

王博.多普勒天气雷达识别低空风切变算法的改进研究[J].海洋气象学报,2020,40(3):84-89.
WANG Bo. Study on improvement of algorithm for identifying low-level wind shear by Doppler weather radar[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(3):84-89. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.009. (in Chinese)

多普勒天气雷达识别低空风切变算法的改进研究

王博

(中国民用航空西北地区空中交通管理局宁夏分局,宁夏 银川 750009)

摘要:针对 CINRAD-CD 天气雷达切变线识别产品的局限性,通过对探测资料采取中值滤波、滑动平均等预处理方法,有效填充缺测区探测资料。随后,再对探测资料采用最小二乘拟合法计算得到风场径向速度的径向切变、方位切变及垂直切变,进一步得到风场径向和方位的组合切变,从而得到垂直切变图。通过两次银川降雨过程实例应用,证明上述方法能够较准确地辨识风切变线,可为临近预报提供更科学的参考信息。

关键词:多普勒天气雷达;中尺度天气;低空风切变;CINRAD-CD

中图分类号:P412.25 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-3599(2020)03-0084-06

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.009

Study on improvement of algorithm for identifying low-level wind shear by Doppler weather radar

WANG Bo

(Ningxia Branch of Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Yinchuan 750009, China)

Abstract In view of the limitations of shear line identification products of CINRAD-CD weather radar, the detection data in the missing detection area are effectively filled by means of median filtering, moving average, and other preprocessing methods. Then, the radial shear, azimuthal shear, and vertical shear of the radial velocity of the wind field are calculated by using the least square fitting method, and the radial and azimuthal combined shear of the wind field is further obtained, so as to obtain the vertical shear diagram. Through the two examples of precipitation process in Yinchuan, it is proved that the above method can identify the wind shear line more accurately and can provide more scientific reference for nowcasting.

Key words Doppler weather radar; mesoscale weather; low-level wind shear; CINRAD-CD

引言

多普勒天气雷达是大气风场中尺度结构的重要探测工具。在多普勒天气雷达的径向风场信息中,大部分中尺度天气系统都有其独特的二维特征结构^[1],可通过研究这些二维特征结构识别和追踪中尺度天气系统^[2-3]。我国内陆目前使用较多的多

普勒天气雷达是 CINRAD-CD,该款雷达有切变线识别产品,但它采用的算法并未把缺测区纳入到分析范畴中,仅对探测数据进行了简单的预处理,且识别产品仅限于平面位置显示(plane position indicator,PPI),没有涉及到垂直切变。

自 20 世纪开始,国内外的一些实验室、高校均已开展多普勒天气雷达风切变线识别领域的研究。

收稿日期:2020-05-09; 修订日期:2020-07-21

作者简介:王博,男,硕士,工程师,主要研究方向为气象雷达信号处理技术、信号处理系统设计与开发、风切变算法及应用研究,252468189@qq.com。

CAMPBELL and OLSON^[4]成功研发了可利用人工智能方法自动识别风切变的WX1系统。QIN et al.^[5]基于多普勒天气雷达回波数据,利用集合平方根滤波法对风场变化进行了预测,该方法得到的爬线传播方向与观测值一致,其传播速度略高于观测值,其有效预报时间约为5 h。ZHENG et al.^[6]研究了阵风锋发生过程中回波的反射率、速度和谱宽等统计特征,提出了一种基于滑动窗口型的阵风锋自动识别算法。胡明宝等^[7]利用单部多普勒天气雷达探测低空风切变,可计算出一维径向风切变值、一维方位风切变值及二维复合风切变值。魏耀和张兴敢^[8]基于多普勒天气雷达速度场合成切变,首先取不同“拟合窗口”,然后使用最小二乘拟合法进行运算,该算法在定位精度、识别能力、边缘切变识别等方面优势明显。冷亮等^[9]、吴举秀等^[10]提出了一种用于阵风锋自动识别的数学形态学算法,通过计算阵风锋的反射率因子差、速度切变、速度梯度等三个参量场,得到一个二维特征量,采取数字形态学算法对该二维特征量进行处理,从而获取阵风锋框架结构特性曲线。国内外相关研究均集中在识别风切变阈值及识别算法方面,并未关注探测资料的预处理,且未实际应用这些研究成果。

