

叶飞,梁海河,文浩,等,2020.基于单站 CAPPI 格点数据的相邻天气雷达均一性评估系统研究[J].气象,46(1):50-62. Ye F, Liang H H, Wen H, et al, 2020. Research on homogeneity evaluation system of neighboring weather radars based on single-station CAPPI grid data[J]. Meteor Mon, 46(1):50-62(in Chinese).

基于单站 CAPPI 格点数据的相邻天气 雷达均一性评估系统研究^{*}

叶 飞^{1,2} 梁海河² 文 浩² 李恒升³ 张乐坚² 郭海平¹

1 内蒙古自治区大气探测技术保障中心,呼和浩特 010051

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

3 河南省气象信息网络与技术保障中心,郑州 450003

提 要: 基于经过严格质量控制后的单站 CAPPI 格点数据,对相邻天气雷达观测重叠区域内等距离线上的回波强度一致性状况进行研究,根据雷达不同探测距离、不同海拔高度、不同降水强度等因素编制相邻雷达自动配对程序和等高面自动选择程序,建立了相邻天气雷达均一性算法。制定了适合我国天气雷达回波观测差异特征的均一性评估的 3 类标准(可信、可疑和疑误),并给出了评估标准的满足条件,从而建立了全国天气雷达均一性实时评估系统。从评估效果来看,均一性评估系统能够实时高效检测出全国不同波段、不同型号以及不同省份相邻雷达之间的回波一致性状况,并给出评估结果;对浙江、福建、广东 3 省雷达一次降水过程的均一性评估,发现参与评估的 27 部 S 波段雷达整体可信率为 85.19%,可疑率为 11.11%,疑误率为 3.7%,成功检测出雷达回波强度偏低、波束阻挡以及电磁干扰等问题;对临沂站雷达回波均一性分析,评估系统能及时报警,检测出该站雷达回波位置指向存在偏差,天线方位顺时针偏移 16.88°,缩短了故障发现时间。

关键词: 格点数据,相邻雷达,均一性,评估

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.005

Research on Homogeneity Evaluation System of Neighboring Weather Radars Based on Single-Station CAPPI Grid Data

YE Fei^{1,2} LIANG Haihe² WEN Hao² LI Hengsheng³ ZHANG Lejian² GUO Haiping¹

1 Inner Mongolia Autonomous Sounding Technical Support Center, Huhhot 010051

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Henan Meteorological Information Network and Technical Support Center, Zhengzhou 450003

Abstract: Based on the single-station CAPPI grid data after strict quality control, this paper studies the echo intensity consistency on the equidistant line in the overlapping area of adjacent weather radar observations. According to the elements of radar detection coverage, altitude and precipitation intensity, the automatic matching program of adjacent radar and the automatic selection program of contour plane are compiled, and the homogeneity algorithm of adjacent weather radar is established. Then, three kinds of criteria for evaluating the homogeneity of weather radar echo observation differences in China are formulated, which are credible, suspicious and false, and also the conditions for meeting the evaluation criteria are

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507502)资助

2019 年 3 月 26 日收稿; 2019 年 9 月 19 日收修定稿

第一作者:叶飞,主要从事天气雷达数据开发和保障研究. Email:459664391@qq.com

通讯作者:梁海河,主要从事气象观测数据质量控制和观测产品研究. Email:lhhaoc@cma.gov.cn

given. A national real-time weather radar homogeneity evaluation system is successfully established. The evaluation results show that the homogeneity evaluation system can detect the echo consistency of different bands, different radar models and adjacent radars in different provinces in real time and efficiently, and give the evaluation results. By evaluating the homogeneity of one-hour precipitation process of radar in Zhejiang, Fujian and Guangdong Provinces, 27 S-band radars participated in the evaluation. The overall credibility rate of the 27 radars was 85.19%, the suspicious rate was 11.11% and the suspicious error rate was 3.7%. In addition, the problems of low radar echo intensity, beam blocking and electromagnetic interference are successfully detected. The uniformity analysis of radar echo at Linyi Station shows that the evaluation system can alarm in time, detect the deviation of radar echo position pointing at Linyi Station, and the azimuth of antenna shifts clockwise by 16.88°, which shortens the fault detection time.

Key words: grid data, adjacent radar, homogeneity, evaluation

引 言

多普勒新一代天气雷达具有很高的时空分辨率,是探测降水系统的主要手段。由于单部雷达的探测范围有限,且存在静锥区、波束阻挡等问题,难以覆盖如台风、雷暴、飑线等大尺度的天气系统(俞小鼎等,2006)。目前国内已有 208 部多普勒新一代天气雷达投入业务运行,为了提高对灾害性天气监测和预警能力,发挥多部雷达在定量估测降水、风场结构研究中的作用,就必须对多部雷达的资料进行组网拼图(肖艳姣和刘黎平,2006)。

在组网拼图过程中,相邻雷达存在不同程度的观测重叠区域,特别是东南沿海地区雷达布局较密集,相邻几部雷达都存在观测重叠区域,而经过长期的业务运行发现,由于雷达型号、参数、定标不一致(仲凌志等,2011),并且运行中存在各种波束遮挡(万玉发等,2000;景号然等,2019)、电磁干扰、大气折射和衰减、雷达故障等问题,雷达在重叠区域的观测值并不完全相同。而回波强度一直是判断强对流天气的重要回波参数,如果相邻雷达在同一观测时间段内对重叠区域内观测的回波强度值存在偏差,就会影响雷达组网拼图的质量(肖艳姣等,2007;张勇等,2019),增加雷达资料在多源数据同化过程中的不确定性(高士博等,2016;许小永等,2006;郑淋淋等,2019),精确的数值预报也就无从谈起(王红艳等,2015)。

如何对相邻雷达观测重叠区域回波均一性状况进行科学评估,发现并修正观测偏差就显得尤为重要。因此,必须建立可信的相邻雷达回波重叠区域的均一性算法,对比分析相邻雷达之间探测数据的

差异,在雷达数据组网拼图前及时发现问题,提高天气雷达组网数据质量,避免组网拼图系统错误地选取相同观测区域有问题的回波值,造成对降水的错误估计。国内外学者一直致力于雷达网数据对比研究(张志强等,2008;吴翀等,2014;张林等,2018),一开始主要使用低仰角或者某一固定仰角数据进行分析(Huuskonen et al,2010),同时水平方向上研究较多,对回波垂直结构缺乏深入研究,且大多选择一块较强回波进行分析,忽略了距离衰减和雷达波束展宽的影响(Tabary,2003;Delobbe and Holleman,2004)。国内对于相邻雷达探测数据均一性方面的研究,主要是一些典型降水回波和故障案例分析,还没有建立较完善的均一性算法,且算法无法在天气雷达业务中进行集成,缺乏能够对全国相邻天气雷达均一性状况进行实时评估的系统(周海光,2013)。本文将以解决这一困难为目标,建立国内新一代天气雷达均一性实时评估系统。

1 相邻雷达回波强度均一性对比可行性分析

1.1 理论可行性

根据雷达反射率因子 Z 的物理意义可知: Z 的大小只取决于云、雨滴谱的情况; Z 正比于 D^6 ,表明粒子越大, Z 越大,回波越强,而且少数大粒子可以产生回波强度的绝大部分; Z 的强度只取决于气象目标本身,与雷达波长 λ 等其他雷达参数和探测距离都无关。

$$Z = \int_0^{\infty} n(D) D^6 dD \quad (1)$$

式中, $n(D)$ 为对应的粒子数量, D 为粒子直径, Z 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

