

双线偏振多普勒雷达资料质量的定量评估^{*1}

杜牧云^{1,2} 刘黎平¹ 胡志群¹ 余蓉³
DU Muyun^{1,2} LIU Liping¹ HU Zhiqun¹ YU Rong³

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 武汉中心气象台,武汉,430074

3. 湖北省防雷中心,武汉,430074

1. *State Key Lab of Severe Weather Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China*

3. *Hubei Provincial Lightning Protection Center, Wuhan 430074, China*

2012-01-04 收稿,2012-12-21 改回.

杜牧云,刘黎平,胡志群,余蓉. 2013. 双线偏振多普勒雷达资料质量的定量评估. 气象学报,71(4): 754-768

Du Muyun, Liu Liping, Hu Zhiqun, Yu Rong. 2013. A quantitative evaluation of the data quality of dual linear polarimetric Doppler radar. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(4): 754-768

Abstract In this paper, based on the field observation experiment in Eryuan, Yunnan Province in 2011 by the C-band Dual-linear Polarimetric Doppler Radar on Wheel (CPDRW) which was built in the State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS), the influence of beam broadening, beam shielding, ground clutter contamination and attenuation of electromagnetic energy by hydrometeors on the quality of the radar measurement is evaluated by the radar quality-index algorithms that are able to identify and estimate the amount of contamination. The output result that ranges between zero and one is encoded on a pixel-by-pixel basis into quality-index fields. The more the quality index is close to zero, the more the radar data are influenced by each affecting factor, and vice versa. According to the quantitative evaluation results, we can directly understand the affection degree of radar data by each affecting factor and the overall quality of the data, and choose the amount of data and the level of quality used for the different requirements easily.

Key words Dual-linear polarimetric Doppler radar, Data quality analysis, Radar quality index, Quantitative evaluation

摘要 以中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的车载 C 波段双线偏振多普勒雷达 2011 年在云南洱源的外场观测资料为例,通过雷达质量指数算法将影响雷达资料质量的主要因子——波束展宽、波束遮挡、地物杂波污染、电磁波衰减等,以距离库为单元按 0—1 的取值范围量化处理,以此对雷达资料质量进行定量评估。其中,质量指数越接近 0 就表示雷达资料受各因子影响越大,质量越差;质量指数越接近于 1,表示雷达资料受各因子影响越小,质量越好。根据该定量评估结果可以直观地了解资料质量受各因子的影响程度及其整体情况,并方便根据不同的应用需要来筛选数据。

关键词 双线偏振多普勒雷达, 资料质量分析, 雷达质量指数, 定量评估

中图分类号 P412.25

1 引言

在过去的几十年里,偏振雷达资料在定量估测

降水、降水粒子相态识别、强对流天气临近预报及人工影响天气的效果检验等方面得到了大量应用并取得了丰富的成果。随着雷达资料愈加广泛的应用,

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40975013)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金重点项目(2011Z001)、“大气水凝物微物理参数及风场垂直结构多波长遥感探测和反演方法研究”和“青藏高原观测预试验与资料分析研究”。

作者简介:杜牧云,主要从事双偏振多普勒天气雷达应用研究。E-mail: Dumy1987@163.com

对其资料质量的分析和控制也就显得越发重要了。

影响雷达资料质量的因子有很多, 其中, 非气象回波(如: 地物杂波, 海浪杂波和生物杂波)的干扰和降水粒子对电磁波的衰减是两个最为主要的因子。这些因子会使雷达参量与其真实值之间产生偏差, 并直接影响与其相关的雷达产品(如: 降水估测产品)。中外研究人员在各种雷达误差的探索和订正方面已做了大量工作, 并取得了较多的研究成果。

随着各种型号雷达资料数量的逐渐增多, 资料应用方向的不断扩展, 对雷达资料质量的要求也越来越高。尽管对雷达资料质量存在的各种问题已研究出相应的识别及订正算法, 但这些算法仍存在一定的局限性——即把重心放在数据订正而不是数据评估上。而雷达资料质量评估应该是资料应用前最为重要的一环, 它直接关系到资料质量控制的处理效果。欧洲各国的气象学者在科学和技术领域进行

了广泛合作(COST Action 717), 并就如何充分利用雷达资料进行了深入探讨(Rossa, et al, 2005)。Friedrich 等(2006)根据多个欧洲气象服务部门有关雷达资料使用需求的调查结果, 利用雷达质量指数算法对影响雷达强度、速度和偏振资料质量的各主要因子按 0—1 的取值范围进行量化处理, 得到各影响因子的质量指数, 并按相应的权重系数进行加权求和得到平均质量指数, 以此来表征雷达资料质量受各因子的影响程度及其整体情况。其中, 质量指数越接近 0 就表明资料受该因子的影响程度越大, 质量越差, 质量指数越接近于 1, 表示雷达资料受各因子影响越小, 质量越好。本文在 Friedrich 等(2006)的研究基础上, 对部分质量指数算法进行了调整和修改, 并利用 C 波段双线偏振多普勒雷达的实测资料对定量评估方案进行了检验, 为该方案的深入研究和业务运行奠定了基础。

表 1 不同天气过程下进行降水估测时各影响因子的权重系数(Friedrich, et al, 2006)

Table 1 The weighting coefficient combinations for the different weather situations for precipitation estimation (Friedrich, et al, 2006)

降水估测	W_{range}	W_{shield}	W_{att}	W_{vpr}	W_{beam}	W_{rain}	W_{con}	W_{sq}	W_{np}	W_{snr}
层状云降水	1	1	[0.4, 0.6]	1	1	1	0.5	1	1	1
对流云降水	1	1	1	1	0.5	1	1	1	[0.6, 0.8]	1
混合云降水	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.8	1

2 强度资料的定量评估方案

2.1 方案介绍

导致雷达强度资料不确定性的主要影响因子为: (1)波束展宽因子(雷达质量指数: F_{range}), (2)波束阻挡因子(雷达质量指数: F_{shield}), (3)电磁波衰减因子(雷达质量指数: F_{att}), (4)垂直廓线不均匀因子

$$\bar{F}_Z = \begin{cases} 0 & F_{shield} = 0 \text{ 或 } F_{att} = 0 \\ \frac{1}{C_Z} (W_{range} F_{range} + W_{shield} F_{shield} + W_{att} F_{att} + W_{vpr} F_{vpr}) & \end{cases} \quad (1)$$

其中, $C_Z = W_{range} + W_{shield} + W_{att} + W_{vpr}$, W_{range} 、 W_{shield} 、 W_{att} 和 W_{vpr} 为各影响因子的权重系数(Friedrich, et al, 2006)。针对临近预报、资料同化和降水估测 3 个资料应用方向以及层状云降水、对流云降水和混合云降水 3 种降水类型对各影响因子的权重系数进行了相应设置(表 1)。本文针对雷达资料的降水估测做重点分析。

(雷达质量指数: F_{vpr})。

上述 4 个因子对强度资料的综合影响程度可用平均雷达质量指数—— \bar{F}_Z 来定量表示(式(1))。当雷达波束被地物完全遮挡($F_{shield} = 0$), 或雷达电磁波受降水粒子影响而存在严重衰减($F_{att} = 0$)时, 相应距离库的数据被认为是不可靠的, 其 $\bar{F}_Z = 0$ 。

2.2 波束展宽因子

随着探测距离的增大, 雷达电磁波的波束宽度在水平和垂直方向都会出现展宽现象, 波束高度也随之增大。当波束宽度超过 0℃ 层亮带的厚度时, 利用雷达探测 0℃ 层亮带将变得非常困难。而当波束高度超过降水回波的高度时, 利用雷达数据进行降水估测也将出现明显误差。雷达电磁波的超折射

效应会随着探测距离的增大而加强,从而导致降水回波的错误定位和地物杂波污染。综上所述,反射

$$F_{\text{range}} = \begin{cases} 0 & r \geq r_{\text{max}} \\ 1 & r \leq r_{\text{min}} \\ (r_{\text{max}} - r)/(r_{\text{max}} - r_{\text{min}}) & r_{\text{min}} < r < r_{\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, r_{max} 和 r_{min} 是由最大体积分辨率 V_{max} 和最大回波高度 H_{max} 得到的最大和最小探测距离 (Friedrich, et al, 2006)。表 2 为不同天气过程下进行降水估测时计算各影响因子雷达质量指数的阈

率因子 (Z_H) 的测量精度随距离的增大基本呈线性下降趋势。因此, F_{range} 的定义如下:

值。需要注意的是,表 2 中各阈值的取值是基于 C 波段双线偏振多普勒雷达的相关使用经验,对其他波长的雷达还有待做进一步的研究。

表 2 不同天气过程下进行降水估测时计算各影响因子雷达质量指数的阈值 (Friedrich, et al, 2006)

Table 2 The threshold limits for calculating each radar quality index according to the different weather situations for precipitation estimation (Friedrich, et al, 2006)

降水估测	r_{min} (km)	r_{max} (km)	K_{min} (dB)	K_{max} (dB)	g_{min} (dB/°)	g_{max} (dB/°)	e_{min} (°/km)	e_{max} (°/km)	ϵ (m/s)	S_i (dB)
层状云降水	0	80—130	1	5	0	15	0	0.5	4	15
对流云降水	0	80—130	1	3	0	20	0	1.0	8	15
混合云降水	0	80—130	1	4	0	20	0	1.0	8	15

