雷达探测数据的时间序列起伏特征基本上和 TRMM PR 一致。只是其差异(即 Z_{GR-PR})存在明显的“三段特征”(图 2c)。

(1) 一致性分析

图 2a 和 b 对比可得,南京雷达平均反射率因子的时间序列波动特征基本和 TRMM PR 是一致的。例如在 2010 年末和 2011 年初,两雷达的平均反射率因子均有一段时间的低值区,波动起伏的发展趋势相似;而在一些时次,两雷达的平均反射率因子的峰值位置也一一对应。TRMM PR 和南京雷达在 260 个匹配时次的平均反射率因子的相关系数为 0.92(由图 2a 和 b 计算),说明两雷达探测降水回波具有良好的 consistency。

(2) 稳定性分析

单一时次的平均反射率因子的大小反映的是该时次内回波强度的平均情况。平均反射率因子越大,说明该时次内,强回波的点或者对流云(一般认

为 35 dBz 以上)的点占全部有效匹配点的比例越高。计算中选定了南京雷达和 TRMM PR 反射率因子的有效阈值分别是 15 和 18 dBz,对于以弱回波或者层云(一般认为 25 dBz 以下)为主的时次,平均反射率因子不会低于 TRMM PR 的阈值 18 dBz (南京雷达为 15 dBz)。因此,雷达探测的单一时次的平均反射率因子有下限,且该下限值应略高于雷达的反射率因子阈值。假设雷达是长期稳定工作,对于弱回波的层云时次,其平均反射率因子的下限值也应该是保持稳定的。图 2a 中的横虚线表示 TRMM PR 多年内平均反射率因子极小值的估值(20.5 dBz),此估值即为 TRMM PR 的平均反射率因子的下限值。由图可知,TRMM PR 多年多个的平均反射率因子的极小值均在此均值线上,可认为 TRMM PR 2008—2013 年的运行工作是持续稳定的。而图 2b 中雷达的平均反射率因子极小值的估值线随时间有比较明显的变化,可大致分为 3 个时段(由竖虚线进行分段,对应时间点分别在 2010 年 3 月 23 日和 2013 年 5 月 6 日)。每个时段内,南京雷达的平均反射率因子的下限值是比较稳定,而 3 个时段之间的下限值有显著的差异。将南京雷达的平均反射率因子与 TRMM PR 的平均反射率因子相减可得图 2c,可见其时间序列可划分为同样的 3 个时段(竖虚线划分)。在 3 个分段时间内, Z_{GR-PR} 的

分段均值如横实线所示。3 个时段的 Z_{GR-PR} 均值差异明显,时段 II 内的均值明显小于时段 I 和时段 III 内的值。这表明,南京雷达工作状态具有明显的“3 段特征”,而在各时段内稳定性较好(与 TRMM PR

有较强的一致性)。

(3) 时段

根据上述“3 段特征”,将 2008—2013 年划分为以下 3 个时段(表 2)。

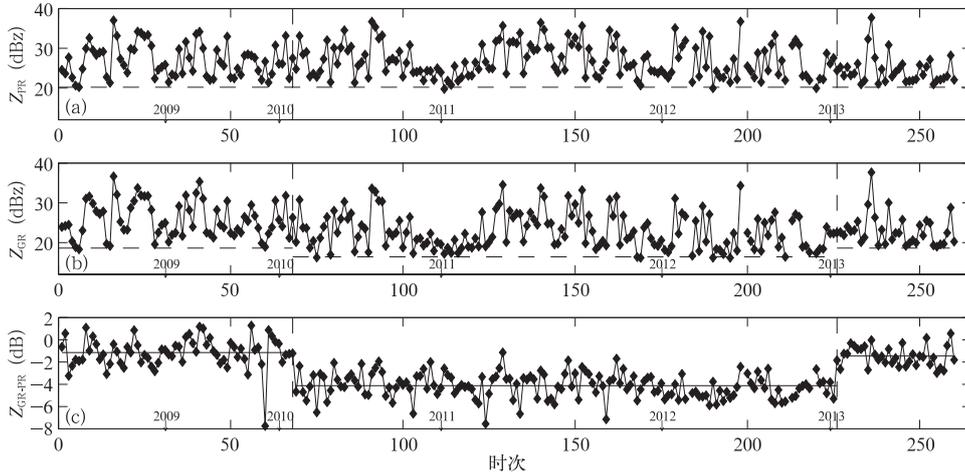


图 2 2008 年 1 月—2013 年 10 月所有匹配时次 0°C 层亮带以下 TRMM PR(a)和南京雷达(b)的平均反射率因子以及 Z_{GR-PR} 时间序列(c)

(图 a 和 b 中横虚线是平均反射率因子的极小值连线,图 c 的横实线是 Z_{GR-PR} 的分时段均值线)

