

X波段双偏振雷达资料的质量控制方法对比研究

伍 魏¹, 周筠珺^{1,2}, 李晓敏¹, 翟 丽¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 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, 江苏 南京 210044)

摘要: 雷达资料的质量控制有各种方法, 但比较缺乏不同方法间系统的对比分析。针对中科院大气所 X 波段双偏振雷达资料进行质量控制, 包括了 φ_{DP} 退折叠、滤波、计算 K_{DP} 、衰减订正等, 其中滤波采用滑动平均、中值滤波和小波去噪 3 种方法对比, 衰减订正采用自适应约束算法和 Z_H-K_{DP} 综合算法进行对比, 最后进行效果分析。结果表明, 质量控制后, 有效实现相位退折叠、滤除孤立点和杂波, 3 种滤波方法对原始数据的毛刺现象都能起到不同程度的抑制, 小波去噪的径向距离廓线平滑程度效果最好。两种衰减订正方法后反射率的值有所增加, 散点更加密集地分布在拟合曲线附近, 其中 Z_H-K_{DP} 综合订正算法订正后的效果相对较好。质控后数据质量改善明显, 数据可靠性更高, 有助于提高对中小尺度天气的监测、预警和预报的能力。

关键词: X 波段偏振雷达; 滤波; 衰减订正; 散点拟合图

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcu.2017.01.004

0 引言

X 波段双偏振雷达具有价格低廉、天线体积小、易于移动、空间分辨率较高等诸多优点, 但其受雨区的衰减也非常严重, 单程衰减率是 C 波段的 7~8 倍、S 波段的 10 倍以上^[1]。因此, 在分析天气活动之前必须对 X 波段双偏振雷达资料进行衰减订正。胡志群等^[2]利用 X 波段雷达观测的偏振参量数据, 比较分析了不同订正方法对降水估测的影响。毕永恒等^[3]选择并改进了自适应约束算法。吴欢等^[4]用 Z_H-K_{DP} 综合订正算法对 Z_H 进行衰减订正处理。但雷达系统本身存在噪声及误差, 非降水回波对气象信号存在干扰, 以及气象目标自身也有一定的涨落, 这些影响会使得差分传播相移 φ_{DP} 随距离存在波动起伏现象, 因此在衰减订正之前必须对 φ_{DP} 进行预处理, 包括退折叠和滤波处理^[5]。肖艳娇等^[6]提出了一系列的差分传播相移质量控制的方法, 其中采用了径向连续性检查来对 φ_{DP} 进行退折叠。何宇翔等^[7]引入卡尔曼滤波到差分传播相移 φ_{DP} 的滤波中, 对车载 X 波段偏振雷达资料进行了衰减订正。魏庆等^[7-9]对滑动平均、中值滤波、FIR 迭代滤波方法、卡尔曼滤波、和小波去噪这 5 种 φ_{DP} 滤波方法进行了对比分析。

目前的研究中有多种滤波和衰减订正方法来对雷达资料进行质量控制, 但不同方法之间系统的对比分析相对较少, 因此对中国科学院大气物理研究所的 X 波段双偏振雷达 φ_{DP} 资料质量问题进行相关的分析研究, 提出了一套包括了 φ_{DP} 退折叠、滤波、计算 K_{DP} 、衰减订正等的质量控制方法。首先对 φ_{DP} 采用连续性检查来进行径向退折叠, 然后比较分析几种不同滤波方法的滤波效果, 选取了小波去噪算法来进行滤波处理, 采用自适应约束算法与 Z_H-K_{DP} 综合订正算法对比对 Z_H 进行衰减订正, 最后利用 Z_H-K_{DP} 散点分布拟合图来进行效果分析。

1 雷达资料和数据选取

使用中国科学院大气物理研究所 X 波段双偏振雷达 2015 年 6 月 26 日的观测资料。图 1 所示是北京地图, 星号为雷达放置地点, 其所在的经纬度是 116.381 °E, 39.977 °N, 横、纵坐标表示到雷达的距离, 单位为 km。该雷达海拔高度为 93 m, 所采用的是“单发单收”的工作模式。该雷达资料扫描方式为体扫模式, 完成一次体扫需要的时间为 6 min, 每进行一次体扫观测就会形成一个相应的数据类型为 VT-Byyyyymmddhhxxzz.0nn 的体扫文件, VTB 代表的是体扫模式, 而 yyyy、mm、dd、hh、xx、zz 分别代表年、月、日、时、分、秒, nn 则代表体扫的层数。该雷达的主要参数如表 1 所示。

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB441401); 北京市自然科学基金重点资助项目(8141002); 四川省教育厅资助项目(16CZ0021); 国家科技支撑计划资助项目(2015BAC03B00)

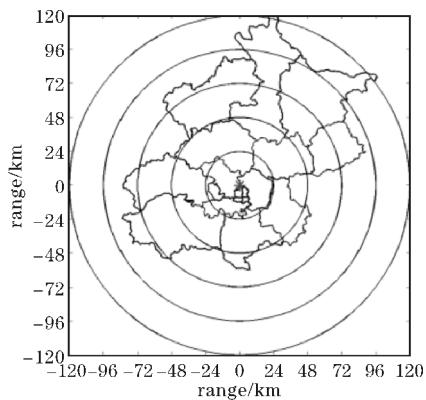


图 1 雷达地理位置

表 1 IAP-Radar 雷达主要参数

雷达特征量	详细说明
偏振模式	双线偏振, 交替发射体制, 单发单收模式
发射系统	频率 9.375 GHz, 脉冲宽度 0.5 μs, 峰值功率 75 kW
接收系统	中心频率 60.5 MHz, 带宽 1.1 MHz, 噪声系数 < 3.5 dB, 动态范围 > 70 dB
天线系统	天线口径 2 m, 主瓣宽度 1.1°, 天线增益 ≥ 40 dB, 偏振增益误差 < 0.3 dB
馈线系统	馈源正交隔离: -35 dB, 开关隔离: -38 dB, 系统正交隔离 -35 dB, 开关速度 5 μs
伺服系统	PPI, RHI, VOI 及扇形扫描, 天线转速 3 ~ 12 (°/s)
雷达产品	水平反射率, 多普勒速度, 谱宽, 差分反射率 (线 性退偏振比), 差分传播相移, 零相关系数

