

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.

S 波段 WSR-88D 双偏振雷达观测 非降水回波识别方法研究*

张 林 杨洪平

中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 与新一代天气雷达相比,双偏振雷达能发射水平和垂直极化偏振波,具有更多的测量信息,利于区分降水和非降水回波,在雷达定量估测降水发挥着重要作用。本文根据双偏振雷达的测量变量(水平反射率、差分反射率和相关系数)及降水与非降水回波的结构特征,发展了一套 S 波段双偏振雷达数据质量控制算法,重点研究晴空回波和生物回波的识别。利用上海南汇 WSR-88D 偏振雷达的观测数据做测试和评估,评估结果表明该算法对南汇偏振雷达非降水回波识别准确率达 93% 以上,且对降水回波的误判率仅为 3.82%。

关键词: 双偏振雷达,非降水回波,相关系数

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.007

Non-Precipitation Identification Technique on S-Band WSR-88D Polarization Weather Radar

ZHANG Lin YANG Hongping

Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: In contrast to the new generation weather radar, dual-polarization weather radar can transmit both of horizontal and vertical electromagnetic waves, and collect more information to differentiate between precipitation and non-precipitation radar echoes. Identifying and removing non-precipitation echoes in radar reflectivity fields are one critical step in radar-based quantitative precipitation estimation. In this paper, according to the observed variables and characteristics of non-precipitation, an algorithm of quality control for S-band polarization weather radar data is developed, tested and evaluated by employing the WSR-88D polarization weather radar in Shanghai. The results demonstrate that the algorithm could identify more than 93% non-precipitation, and the precipitation echo error is only 3.82%.

Key words: dual-polarization weather radar, non-precipitation echo, correlation coefficient

引 言

我国从 20 世纪 90 年代中期开始大规模建设具有定量测量降水和获得大气动力场结构能力的新一代多普勒天气雷达网。由于新一代天气雷达具有在线实时定标全自动体扫描工作模式较合理的地物杂

波抑制以及科学的产品算法等特点,使得在定量测量降水以及对大尺度、中尺度天气系统的结构演变的监测能力方面得到很大的提高(李柏等,2013)。

天气雷达定量估测降水中最重要的一环之一是区分降水和非降水回波。非降水回波包括电磁干扰回波、地物杂波、超折射回波、生物回波(鸟、昆虫迁徙)和海浪回波等(马中元等,2010)。电磁波碰到近

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506021)资助

2016 年 10 月 24 日收稿; 2017 年 11 月 29 日收修定稿

第一作者:张林,主要从事天气雷达及风廓线雷达资料应用研究. Email: zhanglin1834@163.com

地面建筑物或高大山脉后反射而形成的回波称为地物杂波,而在逆温、高湿等特定大气条件下,电磁波发生弯曲碰到建筑物或山脉反射而形成的回波称为超折射回波(江源等,2009)。天气雷达数据质量控制目的是要最大程度地保留降水回波,剔除各种非降水回波对反射率因子数据带来的污染,在强天气分析、雷达定量估测降水以及资料同化应用中发挥着重要作用(张林等,2014)。

新一代天气雷达业务上通常采用模糊逻辑法对地物/超折射回波、海浪回波等进行质量控制,应用的变量包括反射率因子、速度和谱宽,效果较好,能过滤绝大多数的非降水回波带来的污染(刘黎平等,2007)。但对于晴空大气条件下的非降水回波而言效果不佳,特别是在春秋鸟、昆虫迁徙高峰季节下形成的生物回波,与层状云降水或降雪回波混杂在一起时更加难以区分(冷亮等,2012),因此这类回波的质量控制仍然是一个困扰的难题。如何更好地实现非降水回波实时自动分类识别仍然是新一代天气雷达业务上面临的一大难题(李丰等,2012)。

双偏振雷达通过交替发射水平和垂直偏振波,并接收两个偏振方向回波信号的方法,可以探测到降水系统的水平偏振反射率因子(Z_H)、速度(V)、谱宽(σ_V)、差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相位(ϕ_{DP})、水平和垂直极化雷达返回之间的交叉相关系数(ρ_{HV})。这些变量都是用来测量水平和垂直通道返回信号强度和相位之间的差异和相关性,而且能够提供散射粒子的形状、大小和状态等信息。美国已经实现了 158 部布网雷达(WSR-88D)偏振技术升级和业务化应用。

关于双偏振雷达数据质量控制,国内外相关专家和学者做过研究和分析。Hyangsuk et al(2009)发展了基于模糊逻辑法的 WSR-88D 回波分类算法(HCA),将雷达回波分为 10 类,除了地物回波、生物回波这两种非气象回波之外,还有各种不同形态、不同尺度的降水粒子,HCA 算法用到了所有的偏振雷达变量: $Z_H, V, \sigma_V, \rho_{HV}, Z_{DR}, \phi_{DP}$ 。HCA 算法区分降水和非降水回波的整体效果较好,但在模糊逻辑法处理过程中仍然存在一定的局限性,特别是距离较远处的生物回波和超折射回波的识别上并不理想。Lakshmanan et al(2007)发展了基于神经网络法的偏振雷达数据质量控制算法(dpQCNN)来区分降水和非降水回波,用到了 6 个变量信息($Z_H, V, \sigma_V, \rho_{HV}, Z_{DR}, \phi_{DP}$),该方法对大量的降水和非降水回

波样本进行计算和训练,得到降水回波发生的概率,再对未训练的样本进行分类识别。虽然神经网络法的 HSS(Heidke skill score)评分达到 0.8,但是神经网络模型过于依赖于训练的样本库,在识别降水或非降水回波的因果关系上存在局限。上述的模糊逻辑和神经网络方法在计算过程中都用到了 6 个变量信息,计算成本相对较高。Tang et al(2014)研究了基于相关系数法的 WSR-88D 偏振雷达回波分类算法,利用了相关系数、水平偏振反射率因子和大气环境温度场等变量(ρ_{HV}, Z_H, T)区分降水和非降水回波,在实时定量估测降水系统中(MRMS QPE)得到了应用,HSS 评分高达 0.83。

