

文章编号: 2096-1618(2021)06-0615-09

# 遵义地区一次暴雨雨滴谱特征及在雷达中的应用

温 凯, 王福增, 王秋淞, 周秋玲  
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**根据遵义地区的 OTT Parsivel 雨滴谱仪观测的一次暴雨雨滴谱资料、天气雷达观测资料以及自动站降水资料,对暴雨过程中的雨滴谱参数和雨滴谱分布特征进行分析,发现中粒径雨滴贡献率最大;质量加权平均直径和粒子数密度成负相关;在对平均雨滴谱拟合时发现, Gamma 分布在中粒径拟合效果比 M-P 分布好,而在大粒径和小粒径符合程度效果相差不大;比较雷达回波强度与雨滴谱特征参量的雷达反射率之间的关系,通过取 3 次平均来修正雷达回波强度,结果表明:修正后的数据和雨滴谱雷达反射率因子的相关系数高达 99.59%,且均方误差和平均绝对误差都很小;再构建修正后的天气雷达反射率因子与雨滴谱计算的雨强的  $Z-I$  关系,得到拟合的  $Z-I$  关系曲线  $Z=133.98I^{1.12}$ ,利用拟合的  $Z-I$  关系计算的雨强与用雨滴谱数据计算的雨强相关系数达到 99.53%。因此,通过雨滴谱参数修正后的雷达回波反射率可以准确估测降水。

**关键词:**雨滴谱;雷达反射率;雨强;遵义地区

**中图分类号:** TN959.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcui.2021.06.006

## 0 引言

采用 2020 年遵义地区一次暴雨过程中的雨滴谱资料,结合天气形势与当地的天气雷达观测资料,对降水特征进行分析,为了解遵义地区暴雨灾害的雨滴谱特征提供可靠依据。

通过相关公式计算平均雨滴谱、总粒子数浓度、降水粒子含量、雷达反射率、分钟雨强等雨滴谱特征参量。参考张洪胜等<sup>[1]</sup>对平均雨滴谱进行的 Gamma 分布和 M-P 分布的拟合方法,分析了 M-P(两参数)和 Gamma(三参数)分布对粒径平均雨滴谱的拟合效果。再根据濮江平等<sup>[2]</sup>对雨强与雷达反射率对比分析的方法,观察遵义地区天气雷达的雷达反射率变化,分析暴雨过程中雨强和雷达反射率的相关关系。将雨滴谱的数据和雷达回波的数据做比较,并用雨滴谱特征参量的雷达反射率修正天气雷达反射率因子,然后用修正后的雷达反射率数据构建合适的  $Z-I$  关系,最后对实验数据进行分析。发现修正后的雨强与雨滴谱仪测到的雨强很接近,得出结论:修正后的雷达回波反射率可以准确估测降水。这间接地验证了雨滴谱参数的可靠性,也体现了雨滴谱参数在雷达气象中的应用。

## 1 平台与设备

### 1.1 平台

Pycharm 是一种程序编写的 IDE,有调试、代码自

动跳转、智能显示、语法检测高亮等功能。此外,pycharm 还有额外的开发功能,即 Django 功能,同时 pycharm 还支持 google 构架编程。

采用 pycharm 编写程序的主要原因是此 IDE 在数据处理和图像显示方面具有方便、简单等优点。

### 1.2 设备

雨滴谱的数据来源于一款 OTT Parsivel 雨滴谱仪,是新型雨滴谱测量仪器,与传统测量仪器不同,该设备采用了激光测量的方法,用一个光学传感器元件对降水进行检测,可检测出多种类型的降水。Parsivel 降水粒子谱仪能够提供 60 s 的时间分辨率,每 5 min 一次数据存储。贵州地区的设备型号是 100 型,共有 32 个直径测量级和 32 个速度测量级,其直径测量范围为 0.062 ~ 24.5 mm,速度测量范围为 0.05 ~ 20.8 m/s。每一次采样间隔内的粒子谱测量数据都有  $32 \times 32 = 1024$  个。

实验雷达的数据来源于新一代的多普勒天气雷达,这是一种主动遥感的探测工具,具有较强的灵敏度,在测量云、降雨和各种强对流天气发生发展内在因素方面有重要的应用。雷达使用 SC 波段进行探测,所用数据有 9 层仰角,400 个径向,750 的距离库。数据格式是最新一代天气雷达基数据标准格式(CINRAD/CD)。

