张帅, 王振会, 赵兵科, 等. 2019. 星载雷达在订正地基天气雷达标定误差中的应用 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 576−584. ZHANG Shuai, WANG Zhenhui, ZHAO Bingke, et al. 2019. Using Space-Borne Radar Data to Correcting Calibration Errors in Ground-Based Radar [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 576−584. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18118

星载雷达在订正地基天气雷达标定误差中的应用

张帅[1,2] 王振会[1] 赵兵科[2] 陈羿辰[3]

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 中国气象局上海台风研究所台风信息室，上海 200030
3 北京市人工影响天气办公室，北京 100089

摘 要 在雷达反射率数据定量应用中，标定误差是导致结果产生偏差的重要原因之一。星载雷达（TRMM PR）长期工作的稳定性和连续性已被验证，本文将星载雷达数据转换到S波段，通过对比星载雷达和南京雷达同时段不同高度（相对于融化层的位置）不同降水类型（层云降水或对流降水）的数据，得到两部雷达对融化层以下层云降水的观测相关性高，差异稳定。通过对比分析星载雷达和南京雷达同时段零度层以下层状云降水的观测数据，得出两部雷达反射率因子值的回归关系式。以星载雷达观测数据为基准，使用该关系式对南京雷达反射率数据进行订正，并通过雨量计数据对订正结果进行验证，结果显示使用本文订正关系式订正后雷达估计的降雨量更接近雨量计的观测值。

关键词 标定误差 反射率因子 星载雷达 地基雷达 订正

文章编号 1006-9585(2019)05-0576-09 **中图分类号** P413.2^{+}1 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18118

Using Space-Borne Radar Data to Correcting Calibration Errors in Ground-Based Radar

ZHANG Shuai[1,2], WANG Zhenhui[1], ZHAO Bingke[2], and CHEN Yichen[3]

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *China Meteorological Administration Key Laboratory for Aerosol−Cloud−Precipitation*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Shanghai Typhoon Institute*, *China Meterological Administration*, *Shanghai* 200030
3 *Beijing Municipal Weather Modification Office*, *Beijing*100089

Abstract A Calibration error is among the main causes of errors in the quantitative application of radar reflectivity. In this study, the stable and continue doperation of along-term space-borne radar (Precipitation Radar carried by the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite, TRMM/PR) was verified. Reflectivity data from the space-borne radar were converted from Ku-band to S-band. By comparing the reflectivity data gathered from the space-borne radar and Nanjing radarover the same period for different types of precipitation (stratiform or convective) at different altitudes (relative to

收稿日期 2018-09-03；**网络预出版日期** 2019-04-24

作者简介 张帅，男，1984年出生，博士研究生，主要从事雷达资料处理与分析方面的研究。E-mail: zhangs@typhoon.org.cn

通讯作者 王振会，E-mail: eiap@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41675028、41275043、41775064、41475060，公益性行业科研专项GYHY201306078，科技部重点专项2017YFE0107700，国家重点研发计划项目2018YFC1506303、2018YFC1506403，江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675028, 41275043, 41775064, and 41475060), Special Scientific Research Fund for Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306078), Key Program for International S&T Cooperation Projects of China (Grant 2017YFE0107700), National Key R&D Program of China (Grants 2018YFC1506303 and 2018YFC1506403), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

the position of melting layer, ML), it was determined that there was a high correlation between the two radars' observations and a stable difference in stratiform precipitation below the ML. Further, the regression relationship between reflectivity factor values observed by the PR and Nanjing radar was obtained by comparing and analyzing the reflectivity factors of stratiform precipitation under the ML. Consequently, the regression between the two radar reflectivity factors provided a linear correction which was then applied to the reflectivity of the Nanjing radar. Rain gage data employed to verify this correction revealed that the precipitation estimated using GR reflectivity data with correction was closer to the rain gage observations than without.

Keywords Space-borne radar, Ground-based radar, Reflectivity, Calibration error, Correction

1 引言

降雨对人们的生活和国民经济有着重要的影响，对水平衡分析和气候变化具有重要意义。自20世纪90年代中期开始，我国开始建设具有定量测量降水和获得大气动力场结构能力的新一代天气雷达网（李柏等，2013）。通过全自动体扫描工作模式、较合理的地物杂波抑制以及科学的产品算法等特点，使得天气雷达成为研究降水系统不可缺少的工具。与雨量计相比，天气雷达估计的降水具有空间分辨率高的优势。在使用天气雷达估测降水时，涉及从观测高度到地面水凝物滴谱分布及演变的假设，因此估计的结果有不确定性，但最根本的不确定性可能与所使用的雷达数据可靠性有关（Robert et al.，2018）。在影响天气雷达数据可靠性的因素中，除了常见的超折射、地物杂波等因素，也包含反射率数据本身的准确性。特别是长期保存的数据的准确性需要验证，否则，可能导致定量降水估计的结果产生明显的偏差（Li et al.，2017）。

等效反射率因子Z可通过距离雷达r处的平均回波功率$\overline{P_r}$计算得出（张培昌等，2000）：

$$Z = Cr^2\overline{P_r}, \tag{1}$$

其中，C为雷达常数，与雷达的发射功率、发射波长、波束宽度、脉冲宽度、天线增益有关。对公式（1）取对数，两边同乘以10得到以dBZ为单位的反射率因子值：

$$\hat{Z} = \hat{C} + 2\hat{r} + \hat{P}_r, \tag{2}$$

其中，$\hat{Z} = 10\log_{10}Z$，同样方式可得到$\hat{C}$、$\hat{r}$和$\hat{P}_r$。从公式（2）可以看出，在$\hat{C}$中的任何误差将导致反射率因子产生等量的偏差，因此当使用Z-I关系估计降水时，不能准确确定雷达校准常数C可能导致较大的降水估计误差。

