

肖柳斯,胡东明,陈生,等,2021. X 波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J]. 气象,47(6):703-716. Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al, 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar[J]. Meteor Mon, 47(6):703-716(in Chinese).

X 波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究^{*}

肖柳斯^{1,2} 胡东明³ 陈 生^{1,4} 张华龙³ 田聪聪² 张阿思^{1,3,4}

1 中山大学大气科学学院, 珠海 519082

2 广州市气象台, 广州 511430

3 广东省气象台, 广州 510060

4 中山大学广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 珠海 519082

提 要: 粤港澳大湾区正在组建 X 波段双偏振相控阵雷达(XPAR)网, 以提高观测精度并增强低空观测的能力。为了解决 X 波段雷达的雨滴衰减问题, 以适应观测和组网的要求, 引入自适应约束算法, 针对降水目标造成的衰减加以本地化研究。评估结果表明, 强降水个例反射率因子的订正幅度达 6 dB, 差分反射率因子的负值也得到有效约束。经过质量控制后, 相邻 XPAR 的空间和强度分布具有更高的一致性。与 S 波段雷达资料对比, 订正前 XPAR 的强度偏弱, 订正后增强至 S 波段雷达相当强度, 局部更强, 准确性明显提高。差分反射率因子也得到一定程度的订正, 订正后与反射率因子的散点分布更集中, 相关系数提高。由此可见, 此算法较好地解决了 X 波段相控阵雷达的雨区衰减问题, 为粤港澳大湾区 X 波段相控阵雷达网资料推广应用和产品开发提供前期数据质量保障。

关键词: X 波段, 相控阵雷达, 自适应约束算法, 衰减订正

中图分类号: P415

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.006

Study on Attenuation Correction Algorithm of X-Band Dual-Polarization Phased Array Radar

XIAO Liusi^{1,2} HU Dongming³ CHEN Sheng^{1,4} ZHANG Hualong³
TIAN Congcong² ZHANG Asi^{1,3,4}

1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

3 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510060

4 Guangdong Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

Abstract: An X-band dual-polarization phased array radar (XPAP) network is being set up in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) to improve observation accuracy and enhance low-altitude observation capability. In order to solve the raindrop attenuation problem of X-band radar and meet the requirements of observation and networking, self-consistent algorithm for attenuation correction is introduced and localized. The results show that the correction amplitude of reflectivity factor reaches 6 dB, and the negative value of differential reflectivity is also effectively constrained. Scatter analysis and quantitative

^{*} 国家自然科学基金项目(41875182、42075190)、广东省重点领域研发项目(2020B1111200001)、广东省自然科学基金项目(2020A1515010602)、广州市科技计划项目(201904010162)、广东省气象局重点项目(GRMC2018Z01、GRMC2018Z05)和雷达应用及强对流短临预警技术创新团队(GRMCTD202002)共同资助

2020 年 9 月 25 日收稿; 2021 年 2 月 20 日收修定稿

第一作者: 肖柳斯, 主要从事天气雷达应用和数值模式释用研究. E-mail: xiaoliusi104@163.com

通讯作者: 陈生, 主要从事定量降水估计以及水文应用研究. E-mail: chensheng@mail.sysu.edu.cn

statistical results of adjacent XPARs show that the spatial and intensity distributions of the two groups of data after quality control have a high consistency. Compared with S-band radar data which are taken as the truth value, the XPAR intensity of reflectivity factor is weak before attenuation correction, but enhanced to the equivalent strength of the S-band radar after correction, which is stronger locally and the accuracy is significantly improved. Differential reflectivity is corrected to some extent, the scatter distribution of corrected differential reflectivity and reflectivity factor is more concentrated and related coefficient is higher. It can be seen that this algorithm solves well the rain area attenuation problem of X-band phased array radar, and provides early data quality assurance for the promotion and application of X-band phased array radar network data and product development in the GBA.

Key words: X-band, phased-array radar, self-consistent algorithm, attenuation correction

引 言

近 30 年来,随着中国城市化进程加快,极端强降水有向超大城市群集中并增强的趋势(Liang and Ding, 2017; 唐永兰等, 2019),受强热岛效应影响,珠三角城市群短时突发的极端小时降水事件显著增加(Wu et al, 2019)。例如,2017 年 5 月 7 日广州出现突发性极端强降水过程,小时降水量达到 184.4 mm,日降水量为 542.7 mm,均打破了 60 年纪录(伍志方等, 2018; Zhang et al, 2019a)。2020 年 5 月 22 日广州市的小时降水量超过 200 mm,再次突破历史极值,此次过程造成了 4 人死亡,公交、地铁、动车停运,经济损失非常严重。城市内涝问题已经成为威胁超大城市人民生命财产安全的主要自然灾害之一。

目前数值天气预报仍存在较大的不确定性(穆穆等, 2011; Du and Chen, 2018),尤其在弱天气强迫形势下,局地性、突发性的短时强降水的预报水平仍难以满足社会及公众的期许(伍志方等, 2018; 王璐和沈学顺, 2019)。因此,加强对强对流天气系统的跟踪和降水的定量观测以提高短时临近预测预警能力尤为重要,天气雷达在其中发挥了最重要的作用。目前中国业务上应用于降水探测的新一代 S 波段多普勒天气雷达采用 VCP21 体扫模式,该模式共有 9 个仰角,耗时约 6 min(朱丹等, 2018)。然而中小尺度灾害性强对流天气的监测预警对雷达的硬件指标有了更高的需求, S 波段业务天气雷达难以精确探测中小尺度灾害性天气系统的内部涡旋动力结构,时效性难以满足生命史只有数十分钟的龙卷、中气旋等强天气的要求(Zhang et al, 2019b)。同时, S 波段雷达探测范围较广,间距较远,对近地面 1 km

的观测能力也明显不足,低层存在雷达探测盲区。

利用电子扫描的相控阵雷达(phase array radar, PAR)由于具有快速转换波束指向的能力,被美国国家雷达技术委员会推荐作为美国下一代雷达发展的方向(Weber et al, 2007)。大量的观测和数值模拟试验表明, PAR 观测显著增加了强天气的预警提前量(Bluestein et al, 2010; Newman and Heinselman, 2012; French et al, 2014; Kuster et al, 2015)、提高了模式预报准确率(Yussouf and Stensrud, 2010)和减小定量降水估测的累积误差(Agnostou and Krajewski, 1999),在城市内涝和流域洪峰预测服务中发挥重要作用。

为了完善和发展天气雷达布局,填充新一代多普勒天气雷达网的观测盲区,中国气象局部署在粤港澳大湾区开展 X 波段双偏振相控阵天气雷达(X-band dual-polarization phased array radar, XPARR)协同观测业务试验,对云、雨滴、冰雹等水成物的微物理过程开展更加精细化的识别和跟踪,并增强低空尤其是行星边界层观测的能力(McLaughlin et al, 2009)。目前粤港澳大湾区已有 15 部 XPARR 投入了试运行,由于其时空分辨率更高的优势, XPARR 在强天气中能快速把握细致的对流结构及生消发展趋势(程元慧等, 2020; 傅佩玲等, 2020)。

由于华南区域强对流天气频发, X 波段雷达的回波衰减率是 C 波段或 S 波段雷达的 7~10 倍(Park et al, 2005a),雨滴衰减问题对 XPARR 的业务应用造成较大程度的干扰,严重影响其推广应用。早期的 Hitschfeld-Bordan 算法不适用于 X 波段雷达(Hitschfeld and Bordan, 1954),而 Hildebrand(1978)的逐步订正法所适用的反射率因子最大不能超过 60 dBz,具有地域局限性。随着双偏振雷达的发展,借助偏振量帮助衰减订正取得了更好的效果

(Aydin et al, 1989; Meneghini et al, 1989; Gorgucci et al, 1996; Carey et al, 2000)。由于差分传播相移率(K_{DP})不会受到衰减及雷达标定的影响,并与衰减率(A_H)和差分衰减率(A_{DP})存在线性关系($\alpha = A_H/K_{DP}$, $\beta = A_{DP}/K_{DP}$),为基于 K_{DP} 方法来订正反射率因子和差分反射率因子提供了思路,并得到更稳定的订正效果(Bringi et al, 1990)。但是由于大雨滴的 α 和 β 值是小到中雨滴的 2~4 倍,如果使用固定系数,会导致较大的订正误差, Carey et al (2000)、Ryzhkov(2007)、Gu et al(2011)和 Vulpiani et al(2008)利用偏振量区分雨滴大小,发展了变系数订正法,订正效果有所改善。