目前,有些厂家的天气雷达已可提供风切变产品,这些风切变产品包括径向、仰角、方位角等多个方向的风切变场^[11-12]。他们采用的主流算法是:预处理天气雷达的探测数据,并对缺测区域使用线性内插技术填充,再分别计算风场的切变信息^[13],但此前的风场结构可能会由于线性内插而发生变化,从而影响风切变的计算。

本文提出的处理方法可通过多普勒天气雷达的径向速度有效辨识风切变线,显示垂直切变图,可为临近预报提供更科学的参考信息。

1 计算方法

CINRAD-CD多普勒天气雷达切变线识别产品的运算方法^[13]为:先顺着径向选取反射率达到阈值的像素点,并滑动平均原始径向数据,随后运算这部分数据的径向切变和方位切变,最后在笛卡尔坐标系上对其进行梯度插值且对其滤波^[14]。这种算法的局限之处在于:未将缺测区域和回波边缘的数据有效处理,且仅有平面位置显示(PPI)的产品,没有垂直切变的产品。

本文使用多普勒天气雷达径向速度的体积扫描数据,在极坐标上进行运算。

1.1 探测数据预处理

为降低径向速度噪声,且有效保留径向速度的中尺度结构,对探测资料实施预处理。预处理步骤是:

1) 中值滤波

分别沿着方位角和径向选取 $n_1 \times n_2$ 个点,对其排序,但不需选取所有目标点的数值,仅使用中间值代替即可。

2) 滑动平均

对探测数据实施中值滤波后,选取沿着方位角方向和径向的 n_3 和 n_4 个连续像素点,分别计算其均值作为中间点数值。针对缺少探测数据的区域及附近区域,对其采用的处理原则是:唯有满足一定数量的有效数据才进行处理,但是对其不采取外插值处理;如若有效数据不能达到一定数量,则把无数据区周边的点以无探测数据处理。如此则可有效规避边缘区域探测资料不足而导致的误差,切变线通常是连续的,但缺测区是孤立的,因此去除这部分区域对于最终计算效果影响有限。

参与计算的探测数据点数 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 不同(即计算“窗口”大小),会极大影响预处理效果。为降低差别,沿方位角方向的 n_1 、 n_3 通常取值为3。本文重点分析沿着径向的 n_2 、 n_4 变化时对预处理结果造成的影响。

1.2 计算探测数据径向速度的径向切变和方位切变

对任意一组随机数据 (y_1, x_1) , (y_2, x_2) , ..., (y_n, x_n) ,通过最小二乘拟合法,可得到利用这些点的最佳直线,且可得出这条直线的斜率。

将径向速度从原点出发沿任一径向随距离的变化定义为该径向速度的径向切变,即 $\frac{\partial v}{\partial r}$ 。

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n (v_i r_i)}{\sum_{i=1}^n r_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (1)$$

式(1)中 v_i 表示第 i 个点的径向速度, r_i 表示该点距天气雷达的距离, n 表示参与运算的探测数据点数, θ 表示方位角,此处为常数。

与雷达等间距的像素点,其径向速度由 0° 方位角开始顺时针方向的变化定义为该径向速度的方位切变,即 $\frac{\partial v}{r \partial \theta}$ (注:由于要归一化,所以除以 r)。

$$\frac{\partial v}{r \partial \theta} = \frac{\sum_{j=1}^n v_j \sum_{j=1}^n \theta_j - n \sum_{j=1}^n (v_j \theta_j)}{r (\sum_{j=1}^n \theta_j \sum_{j=1}^n \theta_j - n \sum_{j=1}^n \theta_j^2)} \quad (2)$$

式(2)中 v_j 表示第 j 个点的径向速度, r 在此处为常数, 表示该点距天气雷达的距离, n 表示参与运算的探测数据点数, θ_j 表示相应的方位角。

1.3 计算垂直切变

当方位角 θ 、间距 r 都是常数时, 上下两层 PPI 上径向速度数值随垂直高度的变化定义为垂直切变, 即 $\frac{\partial v}{\partial h}$ 。

$$\frac{\partial v}{\partial h} = \frac{\sum_{k=1}^l v_{1k}}{r_1 \sin \alpha_1} - \frac{\sum_{k=1}^l v_{2k}}{r_2 \sin \alpha_2} \quad (3)$$

式(3)中 v_1, v_2 为上下两层的径向速度, 并对其进行平滑拟合(对应的区间范围均为 1); r_1, r_2 为上下两层的径向间距; α_1, α_2 为上下两层 PPI 的仰角。仅当上下两层数据同时有效时才进行运算, 否则作为无探测数据区域处理, 随后对其采取中值滤波。