2 资料处理方法

针对 X 波段双偏振雷达资料的相关问题采取一套的质量控制的方法, 包括了 φ_{DP} 退折叠、滤波、计算 K_{DP} 、衰减订正等, 整个资料处理的流程图如图 2 所示。

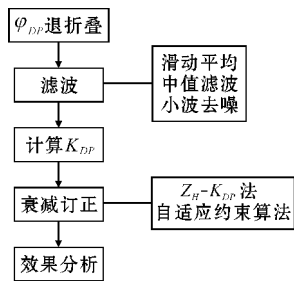


图 2 资料处理流程图

2.1 差分传播相移退折叠

一般来说, φ_{DP} 在径向上是连续的并且具有随距离增加而增大的变化趋势^[10,12]。文中采用的退差分传播相移的折叠的方法是: 径向连续性检查。具体方法如下: 从有效初始 φ_{DP} 所在距离库开始向外比较相

邻两个 $\varphi_{DP(i-1)}$ 和 $\varphi_{DP(i)}$, 如果 $\varphi_{DP(i-1)} - \varphi_{DP(i)} \geq 80^\circ$, 并且连续 10 个距离库的 φ_{DP} 的标准偏差都小于 15° , 则 φ_{DP} 被认为是发生了折叠, 那么就将 φ_{DP} 的值加上 180° , 最后将所有初始的 φ_{DP} 都平移到 -150° 附近。

2.2 滤波

滑动平均和中值滤波是目前最常用最基本的滤波方法, 这两种方法可以较为便捷地达到控制噪声和滤出奇异点的目的, 但是同时也滤去部分的气象信号, 而胡志群等^[13]提出的小波去噪不仅能够使 φ_{DP} 数据更加平滑和连续, 而且能够使有效的气象信息得到保留。小波去噪的步骤大致如下: 信号分解, 信号去噪, 信号重构。

2.3 计算 K_{DP}

进行衰减订正时采用的 Z_H-K_{DP} 综合订正算法需要用到 K_{DP} 这一参量, 因此需要计算出 K_{DP} 数据。目前计算 K_{DP} 普遍采用的方法是根据反射率强度值的不同来选择不同的拟合距离的变距离法^[14]。其表达式为

$$K_{DP} = \frac{\sum_{i=1}^N [\varphi_{DP}(r_i) - \bar{\varphi}_{DP}] (r_i - \bar{r})}{2 \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \tag{1}$$

式(1)中 r_i 表示雷达中心到第 i 个距离库的径向距离, $\bar{\varphi}_{DP}$ 表示这 N 个距离库的 φ_{DP} 的平均值, 而 $\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$ 。其中 N 的取值方法如下^[15]:

$$N = \begin{cases} 30 & Z_H \leq 35 \text{ dBZ} \\ 20 & 35 \leq Z_H \leq 45 \text{ dBZ} \\ 10 & Z_H \geq 45 \text{ dBZ} \end{cases} \tag{2}$$

2.4 订正方法

采用 Z_H-K_{DP} 综合订正算法与自适应约束算法作对比分析。首先简单介绍 Z_H-K_{DP} 综合订正算法, 将 $K_{DP} < \sigma_1$ 或者 $K_{DP} > \sigma_2$ 的值认为是观测或者其他因素引起的误差, 将不予引用, 这一部分采用 Z_H 订正法, 剩下的 $\sigma_1 < K_{DP} < \sigma_2$ 这一范围的则采用 K_{DP} 订正法。公式如下:

$$Z_H(r) = Z_{Ha}(r) + 2 \int_{r_0}^r A_H(s) ds \tag{3}$$

$$A_H = \begin{cases} a_1 K_{DP} & \sigma_1 < K_{DP} < \sigma_2 \\ \alpha Z_H^\beta & K_{DP} < \sigma_1 \text{ or } K_{DP} > \sigma_2 \end{cases} \tag{4}$$

式(3)中 Z_{Ha} 、 Z_H 分别表示订正前、后的反射率因子(单位: dBZ), r_0 为雷达中心, r 为目标的径向距离(单位: km)。式(2)中 A_H 为单程的衰减率(单位: dB/km),

α_1 根据外场实验得到,文中取 0.22 dB/deg , K_{DP} 为差分传播相移率(单位: deg/km), $Z_H = 10^{Z_{Hd}/10} (\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 。 α 、 β 的取值基本不受雨滴形状的影响,因此取常数 $\alpha = 1.370 \times 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} \cdot (\text{mm}^6/\text{m}^3)^{-1}$, $\beta = 0.779$ 。而 σ_1 、 σ_2 分别为质量控制阈值,取 $\sigma_1 = 0.1 (\text{deg/km})$, $\sigma_2 = 3 (\text{deg/km})$ 。

而自适应约束算法与 Z_H - K_{DP} 综合订正算法最大的区别就是综合订正算法中 α 取的是一个常数,而自适应约束算法要不断选取一个最佳的 α 的值,其计算公式如下:

(1) 设定 α 的取值范围,对每一个 α 的值计算 A_H , 利用 A_H 重构 φ_{DP} 。

$$\varphi_{DP}^{cal}(r, \alpha) = 2 \int_{r_0}^r \frac{A_H(s, \alpha)}{\alpha} ds \quad (5)$$

(2) 比较重构的 φ_{DP} 与实测的 φ_{DP} , 以两者的差值最小作为约束条件获得最佳的 α 值。

$$\varphi_{DP}^{err}(\alpha) = \sum_{i=1}^N |\varphi_{DP}^{cal}(r_i, \alpha) - \varphi_{DP}(r_i)| \quad (6)$$

(3) 用最佳系数 α 计算 A_H , 再进行衰减订正。

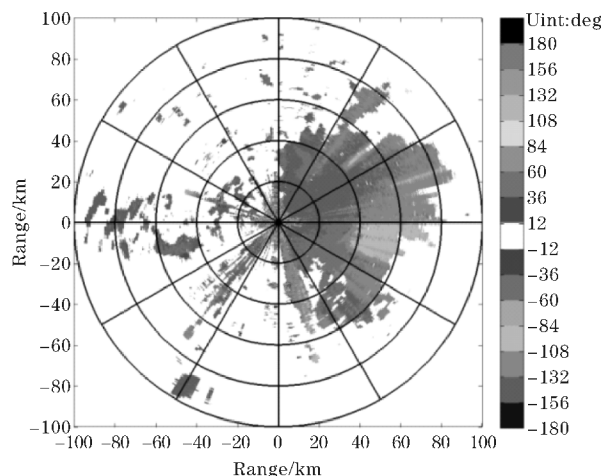
$$A_H(r) = \frac{[Z_H(r)]^b \times [10^{0.1 \times b \times \alpha \times \Delta \varphi_{DP} - 1}]}{I(r_0, r_1) + [10^{0.1 \times b \times \alpha \times \Delta \varphi_{DP} - 1}] \times I(r, r_1)} \quad (7)$$