为了克服迭代算法的不稳定性,借鉴 TRMM (tropical rainfall measurement mission) 星载测雨雷达中的降水廓线算法, Testud et al(2000) 提出了 ZPHI 算法,将差分传播相移(ϕ_{DP})作为衰减订正的外部约束,适用于 S、C 和 X 波段雷达。Bringi et al (2001)把系数的变化考虑进去,提出了改良版的 ZPHI 法,称为自适应算法。Park et al(2005b)验证了自适应算法在 X 波段雷达上应用的优越性。毕永恒等(2012)结合中层大气与 X 波段雷达的特点,改进了自适应约束算法。Gou et al(2019)补充了三个约束条件,以适应实际业务运算速度的需求。ZPHI 算法还可以分段进行,但是全路径的 ZPHI 法可减少 ϕ_{DP} 数据质量问题引起的订正误差,效果最佳(王晗等, 2018)。本文利用双偏振参量的自适应约束性质,对数据进行有效的质量控制,联合 XPAR 雷达试验网和 CINRAD 双偏振天气雷达网观测,对比分析衰减订正前后的数据,试图改进衰减订正效果,增强 XPAR 的业务适用性。

1 数据

1.1 相控阵雷达资料

粤港澳大湾区相控阵天气雷达试验网由 37 部 XPAR 组成,覆盖珠三角地区 9 个市,其中 15 部 XPAR 已投入试运行(图 1),其方位分辨率为 0.9° ,距离库长为 30 m。XPAR 采用双偏振模式,垂直方向使用相控阵电子扫描,其扫描方式为:先在固定方位角进行 17 层仰角无间隙垂直扫描,然后切换方位

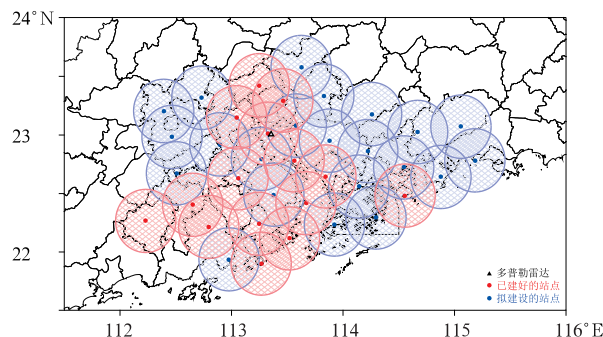


图1 粤港澳大湾区 X 波段双偏振相控阵雷达(XPAR)布网规划图

(红色点和圈为已建好的站点及覆盖范围,蓝色点和圈为拟建设站点及覆盖范围,黑色三角形为广州 S 波段多普勒雷达的位置)

Fig. 1 The X-band dual-polarization phased array radar network distribution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (The red dots and circles represent the established sites and their coverage, while the blue dots and circles denote the planned sites and its coverage, black triangle is the position of S-band Doppler radar in Guangzhou)

角,再次垂直扫描,最低仰角为 0.9° ,波束垂直宽度为 1.8° 。在该扫描方式下,雷达转速不需太快,机械转动以及形成波束指标的稳定性大大提高,既减少了仰角切换所带来的数据污染,又获得无时间延时的距离高度显示(RHI)数据(程元慧等, 2020)。

1.2 个例资料

本文以 2019 年 9 月 2 日一次局地强降水为例进行研究。当天,广东省位于北高南低的环流背景下,2 日 05 时热带低压的中心位于海南省万宁市偏东方约 85 km 的海面上,其后向西偏南方向移动,强度变化不大,受到热带低压影响,午后雷雨云团自东南向西北方向移动,给珠三角地区带来了明显的降水。最大 6 h 降水量(14—20 时)出现在广州市西部和佛山市东北部地区(图 2),位于两市三部相控阵雷达观测范围内。

以 2019 年 9 月 2 日 15:57 佛山雷达观测的原始反射率因子和差分反射率因子分布为例,雷达东南方向降水回波最大强度超过 50 dBz(图 3a),差分反射率因子达到 2 dB 及以上(图 3b)。 135° 方位角上,从雷达中心沿着径向向外,反射率因子出现了锐降的现象,强回波的远侧出现了开口朝向外的 V 型结构(箭头所指之处), 110° 方位角上强回波远侧出现了反射率因子梯度较大的现象,可见雷达信号穿

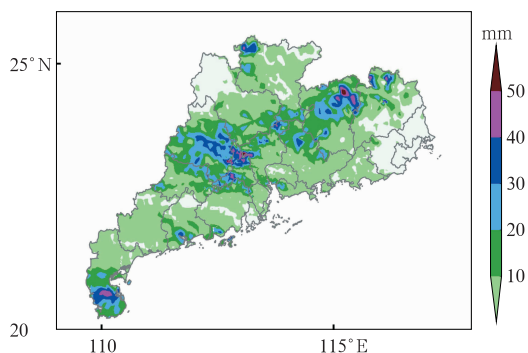


图 2 2019 年 9 月 2 日 14—20 时

广东省 6 h 累积降水量

Fig. 2 Accumulated precipitation in Guangdong Province from 14:00 BT to 20:00 BT 2 September 2019

过强降水回波中心后出现了信号衰减。

就差分反射率因子分布而言(图 3b),在靠近雷达的弱降水区域,差分反射率因子均为负值。沿着径向向外,差分反射率因子正负值相间的噪点现象加剧。 110° 方位角上的差分反射率因子普遍较大,约为 $1\sim 3$ dB,该区域以水滴粒子分布为主。 135° 方位角强降水中心的差分反射率因子达到 1 dB 及以上,经过强回波中心有所减小,在反射率因子 V 型结构所对应的区域,差分反射率因子的值大致为 $0\sim 1$ dB。继续沿着径向向外,间或有些负值分布,并且噪声比周边显著,反映了差分反射率因子探测存在小幅衰减及不稳定问题。但是由于差分反射率因子的值较小,从平面分布上,其衰减的绝对值与反射率因子相比显著偏小。

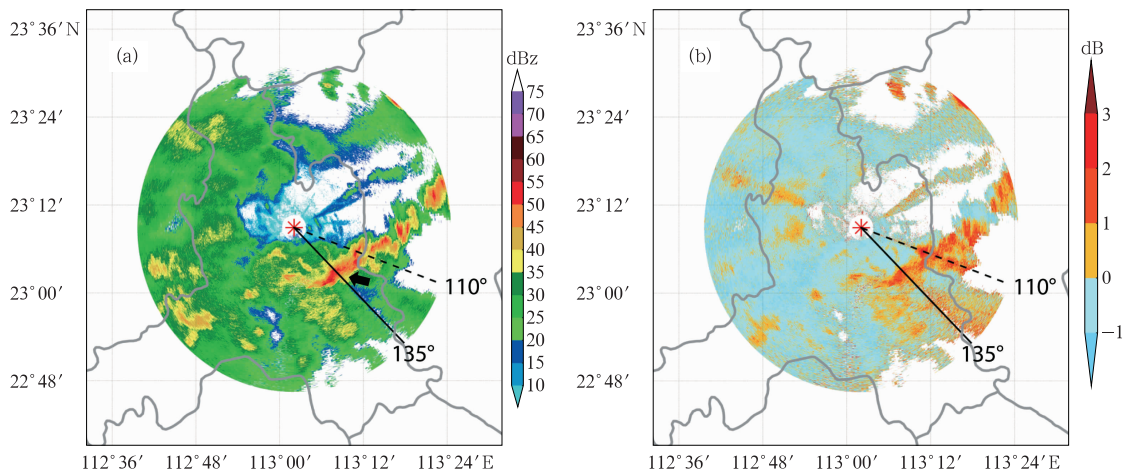


图 3 2019 年 9 月 2 日 15:57 佛山雷达 1.8° 仰角未经衰减订正的

的反射率因子(a)和差分反射率因子(b)分布

(黑色直线指示 135° , 虚线指示 110° 方位角;下同)

Fig. 3 Reflectivity factor (a) and differential reflectivity (b) at 1.8° elevation without attenuation

correction observed by the Foshan XPAR at 15:57 BT 2 September 2019

(Black solid and dotted lines indicate 135° and 110° azimuths respectively, the same below)

沿着图 3 中 135° 径向方向(黑色直线)绘出反射率因子及相关系数(CC)的原始基数据径向分布(图 4)。CC 普遍高于 0.9, 均有降水。距离雷达 8 km 以内, CC 的振荡较明显, 主要由弱降水与非气象回波的混合相态引起的。20 km 附近, CC 维持在 $0.9\sim 1.0$ 。沿着径向向外至 19~20 km 附近, 反射率因子振荡上升达到极大值 50 dBZ, 接着断崖式下降至 32 dBZ, 这种变化是由于受到电磁波信号经过强降水云团后衰减的影响。

2 方 法

2.1 数据预处理

2.1.1 去除孤立点

天气雷达受到硬件的影响, 首先要对雷达数据进行噪声过滤, 去除原始反射率因子、差分反射率因子和相关系数中孤立的点或者线造成的数据污染,

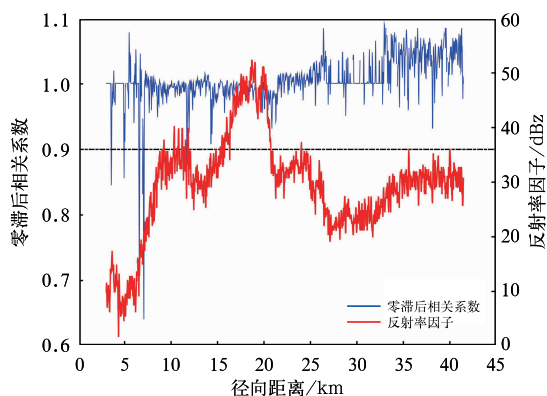


图4 2019年9月2日15:57佛山雷达
1.8°仰角上135°方位角的反射率
因子和零滞后相关系数的径向分布

Fig. 4 Radial distribution of reflectivity factor
and correlation coefficient at 135° azimuth
at 1.8° elevation of the Foshan Radar
at 15:57 BT 2 September 2019