## 2 数据与方法

### 2.1 雨滴谱数据处理

实验使用的是贵州自动气象观测站的雨滴谱数

据,根据姚正兰等<sup>[3]</sup>的研究,遵义地区通常会在6月多发暴雨,故雨滴谱的数据选用时间为2020年6月。采用 Parsivel 雨滴谱仪5 min记录的数据,记录每种雨滴的类型,通过雨滴谱 BUFR 编码格式 1.0 版本进行解码,可利用一段时间内雨滴的类型,计算出各种雨滴谱的参量。图1是贵州气象观测站雨滴谱数据的编码格式。

雨滴谱编码数据格式				
指示段	标识段	描述段	数据段	结束段

图1 雨滴谱数据格式

需要注意的是,在这个数据段格式中有一个重要的编码规则。时间增量 01111111011 值为 2043,即 2048-2043=5 为5 min一次编报,说明数据编码格式是5 min存储一个文件,每5 min的数据又是按分钟编写的。通过延迟重复因子,每16位为一组,读到第一组非0数据,即为循环次数,共5组,表示5 min。

## 2.2 雷达数据处理

实验使用的是贵州遵义地区的气象雷达数据,以一天为基本单位分为不同文件夹,文件夹中的探测数据以5 min或者6 min储存一次写成一个 bin 文件。雷达基数据可分为径向数据块和公共数据块两部分。径向数据块保存了遵义地区天气雷达的探测资料,公共数据块保存了遵义雷达站点信息与相关任务配置参数信息。

要确定雨滴的空间位置,雷达需要测定雨滴的角坐标,包括方位角和仰角,这需要利用电磁波的均匀传播特性,通过雨滴反射电磁波确定雨滴所在方向。但实际情况,电磁波会受到大气密度或湿度不均匀、地形复杂等因素影响,不会均匀传播。因此还需用到测角范围、测角速度、测角误差、角分辨率等参数。

由于雷达数据反映的是不同层面的气象要素情况,因此在处理雷达数据时,需考虑不同仰角对实际雨滴数据造成的影响。同时雨滴在下落过程中会受风速风向的干扰,故在选取雷达基数据时,可取雨滴谱仪对应点的雷达距离库,也可取多点平均的方法来减小雨滴粒子受横风影响造成的误差。

## 2.3 参数公式及含义

通过雨滴谱可得到5 min内雨滴粒子数、雨滴类型(直径与速度),由此计算出众数直径和优势直径。

众数直径是指最大频率直径,即为在5 min内出现次数最多的粒子直径。 $N(D_i)$ 最大值对应的直径就是

众数直径。 $N$ 是某个粒径的粒子个数, $D_i$ 是粒子的直径。

优势直径  $D_p$  是对含水量贡献最多的粒子的直径,单位 mm, $N(D_i)D_i^3$  最大值对应的直径就是优势直径。计算公式如下:

$$D_p = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3}{\sum_{i=1}^{32} N(D_i)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

众数直径和优势直径,就可计算平均体积直径  $D_v$ ,单位 mm,平均体积直径的含义是体积等于平均雨滴体积的等效雨滴直径,实质是一个雨滴直径。平均直径  $D_1$  是一个重要雨滴谱数据,单位 mm,平均直径是指全部雨滴的直径总和除以雨滴的总数。计算公式如下:

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i}{\sum_{i=1}^{32} N(D_i)} \quad (2)$$

质量加权平均直径  $D_m$ ,单位 mm,是指单位体积内所有粒子直径加权质量相对于粒子总质量的平均直径,可以在一定程度上反映粒子分布情况。计算公式如下:

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^4}{\sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3} \quad (3)$$

其中,数体积直径  $D_0$ ,单位 mm,含水量的一半是由直径大于此值的雨滴组成,与数学上的中位数概念有所相似。满足

$$2 \sum_{D_{\min}}^{D_0} N(D_i) D_i^3 = \sum_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D_i) D_i^3 \quad (4)$$

