

张林,李峰,冯婉悦,等,2021. 移动 X 波段双线偏振雷达数据质量分析及偏差订正[J]. 气象,47(3):337-347. Zhang L, Li F, Feng W Y, et al, 2021. Research of data quality analysis and bias correction on mobile X-band dual-polarization weather radar [J]. Meteor Mon, 47(3):337-347(in Chinese).

移动 X 波段双线偏振雷达数据质量分析及偏差订正^{*}

张 林¹ 李 峰¹ 冯婉悦² 刘新安³

1 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2 新疆维吾尔自治区气象技术装备保障中心,乌鲁木齐 830002

3 南京恩瑞特实业有限公司,南京 211106

提 要: 2019 年 8 月,中国电子科技集团第十四研究所南京恩瑞特实业有限公司研制的 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达在江苏大丰进行外场观测。根据该雷达外场观测资料,联合盐城新一代 SA 天气雷达和江苏省 6 个雨量站资料,对移动 X 波段双线偏振雷达做数据质量分析。结果表明,针对同一次降水过程而言,距离越远,衰减越大。为了降低衰减造成的观测误差,首先利用信噪比对差分反射率 Z_{dr} 、零滞后相关系数 $\rho_{hv}(0)$ 进行偏差订正,提高 Z_{dr} 和 $\rho_{hv}(0)$ 的数据质量,以便进行地杂波、生物回波等非降水回波过滤。然后应用去抖动滤波后的差分传播相移率 K_{dp} 或总差分传播相位 ϕ_{dp} 表达在雨中距离雷达 R 处的总双向反射率因子衰减订正值。数据分析表明,订正后移动 X 波段双线偏振雷达数据质量得到了提高。

关键词: X 波段双偏振雷达,数据质量,衰减订正

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.007

Research of Data Quality Analysis and Bias Correction on Mobile X-Band Dual-Polarization Weather Radar

ZHANG Lin¹ LI Feng¹ FENG Wanyue² LIU Xinan³

1 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

2 Observation Center of Uygur Autonomous Regional Meteorological Service, Urumqi 830002

3 Nanjing Nriet Industrial Co., Ltd., Nanjing 211106

Abstract: In August 2019, the GLC-12A-type mobile X-band dual-polarization weather radar, developed by Fourteen Research Institute of China Electronics Technology Group, was used to conduct field tests in Dafeng, Jiangsu Province. In this paper, the data quality of the mobile X-band dual-polarization radar was analyzed by using the field observation data of this radar and the CINRAD/SA radar in Yancheng, and the data of six rainfall stations in Jiangsu Province. The results show that the attenuation of the radar after passing through the rain area is related to the distance. For the same precipitation process, the farther the distance, the greater the attenuation. In order to reduce the observation error caused by attenuation, the difference reflectivity Z_{dr} and correlation coefficient $\rho_{hv}(0)$ are corrected by signal-to-noise ratio (SNR) to improve the data quality for ground or biological clutter removing. Then the differential propagation phase shift rate K_{dp} or differential propagation phase ϕ_{dp} after quality control was used to express the total bidirectional reflectivity factor attenuation correction at the distance of R in rain. At last, data analysis shows that the data quality of the revised mobile X-band dual-polarization radar has been improved.

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506103)资助

2020 年 1 月 9 日收稿; 2020 年 11 月 4 日收修定稿

第一作者:张林,主要从事天气雷达及双偏振雷达资料应用研究. E-mail:zhanglin1834@163.com

Key words: X-band dual polarization weather radar, data quality, attenuation correction

引言

双线偏振雷达是指可以发射水平和垂直偏振状态电磁波的雷达系统。它可以通过探测到的原始数据反演出一些新的物理量,如差分反射率因子 Z_{dr} 、差分传播相位 ϕ_{dp} 、差分传播相移率 K_{dp} 、零滞后相关系数 $\rho_{hv}(0)$ 等偏振参数。使用这些新物理量,可以提高测雨精度和识别冰雹的准确率,了解一定区域内降水粒子相态与形状,确定雨滴谱参数等,以及对非球形的云雨等降水粒子群的探测也都具有实际意义(张培昌等,2018)。

目前,美国已全面完成 158 部布网 S 波段雷达 (WSR-88D) 双线偏振雷达升级和业务化应用。我国也正在加快推进双线偏振雷达业务化发展进程,广东全省雷达和江苏省部分雷达已率先完成了 S 波段 WSR-98D 双线偏振雷达升级和业务化(张林等,2018)。

关于雷达数据质量分析,王超等(2019)分析了北京市气象局和佛山市气象局的 X 波段双线偏振雷达资料,统计偏振测量参数的变化规律,从而分析了地物、避雷针和旋转及俯仰关节等对双偏振参量测量精度的问题,并提出对应的质量控制方法。杜牧云等(2013)分析了升级改造前后的 C 波段双线偏振雷达资料,指出信噪比小于 25 dB 时, Z_{dr} 和 $\rho_{hv}(0)$ 受噪声影响存在明显测量误差。张志强和刘黎平(2011)、吴翀等(2014)分析提出了基于不同地理位置、不同分辨率的雷达反射率因子匹配方法和观测资料的定量对比方法。张林等(2018)通过时间、空间一致性匹配,将相邻两部雷达重叠区资料进行定量对比分析。本文用新一代 SA 天气雷达数据和自动雨量站资料与 X 波段双线偏振雷达定量对比分析,结果表明 X 波段双线偏振雷达信号衰减为影响其观测误差的重要因素。

针对 X 波段双线偏振雷达信号衰减问题,国内学者也开展了大量的研究工作,胡志群等(2012)采用 Z_h - K_{dp} 综合订正法进行衰减订正并评估其对降水估测的影响。王晗等(2016)对比分析了 K_{dp} 订正法、 Z_h 订正法和 ZPHI 降水廓线订正法在 X 波段双线偏振雷达衰减订正中的使用效果,结果表明, K_{dp} 订正法和 ZPHI 订正法的订正效果比较好,优于 Z_h

