

汪学渊,阮征,李效东,等. 2016. 雨滴谱仪与风廓线雷达反射率对比试验. 气象, 42(1): 107-114.

# 雨滴谱仪与风廓线雷达反射率对比试验<sup>\* 1</sup>

汪学渊<sup>1</sup> 阮 征<sup>2</sup> 李效东<sup>1</sup> 黄丽芬<sup>3</sup> 韩伟中<sup>1</sup>

1 福建省大气探测技术保障中心,福州 350008

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 福建省气象台,福州 350001

**提 要:** 针对风廓线雷达估算的反射率数据需要进行验证,开展雨滴谱仪与风廓线雷达反射率对比试验,通过两种不同探测设备观测数据的对比,以验证风廓线反射率数据的可靠性和可用性。结果表明:确定了以风廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率与 3 min 雨滴谱反射率数据对比方法能最大程度的减少时空差异;在雨滴谱仪反射率小于 40 dBz 时,对应的风廓线雷达反射率数据是可靠和可用的;同时由于风廓线雷达有限的动态范围造成反射率低估的现象,使得风廓线雷达反射率在大气垂直结构以及微物理特性等方面应用受到一定的局限性。

**关键词:** 风廓线雷达,雨滴谱仪,反射率,对比试验

**中图分类号:** P414

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2016. 01. 013

## Comparison of the Reflectivities of Wind Profile Radar and Raindrop Disdrometer

WANG Xueyuan<sup>1</sup> RUAN Zheng<sup>2</sup> LI Xiaodong<sup>1</sup> HUANG Lifan<sup>3</sup> HAN Weizhong<sup>1</sup>

1 Support Center for Atmospheric Observation Technology, Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou 350008

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001

**Abstract:** Focusing on the need that the reflectivity data estimated by wind profile radar should be validated comparison experiment of the reflectivities of wind profile radar (WPR) and the raindrop disdrometer was carried out. Through the comparison of the detection data from the two kinds of detection equipments the reliability and usability of the wind profiler radar reflectivity is tested. The results show that the contrast method between the reflectivity of the low mode 360—1440 m of the wind profile radar and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer is determined to reduce the temporal and spatial differences in maximum extent. When the raindrop disdrometer reflectivity is less than 40 dBz, the wind profile radar reflectivity data are reliable and available. At the same time, the limited dynamic range of the wind profile radar causes the phenomenon of underestimated reflectivity so that the application of the wind profile radar reflectivity is limited somewhat in the atmospheric vertical structure and microphysical properties and so on.

**Key words:** wind profile, raindrop disdrometer, reflectivity, comparison test

\* 福建省气象局业务类科研专项项目(2013y04)资助

2014 年 11 月 6 日收稿; 2015 年 7 月 17 日收修定稿

第一作者:汪学渊,主要从事天气雷达和风廓线雷达探测与应用研究. Email:wxy\_976@163.com

## 引言

风廓线雷达采用脉冲多普勒技术,通过垂直指向波束和偏离天顶指向  $15^\circ$  的 4 个波束指向对大气的探测,获取晴空大气中三维风随高度的分布,目前已在大气探测业务中得到广泛的应用。当大气中出现降水时,降水质点散射返回的电磁波信号强度要比晴空大气强得多,风廓线雷达获得的多普勒信息主要是降水质点运动的综合结果,从而获得信噪比、径向速度、速度谱宽信息。专家学者利用风廓线雷达垂直探测距离分辨率高的特性对测站上空降水云体进行垂直结构的研究。阮征等(2002)通过雷达气象方程获取探测空间附近的降水回波强度垂直剖面结构、云中降水含水量以及平均多普勒速度进行了研究。利用风廓线雷达提供的信噪比、垂直速度等多种资料对降水过程进行了分析(何平等,2009;汪学渊等,2013;施红蓉等,2014;王令等,2014;明虎等,2014)。王晓蕾等(2010)利用风廓线雷达开展探测降水云体中雨滴谱的试验研究,拓展了风廓线雷达的应用范围。