国内关于双偏振雷达数据质量控制的研究,Jiang et al(2013)基于模糊逻辑算法,对美国业务运行的 KICT 双偏振雷达的鸟类回波和昆虫回波分别进行了统计分析,发展了鸟类回波识别技术。杜牧云等(2012)通过大量 ϕ_{DP} 资料进行特征分析,根据实际情况将 ϕ_{DP} 资料分为非气象信号、较好、较差和差气象信号共 4 类,并根据不同需要,对较好气象信号不处理,对较差和差的气象信号分别进行订正和剔除,构建出一套系统的 ϕ_{DP} 资料分类处理方法。Liu et al(2010)分析了中国气象科学研究院研制的 C 波段双偏振雷达观测资料,认为信噪比(SNR)值对偏振变量测量值的影响至关重要,当 $SNR < 25$ dB 时,偏振变量的测量值就变得不可信了。

我国双偏振雷达处于试验和应用阶段,正在加快推进双偏振雷达业务化的发展进程,未来我国也要实现双偏振雷达业务化应用,以便于提高雷达探测和定量估测降水准确性。我国上海南汇雷达为 WSR-88D 双偏振业务雷达,观测模式为 VCP21,其中有效数据的信噪比门限值为 28 dB,因此可不考虑信噪比对偏振变量测量值的影响。本文以上海南汇 WSR-88D 双偏振雷达资料为例,利用相关系数、水平偏振反射率因子和差分反射率因子 3 个测量变量(ρ_{HV}, Z_H, Z_{DR})着重研究 S 波段 WSR-88D 双偏振雷达非降水回波的识别方法。

1 识别方法

偏振变量中 ρ_{HV}, Z_{DR} 在降水和非降水回波特征上有明显的不同。对于降水回波而言, ρ_{HV} 值接近于 1, Z_{DR} 也在一定范围内均匀变化,对于非降水回波如生物回波(鸟、昆虫)而言, ρ_{HV} 较小(大多 < 0.7),

Z_{DR} 较大(大多 >6),且杂乱不均匀(Tang et al, 2014;Jiang et al,2013)。 ρ_{HV} 和 Z_{DR} 在区分降水和非降水回波特征上具有重要作用。

本文将 ρ_{HV} , Z , Z_{DR} 作为输入变量,先用简单的 ρ_{HV} 将多数非降水回波提取出来,但是冰雹、对流单体及非均一波束充塞的 ρ_{HV} 也较小,而且有些非降水回波(如生物回波)的 ρ_{HV} 较大,考虑到这些特殊情况对识别结果造成的影响,本文中算法采用回波顶高特征参数保留冰雹和对流单体,再采用 ρ_{HV} 和 Z_{DR} 去除非降水回波。

算法基于一般的气象原理, ρ_{HV} 能够区分相当一部分降水和非降水回波,对于容易产生误判的冰雹及非均一波束充塞,则利用回波顶高特征参数进行保留,而对于一些 ρ_{HV} 较大的非降水回波可利用 Z_{DR} 和相关系数水平纹理等特征量进行识别。如图 1 所示为算法执行步骤,共分为 5 步:(1) ρ_{HV} 区分降水和非降水回波区域;(2)回波顶高特征参数保留冰雹和非均一波束充塞;(3)生物回波去除;(4)相关系数水平纹理($SD(\rho_{HV})$)滤除非降水回波;(5)降水回波空洞填补。

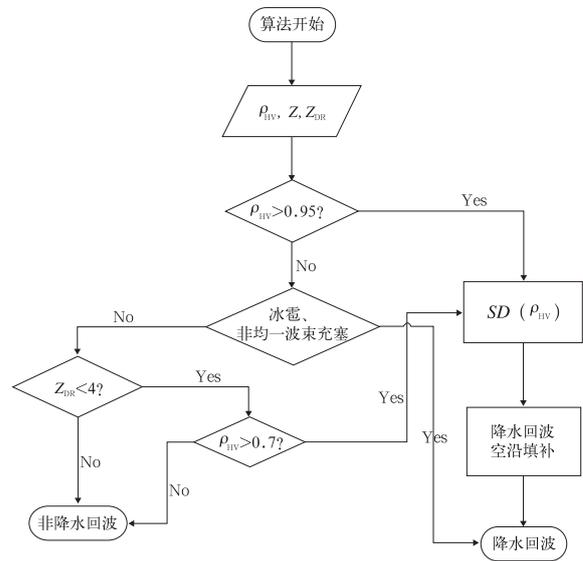


图 1 S 波段偏振雷达质控算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the dual-polarization quality control (dpQC) algorithm

1.1 基本相关系数法

图 2 为上海南汇 WSR-88D 观测产品图像。由

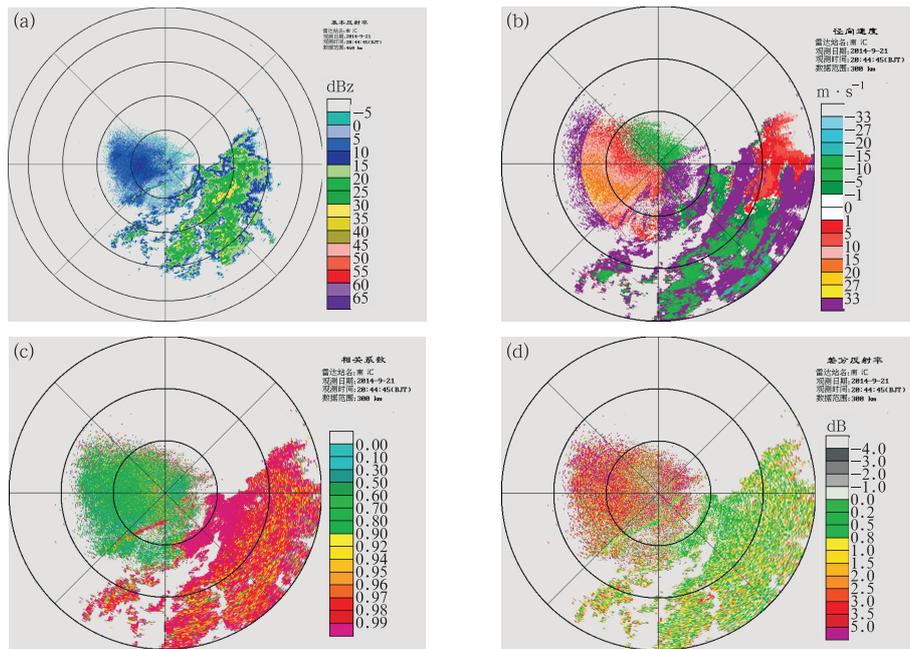


图 2 2014 年 9 月 21 日 20:44 上海南汇雷达观测

(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 基本反射率, (b) 基本速度, (c) 相关系数, (d) 差分反射率