1.4 计算组合切变

天气雷达径向速度沿径向和方位角方向的综合变化定义为组合切变, 即 $\sqrt{(\frac{\partial v}{\partial r})^2 + (\frac{\partial v}{r \partial \theta})^2}$, 只需要计算 $\frac{\partial v}{\partial r} < 0$ 的区域。

2 天气雷达探测数据

本文利用的雷达探测数据来自银川新一代天气雷达(CINRAD-CD)对 2019 年 6 月 26 日暴雨过程、2019 年 8 月 2 日带状强降水过程的探测。CINRAD-CD 雷达是一种 C 波段全相参体制的多普勒天气雷达, 工作频率为 5 300~5 500 MHz, 天线直径 4.3 m, 增益 43 dB, 最大可测半径为 200 km, 天线的方位、俯仰定位精度均为 0.2° ^[15], 银川雷达馈源海拔高度为 1 070.439 m。

3 不同预处理方法试验对比

对 2019 年 6 月 26 日多普勒天气雷达的探测数据进行预处理, 探测时选择 0.6° 仰角, 45° 方位角的径向, 以此次天气过程为例说明探测数据预处理的效果。

3.1 中值滤波

首先分别令 $n_2 = 5, n_2 = 10, n_2 = 20, n_2 = 40$, 然后对该探测数据实施中值滤波, 最后把结果和原始资料比较, 将其绘成图 1。

图 1 中的原始探测数据存在的库间脉动比较明

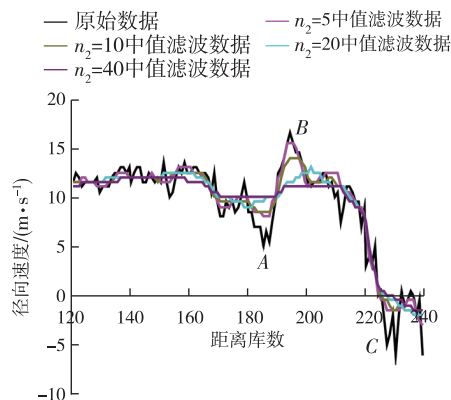


图 1 中值滤波效果对比

Fig.1 Comparison between raw data and median filtering data

显, 经过中值滤波处理之后, 库间脉动基本消失, 但是曲线平滑度依然不足。图 1 中 A—B 段、B—C 段梯度较大。A—B 段, 当 $n_2 = 5$ 和 $n_2 = 10$ 时, 滤波结果和原始资料较为相近, 保持了大梯度值; 当 $n_2 = 20$ 和 $n_2 = 40$ 时, 梯度明显降低, 甚至几乎消失。B—C 段, 当 $n_2 = 5, n_2 = 10, n_2 = 20, n_2 = 40$ 的滤波结果和大梯度区重合度较高, 与原始资料非常接近, 可保持大梯度特征。由以上分析可知, 对大尺度的梯度区域而言, 挑选合理的滤波参数, 可在消除库间脉动的情况下仍然保持探测数据的大梯度特征。

3.2 滑动平均

首先分别令 $n_4 = 5, n_4 = 10, n_4 = 20, n_4 = 40$, 然后对该探测数据实施径向滑动平均, 最后把结果与原始数据对比, 将其绘成图 2。

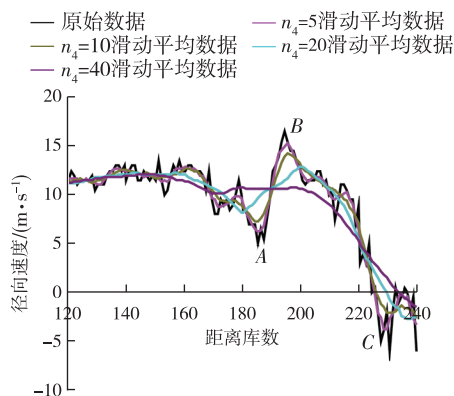


图 2 滑动平均效果对比

Fig.2 Comparison between raw data and moving average data

由图 2 分析可得, 当 n_4 取值较小时, 可以保持大的梯度区间, 但不能有效去除库间脉动; 当 n_4 取值增大时, 库间脉动的去除效果显著, 但是大梯度

区间逐渐降低。由此可见,若只对探测数据进行滑动平均,将无法去除库间脉动且保留大梯度区间的要求。

3.3 中值滤波后滑动平均

首先对原始探测数据实施中值滤波($n_1 \times n_2 = 3 \times 10$),然后分别令 $n_4 = 5, n_4 = 10, n_4 = 20, n_4 = 40$, 对其作径向滑动平均,最后把结果与原始数据对比,将其绘成图3。