2.3 波束阻挡因子

当地物部分甚至完全阻挡雷达电磁波的传播时,其后向散射回来的强信号会直接污染气象回波信号。当波束部分阻挡时,雷达发射电磁波的峰值功率有所减弱(功率增益样式用角度权重函数表示,见式(3)),其后向散射信号的强度也将随之减弱;而当电磁波主瓣被阻挡时,由脉冲边缘产生的后向散射信号会被误认为是主瓣的回波信号,从而产生高度误差。

$$F_{\text{shield}} = 0.5 \tanh[4 \ln 2 (\theta_0 - \theta_{GC}) / \Theta] + 0.5 \quad (3)$$

其中, θ_0 和 θ_{GC} 分别为波束主瓣轴的仰角和地物相对雷达的仰角, Θ 为 3 dB 波束宽度。在完全阻挡时, $F_{\text{shield}} = 0$; 而在完全无阻挡时,则 $F_{\text{shield}} = 1$ 。值得注意的是,当前距离库的 F_{shield} 需参考同一径向前一个距离库的 F_{shield} (记为 F'_{shield})。若 $F_{\text{shield}} > F'_{\text{shield}}$, 则取 $F_{\text{shield}} = F'_{\text{shield}}$ 。关于地物回波信号更加准确的评估可参考 Delrieu 等 (1995)。

2.4 电磁波衰减因子

降水粒子对雷达电磁波的吸收和散射作用使其对电磁波能量具有衰减效应,其衰减大小主要取决于电磁波的波长 λ 。S 波段(波长约 10 cm)雷达衰减作用相对较小,实际应用中常忽略不计。但对于 C、X 波段(波长约 5.3 cm)雷达,电磁波的衰减严重影响了强度资料的应用。衰减作用会沿着径向方向

逐渐累积,常在强对流单体或 0°C 层亮带后存在明显衰减。

水和冰对电磁波的衰减作用不同,在计算衰减量时需要区别对待。由于霰、冰雹等固态粒子对电磁波的衰减主要取决于外包水膜的厚度,因此,很难定量计算。为了方便分析,假设在 0°C 层以上,电磁波的衰减主要由冰雪粒子引起,而在 0°C 层以下则以液态降水粒子为主。雨和雪的单程衰减 K_r 和 K_s 见经验公式(4)和(5) (Dovick, et al, 1992)。

$$K_r = 2 \times 10^{-5} e^{0.17z} \quad (4)$$

$$K_s = 3.5 \times 10^{-2} R^2 / \lambda^4 + 2.2 \times 10^{-3} R / \lambda \quad (5)$$

其中,雨强 R 利用 $Z-R$ 关系 ($Z = 256R^{1.42}$) (Aniol, et al, 1980) 计算。在双程衰减情况下, F_{att} 的定义为

$$F_{\text{att}} = \begin{cases} 1 & K_{r,s} < K_{\text{min}} \\ 0 & K_{r,s} > K_{\text{max}} \\ (K_{\text{max}} - K_{r,s}) / (K_{\text{max}} - K_{\text{min}}) & K_{\text{min}} \leq K_{r,s} \leq K_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_{max} 和 K_{min} 为衰减量的最大和最小阈值(表 2)。信号衰减越严重, F_{att} 越接近 0, 反之则越接近 1。

2.5 垂直廓线不均匀因子

受水凝物的增长效应(凝结、凝聚、蒸发等),相态变化(冰、水、融化中的雪等),下落速度及反射率因子 Z_H 正比于粒子尺寸的 6 次方等因素的影响,

Z_H 的垂直廓线表现出明显的时空变化性。为了便于分析,在计算 F_{vpr} 时做如下假设:当雷达有效照射体积完全低于融化层高度时, Z_H 主要来自液态降水粒子,其 $F_{\text{vpr}} = 1$;而融化层以上存在雪、冰雹、霰等

$$F_{\text{vpr}} = \begin{cases} (h_{+3\text{dB}} - h_{\text{FL}+200\text{m}})/2(h_{+3\text{dB}} - h_{-3\text{dB}}) & h_{-3\text{dB}} < h_{\text{FL}+200\text{m}}, h_{+3\text{dB}} > h_{\text{FL}+200\text{m}}, h_{-3\text{dB}} > h_{\text{FL}-500\text{m}} \\ 0.5 & h_{-3\text{dB}} \geq h_{\text{FL}+200\text{m}} \\ 1 & h_{+3\text{dB}} \leq h_{\text{FL}-500\text{m}} \\ 0 & h_{-3\text{dB}} > h_{\text{FL}-500\text{m}} \text{ 且 } h_{+3\text{dB}} < h_{\text{FL}+200\text{m}} \\ (h_{-3\text{dB}} - h_{\text{FL}-500\text{m}})/(h_{-3\text{dB}} - h_{+3\text{dB}}) & h_{-3\text{dB}} < h_{\text{FL}-500\text{m}} \text{ 且 } h_{+3\text{dB}} > h_{\text{FL}-500\text{m}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $h_{-3\text{dB}}$ 和 $h_{+3\text{dB}}$ 为 3 dB 波束的下限和上限高度,而 $h_{\text{FL}-500\text{m}}$ 和 $h_{\text{FL}+200\text{m}}$ 为融化层的下限和上限高度。

3 速度资料的定量评估方案

3.1 方案介绍

雷达波束的展览会增大空间分辨率,从而导致小尺度的风场信息(如:垂直风切变区域)被过度平滑。波束阻挡、雷达相位的测量精度及非气象目标物(如:飞鸟、轮船、飞机等)干扰也与速度资料质量密切相关。因此,影响速度资料质量的主要因子可

$$\bar{F}_V = \begin{cases} 0 & F_{\text{shield}} = 0 \\ \frac{1}{C_V} (W_{\text{range}} F_{\text{range}} + W_{\text{shield}} F_{\text{shield}} + W_{\sigma_v} F_{\sigma_v} + W_{\text{np}} F_{\text{np}}) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C_V = W_{\text{range}} + W_{\text{shield}} + W_{\sigma_v} + W_{\text{np}}$, W_{range} 、 W_{shield} 、 W_{σ_v} 和 W_{np} 分别为各影响因子的权重系数(表 1)。

3.2 多普勒速度标准差因子

速度谱宽(S_w)是速度离散程度的度量,它与距离库内各目标物的运动速度和方向的差异性成正比,可用来检验径向速度的可靠性。影响 S_w 的主要气象因素为风切变和湍流。当风切变和湍流较强时, S_w 会随之增大,反之亦然。层状云降水的风场相对均匀, S_w 相对较小;而对流云降水内部的上升和下沉气流使其存在明显的风切变和湍流, S_w 也因为雷达分辨体积内多普勒速度的高度变化而变大。 F_{σ_v} 的定义见式(9), v_{nv} 为奈奎斯特速度间隔。

$$F_{\sigma_v} = 1 - |S_w/v_{\text{nv}}| \quad (9)$$

3.3 非气象目标物污染因子

通常情况下,降水粒子或昆虫会随气流的流动而运动,因此,其后向散射回波的速度值能代表客观风场速度。而移动的非气象目标物(如:飞鸟、轮船、飞机等)则会干扰多普勒速度的测量。通过速度-方

粒子,其 $F_{\text{vpr}} = 0.5$;当雷达波束横穿融化层时,其 F_{vpr} 值取决于它们之间交叉区域的大小(见式(7))。其中,融化层厚度设为 0°C 层以下 500 m 至 0°C 层以上 200 m(Doviak, et al, 1992)。

归结为:

- (1) 波束展宽因子(雷达质量指数: F_{range});
- (2) 波束阻挡因子(雷达质量指数: F_{shield});
- (3) 多普勒速度标准差因子(雷达质量指数: F_{σ_v});
- (4) 非气象目标物污染因子(雷达质量指数: F_{np})。

基于上述 4 个影响因子的速度资料平均雷达质量指数—— \bar{F}_V 见式(8)。若雷达波束被地物完全遮挡($F_{\text{shield}} = 0$),则 $\bar{F}_V = 0$ 。

向(VAD, Velocity Azimuth Display)资料分析,可以检测出非气象目标物及速度退模糊错误。为了方便计算,此处将降水粒子下落末速度的不一致、反射率因子的分布形式及雷达扫描仰角的变化等影响因素忽略不计。

对于固定的距离和仰角,雷达扫描一周的多普勒速度呈正弦形波动

$$v_r(\alpha) = C_0 + C_1 \sin\alpha + C_2 \cos\alpha + C_3 \sin(2\alpha) + C_4 \cos(2\alpha) \quad (10)$$

其中, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 为拟合系数, α 为方位角。若多普勒速度在 VAD 拟合速度范围内,其 $F_{\text{np}} = 1$;反之则被视为非气象目标物,其 $F_{\text{np}} = 0$ 。

$$F_{\text{np}} = \begin{cases} 1 & v_r^*(\alpha) - \epsilon \leq v_r(\alpha) \leq v_r^*(\alpha) + \epsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, ϵ 为速度测量值与拟合值之间的方差(表 2)。对于层状云降水, $\epsilon = v_{\text{nv}}/4$;而对流云降水存在更强的湍流风场,则 $\epsilon = v_{\text{nv}}/2$ 。

4 偏振资料的定量评估方案

4.1 方案介绍

偏振雷达在定量降水估测、降水粒子相态识别、云微物理机制研究及人工影响天气效果检测等方面表现出的巨大潜力,使其成为未来天气雷达发展的一个重要方向。偏振雷达的上述优势都是以较高质量的偏振资料为前提,若资料质量较差,降水估测产品将会出现较大误差(Seliga, et al, 1976)。地物杂波污染会导致降水强度(量)的高估,波束阻挡会使测量值出现高度偏差,而对于非球形降水粒子,水平和垂直偏振波的衰减差异还会导致 Z_{DR} 产生差分衰减(Gorgucci, et al, 1998)。除此以外,偏振资料质量还受其他因素的影响,其主要影响因子为

