

杨馨蕊,马舒庆,吴蕾. UHF 风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价[J]. 大气科学学报,2010,33(5):576-581.

Yang Xin-ru, Ma Shu-qing, Wu Lei. Comparison and evaluation of analysis methods of UHF wind profiler data contaminated by precipitation[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(5): 576-581.

UHF 风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价

杨馨蕊,马舒庆,吴蕾

(中国气象局 气象探测中心,北京 100081)

摘要:给出了5种UHF风廓线雷达降水数据的判别方法,利用北京CFL-16型对流层风廓线雷达于2007年6—8月获取的部分观测数据,对5种判别方法进行对比分析。结果表明,这些方法在降水天气下判断正确率都在89%以上,其中,建立关于垂直径向速度和信噪比、垂直径向速度和谱宽的判别函数两种方法判断正确率均达99%以上。

关键词:UHF风廓线雷达;晴空;降水数据;判别方法

中图分类号:P412.25 文献标识码:A 文章编号:1674-7097(2010)05-0576-06

Comparison and Evaluation of Analysis Methods of UHF Wind Profiler Data Contaminated by Precipitation

YANG Xin-ru, MA Shu-qing, WU Lei

(CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the data from the CFL-16 wind profiler in Beijing from June to August in 2007, five analysis methods of UHF wind profiler data are compared. The results show that accuracy of all the five methods are over 89% in case of precipitation, among which the accuracy of the methods of plotting vertical radial velocities against vertical beam SNRs and against spectra widths are over 99%.

Key words: UHF wind profiler; clear air; precipitation data; analysis method

0 引言

风廓线雷达是21世纪高空探测系统的重要组成部分,目前风廓线雷达资料已经在全球进入业务化应用,我国也正在进行风廓线雷达观测网的建设。风廓线雷达主要用来探测大气风场,但它的动态范围很大,在探测到弱的湍流散射信号的同时,还可以探测到降水粒子的散射信号。在有降水发生时,降水粒子的垂直下落速度会使整个信号谱发生较为明显的偏移,如果不加以区分,由此计算得到的水平风和垂直风会有较大的误差,而且在降水频发的地区和时间内,降水干扰将会是一个非常重要的误差源,所以非常有必要对数据是否受到降水干扰进行判断^[1-2]。

国外从20世纪90年代开始了比较多的相关研究。Ecklund等^[3]用垂直径向速度的大小对降水数据进行判断。Lambert等^[4]和NASA关于915MHz风廓线雷达的数据质量控制方法研究报告^[1]中通过对垂直径向速度和信噪比进行分析,给出了区分降水数据和晴空数据的方法。Steiner和Richner^[5]通过对探测信号的零阶矩、一阶矩和二阶矩与其各自在晴空天气下的估计值的差进行分析,给出了判断数据是否受到降水干扰的函数。Ralph等^[6]通过对垂直径向速度的直方图、方差以及信号功率谱密度和垂直径向速度的相关性,对降水数据的判断方法进行了研究。McDonald等^[7]对降水数据的垂直信号功率、垂直信号谱宽和信噪比进行了分析。Wuertz等^[8]通过对几个典型降水天气和晴空天气

收稿日期:2009-02-23;改回日期:2009-05-11

基金项目:中国气象局气象探测中心行业专项(GYHY(QX)2007-6-16);江苏省气象局“北极阁基金”(BJG200803)

作者简介:杨馨蕊(1982—),女,河北保定人,硕士,研究方向为风廓线雷达数据处理及其质量控制,yangxinrui82@163.com.

的研究,给出了 UHF 风廓线雷达降水以及晴空天气下数据的特征。

本文结合北京 CFL-16 型风廓线雷达探测数据对降水数据的判别方法进行了研究,给出了几种方法的具体参数,讨论了这些方法的优缺点,并对其判断正确率作了分析比较,为实现自动降水干扰识别提供了一些参考。

1 UHF 风廓线雷达降水数据探测原理与判断方法

1.1 探测原理

在晴空天气下,风廓线雷达回波为湍流散射。大气的湍流作用使空气密度分布不均匀,从而对入射电磁波产生布拉格散射,散射强度与折射率结构常数(C_n^2)和雷达波长(λ)有关,雷达反射率(η)满足 $\eta = 0.39C_n^2 \lambda^{-\frac{1}{3}}$ ^[9]。