同时根据雨滴谱数据、雨滴类型,可以得到众数粒子速度和最大速度,单位 m/s。众数粒子速度是5 min内最大频率的粒子速度,最大速度是5 min内出现的最大粒子速度。为了分析降水强度,含水量和降水强度是分析一次暴雨数据的关键参数,它们的计算公式也是固定的。

含水量  $W$ ,单位  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,是指单位体积内粒子总的质量。计算公式如下:

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_w \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 \quad (5)$$

其中  $\rho_w = 106 \text{ g}/\text{m}^3$  是固定值。

降水强度  $R$ ,单位 mm/h,是指单位时间的降水量。由于数据是5 min数据,则降水强度指的就是5 min内的降水量。计算公式如下:

$$R = \frac{\pi}{6} \rho_w \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 V_i \quad (6)$$

其中  $V_i$  为某个速度区间的速度,单位 m/s。

雷达反射率因子  $Z$ , 单位  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ , 是指  $1 \text{ m}^3$  内所有粒子后向散射截面的和。实验中的雷达反射率因子是由雨滴谱数据计算得来的, 与由雷达数据得到的雷达反射率因子是不同的来源。计算公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6 \tag{7}$$

粒子数密度  $N(D)$ , 单位  $1/\text{m}^3$ , 粒子数密度是指单位体积内粒子总数。计算公式如下:

$$N(D) = \sum_{i=1}^{32} \frac{N_i}{A \cdot V_i \cdot \Delta T \cdot \Delta D} \cdot 10^6 \tag{8}$$

其中:  $A$  为取样面积, 它的值是  $5400 \text{ mm}^2$ ;  $\Delta T$  为取样时间, 一般取  $60 \text{ s}$ 。

Marshall and Palmer<sup>[4]</sup> 最早提出雨滴谱的分布模型, 即利用指数形式描述雨滴数量随雨滴大小的分布情况, M-P 分布模型:

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \tag{9}$$

其中,  $N_0$  和  $\lambda$  为 2 个参数,  $N_0$  为截距参数,  $\lambda$  为斜率参数。  $N_0$  和降水粒子的总体数浓度有关(平均粒子数密度越大  $N_0$  越大),  $\lambda$  的大小反映降水过程粒子直径大小的变化,  $\lambda$  值越小, 说明雨滴谱分布越平稳, 大粒子的数量越多, 反之相反。并且  $\lambda$  和雨强  $R(\text{mm/h})$  有如下关系:

$$\lambda = 41 \cdot R^{-0.21} \tag{10}$$

随着研究深入的发现, Ulbrich 等<sup>[5]</sup> 提出了一个修正后的雨滴谱分布形式, 即 Gamma 分布, Gamma 分布模型:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \tag{11}$$

其中,  $N_0$ ,  $\mu$  和  $\lambda$  为 3 个参数,  $\mu$  表示雨滴谱分布的形状。根据霍朝阳等<sup>[3]</sup> 研究可知, Gamma 分布模型可以反映拟合平均雨滴谱的趋势, 大于 0 时曲线向上弯曲, 小于 0 时曲线向下弯曲, 等于 0 时为 M-P 分布。同时用矩估计法研究了 Gamma 函数拟合雨滴谱数据, 其中第  $n$  阶矩定义为:

$$M_n = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^n \Delta D \tag{12}$$

$n$  阶矩应用于质量加权平均直径的计算就是四阶矩和三阶矩的比值, 如式(3)。

为了修正雷达回波强度, 对雷达回波强度数据进行多点平均, 雷达反射率  $n$  点平均公式为

$$Z_r = \sum_{i=1}^n Z(i) / n \tag{13}$$

由于雷达反射率和周边的雷达反射率不是一一对应的关系, 因此为了取得最合理的数据, 将九层的数据取 1 点平均, 3 点平均, 5 点平均和 9 点平均。

如图 2 所示, 1 点平均就是指最近邻居点, 3 点平均(1、2、3 点)是指距离扩展平均, 5 点平均(1、2、3、4、

5 点)是指距离方位同时扩展平均, 9 点平均(1、2、3、4、5、6、7、8、9 点)则是面扩展平均, 9 点平均将距离和详细方位都同时考虑了。1、3、5、9 分别对应式(13)中的  $n$ , 即  $n$  分别取 1、3、5、9。