(1)波束展宽因子(雷达质量指数: F_{range});

$$\bar{F}_P = \begin{cases} 0 & F_{shield} = 0 \text{ 或 } F_{att} = 0 \\ 0 & F_{rain} = 0, W_{rain} \neq 0, W_{con} \neq 0 \\ \frac{1}{C_P} (W_{range} F_{range} + W_{shield} F_{shield} + W_{att} F_{att} + W_{beam} F_{beam} + W_{rain} F_{rain} + W_{con} F_{con} + W_{snr} F_{snr}) & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $C_P = W_{range} + W_{shield} + W_{att} + W_{beam} + W_{rain} + W_{con} + W_{snr}$, W_{range} 、 W_{shield} 、 W_{att} 、 W_{beam} 、 W_{rain} 、 W_{con} 和 W_{snr} 为各影响因子的权重系数(见表1)。

4.2 波束充塞不均匀因子

当降水粒子在雷达分辨体积内均匀充塞,且无交叉波束的反射率梯度时,可以得到较高精度的偏振参量(如: Z_{DR} 和 K_{DP})。否则,两个波束形状上的微小差异都将使测量值产生巨大误差(Chandrasekar, et al, 1993),且大的反射率梯度还会得到负的 K_{DP} 值(Ryzhkov, et al, 1998),这显然与降水粒子 $K_{DP} > 0$ 的理论相违背。 F_{beam} 的定义为

$$F_{beam} = \begin{cases} 1 & g < g_{min} \\ 0 & g > g_{max} \\ (g_{max} - g)/(g_{max} - g_{min}) & g_{min} \leq g \leq g_{max} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $g = |Z_{y_2}^{y_1} - Z_{y_1}^{y_2}| + |Z_{x_1}^{y_1} - Z_{x_2}^{y_1}|$, y_2 和 y_1 代表上下两个仰角的资料, x_2 和 x_1 则代表左右相邻距离库的资料,而 g_{max} 和 g_{min} 为交叉波束的最大和最小反射率梯度(表2)。通常情况下,反射率梯度大于沿 0° 层亮带或对流单体边缘的反射率梯度,小于雷达天线辐射功率图中主瓣与旁瓣之间的梯度值。目前,在交叉波束梯度方面的研究还有限,其对偏振资料的具体影响程度仍不明确。

(2)波束阻挡因子(雷达质量指数: F_{shield});

(3)电磁波衰减因子(雷达质量指数: F_{att});

(4)波束充塞不均匀因子(雷达质量指数: F_{beam});

(5)非降水回波污染因子(雷达质量指数: F_{rain});

(6) Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 资料一致性因子(雷达质量指数: F_{con});

(7)信噪比影响因子(雷达质量指数: F_{snr})。

上述7个因子对偏振资料的综合影响程度可由平均雷达质量指数—— \bar{F}_P 来度量,见式(12)。若雷达波束被地物完全遮挡($F_{shield} = 0$)或雷达电磁波存在严重衰减($F_{att} = 0$),则 $\bar{F}_P = 0$;由于非降水区($F_{rain} = 0$)的不确定性较大,其 $\bar{F}_P = 0$ 。

4.3 非降水回波污染因子

目前,模糊逻辑法是利用偏振雷达资料识别降水粒子相态的主要方法(还有统计决策树法、神经网络法等)。Straka 等(1993)在 Aydin 等(1989)研究基础上利用变化的一维和二维隶属函数来描述各种偏振参量,为后续利用模糊逻辑法进行降水粒子相态识别奠定了基础。Liu 等(2000)通过雷达实测数据与地面观测资料给出了一维隶属函数的一系列参数值,建立了一种调整模糊逻辑法系数的反馈方案。美国 NSSL 的 KOUN 雷达利用探测到的4种参数(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 $\rho_{HV}(0)$)建立了3种识别模式(非气象回波识别模式、夏季识别模式和冬季识别模式),并在2002—2003年的外场试验中取得了较好的识别效果(Ryzhkov, et al, 2003)。曹俊武等(2007)综合分析了中外降水粒子相态识别方法,并结合中国双线偏振雷达的应用需求,构建了一种降水粒子类型的识别模式。由于本文所用的雷达资料均来自夏季降水过程,因此,选用 KOUN 雷达的夏季识别模式对降水与非降水回波进行辨别。若识别为降水回波,其 $F_{rain} = 1$,反之,则 $F_{rain} = 0$ 。

4.4 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 资料一致性因子

Goddard 等(1994)提出了 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 资料一致性的检测方法。Scarchilli 等(1996)通过分析

这3个参量的一致性来检测雷达系统对降水的探测性能,即利用 Z_H 和 Z_{DR} 得到降水的滴谱分布,然后根据滴谱分布估计 K_{DP} 值(记为: \hat{K}_{DP}),若 \hat{K}_{DP} 与 K_{DP} 测量值相吻合,则表明 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 资料是一致的。Gorgucci等(1998)提出了另一种检测方法:利用 Z_H 和 Z_{DR} 得到降水粒子对雷达信号的衰减量(记为 α_H);与此同时,利用 K_{DP} 估测信号的衰减量(记为 α_H^*),若 α_H 与 α_H^* 吻合,则认为 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 测量值一致。其中, \hat{K}_{DP} 与 K_{DP} 及 α_H 与 α_H^* 的差异主要来自雷达标定误差和对散射特性及滴谱分布的错误假设(Gorgucci, et al, 1998)。需要特别注意的是:资料一致性的检测仅仅适用于降雨资料,对其他类型的粒子无效。若存在强烈衰减,Gorgucci等(1998)的方法同样不适用。 F_{con} 的定义为

$$F_{con} = \begin{cases} 1 & e < e_{min} \\ 0 & e > e_{max} \\ (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min}) & e_{min} \leq e \leq e_{max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $e = |\hat{K}_{DP} - K_{DP}|$, e_{max} 和 e_{min} 为 K_{DP} 测量值与估测值的最大和最小偏差(表2)。

4.5 信噪比影响因子

受噪声的影响,弱信号的差分反射率因子 Z_{DR} 往往会出现较大偏差(Bringi, et al, 2001)。Liu等(2010)在分析C波段双线偏振多普勒雷达资料质量时发现,信噪比偏低时,噪声对差分反射率因子 Z_{DR} 和零滞后互相关系数 $\rho_{HV}(0)$ 的影响明显。杜牧云等(2011)对升级改造的C波段双线偏振多普勒雷达进行资料分析时同样发现信噪比偏低时, Z_{DR} 受噪声影响存在测量误差,数值明显偏小; $\rho_{HV}(0)$ 也远

小于理论值(一般大于0.9),且都随信噪比的降低呈减小趋势。当信噪比增大后, Z_{DR} 的分布趋于稳定, $\rho_{HV}(0)$ 也随之增大并迅速向1靠拢(图略)。上述结论说明,当信噪比偏低时探测资料整体质量较差,回波信号淹没在噪声之中,数据变得不可信。因此,在Friedrich等(2006)研究的基础上,本研究在偏振资料质量的定量评估中引入了信噪比影响因子—— F_{snr}

$$F_{snr} = \begin{cases} 0 & S < S_t \\ 1 & \end{cases} \quad (15)$$

式中, S_t 为信噪比阈值(见表2)。杜牧云等(2011)对大量C波段双线偏振多普勒雷达实测资料进行质量分析后发现,当信噪比小于15 dB时, Z_{DR} 受噪声影响很大,测量值出现很大误差,数值明显偏小, $\rho_{HV}(0)$ 也基本小于0.7,甚至出现小于0.5的极小值;随着信噪比增大, Z_{DR} 的分布趋于平稳, $\rho_{HV}(0)$ 也迅速增大,基本都大于0.9。因此,本文取 $S_t = 15$ dB。

5 个例分析

图1为2011年8月13日10时54分(北京时,下同)晴空模式下反射率因子 Z_H 和径向速度 V_r 的PPI(Plan Position Indicator),观测仰角为 0.8° 。为避免弱回波信号干扰,图中资料已经过孤立杂波剔除和弱信号抑制等预处理。其中,雷达在外场试验前已用外部信号源标定,且每次开机观测前都用机内曲线进行了重新标定。

由图1可以清楚地看到,在雷达的观测范围内存在大面积的地物回波,其中,强度最强的两块地物回波位于距离雷达较近的北部和南部(图1a箭头标注区域),其他地物回波的强度相对较弱或距离雷达

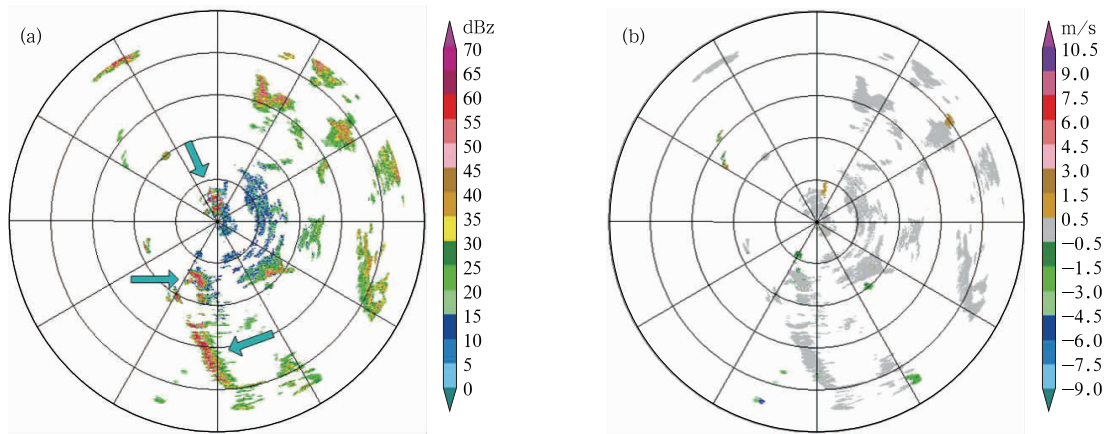


图1 2011年8月13日10时54分 0.8° 仰角 Z_H (a)和 V_r (b)的PPI

Fig. 1 PPI images of Z_H (a), V_r (b) at 10:54 BT 13 August 2011 at the 0.8° elevation angle