在降水天气下,风廓线雷达回波信号中既有湍流造成的回波,也有冰晶、云滴、雨滴等粒子散射产生的回波。其中,湍流散射同样遵从布拉格散射,而粒子散射则与粒子的雷达截面以及粒子浓度有关。雷达反射率为单位体积内全部粒子雷达截面(σ)

之和,即 $\eta = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ ^[10]。瑞利散射条件下,球形粒

子的雷达截面为: $\sigma = \frac{64\pi^5 r^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$, 其中 $m = n$

$-ki$ 称为复折射指数, n 是通常意义的折射率, k 是吸收系数。由上述球形粒子瑞利散射的雷达截面公式,雷达截面与雷达波长的4次方成反比^[9]。因此,雷达波长对粒子探测效果影响敏感,相同粒子条件下,雷达波长越长,雷达截面越小、雷达反射率越低、探测粒子效果越差。风廓线雷达一般采用1 200 MHz 左右的边界层风廓线雷达(L 波段)、450 MHz 左右的对流层和低对流层风廓线雷达(UHF)以及45 MHz 左右的对流层以上的风廓线雷达(VHF)三种,它们对晴空湍流散射和分散目标的瑞利散射都很敏感,但是这3种不同频率的雷达对这些过程的灵敏度又有很大不同。

McDonald 等^[7]指出:对于 VHF 只有降水量大于 $8.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的大雨发生时,瑞利散射信号强度才会超过晴空回波信号强度;对于 UHF 来说,只要有降水过程发生,降水粒子的瑞利散射信号强度就会超过晴空回波信号强度;边界层风廓线雷达除了能接收到降水粒子的散射信号,还能接收到云的回波信号。

1.2 UHF 风廓线雷达降水数据判别方法

1.2.1 方法(一):利用直接测量的功率谱密度

在降水天气下,接收信号的功率谱密度值会比晴空天气下大。对已知的晴空数据和降水干扰数据,将每一时刻所有距离库中的信号作为一个子样本,首先计算每个子样本中功率谱密度大于某值的信号占子样本总信号数量的百分比,然后将所有子样本计算得到的百分比进行分析得到阈值,当百分比大于此阈值时,认为数据受到了降水干扰,反之,则认为是晴空回波数据。

1.2.2 方法(二):利用垂直径向速度

有降水发生时,在某个高度范围内,垂直径向速度(在降水时,该垂直径向速度代表了空气的垂直运动和降水粒子的下沉运动的总和,下同)^[11]会有明显的增大,利用统计方法可以得到在降水过程中,垂直径向速度的分布范围,并由此给出判断阈值,当大于给定阈值时认为数据受到降水干扰,反之,则认为是晴空回波数据。

1.2.3 方法(三):建立关于垂直径向速度和信噪比的判别函数

有降水发生时,通常风廓线雷达接收到回波信号都具有较高的信噪比(SNR),在这种情况下从垂直波束中就可以计算得到相对来说非常明确的垂直径向速度。将已知的降水干扰数据和晴空数据进行对比,具体方法为:将垂直径向速度作为 x 轴,将 SNR 值作为 y 轴,从数据分布情况建立关于垂直径向速度和信噪比的判别函数,然后根据判别函数判断数据是否受到了降水的干扰。

1.2.4 方法(四):建立关于垂直径向速度和谱宽的判别函数

类似方法(三),有降水发生时,风廓线雷达接收到回波信号通常具有较大的谱宽。将垂直径向速度作为 x 轴,将谱宽值作为 y 轴,从数据分布情况建立关于垂直径向速度和谱宽的判别函数,然后根据判别函数判断数据是否受到了降水的干扰。

1.2.5 方法(五):建立关于垂直径向速度、谱宽与其对应的晴空估计值的差的判别函数

这种方法主要是基于降水天气下垂直径向速度和谱宽相对晴空天气下的值的偏移,并由此引入两个参数:1)由风廓线雷达径向速度即信号谱的一阶矩(认为只有垂直方向上的才有价值) R_{MV} 定义 $R_{MV,dev} = R_{MV} - R_{MV,est}$,其中 $R_{MV,est}$ 是 R_{MV} 在晴空条件下某一波束方向的估计值;2)由谱宽即信号谱的二阶矩 R_{SW} 定义 $R_{SW,dev} = R_{SW} - R_{SW,est}$,其中 $R_{SW,est}$ 是