根据式(1)进行处理(黄朝盈,2019):

$$P_I = N/N_{\text{TOTAL}} \quad (1)$$

式中: I 为基数据中给定的距离库, N 是以 I 为中心的 5×5 的窗口中存在有效数值的总库数; N_{TOTAL} 为窗口包含的总库数,等于25, P_I 为有效雷达库个数所占的百分比,当 $P_I < 55\%$ 时,像素点 I 就被当作非气象回波剔除。

2.1.2 确定降水回波初始差分传播相移 $\phi_{\text{DP}}(0)$

差分传播相移(ϕ_{DP})容易受到雷达系统噪声、地物回波、气象目标特性的影响,出现高低起伏的附加相位移。因此,在应用 ϕ_{DP} 之前应先找到初始相位 $\phi_{\text{DP}}(0)$ (肖艳姣等,2012):从径向第1个距离库开始,沿着径向向外滑动,计算连续30个距离库的 ϕ_{DP} 的标准差 σ ,当 $\sigma < 5$ 且 $CC > 0.7$ 的连续距离库达到10个,则为一段连续的降水回波起始点,用这10个距离库的 ϕ_{DP} 均值表示初始相位的大小 $\phi_{\text{DP}}(0)$,并标记每个初始相位所在的径向位置。

2.1.3 ϕ_{DP} 退折叠

在双发双收的工作模式下, ϕ_{DP} 取值范围是 $0 \sim 360^\circ$,当 ϕ_{DP} 高于 360° 时,会发生与多普勒速度类似的相位折叠问题,X波段雷达尤其容易超过不模糊范围(肖艳姣等,2012),因此需要对 ϕ_{DP} 进行去折叠处理。需注意的是,在探测到非气象回波的方向上, ϕ_{DP} 的脉动较大,但不属于折叠现象,因此在开展去折叠之前要限制 $CC > 0.9$ 以消除非降水回波的影响。

此外,斜率以及相邻距离库的标准差均能表现 ϕ_{DP} 脉动情况,较大的斜率和标准差可能是由于地物杂波引起的。因此基于斜率和标准差的概率分布情况,限制取值范围,有助于抑制杂波的影响。沿起始距离库径向向外滑动10个距离库计算标准差(σ),取5个距离库做线性拟合计算斜率(a),根据概率分布可确定其取值范围为 $[-20, 20]$, σ 为 $[0, 6]$,只有符合以上阈值条件的数据才应用于分析及退折叠运算。具体步骤如下:(1)取初始差分相位 $\phi_{\text{DP}}(0)$ 作为退折叠的初始参考值 R ;(2)沿径向逐个距离库向外滑动,利用 a 更新参考值 $R = R + a\Delta r$,其中 Δr 为雷达分辨率,取 $\Delta r = 30 \text{ m}$;(3)比较 R 和当前距离库的 ϕ_{DP} ,当 $R - \phi_{\text{DP}} > 80^\circ$ 时,则认为 ϕ_{DP} 发生了折叠,需进行去折叠处理: $\phi_{\text{DP}} = \phi_{\text{DP}} + 360^\circ$;(4)将去折叠后的 ϕ_{DP} 值调整到 $[0, 180]$,则退折叠过程结束(Wang and Chandrasekar, 2009; 肖艳姣等, 2012)。

2.1.4 小波分析方法滤波

ϕ_{DP} 的径向廓线常常存在起伏现象,在应用之前需完成预处理工作,使 ϕ_{DP} 数据更加平滑和连续,并保留有效的气象信息。常用的预处理方法包括滑动平均、中值滤波、卡尔曼滤波等(何宇翔等, 2009; 曹俊武等, 2011; 魏庆等, 2016)。但是当电磁波通过的是雷暴群时,云体边缘的 ϕ_{DP} 会产生异常或者不连续值,大振幅杂波经滤波控制变成小振幅波动,但未能完全被滤除。胡志群等(2014)和魏庆等(2016)使用了小波分析方法,能够有效剔除噪声,提高 ϕ_{DP} 的连续性、平滑度,且保存了气象回波的有效信息。

本研究采用小波分析方法对数据加以处理,共包括三步。(1)信号分解,利用小波函数对 ϕ_{DP} 数据进行五层分解,每层均可以分解成为低频和高频分量,分别用CA1, CA2, CA3, CA4, CA5和CD1, CD2, CD3, CD4, CD5来表示,数字越小,代表的频率相对越高。(2)信号去噪,主要针对高频分量去噪处理。CD1频率最高,将其系数设为0可将其信号删除;接着对CD2, CD3和CD4做中值滤波,降低噪声;CD5保留原信号。(3)信号重构,增加系数处理的第一至第五层高频信号和小波分解第五层低频信号重构成新的 ϕ_{DP} 数列。

2.2 自适应约束算法

自适应约束算法是在Testud et al (2000)提出的ZPHI法上改良而得。以下第一、二、四步骤为ZPHI法的核心内容,第三步为Bringi et al(2001)

提出的改良步骤,执行了 $\phi_{\text{DP}} - Z_{\text{DR}}$ 联合约束条件,综合两者可形成对反射率因子和差分反射率因子进行衰减订正的算法 (Bringi and Chandrasekar, 2010)。

第一步:非均匀路径上,反射率(Z_h)和衰减率(A_H)之间存在幂指数关系,即: $A_H(r) = a[Z_h(r)]^b$,以 r_0 作为固定参考距离, r 为距离变量,经过公式转换,径向上 $A_H(r)$ 可用固定参考距离上 $A_H(r_0)$ 、反射率测量值 $Z_h(r_0)$ 及 $Z_h(r)$ 表示,如式(2)所示:

$$\begin{cases} A_H(r) = A_H(r_0) \left\{ \frac{[Z_h(r)]^b}{[Z_h(r_0)]^b - A_H(r_0)I(r_0, r)} \right\} \\ I(r_0, r) = 0.46b \int_{r_0}^r [Z_h(x)]^b dx \end{cases} \quad (2)$$

第二步:假设 A_H 与 K_{DP} 的线性关系与已知的 α 参数有关,即: $A_H(r) = \alpha K_{\text{DP}}(r)$ 。另外,定义离开降雨单体以外的距离为 r_m ,而 $\phi_{\text{DP}}(r_m)$ 是差分相位最后的稳定值,以这个值作为约束条件,可得到:

$$A_H(r) = \frac{[Z_h(r_0)]^b [10^{0.1ba\Delta\phi_{\text{DP}}(r_0, r_m)} - 1]}{I(r_0, r_m) + [10^{0.1ba\Delta\phi_{\text{DP}}(r_0, r_m)} - 1]I(r, r_m)} \quad (3)$$

第三步:对于给定的频率, b 为 0.8。 α 与温度及假设的雨滴轴比和直径之间的关系有关,但 ZPHI 法的缺陷在于将 α 设为常数,Bringi et al (2001)把系数 α 的变化考虑进去,通过训练得到最佳系数 α ,提出自适应算法。本文采用自适应算法对经过预处理的 XPAR 数据进行本地化试验,寻找最优的 α 值。

依据 $A_H(r) = \alpha K_{\text{DP}}(r)$,径向距离 $[r_0, r_m]$ 内重构的 $\phi_{\text{DP}}^{\text{reconstructed}}(r, \alpha)$ 有

$$\phi_{\text{DP}}^{\text{reconstructed}}(r, \alpha) = 2 \int_{r_0}^{r_m} \frac{A_H(x, \alpha)}{\alpha} dx \quad (4)$$

取 α 值的范围是 $[0.025, 0.575]$,以 0.025 为间隔反复计算 $\phi_{\text{DP}}^{\text{reconstructed}}(r, \alpha)$,并计算 $\phi_{\text{DP}}^{\text{reconstructed}}(r, \alpha)$ 与测量值 ϕ_{DP} 之间的绝对差值 e_ϕ ,当 e_ϕ 值最小,则该 α 为最优值 α_{opt} :

$$e_\phi = \int_{r_0}^{r_m} |\phi_{\text{DP}}^{\text{reconstructed}}(x, \alpha) - \phi_{\text{DP}}(x)| dx \quad (5)$$

第四步:利用前三个步骤,对每个方位角都可以求得一个最优 α_{opt} ,如果每个方位角 α_{opt} 均不同,对反射率校正之后,其结果在方位角之间会出现较大的数据不连续现象。固然可采用平滑或者滤波的方式对校正后的数据进行处理,但会平滑高分辨率雷达的细节信息,因此取所有方位角的平均值作为该体