不同参数的雷达探测结果可以相互比较(张培昌等, 2001), 因此相邻雷达回波强度均一性对比具有充足的理论依据。

1.2 实际可行性

由于雷达观测资料在时间、空间上分布的不均匀性, 且存在很多误差, 雷达原始基数据存在很多地物杂波、飞鸟回波、晴空回波、海浪回波、超折射回波等异常回波, 如果不对单站雷达基数据进行严格的质量控制(刘黎平等, 2003; 李建通等, 2009), 那么对比结果就失去说服力。

为提高均一性对比结果的准确度, 本文采用经过严格数据质量控制后的单站 CAPPI 格点数据, 多道数据质量控制过程在中国气象局气象探测中心的天气雷达拼图系统(V3.0)下进行, 主要包括噪声点滤除、故障引起的坏图识别、电磁干扰回波识别、地物/超折射回波识别、海浪回波识别、多源数据质量控制和速度退模糊、晴空回波对消等(程昌玉等, 2017), 剔除非气象杂波, 提高雷达数据的准确性。通过对雷达基数据进行严格质量控制和筛选使相邻雷达均一性研究具备了实际可操作性。

2 均一性算法

为避免距离衰减、波束展宽和波束阻挡等对相邻雷达观测重叠区域内同步观测数据的影响, 只选取相同观测时间、同一等高面等距离线上大于 0 dBz 的雷达反射率因子进行对比。但由于我国雷达种类繁多、探测范围不一致、区域降水差异大、高山站众多, 想要建立精确高效的均一性算法, 除了获取相邻雷达等距离线数据, 还必须综合考虑多个影响因子, 例如设置合理的雷达配对范围和选择合适的等高面数据。

2.1 获取相邻雷达等距离线数据

本文选用水平分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、8 km 以下垂直分辨率为 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ 、8 km 以上垂直分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 CAPPI 格点数据。由于 CAPPI 格点数据由雷达基数据解析而来, 相邻雷达数据在时间一致性上的匹配标准参考国内新一代天气雷达波束指向定标检查时的误差要求(10 s 以

内)。将质量控制后的相邻雷达同步观测 CAPPI 格点数据进行解析, 并对数据重新编号, 在相同观测区域内获取到两部雷达距离相等的数据, 具体分五步进行, 流程图如图 1。

第一步: 读取雷达 CAPPI 数据。利用 Python 编程解析经过数据质量控制后、拼图前的同一时刻两部雷达 CAPPI 格点数据文件, 获取同一等高面上 CAPPI 数组文件。

第二步: 对格点数据进行编号。读取数组文件里台站经纬度值和经纬度格点数, 并统一保留两位小数, 否则编号长度不一致, 分别利用经纬度值对二维数组数据进行编号。

第三步: 确定格点数据观测重叠区域。通过循环遍历上一步骤中重新编号后列和行的相邻雷达二维数组数据, 同样编号位置处即观测重叠区域。

第四步: 寻找等距离线。若相邻两部雷达站(图 2) Radar1 和 Radar2 的站点信息为 $C(a_1, b_1)$ 和 $D(a_2, b_2)$, a_1, b_1 和 a_2, b_2 分别为雷达站 Radar1 和 Radar2 的纬度和经度。读取第三步获取的观测重叠区域内任一经纬度数据, 设为 $E(x, y)$, 若 E 到两部雷达的距离差小于某一阈值, 即 $|EC - ED| \leq k$ 时(k 的阈值可调), 则认为 E 在相邻两部雷达相同观测区域内, 并且到 Radar1 和 Radar2 的距离相等, 将所有到两部雷达等距离的 E 点连接成线即为等距离线 AB , 具体算法如下:

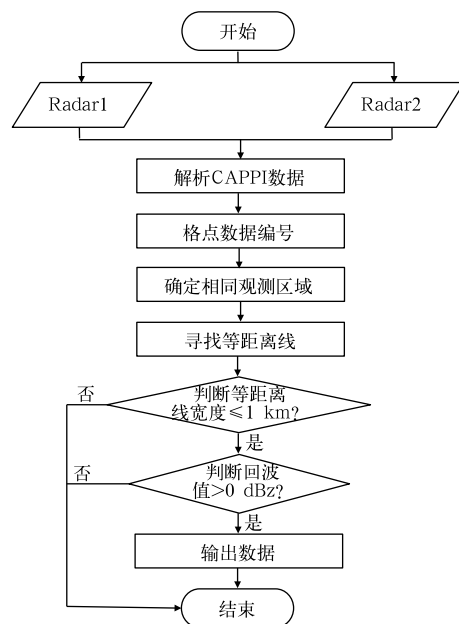


图1 均一性算法流程图

Fig. 1 Homogeneity algorithm flow chart

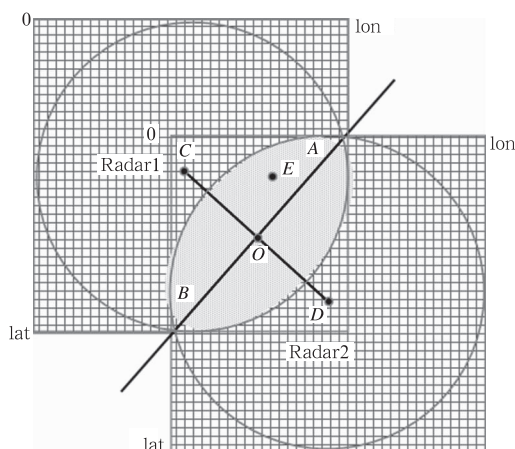


图2 相邻雷达观测重叠区域等距离线示意图

Fig. 2 Isometric diagram of overlapped areas of adjacent radar observations

$$d_1 = \sin\left(a_1 \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(x \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left[\left(b_1 - y\right) \frac{\pi}{180}\right] \cos\left(a_1 \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(x \frac{\pi}{180}\right) \quad (2)$$

$$EC = R_m \arccos(d_1) \quad (3)$$

$$d_2 = \sin\left(a_2 \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(x \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left[\left(b_2 - y\right) \frac{\pi}{180}\right] \cos\left(a_2 \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(x \frac{\pi}{180}\right) \quad (4)$$

$$ED = R_m \arccos(d_2) \quad (5)$$

式中, R_m 为平均地球半径, d_1 、 d_2 至少保留 6 位小数。

第五步:判断等距离线宽度并输出数据。由于本文选用水平分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 CAPPI 格点数据,为使雷达回波距离库尽量一致,本文做两部雷达等距离线对比时 $k=1 \text{ km}$,即 $|EC-ED| \leq 1 \text{ km}$ 则表示等距离线 AB 的宽度为 1 km ,并将符合 $|EC-ED| \leq 1 \text{ km}$ 的 E 点经纬度坐标和对应大于 0 dBz 的回波强度值输出,至此成功获得相邻雷达观测重叠区域等距离线上的回波强度值,并进行均一性状况分析。