3 实例分析

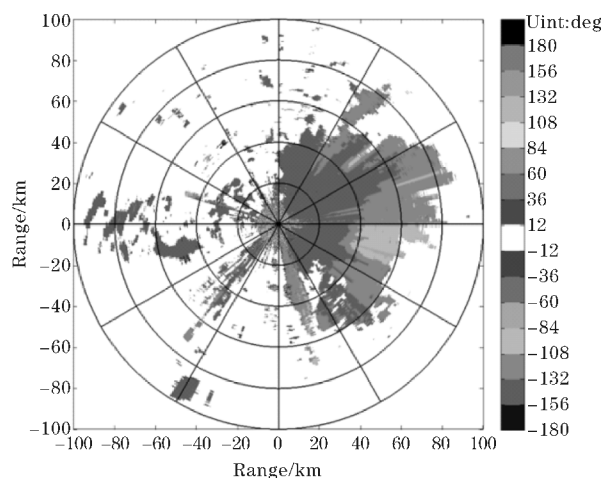
选取该雷达在 2015 年 6 月 26 日的资料为例,首先对 φ_{DP} 进行退折叠处理,再分析对比 3 种滤波方法并选取一种效果较好的进行进一步的处理,估算出 K_{DP} 并利用 K_{DP} 来进行 Z_H - K_{DP} 综合订正算法,再与自适应约束算法的效果进行比较分析,最后进一步分析订正效果。

3.1 φ_{DP} 退折叠

由于近距离处地物杂波、遮挡等隐私的影响,差分传播相移的波动较大,取值不可信,因此从第 70 个距离库开始进行退折叠。如图 3 所示,选取的是 2015 年 6 月 26 日 05 时 05 分 33 秒的 X 波段双偏振雷达资料所得到的 φ_{DP} 的仰角为 2° 的 PPI 图。图 3(a) 为原始的 φ_{DP} 的 PPI 图,从图中可看出,在方位角 30° 附近以及 $90^\circ \sim 150^\circ$ 出现了相位折叠,由正值突变为负值,然后再随距离逐渐增加。图 3(b) 为经过退折叠后的 φ_{DP} 的 PPI 图,从图中可以看出,除了雷达中心附近的 φ_{DP} 波动较大之外,所有径向的 φ_{DP} 变得连续,并且随着距离而增加。因此,说明文中针对 φ_{DP} 的退折叠方法有效,可进一步进行滤波处理。



(a) 退折叠前



(b) 退折叠后

图3 仰角为 2° 的差分传播相移 φ_{DP} 退折叠前后的 PPI 图

3.2 滤波

退折叠处理后, φ_{DP} 数据或多或少地还存在一些波动,因此还需要选择合适的滤波方法。文中采用小波去噪的方法、13 点滑动平均和 13 点中值滤波 3 种方法得到的结果进行比较分析。如图 4 所示,选取仰角为 2° 方位角为 74° 的差分传播相移 φ_{DP} 的滤波前后的距离廓线图,对比可知:该径向数据连续性较好,并且随着距离的增加而增大,整体变化趋势符合理论分析;但是原始数据的差分传播相移在退折叠后仍旧存在比较大的波动和毛刺现象。经过不同的滤波处理后,径向距离廓线的整体变化趋势与原始数据基本一致,并且对原始数据的毛刺现象都能起到不同程度的抑制作用。其中小波去噪处理后,数据的连续性和平滑性有了明显的提升,并且原始数据的有效的气象回波也得到了很好的保留,因此,相较于滑动平均和中值滤波两种滤波方法来说,小波去噪具有更明显的滤波效果,所以后续数据的衰减订正处理都是建立在小波去噪的方法上进一步进行的。

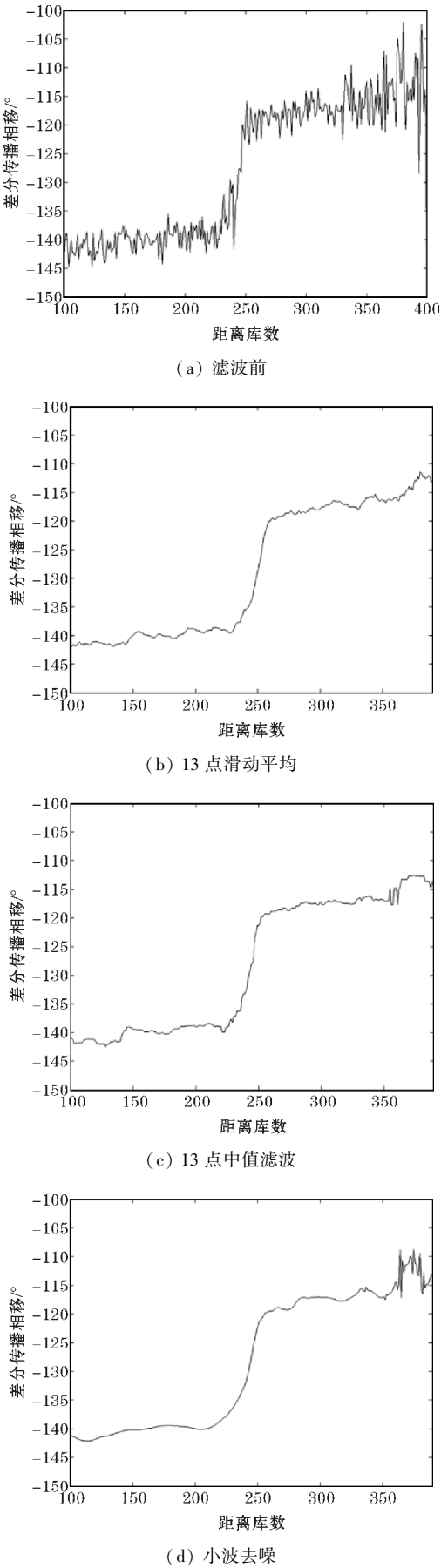


图 4 仰角 2°,方位角 74°的差分传播相移 φ_{DP} 滤波前、滑动平均、中值滤波、小波去噪后距离廓线图

3.3 计算 K_{DP}

图 5 是图 4 经过 3 种滤波方法滤波后的 φ_{DP} 再一次经过上述处理后得到的 K_{DP} 随径向距离变化廓线图。对比图 4、图 5 可进一步表明,经 13 点滑动平均和 13 点中值滤波过后的 K_{DP} 的距离廓线图仍然有过多的毛刺和波动,只有小波去噪的 K_{DP} 的距离廓线更平滑,并且更加能够反映出 φ_{DP} 的变化趋势。