较远,且主要分布在 PPI 的第一、二象限。

5.1 层状云降水过程分析

2011年8月15日C波段双线偏振多普勒雷达观测到1次大范围的层状云降水过程,该过程的平均回波强度在35 dBz左右,持续时间在10 h以上。

5.1.1 强度资料定量评估结果分析

图2为18时01分 0.9° 仰角雷达强度资料的 Z_H 、 \bar{F}_Z 、 F_{range} 、 F_{shield} 、 F_{att} 和 F_{vpr} 的PPI。其中,取 $r_{max} = 120$ km,而 F_{shield} 由中国地理信息数据计算得到(下同)。由于C波段双线偏振多普勒雷达在外场观测试验中位置固定,因此, F_{range} 和 F_{shield} 仅需计算一次。

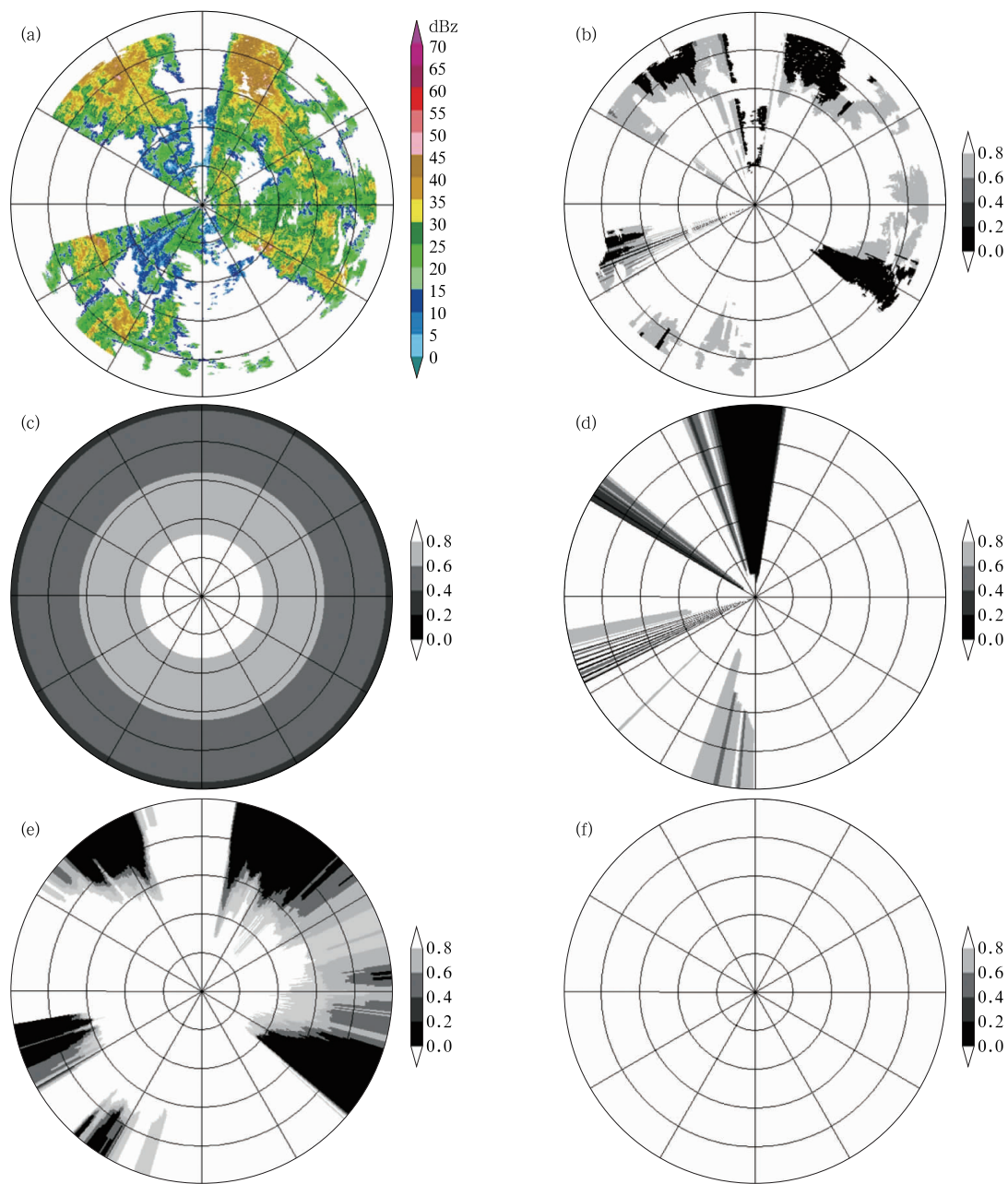


图2 2011年8月15日18时01分 0.9° 仰角强度资料及其各雷达质量指数的PPI

(a. Z_H , b. \bar{F}_Z , c. F_{range} , d. F_{shield} , e. F_{att} , f. F_{vpr})

Fig. 2 PPI images of (a) Z_H , (b) \bar{F}_Z , (c) F_{range} , (d) F_{shield} , (e) F_{att} , and (f) F_{vpr}

at 18:01 BT 15 August 2011 at the 0.9° elevation angle

由 F_{range} (图 2c) 可以看到, 随着探测距离的增大 (即逐渐远离雷达), F_{range} 越来越小, 这表明雷达波束随距离的增大而逐渐展宽, 对雷达资料质量的影响程度也逐渐增大。由 F_{shield} (图 2d) 看到, 在雷达的北部和西北部存在明显的波束阻挡现象 ($F_{\text{shield}} < 0.2$), 而在雷达的西南部和南部也存在波束的部分阻挡 ($0.8 > F_{\text{shield}} > 0.2$)。上述波束阻挡情况与图 1 中主要地物回波的分布位置完全吻合。值得注意的是, 在雷达的整个东部区域并未出现明显的波束阻挡, 而在图 1 中却探测到了多块地物回波, 这很可能是雷达电磁波在该区域发生超折射而出现的超折射地物回波 (AP)。从 F_{att} (图 2e) 看到, 几块强降雨回波后面都存在强烈的电磁波衰减 ($F_{\text{att}} < 0.4$)。而在 0.9° 的观测仰角下, 其最大探测距离 75 km 对应的高度约为 1.6 km, 远低于 0°C 层的高度 (当天的探空资料测得 0°C 层高度约为 5.1 km), 因此, 强度资料 (图 2a) 不受 0°C 层亮带的影响, 在所有距离库中的 $F_{\text{vpr}} = 1$ (图 2f)。由 \bar{F}_z (图 2b) 可知, 高质量的强度资料 ($\bar{F}_z > 0.8$) 主要分布在距离雷达较近的 45 km 范围内, 这一区域内无明显的波束阻挡和电磁波衰减; 具有较大不确定性的强度资料 ($\bar{F} < 0.2$) 则主要分布在电磁波存在较大衰减的雷达东南部、西南部、东北偏北部和西北偏西部。

5.1.2 速度资料定量评估结果分析

图 3 为 18 时 01 分 0.9° 仰角雷达速度资料的 V_r 、 S_w 、 \bar{F}_v 、 F_{σ_v} 和 F_{np} 的 PPI 及多普勒速度的 VAD 分析。

由速度谱宽 (S_w , 图 3c) 可以看到, S_w 基本都小于 3 m/s, 且大部分都在 2 m/s 以下。因此, 其 F_{σ_v} (图 3d) 除了少量谱宽值较大的散点 (主要分布在雷达东北方向 50 km 及西北方向 60 km 附近) 以外, 基本都大于 0.8。对多普勒速度进行 VAD 分析 (图 3e) 后发现, 大部分的速度值都在对应的 VAD 拟合速度阈值范围内 ($F_{\text{np}} = 1$), 只有少量数据点位于阈值范围以外 ($F_{\text{np}} = 0$)。从 F_{np} (图 3f) 可以看出, 在雷达的远端探测到了少量非气象目标物。为了便于观察和分析, 以 10 m/s 为间隔将各距离圈的速度数据绘制在同一张图上 (图 3e)。其中, 细实线为 42—42.75 km 距离范围内沿整个圆周扫描得到的多普勒速度测量值 ($v_r(\alpha)$), 虚线为通过 VAD 分析拟合得到的正弦曲线 ($v_r^*(\alpha)$), 粗实线则表示多普勒速

度的阈值范围 ($v_r^*(\alpha) \pm \epsilon$), 取 $\epsilon = 4$ m/s (见表 2)。由 \bar{F}_v (图 3b) 可知, 除了波束存在部分阻挡的雷达西北、西南部及雷达远端探测到的少量非气象目标物以外, 速度资料 (图 3a) 整体质量较高 ($\bar{F}_v > 0.6$), 且大部分资料的 $\bar{F}_v > 0.8$ 。