R_{SW} 在晴空条件下某一波束方向的估计值。然后对已知的晴空和降水干扰数据分别计算 $R_{MV,dev}$ 和 $R_{SW,dev}$, 以 $R_{SW,dev}$ 为 x 轴, 以 $R_{MV,dev}$ 为 y 轴, 由数据分布情况建立判别函数, 然后根据判别函数判断数据是否受到了降水的干扰。

2 对比与评价

2.1 雷达设备和资料

本文采用的数据采自中国气象局大气探测试验基地的 CFL-16 型对流层风廓线雷达。它的设计探

测高度为 16 km, 属于对流层风廓线雷达。为了兼顾探测高度和低层的高度分辨率, CFL-16 采用高、中、低三种工作模式。低模式使用窄脉冲 $0.8 \mu s$, 高度分辨率为 120 m, 最低探测高度 150 m。中模式采用较宽脉冲 $1.6 \mu s$, 高度分辨率为 240 m, 最低探测高度 2 550 m。高模式采用宽脉冲 $9 \mu s$, 高度分辨率 480 m, 最低探测高度 4 950 m。三种工作模式交替进行, 在保证低空具有较高高度分辨率的同时可以达到较高的探测高度。表 1 列出了 CFL-16 型风廓线雷达的典型参数。

表 1 CFL-16 型风廓线雷达典型参数

Table 1 Typical parameters of the CFL-16 wind profiler

波长/ mm	发射频率/ MHz	探测模式	脉冲重复 周期/ μs	脉冲宽度/ μs	发射峰值 功率/kW	天线增益/ dB	相干积 分次数	谱平均数	谱变换数	距离库长/ m
674	445	低	40	0.8	20	28	220	6	256	120
		中	72	1.6	23	33	120	8	512	240
		高	198	9	23	33	36	14	512	480

资料时间为 2007 年 6—8 月, 探测数据是多个模式探测的综合, 时间分辨率约为 6 min。分析数据包括了探测试验期间的大部分降水过程, 以及连续晴天数为 5 d 以上的 4 个晴空过程中的部分数据, 降水和晴空数据样本总数分别为 4 760 个。此外, 还采用了中国气象局大气探测试验基地采集的同时期地面观测资料作为发生降水天气的参考, 将得到的数据依据地面观测资料较为客观地分成降水或晴空回波数据^[12-13]。为了检验处理方法的合理性, 应选择探测高度范围内数据可信度较好的数据进行分析, 由于降水发生的高度一般在 4 000 m 以下, 而且较低高度范围的信号谱宽受地物干扰比较严重, 所以谱宽数据选择的高度范围为 2 000 ~ 4 000 m。在资料处理之前, 对选取的数据进行了合理性检验以及奇点剔除。

2.2 资料处理

2.2.1 利用直接测量的功率谱密度

分别计算每个子样本中信号功率谱密度大于 0.001 W 的信号数量占总信号数量的百分比, 得到两种天气下的百分比分布(图 1)。采用线性回归法得到判断阈值为 0.375%, 即: 当一个子样本中信号功率谱密度大于 0.001 W 的信号数量占总信号数的百分比大于 0.375% 时, 认为数据受到了降水的干扰。

2.2.2 利用垂直径向速度

图 2 是选取 2007 年 7 月 31 日和 2007 年 6 月

27 日两个降水个例中 5 个时刻以及 2007 年 6 月 5 日一个晴空个例中 4 个时刻的垂直径向速度廓线图。由统计分析得出, 在稳定性降水和阵性降水过程中, 垂直径向速度主要分布在 4 ~ 10 m/s 之间, 晴空天气下垂直径向速度主要分布在 -1 ~ 1 m/s 之间, 所以当垂直径向速度大于 4 m/s 时认为数据受到降水干扰。

2.2.3 建立关于垂直径向速度和信噪比的判别函数

将垂直径向速度 V 作为 x 轴, 信噪比 S_{NR} 值作为 y 轴, 两种天气条件下的数据分布如图 3 所示, 采用线性回归法^[14]得到判别函数: $L = -55 + 17.54 \times V + S_{NR}$ 。其中: V 是垂直径向速度, 单位为 m/s; S_{NR} 是信噪比, 单位为 dB。当 $L > 0$ 时, 认为数据受到了降水干扰, 当 $L < 0$ 时, 认为数据是晴空回波数据。