扫订正所需的 $\alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}}$,求得 r_0 和 r_m 之间的任意位置上的比衰减 $A_H(r, \alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}})$ 之后,可以用式(6)对反射率因子 Z'_H 进行校正:

$$Z'_H(r) = 10 \log_{10} [Z_h(r)] + 2 \int_{r_0}^r A_H(x, \alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}}) dx \quad (6)$$

第五步:Park et al(2005a; 2005b)根据散射仿真实验得到了反射率因子(Z_H)和差分反射率因子(Z_{DR})在三种雨滴分布情况下的平均关系:

$$Z_{\text{DR}} = \begin{cases} 0 & Z_H \leq 10 \text{ dBz} \\ 0.051Z_H - 0.486 & 10 < Z_H \leq 55 \text{ dBz} \\ 2.3 & Z_H > 55 \text{ dBz} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z_H 的单位是 dBz,而 Z_{DR} 的单位是 dB。

与反射率因子的订正相似,差分反射率因子的订正也需差分衰减率 $A_{\text{DP}}(r)$ 参与。在自适应约束算法中, $A_{\text{DP}}(r) = \frac{\gamma}{\alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}}} A_H(r)$,其中 γ 是变化量。而差分反射率因子的订正量 Z'_{DR} 可通过式(8)求得:

$$Z'_{\text{DR}}(r) = Z_{\text{DR}}(r) + 2 \frac{\gamma}{\alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}}} \int_{r_0}^r A_H(x) dx \quad (8)$$

电磁波经过一段距离,差分反射率因子测量值和根据式(7)求得理论值的变化幅度分别为 ΔZ_{DR}^1 和 ΔZ_{DR}^2 ,两者理应相同。但是由于存在衰减作用,两者存在差值为 A_{DP}^1 。自适应约束算法通过循环不同的 γ ,根据式(8)订正差分反射率因子,当 $\frac{\gamma}{\alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}}} \int_{r_0}^r A_H(x) dx$ 最接近 A_{DP}^1 ,此时 γ 则为最优值 γ_{opt} 。将 γ_{opt} 代入式(8),即可求得校准后的差分反射率因子。

2.3 订正效果评估方案

由于降水单体相对周边雷达方位和距离均有差异,受到雨滴衰减影响的程度也有区别。一个合理的方案针对不同雷达订正后的结果应该具有高度一致性。因此本文针对相邻雷达的共同覆盖面积,从一致性角度去检验衰减订正方法的准确性,称其为 X-X 检验。另外,除非在湿雹区, S 波段雷达基本不存在雨区衰减(Chandrasekar et al, 2006),因此以 S 波段雷达的观测资料为真值,并与衰减前后的 XPAR 的数据比对,可检验衰减订正的准确程度,称为 X-S 检验。

为了更客观地以格点对格点的方式比对衰减订

正效果,需将相邻天气雷达资料订正到同一个坐标系下。本文选定佛山雷达作为参考站点C,将广州S波段多普勒双偏振雷达A及X波段相控阵雷达B的观测数据插值到C的坐标系上,需进行两个步骤:(1)将三部雷达的观测资料均转换到经纬度坐标上(李明凤等,2018);(2)利用距离权重法将A和B插值到C的格点上:以A为例,从低层向上逐层抬仰角,比对经纬度信息,从A逐个仰角层次上找到距离最近的点A0,并计算A0的海拔高度 H_{A0} 与 $C(i,j)$ 格点的海拔高度 H_C ,找到 H_C 上下两层的高度,并利用距离权重法进行插值,将两者的高度插值到一致(王晗等,2018)。

定量评估指标包括相对偏差(relative bias, RB)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、分数标准偏差(fractional standard error, FSE)和相关系数(related coefficient, R)等。RB用以评价不同雷达之间参量的总体偏差趋向,能够消除局地个别数据的影响,取值范围是 $[-1, 1]$,越接近于0,则误差越小。RMSE反映偏差的总体水平,其数值越小则越准确。FSE反映单个变量造成的偏差程度,其值越小,偏差越小。 R 衡量的是观测数据之间的一致性,取值范围同RB,但绝对值越大,估测效果越好(黄嘉佑和李庆祥,2015;肖柳斯等,2019;Zhang et al,2019a)。

3 衰减订正效果分析

3.1 径向订正效果评估

利用自适应算法进行衰减订正,首先对反射率因子进行订正,关键在于选择最优的 α 值,选定 α 值的范围在 $[0.025, 0.575]$,以0.025为间隔,共有23个 α 值,反复测试重构 ϕ_{DP} ,得到23个重构 ϕ_{DP} 值(如图5a),这23条重构 ϕ_{DP} 线均在测量线(黑线)附近,各有偏离。利用式(5)计算测量和重构的 ϕ_{DP} 之间的误差 e_ϕ ,当 α 为0.425的时候, e_ϕ 最小(图5c)。如图5b所示,重构得到的 ϕ_{DP} (红色)在17~22 km范围内增长最快,与观测线大致重合,较为可信,22 km之外观测线起伏较大,重构的 ϕ_{DP} 大致位于观测的中值线上,可信度仍然较高。由图5可见,重构之后的 ϕ_{DP} 可反映原始差分传播相移的变化趋势,光滑程度更高,可选用0.425作为 α 的最优系数进行衰减订正。

1.8°仰角上126°~135°方位角订正前后的平均反射率因子和差分反射率因子的效果如图6所示。沿着径向向外,在反射率因子达到35 dBz之前,订正前后的曲线几乎重合,订正前后结果几乎没有差异,而在35~50 dBz,订正后的反射率因子略有增大,当电磁波穿越强降雨区域(超过50 dBz)之后,反射率因子有明显的调整。在20 km附近,测量的反射率因子极大值约为52 dBz,订正后的值可达到58 dBz,订正幅度达6 dB。继续沿着径向向外,订正后的反射率因子梯度值大幅减小,5 km的减幅从30 dBz订正为20 dBz。25 km向外订正的反射率因子约为35 dBz,并略有上升趋势(图6a)。

在靠近雷达的弱降水区,差分反射率因子普遍为负值,因此根据初始差分反射率因子的分布规律,将差分反射率因子整体提高了0.8 dB,以使得近雷达的弱降水区域的差分反射率因子维持在0 dB的理论值附近,有效约束了差分反射率因子的负值。其后再展开衰减订正。图6b显示,电磁波经过强降雨回波(距离雷达20 km)之前,几乎无衰减;而在强回波之后,订正前后的线条能够区分出来,但是差异不是很明显。结合图6a可见,在27 km处,订正后的反射率因子约为33 dBz,强度小,对应的差分反射率因子也接近谷值,约为0.3 dB。但是继续沿着径向向外,差分反射率因子显著增大,与反射率因子的增长幅度和趋势关系不匹配。而本方法由于受到反射率因子的约束,订正后的差分反射率因子并没有因为其测量增幅而出现过度订正的情况。

3.2 X-X对比结果

广州XPAR探测到的反射率因子分布显示(图7a),线性对流位于雷达的西北象限。由于广州XPAR遮挡较多,西北方向上的对流未能形成连贯的线状形式,仍能大致反映其东北—西南走向分布的态势,最大反射率因子在50~55 dBz,分布形势与佛山XPAR观测结果(图3a)相似。但是对流强度偏弱,尤其是佛山境内的强回波带的组织形式不完整,以单体对流为主。图7a中第二象限上的回波强度达到35 dBz,在相同位置上,佛山雷达测量的强度在30 dBz以下(图3a)。即是说,在不同的位置上,两雷达观测的强度具有一定程度上的差异。究其原因,两部雷达的电磁波从不同方向穿越强降雨云团,雨区造成的衰减强度不同,从而产生了观测误差。不一致。