订正法。毕永恒等(2012)采用自适应约束算法对 X 波段雷达进行衰减订正,分析表明当存在较大范围降水时,订正后的效果显著优于订正前,能提高降水估测精度。

关于双线偏振雷达数据质量控制,美国强风暴实验室(NSSL)研发了美国业务双线偏振雷达(WSR-88D)非降水回波识别算法,并应用于定量估测降水业务中(Tang et al,2014)。张林等(2018)针对中国上海南汇 S 波段 WSR-88D 双线偏振雷达,设计了数据质量控制流程。朱轶明等(2019)研究了上海 WSR-88D 双线偏振生物回波识别算法。肖艳姣等(2012)针对移动 X 波段双线偏振雷达数据质量问题,提出了一套差分传播相位数据质量控制算法,用来识别和消除差分传播相位数据中的地物杂波、退折叠的相位和滤除正常的随机差分相位波动。杜牧云等(2012)处理 C 波段双线偏振雷达资料,根据信噪比和相关系数将差分传播相位资料分为较好、较差和差这三类分别处理,提高差分传播相位数据质量。差分传播相移率 K_{dp} 是雷达波束穿过雨区时,单位距离内水平与垂直偏振方向相位差引起的,与雨区衰减无关,普遍用于短波长双线偏振雷达型号衰减订正上。而 K_{dp} 订正法的前提是数据质量稳定可靠。原始资料中可能存在地杂波等非降水回波,虽然 $\rho_{hv}(0)$ 和 Z_{dr} 是消除非降水回波的有效偏振参量(Tang et al,2014;张林和杨洪平,2018),但两者在信噪比较小时容易产生测量偏差,因此需要在衰减订正前对偏振测量参数进行偏差订正。

2008 年 12 月国家重点研发计划“龙卷风探测雷达研制及业务化应用研究”项目落地,项目计划在龙卷风灾害风易发区江苏省大丰、高邮等多个地区布设多波段多体制雷达(包括移动 X 波段双线偏振雷达、C 波段相控阵雷达等),开展外场观测试验,捕捉龙卷、强对流天气,利用高分辨率的观测资料分析龙卷精细化结构及演变特征。本文分析和处理 2019 年 8 月在龙卷风观测区域开展试验的 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达观测资料,利用 K_{dp} 表达在雨中任意距离的水平反射率因子衰减订正值。为龙卷风观测区域多部雷达组网拼图、研究分析龙卷精细结构和演变特征奠定基础。

1 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达系统和外场试验

1.1 性能参数

表 1 列出了 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达主要性能指标,在本次观测过程中,采用的是单发双收的极化方式,距离库长为 60 m,距离范围为 75 km。

表 1 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达主要性能参数

Table 1 The main parameters of GLC-12A mobile X band dual polarization weather radar			
项目	性能指标	项目	性能指标
工作频率	9.3~9.5 GHz	测量范围	强度: -20~70 dBz; 速度: 64 m·s ⁻¹
天线直径	2.4 m		速度谱宽: 0~16 m·s ⁻¹
脉冲重复频率	300~5 000 Hz		差分反射率: -8~8 dB
波束宽度	≤1°		差分传播相位: -180°~180°
距离库长	60 m		差分传播相移率: -2°~10° km ⁻¹
距离范围	75 km		相关系数: 0~1
天线扫描俯仰范围	-2°~90°	参数测量精度	距离≤75 km, 强度≤1 dBz,
天线扫描方位范围	0~360°		速度≤1 m·s ⁻¹ , 谱宽≤1 m·s ⁻¹ ,
			差分反射率因子≤0.2 dB,
			差分传播相位≤2°,
			差分传播相移率: ≤0.1° km ⁻¹ ,
			相关系数≤0.01

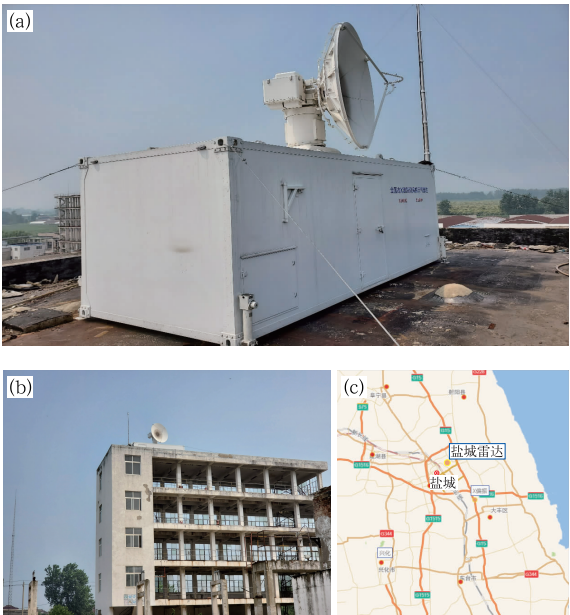


图 1 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达外场试验 (a)雷达样机, (b)架设位置, (c)位置关系 (黄点为雷达位置, 红点为雨量站位置)

Fig. 1 Field Test of GLC-12A mobile X-band dual-polarization weather radar (a) radar hardware, (b) positon, (c) positional relation in Gaode Map (yellow dot: postion of radar, red dot: automatic rainfall station)

1.2 试验场地和位置

国家重点研发计划“龙卷风探测雷达研制及业务化应用研究”第二课题“龙卷探测雷达组网技术及自适应协同观测试验”负责外场观测试验。为尽快取得龙卷、强对流观测资料,由江苏省气象局联合中国电子科技集团第十四研究所南京恩瑞特实业有限公司,于 2019 年 8 月在江苏省大丰市进行外场观测试验。图 1a 为 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达样机。雷达架设在一栋楼顶上(图1b)。图1c为高

德地图上显示该 X 波段双偏振雷达、盐城新一代 SA 天气雷达和江苏省 7 个自动雨量站(大丰、盐城、东台、射阳、建湖、兴化、阜宁)位置示意图。

根据经纬度与雷达极坐标之间的转换公式(张林和杨洪平, 2018; 吴翀等, 2014), 将雨量站、雷达站经纬度代入公式, 计算得到每部雨量站相对于 X 波段双线偏振雷达、盐城 S 波段新一代天气雷达的方位和距离, 如表 2 所示。

表 2 雨量站与雷达距离

Table 2 The distance between automatic rainfall station and radar

雨量站	与 X 波段双线偏振雷达 距离/km, 方位/(°)	与盐城新一代天气雷达 距离/km, 方位/(°)
大丰	12.4, 138	37.5, 142
盐城	25.5, 288	15.6, 217
东台	45.1, 190	65.1, 174
射阳	55.9, 354	36.5, 14
建湖	60.1, 294	40.3, 276
兴化	60.6, 236	64.7, 213
阜宁	77.4, 322	52.4, 322