2.2.4 建立关于垂直径向速度和谱宽的判别函数

将垂直径向速度作为 x 轴, 将谱宽值作为 y 轴, 两种天气条件下的数据分布如图 4 所示, 采用线性回归法^[14]得到判别函数: $L = -5.7 + 1.7 \times V + S_{PE}$ 。其中: V 是垂直径向速度, 单位为 m/s; S_{PE} 是谱宽, 单位为 m/s。当 $L > 0$ 时, 认为数据受到了降水干扰, 当 $L < 0$ 时, 认为数据是晴空回波数据。

2.2.5 建立关于垂直径向速度、谱宽与其对应的晴空估计值的差的判别函数

对晴空天气下的数据进行统计平均得到谱宽的估计值为 1.12 m/s, 垂直径向速度的估计值为 0.19 m/s。

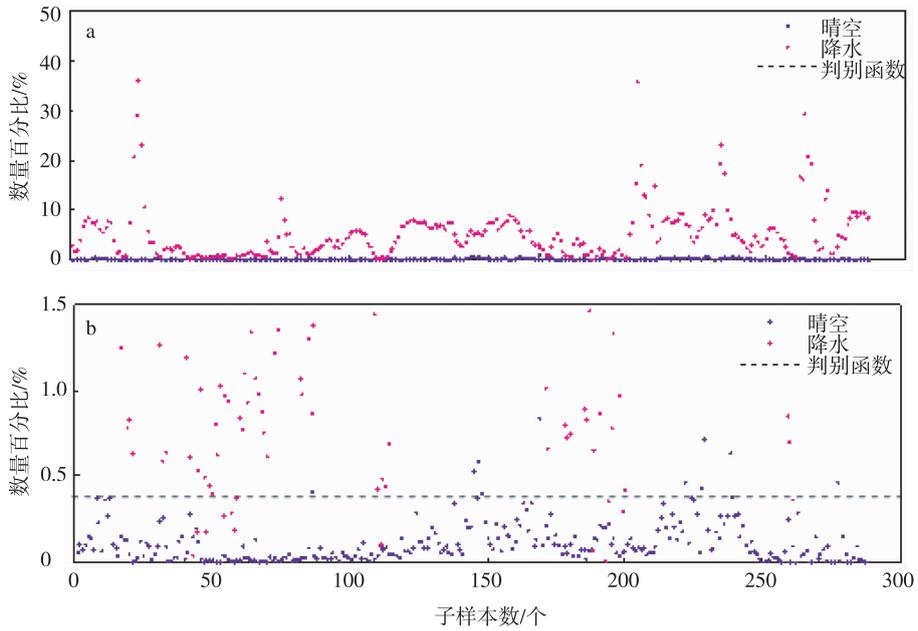


图 1 晴空数据与受降水干扰的数据叠加 (a) 及 0.5% 附近的局部放大 (b)

Fig. 1 (a)Overlap of clear air data and precipitation contaminated data and (b)enlarged image of figure 1(a) around 0.5%

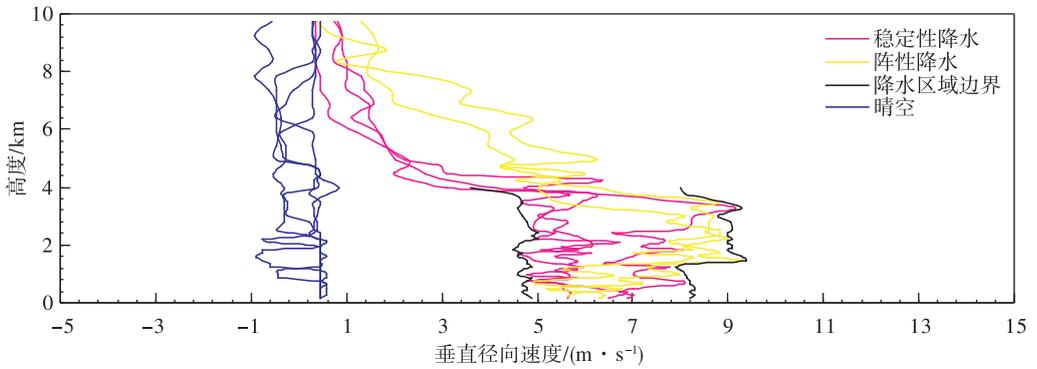


图 2 降水和晴空个例的垂直径向速度—高度廓线

Fig. 2 Vertical radial velocity-height profiles in precipitation and clear air cases