2.2 相邻雷达自动配对

相邻雷达只有存在观测重叠区域时才能进行均一性分析。然而我国 C 波段天气雷达探测范围仅为 S 波段一半左右,且 C 波段雷达大多布设在边远地区,相邻雷达距离较远,在最大探测范围内相邻雷达之间可能不存在回波重叠区域;S 波段雷达大多布设在东南沿海地区,相邻雷达距离较近,相邻多部

雷达之间均存在重叠区域。若相邻雷达配对范围过大,将导致 C 波段雷达无法进入配对表或 S 波段雷达远距离弱回波数据进入均一性评估系统,降低均一性评估的准确性,因此选择合理的雷达配对范围显得尤为重要。

利用雷达站经纬度、海拔高度和探测距离信息,编制相邻雷达自动配对程序,根据不同研究目的设置不同配对阈值,形成相邻雷达配对表。若当研究区域主要为 C 波段雷达时可采用 200 km 配对阈值,主要为 S 波段雷达时可采用 300 km 配对阈值。本文从全国不同波段天气雷达探测距离、相邻雷达回波重叠状况以及后期均一性评估系统的展示效果等多方面进行整体考虑,采用了 $200 \sim 300 \text{ km}$ 的配对阈值范围。当降水回波数量达到设定阈值时直接调用配对表进行相邻雷达均一性分析,避免因临时配对影响均一性评估计算效率。

2.3 等高面自动选择

我国天气雷达大多采用 VCP21 体扫模式,低层仰角的扫描密集,能直接生成低层等高面数据,仰角越往上扫描间隙越大,高层等高面数据需要通过插值来补充,而插值算法必然给雷达数据带来偏差,因此低层等高面的数据质量将高于高层等高面数据,均一性算法实现过程中需选择相邻雷达同一等高面数据进行分析,这将涉及最大回波高度、海拔高度、降水强度等多个影响因子。

2.3.1 最大回波高度

利用标准大气的测高公式(张培昌等,2001),可计算回波的大致高度范围。

$$H = h + R \sin \delta + \frac{R^2}{2R_m} \quad (6)$$

式中, h 为雷达站海拔高度, δ 为雷达最低工作仰角, R 为两部雷达等距离线处距离, R_m 为等效地球半径。表 1 以南京雷达站海拔高度 ($h=138.2 \text{ m}$) 为例,计算出不同雷达配对范围下的最大回波高度 H ,均一性算法应选择最大回波高度值附近的等高面数据。

表 1 雷达配对阈值选择

Table 1 Selection of radar pairing threshold

配对范围/km	等距离线处 距离(R)/km	最大回波 高度(H)/km
300	150	2.77
200	100	1.59
150	75	1.12

2.3.2 雷达站海拔高度

我国新一代天气雷达各站之间海拔高度差异较大,高山站众多,若统一选用某一固定高度层等高面 CAPPI 数据必然造成部分台站数据缺乏代表性。图 3 展示了 2017 年 6 月 13 日 01 时安徽省安庆站和黄山站分别选择不同高度 CAPPI 数据进行分析的结果,安庆站海拔高度为 386.1 m,而黄山站海拔高度达到 1841.3 m,若选择 3 km 高度(图 3a)等高面 CAPPI 数据,两站等距离线上的回波数量仅为 85 对,当选择 4 km 高度时(图 3b)回波数量达 270 对,显然选择 4 km 等高面数据更具说服力。本文均一性算法考虑到了不同海拔高度对均一性对比的影响,因此根据相邻雷达不同海拔高度值(以海拔高度较高的雷达站为选择依据)设计了等高面选择规则(表 2),同时等高面的选择还需结合相邻雷达重叠区域降水强度的大小进行综合考虑。

2.3.3 降水强度

降水强度大小会影响不同等高面上的均一性状况,本文因不涉及专业的降水强度划分研究,简单以雷达 30 dB 回波强度值作为降水强弱的划分标准,通过判断相邻雷达回波重叠区域大于 30 dB 强度值的回波比例来判断强弱降水过程。图 4 和图 5 分别展示了南通、常州 2017 年 6 月 13 日 07:40 一次强降水过程和 12 月 14 日 01:30 一次弱降水过程在不同等高面上的均一性状况。表 3 对图 4 和图 5 的数据进行了统计,可以看出强降水过程中等高面越高数据样本量越大,平均偏差和标准偏差越小,相关性没有明显变化;弱降水过程中 3 km 等高面的数据相关性最好;4 km 等高面样本数据最多、平均偏差最好,但相关性最差;5 km 等高面时样本数据量开始明显减少,由此可见等高面的选择必须将降水强度这一影响因子纳入考虑范畴。

综上所述,在等高面自动选择过程中除了考虑雷达体扫模式,必须结合不同雷达配对范围下的最大回波高度、雷达站海拔高度和不同降水强度等因素进行综合考虑,尽可能选择合理等高面数据进行分析。例如重庆地区共 4 部雷达,以丘陵、山地为主,雷达站海拔高度在 400~1100 m,根据其不同型号雷达最大探测范围(250 km 左右),重庆雷达与周边雷达进行配对时配对阈值选择为 200 km(配对表见表 4);根据最大回波高度值,此区域进行均一性

评估时等高面选择以 3 km 为主;由表 2 可知当万州站(海拔高度 1075.7 m)与周边雷达配对时可选取 4 km 等高面数据进行分析,若遇到强降水过程时可选取 5 km 等高面数据进行分析;但由于重庆区域雷达型号较多(分别为 SA、SB、CD),且山体对雷达波束阻挡较严重,这些都将影响该区域均一性对比的精度。

表 2 不同海拔高度下等高面选择规则

Table 2 Basis for selecting contour planes at different altitudes

海拔高度/km	等高面/km
<1	3
1~2	4
2~3	5
>5	6

3 相邻雷达均一性评估系统

因缺乏适宜的均一性评估标准,导致均一性算法很难在业务上进行系统集成,因此必须针对我国天气雷达实际观测过程中的回波差异状况制定合适的均一性评估标准,建立全国相邻雷达均一性实时评估系统。

3.1 均一性评估标准

业务上集成可靠的均一性算法,必须建立适宜的均一性评估标准。本文根据新一代天气雷达回波精度(约 1 dB),加上不同雷达损耗(如波导损耗)及误差(约 2 dB),参考美国天气雷达均一性评估标准(3 dB),并结合我国天气雷达多波段、多型号等造成的实际回波差异状况,利用相邻雷达重叠区域等距离线上回波强度数据的平均偏差、标准偏差和相关性 3 个指标制定了我国天气雷达均一性评估可信、可疑和疑误的三个标准(表 5),并分别给出了三个评估标准的满足条件:当反射率因子偏差均值(av) 在 3 dB 以内、标准偏差均值(std) 在 5 dB 以内,相关系数均值(R^2) 在 0.5 以上,三个指标同时满足则标识为可信;当平均偏差均值在 3~5 dB、标准偏差均值在 5~8 dB,相关系数均值在 0.3~0.5,满足其中一个指标则标识为可疑;当平均偏差均值在 5 dB 以上、标准偏差均值在 8 dB 以上,相关系数均值在