Fig. 2 Shanghai Nanhui S-Band WSR-88D Dual-Polarization Radar observation at 20:44 BT 21 September 2014

(One circle represents 100 km)

(a) Z_H , (b) V , (c) ρ_{HV} , (d) Z_{DR}

图可知,非降水回波(鸟、昆虫等生物回波) Z_H 和 V 与层状云降水回波很相似,因此采用单偏振雷达不易完全区分两者,而偏振变量却比较容易区分两者的不同。

图 3 为降水和非降水回波 ρ_{HV} 的统计直方图,统计了 2016 年上海南汇 WSR-88D 雷达两次观测过程共 198 个体扫数据,在统计之前首先根据雷达观测回波经验人工区分降水和非降水回波,再利用上海 14 部自动气象站小时累积雨量值进行验证。根据统计结果不难发现,非降水回波的 ρ_{HV} 取值在 0.2~1 变化,而降水回波的相关系数 ρ_{HV} 在 0.8~1 取值,两者之间有一个重叠区域。

图 4 为基本相关系数法识别图 2 中的个例。由图 4 可知,当 $\rho_{HV}=0.95$ 时,多数非降水回波得到去除,但也会滤掉一些正常的降水回波,而当 $\rho_{HV}=0.7$ 时,则会有一部分非降水回波保留下来。

1.2 冰雹及非均一波束充塞

当降水回波的 $\rho_{HV}<0.95$ 甚至更低时,考虑冰雹、对流单体及冰水混合物观测过程中发生非均一波束充塞的可能性较大。在一个脉冲周期内,当 ρ_{HV} 的减小伴随着较大的 ϕ_{DP} 梯度时,或者说是由于 ϕ_{DP} 的梯度变化而导致 ρ_{HV} 减小,这种现象称为非均一波束充塞。S 波段 WSR-88D 双偏振雷达水平和垂直波束分辨率均为 1° ,在对流性降水观测过程中,当波束照射体内存在冰雹或对流单体时,若对流单体未被 1° 波束充满,则容易发生非均一波束充塞,且距离越远,随着雷达波束的展宽作用,非均一波束充塞现象越明显, ρ_{HV} 越小。

那么如何在双偏振雷达数据质量控制中保留冰

雹、对流单体和非均一波束充塞等正常降水回波呢?本文利用了回波顶高特征参数进行保留。由于冰雹、对流单体和非均一波束充塞通常发生在强对流降水过程中,伴随较高的回波强度和回波顶高。当一个距离库中的 $\rho_{HV}<0.95$ 时,检查该距离库对应的 Z_H 和回波顶高 $E_{TOP18\text{ dBz}}$ 和 $E_{TOP0\text{ dBz}}$ 值,式(1)和式(2)分别为冰雹和非均一波束充塞的识别标准。当距离库中 $\rho_{HV}<0.95$ 时,如式(1), $Z_H>45\text{ dBz}$,且 $E_{TOP18\text{ dBz}}>8\text{ km}$,则识别为冰雹;在低 ρ_{HV} 值和雷达站之间,算法搜索可能存在的风暴单体核,当径向上连续出现高的水平偏振反射率因子值 ($Z_H>45\text{ dBz}$),且长度超过 1 km ,则认为是风暴单体核, $r_{\text{storm_core}}$ 定义为风暴单体核到雷达站的距离。式(2)所示为识别非均一波束充塞的标准,在远于风暴单体核的位置,当 $E_{TOP0\text{ dBz}}>9\text{ km}$ 时,则识别为非均一波束充塞。

Tang et al (2014) 的研究表明,这两个识别标准不仅适用于冰雹和非均一波束充塞,在不同形状和大小的混合粒子或冰水混合物降水过程中, ρ_{HV} 值较低,其识别标准也同样适用。

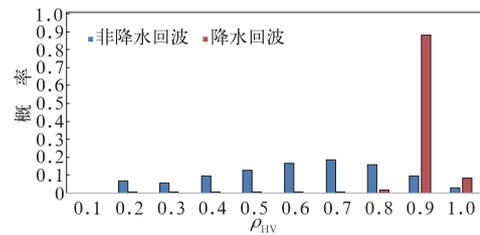


图 3 降水和非降水回波相关系数 ρ_{HV} 的统计直方图

Fig. 3 Histogram plots of the ρ_{HV} values associated with NP (blue) and P (red) echoes

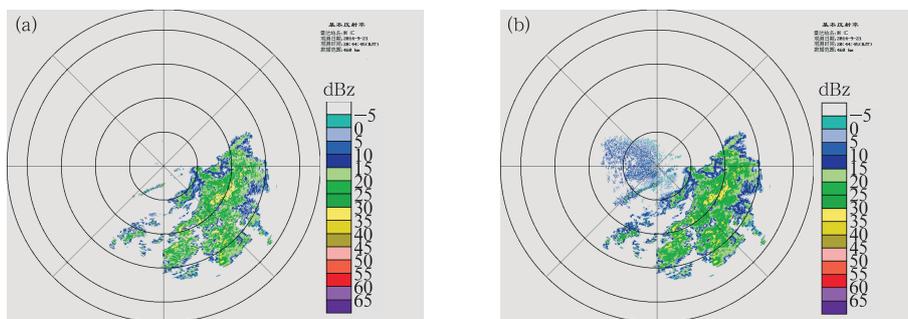


图 4 基本相关系数法识别非降水回波效果
(相关系数取值,图 4a: 0.95,图 4b: 0.7)