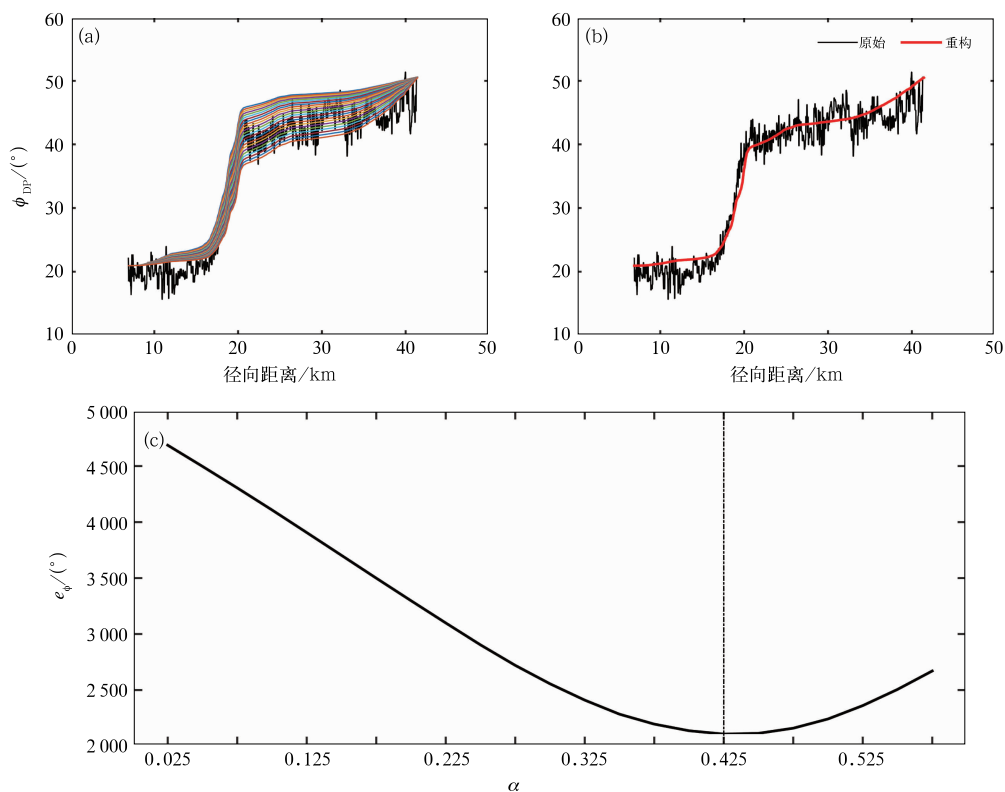


图 5 23 个 α 值重构的 ϕ_{DP} 和测量的 ϕ_{DP} (a), α_{opt} 重构的 ϕ_{DP} 和测量的 ϕ_{DP} (b), 以及重构误差随 α 值的变化 (c)

Fig. 5 Reconstructed ϕ_{DP} lines with 23 α values and observed ϕ_{DP} (a), reconstructed ϕ_{DP} lines with α_{opt} (b), and reconstruction error variation with α (c)

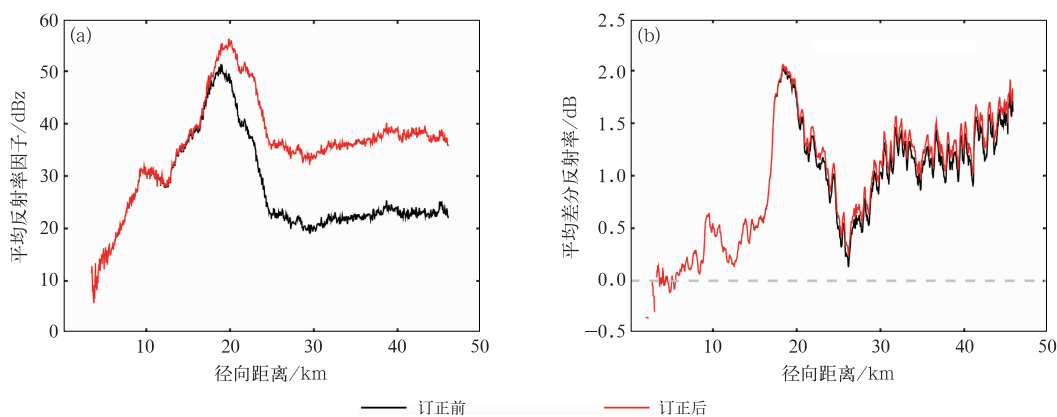


图 6 2019 年 9 月 2 日 15:57 衰减订正前后的平均反射率因子 (a) 和平均差分反射率 (b)

Fig. 6 Comparison of mean reflectivity factor (a) and mean differential reflectivity (b) before and after attenuation correction at 15:57 BT 2 September 2019

采用自适应算法对广州 XPAR 进行订正, 利用各个方位角的观测数据, 求得广州最优系数 $\alpha_{opt}^{mean} = 0.3080$ 。经过衰减订正的回波强度显著增加 (图 7b), 线性对流最大值可达到 60~65 dBZ。尤其是第四象限上佛山区域的反射率因子强中心区连成线, 线状对流特征较订正前明显, 组织性结构更清

晰, 体现出衰减订正算法的有效性。

为了提高比对的客观性, 本文将经过衰减订正的广州 XPAR 观测资料插值到佛山 XPAR 第二个仰角的坐标系上。由于两部 XPAR 的共同覆盖范围仅限于佛山 XPAR 第二象限, 并且受到广州 XPAR 静锥区和部分遮挡的影响, 数据连续性不是

很理想(如图 8a)。但是图 8a 仍然能够抓住对流主体,其形态与佛山雷达的观测(图 8b)分布相似,强度也相仿。箭头所指的强回波均能被订正至 55 dBz 以上,110°方位角上的回波也明显体现出订正增强的效果。110°~135°方位角上的回波形态分布较一致。以上结果表明将衰减订正算法应用于相邻的两部 XPAR,订正后的反射率因子具有较高的一致性。

佛山站和广州站的散点分布显示,订正前(图 9a)散点偏心于佛山站,RB 为 -0.14, RMSE 为 12.04, FSE 为 1.92, R 为 0.22, 即佛山站的原始探测数据总体偏高。经过衰减订正(图 9b)后,对角线两侧的散点分布更均匀,密度中心位于对角线上。订正后的 RB 为 -0.02, 佛山站的数值仍略高于广州站数据,但是两个站点的资料一致性增强。其他

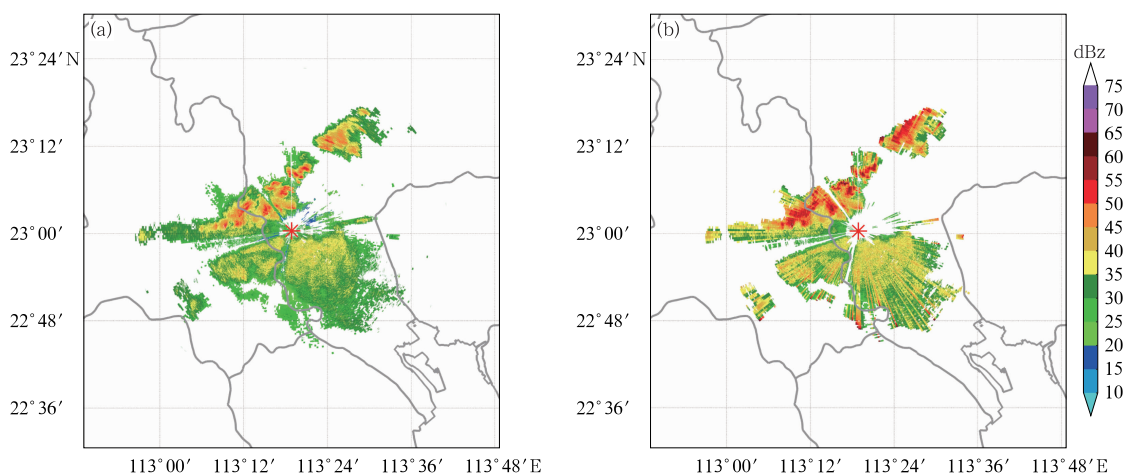


图 7 2019 年 9 月 2 日 15:57 广州 XPAR 站 1.8°仰角未经订正(a)和完成自适应算法衰减订正(b)的反射率因子
(图中红色标记指示广州 XPAR 的位置)

Fig. 7 Reflectivity factor before (a) and after (b) self-consistent attenuation correction at 1.8° elevation of Guangzhou XPAR at 15:57 BT 2 September 2019
(The red mark denotes the location of Guangzhou XPAR)

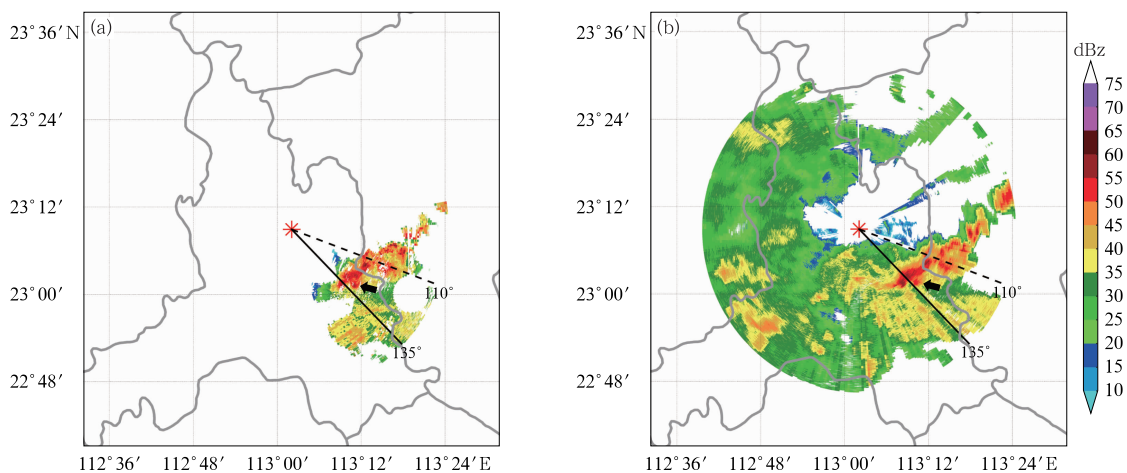


图 8 2019 年 9 月 2 日 15:57 经过衰减订正及插值的广州(a)和佛山(b)X波段相控阵 1.8°仰角的反射率因子
(图中红色标记指示佛山 XPAR 的位置,下同,箭头指示衰减显著的位置)