TRMM（Tropical Rainfall Measuring Mission）卫星发射于1997年，探测的纬度范围在38°S～38°N，每天环绕地球16圈。TRMM星载雷达（PR）观测时以±17°天顶角、垂直于轨道的方向进行扫描，扫描宽度为215 km（轨道提升后为247 km），发射波长为2.2 cm的电磁波（Ku波段），TRMM PR经过了美国地基主动式雷达定标系统的精确的定标，标定误差稳定在1 dB内（Takahashi et al.，2004），该雷达持续稳定运行多年，测量数据一致性好，可靠性高（Kim et al.，2014；朱艺青等，2016），可为地基天气雷达（GR）数据提供了稳定的校准基准（Anagnostou，1999）。

自TRMM卫星发射以来，已有不少学者使用PR数据和GR的数据进行对比研究。国内，冯锦明等（2001）利用青藏高原地基雷达资料和TRMM PR进行对比，分析了地基Doppler雷达和TRMM PR所测降水在回波结构和回波强度等方面的差异。何会中等（2002）使用香港雷达数据与TRMM PR进行了对比，结果显示两部雷达有很好的一致性，两部雷达在距离香港雷达100 km范围内的观测数据相关系数较大。王成刚等（2003）将TRMM PR与阜阳713雷达在反射率强度场分布、平均反射率及灵敏度三方面进行了对比。刘黎平（2002）用散射模式和数值模拟的方法讨论了这两种雷达的波长、雷达波入射方向、波瓣宽度等参量对反射率因子的大小和结构的影响。王振会等（2015）将星载雷达与上海雷达进行了观测个例对比，结果显示PR与GR降水回波分布大体一致，两部雷达的反射率因子在融化层内和融化层以下具有较好相关性。朱艺青等（2016）通过对比融化层以下PR和南京雷达的反射率强度数据发现南京雷达2008～2013年的观测数据存在不连续现象，呈现明显的三段性。Zhonget al.（2017）使用TRMM PR与CINRADS（China New Generation Doppler Weather Radar）进行比较，发现相比于S波段C型雷达，S波段A型雷达与B型雷达与PR数据的有更好的吻

合；GR与PR的偏差取决于反射率因子值的大小，此结果与Wang and wolff（2009）的结论类似。Li et al.（2017）使用融化层以上及以下TRMM PR层云降水数据对南京雷达工作状况进行了评估，发现南京雷达在2003～2014年的一些年份数据存在明显的偏差。

国外Bolen and Chandrasekhar（2000）将PR和S波段GR的反射率因子值进行了比较以验证了PR的工作稳定性，结果表明当衰减不显著时，PR与该雷达的观测值差异在1 dB以内。Heymsfield（2000）将PR反射率数据与GR的高分辨率数据进行了比较发现，对于尺度大于PR分辨率的降水系统，PR与GR反射率因子廓线能很好地吻合，但对于尺度小于PR分辨率的对流性降水而言，PR会出现明显的低估。Liao（2001）将PR和墨尔本雷达数据重采样到一个共同的网格上，发现当反射率强度随高度的变化相对较小时两部雷达反射率因子的差异在1 dB内。Wang and Wolff （2009）将PR反射率因子值与4个地基验证雷达进行了比较发现，PR与休斯敦、墨尔本和夸贾林的雷达观测值平均偏差约为±1 dB，与达尔文的雷达偏差在−5 dB到1 dB之间，且偏差值随反射率强度变化。Kim et al.（2014）通过对比PR与韩国地基雷达融化层以上反射率数据发现地基雷达反射率强度值随时间波动在−2 dB*Z*到1 dB*Z*之间。Park et al.（2015）对比PR和GR的数据，发现融化层以下两部雷达观测更加一致，在融化层以上及融化层内，两部雷达的观测一致性较差。Robert et al.（2018）通过对比TRMM PR及GPM（Global precipitation measurement）Ku PR和澳大利亚3部S波段GR融化层以上、以下的层云降水数据来获得每部雷达在不同时间段内的标定误差。

本文将星载雷达反射率数据通过频率调整关系调整到S波段，以同南京地基雷达数据进行对比。通过比较频率调整前后的星载雷达与南京地基雷达不同高度（相对于融化层的位置），不同降水类型目标的观测，筛选两部雷达相关性好，差异稳定的观测数据。通过对比分析筛选出的两部雷达观测数据，对南京雷达反射率数据的偏差进行订正。

2 资料和方法

2.1 PR反射率强度数据

PR反射率强度数据为TRMM卫星2008年1月至2013年12月第七版的2A25数据，水平分辨率约为5 km，垂直分辨率0.25 km，数据范围为从地面到20 km高度。2A25数据包含经过衰减订正的反射率因子值、降水类型和亮带数据（王振会，2001）。在比较PR和GR的反射率因子值时，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处理的2A25数据与地基雷达的反射率因子值作对比，1A21数据为直接探测得到的反射率强度数据，作为备查。