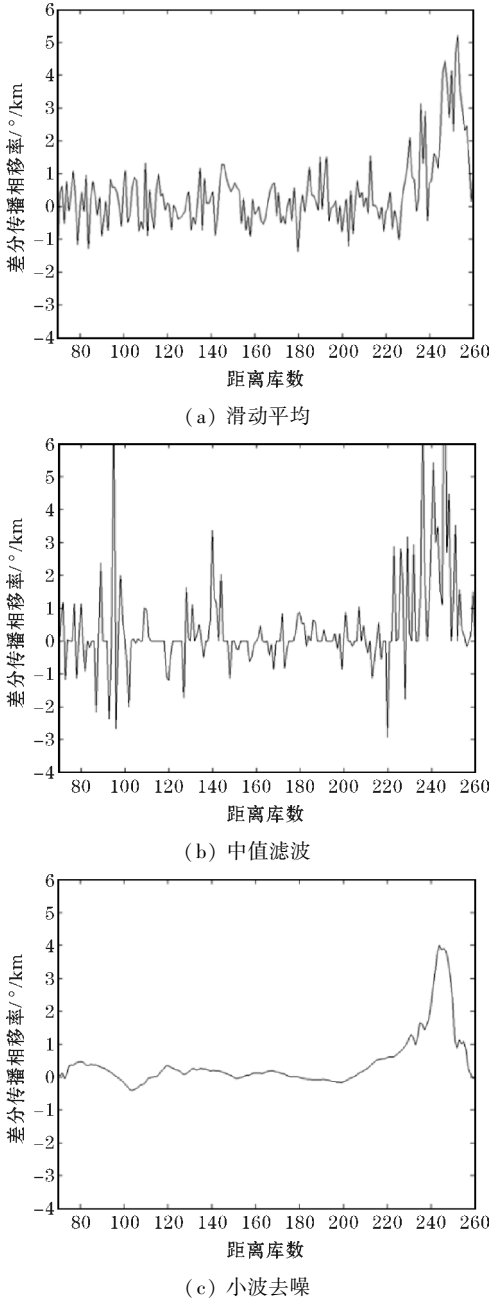
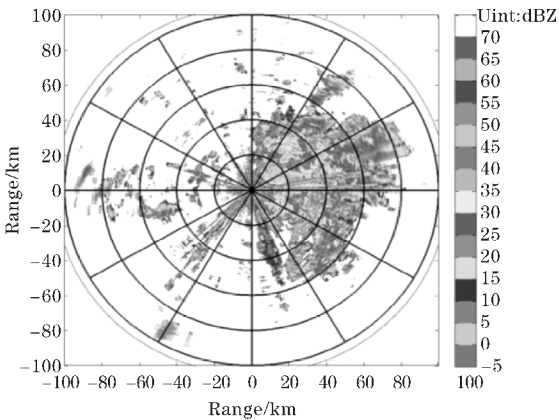


图 5 仰角 2°,方位角 74°的差分传播相移率 K_{DP} 经过滑动平均、中值滤波和小波去噪后距离廓线图

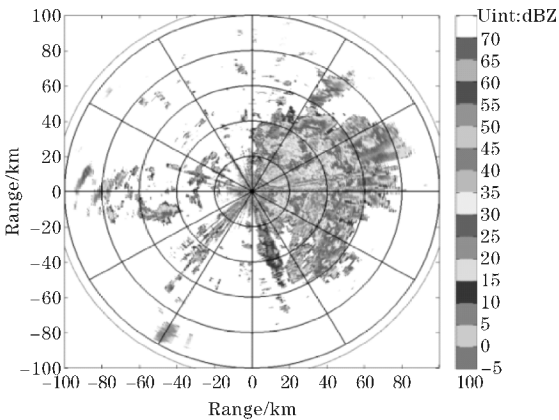
3.4 衰减订正

如图 6 所示,选取的是 2015 年 6 月 26 日 05 时 05 分 33 秒的 X 波段双偏振雷达资料,仰角为 2°时做出

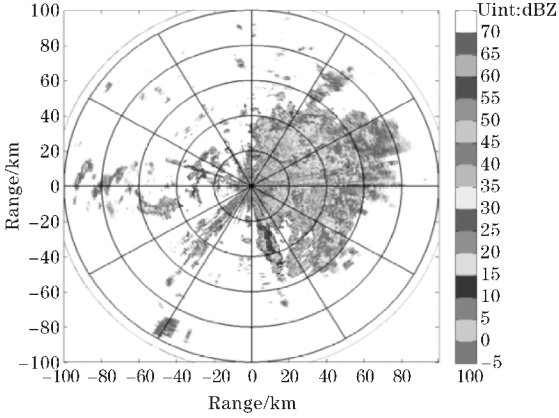
的雷达反射率的 PPI 图。图 6(a) 为衰减订正前的原始的雷达反射率的 PPI 图,图 6(b)、(c) 分别为经过自适应约束算法、 Z_H-K_{DP} 综合订正算法订正后的雷达反射率的 PPI 图。由图 6(a) 可以看出,在距离雷达中心较近的范围内,雨区的衰减较少,反射率基本都在 20 ~ 35 dBZ,而在雷达东南部距离雷达中心 20 ~ 40 km 处有一强回波区域。经过两种方法订正后,雷达反射率因子都有一定的增强,反射率因子 Z_H 的衰减得到一定的订正,接下来根据不同的反射率强度来划分两块不同区域,并对这两个区域做反射率概率分布图对比分析,最后再做出散点拟合图进行对比分析。