2 数据质量分析

2.1 降水过程的雨量站数据统计

阜宁雨量站距移动 X 波段双线偏振雷达为 77.4 km,超出了该雷达在本次观测过程中的最大探测距离。本文采用 6 个雨量站(大丰、盐城、东台、射阳、建湖、兴化)和盐城新一代 SA 天气雷达数据作为对比,分析移动 X 波段双线偏振雷达数据质量。

2019 年 8 月 10—11 日,在江苏省发生了大面积连续性降水过程。表 3 给出了 6 个雨量站在本次过程不同降水时段的最大小时降水量。

2.2 雷达回波定性分析

选取 2019 年 8 月 11 日降水过程中 03 时观测数据,图 2a 为盐城新一代 SA 天气雷达观测回波(一圈代表 50 km,最大探测距离 230 km),其中红色三角形和圆圈为移动 X 波段双线偏振雷达位置和观测范围,距盐城新一代 SA 天气雷达约 25 km。图 2b 为移动 X 波段双线偏振雷达观测回波(第一圈代表 50 km,第二圈代表 90 km,回波最远探测距离是 75 km)。从图中直观对比可知,移动 X 波段

双线偏振雷达观测的回波结构和轮廓与新一代 SA 天气雷达基本一致,所不同的是移动 X 波段双线偏振雷达的距离分辨率(60 m)更高,有利于观测强对流、冰雹及龙卷等灾害天气的精细结构演变,但新一代 SA 天气雷达探测范围广,灵敏度更高,因此其弱回波的探测能力更强。

表 3 2019 年 8 月 11 日强降水观测过程
Table 3 The heavy rainfall observed on 11 August 2019

雨量站	最大小时降水量/0.1 mm	观测时间段 (日起始时—终止时)/BT
大丰	88	10 日 03:00—12:00
	140	10 日 13:00—20:00
	140	10 日 21:00—11 日 05:00
	34	11 日 05:40—07:00
盐城	50	10 日 04:30—12:00
	62	10 日 13:30—20:00
	250	10 日 21:00—11 日 06:00
	93	10 日 02:30—11:00
东台	219	10 日 17:20—11 日 05:00
	9	11 日 06:20—10:00
	23	10 日 08:50—10:00
射阳	83	10 日 18:00—21:00
	207	10 日 22:00—11 日 08:00
	71	10 日 05:00—13:00
建湖	144	10 日 14:20—11 日 07:00
	100	10 日 03:30—12:00
	10	10 日 14:00—17:00
兴化	126	10 日 18:00—11 日 03:00
	23	11 日 04:30—10:00

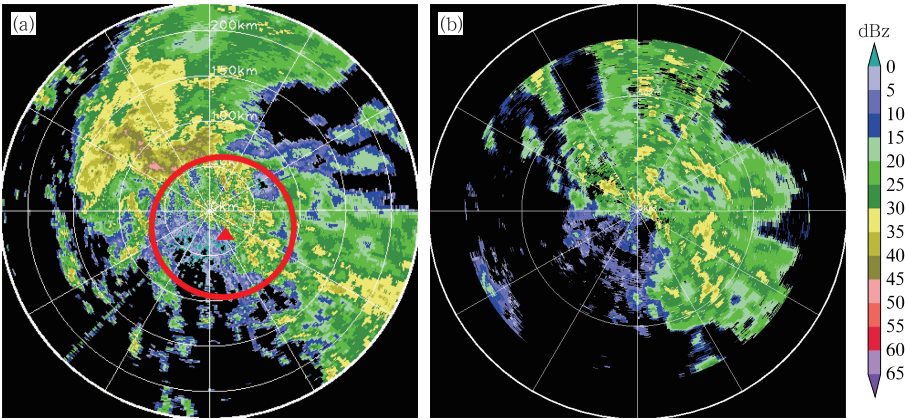


图 2 2019 年 8 月 11 日 03 时雷达观测回波
(a)盐城新一代 SA 天气雷达 0.5°仰角观测,(b)移动 X 波段双线偏振雷达 1.5°仰角观测
(红色三角和圆圈:X 波段雷达架设位置和观测范围)
Fig. 2 The radar image at 03:00 BT 11 August 2019
(a) CINRAD/SA of 0.5° elevation angle in Yancheng,
(b) mobile X-band dual-polarization weather radar of 1.5° elevation angle
(red triangle and circle; position and observation range of X-band dual-polarization weather radar respectively)

2.3 雷达和雨量站观测值定量分析

根据表 2 中雨量站在两部雷达上的极坐标(方位、距离),取雨量站点在两部雷达坐标上的反射率因子观测数据,挑选与雷达观测时间最近时次的 5 min 雨量站数据做对比(两部雷达均为 6 min 观测一次)。图 3 为 6 个雨量站数据随时间序列统计,其中横轴为时间序列,主纵轴(左)为反射率因子观测值,次纵轴(右)为 5 min 雨量值。

求两部雷达在雨量站处平均反射率因子($dBz_{SA}-dBz_X$),如表 4 所示,平均偏差随距离增大

也呈上升趋势。由此可知,X 波段双线偏振雷达穿过雨区后受到的衰减与距离有关。针对同一次降水过程而言,距离越远,衰减越大。其中,盐城雨量站处(距离 X 波段雷达 25.5 km)的平均反射率因子偏差较大,可能是因为 X 波段雷达观测的反射率因子高值区(超过 40 dBz)的衰减严重或两者海拔高度的不一致等因素造成统计上存在较大的偏差。

3 数据偏差订正

雷达接收的回波功率 $P_r=P_r^*+N_r$,其中 P_r^*

表 4 两部雷达在雨量站位置处平均反射率因子偏差

Table 5 The average reflectivity factor deviation observed by two radars at rainfall station

雨量站	平均反射率 偏差/dBz	与 X 波段双线偏振 雷达距离/km	与盐城新一代天气 雷达距离/km
大丰	0.98	12.4	37.5
盐城	5.3	25.5	15.6
东台	2.1	45.1	65.1
射阳	3.9	55.9	36.5
建湖	5.4	60.1	40.3
兴化	6.5	60.6	64.7