2.2 地基天气雷达资料

地基天气雷达（GR）为部署在南京的S波段雷达，可忽略衰减对其数据的影响，海拔高度为138.2 m。在其业务工作模式下有效探测半径230 km，反射率数据产品的时间分辨率为6 min，径向空间分辨率约为1°×1 km，数据以极坐标方式存储。本文使用该雷达从2008～2013年与星载雷达同时段的反射率数据。所用数据经过了晴空回波滤除及SWAN（Severe Weather Now-casting System）系统的质量控制，有效地去除了非降水回波（吴涛等，2013）。

2.3 雨量计数据

雨量计数据为小时降水数据，尽管雨量计数据受校准、风及蒸发等因素导致的采样误差影响，雨量计数据仍是可用于建立参考降水数据集的代表性数据（Francesco et al.，2012）。文中选取2010年6～8月汛期期间，距离南京雷达100 km内8个雨量站的观测数据用于南京雷达反射率强度数据订正的验证。

2.4 时间及空间匹配

PR在其观测纬度范围内的任何给定位置上每天有1～3次观测（Negri et al.，2002）。由于GR完成一次体扫的时间为6 min，因此设置的PR与GR匹配时次时间窗为±6 min，在此时间范围内可能会得到不止一个的体扫数据，在进行PR和GR数据时间匹配时，根据TRMM扫过GR观测区域的时间和GR体扫起始时间，选择时间上与PR探测时间最接近的GR体扫数据，以最小化时间差异。

使用几何匹配法将PR和GR观测数据进行空间匹配，匹配范围限制在距离南京雷达100 km以限制波束展宽的影响，PR最小可探测回波强度约为18 dB*Z*（Kozu et al.，2001），而GR可以探测到反射率强度低得多的回波。为GR设置15 dB*Z*的阈值，以限制PR和GR之间的观测差异（Schwaller

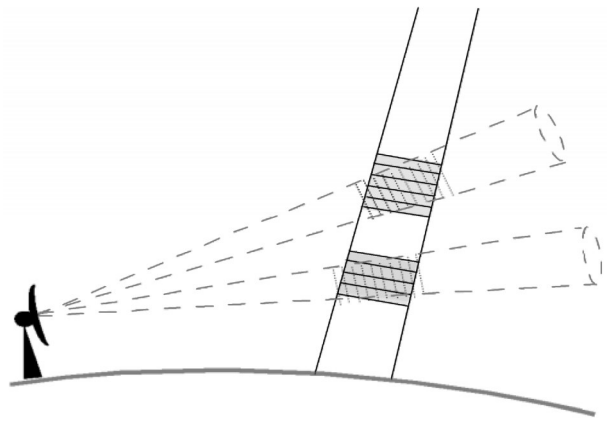

图1　几何匹配法示意图（实线是PR扫描波束，虚线是地基雷达波束，阴影部分是重合区域）

Fig. 1　Schematic of the geometry-matching method. Solid lines represent PR (Precipitation Radar carried by the tropical rainfall measuring mission satellite) scanning beam, dotted lines represent GR (Ground-based Radar) sweeps, and the shaded area represents the overlap region

and Morris，2011）。几何匹配法通过计算PR扫描波束与每一个GR仰角扫描的几何相交处的平均PR反射率因子值和GR反射率因子值来实现两部雷达数据的空间匹配（图1所示）。因此匹配后的数据水平分辨率与PR一致，垂直分辨率与GR反射率因子数据一致。

3　统计分析

根据TRMM卫星飞过GR观测区域的时间对地基雷达资料进行海选，并进行时空匹配，共得到250个有效降水匹配时次。为了提高样本的代表性，用PauTa准则对匹配时次进行筛选，样本从250降低到245个。

2008～2013年南京雷达反射率因子数据存在不连续现象，呈现明显的三段性（朱艺青等，2016）。出现不连续的时间点与两次雷达标定的时间一致（分别为2010年3月和2013年5月），因此标定误差是导致该雷达数据出现偏差的最可能原因，使得该段时间内的反射率强度明显偏弱，如表1所示。

时空匹配解决了PR与GR在采样时间、扫描方式、采样体积和分辨率方面的不同。在定量比较PR和GR观测前，还需要考虑降水粒子在Ku波段（PR）与S波段（GR）后向散射的差异，不同高度不同类型的降水导致的差异以及波束非均匀填充和雷达灵敏度对两部雷达观测差异的影响。在通过对比PR与GR观测数据量化GR反射率数据偏差时，需要尽可能减小上述因素导致的差异，进而对GR的观测误差进行订正。

表1　南京雷达与地基雷达2008年1月到2013年10月匹配时次平均反射率因子值的差异

Table 1　Mean values of reflectivity differences between PR and the GR over three periods from January 2008 to October 2013