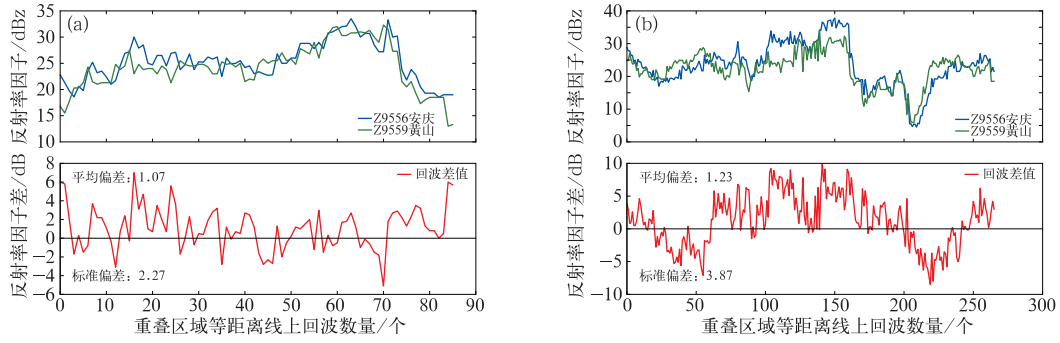
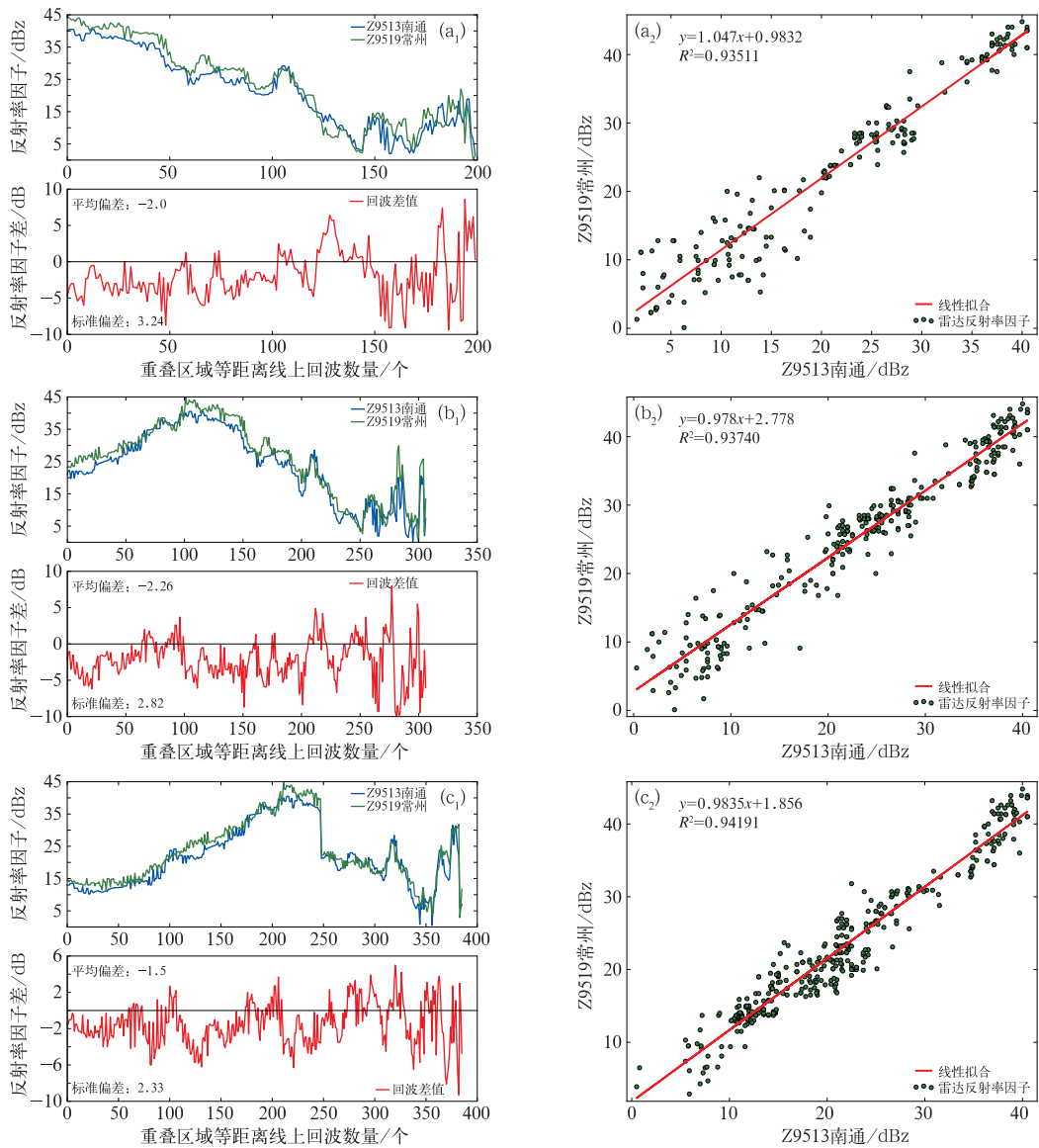


图3 2017年6月13日01时安庆站和黄山站不同等高面反射率因子偏差分析

(a) 3 km, (b) 4 km

Fig. 3 Analysis on the deviation of different isoplane reflectance factors of Anqing Station and Huangshan Station at 01:00 BT 13 June 2017

(a) 3 km, (b) 4 km

图4 2017年6月13日07:40南通、常州站强降雨过程不同等高面反射率因子偏差(a₁, b₁, c₁)和相关系数(a₂, b₂, c₂)分析

(a) 3 km, (b) 4 km, (c) 5 km

Fig. 4 Homogeneity of differences (a₁, b₁, c₁) and correlation (a₂, b₂, c₂) of different isoplane reflectance factors in heavy rainfall processes in Nantong Station and Changzhou Station at 07:40 BT 13 June 2017