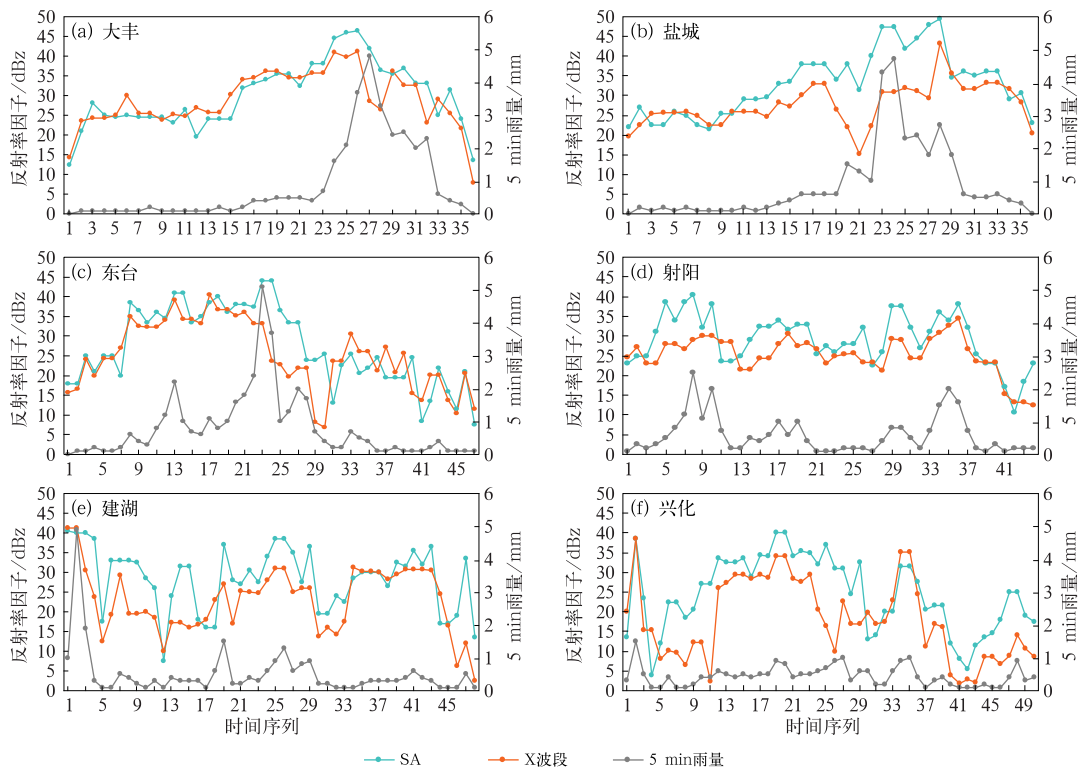


图 3 两部雷达和 6 个雨量站观测值定量分析
(a)大丰,(b)盐城,(c)东台,(d)射阳,(e)建湖,(f)兴化

Fig. 3 Quantitative analysis of radar and rainfall data

(a) Dafeng, (b) Yancheng, (c) Dongtai, (d) Sheyang, (e) Jianhu, (f) Xinghua

是气象目标回波功率, N_r 是噪声功率, P_r^* 应等于 $P_r - P_{\text{mix}}$, 取 dB 后为 $10\lg P_r/P_{\text{mix}} = \text{SNR}$, 即信噪比(SNR)代表气象目标回波功率 P_r^* 的 dB 值。由于接收机的噪声电平受温度影响会随时间变化, 故某一时刻测得的回波功率 P_r 中所包含的噪声功率, 不一定正好等于设定的最小可测功率 P_{mix} , 则由 SNR 决定的气象目标回波功率 P_r^* 中, 可能仍含有少量噪声或被过多地扣除了噪声, 使 SNR 不能真正代表气象目标回波功率 P_r^* 的 dB 值, 即存在误差, 由它反演出的差分反射率 Z_{dr} 和零滞后相关系数 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 也会有误差。 Z_{dr} 和 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 在 SNR 较小时的误差变大, 这种现象会因发射功率随距离的增大而下降变得更加明显(张培昌等, 2018)。而 Z_{dr} 和 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 均为区分降水和非降水回波的有效参量, 因此需要对 Z_{dr} 和 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 数据进行噪声偏差订正, 为后续资料质量控制、降水相态分类提供稳定可靠的数据。

3.1 信噪比计算

本文分析的 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达没有直接给出 SNR 值, 故 SNR 通过雷达反射率因子 dBZ_h 和探测距离 R 间接计算得到(张培昌等, 2018):

$$\text{SNR} = \text{dBZ}_h - 20\lg(R) + C \quad (1)$$

式中: SNR 单位为 dB, R 单位为 km, C 是常数。

如图 4 所示, 2019 年 8 月 11 日 03 时为观测时刻, 经计算得到 1.5° 仰角的反射率因子(图 4a)和信噪比 SNR 测量值(图 4b)。

3.2 零滞后相关系数 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 订正

零滞后相关系数 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 是指当水平和垂直偏振波同时发射与接收时, 接收到回波水平偏振分量与垂直偏振分量之间的相关程度。

当信噪比大时, 属于气象信息的相关部分占的比例大, 故两种偏振的气象回波信号相关性好, 相关系数就高; 信噪比小时, 气象信息相关部分占的比例小, 相关系数就变小。从相关函数应反映气象目标特性而言, 这个变小就是一种误差, 必须通过信噪比的比值加以校正(张培昌等, 2018)。 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 的订正公式如下所示:

$$\rho_{\text{cor}}(0) = \rho_{\text{hv}}(0) \times (1 + 1/\text{snr}) \quad (2)$$

式中: $\text{snr} = 10^{0.1\text{SNR}}$ 。图 5 为 2019 年 8 月 11 日 03 时 1.5° 仰角信噪比订正前后的相关系数。从图 4a 中可知, 该时刻观测回波均为降水回波。图 5a 中 50 km 之外, 受信噪比下降的影响, 降水回波的相关系数降低到 0.7 左右, 经过订正后, 恢复到 0.9 以上。

根据 S 波段 WSR-88D 双线偏振雷达数据质量控制流程(张林和杨洪平, 2018)中的非降水回波识别方法, 将经过订正后的 Z_{dr} 和 $\rho_{\text{hv}}(0)$ 数据作为输入, 识别和消除地物、生物等非降水回波。

3.3 差分传播相位 ϕ_{dp} 订正

差分传播相位:

$$\phi_{\text{dp}} = \phi_{\text{hh}} - \phi_{\text{vv}} = \delta + \phi_{\text{dp}} \quad (3)$$