5.1.3 偏振资料定量评估结果分析

图 4 为 18 时 01 分 0.9° 仰角雷达偏振资料的 Z_{DR} 、 Φ_{DP} 、 $\rho_{\text{HV}}(0)$ 及 \bar{F}_p 、 F_{beam} 、 F_{rain} 、 F_{con} 和 F_{snr} 的 PPI。

由 F_{beam} (图 4e) 可以清楚地看到, F_{beam} 的低值区 ($F_{\text{beam}} < 0.4$) 主要分布在降水回波的边缘及雷达远端区域。距离观测点约 85 km 的丽江站当天的探空资料测得 0°C 层高度约为 5.1 km, 而在 0.9° 的观测仰角下, 雷达最大观测距离 75 km 对应的高度约为 1.6 km, 远远低于 0°C 层的高度, 因此, 整个雷达探测范围内的水凝物都被认为是液态降水粒子。由 F_{rain} (图 4f) 看到, 利用模糊逻辑法建立的降水粒子相态识别模式成功地识别出了降水回波 ($F_{\text{rain}} = 1$), 其余离散的非降水回波则主要分布在距离雷达较远的区域和降水回波的边缘。而从 F_{con} (图 4g) 和 F_{snr} (图 4h) 发现, 上述区域正是 Z_{H} 、 Z_{DR} 和 Z_{DP} 资料一致性较差 ($F_{\text{con}} < 0.4$) 和信号较弱 ($F_{\text{snr}} < 0.6$) 的区域。在这些区域里, 信噪比较低, 偏振参量的测量受噪声影响较大, 存在明显的误差, 从而导致资料一致性变差并被相态识别模式误判为非降水回波。由 \bar{F}_p (图 4d) 可知, 除了距离雷达较远的, 存在明显波束阻挡的雷达西南偏西部和电磁波严重衰减的雷达东南部、东北偏北部、西北部及西南偏西部以外, 偏振资料整体质量较好 ($\bar{F}_p > 0.6$), 且大部分资料的 $\bar{F}_p > 0.8$ 。

5.2 对流云降水过程分析

2011 年 8 月 22 日 C 波段双线偏振多普勒雷达观测到一次局地的对流云降水过程。其中, 对流单体出现在距离雷达约 60 km 的东北及西南方向, 最大回波强度达到了 61 dBz。雷达的西北及东部也出现了平均强度低于 30 dBz 的小面积层状云降水。由于分析与计算方法与 5.1 节类似, 下面仅对各种资料的定量评估结果做简要分析。

5.2.1 强度资料定量评估结果分析

图 5 为 18 时 26 分 1.0° 仰角雷达强度资料的 Z_{H} 、 \bar{F}_z 、 F_{att} 和 F_{vpr} 的 PPI。其中, F_{range} 和 F_{shield} 同图 2c、d。

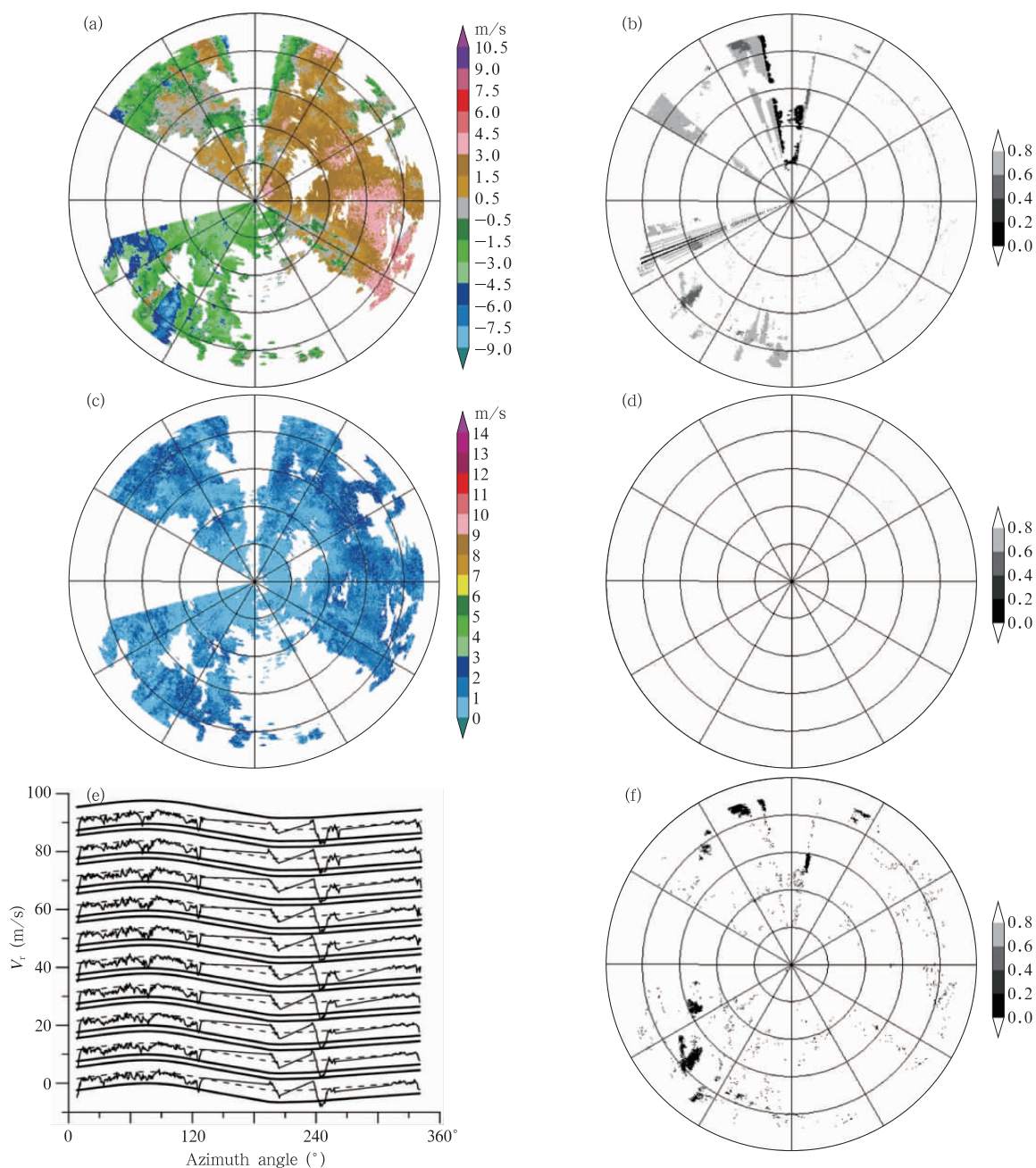


图3 2011年8月15日18时01分 0.9° 仰角速度资料及其各雷达质量指数的PPI和VAD分析

(a. V_r , b. \bar{F}_V , c. S_w , d. F_q , e. VAD, f. F_{np})

Fig. 3 PPI images of (a) V_r , (b) \bar{F}_V , (c) S_w , (d) F_q , and (f) F_{np}

at 18:01 BT 15 August 2011 at the 0.9° elevation angle and (e) VAD of the Doppler velocity along the 360° azimuth angle (thin-solid lines) together with the fitted sine curve (thick-dashed lines)

由 F_{att} (图 5c) 看到, 强的电磁波衰减 ($F_{att} < 0.2$) 主要出现在雷达东北及西南方向的对流单体处, 而强度相对较弱 ($Z_H < 30$ dBz) 的层状云降水产生的衰减较小 ($F_{att} > 0.8$), 基本可以忽略。在 1.0°

的观测仰角下, 雷达最大探测距离 75 km 对应的高度约为 1.6 km, 远低于 0°C 层的高度 (当天的探空资料测得 0°C 层高度约为 5.0 km)。因此, 该降水过程的强度资料 (图 5a) 同样不受 0°C 层亮带的影

响, 所有距离库的 $F_{\text{vpr}} = 1$ (图 5d)。由 \bar{F}_Z (图 5b) 可知, 整体而言, 除了受电磁波衰减影响明显的两块对流单体回波以外, 其他区域的强度资料质量都较好 ($\bar{F}_Z > 0.8$)。

5.2.2 速度资料定量评估结果分析

图 6 为 18 时 26 分 1.0° 仰角雷达速度资料的 V_r 、 S_w 、 \bar{F}_V 、 F_{σ_v} 和 F_{mp} 的 PPI 及多普勒速度的 VAD 分析。