Fig. 4 The non-precipitation recognition using correlation coefficient
(Correlation coefficient is 0.95 in Fig. 4a and 0.7 in Fig. 4b)

$$\rho_{HV} < 0.95 \cap (E_{TOP18\text{ dBz}} > 8.0\text{ km} \cap Z_H > 45\text{ dBz}) \quad (1)$$

$$\rho_{HV} < 0.95 \cap (E_{TOP0\text{ dBz}} > 9.0\text{ km} \cap r_{\text{range}} > r_{\text{storm_core}}) \quad (2)$$

图 5 为 2016 年 7 月 5 日上海南汇 WSR-88D 雷达一次冰雹观测过程,图 5a 基本反射率中蓝圈标注处为冰雹影响区域,从图 5b 中能直观看出在冰雹影响区域内的对流单体局部 ρ_{HV} 较小,低于 0.95,当用 $\rho_{HV}=0.95$ 阈值识别后,图 5c 中部分对流单体被误判过滤了,图 5d 为采用回波顶高特征参数式(1)保留冰雹和对流单体,同时雷达站周围的非降水回波也得到了识别。

图 6 为 2016 年 7 月 5 日上海南汇 WSR-88D 雷达一次非均一波束充塞过程的观测个例,黑色圈标注为非均一波束充塞影响区域,如图 6b 所示非均一波束充塞影响区域内 ρ_{HV} 较小,低于 0.95。如图 6c 所示,其 ϕ_{DP} 梯度变化明显。经过质量控制后,如图 6d 所示,降水回波得到了保留,靠近雷达站的非降水回波也得到了识别。

1.3 生物回波识别

由昆虫后向散射导致的非降水回波中包含很多

具有重要气象意义的信息,一般情况下是不宜被去除的,但在降水估测时是有必要将该类回波识别过滤的。

经过 ρ_{HV} 变量的初步筛选后,大致可区分为降水和非降水回波。非降水回波中包含生物回波、电磁干扰、超折射等各种类型的杂波。电磁干扰、超折射等杂波在新一代天气雷达业务中有较成熟的算法进行识别。而生物回波在新一代天气雷达业务上识别效果不理想,双偏振雷达中可利用偏振变量予以识别。

Jiang et al(2013)统计了大量 WSR-88D 偏振雷达的生物回波,认为 Z_{DR} 是识别生物回波的有效变量,其为水平和垂直返回信号强度之比,当降水回波较为均匀时,水平和垂直返回信号的相关性好, Z_{DR} 在一定范围内均匀变化。生物回波 Z_{DR} 值很大,一般大于 6 以上。

本文利用 2016 年上海南汇雷达 8—10 月的晴朗天气资料,统计每天 21:30 左右时刻的数据,分析昆虫回波在 100 km 范围内 Z_{DR} 的平均值随时间的变化规律。横坐标为从 8 月 1 日起开始计数,直到 10 月 31 日截止,除去降雨天气的数据外,参与统计的昆虫数据有 76 个,如图 7 所示。

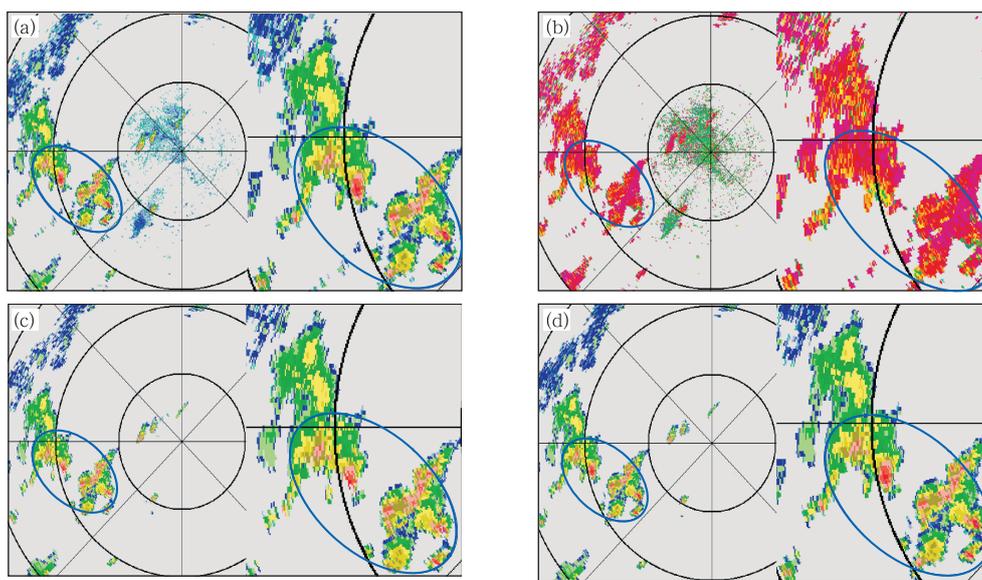


图 5 2016 年 7 月 5 日 15:22 上海南汇雷达观测冰雹

(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 基本反射率, (b) 相关系数, (c) 冰雹被错误过滤, (d) 质控后基本反射率

Fig. 5 The hail observed by Shanghai Nanhui S-Band WSR-88D Dual-Polarization Radar at 15:22 BT 5 July 2016

(One circle represents 100 km)