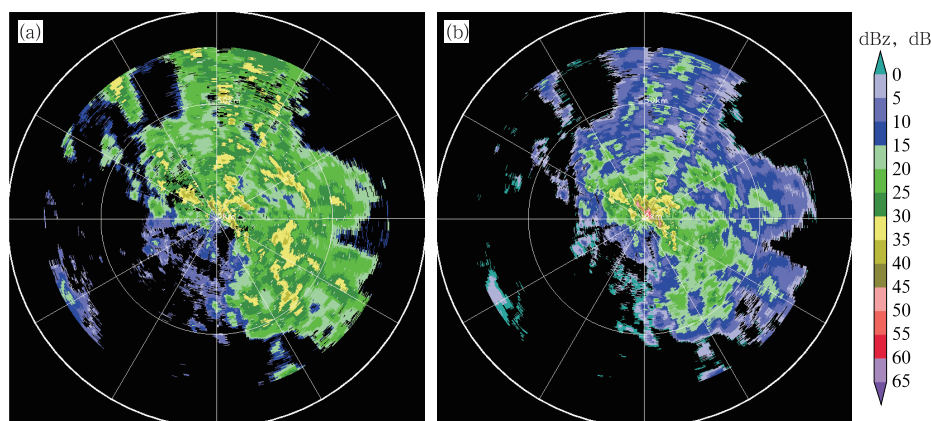


图 4 2019 年 8 月 11 日 03 时 1.5° 仰角反射率因子(a)和信噪比计算值(b)

Fig. 4 Values of reflectivity (a) and SNR (b) at 1.5° elevation angle

at 03:00 BT 11 August 2019

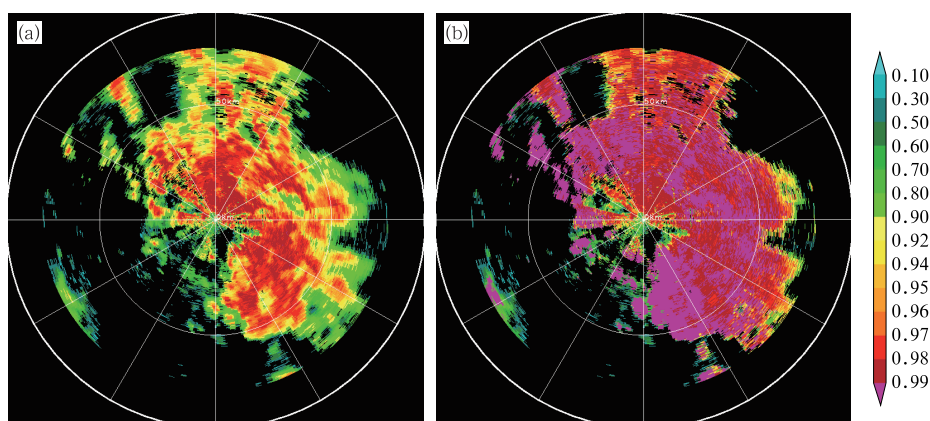


图5 2019年8月11日03时1.5°仰角信噪比订正前后的相关系数

(a)订正前,(b)订正后

Fig. 5 The SNR correction of correlation coefficient of 1.5° elevation angle at 03:00 BT 11 August 2019

(a) before correction, (b) after correction

式中: ϕ_{hh} 和 ϕ_{vv} 分别表示水平及垂直偏振发射波通过相同长度的一个降水区后,散射回天线处的相位值; δ 为由于散射造成的双程差分后向散射相移; ϕ_{dp} 为前向传播相位差,这里前向是指辐射源到接收体的方向,故粒子散射波射向天线也属于这种情况,它也是由于水平及垂直偏振波经过非球形粒子组成的降水区时造成的。

差分传播相位 ϕ_{dp} 是传播过程中非球形降水粒子对水平及垂直偏振波的传播相位变化不同而引起的,故 ϕ_{dp} 值的大小既与粒子形状、相态、取向有关,也与通过降水区的长度有关。 ϕ_{dp} 的大小能反映降水粒子的状况,其值随雨区增大而变大,当通过百千米以上的非球形雨区时, ϕ_{dp} 值可达上百度(张培昌等,2018)。

ϕ_{dp} 的准确与否,直接影响差分传播相移率 K_{dp} 的估计,在反射率因子 Z_h 和差分反射率因子 Z_{dr} 的衰减订正中,都要使用准确的 ϕ_{dp} ,因此需要对 ϕ_{dp} 数据进行质量控制,包括去折叠、抖动和滤波处理。

相位折叠是指当遇到大范围强降水时,降水回波远端的 ϕ_{dp} 可能会大于最大可测值而引起的折叠。肖艳姣等(2012)利用模糊逻辑区分地杂波和降水后,然后再看是否要对 ϕ_{dp} 值退折叠。本文选择将反射率因子和信噪比订正后的相关系数及差分反射率因子作为输入,进入双线偏振雷达数据质量控制流程消除地物、生物回波等杂波(张林和杨洪平,2018),然后根据径向连续性检查对 ϕ_{dp} 退折叠处理(张培昌等,2018)。

设径向上相邻两个非杂波点的有效差分传播相

位为 $\phi_{dp}(i-1)$ 、 $\phi_{dp}(i)$,若 $\phi_{dp}(i-1)-\phi_{dp}(i)\geq 140^\circ$,那么 $\phi_{dp}(i)$ 就被认为是折叠的,对其值加上 180° (最大、最小可测量值之间的间隔)就完成了退折叠。

因为后向散射相移以及噪声、地物及旁瓣等因素,引起 ϕ_{dp} 的值显著抖动。对 ϕ_{dp} 滤波的基本思路是,对偏离 ϕ_{dp} 平均趋势较大的值,本文通过比较每个 ϕ_{dp} 点与其邻近方位和距离库的窗口(可选 5×5 或 9×9)上的 ϕ_{dp} 值,偏差较大者进行滤波处理。对显著抖动的 ϕ_{dp} 值进行滤波方法是,首先沿径向对退折叠后的 ϕ_{dp} 进行4 km窗口的滑动平均,然后比较退折叠后的每个库中的 ϕ_{dp} 和其滑动平均值,如果二者的绝对差大于给定的阈值(本文取 10°),那么就利用滑动平均值取代该距离库的 ϕ_{dp} 值。2019年8月11日03时观测时刻,0.5°仰角上 ϕ_{dp} 去抖动和滤波处理前后图像(图6),红色圈内显示,滤波后的图像剔除了一些 ϕ_{dp} 抖动点。图7为该时刻 239° 方位上的 ϕ_{dp} 随距离的变化曲线,经过滤波后,该方位上消除了一些折叠或抖动的异常值。