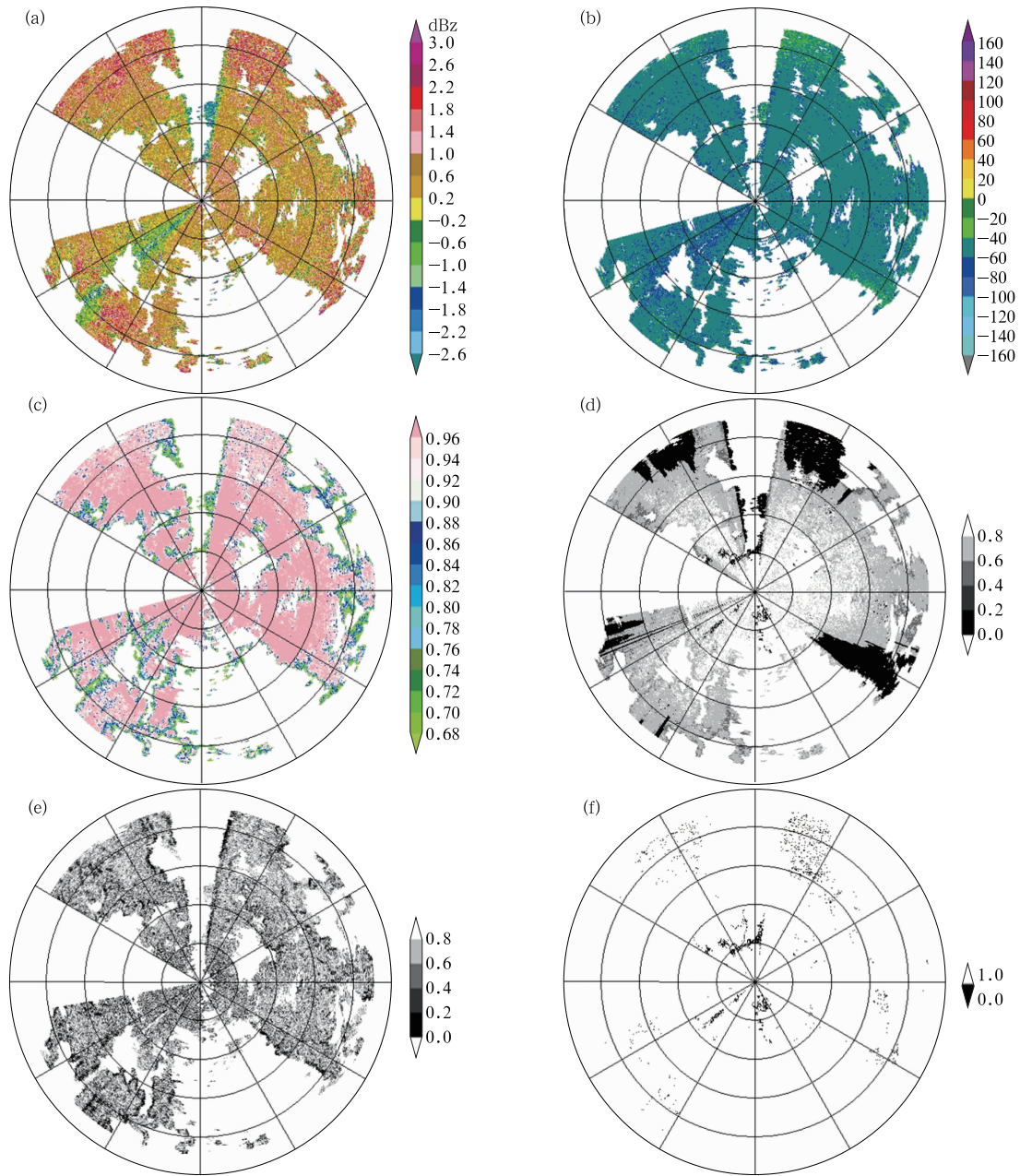
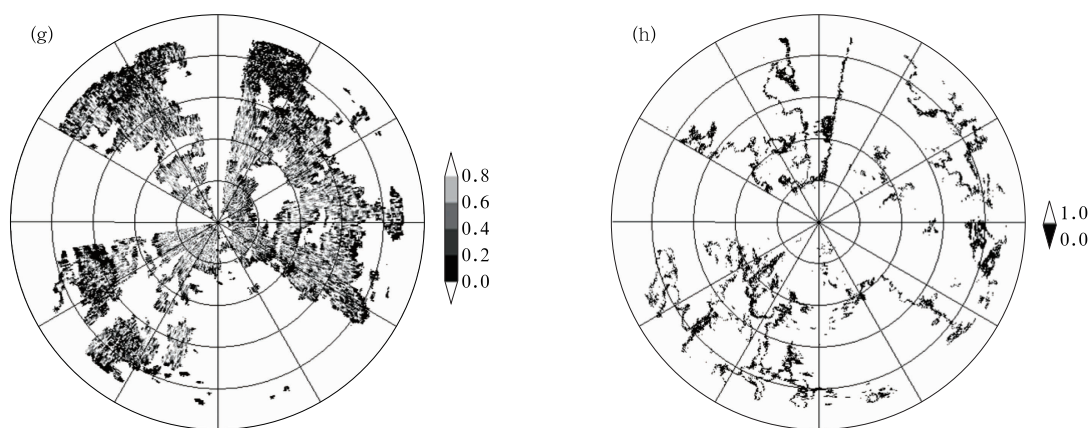


图 4 2011 年 8 月 15 日 18 时 01 分 0.9° 仰角偏振资料及其雷达质量指数的 PPI

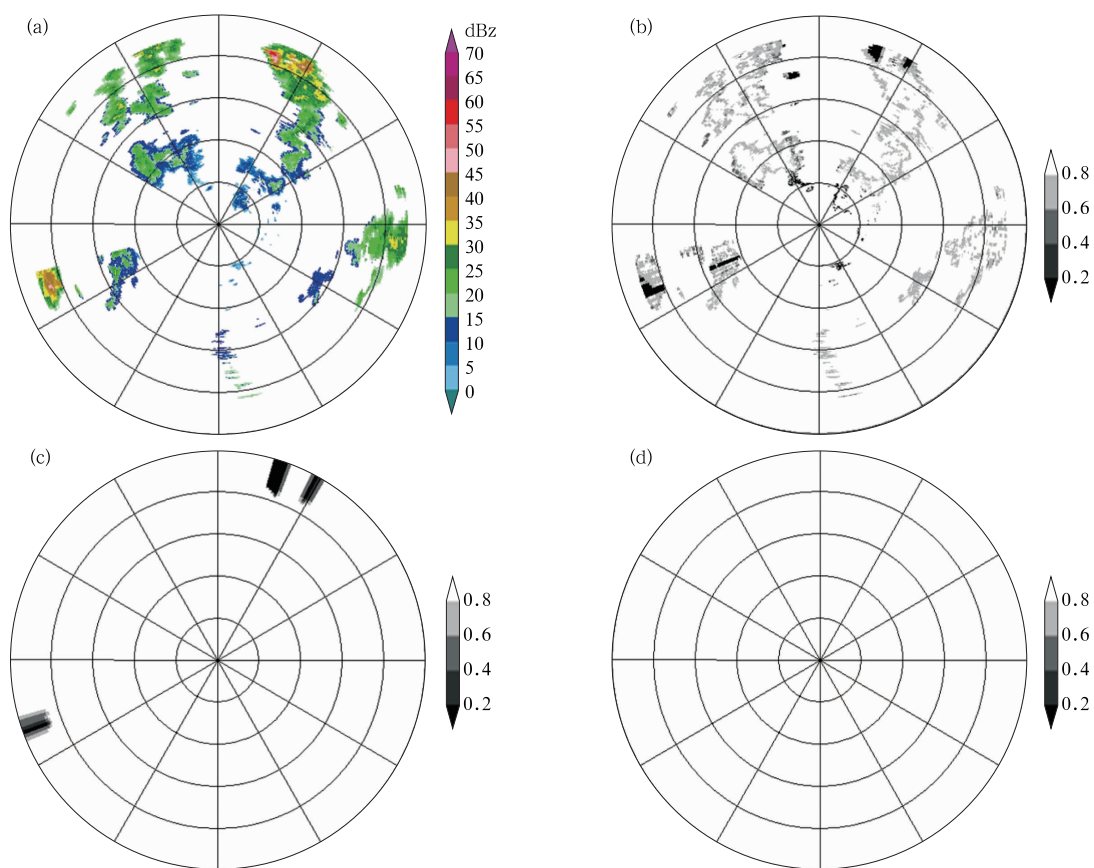
(a) Z_{DR} , (b) Φ_{DP} , (c) $\rho_{\text{HV}}(0)$, (d) \bar{F}_P , (e) F_{beam} , (f) F_{rain} , (g) F_{con} , (h) F_{snr}

Fig. 4 PPI images of (a) Z_{DR} , (b) Φ_{DP} , (c) $\rho_{\text{HV}}(0)$, (d) \bar{F}_P , (e) F_{beam} , (f) F_{rain} , (g) F_{con} , and (h) F_{snr} at 18:01 BT 15 August 2011 at the 0.9° elevation angle



续图 4

Fig. 4 (Continued)

图 5 2011 年 8 月 22 日 18 时 26 分 1.0° 仰角强度资料及其各雷达质量指数的 PPI(a. Z_H , b. \bar{F}_Z , c. F_{att} , d. F_{vpr})Fig. 5 PPI images of (a) Z_H , (b) \bar{F}_Z , (c) F_{att} , and (d) F_{vpr} at 18:26 BT 22 August 2011 at the 1.0° elevation angle

由速度谱宽 S_w (图 6c) 看到, 除了对流单体回波的 S_w 相对较大外, 其他区域的 S_w 都小于 2 m/s。因此, 其 F_{σ_v} (图 6d) 基本上均大于 0.8。从 F_{np} (图 6f) 可以看出, 仅探测到了少量的非气象目标物 ($F_{np} = 0$)。图 6e 为距离雷达 40—40.5 km 范围内沿整个圆周扫

描得到的多普勒速度 VAD 分析结果, 此处取 $\epsilon = 8$ m/s (见表 2)。由 \bar{F}_V (图 6b) 可知, 除了波束存在部分阻挡的区域及探测到的少量非气象目标物以外, 速度资料 (图 6a) 的整体质量较高, 其 $\bar{F}_V > 0.8$ 。