Fig. 2 Time series of below-bright band height mean reflectivity factor of all the match-up cases of TRMM PR (a), GR(b) and Z_{GR-PR} (c) from January 2008 to October 2013
(The dotted lines in figures "a" and "b" represent the minimal of mean reflectivity; the solid lines in figure "c" represent the average of Z_{GR-PR})

表 2 2008—2013 年分段统计数据
Table 2 Multiple-segmented statistics of Nanjing radar from 2008 to 2013

	时段 I 2008 年 1 月—2010 年 3 月	时段 II 2010 年 3 月—2013 年 5 月	时段 III 2013 年 5 月—2013 年 10 月
时次数(个)	68	158	34
南京雷达的平均 反射率因子极 小值的估值(dBz)	18.6	16.4	18.6
Z_{GR-PR} 均值(dB)	-1.14	-4.12	-1.45

结合表 2 和图 2 分析可得,TRMM PR 多年运行工作稳定,而南京雷达在时段 II 内整体的反射率因子比前、后时段的价值偏小 2.2 dB, Z_{GR-PR} 偏小 2.8 dB,时段 II 整体的回波强度比时段 I、III 偏小 2—3 dB。

3.2 分段统计分析

分别对 3 个时段内 0°C 层亮带以下的两种雷达反射率因子值做进一步的统计分析。以时段最长且匹配时次数最多的时段 II (2010 年 3 月—2013 年 5 月)为例,结果如下:

Z_{GR-PR} 的分布如图 3。 Z_{GR-PR} 的经验分布函数的峰值位置与 Z_{GR-PR} 的均值线位置(竖直线)相对应,从峰值位置开始曲线分别向两侧相对均匀的逐渐下降。使用基于经验累积分布函数的 Kolmogorov-Smirnov 检验法对样本的经验分布函数进行正态性检验,检验结果表明该时段的样本数据服从正态分布。因此,使用拉依达准则(3 σ 准则)剔除样本中的异常值。拉依达准则式为

$$P(|x - \mu| > 3\sigma) \leq 0.003 \quad (1)$$

式中, μ 和 σ 分别代表正态总体 x 的均值和标准差,

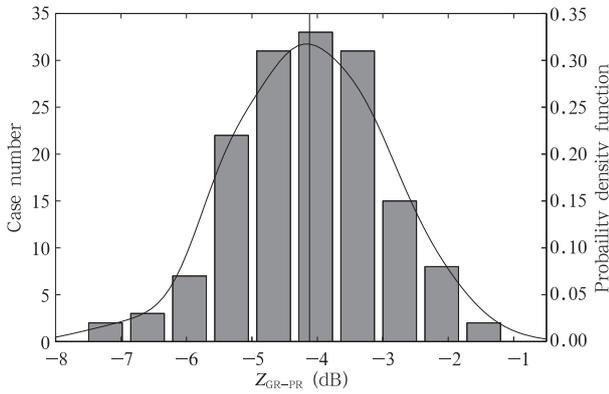


图3 2010年3月—2013年5月158个时次 Z_{GR-PR} 的时次数和概率密度函数(柱条是时次数, 曲线是概率密度分布函数, 竖直线是 Z_{GR-PR} 均值线)

Fig. 3 The number of cases and frequency distribution (158 time levels) of Z_{GR-PR} from March, 2010 to May, 2013. (The columns represent the number of cases, the curve represents the probability density function, the vertical line represents the average line of Z_{GR-PR})

P 表示正态总体中的数值出现大于 $\mu + 3\sigma$ 或小于 $\mu - 3\sigma$ 的概率是小于 0.3%。经使用拉依达准则剔除了样本的异常点后, 该时间段内的匹配样本容量由 158 减少到 155。剔除样本中的异常值, 可有助于提

高计量样本的代表性。

图 4 是时段 II 的 155 个时次所有匹配点(共 62883 个)的 Z_{GR-PR} 以及匹配点数在每个回波强度区间的分布。统计中, 取南京雷达反射率因子阈值为 15 dBz, 15—55 dBz 每隔 5 dB 设一个区间段。随着南京雷达反射率因子的增大, 匹配点数逐渐减少, 南京雷达和 TRMM PR 的差值从 -5.63 dB 逐渐增大到 1.28 dB。在各时次的所有匹配点里, 约 60% 的匹配点是层云回波(大多在 25 dBz 以下), 不到 10% 的匹配点是对流云(大多在 35 dBz 以上)。 Z_{GR-PR} 随南京雷达反射率因子值的变化趋势表明, 回波强度越小, Z_{GR-PR} 越小, 即对应匹配点上的南京雷达探测值小于 TRMM PR 的值; 随着回波强度增大, Z_{GR-PR} 从负值逐渐增大并转为正值, 即对应匹配点上的南京雷达探测值越接近于 TRMM PR 的值, 甚至大于 TRMM PR 的值。南京雷达探测值在 40—45 和 45—50 dBz 区间内, Z_{GR-PR} 值从 -0.6135 dB 逐渐增大到 0.6747 dB, 说明在 45 dBz 附近, 南京雷达探测值近似等于 TRMM PR 探测值, 并随着回波强度的增强, 南京雷达探测值开始大于 TRMM PR 探测值。