3.4 衰减订正

Bringi and Chandrasekar(2010)通过散射的数值模拟表明:衰减率 A_h 和差分衰减率 $A_{dp}=A_h-A_v$ (A_h 、 A_v 分别为水平和垂直偏振波在降水区中的衰减率,单位: $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$)与差分传播相移率 K_{dp} 之间基本上为线性关系。因此,可利用 K_{dp} 或总差分传播相位 ϕ_{dp} 来表达在雨中距离雷达 R 处的总双向水平反射率因子衰减订正值 $\Delta Z_h(R)$ 和差分反射率因子的差分衰减订正 $\Delta Z_{dr}(R)$,其表达式如下:

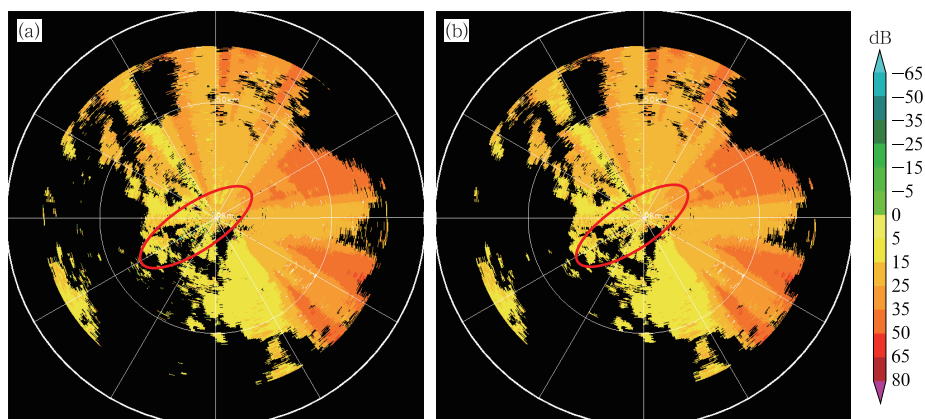


图 6 2019 年 8 月 11 日 03 时 1.5° 仰角差分传播相位 ϕ_{dp} 去抖动和滤波处理
(红色圈内存在一些抖动点)
(a) 滤波前, (b) 滤波后

Fig. 6 The de-jitter and filter processing of differential propagation phase
at 1.5° elevation angle at 03:00 BT 11 August 2019
(a) before filtering, (b) after filtering
(The red circle indicates the presence of some wobble points)

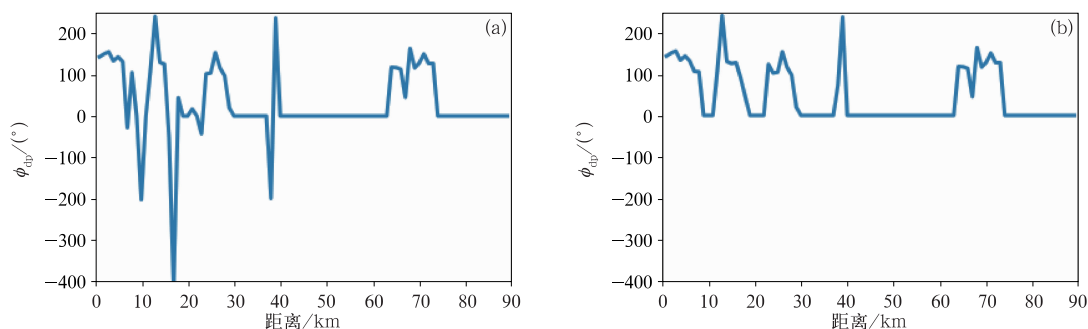


图 7 2019 年 8 月 11 日 03 时 1.5° 仰角差分传播相位 ϕ_{dp} (239° 方位) 随距离变化曲线
(a) 滤波前, (b) 滤波后

Fig. 7 Variation curve of differential propagation phase (239° azimuth)
at 1.5° elevation angle with distance at 03:00 BT 11 August 2019
(a) before filtering, (b) after filtering

$$\Delta Z_h(R) = 2\alpha_1 \cdot \Delta R \sum K_{dp}(i) = \alpha_1 [\phi(R) - \phi(0)] \quad (4)$$

式中: $i=0, 1, 2, \dots, N$; Σ 为求 i 所有对应的 K_{dp} 之和。

$$\Delta Z_{dr}(R) = 2\alpha_2 \cdot \Delta R \sum K_{dp}(i) = \alpha_2 [\phi(R) - \phi(0)] \quad (5)$$

式中: $i=0, 1, 2, \dots, N$; Σ 为求 i 所有对应的 K_{dp} 之和。

式(4)和式(5)中: N 为雷达到距离 R 处的总探测库数; ΔR 为库长(单位: km), 系数 α_1 和 α_2 依赖于雨滴椭球率。对于 X 波段双线偏振雷达而言, 可取 $\alpha_1 = 0.25 \text{ dB} \cdot (^\circ)^{-1}$, $\alpha_2 = 0.033 \text{ dB} \cdot (^\circ)^{-1}$ (Maltrosov et al, 2002; 张培昌等, 2018)。 $\phi(0)$ 为沿径向

的初始差分传播相位, 由于离雷达 2 km 内差分传播相位受地物杂波和旁瓣等因素影响造成观测值不稳定, 因此通过沿径向寻找 2 km 以外的一段距离, 要求在该段距离上自第一个 1 km 开始连续向下, 其 ϕ_{dp} (经过去抖动和滤波处理后) 在该段上的相关系数 (经过订正后) 都大于 0.9, 而且 ϕ_{dp} 在该段上的标准偏差小于 10° (即取 ϕ_{dp} 波动小的一段), 当选到这样一段距离后, 就取该段上的所有 ϕ_{dp} 的平均值, 作为初始相位 $\phi(0)$ 。