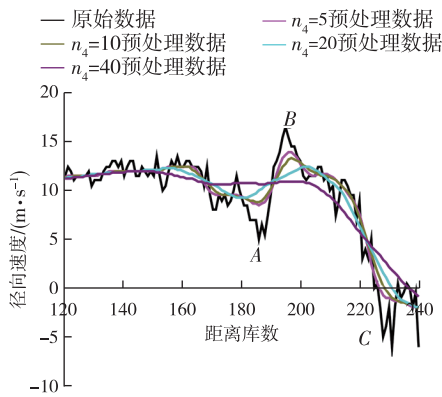


图3 先实施中值滤波再实施滑动平均的效果对比
Fig.3 Comparison between raw data and data that are successively processed with median filtering and moving average

由图3分析可得,当 $n_4 = 5, n_4 = 10, n_4 = 20$ (即

n_4 较小时),3个处理结果较为接近,不仅过滤了库间脉动,而且保留了原有的中尺度结构。但是当 $n_4 = 40$ 时,该处理方法会影响中尺度结构。

3.4 切变计算

对探测数据实施切变计算的过程中,探测数据点数的不同表示辨识风切变的尺度不同。通过对比预处理结果发现:在预处理尺度和切变计算尺度相差不大(即都较大或较小)时,风切变的辨识效果不良;预处理尺度和切变计算尺度相差较大时可得到良好的辨识效果。

4 实例识别结果

在对银川市多普勒天气雷达的探测数据处理过程中,不仅要有效过滤库间脉动,尽可能保留天气过程原有的中尺度结构,而且要尽可能多地使用探测数据,因此选用 $n_1 = 3, n_2 = 10, n_3 = 3, n_4 = 20$ 。

4.1 暴雨天气过程识别结果

2019年6月26日银川市发生一次暴雨天气过程,与中尺度切变线有关(图4)。分别对比同一仰角上的反射率因子和径向速度,继续对比同时次、不同仰角间的垂直切变。分析可得:此天气过程强降雨区域的反射率因子为25~40 dBZ。负垂直切变和正垂直切变分别出现在切变线的北侧和南侧,该现象说明垂直切变的计算结果与实际径向风场的