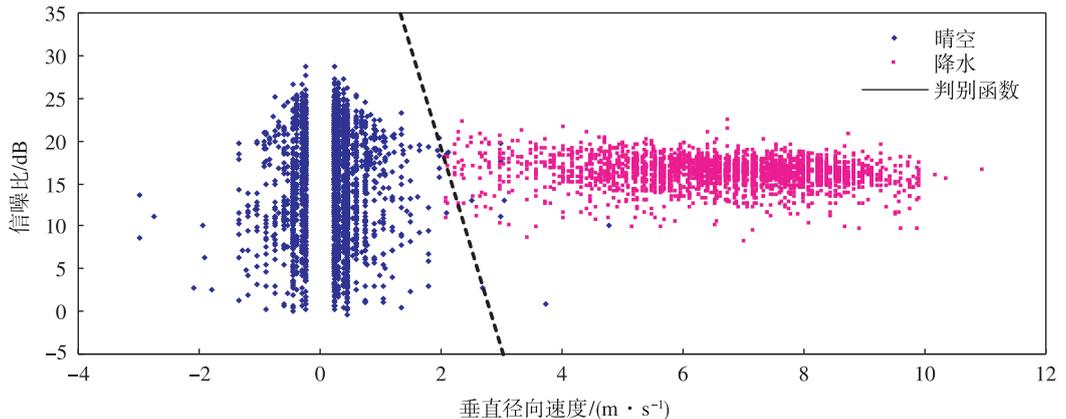


图 3 晴空数据与受降水干扰的数据叠加分布 (垂直径向速度—信噪比)

Fig. 3 Overlapped distribution of clean air data and precipitation contaminated data (vertical radial velocity-S_{NR})

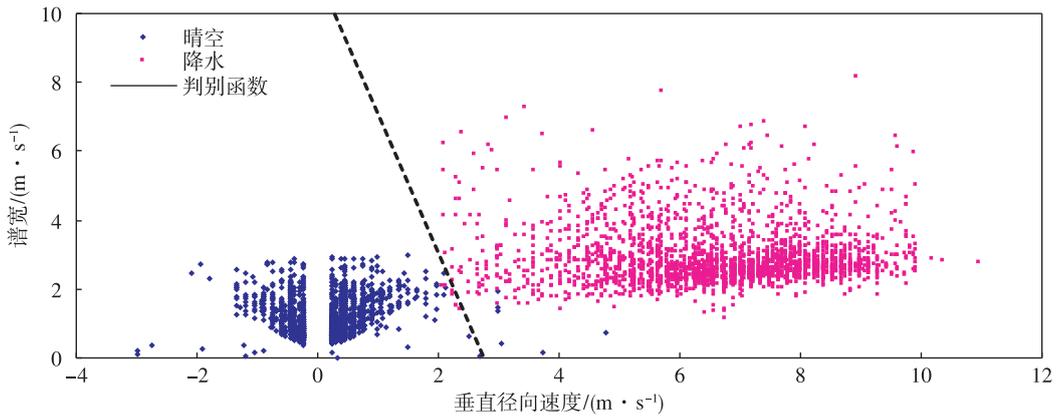


图 4 晴空数据与受降水干扰的数据叠加(垂直径向速度—谱宽)

Fig. 4 Overlap of clean air data and precipitation contaminated data (vertical radial velocity-spectral width)

将待测试数据分别减去对应的估计值后得到定义的两个参数 $R_{MV,dev}$ 和 $R_{SW,dev}$, 以 $R_{MV,dev}$ 为 y 轴, 以 $R_{SW,dev}$ 为 x 轴, 两种天气条件下的数据分布如图 5 所示, 由此估计出 $a = 2.1$ 、 $b = 0.26$ (图 5 中虚线所示), 即 $L = \frac{R_{MV,dev}}{2.1} + \frac{R_{SW,dev}}{0.26}$, 并基于图中所示的不对称性分布, 假设由降水数据计算得到的 L 值比晴空时大, 采用线性回归法^[14] 得到 L 的阈值为 4.85, 当 L 大于 4.85 时, 认为数据受到了降水干扰。