采用式(4)和式(5)对反射率因子和差分反射率因子 (经过信噪比订正后) 进行衰减订正 (图 8 和图 9)。图 8 为反射率因子衰减订正效果, 1.5° 仰角

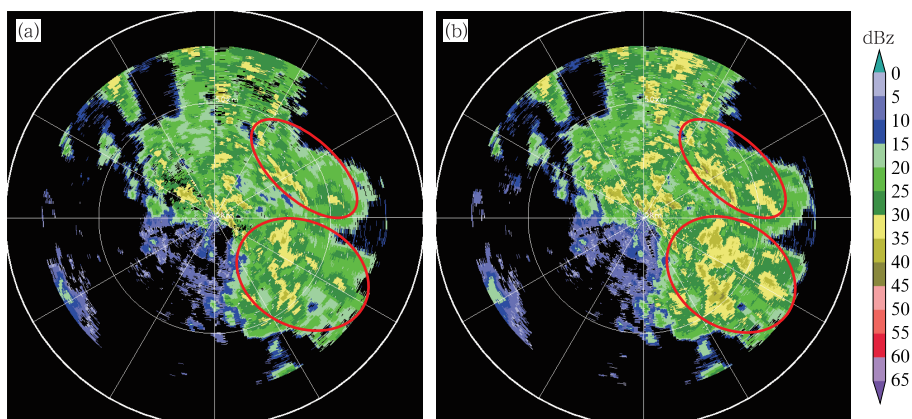


图 8 2019 年 8 月 11 日 03 时衰减订正前后的 1.5° 仰角反射率因子
(红色圆圈表示订正前后效果明显)

(a) 订正前, (b) 订正后

Fig. 8 Reflectivity factor of before and after attenuation correction
at 1.5° elevation angle at 03:00 BT 11 August 2019

(a) before correction, (b) after correction

(The red circles indicate that the improvement effect is obvious before and after the revision)

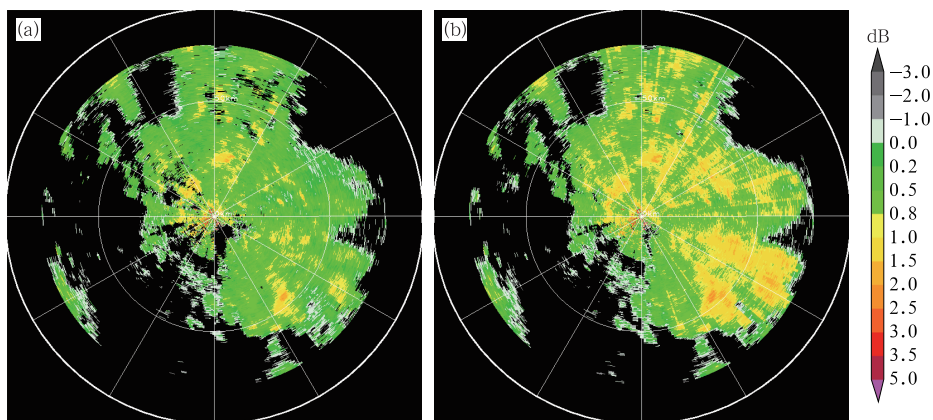


图 9 同图 8, 但为差分反射率因子

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for differential reflectivity factor

反射率因子观测数据在方位 300° 附近存在缺测值, 经过衰减订正后, 采用 2.5° 仰角订正后的值补充 1.5° 仰角层上的缺测值。

3.5 两部雷达观测定量对比

关于如何将两部不同地理位置、不同分辨率的雷达反射率因子进行匹配后定量对比, 可采用雷达极坐标与经纬度坐标的转换公式(张林和杨洪平, 2018; 吴翀等, 2014), 首先将新一代 SA 天气雷达极坐标转为经纬度坐标, 再转换为 X 波段双线偏振雷达的极坐标, 实现新一代 SA 天气雷达极坐标数据

转为 X 波段雷达的极坐标数据, 然后直接定量对比。

图 10 是 $0\sim 30$ 和 $30\sim 60$ km 范围的两部雷达衰减订正前后观测反射率因子数据的定量对比散点图, 横轴为盐城新一代 SA 天气雷达观测值, 纵轴为 X 波段双线偏振雷达观测值。如图所示, 在弱回波区间, X 波段双线偏振雷达观测值略大于 S 波段新一代天气雷达观测值, 随着回波值的增大, S 波段新一代天气雷达观测值大于 X 波段双线偏振雷达观测值的比例逐渐变大, 这种现象在 $30\sim 60$ km 区间比在 $0\sim 30$ km 区间更明显。

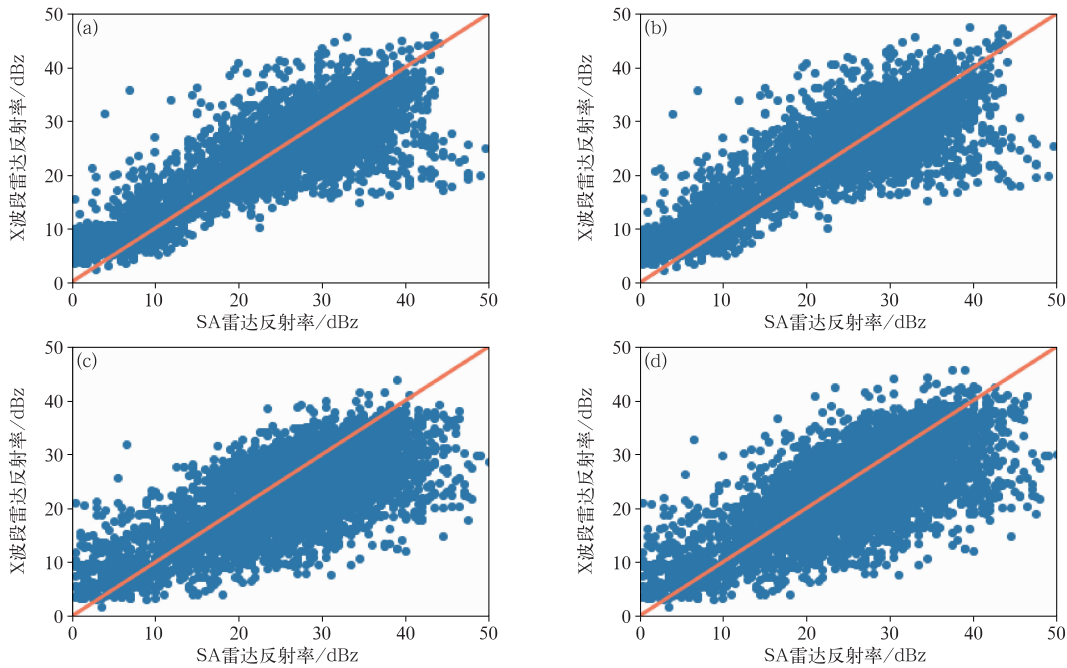


图 10 两部雷达衰减 0~30 km(a,b)、30~60 km(c,d)范围订正前(a,c)和订正后(b,d)观测反射率因子定量对比

Fig. 10 Quantitative comparison of reflectivity factor between two radars before attenuation correction (a, c) and after attenuation correction (b, d) in the ranges of 0—30 km (a, b) and 30—60 km (c, d)