(a) Z_H , (b) ρ_{HV} , (c) hail error removed,

(d) Z_H after QC

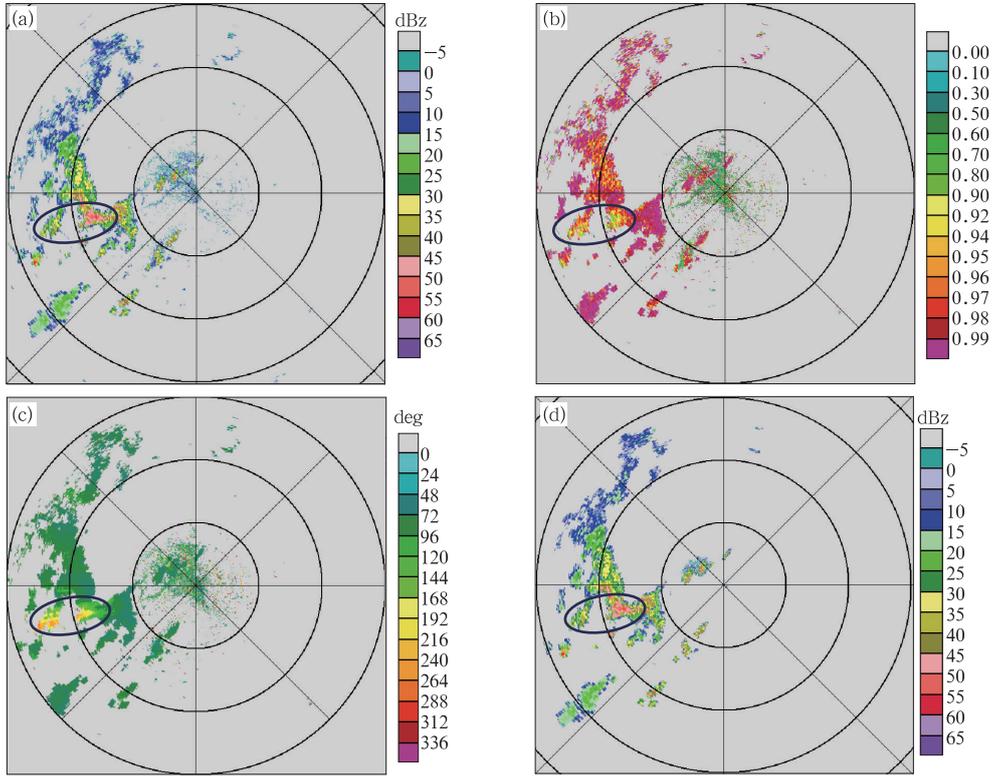


图 6 2016 年 7 月 5 日 15:50 南汇雷达观测非均一波束充塞
(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 基本反射率, (b) 相关系数, (c) 差分传播相移, (d) 质控后基本反射率

Fig. 6 The NBF observed by Shanghai Nanhui S band WSR-88D Dual-Polarization Radar at 15:50 BT 5 July 2016
(One circle represents 100 km)

(a) Z_H , (b) ρ_{HV} , (c) ϕ_{DP} , (d) Z_H after QC

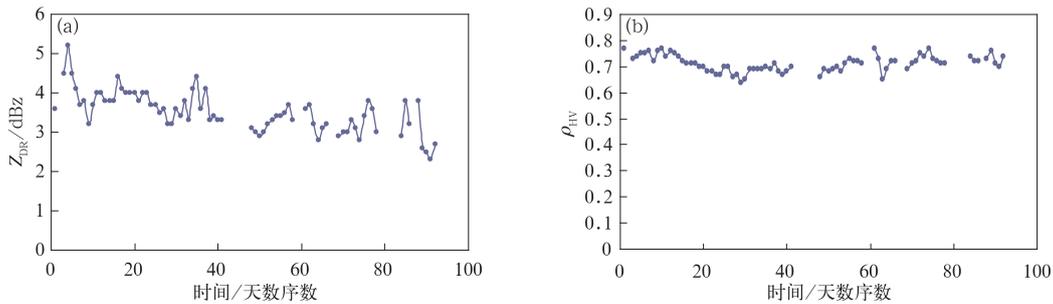


图 7 昆虫回波 Z_{DR} (a) 和 ρ_{HV} (b) 随时间变化统计规律

Fig. 7 Time variation statistics of Z_{DR} (a) and ρ_{HV} (b) of insect echo

由图 7b 可知,昆虫回波 ρ_{HV} 随时间变化不明显,在 0.7 附近。而 Z_{DR} 随时间变化较为明显,存在降低趋势,总体在 3~5 之间变化(图 7a),相比江源等(2009)对美国昆虫回波的统计结果值偏低。

图 1 算法流程第三步为生物回波的识别,结合南汇雷达昆虫回波的统计规律,当 $Z_{DR} > 4$ 认为是生物回波给予滤出,若 $Z_{DR} < 4$ 则对 ρ_{HV} 做进一步判