	平均反射率因子差值/dB
时间段1	−0.412
时间段2	−3.915
时间段3	−0.994

注：时间段1为2008年1月至2010年3月，时间段2为2010年3月至2013年5月，时间段3为2013年5月至2013年12月

3.1　波束非均匀填充和雷达灵敏度对差异的影响

几何匹配方法通过计算PR与GR波束相交处反射率因子的平均值实现两部雷达空间上的匹配，避免了插值引入的误差，但会受到波束非均匀填充及雷达灵敏度差异的影响。如图2所示，将匹配点处PR与GR阈值以上的距离库库数与期望库数的比值（f_{above}）从1递减到0，分析两部雷达反射率因子值之间差异（ΔZ）的变化。当$f_{above}=1$时，两部雷达在匹配点处参与平均的所有距离库反射率因子值都必须满足标准（$Z_{PR}\geqslant 18$ dBZ，$Z_{GR}\geqslant 15$ dBZ，Z_{PR}、Z_{GR}分别表示PR、GR反射率因子值），这确保了良好的空间匹配结果，但也限制了满足要求的匹配点的数量。与之相反，当$f_{above}=0$时，PR和GR只需要一个距离库的反射率因子值高于各自的反射率因子阈值，此时，PR与GR差异最大，满足条件的匹配点数量最多。从图1可以看出，当f_{above}降低时，ΔZ中值随之减小，四分位间距（IQR）增大，差异更分散，获得的匹配点数量随之增加。由于PR灵敏度比GR低，随着f_{above}的减小，在匹配点处包含更多的$Z<18$ dBZ的距离库，这部分降水目标GR可以观测到，而PR则不能，使得两雷达波束相交体积内的GR平均反射率因子值降低，而相应的PR平均反射率强度保持大致恒定，导致GR与PR之间的差异随f_{above}减小而增大。显然，在进行两部雷达反射率因子值比较时，需要尽可能设置高的f_{above}来减小波束非均匀填充和雷达灵敏度对差异的影响。

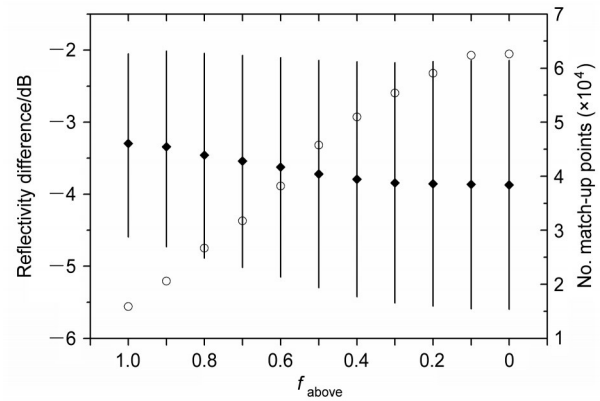

图2 PR与GR反射率强度差异（ΔZ）随两部雷达阈值以上距离库库数与期望库数间比值（f_{above}）的变化，实心菱形和垂直线段分别代表中值和四分位距，空心圆圈代表匹配点数

Fig. 2 Reflectivity difference (ΔZ) plotted as a function of the minimum fraction of SR and GR bins with reflectivity values above their respective thresholds. The solid diamonds and vertical lines show, respectively, the median and interquartile range for each f_{above} (the fraction of GR bins within the volume that meet the criterion that Z_{PR}≥18 dBZ and Z_{GR}≥15 dBZ), while open circles indicate sample size (scale on right y-axis)

3.2 发射频率及降水目标对差异的影响

PR和GR工作在不同频段，降水粒子对两部雷达所发射电磁波的散射特性不同，导致两部雷达观测到的反射率强度数据会出现系统性的差异。散射模拟可量化这些差异，并导出将一个频率测量得到的反射率因子数据转换为另一个频率的经验关系。Schwaller and Morris（2011）使用Liao and Meneghini（2009）提出的经验关系将S波段数据转换到Ku波段，以使用地基雷达观测数据标定PR（GPM KuPR）的观测数据。王振会等（2015），2016及Li et al.（2017）等使用该关系式比较PR与GR之间的观测差异，进而对地基雷达工作状况进行了评估。本文关注的是地基雷达的观测误差，因此需要将Ku波段（PR）观测数据调整到S波段。

基于降水类型以及相对于融化层（ML）的高度（上、下或者位于融化层中），对采样点进行分类。对于ML以上、以下及位于融化层中的采样点，分别使用干雪、液态水及湿雪的频率转换关系（Cao et al.，2013）。降水分类数据来源于PR 2A25数据，采样点高度的划分方法同Kim et al.（2014）。对于类型为“其它”的降水，由于其比例很少，占总采样点比例小于1%，这部分降水在分析中不采用。

表2 PR与GR不同高度层云降水反射率数据的相关系数及差异的方差

Table 2 Correlation coefficient and variance of stratiform precipitation reflectivity observed by PR and GR at different heights

	相关系数	反射率差值的方差/dB
融化层下	0.876	2.014
融化层内	0.751	3.231
融化层上	0.652	1.975

由图3可知，频率转换使得层云降水ML下的ΔZ增大（通过PR反射率因子值的减小），而ML内的ΔZ减小（通过PR反射率因子值的增加）。因为对流降水具有更高的反射率强度，对流降水变化比层状降水更明显。对于ML以上和以下的层云降水，频率转换后反射率差异分布具有良好的一致性，而在ML内，频率转换后的ΔZ明显大于融化层以上和融化层以下的值，表明针对PR融化层内层云降水反射率因子值的频率转换可能出现低估，从差异的分布可以看出，在融化层内ΔZ分布更分散，这与融化层内复杂的粒子相态有关。对于对流降水，频率转换增大了PR和GR在不同层次的反射率强度差异，这可能与对流降水中PR衰减的欠订正（低估PR反射率因子值，从而高估ΔZ）及频率转换的误差有关。除了在不同高度存在差异外，对流降水的ΔZ数值分布也更分散，这与对流降水有更大空间差异及可能出现的较差的空间匹配相关。基于这些结果，我们在后续分析中排除了对流降水样本和ML内的层云降水样本。