(a) 3 km, (b) 4 km, (c) 5 km

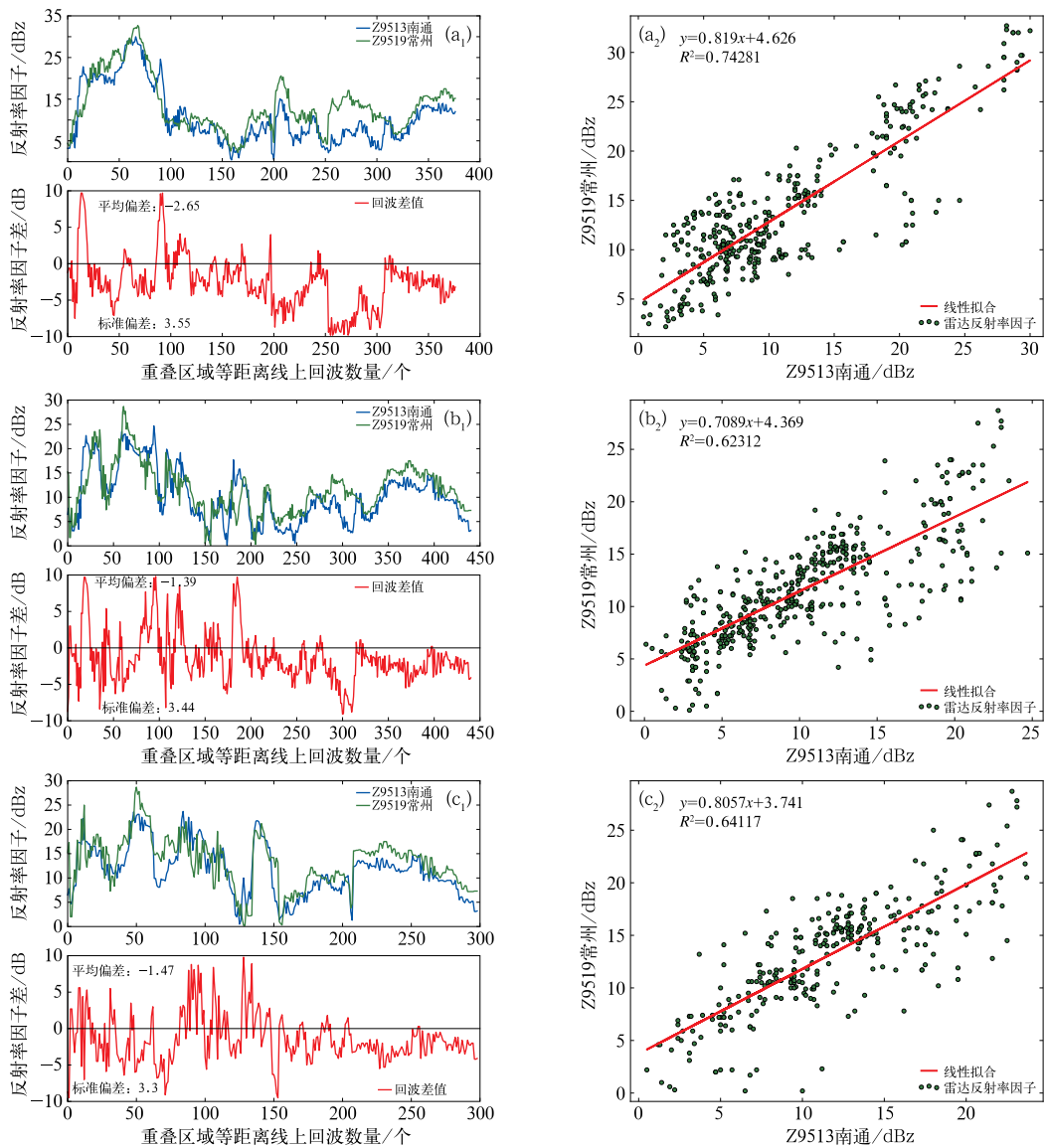


图 5 同图 4,但为 2017 年 12 月 14 日 01:30 一次弱降水过程
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for a weak precipitation process at 01:30 BT 14 December 2017

表 3 不同降水过程不同等高面等距离线上数据状况

Table 3 Data of different precipitation processes on different contour lines

等高面高度/km	强降水			弱降水		
	3	4	5	3	4	5
平均偏差/dB	-2	-2.2	-1.5	-2.6	-1.3	-1.4
标准偏差/dB	3.24	2.82	2.33	3.55	3.44	3.3
相关系数(R^2)	0.93	0.93	0.94	0.74	0.62	0.64
样本量/对	198	308	380	375	430	295

0.3 以下,满足其中一个指标则标识为疑误。

3.2 全国天气雷达均一性评估系统

通过读取全国相邻雷达配对表,根据雷达实际

运行状况选取相邻雷达均一性对比等高面,将均一性算法在中国气象局气象探测中心的“‘天衡’——综合气象观测数据质量控制系统”中进行了业务集成,从2018年6月开始试运行,依据均一性评估标

表 4 重庆地区相邻雷达配对表
Table 4 Adjacent radar matching table
in Chongqing Area

雷达本站	配对站
重庆 (SA)	南充 (SC)
	永川 (SA)
	达州 (SC)
万州 (SB)	恩施 (SB)
	黔江 (CD)
	恩施 (SB)
黔江 (CD)	张家界 (SA)
	南充 (SC)
	乐山 (SC)
永川 (SA)	宜宾 (SC)

准,实现了对全国天气雷达有回波区域的均一性实时检测、实时评估,可查询实时和历史均一性评估数据,并给出全国不同省份、不同波段、不同雷达型号的均一性整体评估状况。

4 均一性评估效果

4.1 按不同雷达波段、不同雷达型号进行均一性评估

我国天气雷达分别由不同厂家进行生产组装,

表 5 均一性评估标准
Table 5 Homogeneity evaluation standard

	平均偏差/dB	标准偏差/dB	相关系数	满足条件	评估结果
评估标准 1	$av \leq 3$	$std \leq 5$	$R^2 \geq 0.5$	同时满足	可信
评估标准 2	$3 < av \leq 5$	$5 < std \leq 8$	$0.3 \leq R^2 < 0.5$	满足其一	可疑
评估标准 3	$av > 5$	$std > 8$	$R^2 < 0.3$	满足其一	疑误

雷达主要硬件、软件系统差异较大,受客观条件限制,前期雷达布网时未能进行有效的均一性检查,因此十分有必要对不同波段、不同型号天气雷达的均一性状况进行有效评估,了解各雷达之间的整体均一性状况。

选取 2018 年全国主汛期 1 个月(6 月 10 日至 7 月 10 日)的雷达数据,对全国雷达回波均一性状况进行了评估,从图 6 可以看出全国整体可信率为 55.3%、可疑率为 38.8%、疑误率为 6%。其中,S 波段雷达可信率为 62.4%、C 波段雷达可信率仅为 20.6%;SA 雷达可信率最高,达到 70.1%,SB 和

SC 的可信率分别为 45.2%和 23.9%;C 波段雷达可信率整体偏低,均在 25%以下,可疑率均超过 65%,CC 和 CD 雷达可信率均不足 20%。C 波段雷达可信率低的主要原因为其探测回波强度偏低,回波一致性较差,对晴空回波和弱回波的探测能力较弱。

4.2 按不同省份进行均一性评估

我国各省(区、市)雷达布设情况差异较大,江苏、广东等地均为 SA 雷达,湖南、重庆等省(市)雷达型号达 3 种,各省雷达保障能力不同,雷达定标也不尽相同,这些都会造成雷达回波不一致。

对 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日期间全国各省(区、市)雷达回波均一性状况进行评估,发现各省均一性状况差异较大(图 7),雷达数量多、型号单一的江苏、河南、浙江等地,可信率均在 70%以上;四川、重庆地区主要为山区,地形复杂,波束阻挡较严重,雷达型号种类较多,该区域相邻雷达回波之间均一性状况较差;甘肃省雷达回波可信率为 0%,本文仅使用相同算法对不同省(区、市)相邻雷达数据进行分析,得出该省相邻雷达之间一致性较差,由于缺乏实地调研,且对该省(区、市)雷达运行保障实况不了解,无法定量描述该省雷达资料在组网拼图中的意义和具体使用价值。

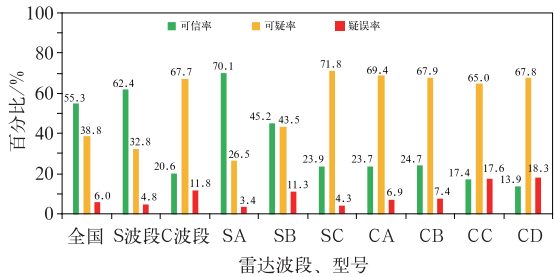


图 6 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日
全国不同雷达波段、不同雷达
型号均一性评估

Fig. 6 Homogeneity assessment of
different radar bands and models in China
from 10 June to 10 July 2018