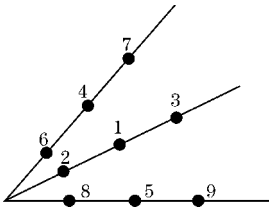


图 2  $n$  点平均示意图

### 3 雨滴谱数据分析

#### 3.1 粒径大小对于雨强的贡献量

图 3 描述了粒径大小对于与雨强的贡献量, 数据处理方面参考了王福增等<sup>[6]</sup> 的研究分析方法, 横坐标表示雨滴的直径大小, 左侧纵坐标表示雨滴下落速度, 右侧纵坐标表示不同雨滴粒径对降水的贡献程度, 刻度标志不同的粒子数密度区间。

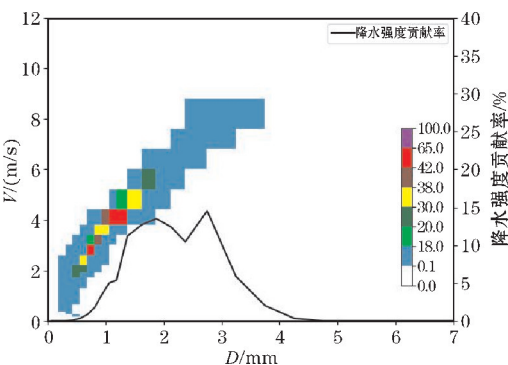


图 3 粒径大小对于与雨强的贡献量

雨滴谱数据中有不同类型的雨滴, 每种雨滴对这次暴雨的雨量贡献程度都不一样。从图 3 可以看出, 1.5 ~ 3 mm 直径的雨滴对本次降雨的贡献占绝对位置, 而 0 ~ 1.5 mm 和 3 ~ 5 mm 直径的雨滴对本次降雨的贡献相对较小。在 1.5 ~ 3 mm 直径的雨滴中, 2 mm 直径的雨滴和 2.8 mm 直径的雨滴降水贡献率达到了峰值的 15% 左右, 说明中粒径的雨滴对降水强度的贡献最多, 小粒径的雨滴和大粒径的雨滴的贡献相对较少。

从图 3 也可发现, 0.8 mm 直径 3 m/s 速度和 1 ~ 1.2 mm 直径 3.8 ~ 4.2 m/s 速度的雨滴粒子数密度是最高的, 其次是 1 mm 直径 3 ~ 4.2 m/s 速度的雨滴粒子数密度。由此可见, 在本次降雨过程中, 1 mm 直径 4 m/s 左右速度的雨滴粒子是粒子数密度最高的。



3.2 不同雨强下的雨滴谱分布

根据暴雨过程中的数据,绘制了粒子数密度、降水强度和质量加权平均直径的曲线图(图 4),通过控制变量法,从图中选取 4 个特殊点,比较不同雨强下粒子数密度和质量加权平均直径的关系,分析不同雨强下的雨滴谱分布。

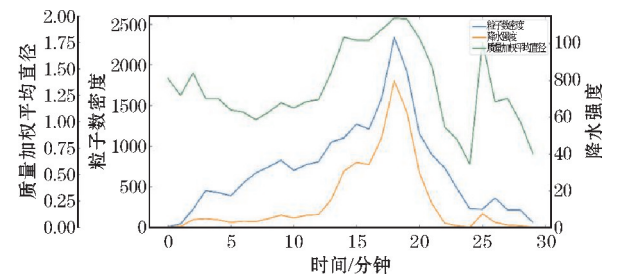


图 4 不同雨强下的雨滴谱分布图

从图 4 知,粒子数密度和降水强度约在 18 min 时达到峰值,而质量加权平均直径有两个峰值,分别是在 18 min 和 25 min。

表 1 是雨滴谱数据,分别由式(3)和式(6)计算得到的,A 点和 B 点都具有 225 左右的粒子数密度,降水强度大的 B 点质量加权平均直径为 1.75 mm,大于降水强度小的 A 点质量加权平均直径 1.46 mm,说明粒子数密度相同而降水强度不同,降水强度越大的质量加权平均直径也越大。C 点和 D 点具有相同的质量加权平均直径 1.22 mm,降水强度大的 C 点粒子数密度为 453.5,大于降水强度小的 D 点的粒子数密度 217.6,说明质量加权平均直径相同而降水强度不同,降水强度越大的粒子数密度越大,由式(14)知:

$$R=\frac{\pi}{6}\rho_w\sum_{i=1}^{32}N(D_i)D_i^3V(D_i)\Delta D\tag{14}$$

其中, $N(D_i)$ 表示粒子数密度, $R$ 表示降水强度, $D_i^3$ 在一定程度上可以反映质量加权平均直径的变化。降水强度相同的情况下,粒子数密度和质量加权平均直径成负相关。