Fig. 8 Reflectivity factor at 1.8° elevation after self-consistent attenuation correction and interpolation of Guangzhou (a) and Foshan (b) XPAR at 15:57 BT 2 September 2019
(Red mark denotes the location of Foshan XPAR, the same below; arrow indicates where the attenuation is significant)

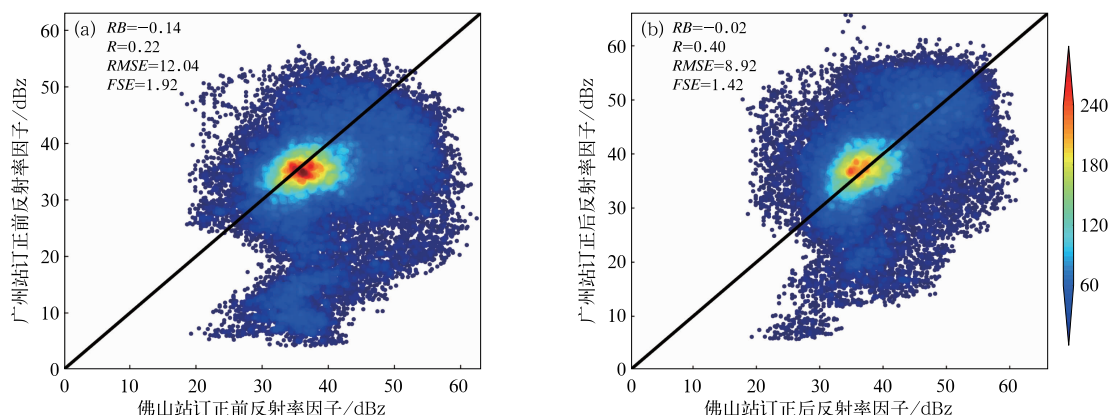


图 9 2019 年 9 月 2 日 15:57 广州与佛山 X 波段相控阵订正前(a)、后(b)的反射率因子散点图
(色标指示以 0.5 dBz 半径为圆的格点密度)

Fig. 9 Scatter plot of reflectivity factor of Foshan and Guangzhou XPAR before (a) and after (b) self-consistent attenuation correction and interpolation at 15:57 BT 2 September 2019
(Color area denotes the density of data within a radius of 0.5 dBz)

定量统计结果也佐证了一致性显著增强的观点,例如 RMSE 和 FSE 都显著减小,分别为 8.92 和 1.42, R 显著增加达到 0.40,订正效果显著。由此可见,从数据的一致性说明了采用恰当的衰减订正算法进行数据订正的必要性,这不仅仅增强了单个 XPAR 资料应用的可靠性,也为多雷达组网所要求的数据质量均一性打下了基础。

3.3 X-S 对比结果

对所有方位角的 α_{opt} 取平均求得 $\alpha_{\text{opt}}^{\text{mean}} = 0.3281$, 将该平均值代入求得所有方位角上衰减订正后的反射率因子,订正效果如图 10c 所示。订正后反射率因子的分布结构形态与订正前(图 10a)相似,最强的回波中心位于佛山 XPAR 的西南方向上,呈现为东北—西南走向的线状对流形态,强度最大的对流单体位于雷达 135° 附近,其值可超过 55 dBz,经过订正后,强对流单体远侧的反射率因子显著增强,从之前的 35 dBz 以下(绿色)订正为 35 dBz 以上(图 10c,黑色圆圈 1)。雷达东北偏东方向上(黑色圆圈 2)是电磁波经过了较长一段的无降水区域方到达的相对独立单体,经过衰减订正后,这个单体的中心强度增强幅度可达 5 dBz。

为了更直观对比 S 波段和 XPAR 数据的差异,在数据处理时已将 S 波段雷达观测数据插值到佛山 XPAR 的坐标系上(图 10b)。XPARG 的观测分辨率更高,观测所得的反射率因子强度结构分布更为细致,体现了 XPARG 的高精度观测的优势。与 S 波段雷达探测数据的分布形态相比,订正前的线状对流强度较弱;订正后显著增强,与 S 波段雷达的强度相

当,局部较强。在线性对流东南侧,即雷达电磁波径向通过强对流单体的远端,订正后的反射率因子强度和分布均与 S 波段雷达探测数据的分布更为接近。在雷达观测的其他象限,本文所使用的衰减订正算法对远距离的探测都能表现出较为理想的订正效果。因此,从反射率因子的平面分布来看,本文所使用的衰减订正算法对粤港澳大湾区统一使用的 XPARG 探测数据有较好订正效果,具有较高的本地适用性。

选择佛山 XPAR 的 $90^\circ \sim 180^\circ$ 方位角上(也就是强回波所在区间)订正前后的反射率因子进行散点分析(图 11)。订正前,XPARG 散点密度最高的区间均在 30~40 dBz,与 S 波段雷达相似,但是两者的散点分布偏离对角线,位于对角线上方。XPARG 存在一个较弱的次中心位于 20~30 dBz(图 11a)。散点图上,单位面积格点数超过 240 的中心区如平行于 X 轴的“蝌蚪”状,横亘在对角线上方,横向跨度可达 20 dBz,以 S 波段雷达作为参考,XPARG 的探测结果明显低估了反射率因子的强度。定量评估的统计量表明, RB 为 0.14, $RMSE$ 为 8.52, FSE 为 1.52,反映了 X 波段低估了反射率因子的事实。相关系数 R 值为 0.60,通过了 0.01 的显著性水平检验,表明两个雷达观测具有较好的正相关关系。经过衰减订正后,对角线两侧的散点分布较订正前均匀,密度中心量级增加,并分布在对角线上。经过订正后的统计量 RB 、 $RMSE$ 、 FSE 和 R 分别为 -0.04、6.96、1.15 和 0.63,XPARG 订正后的数据略微高估了反射率因子,但是估测偏差幅度减小,相关性有所增加。以上定量结果均意味着经过衰减订正

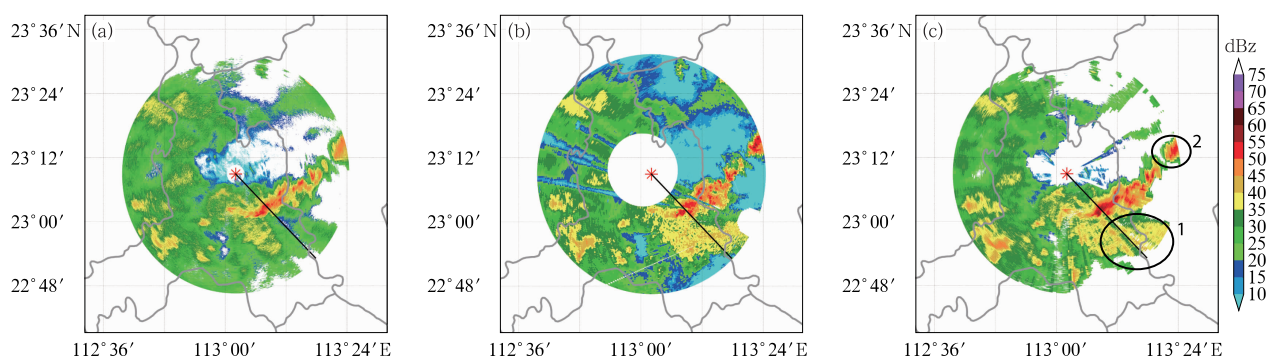


图 10 2019 年 9 月 2 日 15:57 佛山 X 波段相控阵雷达原始观测(a)、经过坐标匹配的广州 S 波段双偏振雷达(b), 利用自适应算法衰减订正佛山 X 波段相控阵雷达的反射率因子(c)

Fig. 10 Reflectivity factor observed by Foshan XPAR (a), reflectivity factor of Guangzhou S-band Doppler radar after coordinate matching (b) and reflectivity factor of Foshan XPAR after self-consistent attenuation correction and interpolation (c) at 15:57 BT 2 September 2019