(a) 订正前



(b) 自适应约束算法订正后



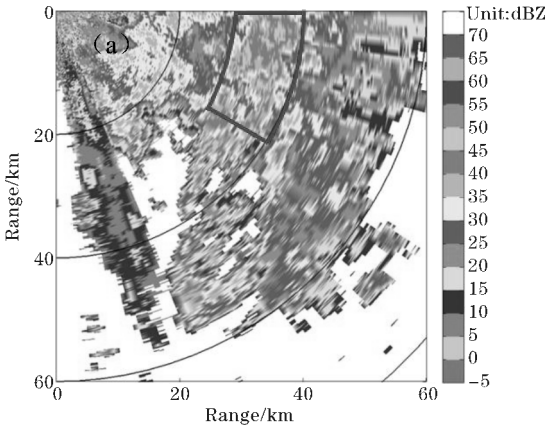
(c) Z_H-K_{DP} 综合算法订正后

图 6 仰角为 2° 的 Z_H 的 PPI 图对比

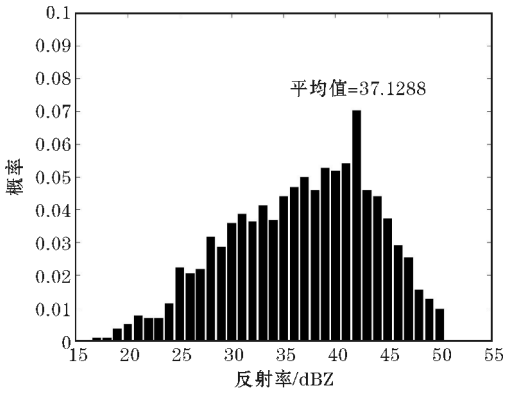
3.5 效果分析

3.5.1 回波强度 35 dBZ 以上

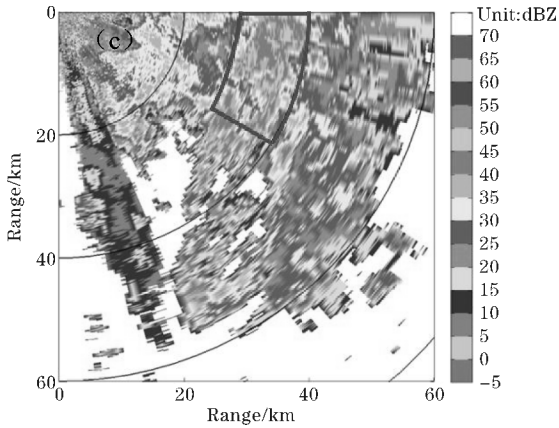
在仰角为 2°, 方位角 90° ~ 120°, 距离雷达中心 30 ~ 40 km 的区域, 有一块较强的回波区, 回波强度中心都在 35 dBZ 以上, 最大值达到 45 dBZ 以上, 如图 7 所示。图 7(a)、(c)、(e) 分别为订正前、自适应约束算法、 Z_H-K_{DP} 订正后 Z_H 的 PPI 图, 其中图 7(c) 的回波强度有一定的增加, 图 7(e) 回波强度普遍增加到了 45 dBZ 左右, 最大值达到 55 dBZ 左右。而图 7(b)、(d)、(f) 分别为订正前、自适应约束算法、 Z_H-K_{DP} 综合算法订正后反射率概率分布图。订正前该区域内的平均值为 37.1288 dBZ, 经过两种方法订正后, 反射率的分布都有向大值区移动的趋势, 图 7(d) 中整个区域内的平均值达到 37.4018 dBZ, 比订正前平均增加了 0.3 dBZ 左右; 图 7(f) 中 40 ~ 50 dBZ 的反射率值明显增大了, 整个区域内的平均值达到 38.4006 dBZ, 比订正前平均增加了 1.3 dBZ 左右。对比可知, Z_H-K_{DP} 的订正效果相对较好。