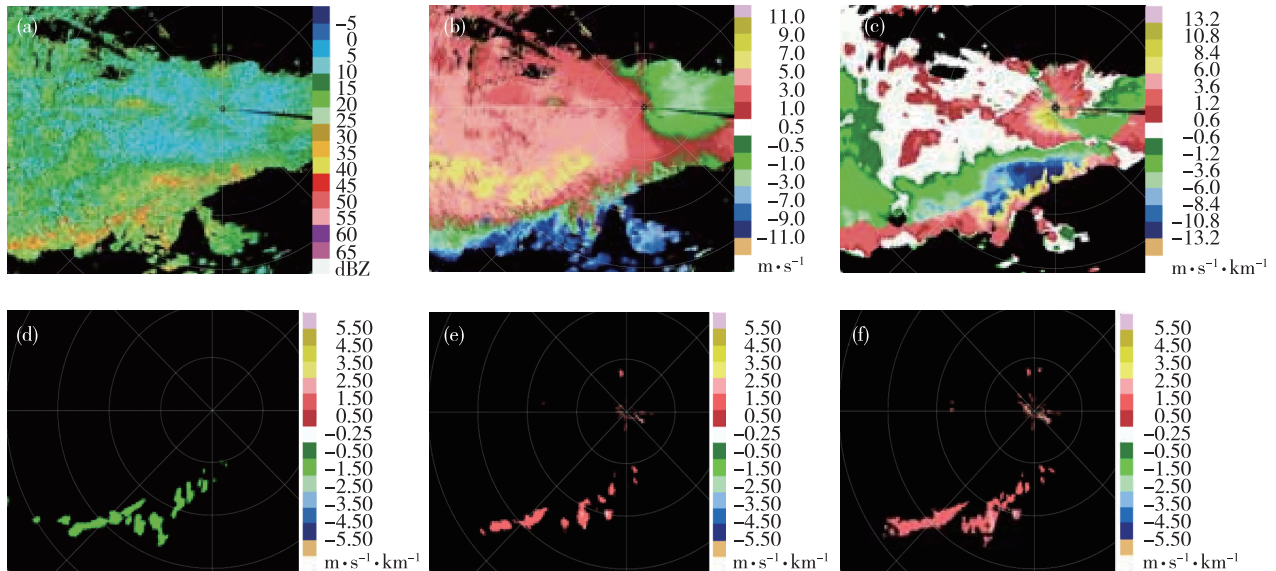


图4 银川市2019年6月26日天气过程识别结果(a. 0.6°仰角反射率因子;b. 0.6°仰角径向速度;c. 0.6°仰角、1.4°仰角间垂直切变;d. 0.6°仰角径向切变,显示阈值:0.5 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$;e. 0.6°仰方位切变,显示阈值:0.8 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$;f. 0.6°仰角组合切变,显示阈值:0.8 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$)

Fig.4 Identification results of Doppler weather radar during a rainstorm process in Yinchuan on 26 June 2019 (a. reflectivity factor at 0.6° elevation; b. radial velocity at 0.6° elevation; c. vertical shear between 0.6° elevation and 1.4° elevation; d. radial shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 0.5 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$; e. azimuthal shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 0.8 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$; f. combined shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 0.8 $m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$)

变化是一致的。

4.2 带状强降水天气过程识别结果

2019年8月2日银川市发生一次带状强降水天气过程(图5)。分析可见,图5a中强降水区的反射率因子为40~50 dBZ,正垂直切变最大值出现在降水区前部,负垂直切变出现在降水区后部。带状回波强度略有减弱,切变线识别结果强度减弱且不连续。

5 试验结果分析

本文通过对多普勒天气雷达径向速度的探测资料进行预处理,得出垂直切变图,探究了识别风切变线的新方法,并将该方法分别应用于暴雨和带状强降水两个案例,证明此方法可有效识别风切变。识别结果表明:

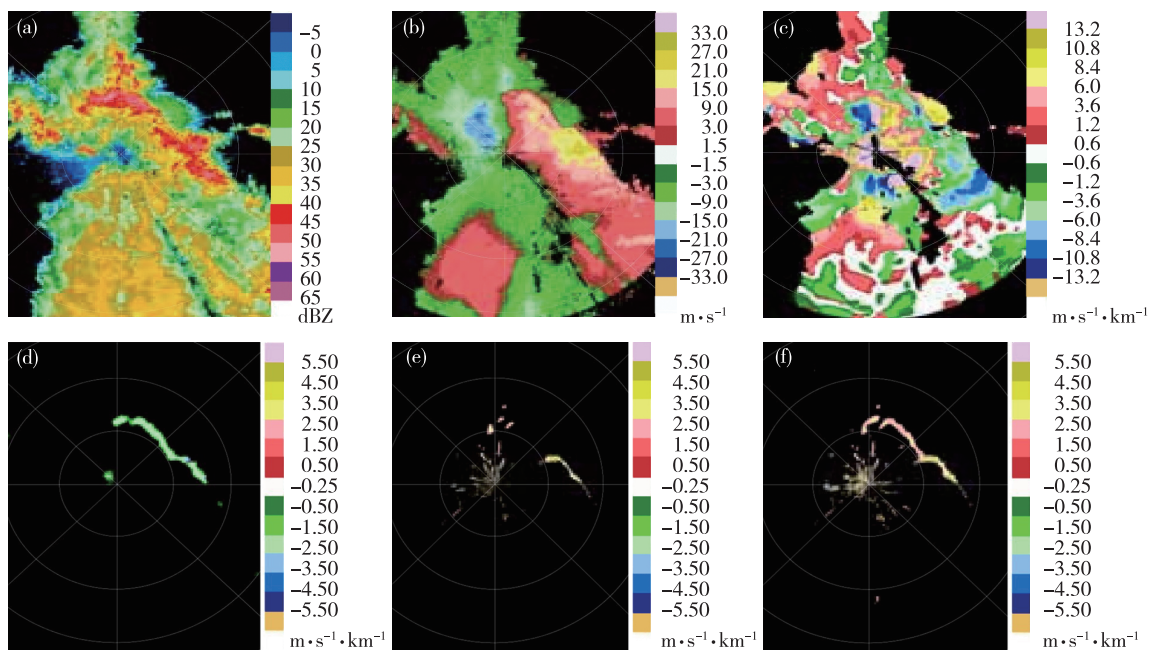


图5 银川市2019年8月2日天气过程识别结果(a. 0.6°仰角反射率因子;b. 0.6°仰角径向速度;c. 0.6°仰角、1.4°仰角间垂直切变;d. 0.6°仰角径向切变,显示阈值:1.2 m·s⁻¹·km⁻¹;e. 0.6°仰角方位切变,显示阈值:1.7 m·s⁻¹·km⁻¹;f. 0.6°仰角组合切变,显示阈值:1.7 m·s⁻¹·km⁻¹)