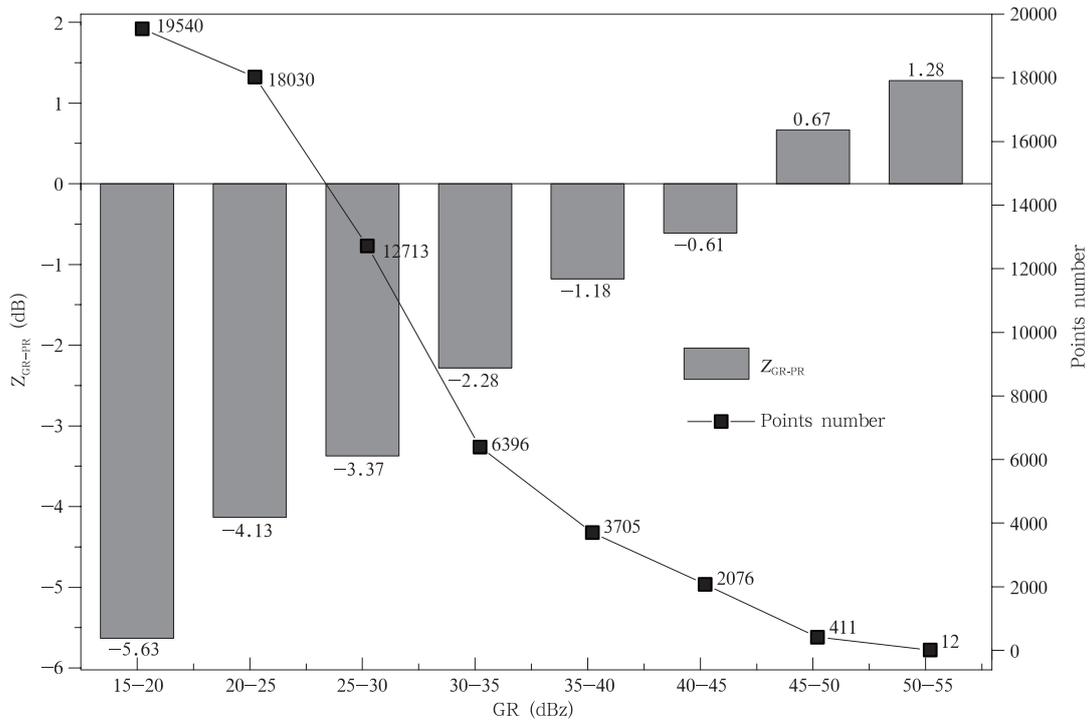


图4 2010年3月—2013年5月155个时次 Z_{GR-PR} 值(dB)和匹配点数随南京雷达探测反射率因子(dBz)的大小的变化(柱条是 Z_{GR-PR} , 折线是匹配点数)

Fig. 4 Variation of Z_{GR-PR} and the numbers of match-up points with the reflectivity factor from March 2010 to May 2013 (The columns represent Z_{GR-PR} and the line represents the numbers of match-up points)

对比 Z_{GR-PR} 和匹配点数随回波强度的变化,表明在此时段内 Z_{GR-PR} 均值 (-4.12 dB) 主要是由占总匹配点数 60% 的层云回波点的 Z_{GR-PR} 贡献所得。因此, Z_{GR-PR} 均值只能反映两种雷达在中弱回波 (30 dBz 以下) 或者层云回波的反射率因子的差值, 不能体现在中强回波 (30 dBz 以上) 或层积云回波的反射率因子差值情况。

同样方法, 发现在时段 I 和 II 内 Z_{GR-PR} 和匹配点数的分布特征与上述时段 II 的基本相同, 3 个时段的整体样本容量由 260 减少到 245。

4 订正分析

上文分析表明, Z_{GR-PR} 是随回波强度而变化的, 当订正两雷达反射率因子的差异时, 对匹配时次上所有点的反射率因子整体增减一个数值并不能有效地订正两种雷达值差异。两种雷达反射率因子差异的原因有多种, 如不同电磁波段探测降水粒子时产生的米散射效应 (Liao, et al, 2009; Li, et al, 2015)、传感器的极化效应、信号端的衰减效应等 (Liao, et al, 2001)。即使南京雷达和 TRMM PR 探测资料分别经过校准, 采样距离也会引起回波值的差异 (Gabella, et al, 2006)。引起两雷达反射率因子差异的原因是复杂的, 故本研究主要从统计上对两雷达的反射率因子做统计分析。由于南京雷达数据的“3 段特征”, 故进行分段统计分析 (3 时段所含时次数分别为 60、155 和 30), 并进行南京雷达反射率因子的线性订正及订正效果分析。