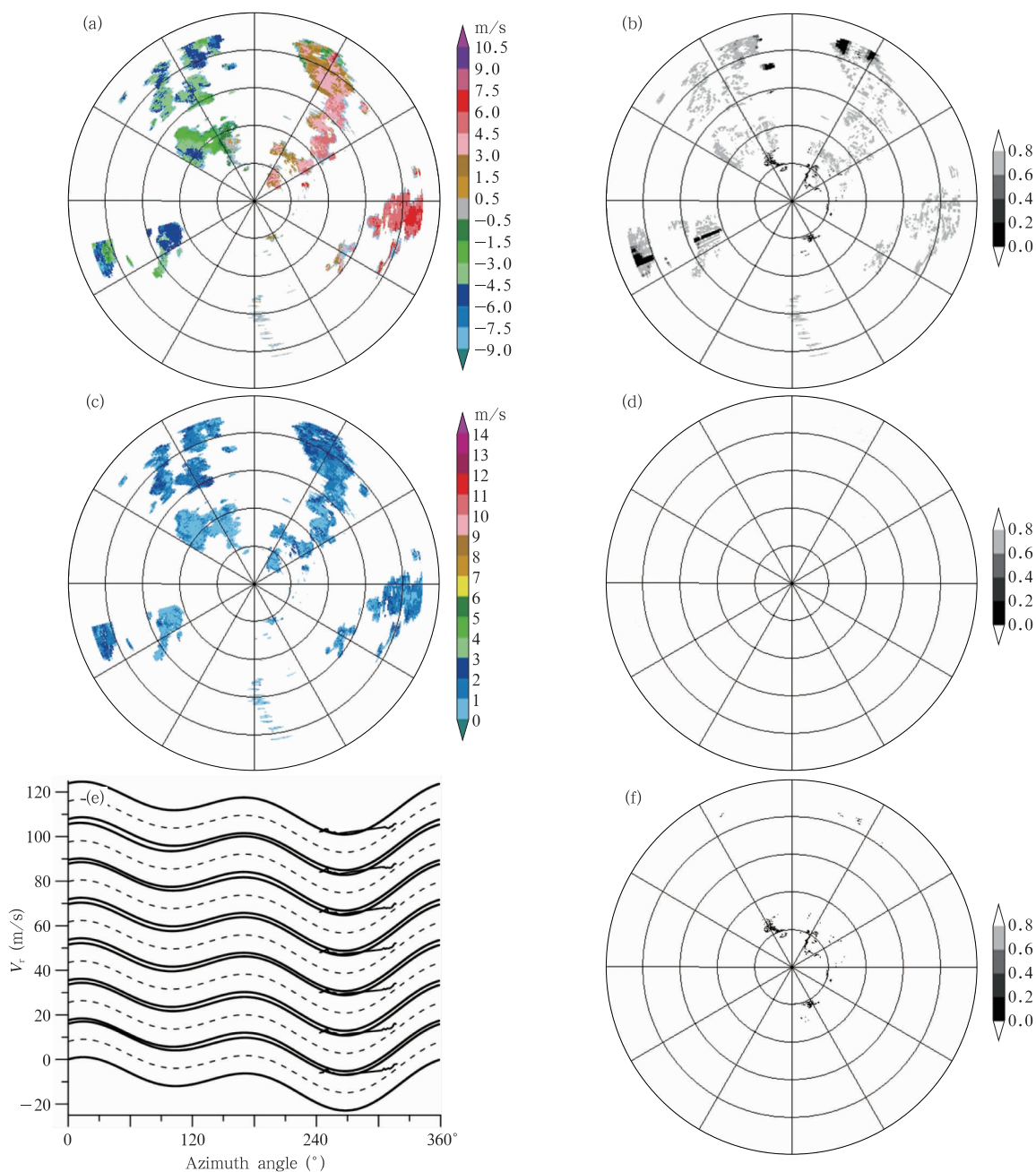


图6 2011年8月22日18时26分1.0°仰角速度资料及其各雷达质量指数的PPI和VAD分析

(a. V_r , b. \bar{F}_V , c. S_w , d. F_{σ_v} , e. VAD, f. F_{np})

Fig. 6 PPI images of (a) V_r , (b) \bar{F}_V , (c) S_w , (d) F_{σ_v} , and (f) F_{np}

at 18:26 BT 22 August 2011 at the 1.0° elevation angle

and (e) VAD of the Doppler velocity along the 360° azimuth angle

5.2.3 偏振资料定量评估结果分析

图7为18时26分1.0°仰角偏振资料的 Z_{DR} 、 Φ_{DP} 、 $\rho_{HV}(0)$ 及 \bar{F}_P 、 F_{beam} 、 F_{rain} 、 F_{con} 和 F_{Snr} 的PPI。

由图7可以清楚地看到, F_{beam} (图7e)的低值区

($F_{beam} < 0.6$)主要分布在降水回波的边缘及对流单体处。由于探测资料的高度远低于0°C层高度,在此认为雷达探测范围内的水凝物以液态降水粒子为主(同5.1.3节)。从图7f看出,降水粒子相态识别

模式探测出少许离散的非降水回波 ($F_{\text{rain}} = 0$), 且主要分布在雷达远端和降水回波边缘。而在这些区域, 由于信噪比(图 7h)偏低 ($F_{\text{snr}} < 0.6$), 噪声严重影响了偏振参量的测量, 使其存在明显的误差, 从而导致 Z_{H} 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 资料一致性(图 7g)变差 ($F_{\text{con}} <$

0.4) 并被相态识别模式误判为非降水回波。由 \bar{F}_{P} (图 7d) 可知, 除了距离雷达较远且电磁波存在严重衰减的对流单体区域以外, 偏振资料的整体质量较好 ($\bar{F}_{\text{P}} > 0.6$), 且大部分资料的 $\bar{F}_{\text{P}} > 0.8$ 。

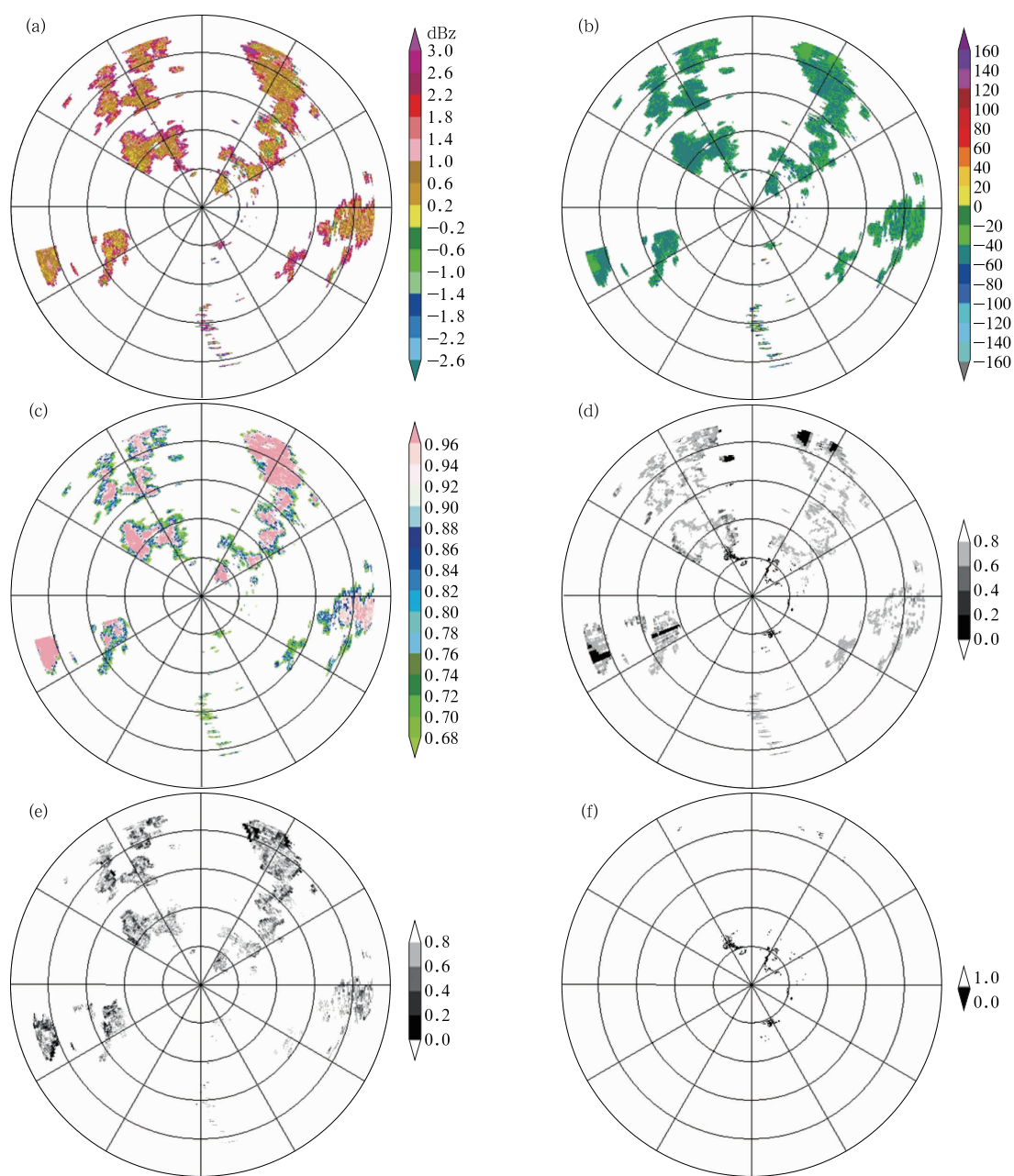
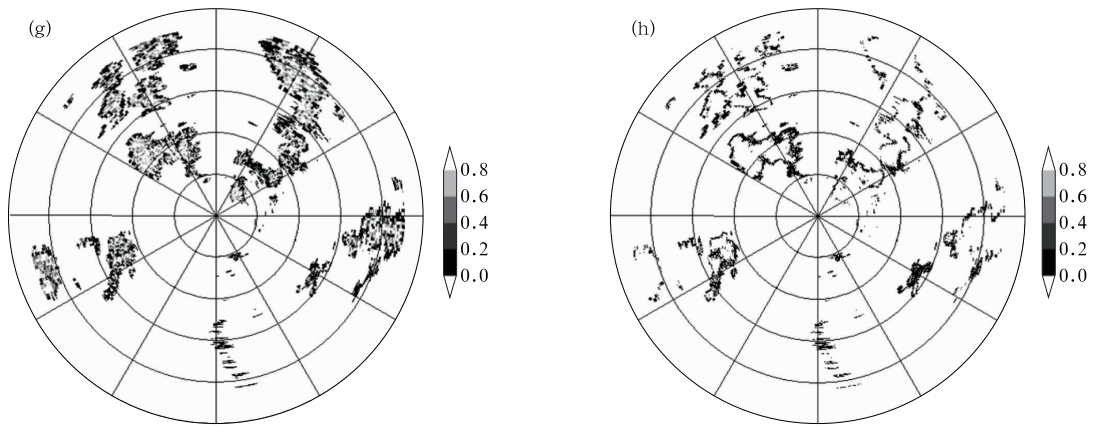