由于风廓线雷达提供降雨强度信息只有信噪比,而信噪比随着高度逐渐减小,并不能完全反映波束采样体积内降雨强度,利用雷达气象方程获取的降雨反射率能够反映雷达波束采样体积内降雨强度,对于了解降雨过程的垂直结构以及反演云体中雨滴谱分布都提供了重要信息。本文不再进行风廓线雷达在降雨方面的应用,而是从观测的角度出发分析风廓线雷达探测数据的可靠性和一致性,也是科学研究的前提和基础,具有十分重要的意义。张旭斌等(2015)利用经验正交函数(EOF)分析方法对风廓线雷达观测数据进行质量控制研究;汪学渊等(2015)通过对风廓线雷达数据进行统计特性分析给出了改进观测数据质量的合理建议;张昊等(2012)通过处理多普勒雷达的观测资料和降水雨滴谱资料,用 Parsivel 激光降水粒子谱仪获得的谱数据通过瑞利散射计算回波强度,然后用此计算结果同雷达观测的回波强度进行比较,得出两者具有较好的一致性,但是雷达观测却低估了回波强度,并且在降水越强导致回波强度越大的时候,雷达探测结果低估现象更为严重。周黎明等(2010)把自动气象站

和激光雨滴仪同步观测得到的雨量资料,结合新一代多普勒雷达基数据获得的反射率因子一起对比分析,结果表明激光雨滴谱仪和自动气象站探测的雨量随时间的变化相关性较好,但其前者的幅度值远大于后者的幅度值,而相比之下雷达探测得到的反射率因子与激光雨滴谱仪探测的雨量却有更好的一致性。苗少宝等(2010)运用激光雨滴谱仪获取的试验数据,也是运用瑞利散射计算反射率因子然后与其他气象数据进行对比分析,结果表明两者变化趋势较一致但变化强度有差异。综上所述可以看出,雨滴谱仪作为一种雷达降雨反射率的验证方式得到了广泛的应用。

因此本文提出了利用雨滴谱仪进行风廓线雷达降雨反射率对比试验,由于雨滴谱仪和风廓线雷达探测降雨存在时空差异,为了减小这种差异,采用了三种对比方法进行分析,选取最佳方法作为雨滴谱仪和风廓线雷达的最终对比方案,以检验风廓线雷达观测降雨数据的可靠性和可用性。

## 1 设备与数据

### 1.1 设备介绍

对比试验所采用的仪器有 CFL-03 型风廓线雷达、Parsivel 激光雨滴谱仪和 0.1 mm 翻斗式雨量筒,风廓线雷达选择在观测环境良好的福建永安风廓线雷达站( $25.94528^\circ \text{N}$ 、 $117.36944^\circ \text{E}$ ,海拔 253 m)。该雷达 2012 年稳定运行至今,其技术指标如表 1 所示,雷达的发射频率为 1320 MHz 的低/高模 5 波束探测。

表 1 永安 CFL-03 型风廓线雷达技术指标

Table 1 Technical indicators of wind profile radar CFL-03 in Yong'an

永安 CFL-03 型风廓线雷达技术指标			
发射频率	1320 MHz	天线波束	5 波束
发射峰值功率	2.0 kW	天线波束宽度	$4.5^\circ$
低模探测高度	60~1500 m	高模探测高度	600~7080 m
低模距离库分辨率	60 m	高模距离库分辨率	120 m
5 波束探测周期	3 min	脉冲宽度	$0.8 \mu\text{s}$

激光雨滴谱仪采用 HSC-PS32 雨滴谱监测仪,采用平行激光束为采样空间,光电管阵列为接收传感器,当有降水粒子穿越采样空间时,自动记录遮挡物的宽度和时间,从而计算降水粒子的尺度和速度,经过 1 min 累积给出降雨反射率,0.1 mm 翻斗式雨量筒采用 CAWS100 型自动气象站;安装 0.1 mm 翻斗式雨量筒主要是为了验证雨滴谱仪数据的可靠性和可用性,以确保雨滴谱仪验证风廓线雷达时数据的准确性。如图 1 所示为风廓线雷达、雨滴谱仪和雨量筒位置分布图,图中雨滴谱仪和雨量筒安装在距离风廓线雷达 30 m 处的位置,四周环境无遮挡,观测条件良好,保证试验数据的可靠性。



图 1 风廓线雷达、雨滴谱仪和雨量筒位置分布图

Fig. 1 The distribution of WPR, raindrop disdrometer and rain gauge

## 1.2 数据采集

雨滴谱仪和雨量筒安装时间为 2013 年 10 月,雨滴谱仪运行至 2014 年 5 月由于强雷暴天气造成雨滴谱仪采集板损坏,为了避免再次损坏,雨滴谱仪由原先的市电供电系统整改为由太阳能电池板供电,将大大减少由雷击造成的损坏。雨滴谱仪再次运行时间为 2014 年 9—11 月,因此雨滴谱仪可利用的降雨数据为 2013 年 10 月至 2014 年 5 月总共 7 个月的时间,而 2014 年 6—8 月三个月的雨季降雨数据由于雷击而造成缺测,使得可利用的降雨数据大大减少;最后经过数据的统计,总共有三次降雨数据可以利用,第一次为 2014 年 4 月 23 日 06—18 时的降雨过程,生成风廓线径向速度 RAD 文件 153 个,对应的垂直方向信噪比数据 153 组;第二次为 2014 年 11 月 7 日 18 时至 8 日 04 时的降雨过程,生成风廓线径向速度 RAD 文件 190 个,对应的垂直