4.1 订正拟合

以时段 II 探测数据为例, 在 155 个时次中共有 62883 个匹配点 (即南京雷达和 TRMM PR 的反射率因子), 把南京雷达回波强度取值范围 [15, 54] 平分 39 个区间, 计算每个区间内所有对应匹配点的南京雷达和 TRMM PR 均值 (图 5 中的点)。由于南京雷达回波强度较大时匹配点数较少, 两雷达值在高值区对应的位置关系有比较大的起伏, 但不会改变两雷达探测结果整体对比的趋势特征, 如图 5 中虚线所示。

$$Z_{PR} = 0.77Z_{GR} + 9.45 \quad (2)$$

据此得到对南京雷达反射率因子的订正式

$$Z_{GR_0} = 0.77Z_{GR} + 9.45 \quad (3)$$

式中, Z_{GR_0} 为南京雷达观测值的订正值, 订正后的南京雷达记作 GR_0 。

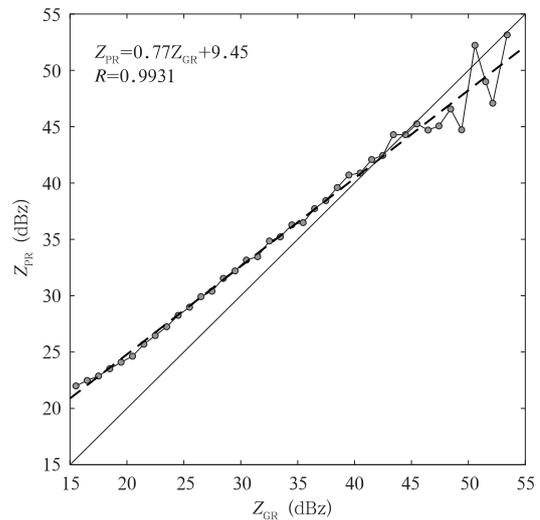


图 5 2010 年 3 月—2013 年 5 月 (时段 II) 南京雷达和 TRMM PR 的反射率因子散点和拟合直线 (虚线是 Z_{GR} 和 Z_{PR} 的拟合直线)

Fig. 5 The comparison of distributions of reflectivity factor values between GR and PR and the fitting line from March 2010 to May 2013

(The points represent the comparison of Z_{GR} and Z_{PR} ; the dotted line represents the fitting line of Z_{GR} and Z_{PR})

同理可得时段 I 和 III 的南京雷达反射率因子的订正式分别为

$$Z_{GR_0} = 0.76Z_{GR} + 7.61 \quad (4)$$

$$Z_{GR_0} = 0.78Z_{GR} + 6.63 \quad (5)$$

时段 I、II 和 III 的 TMR PR 和南京雷达拟合订正式 (3) — (5) 的相关系数分别为: 0.9900、0.9931 和 0.9839。

4.2 六年样本订正及其效果分析

经分段订正后, 对所有匹配时次订正后的南京雷达反射率因子 (Z_{GR_0}) 求平均, 可得每个时次的均值, 同时求出对应时次的 Z_{GR_0} 和 TRMM PR 的反射率因子差值, 记作 Z_{GR_0-PR} 。图 6 是 TMR PR 和订正后南京雷达的平均反射率因子以及 Z_{GR_0-PR} 的时间序列。表 3 给出 3 个时段内 Z_{PR} 和 Z_{GR_0} 平均值的极小值的估值以及 Z_{GR_0-PR} 的均值。可见:

(1) 三个时段的 Z_{GR_0} 平均值的极小值的估值和 Z_{GR_0-PR} 的均值大致相等, 而订正前 3 个时段差异较大。

(2) 3 个时段 245 个匹配时次的平均反射率因子值整体差异小 0.75 dB, 优于订正前 (表 2)。相应的 Z_{GR-PR} 值的标准差从订正前的 1.760 dB 下降到订

正后的 1.222 dB。

(3) TRMM PR 和南京雷达 245 个匹配时次的平均反射率因子的整体相关系数订正后为 0.956 (由图 6a 和 b 计算), 优于订正前的 0.924 (由图 2a 和 b 计算)。

(4) 进一步计算 TRMM PR 和南京雷达 245 个匹配时次 105894 个匹配点上的反射率因子的相关系数, 从订正前的 0.835 增大到订正后的 0.850, 相应的 Z_{GR-PR} 的标准差从订正前的 3.976 dB 下降到订