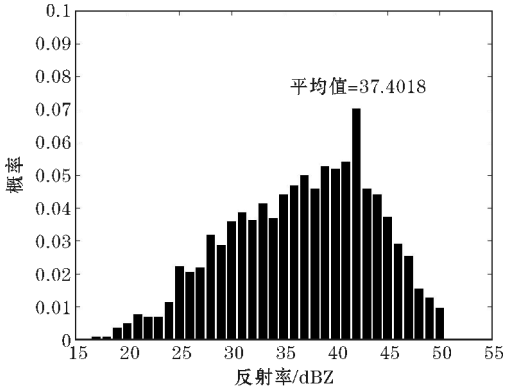
(a) PPI 图订正前



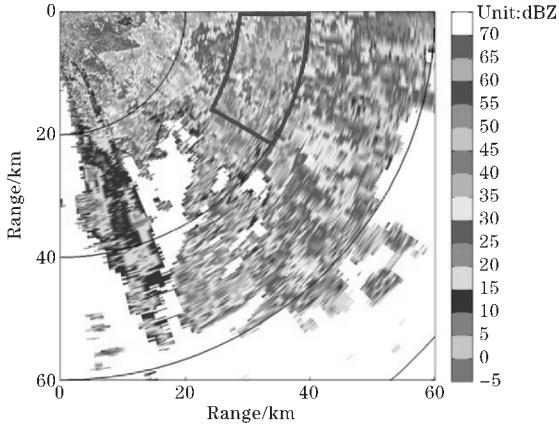
(b) 反射率概率分布订正前



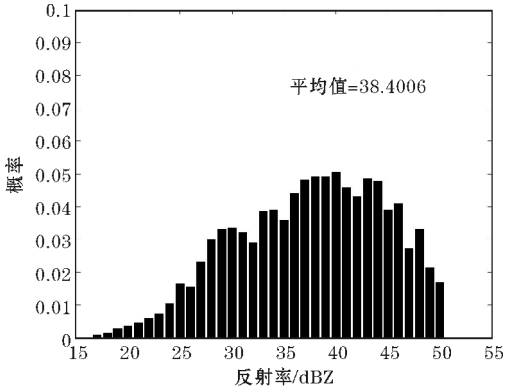
(c) PPI 图自适应约束算法订正后



(d) 反射率概率分布自适应约束算法订正后



(e) PPI 图 Z_H-K_{DP} 综合算法订正后

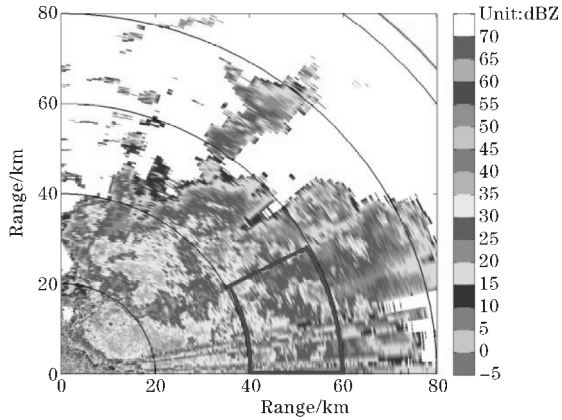


(f) 反射率概率分布 Z_H-K_{DP} 综合算法订正后

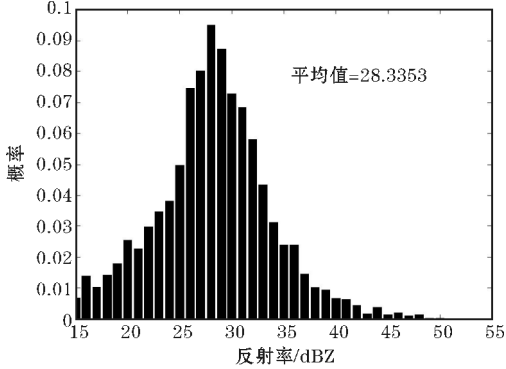
图 7 仰角为 2° , 方位角 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$, 距离雷达中心 30 ~ 40 km 回波区域 Z_H 的 PPI 图及反射率概率分布

3.5.2 回波强度 25 ~ 35 dBZ

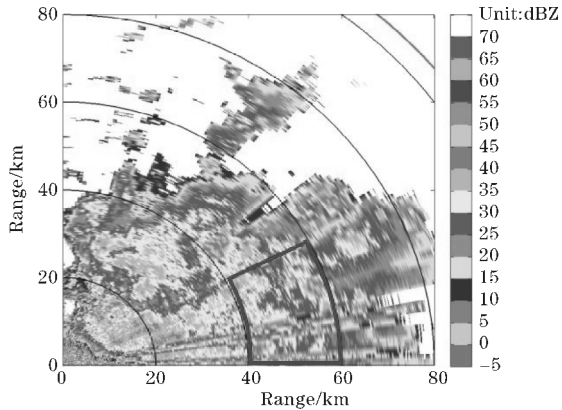
在仰角为 2° ,方位角 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,距离雷达中心 40 ~ 60 km的区域,有一块较弱的回波区,回波强度中心都在 25 ~ 35 dBZ,如图 8 所示。图 8(a)、(c)、(e) 分别为订正前、自适应约束算法、 Z_H-K_{DP} 订正后 Z_H 的 PPI 图,其中图 8(c)、(e)的回波强度有一定的增加。而图 8(b)、(d)、(f) 分别为订正前、自适应约束算法、 Z_H-K_{DP} 订正后反射率概率分布图。订正前该区域内的平均值为 28.3353 dBZ,经过两种方法订正后,反射率的分布都有向大值区移动的趋势,图 8(d)中整个区域内的平均值达到28.8003 dBZ,比订正前平均增加了0.5 dBZ左右;图 8(f)中整个区域内的平均值达到29.5581 dBZ,比订正前平均增加了1.2 dBZ。对比可知,两种方法效果相当, Z_H-K_{DP} 综合算法效果相对较好。



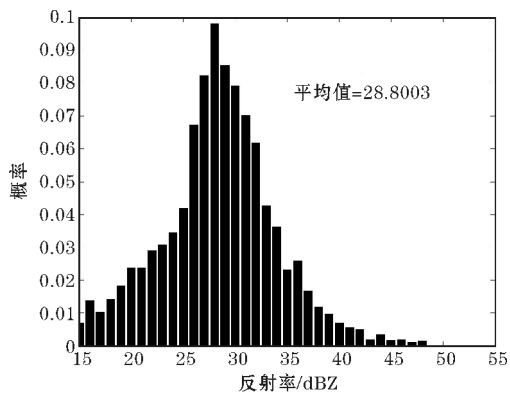
(a) PPI 图订正前



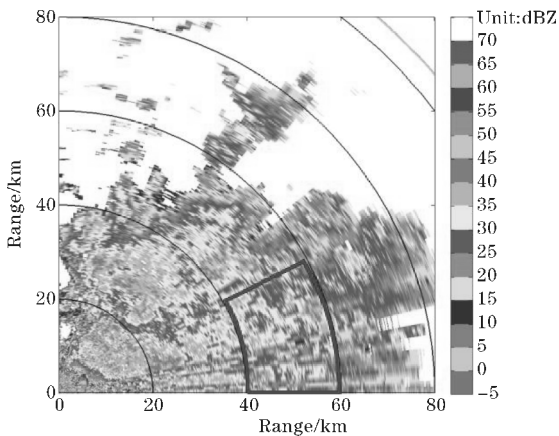
(b) 反射率概率分布订正前



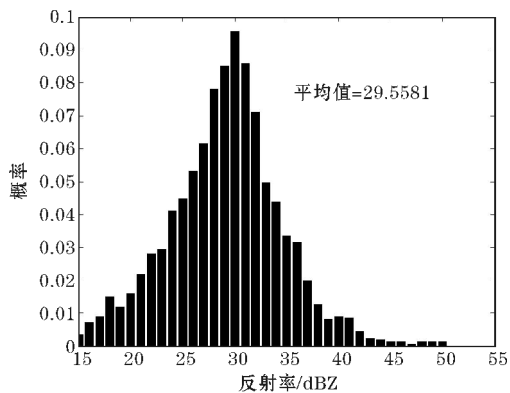
(c) PPI 图自适应约束算法订正后



(d) 反射率概率分布自适应约束算法订正后



(e) PPI 图 Z_H - K_{DP} 综合算法订正后



(f) 反射率概率分布 Z_H - K_{DP} 综合算法订正后

图 8 仰角为 2°,方位角 60°~90°,距离雷达中心 40~60 km 回波区域 Z_H 的 PPI 图及反射率概率分布

为进一步地分析衰减订正的效果,选取以上两个不同强度的回波区域数据,比较订正前后的 Z_H - K_{DP} 的分布特性。图 9、图 10 中的曲线是由 Park et al. (2005 年)通过散射模拟建立的订正后的反射率因子 Z_H 与差分传播相移率 K_{DP} 之间的关系式,如下所示:

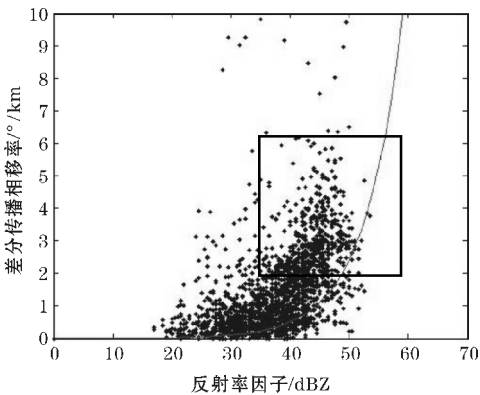
$$K_{DP} = \alpha Z_H^c \tag{8}$$

式中 $\alpha = 9.89 \times 10^{-4}$, $c = 0.678$ 。

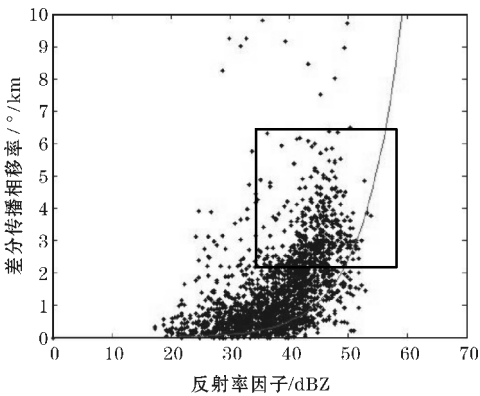
3.5.3 回波强度 35 dBZ 以上

图 9 选取的是仰角为 2°,方位角为 90°~120°,距离雷达中心 30~40 km 的区域做出的散点图分

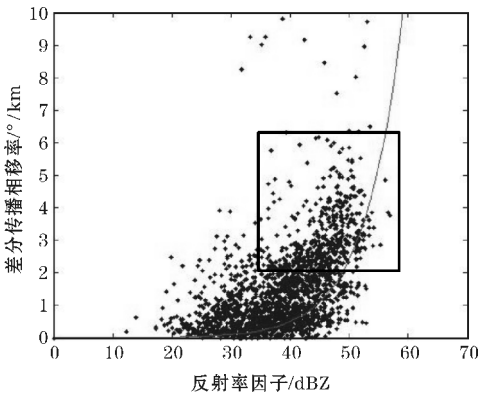
布,从图 9(a)中可以看出订正前的反射率因子位于拟合曲线的左上边,距离拟合曲线稍远。经过两种方法衰减订正后,如图 9(b)、(c)所示,散点分布图出现较大的变化,反射率因子的值有所增加,散点更加密集地分布在拟合曲线附近,并且随着反射率因子的增大,差分传播相移率也呈现出增大的趋势。对于一个确定的反射率因子的值,其对应的差分传播相移率的值范围逐渐减小,并且向拟合曲线靠近,说明一些零散且杂乱无规律的点在订正之后得到了合理的修正。图 9(c)的散点分布更加靠近拟合曲线,因此 Z_H - K_{DP} 订正效果相对较好。



(a) 订正前



(b) 自适应约束算法订正后

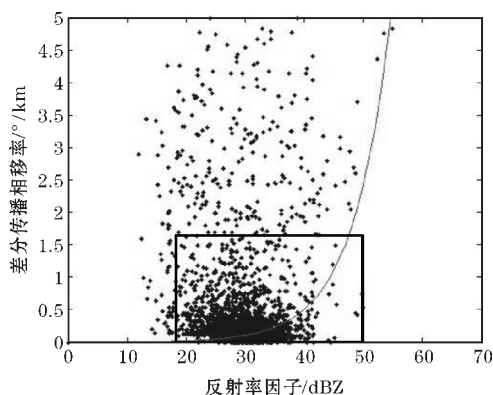


(c) Z_H - K_{DP} 综合算法订正后

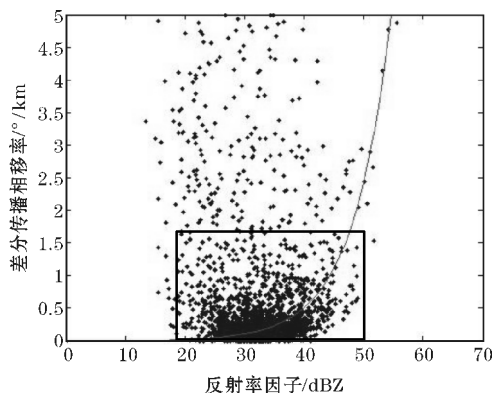
图 9 仰角为 2°,方位角 90°~120°,距离雷达中心 30~40 km 回波区域订正前后的散点拟合图

3.5.4 回波强度 25 ~ 35 dBZ

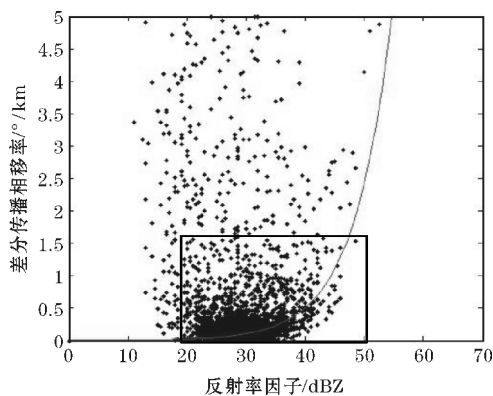
图 10 选取的是仰角为 2° , 方位角为 $60^\circ \sim 90^\circ$, 距离雷达中心 40 ~ 60 km 的区域的数据做出的散点图分布, 由图 10(a)、(b)、(c) 对比可知, 订正后的散点分布靠近拟合曲线的更多, 尤其是反射率在 30 ~ 45 dBZ 区间的散点分布, 图 10(c) 的散点分布更加靠近拟合曲线, 因此 $Z_H - K_{DP}$ 订正效果相对较好。