方向信噪比数据 190 组;第三次为 2013 年 11 月 24 日 12—16 时的降雨过程,生成风廓线径向速度 RAD 文件 82 个,对应的垂直方向信噪比数据 82 组。

## 2 风廓线雷达和雨滴谱仪反射率的估算及对比方法

### 2.1 风廓线雷达降雨反射率的估算

风廓线雷达对降水云体探测时,估算回波强度的基本公式仍可采用 Probert-Joss 的雷达气象方程,由于波长 0.227 m 与降水质点直径的比值比较大,其质点对电磁波的散射更符合瑞利散射;利用雷达气象方程,引入信噪比( $S/N$ )可以估算雷达反射率因子  $Z$  的计算公式可表示为(阮征等,2008;张培昌等,2001)

$$Z = \frac{1024 \ln 2}{0.93 \pi^3 C} \cdot \frac{\lambda^2 K T_0 B N_f}{P_t C_e \tau \theta \varphi} \cdot \frac{S}{N} \cdot R^2 \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为风廓线雷达的发射波长, $T_0$  是用绝对温度表示的雷达天线温度, $B$  为接收机带宽, $N_f$  是噪声系数, $P_t$  为风廓线雷达天线处的发射峰值功率, $G_e$  为天线增益, $\tau$  为雷达发射的脉冲宽度, $\theta$ 、 $\varphi$  分别为水平及垂直波束宽度,以上参数由风廓线雷达的主要性能指标决定;其他参数  $R$  为目标物距离雷达天线的距离, $S/N$  为回波信号的信噪比, $C$  是光速, $K$  是玻尔兹曼常数。式(1)可以简化为式(2):

$$Z = C_1 \cdot \frac{S}{N} \cdot R^2 \quad (2)$$

式中, $C_1$  为常数。可以看出雷达反射率因子  $Z$  与回波信号的信噪比及探测距离的平方呈线性对应关系。

说明一点的是,风廓线雷达探测为 5 波束(中、东、南、西、北)高/低模式探测,在估算风廓线雷达降雨反射率时都是采用低模垂直波束即中波束进行估算,因此以下有提及风廓线雷达反射率都是指低模垂直波束的反射率(何平,2006)。

### 2.2 雨滴谱仪雷达反射率的估算

雨滴谱是指根据半径的不同确定雨滴个数的分布,常用到单位体积内粒子数对谱分布进行计算。雨滴谱仪所测的个数是指采样面积,因此,何雪松等

(2009)提出在计算时需要把面积浓度转换为体积浓度,可以按如下公式计算雨滴谱仪的雷达反射率因子:

$$Z = \frac{1}{(ST)} \cdot \sum_{i=1}^{35} \frac{N_i}{V(D_i)} \cdot D_i^6 \quad (3)$$

式中,  $N_i$  表示 HSC-PS32 雨滴谱仪第  $i$  个通道的雨滴数目,单位为个;  $D_i$  表示雨滴谱仪第  $i$  个通道所对应的雨滴直径,单位为 mm;  $S$  表示雨滴谱仪的采样面积,  $S = 45 \text{ cm}^2$ ;  $T$  为采样时间,  $T = 60 \text{ s}$ .  $V(D_i)$  表示直径为  $D_i$  的雨滴降落末速度. 对式(3)进行  $10\log(Z)$  就得到雨滴谱仪 1 min 雷达反射率.

### 2.3 风廓线雷达与雨滴谱仪反射率对比方法

雨滴谱仪测量的是地面降雨反射率,而风廓线雷达探测的是测站上空降雨的反射率,两者之间存在着时空不一致的问题,为了能够尽可能减少两者时空差异,因此,在雨滴谱仪和低模的垂直波束(以下简称低模)进行对比时分成 3 种方法,以判断出最佳的对比方法,其方法如下:

(1) 利用风廓线低模 360 m 高度上的反射率(1 个距离库)和相对应的 1 min 雨滴谱仪反射率对比,假设雨滴从 360 m 高度以  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的平均速度下落,到达地面的时间为 60 s,因此将风廓线低模的数据延迟 1 min 与雨滴谱仪在时间上一致的数据进行对比.