正后的 3.538 dB。

可见, 以 TRMM PR 作为南京雷达回波强度的参考, 对南京雷达数据分段订正, 可有效地改善南京雷达多年降水回波探测的一致性和稳定性。

4.3 个例订正分析

分别选取以层云回波和层积云回波为主的两个匹配时次(表 3), 对比分析 TRMM PR 与订正前、后的南京雷达值的差异以及地基雷达的订正效果。

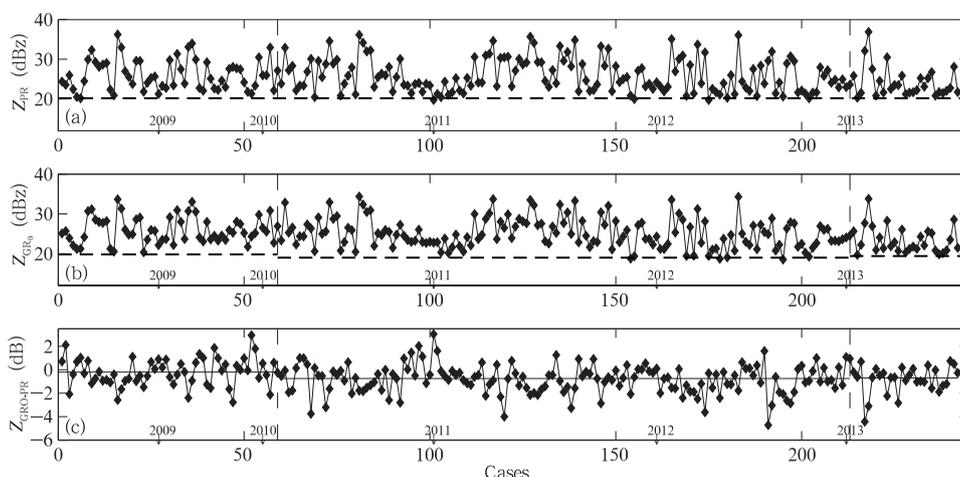


图 6 2008—2013 年 245 个匹配时次 0℃层亮带以下 TRMM PR(a)、订正后南京雷达(b)的平均反射率因子值以及 Z_{GR0-PR} 时间序列(c)

(图 a 和 b 横虚线是平均反射率因子值的极小值估值线, 图 c 的横实线是分段内 Z_{GR0-PR} 的均值线)

Fig. 6 Time series of below-bright band height mean reflectivity of all the match-up cases of TRMM PR (a), Z_{GR0} (b) and Z_{GR0-PR} (c) from January 2008 to October 2013

(The dotted lines in figures "a" and "b" represent the minimal of mean reflectivity; the solid lines in figure "c" represent the average of Z_{GR0-PR})

表 3 南京雷达订正后分段统计数据

Table 3 Statistics of radar data at Nanjing after multiple-segment piecwise

	时段 I 2008 年 1 月—2010 年 3 月	时段 II 2010 年 3 月—2013 年 5 月	时段 III 2013 年 5 月—2013 年 10 月
订正后平均反射率因子 值极小值的估值(dBz)	19.8	19.0	19.4
Z_{GR0-PR} 均值(dB)	-0.20	-0.75	-0.71

表 4 匹配时次的回波类型和时间

Table 4 Echo types and time of match-up cases

回波类型	日期	TRMM PR 轨道号	TRMM PR 探测时间	南京雷达体扫开始时间
层云	2010 年 6 月 8 日	71567	16 时 08 分 19 秒	16 时 06 分 01 秒
层积云	2010 年 3 月 23 日	70361	07 时 03 分 51 秒	07 时 06 分 01 秒

图 7 是 2010 年 6 月 8 日 16 时 08 分(属于时段 II)以层云回波为主的 TRMM PR 和订正前、后的

在 0.5° 仰角的 PPI。图 8 同图 7, 但时间为 2010 年 3 月 23 日 07 时 03 分(属于时段 II)以层积云回波

为主的 1.5° 仰角 PPI。采用几何匹配法,将两雷达的反射率因子重采样,得到在南京雷达的 PPI 的空间位置上的 Z_{PR} 和订正前的 Z_{GR} 、后的 Z_{GR_0} 。PPI 以南京雷达为中心,距离圈半径分别为 50 和 100 km。

在图 7 以层云回波为主的 0.5° PPI 图中,订正

前 Z_{GR} 的回波区域小于 TRMM PR 探测的回波区域,尤其是在以南京雷达为中心东侧的探测区域;南京雷达的回波强度也小于 TRMM PR。订正后的 Z_{GR_0} 回波区域分布和回波强度与 TRMM PR 的大体一致。