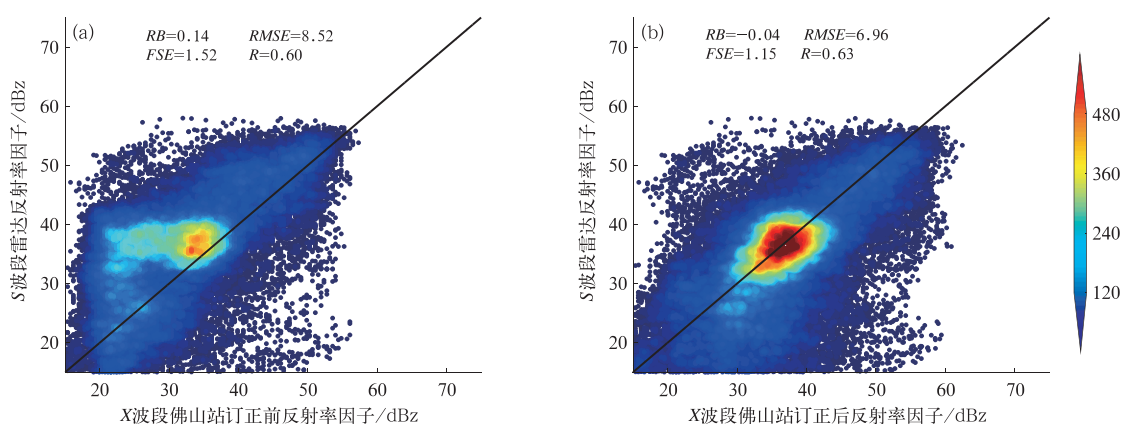


图 11 2019 年 9 月 2 日 15:57 S 波段多普勒雷达与佛山 X 波段相控阵雷达 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 方位角上订正前(a)、订正后(b)高于 15 dBz 的反射率因子散点图

(色标指示以 0.5 dBz 半径为圆的格点密度)

Fig. 11 Scatter plot of reflectivity factor (>15 dBz) before (a) and after (b) self-consistent attenuation correction between interpolation of Guangzhou S-band Doppler Radar and Foshan XPAR at 15:57 BT 2 September 2019
(Color area denotes the density of grids within a radius of 0.5 dBz)

后的 XPAR 的反射率因子准确率提升,本算法具有较好的本地适用性。

3.4 差分反射率因子订正效果

低仰角观测的反射率因子小于 10 dBz 时,差分反射率因子理论值应为 0 dB(何宇翔等,2009),因此本文在开展衰减订正前,基于反射率因子与差分反射率因子的统计关系,将差分反射率因子整体增加 0.8 dB,差分反射率因子的负值得到有效约束,但是噪点明显(图 12a)。后续开展的差分反射率因子衰减订正效果如图 12b 所示,噪点现象得到抑制,图中可辨识独立的回波单体分布特征,订正幅度不是很明显。

由于差分反射率因子值反映的是雨滴大小,大

雨滴的差分反射率因子有所增大,而通常而言大粒子的反射率因子较大,两者具有一定的相关性。散点分布图(图 12c)显示订正前差分反射率因子和反射率因子之间存在正相关关系,相关系数为 0.48。反射率因子小于 15 dBz 时,差分反射率因子相对均匀地分布在 0 dB 上下;反射率因子在 15~40 dBz 时,差分反射率因子主要集中在 0~1 dB,大致呈现曲线相关关系,其中在 20~25 dBz 区间上,差分反射率因子出现凸起现象,可能是由于数据抖动导致的;当反射率因子超过 40 dBz,差分反射率因子随反射率因子增大而增加的幅度有所增大。

经衰减订正之后(图 12d),散点分布更为集中,差分反射率因子和反射率因子之间的正相关关系更显著,相关系数增加至 0.58,并且 20~25 dBz 区间

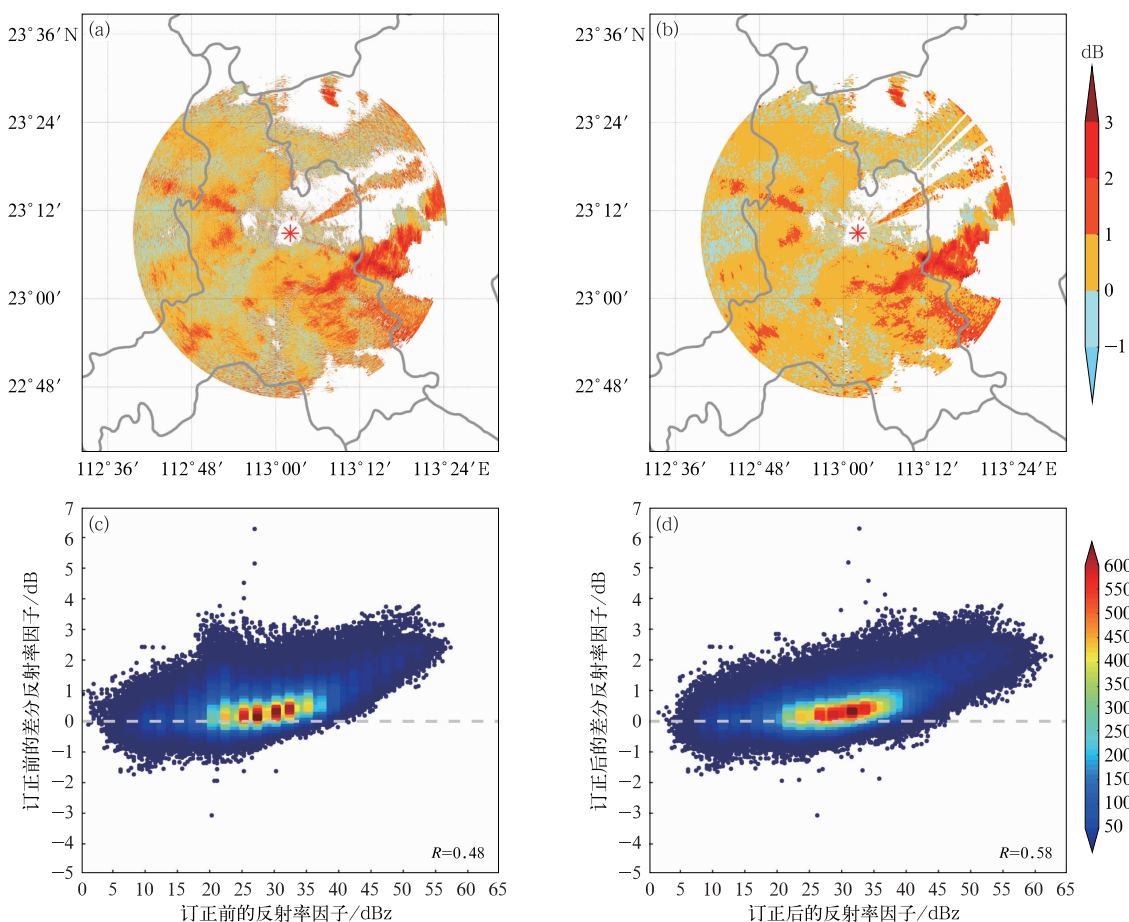


图 12 2019 年 9 月 2 日 15:57 佛山 XPAR1.8°仰角上订正前(a,c)、后(b,d)差分反射率平面分布(a,b)和反射率因子与差分反射率因子的散点图(c,d)
(色标指示 0.5 dBz×0.05 dB 矩形的格点密度)

Fig. 12 Distribution of differential reflectivity (a, b) and scatter plot between differential reflectivity and reflectivity factor (c, d) at 15:57 BT 2 September 2019

(a, c) before attenuation correction, (b, d) after attenuation correction

(Color area denotes the density of grids within a 0.5 dBz×0.05 dB rectangle in Figs. 12c, 12d)

上没有了凸起的数据分布,异常数据现象得到抑制。反射率因子在 15~40 dBz 时,单位面积上的格点数量较订正前显著增加,差分反射率因子更集中于 0~1 dB,该区间内主要为小水滴。

4 结 论

本文针对 X 波段双偏振相控阵雷达的雨滴衰减问题进行订正算法研究,利用自适应约束算法对佛山相控阵雷达的反射率因子和差分反射率因子进行质量控制,并将订正前后的数据与 S 波段多普勒雷达及相邻的广州 X 波段相控阵雷达数据对比评估。检验结果表明,X 波段相控阵雷达所得的反射率因子强度结构分布更为细致,体现了其高精度观测的优势。沿着径向向外,在强降水中心远离雷达

的一侧,回波强度明显增强,反射率因子梯度值明显减小。图形分析及定量评分结果均表明:订正后的反射率因子与 S 波段雷达的观测分布强度相当,局部更强;与相邻 X 波段相控阵雷达的订正值分布均较为一致,自适应约束衰减订正算法对反射率因子有较好订正效果,具有较高的本地适用性。差分反射率因子也得到了一定程度的订正,有效约束了负值,径向分布表明在强降水回波远侧有微弱的订正幅度。但是由于差分反射率因子的量值分布范围较小,增幅在平面图的对比上不如反射率因子的订正效果明显。订正后的反射率因子和差分反射率因子的正相关关系显著增强,相关系数由订正前的 0.48 增长到订正后的 0.58。

以上的评估效果可见,自适应衰减订正方法能够基于不同的雷达及降水目标物自适应调整关系系

数,较好地解决了X波段双偏振相控阵雷达的雨滴衰减问题,具有较好的可移植性和本地适应性。本研究可为粤港澳大湾区X波段双偏振相控阵雷达网资料推广应用和产品开发提供前期数据质量保障,有助于增强高分辨率雷达对强对流天气系统的追踪和定量降水估测能力,以及提高国家重要大城市的短时临近天气预测和预警能力。