对比PR和GR在不同高度的层状云降水可以看出（表2所示），PR和GR在融化层以上及以下的观测差异相对稳定。与ML以上的降水对比，两部雷达对ML以下的降水观测结果具有更高的相关性，这主要由PR灵敏度和GR在远距离处的波束展宽所致（Park et al.，2015）。因此选取PR和GR融化层以下层云降水的反射率数据对两部雷达的观测差异进行分析。

4 基于PR反射率因子值的订正

4.1 订正关系

图4所示的PR与GR反射率因子值之间的散点图表明GR反射率强度随PR反射率因子值增加而增大，两者呈现线性关系。订正关系式用线性回归

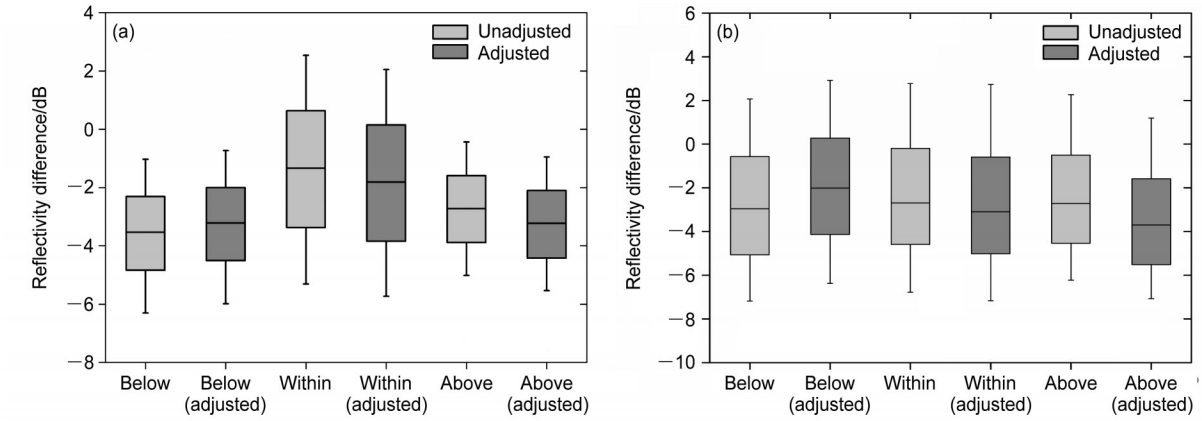

图3　不同高度不同降水类型GR与PR反射率差异（ΔZ）箱线图（浅灰、深灰分别代表频率转换前、后）：（a）层云降水；（b）对流云降水。矩形盒显示中值及四分位距，须线显示第10及第90百分位数

Fig. 3　Box and whisker plots showing GR−PR reflectivity difference (ΔZ) for samples below, in, and above the ML in (a) stratiform and (b) convective precipitation. The Box plot shows the median and interquartile ranges of distribution while whiskers show the 10th and 90th percentiles; dark and light gray boxes show values computed using PR data with and without the Ku-band to S-band frequency correction, respectively

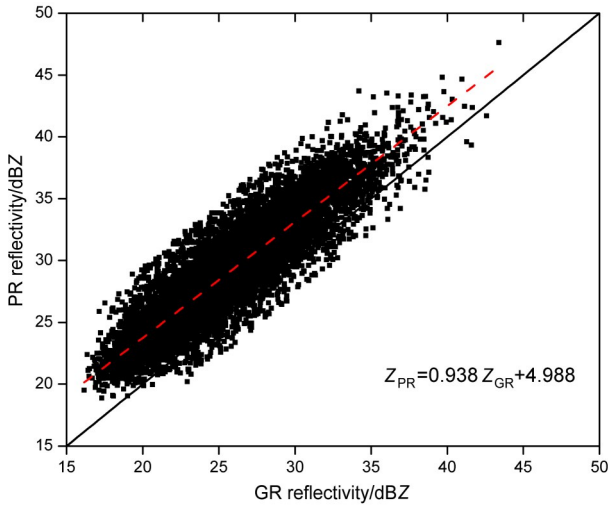

图4　地基雷达与星载雷达反射率强度散点分布（红色虚线为拟合直线）

Fig. 4　Reflectivity scatterplots for PR and GR within 100 km of GR. The black solid line is the one-to-one line and red-dashed line is the linear regression

模型表示如下（Li et al.，2017）：

$$Z_{PR} = aZ_{GR} + b\ , \tag{3}$$

其中，Z_{PR}为PR反射率因子值，Z_{GR}为GR反射率因子值，a, b分别为线性回归系数的斜率和截距。由此得到以PR反射率因子值为参考的地基雷达进行订正关系为

$$Z_{GR_corr} = 0.938Z_{GR_org} + 4.988\ , \tag{4}$$

其中，Z_{GR_corr}、Z_{GR_org}分别为订正前、后GR反射率因子。

表3为使用公式（4）订正后的PR和GR在匹配时次的平均值反射率因子差异。结果表明，订正后两部雷达观测数据相关系数增加，平均偏差显著减小，差异更趋稳定。订正后与PR的平均差异缩小−0.685 dB，对比表1可以看出，以PR数据为参考对GR进行订正提高了GR多年降水回波强度的一致性。

表3　订正前后PR与GR在匹配时次的平均反射率的偏差、偏差的标准差和相关系数

Table 3　Mean values, standard deviations of differences, and correlation coefficients of average reflectivity in match-up cases before and after correction