(2) 利用风廓线低模 360~720 m 采样体积内的反射率(6 个距离库)与相对应的 1 min 雨滴谱仪反射率对比,假设雨滴从 360 m 高度以  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的平均速度下落,到达地面的时间为 60 s,但是雨滴谱仪数据的时间分辨率为 1 min,那么从 360~720 m 高度上的雨滴完全穿过雨滴谱仪的时间为 1 min,将风廓线低模的数据延迟 2 min 与雨滴谱仪在时间上一致的数据进行对比.

(3) 利用风廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率(18 个距离库)与相对应的 3 min 雨滴谱仪反射率数据对比,由于风廓线低模信噪比的时间分辨率为 3 min,雨滴谱仪数据的时间分辨率为 1 min,为了使风廓线数据和雨滴谱仪数据的时间分辨率达到一致,且充分利用雨滴谱仪数据,那么从 1440 m 高度上的雨滴下落到地面的时间刚好为 3 min,因此重新计算廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率与相对应的 3 min 雨滴谱仪反射率.

## 3 风廓线雷达与雨滴谱仪反射率的对比分析

### 3.1 风廓线低模 360 m 高度上的反射率和 1 min 雨滴谱仪数据对比分析

由于雨滴谱仪故障的原因,可利用的降雨数据偏少,此次对比采用 2014 年 4 月 23 日 07—17 时的降雨数据,降雨长达 10 h,可利用降雨数据量比较大,如图 2 所示的雨滴谱仪和雨量筒的小时降雨量对比,从图中可以看出,雨滴谱仪测量的降雨量和雨量筒的降雨量一致性良好,并且准确性和 0.1 mm 雨量筒一致,雨滴谱仪数据是可信的.但是在强降雨时,雨滴谱仪的降雨量明显偏高于雨量筒的降雨量 1 mm,说明雨滴谱仪在测量强降水时有过估的现象,但是都在合理的范围之内(胡子浩等,2014;周黎明等,2010).

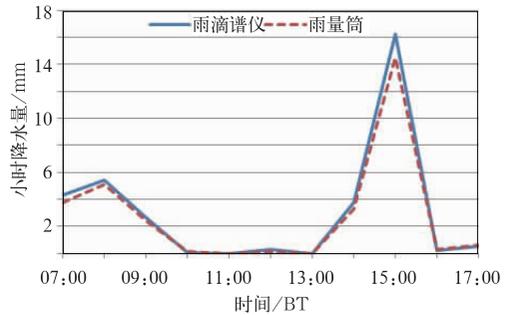


图 2 雨滴谱仪与雨量筒小时降水量曲线  
Fig. 2 The hourly rainfall curve of raindrop disdrometer and rain gauge

与之对应风廓线雷达的低模垂直波束信噪比和降雨反射率如图 3 所示,横坐标为时间序列,纵坐标为垂直探测高度,时间序列一个点表示雷达一次完整探测周期 3 min,高度为采样目标到达雷达天线的距离,在图 3a 中,信噪比的大小是随着高度的增加而减小的,在 360 m 以下受到地物的干扰造成信噪比数据不可用;在图 3b 中降雨反射率随高度逐渐增强,360 m 以下降雨反射率下降为 0 dBz,为了排除干扰,剔除 360 m 以下的数据,将 360~1500 m 高度上的降雨反射率数据参与对比.

利用风廓线低模 360 m 高度上的反射率和相对应的 1 min 雨滴谱仪数据对比如图 4 所示,图 4a 为两者的实时序列对比,红色为风廓线降雨反射率,

黑色为雨滴谱仪反射率,图 4b 为两者反射率之差的概率密度分布曲线,从图 4a 中可以看出,两者反射率之间的差异很大,一致性也不好;图 4b 中,风廓线雷达的反射率明显偏小很多,雨滴谱仪与风廓线雷达反射率差值的平均值为 30 dBz,其差值的标准差为 7.04 dBz,造成这一差异的原因:两者采集的时间不同,风廓线雷达的垂直波束一次探测时间为 2 s,到下一次进行垂直探测在 3 min 后,而雨滴谱仪采集数据为实时累积采集,时间以 1 min 为单位计算 1 min 内降雨反射率。因此雷达探测是瞬间探测,而雨滴谱仪是连续累积的过程,从而造成两者采集样本有很大的差异,导致计算出的反射率差异很大。