(a) 订正前



(b) 自适应约束算法订正后



(c) $Z_H - K_{DP}$ 综合算法订正后

图 10 仰角为 2° , 方位角 $60^\circ \sim 90^\circ$, 距离雷达中心 40 ~ 60 km 回波区域订正前后的散点拟合图

个重要的不可忽视的问题, 在利用 X 波段雷达资料分析天气过程及其形成机理之前, 必须对其进行质量控制。对 2015 年 6 月 26 日中国科学院大气物理研究所的 X 波段双偏振雷达资料采用不同方法进行了一系列的质量控制处理, 包括退折叠、滤波、衰减订正等, 并且对这些处理的效果进行对比分析, 得出的初步的结论如下:

(1) 采用径向连续性检查的方法来对差分传播相移 φ_{DP} 进行退折叠处理, 并且在显示的时候将初始差分传播相移都平移到 -150° 附近。经过处理后得到的 φ_{DP} 更加地平滑且连续, 并且具有随距离增加的趋势。

(2) 采用的是 13 点滑动平均、13 点中值滤波以及小波去噪 3 种方法对比分析来对差分传播相移 φ_{DP} 进行滤波处理, 结果表明, 相较于滑动平均和中值滤波这两种基本滤波方法来说, 小波去噪能够更好地抑制差分传播相移 φ_{DP} 的波动问题, 并且能够有效地保留有用的气象回波信息, 因此利用小波去噪后的数据来进行进一步的处理。

(3) 利用变距离法对经过上述处理后的差分传播相移 φ_{DP} 进行最小二乘拟合得到差分传播相移率 K_{DP} , 并选取某一径向的资料做出 K_{DP} 随距离变化的廓线图, 分析得知, 经过滑动平均和中值滤波后的曲线仍存在许多的波动和毛刺, 而小波去噪后的 K_{DP} 减少了许多明显的负值点和极大值点, 曲线更加平滑且连续, 进一步说明了小波去噪滤波效果更好。

(4) 采用自适应约束算法、 $Z_H - K_{DP}$ 综合算法分别对反射率因子进行衰减订正, 经过两种方法订正后, 受衰减的回波信号得到一定的加强, 反射率的值有向大值区移动的趋势, 其中 $Z_H - K_{DP}$ 订正效果相对较好。

但是本文也存在着一些不足之处, 采用退折叠对差分传播相移 φ_{DP} 进行处理时, 对实际差分传播相移 φ_{DP} 的分布有所改变, 还有, $Z_H - K_{DP}$ 衰减订正公式中的部分系数是由场外试验所得到, 进行处理时可能会有所偏差, 因此亟须更科学的系数计算方法, 或者采取更科学的衰减订正方法。另外文中只选取了一个个例进行对比分析, 还需要大量的不同结构的个例来验证订正的效果, 使其得到普适性, 这也是进一步探究的方向。

致谢: 感谢成都信息工程大学气象科普基地示范项目 (2017 KZ0015) 对本文的资助

参考文献:

- [1] Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. 2005a. Correction of radar reflectivity and differ-

4 结束语

衰减问题已经成为 X 波段双偏振雷达资料的一

- ential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis [J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 22(11):1621-1632.
- [2] 胡志群,刘黎平. X波段双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, 2008, 66(2): 251-261.
- [3] 毕永恒,刘锦丽,段树,等. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学, 2012, 36(3).
- [4] 吴欢,黄兴友. X波段双偏振雷达回波强度衰减和地物回波识别订正[J]. 气象科学, 2014, 34(1): 32-38.
- [5] 曹杨,苏德斌,周筠珺,等. C波段双线偏振多普勒雷达差分传播相移质量分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 548-559.
- [6] 肖艳姣,王斌,陈晓辉,等. 移动X波段双线偏振多普勒天气雷达差分传播相移数据质量控制[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 223-230.
- [7] 何宇翔,吕达仁,肖辉,等. X波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 1027-1037.
- [8] 魏庆,胡志群,刘黎平. 双偏振雷达差分传播相移的五种滤波方法对比分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(6): 1-7.
- [9] 杜牧云,刘黎平,胡志群,等. 双偏振雷达差分传播相移的小波滤波初探[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 248-254.
- [10] 吴欢. X波段双偏振雷达资料的衰减订正和地物消除以及降水物类型判别研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 10-16.
- [11] Hubbert J, Brangi V N. An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements [J]. J Atmos Ocean Technol, 1995, 12(3): 643-648.
- [12] Wang Yanting, Chandrasekar V. Algorithm for estimation of the specific differential phase [J]. J Atmos Ocean Technol, 2009, 26(12): 2565-2578.
- [13] Hu Z Q, Liu L P. Applications of wavelet analysis in differential propagation phase shift data denoising [J]. Adv Atmos Sci, 2014, 31(4): 824-834.
- [14] 陈羿辰,刘锦丽,段树,等. X波段双极化雷达在北京夏季降水估测中的应用[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 292-302.
- [15] Wang Yanting, Chandrasekar V. Algorithm for estimation of the specific differential phase [J]. J Atmos Ocean Technol, 2009, 26(12): 2565-2578.

Comparative Study on Quality Control Methods of X-band Dual-Polarization Radar Data

WU Wei¹, ZHOU Yun-jun^{1,2}, LI Xiao-min¹, ZHAI Li¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Meteorological Disaster Warning and Evaluating the Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: There are various methods to control the quality of radar data, but the comparative analysis among different methods is relatively rare. This paper chooses the X-band dual-polarization radar data to control the quality, including phase unfolding, phase filtering, K_{dp} calculating and attenuation correction, in which phase filtering is compared with the methods of moving average, median filtering and wavelet de-noising and attenuation correction is compared with the self-consistent method and Z_H-K_{dp} method. The results indicate that it can work on ground clutter, wrapped phase and statistical fluctuations. The smoothing effect of wavelet filter is the best, while three kinds of filtering methods can suppress the glitch of the original data. The effect of the Z_H-K_{dp} method is better, while the value of the reflectivity has increased, scattered points more densely distributed in the vicinity of the fitting curve two attenuation correction methods. The improvement of the quality is obvious after attenuation correction, and the reliability of data show better, which is beneficial to improve the ability of monitoring, early warning and forecasting of meso-and-micro scale weather system.

Keywords: X-band dual-polarization radar; wave filtering; attenuation correction; scatter plots