	平均反射率偏差/dB	偏差标准差/dB	相关系数
订正前	−3.916	1.429	0.952
订正后	−0.685	1.249	0.957

4.2　订正验证

图5为2010年7月11日23:18（北京时间，下同）的PR和订正前、后GR在1.5°仰角的PPI图。该仰角探测到大范围的降水回波，且同时包含了较强和较弱的回波。由图可以看出，订正后，相对较强和较弱回波的反射率强度都更接近于PR的观测值。

以雨量计站点位置为准，采用自然临近法，选取和雨量计站点位置相对应的雷达反射率因子值。采用经验Z-I关系$Z=aR^b$将回波强度转换为降水强度，再通过累积得到1 h时间尺度的雷达估测降水量资料。假设降水粒子满足Marshall−Palmer分布，对于层云和混合性降水：a=200，b=1.6；对于对流降水：a=300，b=1.4。GR降水类型取自与之匹配的PR 2A25数据。

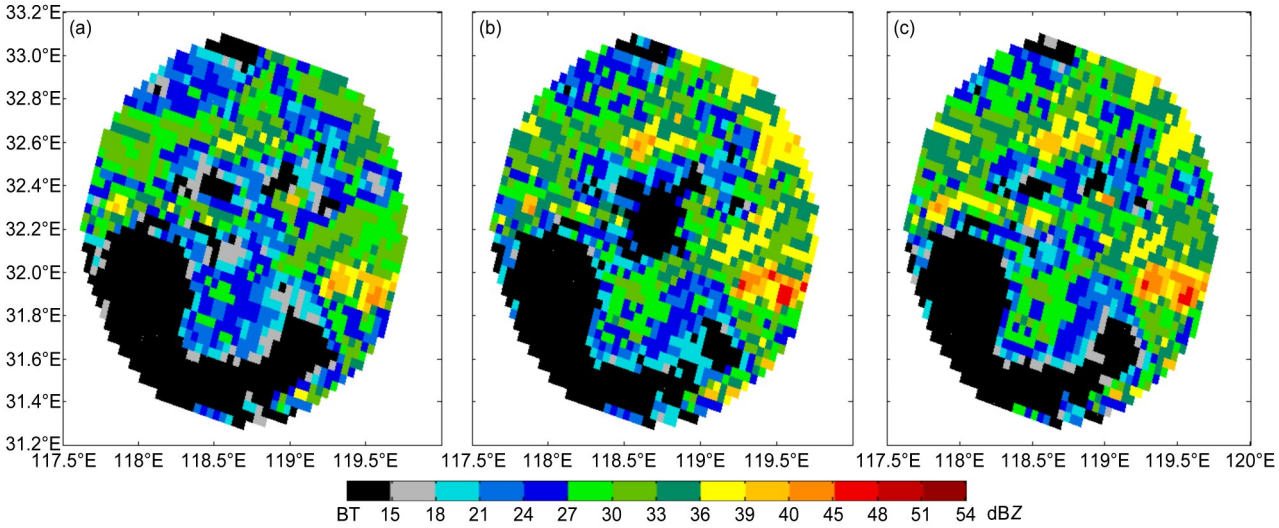

图5 2010年7月11日23:18分订正前的（a）GR反射率因子、（b）PR反射率因子和（c）订正后的GR反射率因子在1.5°仰角的PPI（Plan Position Indicator）图

Fig. 5 PPI (Plan Position Indicator) of (a) GR reflectivity factor, (b) PR reflectivity factor, and (c) GR reflectivity factor after correction for a 1.5° elevation sweep of the Nanjing radar at 2318 LST on 11 July 2010

表4 2010年7月12日00:00雨量计观测值与订正前后的雷达估计的小时降水量

Table 4 Estimated precipitations using raw and corrected GR reflectivity, and measured precipitations in eight stations at 0000 LST on 12 July 2010

站号	雨量计观测降水量/mm	GR估计雨量（订正前）/mm	GR估计雨量（订正后）/mm
58138	0.3	0.3	0.6
58147	4.3	2.3	3.5
58336	2.3	1.4	2.2
58339	0.8	0.5	1.0
58340	0.5	0.1	0.3
58341	17.2	7.8	11.7
58342	3.2	1.1	1.8
58344	16	4.2	6.5

使用0.5°仰角反射率因子值估计的降雨量与雨量计数据进行对比，来自八个自动气象站测量的小时降水量与订正前GR降水估计值有较大的差异（表4所示）。雨量计平均观测值为5.6 mm h^{-1}，订正后，GR估计的降水量从2.2增加到3.5 mm h^{-1}，更接近雨量计平均雨量5.6 mm h^{-1}，与雨量计的均方根误差从5.462下降到3.919。订正后雷达估计降水量与雨量计的观测值更接近。

使用2010年汛期6月至8月的小时雨量数据进行验证，上述8个雨量站3个月共有1085个有效降水数据，雨量计观测的平均值为2.8 mm h^{-1}，订正前后雷达降水估计平均值分别为1.1和1.8 mm h^{-1}，与雨量计观测值的均方根误差分别3.953和3.082，相关系数分别为0.887和0.891，订正前后GR估计雨量与雨量计雨量的散点分布图如图6a所示，由图可以看出订正后雷达估计的降雨量更接近雨量计观测值。