定,若 $\rho_{HV} < 0.7$ 则认为非降水回波给予滤出。

如图 8 所示,为雷达站周围大面积生物回波,经过 Z_{DR} 和 ρ_{HV} 过滤后,多数生物回波得到识别,并且可以很大程度上保留降水回波。

1.4 相关系数水平纹理 $SD(\rho_{HV})$

降水回波和非降水回波的区别不仅体现在 ρ_{HV}

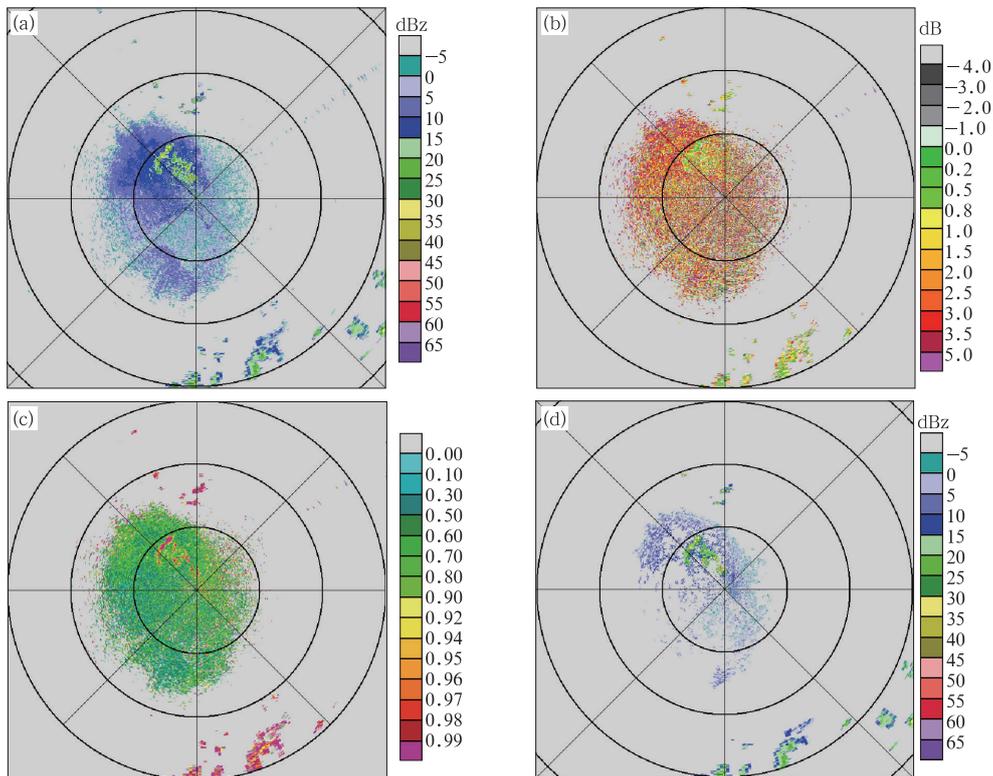


图 8 2014 年 9 月 3 日 21:47 上海南汇雷达观测生物回波
(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 基本反射率, (b) 差分反射率因子, (c) 相关系数, (d) 质控后基本反射率
Fig. 8 Biological scatters observed by Shanghai Nanhui S band WSR-88D
Dual-Polarization Radar at 21:47 BT 3 September 2014

(One circle represents 100 km)
(a) Z_H , (b) Z_{DR} ,
(c) ρ_{HV} , (d) Z_H after QC

上,两者相关系数水平纹理 $SD(\rho_{HV})$ 也表现出明显的不同特征,降水回波 $SD(\rho_{HV})$ 小,非降水回波 $SD(\rho_{HV})$ 大。图 1 算法流程中,利用 $SD(\rho_{HV})$ 能有效识别 $\rho_{HV} > 0.95$ 的非降水回波,而且能过滤 $0.7 < \rho_{HV} < 0.95$ 残留的非降水回波。

$SD(\rho_{HV})$ 计算方法见式(3)所示,图 9 为降水和非降水回波的 $SD(\rho_{HV})$ 特征统计概率分布图。统计前首先需要排除识别为冰雹、对流单体和非均一波束充塞等降水回波,采取先人工识别,再利用自动气象站雨量值进行验证的方法,分别统计了 360620 个降水回波样本点和 865750 个非降水回波样本点。由图可知,降水和非降水回波 $SD(\rho_{HV})$ 特征有非常明显的不同, $SD(\rho_{HV})$ 一般在 $0 \sim 3$,而非降水回波的 $SD(\rho_{HV})$ 一般都大于 1。为了保证降水回波不会被误判,当 $SD(\rho_{HV}) > 3$ 时为识别非降水回波的最佳阈值。

$$SD(\rho_{HV}) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} [10\rho_{HV}(i,j) - 10\rho_{HV}(i,j+1)]^2}{N_A N_R} \quad (3)$$

如图 10 所示为处理图 8 中生物回波识别后残留的非降水回波,经过相关系数水平纹理参数识别后,残留非降水回波得到了有效识别,降水回波基本上得到了保留。

1.5 降水回波空洞填补

图 11 为 2015 年 7 月 11 日 08:12 上海南汇雷达在灿鸿台风过程中的观测产品。由图 11b 可知,大多数降水回波的 $\rho_{HV} > 0.95$,只有极少降水回波 $\rho_{HV} < 0.7$ 。经过质量控制后,如图 11c 所示,个别降水回波点会被误判为非降水回波而形成降水回波空洞。

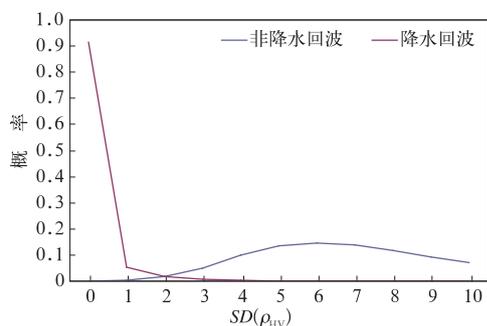


图 9 降水和非降水回波相关系数纹理参数概率分布图

Fig. 9 Probability distribution of $SD(\rho_{HV})$ of P and NP echos

算法的最后一步为降水回波空洞的填补。本文采用了中值法进行填补,以回波空洞点为中心 9×9 的窗口内,若有效回波的个数占窗口总数的 70% 以上,则采用 9×9 窗口内的有效回波的水平偏振反射率因子平均值代替回波空洞点的水平偏振反射率因子值,此时水平偏振反射率因子的单位为 $(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$ 。具体过程为将 9×9 窗口内 dBz 值转换为 $(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$ 后进行平均,最后再将平均后的 $(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$ 值转换为 dBz 值。图 11d 所示为降水回波空洞的填补效果,经过填补后,基本恢复到图 11a 原来的降水回波形状。

2 效果评估

本文采用了算法测试个例之外的 200 个南汇体扫观测数据做效果评估分析,仍然采取先人工识别,再利用自动气象站雨量值进行验证的方法选取了 6389760 个非降水回波点和 8356891 个降水回波点样本数据。对文中算法的非降水回波识别准确率 P_a 、漏判率 P_f 以及降水回波误判率 P_e 进行评估。评估依据如下:

$$P_a = \sum NP_Identify / \sum NP \quad (4)$$

$$P_f = \sum NP_Unidentify / \sum NP \quad (5)$$

$$P_e = \sum P_Identify / \sum P \quad (6)$$

式中 $\sum NP$ 和 $\sum P$ 分别为非降水回波和降水回波的样本总数, $\sum NP_Identify$ 和 $\sum NP_Unidentify$ 分别为非降水回波识别和未识别的样本个数, $\sum P_Identify$ 为降水回波识别样本个数。

经过评估后的效果如表 1 所示。南汇 S 波段 WSR-88D 双偏振雷达非降水回波识别准确率为 93.8%,漏判率为 6.2%,降水回波的误判率为 3.82%。