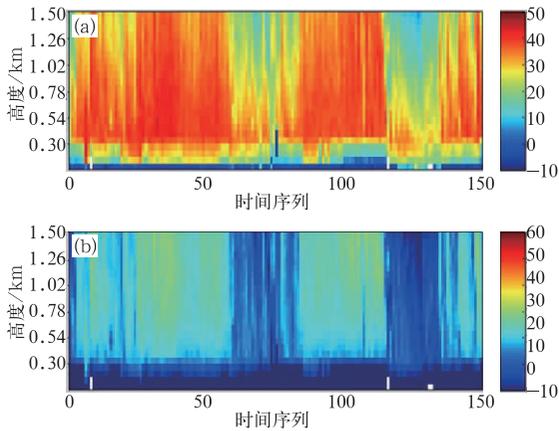


图 3 (a)低模信噪比随高度分布图,  
(b)低模反射率随高度分布图

Fig. 3 (a) SNR distribution of WPR with height,  
(b) reflectivity distribution of WPR with height

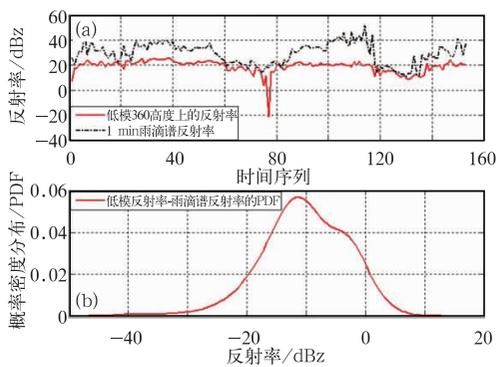


图 4 (a)低模 360 m 和 1 min 雨滴谱仪  
反射率实时序列对比, (b)两者之差  
的概率密度分布

Fig. 4 (a) Real-time sequence comparison  
between reflectivity of WPR at 360 m height and  
the reflectivity of 1 min raindrop disdrometer,  
(b) PDF of the difference between the two

假设把 360 m 高度上的降雨粒子群看做一个质点,质点以  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度垂直降落,那么质点到达地面的时间刚好为 1 min,也就是说地面雨滴谱仪刚好接收到从 360 m 下落的质点。

假设把雷达上空 360~720 m 采样体积内的降雨粒子群看做一个垂直的水柱垂直下落,同样以  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度下落,那么水柱完全穿过地面雨滴谱仪的时间刚好也为 1 min。因此,下面将风廓线 360~720 m 采样体积内的降雨反射率与 1 min 雨滴谱仪反射率进行对比,这样两者在样本采集的一致性才能互相匹配。

### 3.2 风廓线低模 360~720 m 采样体积内的反射率与 1 min 雨滴谱仪数据对比分析

利用风廓线低模 360~720 m 采样体积内的反射率与相对应的 1 min 雨滴谱仪数据进行对比,从图 5a 中可以看出,两者之间的一致性和变化趋势比图 4a 更好。但是,当雨滴谱仪的反射率大于 40 dBz 时,风廓线的反射率始终小于 40 dBz,例如在图 5a 的时间序列点 10 和点 100—117 上都存在着这样的现象,同时反映在图 5b 中存在 -15 dBz 左右一定数量的差值,图中雨滴谱仪与风廓线反射率差值的平均值为 2.54 dBz,其差值的标准差为 5.84 dBz。原因有可能有:(1) 雨滴谱仪在测量大粒子雨滴时有过估现象,在试验同一地点安装了 0.1 mm 的雨量筒,通过累计降雨量对比发现,雨滴谱仪计算的降

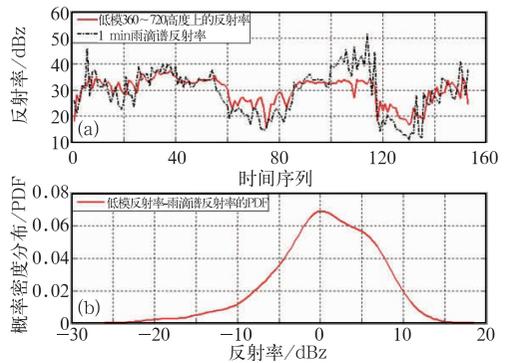


图 5 (a)低模 360~720 m 和 1 min 雨滴谱仪  
反射率实时序列对比, (b)两者之差  
的概率密度分布

Fig. 5 (a) Real-time sequence comparison  
between the reflectivity of WPR in the height of  
360—720 m and the reflectivity of 1 min  
raindrop disdrometer, (b) PDF of the difference  
between the two