4.3 订正关系对比

直接使用偏差时间段融化层下PR反射率强度数据为参考得到GR反射率因子值订正关系为（朱艺青等，2016）

$$Z_{\mathrm{GR_corr}} = 0.77Z_{\mathrm{GR_org}} + 9.45 . \qquad (5)$$

由公式（5）可知，使用公式（5）进行订正后，较强回波（强度大于42 dBZ）强度减小，对应雨量在17 mm h^{-1}以上的降水（使用经验Z-I关系式，对应反射率强度约为42 dBZ）雨量将降低。2010年汛期6月至8月雨量计测量的小时雨量在17 mm h^{-1}以上的降水平均雨量值为26.7 mm h^{-1}，使用公式（5）订正前后的GR估计的降水量分别为10.1和9.5 mm h^{-1}，使得GR估计的降雨量减小，与雨量计观测值之间的偏差增大。使用本文订正关系式（式4）订正后GR估计的降雨量为14.8 mm h^{-1}，订正后降水估计结果更接近雨量计实际观测值。

与2010年汛期6月至8月的8个雨量站观测数据相比，使用公式（5）对GR反射率强度进行订正后估计雨量为1.5 mm h^{-1}，均方根误差为3.904，

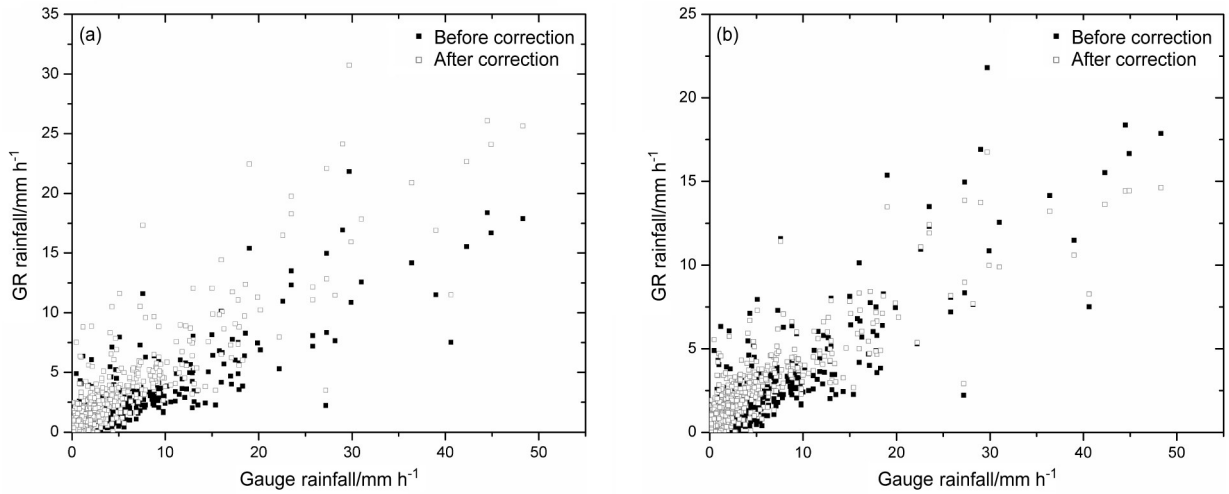

图6　2016年6~8月雨量计与GR雷达估计降水量散点分布：（a）使用订正公式（4）的订正；（b）使用订正公式（5）的订正

Fig. 6　Fit between June 2010 and August 2010 hourly rainfall derived from gage- point measurements and corresponding GR radar estimates. Radar echoes were acquired using a 0.5° elevation angle. (a) Correction using formula 4; (b) correction using formula 5

相关系数为0.887，使用公式（5）订正前后GR估计雨量与雨量计的散点分布图如图6b。对比可知，使用关系公式（4）订正后，GR估计的降雨量更接近雨量计观测值。

5　结论

本文使用几何匹配方法将PR和GR反射率强度数据进行空间匹配，避免了插值引入的误差。通过分析差异随匹配点处PR与GR阈值以上的距离库库数与期望库数比值（f_{above}）的变化得出，在匹配点处，参与平均的PR与GR所有距离库的反射率因子值都满足阈值标准（$Z_{PR}\geqslant 18$ dBZ，$Z_{GR}\geqslant 15$ dBZ）时，偏差最小且最为稳定集中；随着f_{above}的减小，两部雷达间偏差增大，差异值分布更分散。后续分析中选取填充度最高的匹配点以减小波束非均匀填充及雷达灵敏度对差异的影响。

使用频率转换关系式将PR（Ku波段）观测数据调整到S波段（GR工作波段），通过比较频率调整前后的PR与GR不同高度，不同降水类型的观测数据，得到PR和GR对融化层以下层云降水观测相关性最高，差异稳定。使用PR与GR融化层以下层云降水数据进行对比分析，通过回归得到GR反射率数据订正关系式。使用该关系式对GR反射率因子值进行订正，结果显示订正后GR与PR匹配时次的平均反射率强度更接近，GR多年降水观测数据的一致性显著提高。

通过雨量计数据对订正结果进行验证，并与直接使用融化层以下降水为参考得到的订正关系式进行了对比，结果显示经本文订正关系式订正后的GR反射率因子值估计的降雨量更接近雨量计实测值。

参考文献（References）

Anagnostou E N, Morales C A, Dinku T. 2001. The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18(4): 616−628. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<0616:tuotpr>2.0.co;2.

Bolen S M, Chandrasekar V. 2000. Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations[J]. Journal of Applied Meteorology, 3912　PART 1: 2071−2079.