图 12a 为上海南汇雷达 2016 年 9 月 6 日 10:47 观测数据,图 12b 为经过质量控制后的效果。图 13a

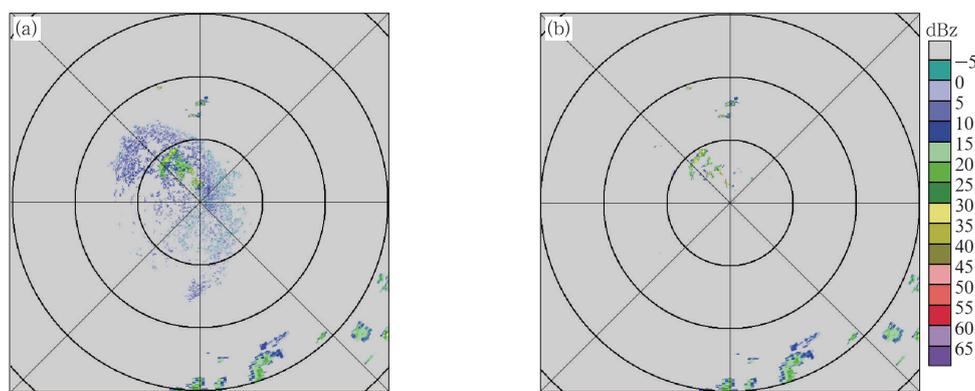


图 10 相关系数纹理参数识别非降水回波

(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 2014 年 9 月 3 日 21:47 南汇雷达生物回波识别后残余非降水回波,

(b) 相关系数水平纹理特征识别残余非降水回波

Fig. 10 The non-precipitation recognized by $SD(\rho_{HV})$ at 21:47 BT 3 September 2014

(One circle represent 100 km)

(a) residual non-precipitation after removing biological scatters, and

(b) after $SD(\rho_{HV})$ recognition

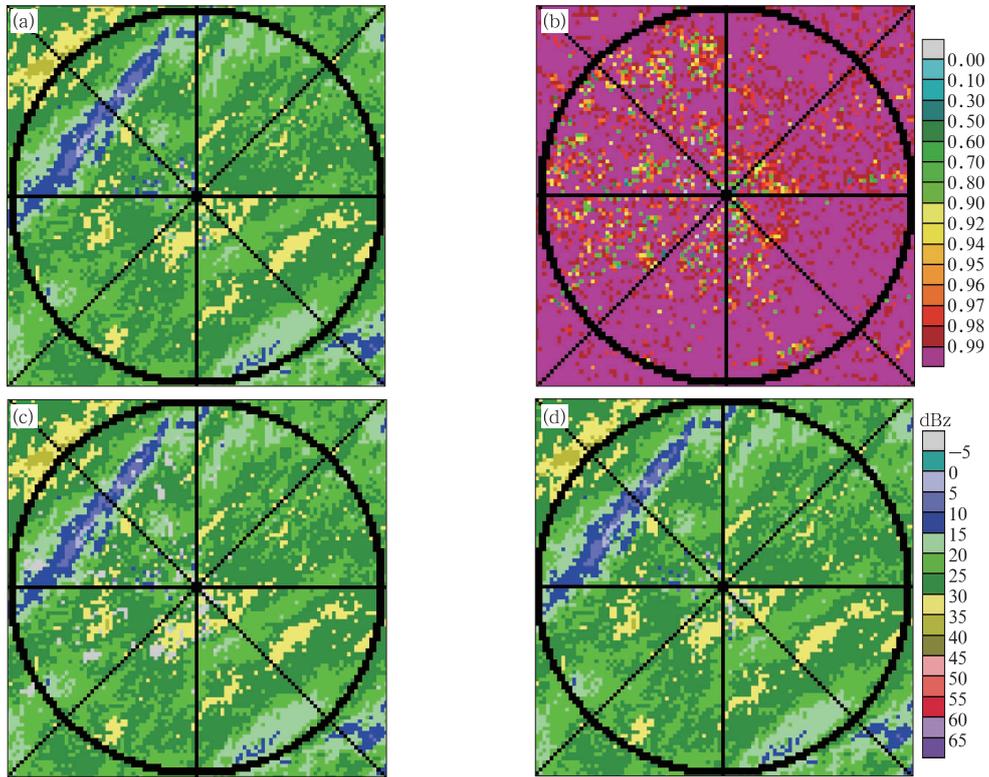


图 11 2015 年 7 月 11 日 08:12 上海南汇雷达降水回波空洞填补效果
(距离圈中每圈代表 50 km)

(a)基本反射率, (b)相关系数, (c)降水回波被误判, (d)降水回波空洞填补

Fig. 11 Precipitation echo hole filling Shanghai Nanhui Radar at 08:12 BT 11 July 2015

(One circle represents 50 km)

(a) Z_H , (b) ρ_{HV} , (c) precipitation error removed, (d) hole filling

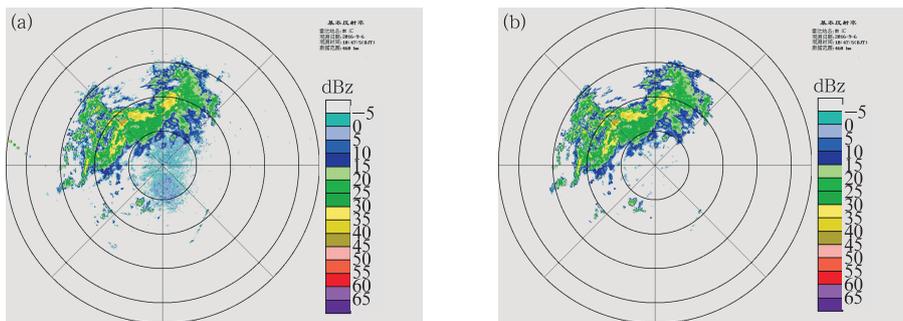


图 12 2016 年 9 月 6 日 10:47 上海南汇 S 波段 WSR-88D 偏振雷达质量控制效果
(距离圈中每圈代表 100 km)

(a)基本反射率, (b)质控后基本反射率

Fig. 12 Quality control of Shanghai Nanhui S Band Dual-Polarization Radar

at 10:47 BT 6 September 2016

(One circle represents 100 km)