雨量要高于 0.1 mm 雨量筒平均 10% 的现象,因此在强反射率对比中雨滴谱仪有高估的现象;(2)也可能与风廓线雷达有限的动态范围有关,从而造成信噪比提前饱和,导致风廓线雷达反射率低估的现象(Christopher et al, 2005; Kenneth et al, 2000)。

风廓线雷达垂直信噪比的时间分辨率为 3 min,而雨滴谱仪的时间分辨率为 1 min,在图 5 的对比中就必须舍弃 2 min 雨滴谱仪数据,从而造成降雨过程的不连续,为了充分利用雨滴谱仪数据,使两者采样时间一致。假设雷达上空 360~1440 m 采样体积内的降雨粒子群看做一个垂直水柱垂直下落,同样以  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度下落,那么水柱完全穿过地面雨滴谱仪的时间为 3 min,将风廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率与相对应的 3 min 雨滴谱仪反射率进行对比。

### 3.3 风廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率与 3 min 雨滴谱仪反射率数据对比分析

利用风廓线低模 360~1440 m 采样体积内的反射率与相对应的 3 min 雨滴谱仪反射率数据对比,如图 6 所示,图 6a 为低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率实时序列对比;图 6b 为低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布;图 6c 为两者之差的概率密度分布,其平均差值为 2.12 dBz,标准差为 4.92 dBz。

在图 6 中,两者之间的一致性和变化趋势比图 5 得更好,两者的概率密度分布存在很大的差异,很明显雨滴谱仪超过 40 dBz 的数量远大于风廓线雷达的,同样存在着当雨滴谱仪反射率大于 40 dBz 时,风廓线对应反射率却总是在 40 dBz 以下,这很可能的原因是跟风廓线雷达有限的动态范围有关,造成在强降雨时信噪比提前饱和,从而导致风廓线雷达降雨反射率低估。

在图 6c 上也可看出曲线的左方存在着差值为 -10 dBz 以上概率分布,从而造成概率密度分布两边不对称,但比图 5b 中概率密度分布图有着更好的分布效果,其两者差值的平均值和标准差都比图 5b 中的小,说明此方法比前面的效果更好。

如果将雨滴谱仪的强降水阶段超过 40 dBz 的数据移除,与之相应的风廓线雷达反射率也同时移除,然后进行两者之间的对比和概率分布,两者的实时序列也更加趋于一致,其概率分布也更加集中于 0 值附近。

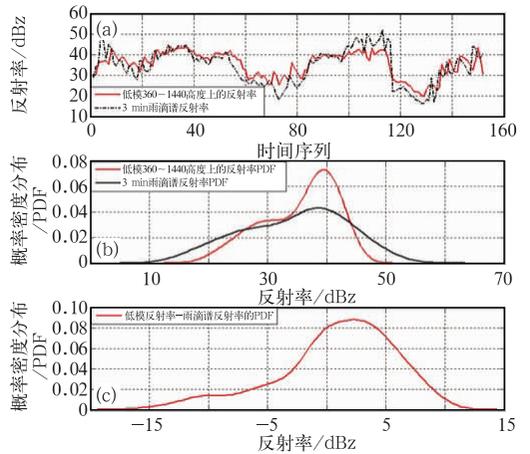


图 6 (a)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率实时序列对比, (b)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布, (c)两者之差的概率密度分布

Fig. 6 (a) Real-time sequence comparison between the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (b) PDF of the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (c) PDF of the difference between the two

### 3.4 最终对比分析

按照第 3.3 节的对比方法加上移除风廓线反射率低估的数据,再进行两者之间对比,对比结果如图 7 所示,两者的变化趋势基本一致,两者反射率数值变化一致性程度高。但是由于时间上的差异,风廓线每 3 min 采样一次,而雨滴谱仪连续实时采样,而且在计算下落时间是以平均速度  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  计算,也会造成误差,不可避免的造成两者变化趋势有平移的现象。在图 7b 中可以看出两者的概率密度分布,两条分布曲线近乎一致,虽然存在着一些差异,这跟两者各自的探测方式不同和探测时空上的差异有关,雨滴谱仪采样的是地面  $0.5 \text{ m}^2$  的采样面积,而风廓线雷达的采样体积达到  $1000 \text{ m}^3$  体积,因此两者之间的采样体积相差悬殊,而且雨滴从高空下落的过程中,由于蒸发、碰并等过程也会造成雨滴的形态发生变化,从而造成两者测量对象发生变化,导致测量上的误差。在图 7c 中,两者之差的概率密度分布曲线对称性良好,也符合高斯分布的形态,其差值平均值为 0.1 dBz,标准差为 3.46 dBz,说明雨滴谱仪可以作为风廓线雷达反射率的一种验证方式,检