Fig.5 Identification results of Doppler weather radar during a banded heavy precipitation process in Yinchuan on 2 August 2019 (a. reflectivity factor at 0.6° elevation; b. radial velocity at 0.6° elevation; c. vertical shear between 0.6° elevation and 1.4° elevation; d. radial shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 1.2 m·s⁻¹·km⁻¹; e. azimuthal shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 1.7 m·s⁻¹·km⁻¹; f. combined shear at 0.6° elevation, showing threshold value: 1.7 m·s⁻¹·km⁻¹)

1)首先对天气雷达的探测数据实施预处理,然后挑选合理的运算“窗口”,通过最小二乘拟合法得到径向速度沿着两个方向的切变现象,辨识结果与径向速度在图中的切变信息保持一致,证明了该方法的有效性。

2)由于各降水过程中显示阈值存在着区别,垂直切变能够提供径向风场的高低层配置信息,径向速度水平切变的强弱和降水强度具有一定联系。

3)通过合理运用多普勒天气雷达探测到的径向速度信息,提供垂直切变图,能够有效识别风切变,为灾害气象预报提供更科学的参考信息。

然而,需要特别指出的是,本文提供的方法可

有效辨识径向速度的切变,但与真实风场的切变尚有区别。对于算法中显示阈值的设置,需根据各个地区的现实状况,对一系列天气案例采取试验、分类和归纳,方可获得最佳结果,不能将本文的阈值直接使用。

参考文献:

- [1] 祁月皎,何建新,王旭.多普勒天气雷达二维理想均匀风场的数值模拟[J].成都信息工程学院学报,2014,29(2):127-132.
- [2] 郑永光,周康辉,盛杰,等.强对流天气监测预报预警技术进展[J].应用气象学报,2015,26(6):641-657.
- [3] 牟容.利用四维变分同化技术反演低层风场的准业务

- 应用研究[D].北京:中国气象科学研究院,2007.
- [4] CAMPBELL S D, OLSON S H. Recognizing low-altitude wind shear hazards from Doppler weather radar: An artificial intelligence approach [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1987, 4(1):5-18.
- [5] QIN Y Y, GONG J D, LI Z C, et al. Assimilation of Doppler radar observations with an ensemble square root filter: A squall line case study [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2014, 28(2):230-251.
- [6] ZHENG J F, ZHANG J, ZHU K Y, et al. Gust front statistical characteristics and automatic identification algorithm for CINRAD [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2014, 28(4):607-623.
- [7] 胡明宝,谈曙青,汤达章,等.单部多普勒天气雷达探测低空风切变方法[J].*南京气象学院学报*, 2000, 23(1):113-118.
- [8] 魏耀,张兴敢.多普勒天气雷达合成切变算法及改进方法的研究[J].*电子与信息学报*, 2010, 32(1):43-47.
- [9] 冷亮,肖艳姣,吴涛.基于数学形态学的阵风锋识别算法[J].*气象科技*, 2016, 44(1):1-6.
- [10] 吴举秀,周青,杨传凤,等.2015年7月14日阵风锋及锋后大风多普勒天气雷达产品特征分析[J].*高原气象*, 2017, 36(4):1082-1090.
- [11] 周生辉,魏鸣,张培昌,等.多普勒雷达反演风场的风切变识别研究[J].*热带气象学报*, 2015, 31(1):119-127.
- [12] 吕智.机载风切变气象雷达地面验证系统技术研究[J].*航空科学技术*, 2015(8):48-52.
- [13] 肖艳姣,万玉发,王志斌.多普勒天气雷达双PRF径向速度资料质量控制[J].*高原气象*, 2016, 35(4):1112-1122.
- [14] 刘彬贤,王彦,刘一玮.渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成雷暴天气的诊断特征[J].*大气科学学报*, 2015, 38(1):132-136.
- [15] 龚雪鹏,罗红,陈余明,等.毕节CINRAD/CD型天气雷达调制系统典型故障分析与处理[J].*气象水文海洋仪器*, 2019, 36(3):106-108.