图 8 单独对江苏 9 部 SA 雷达均一性状况进行了评估,全省雷达可信率达到 81.2%,南通和淮安两部雷达可信率超过 90%,回波平均偏差和标准偏差分别在 2 和 5 dB 以内。江苏雷达型号单一,探测环境保护较好,定标一致,雷达回波均一性状况整体较好。

4.3 一次降水过程评估

选取 2018 年 6 月 6 日 11—12 时对中国天气雷达均一性状况进行评估,全国一共 27 部雷达达到均一性评估阈值,主要为浙江、福建、广东地区 S 波段雷达。通过评估发现此次降水过程可信雷达部数为 23 部,占比 85.19%;可疑雷达部数为 3 部,占比 11.11%;疑误雷达部数为 1 部,占比 3.7%。标识可疑的 3 部雷达站分别是宁波站、厦门站、深圳站,通过分析发现宁波站存在严重的电磁干扰(图 9a);厦

门站在 0.5° 仰角层、 $315^\circ \sim 360^\circ$ 方位处(图 10a、10b),深圳站在 0.5° 仰角层、 $315^\circ \sim 45^\circ$ 方位处都存在严重的波束阻挡(图 10c、10d);舟山站(图 9b)相比周边雷达(如宁波站,图 9a),回波强度明显偏低,被标识为疑误。

4.4 临沂站回波位置偏差

全国新一代天气雷达均一性评估系统显示临沂站自 2018 年 7 月 8 日起与周边多部雷达(潍坊、青岛、宿迁、连云港、徐州)均一性评估状态全部显示为疑误(红色连线),主要表现为标准差大、相关性低,而周边其他雷达站相互之间的均一性状况均较好(图 11)。

调看 2018 年 7 月 10 日 11 时临沂、潍坊、连云港 3 站 0.5° 仰角雷达基本反射率因子单站图(图 12),发现临沂站的主要回波区已经明显偏向山

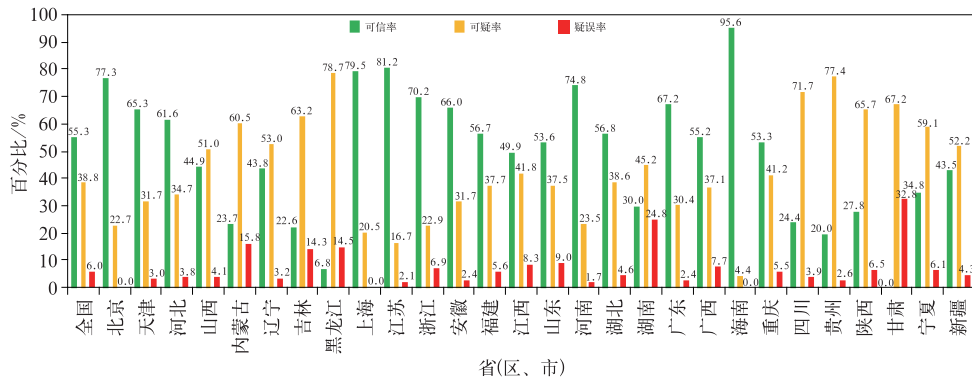


图 7 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日全国不同省(区、市)雷达均一性状况评估

Fig. 7 Assessment of radar homogeneity in different provinces of China from 10 June to 10 July 2018

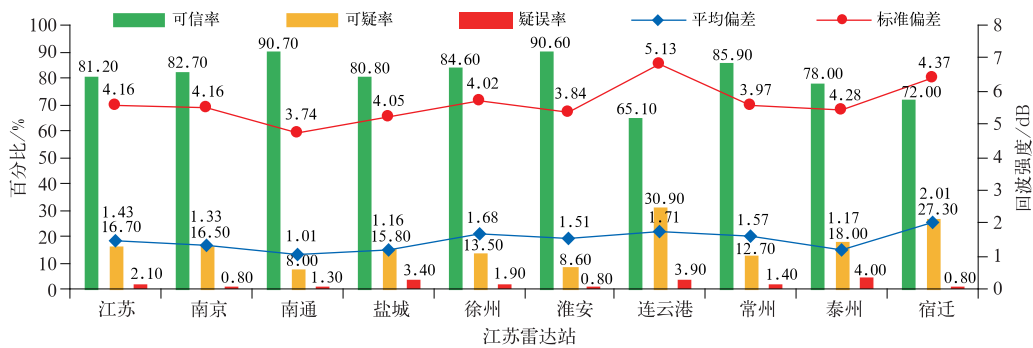


图 8 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日江苏雷达均一性状况评估

Fig. 8 Evaluation of radar homogeneity in Jiangsu Province from 10 June to 10 July 2018

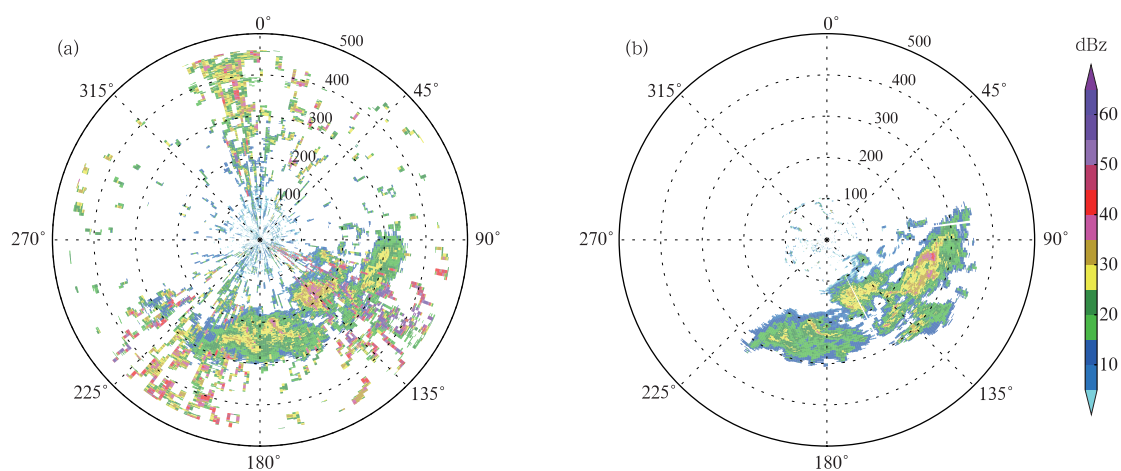


图 9 2018 年 6 月 6 日 11—12 时宁波站(a)和舟山站(b)单站回波强度图

Fig. 9 Single-station echo intensity of Ningbo Station (a) and Zhoushan Station (b) at 11:00–12:00 BT 6 June 2018