2.3 结果分析

选用试验数据中另外一组已知的晴空和受降水干扰的数据对上述各方法的性能进行测试, 测试结果见表 2。

采用直接测量得到的功率谱密度进行判别的计算结果与高度和时间都无关, 它是在计算谱矩等参数之前就首先判断信号是否受到了降水干扰, 不涉及之后的计算带来的误差。但是这种计算方法只能对一个时刻的所有距离库进行统一判断, 而不能对各距离库的数据分别进行判断。此外, 在降水发生

表 2 判别方法性能测试结果

Table 2 Test result of all the methods

方法	晴空条件下判断 正确率/%	降水条件下判断 正确率/%
方法(一)	96.53	98.26
方法(二)	99.88	89.59
方法(三)	99.5	99.45
方法(四)	99.5	99.55
方法(五)	97.23	93.86

时刻的前后, 由于大气中的水汽含量较高, 即使粒子没有垂直下落速度, 返回的功率密度值也比较大, 采用这种方法时就会造成判断误差。

采用垂直径向速度的方法对判别晴空数据效果较好, 但对于受到降水干扰的数据来说, 当雨滴直径较小或垂直下落速度较慢时, 垂直径向速度会比较小, 就会产生误差。这种方法与雨量、高度等因素的相关性太高, 不容易给出比较精确的判别阈值, 在降水条件下的判断正确率为 89.59%, 在上述方法中最低。

建立关于垂直径向速度和信噪比、垂直径向速度和谱宽的判别函数, 选取的数据与高度和时间无

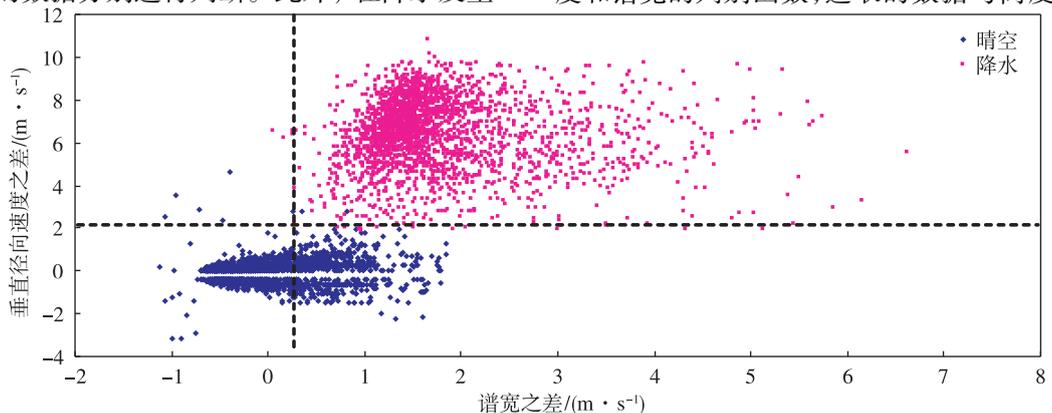


图 5 晴空数据与受降水干扰的数据叠加分布(垂直径向速度之差—谱宽之差)

Fig. 5 Overlapped distribution of clean air data and precipitation contaminated data ($R_{SW,dev} - R_{MV,dev}$)

关,可以判断任意高度的数据是晴空回波数据还是受到了降水的干扰的数据。而且由于垂直径向速度和信噪比以及谱宽在降水天气下增加比较明显,所以这两种方法在降水天气下判断正确率达到了99%以上。

建立关于垂直径向速度、谱宽与其对应的晴空估计值的差的判别函数,选取的数据与高度和时间的相关性很小,也可以对任意高度的数据进行判断。但是在选取晴空天气下的估计值时,会产生一定的误差。

3 讨论

(1)在用垂直速度、谱宽与其对应的晴空估计值的差作对比的方法中,求取垂直径向速度和谱宽在晴空天气下的估计值时通过统计分析发现,两者随着高度的增加有一定的变化,特别是谱宽随高度的增加变化较为明显。本文采用整个高度的统计平均值代表每个高度的估计值会带来一定的误差,可能对方法的判断正确率造成了一定的影响。