(a) Z_H , (b) Z_H after QC

为南汇雷达 2016 年 9 月 6 日 20:06 观测数据,该观测个例中降水与非降水回波发生了混合,图 13d 为

经过质量控制后的效果,采用偏振变量能有效区分降水和非降水回波。

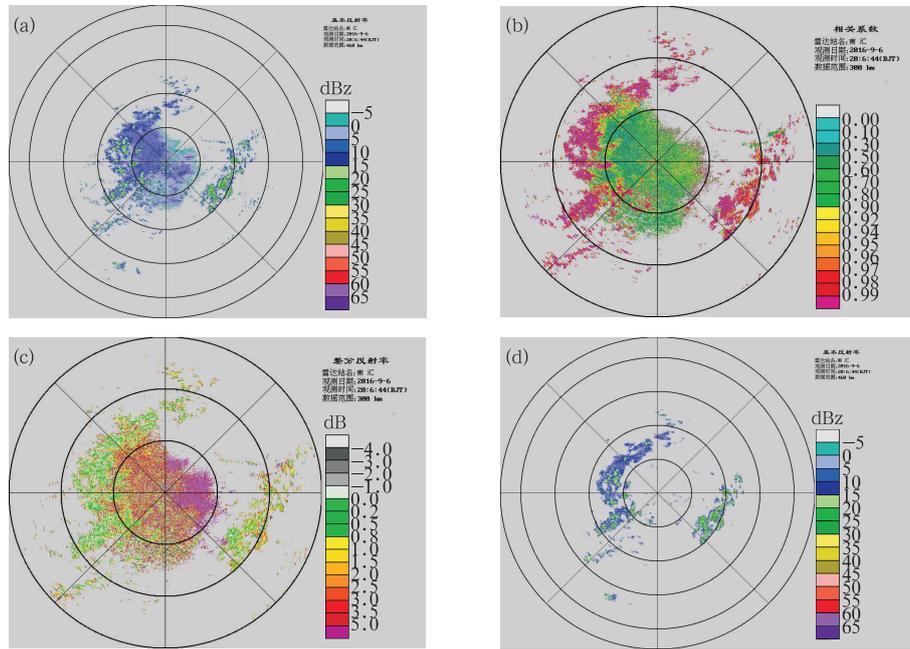


图 13 2016 年 9 月 6 日 20:06 上海南汇 S 波段 WSR-88D 偏振雷达质量控制效果

(距离圈中每圈代表 100 km)

(a) 基本反射率, (b) 相关系数, (c) 差分反射率, (d) 质控后基本反射率

Fig. 13 Quality control of Shanghai Nanhui S Band Dual-Polarization Radar

at 20:06 BT 6 September 2016

(One circle represent 100 km)

(a) Z_H , (b) ρ_{HV} , (c) Z_{DR} , (d) Z_H after QC

表 1 S 波双段偏振雷达非降水回波识别效果评估

Table 1 Evaluation of non-precipitation recognition for S-band dual polarization radar

	非降水气象回波 识别准确率	非降水气象回波 识别漏判率	降水回波 识别误判率
dpQC/%	93.8	6.2	3.82

3 结论和讨论

本文分析 S 波段 WSR-88D 双偏振雷达非降水回波特征,利用偏振变量对降水和非降水回波特征进行了分类识别,并考虑了冰雹、非均一波束充塞等特殊情况下的处理,得到 S 波段 WSR-88D 双偏振雷达非降水回波识别算法流程,结论如下:

(1) ρ_{HV} , Z 和 $SD(\rho_{HV})$ 为双偏振雷达识别非降水回波的有效特征量,能区分绝大多数降水和非降水回波。

(2) 当雷达回波中存在冰雹、对流单体和非均一波束充塞时, ρ_{HV} 值小于 0.95,算法利用了回波顶

高特征参数对其进行保留。

(3) 极少的降水回波 $\rho_{HV} < 0.7$,算法执行后形成了降水回波空洞,文中采用了中值法填补了降水回波空洞。

(4) 本文对算法进行了评估,结果表明,该算法对上海南汇 S 波段 WSR-88D 双偏振雷达非降水回波的识别准确率达到 93% 以上,降水回波误判率仅为 3.82%。

我国双偏振雷达尚处于业务试验阶段,文中仅采用了一部上海南汇 S 波段 WSR-88D 偏振雷达数据做算法研究和测试。受到测试样本的局限,本文算法难免会有一些欠考虑的情况,未来需要在更多的偏振雷达中进行验证和完善。

参考文献

- 杜牧云,刘黎平,胡志群,等,2012. 双线偏振差分传播相移的质量控制[J]. 应用气象学报,23(6):711-719.
- 江源,刘黎平,庄薇,2009. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报,20(2):204-208.

- 冷亮,黄兴友,杨洪平,等,2012.多普勒雷达晴空回波识别与应用[J].气象科技,40(4):535-540.
- 李柏,古庆同,李瑞义,等,2013.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J].气象,39(3):266-280.
- 李丰,刘黎平,王红艳,等,2012.S波段多普勒天气雷达非降水气象回波识别[J].应用气象学报,23(2):147-158.
- 刘黎平,吴林林,杨引明,2007.基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J].气象学报,65(2):252-260.
- 马中元,朱春巧,刘熙明,等,2010.CINRAD雷达数据质量控制方法初探[J].气象,36(8):134-141.
- 张林,杨洪平,邓鑫,等,2014.基于模板匹配法的长乐雷达强超折射回波识别[J].气象,40(3):364-372.
- Hyang Suk P, Ryzhkov A V, Zrnic D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24: 730-748.
- Jiang Yuan, Xu Qin, Zhang Pengfei, et al, 2013. Using WSR-88D polarimetric data to identify bird-contaminated doppler velocities [J]. Advances in Meteorology, 1-13.
- Lakshmanan V, Fritz A, Smith T, et al, 2007. An automated technique to quality control radar reflectivity data[J]. J Appl Meteor Climatol, 46: 288-305.
- Liu Liping, Hu Zhiqun and Fang Wengui, 2010. Calibration and data quality analysis with mobile C-band polarimetric radar[J]. Acta Meteor Sin, 24: 502-509.
- Tang Lin, Zhang Jian, Kenneth Howard et al, 2014. A physically based precipitation-nonprecipitation radar classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system [J]. Wea Forecasting, 29: 1106-1119.