图 7 2011 年 8 月 22 日 18 时 26 分 1.0° 仰角偏振资料及其各雷达质量指数的 PPI

(a. Z_{DR} , b. Φ_{DP} , c. $\rho_{\text{HV}}(0)$, d. \bar{F}_{P} , e. F_{beam} , f. F_{rain} , g. F_{con} , h. F_{snr})

Fig. 7 PPI images of (a) Z_{DR} , (b) Φ_{DP} , (c) $\rho_{\text{HV}}(0)$, (d) \bar{F}_{P} , (e) F_{beam} , (f) F_{rain} , (g) F_{con} , and (h) F_{snr} at 18:26 BT 22 August 2011 at the 1.0° elevation angle



续图 7

Fig. 7 (Continued)

在 Friedrich 等(2006)研究的基础上,本文在偏振资料质量的定量评估方面引入了信噪比影响因子—— F_{snr} ,下面通过对比分析引入 F_{snr} 前后的 \bar{F}_P

来了解其具体的改进效果。图 8 即为剔除信噪比影响因子 F_{snr} 后,上述两次降水过程 \bar{F}_P 的 PPI。

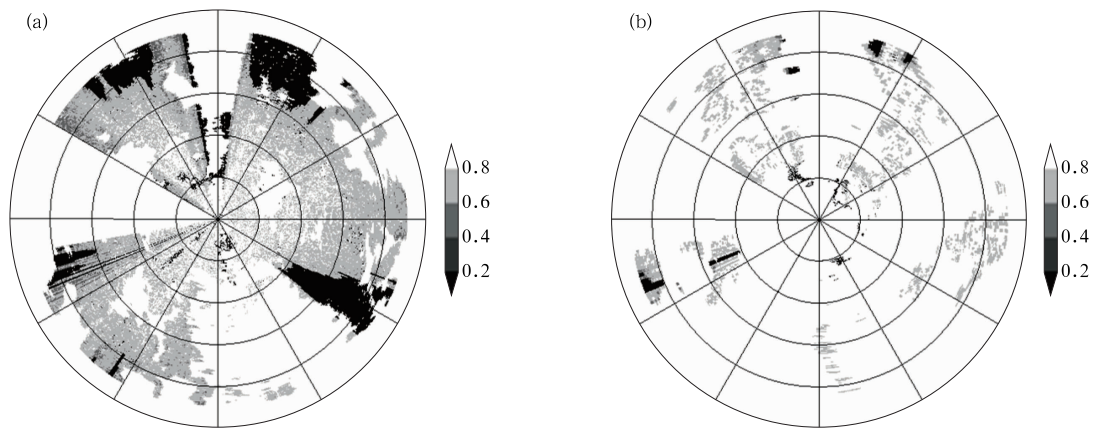


图 8 剔除 F_{snr} 后 \bar{F}_P 的 PPI (a. 对应图 4d, b. 对应图 7d)

Fig. 8 PPI images of \bar{F}_P excluding F_{snr}

(a) corresponding to Fig. 4d, and (b) corresponding to Fig. 7d

整体而言,引入 F_{snr} 前后 \bar{F}_P 的变化并不明显,但经过仔细观察后仍可发现些许差异。相较于剔除 F_{snr} 后的 \bar{F}_P (图 4d、7d),引入 F_{snr} 得到的 \bar{F}_P (图 8a、b)对雷达远端及降水回波边缘数据的评估更加细致准确,而这些区域也正是信噪比偏低,数据质量偏差的区域。前者由于忽略了信噪比因子 F_{snr} 的影响,得到的评估结果也明显偏大。上述分析结果表明:信噪比影响因子 F_{snr} 的引入使偏振资料质量的定量评估更加全面,尤其是对雷达远端及降水回波边缘等信噪比偏低的数据。对其他降水过程的分析也能得到相同的结论(图略)。

6 结论与展望

雷达资料质量的定量评估是将导致雷达测量参数不确定性的各影响因子通过简单的量化算法转化成雷达质量指数,并将各雷达质量指数以指定的权重系数加权求和得到相应的平均雷达质量指数,从而直观地了解资料质量受各因子的影响程度及其整体情况。得到如下结论:

(1)由于信噪比对偏振资料质量存在较大影响,低的信噪比往往会导致测量值出现明显偏差。因此,在 Friedrich 等(2006)研究的基础上,本文在偏

振资料质量的定量评估方案中引入了信噪比影响因素,使其更加完善。

(2)由定量评估结果可以看到,该雷达的强度资料除了存在明显波束阻挡和强烈电磁波衰减的区域以外,整体质量较好;速度资料的质量很好,只存在少量质量较差的离散数据点;而在雷达远端及降水回波边缘的偏振资料质量相对较差,其余偏振资料的质量较好。

(3)雷达资料质量的定量评估方法将影响雷达强度、速度和偏振资料质量的各主要因子以距离库为单位进行量化处理,得到的评估结果直观易懂且与资料质量的实际情况一致。除此之外,该方法适用性强,不受雷达频率、波束宽度和站点周围地形及气候环境等因素的影响。

截至到目前,该方法还处在试验与研究阶段。对不同的天气过程和资料应用需求下各权重系数的设置以及各影响因素的量化方法都还有待做进一步的研究,对其得到的评估结果也需要更多的雷达资料去检验。

参考文献

- 曹俊武,刘黎平. 2007. 双线偏振雷达判别降水粒子类型技术及其检验. 高原气象, 26(1):116-127
- 杜牧云,刘黎平,胡志群等. 2011. C波段双线偏振多普勒雷达资料质量分析. 暴雨灾害, 30(4):328-334
- Aniol R, Riedl J, Dieringer M. 1980. Über kleinräumige und zeitliche Variationen der Niederschlagsintensität. Meteor Rd-sch, 33:50-56
- Aydin K, Zhao Y, Seliga T A. 1989. Rain-induced attenuation effects on C-band dual-polarization meteorological radars. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 27(1):57-66
- Bringi V N, Chandrasekar V. 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge; Cambridge University Press, 636pp
- Chandrasekar V, Keeler R J. 1993. Antenna pattern analysis and measurements for multiparameter radars. J Atmos Ocean Technol, 10(3):674-683
- Delrieu G, Creutin J, Andrieu H. 1995. Simulation of radar mountain returns using a digitized terrain model. J Atmos Ocean Technol, 12(5):1038-1049
- Doviak J R, Zrnic D S. 1992. Doppler Radar and Weather Observations(2nd edition). San Diego; Academic Press, 562pp
- Friedrich K, Hagen M, Einfalt. 2006. A Quality control concept for radar reflectivity, polarimetric parameters, and Doppler velocity. J Atmos Ocean Technol, 23:865-887
- Goddard J W F, Eastment J, Tan J. 1994. Self consistent measurements of differential phase and differential reflectivity in rain// Preprints, IGARSS 1994. Pasadena, CA, IEEE, 1:369-371
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. 1998. Intercomparison of techniques to correct for attenuation of C-band weather radar signals. J Appl Meteor, 37(8):845-853
- Liu Hongping, Chandrasekar V. 2000. Classification of hydrometeor based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification. J Atmos Ocean Technol, 17(2):140-164
- Liu Liping, Hu Zhiqun, Fang Wengui, et al. 2010. Calibration and data quality analysis with mobile C-band polarimetric radar. Acta Meteor Sinica, 24(4):501-509
- Rossa A, Bruen M, Fruehwald D, et al. 2005. Use of radar observations in hydrological and NWP models. COST 717 Working Doc, 292pp
- Ryzhkov A V, Zrnic D S. 1998. Beamwidth effects on the differential phase measurements of rain. J Atmos Ocean Technol, 15(3):624-634
- Ryzhkov A V, Zrnic D S, Burgess D, et al. 2003. Observations and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar. Report of National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, 19-26
- Scarchilli G E, Gorgucci V, Chandrasekar V, et al. 1996. Self-consistency of polarization diversity measurement of rainfall. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 34(1):22-26
- Straka M J, Zrnic D S. 1993. An algorithm to deduce hydrometeor types and contents from multi-parameter radar data. 26th Conference on Radar Meteorology, 17:513-515