(2)对2007年6—8月观测资料的分析发现,接近地面高度上的探测结果,常因地物等信号的干扰而难以得到较为明确的判断,一般在2 000 m及其以下,因地物干扰产生的垂直径向速度有时甚至会达到15 m/s以上,需要对这些干扰信号和降水干扰加以区分。

(3)本文在给出各种方法的阈值或者判别函数时,都是基于所选取的试验数据,所以在数据选取时,尽可能多的包括了多种降水类型,但是对降水发生前后和降水发生时刻的区分较为粗略,主要依据垂直径向速度的大小进行区分,这可能也带来了一定的误差。比如在阵性降水发生前,因为空气的垂直运动非常强烈,垂直径向速度和速度谱宽比较大,可能会被误判断为降水产生的信号^[15]。

4 结论

本文通过对UHF风廓线雷达的探测数据进行分析,给出了5种判别降水数据方法的具体计算参数,性能测试结果表明上述5种方法在晴空天气下判断正确率较高,都达到了96%以上,在降水天气下判断正确率都在89%以上,其中采用垂直径向速度和信噪比以及垂直径向速度和谱宽的相互关系进行判断,正确率均达到了99%以上。

目前,国内普遍采用垂直径向速度阈值法对是否受到降水干扰进行判断,从上述测试结果中可以看出,这种方法尽管在晴空天气下的正确率最高,但

在降水天气下判断正确率仅为89.59%,是几种方法中最低的,建议在对数据质量要求较高的情况下,采用建立关于垂直径向速度和信噪比以及关于垂直径向速度和谱宽的判别函数方法进行判断。

参考文献:

- [1] Applied Meteorology Unit. Data quality assessment methods for the eastern range 915 MHz wind profiler network [R]//NASA Contractor Report NASA/CR-1998-207906. 1998.
- [2] Ralph F M, Neiman P J, Van de Kamp D W, et al. Using spectral moment data from NOAA's 404-MHz radar wind profiler to observe precipitation [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1995, 76 (10): 1717-1739.
- [3] Ecklund W L, Gage K S, Williams C R. Tropical precipitation studies using a 915-MHz wind profiler [J]. Radio Sci, 1995, 30 (4): 1055-1064.
- [4] Lambert W C, Merceret F J, Taylor G E, et al. Performance of ifve 915-MHz wind profilers and an associated automated quality control algorithm in an operational environment [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2003, 20: 1488-1495.
- [5] Steiner A, Richner H. Separation of clear-air echoes from precipitation echoes in UHF wind profiler measurements [J]. Ann Geophys, 1994, 12: 497-505.
- [6] Ralph F M, Neiman P J, Uffieux D. Precipitation identification from radar wind profiler spectral moment data: Vertical velocity histograms, velocity variance, and signal power-vertical velocity correlations [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 13: 545-559.
- [7] McDonald A J, Carey-Smith T K, Hooper D A, et al. The effect of precipitation on wind-profiler clear air returns [J]. Ann Geophys, 2004, 22: 3959-3970.
- [8] Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G, et al. Effects of precipitation on UHF wind profiler measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1988, 5: 450-465.
- [9] 何平. 相控阵风廓线雷达 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 42-61.
- [10] 嵇驿民, 王宝瑞, 张培昌. 计算雷达截面的积分方程法 [J]. 南京气象学院学报, 1991, 14 (1): 61-72.
- [11] 王丽荣, 胡志群, 汤达章, 等. 多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用 [J]. 气象科学, 2007, 27 (6): 695-701.
- [12] 普贵明, 鲁亚斌, 周国莲, 等. 2007年云南7次强降水过程的分析研究 [J]. 气象科学, 2008, 28 (6): 683-688.
- [13] 封秋娟, 牛生杰, 雷恒池, 等. 吉林省一次层状云降水宏微观特征的观测研究 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (6): 770-778.
- [14] 濮文耀, 魏鸣, 李红斌, 等. 线性回归模型的最小二乘法基本假设在Z-I关系拟合中的应用 [J]. 气象科学, 2008, 28 (6): 644-648.
- [15] 耿建军, 顾松山, 陈钟荣, 等. 新一代天气雷达谱宽资料分析晴空回波特征的探讨 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (6): 814-818.