经过衰减订正后,由衰减造成的观测误差在整体上得到了改善。表 5 为统计 S 波段新一代天气雷达观测值大于 X 波段双线偏振雷达观测值所占的比例,0~30 和 30~60 km 范围内在订正前的比例分别为 48.18%和 71.78%。经过衰减订正后,该比例分别降低为 42.56%和 63.41%,30~60 km 范围内的改善更为明显。

表 5 S 波段新一代天气雷达观测值大于 X 波段
双线偏振雷达观测值所占比例(单位:%)
Table 5 Percentages of observation value by S-band
weather radar larger than that by X-band
dual-polarization weather radar (unit: %)

订正前后	0~30 km	30~60 km
衰减订正前	48.18	71.78
衰减订正后	42.56	63.41

4 结论与讨论

本文首先分析了 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达数据质量,然后利用信噪比对 Z_{dr} 和 $\rho_{hv}(0)$ 进行偏差订正,再对 ϕ_{dp} 数据做去折叠、抖动和滤波处理,将偏差订正后的数据输入数据质量控制流程,

消除地物、生物回波等杂波,最终利用 K_{dp} 完成了衰减订正。结论如下:

- (1)移动 X 波段双线偏振雷达距离分辨率高,利于观测强对流、冰雹和龙卷的精细结构演变,且回波结构和轮廓与新一代 SA 天气雷达基本一致;
- (2)与盐城新一代 SA 天气雷达和 6 个雨量站数据定量对比分析,表明移动 X 波段双线偏振雷达在 0~30 km 仅在回波强度高值区存在一定的衰减,但在 30 km 之外衰减严重;
- (3)利用信噪比对 Z_{dr} 和 $\rho_{hv}(0)$ 进行订正后,作为输入数据代入双线偏振雷达数据质量控制流程,识别除地物、生物等非降水回波;
- (4)根据径向连续性检查对 ϕ_{dp} 去折叠处理,再进行抖动和滤波处理,确定初始差分传播相位 $\phi_{dp}(0)$,利用 K_{dp} 或总差分传播相位 ϕ_{dp} 完成 Z_h 和 Z_{dr} 衰减订正;
- (5)统计分析表明,30~60 km 范围内,由衰减造成的水平反射率因子观测误差得到了改善。

本文分析了 GLC-12A 型移动 X 波段双线偏振雷达数据质量,提出了 Z_{dr} 、 $\rho_{hv}(0)$ 和 ϕ_{dp} 的偏差订正方法,完成了该型号雷达数据质量控制和衰减订正,

可为在龙卷风观测区域多部雷达组网拼图提供高质量数据,也为更好地分析龙卷及强对流等灾害性天气的精细结构和演变规律奠定了基础。

参考文献

- 毕永恒,刘锦丽,段树,等,2012. X 波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学,36(3):495-506. Bi Y H, Liu J L, Duan S, et al, 2012. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual-polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):495-506 (in Chinese).
- Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. 偏振多普勒天气雷达原理和应用[M]. 李忱,张越,译. 北京:气象出版社. Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Li C, Zhang Y, trans. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 杜牧云,刘黎平,胡志群,等,2012. 双线偏振雷达差分传播移移的质量控制[J]. 应用气象学报,23(6):710-720. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al, 2012. Quality control of differential propagation phase shift for dual linear polarization radar[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6):710-720 (in Chinese).
- 杜牧云,刘黎平,胡志群,等,2013. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J]. 气象学报,71(1):146-158. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al, 2013. An analysis of dual-linear polarimetric Doppler radar data quality[J]. Acta Meteor Sin, 71(1):146-158 (in Chinese).
- 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等,2012. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J]. 气象学报,66(2):251-261. Hu Z Q, Liu L P, Chu R Z, et al, 2012. Comparison of different attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using X-band dual linear polarimetric radar[J]. Acta Meteor Sin, 66(2):251-261 (in Chinese).
- 王超,吴翀,刘黎平,2019. X 波段双线偏振雷达数据质量分析及控制方法[J]. 高原气象,38(3):636-649. Wang C, Wu C, Liu L P, 2019. Data quality analysis and control method of X-band dual polarization radar[J]. Plateau Meteor, 38(3):636-649 (in Chinese).
- 王晗,史朝,滕玉鹏,2016. X 波段双线偏振雷达反射率不同衰减订正法对比分析[J]. 成都信息工程大学学报,31(4):363-366. Wang H, Shi Z, Teng Y P, 2016. Comparison of different attenuation correction methods using X-band dual polarimetric radar[J]. J Chengdu Univ Inf Technol, 31(4):363-366 (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,王斌,陈晓辉,等,2012. 移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制[J]. 高原气象,31(1):223-230. Xiao Y J, Wang B, Chen X H, et al, 2012. Differential phase data quality control of mobile X-band dual-polarimetric Doppler weather radar[J]. Plateau Meteor, 31(1):223-230 (in Chinese).
- 张林,杨洪平,2018. S 波段 WSR-88D 双偏振雷达观测非降水回波识别方法研究[J]. 气象,44(5):665-675. Zhang L, Yang H P, 2018. Non-precipitation identification technique on S-band WSR-88D polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 44(5):665-675 (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,魏鸣,黄兴友,等,2018. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京:气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X Y, et al, 2018. Principle and Application of Dual Linear Polarization Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 张志强,刘黎平,2011. S 波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报,69(4):729-735. Zhang Z Q, Liu L P, 2011. A simulation and analysis of the observation errors of cloud intensity and structure with the S-band phased array radar and the CINRAD/SA[J]. Acta Meteor Sin, 69(4):729-735 (in Chinese).
- 朱铁明,马舒庆,杨玲,等,2019. 上海南汇 WSR-88D 双偏振天气雷达的生物回波识别与分析[J]. 气象与环境科学,42(3):118-128. Zhu Y M, Ma S Q, Yang L, et al, 2019. Recognition and analysis of biological echo using WSR-88D dual-polarization weather radar in Nanhui of Shanghai[J]. Meteor Environ Sci, 42(3):118-128 (in Chinese).
- Matrosov S Y, Clark K A, Martner B E, et al, 2002. X-band polarimetric radar measurements of rainfall[J]. J Appl Meteor, 41(9):941-952.
- Tang L, Zhang J, Langston C, et al, 2014. A physically based precipitation-nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system[J]. Wea Forecasting, 29(5):1106-1119.