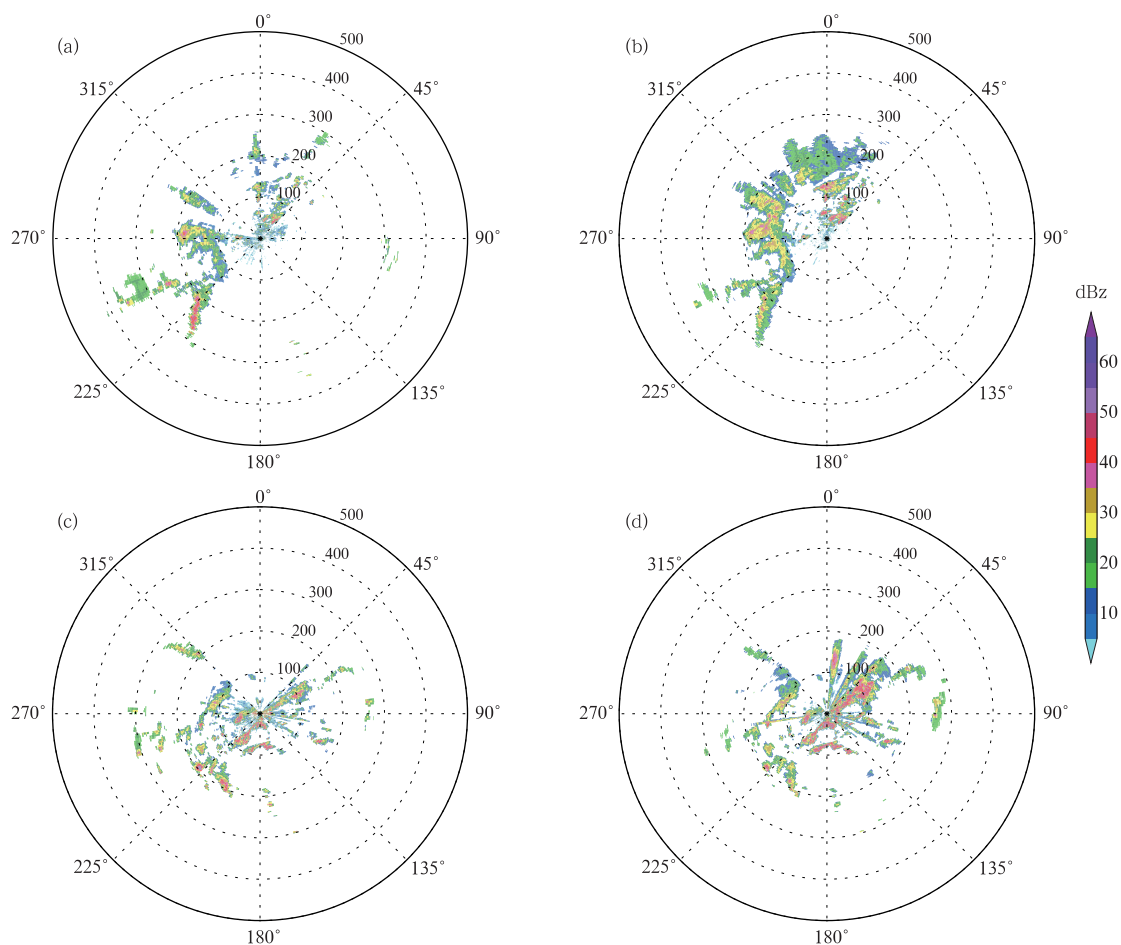


图 10 2018 年 6 月 6 日 11—12 时厦门站(a,b)、深圳站(c,d)0.5°(a,c)

和 1.5°(b,d)仰角层单站回波强度图

Fig. 10 Single-station echo intensity of Xiamen Station (a, b) and Shenzhen Station (c, d) at elevation levels of 0.5° (a, c) and 1.5° (b, d) at 11:00–12:00 BT 6 June 2018



图 11 临沂站均一性评估效果图

Fig. 11 Effect chart of homogeneity assessment at Linyi Station

东半岛南部,而其他 2 站的主要回波区都在山东半岛附近。至此可以确定临沂站雷达回波位置发生顺时针偏移,疑似天伺系统发生故障。临沂站在方位 $300^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 存在地物阻挡,通过查看该站 2018 年 7 月 7 日 05—08 时的地物回波图发现从 7 日 05:24 开始地物阻挡回波位置沿顺时针方向发生偏移,一直到 08 时偏移量达到 15° 左右。2018 年 7 月 10 日台站通过太阳法定标,发现临沂站方位偏差达 16.88° ,由于雷达方位联轴节松动,导致天线方位发生偏移。

图 13 展示了临沂站故障修复前后均一性评估状况,可以看出故障发生期间(2018 年 7 月 7—10 日)该站均一性评估数据明显异常:平均偏差和标准偏差较大、相关性差。由此可见均一性评估系统能在第一时间检测出雷达回波空间位置指向是否正确,判断雷达是否存在故障。

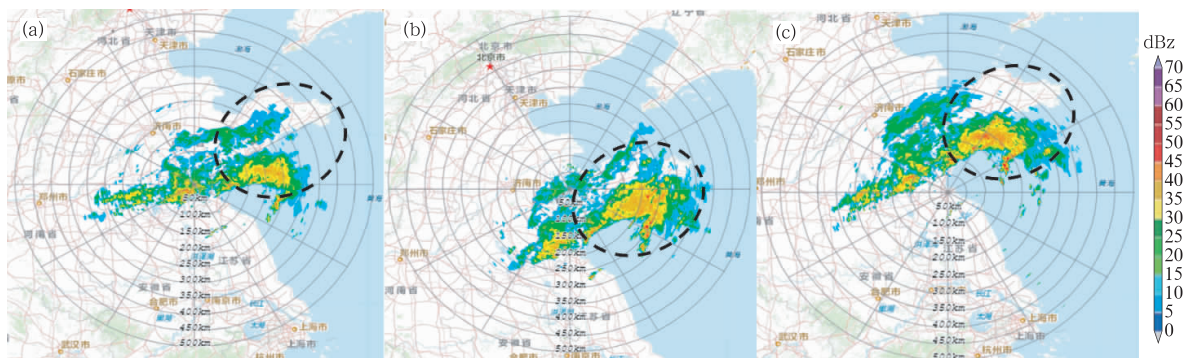


图 12 2018 年 7 月 10 日 11 时临沂(a)、潍坊(b)和连云港(c)3 站单站回波对比

Fig. 12 Single-station echo comparison of Linyi Station (a), Weifang Station (b) and Lianyungang Station (c) at 11:00 BT 10 July 2018

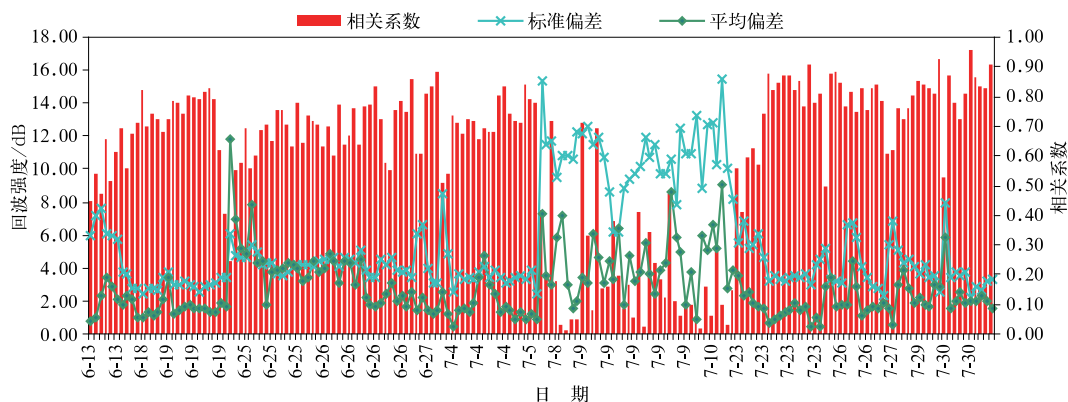


图 13 2018 年 6 月 13 日至 7 月 30 日临沂站方位偏差故障修复前后回波强度偏差及相关系数对比

Fig. 13 Comparison of echo intensity deviation and correlation coefficient before and after repairing the azimuth deviation fault of Linyi Station from 13 June to 30 July 2018