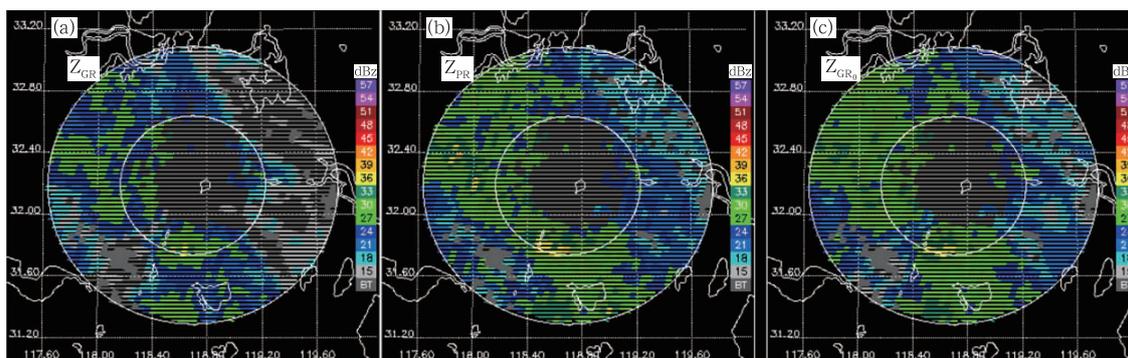


图 7 2010 年 6 月 8 日 16 时 08 分匹配时次的订正前的 Z_{GR} (a)、 Z_{PR} (b) 和订正后的 Z_{GR_0} (c) 在 0.5° 仰角的 PPI

Fig. 7 Geometrically matched Z_{GR} (a), Z_{PR} (b) and Z_{GR_0} (c) for the 0.5° elevation sweep of the radar at Nanjing 16:08 UTC 8 June 2010, rendered as PPIs

在图 8 以层积回波为主的 1.5° PPI 中,订正前的南京雷达回波区域以及回波强度均小于 TRMM PR,且该时次匹配区域的强回波(红黄色)区域与

TRMM PR 的相比明显缺失。订正后的南京雷达回波区域分布与 TRMM PR 大体一致,强回波区域的强度和范围有所增大,但仍小于 TRMM PR。

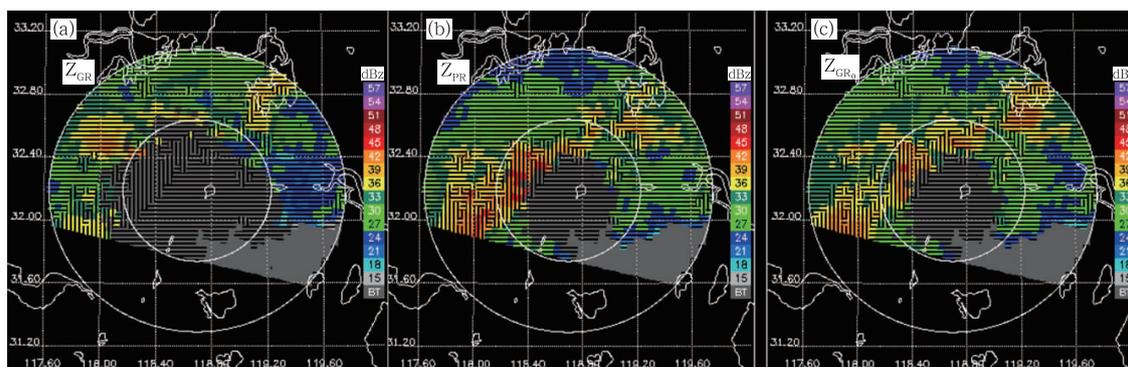


图 8 同图 7, 仅时间为 2010 年 3 月 23 日 07 时 03 分 1.5° 仰角 PPI

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for the 1.5° elevation sweep of the radar at Nanjing 07:03 UTC 23 March 2010

5 结论

本研究采用 2008—2013 年的 TRMM PR 探测数据和经过 SWAN 系统质量控制的南京雷达探测资料,运用几何匹配法对两雷达的一致性、稳定性和反射率因子差异进行对比分析。结论如下:

(1) 南京雷达 0° 层亮带以下的数据与 TRMM PR 具有较强的一致性,其平均反射率因子的时间

序列起伏特征基本与 TRMM PR 的一致,只是其差异(即 Z_{GR-PR})存在明显的“三段特征”(时段 I:2008 年 1 月—2010 年 3 月,时段 II:2010 年 3 月—2013 年 5 月,时段 III:2013 年 5 月—2013 年 10 月);3 个时段回波强度的整体差异为 2—3 dB。TRMM PR 的下限值保持在一个水平线上,表明 TRMM PR 在 6 a 里工作状态稳定,可作为地基雷达的参考。

(2) 时段 II (2010 年 3 月—2013 年 5 月)内南

京雷达与 TRMM PR 差异表明在不同回波强度分布下, Z_{GR-PR} 随回波强度的增大, 从负值逐渐增大到正值, 成线性关系。回波强度越小, Z_{GR} 越小于对应匹配点的 Z_{PR} ; 当回波强度增大时, Z_{GR} 越接近于 Z_{PR} , 并开始大于 Z_{PR} 。

(3) 以 TRMM PR 为参照, 建立了 3 个时段南京雷达值的线性订正关系。订正后南京雷达回波数据整体一致性得到改善: 3 个时段回波强度的整体差异从订正前的 2—3 dB 下降到订正后 0.75 dB 以内; TRMM PR 和南京雷达在 245 个匹配时次的平均反射率因子的相关系数从订正前的 0.924 增大到订正后的 0.956, Z_{GR-PR} 的标准差从订正前的 1.760 dB 下降到订正后的 1.222 dB; TRMM PR 和南京雷达在 105894 个匹配点上的反射率因子相关系数从订正前的 0.835 增大到订正后的 0.850, Z_{GR-PR} 的标准差从订正前的 3.976 dB 下降到订正后的 3.538 dB。