Cao Q, Hong Y, Qi Y C, et al. 2013. Empirical conversion of the vertical profile of reflectivity from Ku-band to S-band frequency[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(4): 1814−1825. doi: 10.1002/jgrd.50138.

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[J]. 高原气象, 20(4): 345−353. FengJinming, Liu Liping, Wang Zhijun, et al. 2001. Comparison of cloud observed by ground based Doppler radarwith TRMM PR in Qinghai−Xizang Plateau, China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20(4): 345−353.

何会中, 程明虎, 周康军, 等. 2002. TRMM/PR与香港雷达资料对比分析[J]. 气象, 28(10): 32−36.　He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Kangjun, et al. 2002. Comparison of data and product obtained by TRMM/PR and Hong Kong radar[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28(10): 32−36.

Heymsfield G M, Geerts B, Tian L. 2000. TRMM precipitation radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and

ground-based radar measurements[J]. Journal of Applied Meteorology, 3912 PART 1: 2080−2102.

Kim J H, Ou M L, Park J D, et al. 2014. Global precipitation measurement (GPM) ground validation (GV) prototype in the koreanpeninsula[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(9): 1902−1921. doi:10.1175/jtech-d-13-00193.1.

Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. 2001. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 39(1): 102−116. doi:10.1109/36.898669.

李柏, 古庆同, 李瑞义, 等. 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 39(3): 265−280. Li Bai, Gu Qingtong, Li Ruiyi, et al. 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39(3): 265−280.

刘黎平. 2002. 热带测雨卫星的星载雷达和地基雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报, 60(5): 568−574. Liu Liping. 2002. Simulation and analysis on observation errors of cloud intensity and structure with trmmpr and ground-based radar[J]. ActaMeteorologicaSinica (in Chinese), 60(5): 568−574. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2002.05.007.

Li N, Wang Z, Xu F, et al. 2017. The assessment of ground-Based weather Radar data by comparison with TRMM PR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14, 72−76. doi: 10.1109/lgrs.2016.2626320

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]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18(12): 1959−1974. doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<1959:corrar>2.0.co;2.

Liao L, Meneghini R. 2009. Changes in the TRMM version-5 and version-6 precipitation radar products due to orbit boost[J]. JMSJ, 87A: 93−107. doi:10.2151/jmsj.87a.93.

Morris K R, Schwaller M R. 2011. Sensitivity of spaceborne and ground radar comparison results to data an-alysis methods and constraints[C]. 35th Conf on Radar Meteorology, Pittsburgh, PA, Amer. Meteor. Soc., avalaible online at https://ams.confex.com/ams/35Radar/webprogram/Manuscript/Paper191729/AMS 35th Radar paper final.pdf

Negri A, Bell T, Xu L. 2002. Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM [J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 19, 1333−1344. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<1333:sotdco>2.0.co;2

Park S, Jung S H, Lee G. 2015. Cross validation of TRMM PR reflectivity profiles using 3D reflectivity composite from the ground-based radar network over the koreanpeninsula[J]. J. Hydrometeor, 16 (2): 668−687. doi:10.1175/jhm-d-14-0092.1.

Robert A. Warren, Alain Protat , et al. 2018. Calibrating ground-based radars against TRMM and GPM [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35(2), 323−346. doi:10.1175/2010jtecha1403.1.

Takahashi N, Iguchi T. 2004. Estimation and correction of beam mismatch of the precipitation Radar after an orbit boost of the tropical rainfall measuring mission Satellite[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 42(11): 2362−2369. doi:10.1109/tgrs.2004.837334.

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分析[J]. 遥感学报, 7(4): 332: 336. Wang Chenggang, GeWenzhong, Wei Ming, et al. 2003. Comparative case study on the observation between the space-borne radar and ground-based radar [J].J Remote Sensing. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 7(4): 332−336, 344−346.

王振会. 2001. TRMM 卫星测雨雷达及其应用研究综述[J]. 气象科学, 21(4): 491−500. Wang Zhenhui. 2001. A brief introduction to TRMM precipitation radar and a summary on the study of its applications[J]. ScientiaMeteorologicaSinica (in Chinese), 21(4): 491−50. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2001.04.015.

王振会, 李圣殷, 戴建华, 等. 2015. 星载雷达与地基雷达数据的个例对比分析[J]. 高原气象, 34(3): 804−814. Wang Zhenhui, Li Shengyin, Dai Jianhua, et al. 2015. Comparative case study on the observations between the space-borne radar and ground-based radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(3): 804−814.

Wang J X, Wolff D B. 2009. Comparisons of reflectivities from the TRMM precipitation radar and ground-based radars[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(5): 857−875. doi:10.1175/2008jtecha1175.1.

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[J]. 气象科技, 41(5): 809−817. Wu Tao, Wan Yufa, WoWeifeng, et al. 2013. Design and application of radar reflectivity quality control algorithm in SWAN[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 41(5): 809−817. doi:10.19517/j.1671-6345.2013.05.004.

张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2000. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 165−169. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepiet al. 2000. Radar Meteorology (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 165−169.

朱艺青, 王振会, 李南, 等. 2016. 南京雷达数据的一致性分析和订正[J]. 气象学报, 74(2): 298−308. Zhu Yiqing, Wang Zhenhui, Li Nan, et al. 2016. Consistency analysis and correction for observations from the radar at Nanjing[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(2): 298−308.