致谢:感谢广东纳睿雷达科技股份有限公司地对本研究评估工作的支持。

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).
- 曹俊武,胡志群,陈晓辉,等,2011. 影响双线偏振雷达相位探测精度的分析[J]. 高原气象,30(3):817-822. Cao J W, Hu Z Q, Chen X H, et al, 2011. Accuracy analysis of dual-linear polarization signal-process measurement[J]. Plateau Meteor, 30(3):817-822(in Chinese).
- 程元慧,傅佩玲,胡东明,等,2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象,46(6):823-836. Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al, 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon, 46(6):823-836(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,黄浩,等,2020. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征[J]. 应用气象学报,31(6):706-718. Fu P L, Hu D M, Huang H, et al, 2020. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric phased array radar in 2018[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6):706-718(in Chinese).
- 何宇翔,吕达仁,肖辉,2009. X波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正[J]. 高原气象,28(3):607-616. He Y X, Lyu D R, Xiao H, 2009. Attenuation correction of radar differential reflectivity for X-band dual polarization radar[J]. Plateau Meteor, 28(3):607-616(in Chinese).
- 胡志群,刘黎平,吴林林,2014. C波段偏振雷达几种系统误差标定方法对比分析[J]. 高原气象,33(1):221-231. Hu Z Q, Liu L P, Wu L L, 2014. Comparison among several system biases calibration methods on C-band polarimetric radar[J]. Plateau Meteor, 33(1):221-231(in Chinese).
- 黄朝盈,2019. 双偏振天气雷达定量降水估计关键技术研究[D]. 南宁:南宁师范大学. Huang Z Y, 2019. Study on key technologies of quantitative precipitation estimation with dual polarimetric weather radar [D]. Nanning: Nanning Normal University (in Chinese).
- 黄嘉佑,李庆祥,2015. 气象数据统计分析方法[M]. 北京:气象出版社:28-47. Huang J Y, Li Q X, 2015. Statistical Analysis Methods of Meteorological Data [M]. Beijing: China Meteorological Press:28-47(in Chinese).
- 李明凤,闵超,张阿思,等,2018. 基于SRTM数据的广东新一代天气雷达覆盖研究[J]. 地球信息科学学报,20(8):1201-1208. Li M F, Min C, Zhang A S, et al, 2018. Analysis of CINRAD coverage in Guangdong Province based on SRTM data[J]. J Geo-Info Sci, 20(8):1201-1208(in Chinese).
- 穆穆,陈博宇,周非凡,等,2011. 气象预报的方法与不确定性[J]. 气象,37(1):1-13. Mu M, Chen B Y, Zhou F F, et al, 2011. Methods and uncertainties of meteorological forecast [J]. Meteor Mon, 37(1):1-13(in Chinese).
- 唐永兰,徐桂荣,于晓晶,2019. 近49 a中国30°N带不同地形下大城市与其郊区的降水特征[J]. 暴雨灾害,38(4):354-363. Tang Y L, Xu G R, Yu X J, 2019. Precipitation characteristics in large cities and their suburbs under different terrains in 30°N zone of China in recent 49 years[J]. Torr Rain Dis, 38(4):354-363(in Chinese).
- 王晗,刘黎平,张扬,2018. X波段双线偏振雷达不同衰减订正法对比分析[J]. 气象科技,46(1):1-9, 15. Wang H, Liu L P, Zhang Y, 2018. Comparison of different attenuation correction methods using X-band dual polarimetric radar[J]. Meteor Sci Technol, 46(1):1-9, 15(in Chinese).
- 王璐,沈学顺,2019. 对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J]. 气象,45(8):1158-1168. Wang L, Shen X S, 2019. Review on the representation of model uncertainty in convection-allowing ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 45(8):1158-1168(in Chinese).
- 魏庆,胡志群,刘黎平,等,2016. C波段偏振雷达数据预处理及在降水估计中的应用[J]. 高原气象,35(1):231-243. Wei Q, Hu Z Q, Liu L P, et al, 2016. C-band polarization radar data preprocessing and its application to rainfall estimation[J]. Plateau Meteor, 35(1):231-243(in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 肖柳斯,张阿思,闵超,等,2019. GPM卫星降水产品在台风极端降水过程的误差评估[J]. 高原气象,38(5):993-1003. Xiao L S, Zhang A S, Min C, et al, 2019. Evaluation of GPM satellite-based precipitation estimates during three tropical-related extreme rainfall events[J]. Plateau Meteor, 38(5):993-1003(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).
- 朱丹,谷军霞,师春季,等,2018. 新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J]. 气象,44(11):1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C J, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. Meteor Mon, 44(11):1434-1444(in Chinese).
- Anagnostou E N, Krajewski W F, 1999. Real-time radar rainfall estimation. Part II: case study[J]. J Atmos Ocean Technol, 16(2):

- 198-205.
- Aydin K, Zhao Y, Seliga T A, 1989. Rain-induced attenuation effects on C-band dual-polarization meteorological radars [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 27(1):57-66.
- Bluestein H B, French M M, Popstefanija I, et al, 2010. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(5):579-600.
- 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).
- Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al, 1990. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 7(6):829-840.
- Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V, 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation; a self-consistent method with constraints[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 39(9):1906-1915.
- Carey L D, Rutledge S A, Ahijevych D A, et al, 2000. Correcting propagation effects in C-band polarimetric radar observations of tropical convection using differential propagation phase[J]. *J Appl Meteor*, 39(9):1405-1433.
- Chandrasekar V, Lim S, Gorgucci E, 2006. Simulation of X-band rainfall observations from S-band radar data [J]. *J Atmos Ocean Technol*, 23(9):1195-1205.
- Du Y, Chen G X, 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: Ensemble-based analysis [J]. *Mon Wea Rev*, 146(11):3827-3844.
- French M M, Bluestein H B, Popstefanija I, et al, 2014. Mobile, phased-array, Doppler radar observations of tornadoes at X band [J]. *Mon Wea Rev*, 142(3):1010-1036.
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, 1996. Operational monitoring of rainfall over the arno river basin using dual-polarized radar and rain gauges[J]. *J Appl Meteor*, 35(8):1221-1230.
- Gou Y B, Chen H N, Zheng J F, 2019. An improved self-consistent approach to attenuation correction for C-band polarimetric radar measurements and its impact on quantitative precipitation estimation[J]. *Atmos Res*, 226:32-48.
- Gu J Y, Ryzhkov A, Zhang P, et al, 2011. Polarimetric attenuation correction in heavy rain at C band[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50(1):39-58.
- Hildebrand P H, 1978. Iterative correction for attenuation of 5cm radar in rain[J]. *J Appl Meteor*, 17(4):508-514.
- Hitschfeld W, Bordan J, 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths[J]. *J Meteor*, 11(1):58-67.
- Kuster C M, Heinselman P L, Austin M, 2015. 31 may 2013 El Reno tornadoes: advantages of rapid-scan phased-array radar data from a warning forecaster's perspective[J]. *Wea Forecasting*, 30(4):933-956.
- Liang P, Ding Y H, 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in shanghai during 1916-2014[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(3):321-334.
- McLaughlin D J, Pepyne D, Chandrasekar V, et al, 2009. Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(12):1797-1818.
- Meneghini R, Nakamura K, Ulbrich C W, et al, 1989. Experimental tests of methods for the measurement of rainfall rate using an airborne dual-wavelength radar[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 6(4):637-651.
- Newman J F, Heinselman P L, 2012. Evolution of a quasi-linear convective system sampled by phased array radar[J]. *Mon Wea Rev*, 140(11):3467-3486.
- Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al, 2005a. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: theoretical and empirical basis[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 22(11):1621-1632.
- Park S G, Maki M, Iwanami K, et al, 2005b. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: evaluation and application[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 22(11):1633-1655.
- Ryzhkov A V, 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 24(5):729-744.
- Testud J, Le Bouar E, Obligis E, et al, 2000. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 17(3):332-356.
- Vulpiani G, Tabary P, Parent Du Chatelet J, et al, 2008. Comparison of advanced radar polarimetric techniques for operational attenuation correction at C band[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 25(7):1118-1135.
- Wang Y T, Chandrasekar V, 2009. Algorithm for estimation of the specific differential phase[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 26(12):2565-2578.
- Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al, 2007. The next-generation multimission U. S. surveillance radar network[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(11):1739-1752.
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al, 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 58(8):1799-1819.
- Yussouf N, Stensrud D J, 2010. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter[J]. *Mon Wea Rev*, 138(2):517-538.
- Zhang A S, Xiao L S, Min C, et al, 2019a. Evaluation of latest GPM-era high-resolution satellite precipitation products during the May 2017 Guangdong extreme rainfall event[J]. *Atmos Res*, 216:76-85.
- Zhang G F, Mahale V N, Putnam B J, et al, 2019b. Current status and future challenges of weather radar polarimetry: bridging the gap between radar meteorology/hydrology/engineering and numerical weather prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(6):571-588.