当然, 南京雷达数据的订正效果还有待于进一步的验证实验。验证方法如将订正前、后的回波强度转换为雨强, 然后与回波区域内地面雨量计网的雨量值对比, 也可以借助数值模式将订正前、后的回波强度同化, 然后对比同化效果。

致谢:感谢中国科技大学傅云飞教授对本研究的数据收集工作的帮助, 中国气象局武汉暴雨研究所的万玉发研究员和冷亮老师对本文所使用的南京雷达数据提供了 SWAN 系统的质量控制处理技术。

参考文献

成璐, 沈润平, 师春香等. 2014. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验. 气象, 40(11): 1372-1379. Cheng L, Shen R P, Shi C X, et al. 2014. Evaluation and verification of CMORPH and TRMM 3B42 precipitation estimation products. Meteor Mon, 40(11): 1372-1379 (in Chinese)

冯锦明, 刘黎平, 王致君等. 2001. 青藏高原地面 Doppler 雷达与 TRMM 星载雷达测云比较. 高原气象, 20(4): 345-353. Feng J M, Liu L P, Wang Z J, et al. 2001. Comparison of cloud observed by ground based Doppler radar with TRMM PR in Qinghai-Xizang Plateau, China. Plateau Meteor, 20(4): 345-353 (in Chinese)

傅云飞, 宇如聪, 徐幼平等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究. 气象学报, 61(4): 421-431. Fu Y F, Yu R C, Xu Y P, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and IMI. Acta Meteor Sinica, 61(4): 421-431 (in Chinese)

何会中, 程明虎, 周康军等. 2002. TRMM/PR 与香港雷达资料对比分析. 气象, 28(10): 32-36. He H Z, Cheng M H, Zhou K J, et al. 2002. Comparison of data and product obtained by TRMM/PR and Hong Kong Radar. Meteor Mon, 28(10): 32-36 (in Chinese)

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. He H Z, Cui Z H, Cheng M H, et al. 2004. TRMM satellite and application of its products. Meteor Sci Technol, 32(1): 13-18 (in Chinese)

何文英, 陈洪滨. 2006. TRMM 卫星对一次冰雹降水过程的观测分析研究. 气象学报, 64(3): 364-376. He W Y, Chen H B. 2006. Analyses of evolutional characteristics of a hailstorm precipitation from TRMM observations. Acta Meteor Sinica, 64(3): 364-376 (in Chinese)

李德俊, 李跃清, 刘草等. 2010. 基于 TRMM 卫星探测对宜宾夏季两次暴雨过程的比较分析. 气象学报, 68(4): 559-568. Li D J, Li Y Q, Liu C, et al. 2010. Comparative analysis between two summer heavy rain events in Yibin based on the TRMM data. Acta Meteor Sinica, 68(4): 559-568 (in Chinese)

刘鹏, 傅云飞, 冯沙等. 2010. 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, 68(6): 822-835. Liu P, Fu Y F, Feng S, et al. 2010. A comparison of the precipitation from rain gauge observations with from TRMM PR measurements in the southern China. Acta Meteor Sinica, 68(6): 822-835 (in Chinese)

刘鹏, 李崇银, 王雨等. 2012. 基于 TRMM PR 探测的热带及副热带对流和层云降水气候特征分析. 中国科学 D: 地球科学, 42(9): 1358-1369. Liu P, Li C Y, Wang Y, et al. 2012. Climatic characteristics of convective and stratiform precipitation over the Tropical and Subtropical areas as derived from TRMM PR. Sci China D: Earth Sci, 56(3): 375-385

马明, 林锦冰, 傅云飞. 2012. 一次强对流活动中雷电与降水廓线特征研究. 气象学报, 70(4): 797-805. Ma M, Lin J B, Fu Y F. 2012. A study of lightning and precipitation profiles of a severe convective activity. Acta Meteor Sinica, 70(4): 797-805 (in Chinese)

史锐, 程明虎, 崔哲虎等. 2004. 长江流域多普勒雷达回波强度资料对比分析. 气象, 30(11): 27-31. Shi R, Cheng M H, Cui Z H, et al. 2004. Quality analysis of echo intensities from the Doppler weather radars in the Changjiang River Valley. Meteor Mon, 30(11): 27-31 (in Chinese)

王成刚, 葛文忠, 魏鸣. 2003. TRMM PR 雷达与阜阳雷达降水资料的对比研究. 遥感学报, 7(4): 332-336. Wang C G, Ge W Z, Wei M, et al. 2003. A comparative study of data from TRMM Precipitation Radar and Fuyang Radar. J Remote Sensing, 7(4): 332-336 (in Chinese)