5 结论和讨论

本文基于质量控制后的单站 CAPPI 格点数据,通过研究相邻雷达观测重叠区域等距离线上的回波特征,建立了相邻天气雷达均一性算法;结合我国天气雷达波段不一、型号种类多、海拔高度跨度大等探测现状,设计了相邻雷达自动配对和等高面自动选择程序,提高了算法运算精度和执行效率;通过制定适合国内天气雷达回波观测差异的均一性评估标准,实现了均一性算法在气象雷达业务中的集成,建立了全国天气雷达均一性实时评估系统。

从均一性评估系统运行效果来看,该系统实现了对不同波段、不同型号、不同省份以及特定降水过程相邻雷达之间的均一性实时评估,在雷达站有回波但回波强度和回波位置不准确时,均一性评估算法能有效弥补其他雷达质控算法的不足,及时检测到回波异常,判断故障点,指导故障维修;同时该系统还能对前端雷达精细化定标、后端雷达数据同化过程中的偏差订正,以及未来新建雷达站型号定型等提供有效的均一性指标。

参考文献

- 程昌玉,张乐坚,梁海河,等,2017. 基于气象卫星资料的天气雷达非降水回波消除方法[J]. 气象与减灾研究,40(2):141-145. Cheng C Y, Zhang L J, Liang H H, et al, 2017. Elimination method of non-precipitation echoes in weather radar based on meteorological satellite data[J]. Meteor Disaster Reduct Res, 40(2): 141-145(in Chinese).
- 高士博,闵锦忠,黄丹莲,2016. EnSRF 雷达资料同化在一次飑线过程中的应用研究[J]. 大气科学,40(6):1127-1142. Gao S B, Min J Z, Huang D L, 2016. The simulation of a squall line with Doppler radar data assimilation using the EnSRF method[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6): 1127-1142(in Chinese).
- 景号然,谢晓琳,郑伟,等,2019. 基于 SRTM 数据的天气雷达探测环境分析研究[J]. 气象,45(6):871-876. Jing H R, Xie X L, Zheng W, et al, 2019. Research on weather radar environment detection based on SRTM elevation data[J]. Meteor Mon, 45(6): 871-876(in Chinese).
- 李建通,高守亭,郭林,等,2009. 基于分步校准的区域降水量估测方法研究[J]. 大气科学,33(3):501-512. Li J T, Gao S T, Guo L, et al, 2009. The two-step calibration technique of estimating areal rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 33(3): 501-512(in Chinese).
- 刘黎平,张沛源,梁海河,等,2003. 双多普勒雷达风场反演误差和质量控制[J]. 应用气象学报,14(1):17-29. Liu L P, Zhang P Y, Liang H H, et al, 2003. Error estimation in wind fields derived from dual-Doppler radar and data quality control[J]. J Appl Meteor Sci, 14(1): 17-29(in Chinese).
- 王玉发,杨洪平,肖艳姣,等,2000. 多普勒天气雷达站址视程的客观分析技术[J]. 应用气象学报,11(4):440-447. Wan Y F, Yang H P, Xiao Y J, et al, 2000. An objective method for analyzing the horizon of Doppler weather radar stations[J]. Quart J Appl Meteor, 11(4): 440-447(in Chinese).
- 王红艳,王改利,刘黎平,等,2015. 利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究[J]. 大气科学,39(1):59-67. Wang H Y, Wang G L, Liu L P, et al, 2015. Development of a real-time quality control method for automatic rain gauge data using radar quantitative precipitation estimation[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 59-67(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,张志强,2014. S 波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用[J]. 气象学报,72(2):390-401. Wu C, Liu L P, Zhang Z Q, 2014. Quantitative comparison algorithm between the S-band phased array radar and the CINRAD/SA and its preliminary application[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 390-401(in Chinese).
- 肖艳姣,刘黎平,2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报,64(5):647-657. Xiao Y J, Liu L P, 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics[J]. Acta Meteor Sin, 64(5): 647-657(in Chinese).
- 肖艳姣,刘黎平,杨洪平,2007. 区域雷达网同步观测对比分析[J]. 气象学报,65(6):919-927. Xiao Y J, Liu L P, Yang H P, 2007. A contrast analysis of synchronous observations from regional radar network[J]. Acta Meteor Sin, 65(6): 919-927(in Chinese).
- 许小永,刘黎平,郑国光,2006. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验[J]. 大气科学,30(4):712-728. Xu X Y, Liu L P, Zheng G G, 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman Filter[J]. Chin J Atmos Sci, 30(4): 712-728(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:3. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Business Application[M]. Beijing: China Meteorological Press: 3(in Chinese).
- 张林,杨洪平,裴翀,等,2018. 相邻雷达回波差异检测方法研究与应用[J]. 气象,44(2):268-276. Zhang L, Yang H P, Pei C, et al, 2018. Analysis and application of the test method of reflectivity difference between adjacent radars[J]. Meteor Mon, 44(2): 268-276(in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:11-118. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 11-118(in Chinese).
- 张勇,吴胜刚,张亚萍,等,2019. 基于 SWAN 雷达拼图产品在暴雨过程中的对流云降水识别及效果检验[J]. 气象,45(2):180-190. Zhang Y, Wu S G, Zhang Y P, et al, 2019. Identification and

- effect verification of convective cloud precipitation in rainstorm processes based on SWAN mosaic products[J]. Meteor Mon, 45(2):180-190(in Chinese).
- 张志强, 刘黎平, 王红艳, 等, 2008. 华北区域四部雷达探测强度与定位一致性分析[J]. 气象, 34(9):22-27. Zhang Z Q, Liu L P, Wang H Y, et al, 2008. Analysis on the consistency of intensity and positioning in four radars of North China[J]. Meteor Mon, 34(9):22-27(in Chinese).
- 郑淋淋, 邱学兴, 钱磊, 2019. 同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究[J]. 气象, 45(1):73-87. Zheng L L, Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J]. Meteor Mon, 45(1):73-87(in Chinese).
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等, 2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J]. 气象学报, 69(2):352-362. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al, 2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wave-length cloud radar (HMBQ) and its detection capability[J]. Acta Meteor Sin, 69(2):352-362(in Chinese).
- 周海光, 2013. 新一代多普勒天气雷达网探测数据对比分析系统[J]. 计算机应用, 33(1):270-275. Zhou H G, 2013. Data comparison software system for new generation Doppler weather radar network[J]. J Comput Appl, 33(1):270-275(in Chinese).
- Delobbe L, Holleman I, 2004. Quality of echotop products and derived probability of hail as a function of range[C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Gotland; Copernicus GmbH:87-90.
- Huuskonen A J, Hohti H, Kuitunen T, et al, 2010. Weather radar pointing and calibration level adjustment by solar observations and pair-wise comparison of reflectivity[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Sibiu; Romania National Meteorological Administration:121-126.
- Tabary P, 2003. Efforts to improve the monitoring of the French radar network[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle; American Meteorology Society:482-485.