验了风廓线雷达反射率数据是可靠和可用的,但其只适用于不超过 40 dBz 的弱降水中,强降雨中风廓线雷达反射率会造成低估的现象,在风廓线雷达反射率进行大气垂直结构的分析以及微物理特性等方面应用会受到一定的局限。

雨滴谱仪反射率实时序列对比,两者反射率变化趋势非常一致;图 9b 为低模 360~1440 m 和 3 min 雨

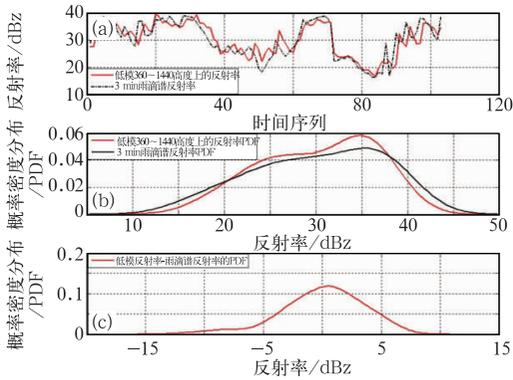


图 7 (a)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率序列对比, (b)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布, (c)两者之差的概率密度分布

Fig. 7 (a) Sequence comparison between reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (b) PDF of the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (c) PDF of the difference between the two

### 3.5 利用最终对比方法对两次降雨过程的检验

一次降雨过程为 2013 年 11 月 24 日 12—16 时,按照最终对比方法对雨滴谱仪超过 40 dBz 的反射率与相应的风廓线数据剔除之后进行对比,图 8a 为此次降雨过程低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率实时序列对比,两者反射率变化趋势的一致性良好,由于两者在选取数据时存在着一定的时间差,因此两者实时曲线会有平移的现象;图 8b 为低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布,可以看出两者数据的分布情况比较吻合;图 8c 为两者之差的概率密度分布,其平均差值为 1.3 dBz,标准差为 5.4 dBz。

一次层状云降雨过程为 2014 年 11 月 7 日 18 时至 8 日 04 时,此次降雨过程为弱降水,雨滴谱仪的反射率值都不超过 40 dBz,因此数据无需剔除,图 9a 为此次降雨过程低模 360~1440 m 和 3 min

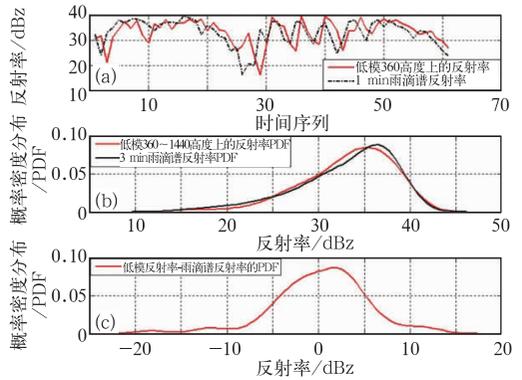


图 8 2013 年 11 月 24 日 12—16 时 (a)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率序列对比, (b)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布, (c)两者之差的概率密度分布

Fig. 8 (a) Sequence comparison between the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (b) PDF of the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (c) PDF of the difference between the two at 12:00 BT—16:00 BT 24 November 2013

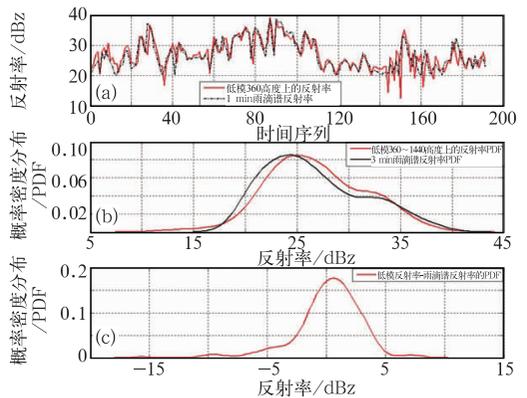


图 9 2014 年 11 月 7 日 18 时至 8 日 04 时 (a)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率实时对比, (b)低模 360~1440 m 和 3 min 雨滴谱仪反射率的概率密度分布, (c)两者之差的概率密度分布