王振会. 2001. TRMM 卫星测雨雷达及其应用研究综述. 气象科学, 21(4): 491-500. Wang Z H. 2001. A brief introduction to TRMM Precipitation Radar and a summary on the study of its applications. Scientia Meteor Sinica, 21(4): 491-500 (in Chi-

- nese)
- 王振会, 李圣股, 戴建华等. 2015. 星载雷达与地基雷达数据的个别对比分析. 高原气象, 34(3): 804-814. Wang Z H, Li S Y, Dai J H, et al. 2015. Comparative case study on the observations between the space-borne radar and ground-based radar. Plateau Meteor, 34(3): 804-814 (in Chinese)
- 吴涛, 万玉发, 沃伟锋等. 2013. SWAN 系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用. 气象科技, 41(5): 809-817. Wu T, Wan Y F, Wo W F, et al. 2013. Design and application of radar reflectivity quality control algorithm in SWAN. Meteor Sci Technol, 41(5): 809-817 (in Chinese)
- 张凌, 吕达仁, 段树等. 2003. 降雨空间不均匀性与雷达测雨空间平滑误差. 遥感技术与应用, 18(6): 364-373. Zhang L, Lu D E, Duan S, et al. 2003. Rain spatial nonuniformity and spatial smoothing error of radar rainfall measurement. Remote Sensing Technol Appl, 18(6): 364-373 (in Chinese)
- 周森, 刘黎平, 王红艳. 2014. 一次高原涡和西南涡作用下强降水的回波结构和演变分析. 气象学报, 72(3): 554-569. Zhou M, Liu L P, Wang H Y. 2014. Analysis of the echo structure and its evolution as shown in a severe precipitation event caused by the plateau vortex and the southwest vortex. Acta Meteor Sinica, 72(3): 554-569 (in Chinese)
- Anagnostou E N, Morales C A, Dinku T. 2001. The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases. J Atmos Oceanic Technol, 18(4): 616-628
- Bolen M S, Chandrasekar V. 2000. Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations. J Appl Meteor, 39(12): 2071-2079
- Cheng M H, He H Z, Mao D Y, et al. 2001. Study of 1998 heavy rainfall over the Yangtze River Basin using TRMM data. Adv Atmos Sci, 18(3): 387-396
- Gabella M, Joss J, Perona G, et al. 2006. Range adjustment for ground-based radar, derived with the spaceborne TRMM Precipitation Radar. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 44(1): 126-133
- GSFC. 2011. GPM Ground Validation System. Validation Network Data Product User's Guide. Goddard Space Flight Center
- Heymsfield G M, Geerts B, Lian L. 2000. TRMM Precipitation Radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and ground-based radar measurements. J Appl Meteor, 39(12): 2080-2102
- Hitschfeld W, Bordan J. 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. J Meteor, 11(1): 58-67
- Houze R A Jr, Brodzik S, Schumacher C, et al. 2004. Uncertainties in oceanic radar rain maps at Kwajalein and implications for satellite validation. J Appl Meteor, 43(8): 1114-1132
- Kim J H, Ou M L, Park J D, et al. 2014. Global Precipitation Measurement (GPM) Ground Validation (GV) prototype in the Korean Peninsula. J Atmos Oceanic Technol, 31(9): 1902-1921
- Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. 2001. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(1): 102-116
- Li N, Zhu Y Q, Wang Z H. 2015. A discussion on the applicable condition of Rayleigh scattering. International J Remote Sensing Appl, 5: 62-66
- Liao L, Meneghini R, Iguchi T. 2001. Comparisons of rain rate and reflectivity factor derived from the TRMM Precipitation Radar and the WSR-88D over the Melbourne, Florida site. J Atmos Oceanic Technol, 18(12): 1959-1974
- Liao L, Meneghini R. 2009. Changes in the TRMM version-5 and version-6 precipitation radar products due to orbit boost. J Meteor Soc Japan, 87(3): 93-107
- Meneghini R, Iguchi T, Kozu T, et al. 2000. Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM Precipitation Radar. J Appl Meteor, 39(12): 2053-2070
- Morris K R, Schwaller M R. 2011. Sensitivity of spaceborne and ground radar comparison results to data analysis methods and constraints. Validation Network Data User's Guide. Appendix
- Negri A J, Bell T L, Xu L M. 2002. Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM. J Atmos Oceanic Technol, 19(9): 1333-1344
- Schumacher C, Houze R A Jr. 2000. Comparison of radar data from the TRMM satellite and Kwajalein oceanic validation site. J Appl Meteor, 39(12): 2151-2164
- Schwaller M R, Morris K R. 2011. A ground validation network for the global precipitation measurement mission. J Atmos Oceanic Technol, 28(3): 301-319
- Wang J X, Wolff D B. 2009. Comparisons of reflectivities from the TRMM Precipitation Radar and ground-based radars. J Atmos Oceanic Technol, 26(5): 857-875