Fig. 9 (a) Sequence comparison between reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (b) PDF of the reflectivity of WPR in the height of 360—1440 m and the reflectivity of 3 min raindrop disdrometer, (c) PDF of the difference between the two from 18:00 BT 7 to 04:00 BT 8 November 2014

滴谱仪反射率的概率密度分布,可以看出两者数据的分布情况比较吻合;图 9c 为两者之差的概率密度分布,其平均差值为 0.14 dBz,标准差为 2.9 dBz。

利用两次降雨过程对最终对比方法的正确性进行了检验,说明了雨滴谱仪和风廓线雷达进行降雨反射率对比的可行性,证明了风廓线雷达在一定的条件下降雨反射率的准确性和可靠性,拓展了风廓线雷达在降雨垂直探测的应用。

## 4 结论与讨论

通过风廓线雷达降雨反射率与雨滴谱仪反射率三种方法的对比,最终确定以风廓线低模 360~1440 m 采样体积内反射率与相对应的 3 min 雨滴谱仪反射率数据最佳的对比方法,由于风廓线雷达有限的动态范围造成反射率低估,进而在该方法的基础上移除低估的反射率,最终实现雨滴谱仪对风廓线雷达反射率的对比。从对比的结果来看,说明风廓线雷达反射率数据是可靠和可用的。但是在对比的过程中也存在一些问题,现总结如下:

(1) 风廓线雷达自身有限的动态范围。当强降雨时,风廓线雷达信噪比提前饱和,导致降雨反射率低估,这给风廓线雷达在降雨方面的应用受到了一定的限制。

(2) 风廓线雷达和雨滴谱仪在探测降雨的时间和空间上存在差异。从以上三种方法的对比结果来看,不同时空上的差异,会导致不一样的结果,不当的方法会直接导致对比的失败,因此不同设备在时间和空间的一致性决定着对比成功与否。

(3) 开展风廓线雷达和雨滴谱仪对比最好是选择比较平稳的降雨过程,特别是弱层状云降水,层状云降水过程受垂直气流的影响较小,高空雨滴谱的分布更加稳定,雨滴下落的过程中受到的干扰更小,时空差异也就更小。

## 参考文献

何平. 2006. 相控阵风廓线雷达. 北京:气象出版社,94-103.

- 何平,朱小燕,阮征,等. 2009. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. 应用气象学报,20(4):465-470.
- 何雪松,王瑞田,濮江平. 2009. Parsivel 雨滴谱仪数据处理方法及其应用//第五届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会专辑,214-216.
- 胡子浩,濮江平,张欢,等. 2014. Parsivel 激光雨滴谱仪观测强降雨的可行性分析和建议. 气象科学,34(1):25-31.
- 苗少宝,陆亦怀,桂华侨,等. 2011. 激光雨滴谱仪降水量反演及误差修正. 大气与环境光学学报,6(6):423-431.
- 明虎,王敏仲,阮征,等. 2014. 风廓线雷达对天山中部一次层状云降水过程的探测分析. 气象,40(12):1513-1521.
- 阮征,葛润生,吴志根. 2002. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报,13(3):330-338.
- 阮征,何平,葛润生. 2008. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究. 大气科学,32(1):133-140.
- 施红蓉,李峰,吴蕾,等. 2014. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析. 气象,40(10):1259-1265.
- 王令,王国荣,古月,等. 2014. 风廓线雷达垂直直径向速度应用初探. 气象,40(3):290-296.
- 王晓蕾,阮征,葛润生,等. 2010. 风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究. 高原气象,29(2):498-505.
- 汪学渊,李栋,任雍,等. 2013. 风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探. 气象,39(11):1431-1436.
- 汪学渊,汪波,文明章,等. 2015. 丘陵地区边界层风廓线雷达数据统计特性分析. 气象科学,35(3):328-333.
- 张昊,李靖. 2012. Parsivel 雨滴谱仪与多普勒天气雷达观测结果对比分析. 气象水文海洋仪器,2:16-19.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社,7-20.
- 张旭斌,万齐林,薛纪善,等. 2015. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用. 气象学报,73(1):159-176.
- 周黎明,王俊,张洪生,等. 2010. 激光雨滴谱仪与自动气象站观测雨量对比分析. 气象科技,38(增刊):113-117.
- Christopher R W, Kenneth S G, Wallace C. 2005. Monitoring the reflectivity calibration of a scanning radar using a profiling radar and a disdrometer. Amer Meteor Soc,22:1004-1018.
- Kenneth G, Christopher R W, Paul E J. 2000. Doppler Radar profilers as calibration tools for scanning radars. Appl Meteor,39:2209-2222.