表 1 部分雨滴谱数据

	粒子数 密度	质量加权平 均直径/mm	降水强度/ (mm/h)
A	225.27886	1.46	4.391853
B	226.74743	1.75	7.52074
C	453.58377	1.22	4.908208
D	217.610027	1.22	1.400834

3.3 相关关系分布拟合

解析出的雨滴谱数据都是离散型的,需要将数据

进行拟合。首先采用 M-P 分布,即指数分布拟合,但根据王文玲等<sup>[7]</sup>的研究发现,M-P 分布在一定程度上拟合效果并不是很理想。原因就在于 M-P 分布是指数形式,在研究数据时,对实际多变的情况没有很好地调整,所以用于拟合的数据与实际数据存在一定差异。因此霍朝阳等<sup>[8]</sup>为了提升数据准确性,表示使用 Gamma 分布可以改善 M-P 分布存在的一些问题。M-P 分布是双参数  $N_0, \lambda$ , 见式(9),Gamma 分布是三参数  $N_0, \mu, \lambda$ , 见式(11),从式(11)看 Gamma 模型相比于 M-P 模型有更好的数据准确性,能够更好地研究雨滴谱数据,是 M-P 模型的进一步发展。

图 5 是 M-P 和 Gamma 分布拟合雨滴谱数据图,红色曲线是根据此次暴雨时段的雨滴谱数据绘制的粒子数密度和粒径之间的关系。黄色曲线是由式(9)拟合的分布,蓝色曲线是由式(11)拟合的 Gamma 分布。用最小二乘法拟合平均雨滴谱得到的 M-P 分布: $N(D)=241.26e^{-1.36D}$ ,Gamma 分布: $N(D)=428.32D^{0.46}e^{-1.89D}$ 。

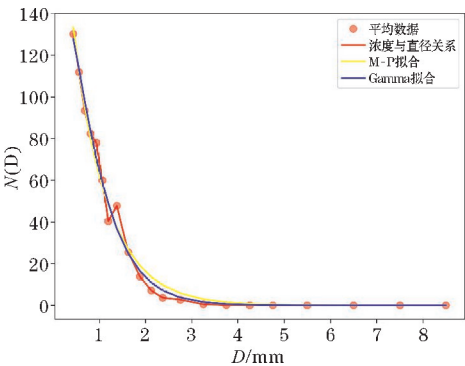


图 5 M-P 和 Gamma 分布拟合雨滴谱数据图

可以看出 M-P 分布和 Gamma 分布对小粒径(0 ~ 1 mm)和的大粒径(大于 3 mm)拟合度区别都不大,而对中粒径(1 ~ 3 mm)的拟合度有一定区别,即对中粒径的拟合效果,M-P 分布没有 Gamma 分布的拟合效果好。

M-P 分布为指数分布,这对实际数据的要求相当高,需要很强的规律性。Gamma 分布对实际的数据拟合效果明显比 M-P 分布更好、更准确。

4 雨滴谱对雷达反射率因子估测降水的修正

4.1 不同层的雷达回波图

西南雷达数据共有 16 个仰角,每层仰角所扫描到的图像都不同。随着仰角度数越高,扫到的范围就越

小。根据数据情况,选择其中 6 个仰角(0.5/1.5/2.4/3.39/4.3/6)的数据来进行比较与验证。

如图 6 所示,红色小圈表示站点的位置。可以发现,随着仰角的变化,同一位置的雷达反射率有所不同,仰角越高,所检测到的区域越少;仰角越低,所检测

到的要素越接近地面。其中第 0 层和第 1 层的雷达回波图由于仰角较低,可能受地面遮挡物的影响较大,因此回波图不是很完整。而高层雷达回波图可能受雨雾或者空气对流的影响,回波图也不是特别完整。

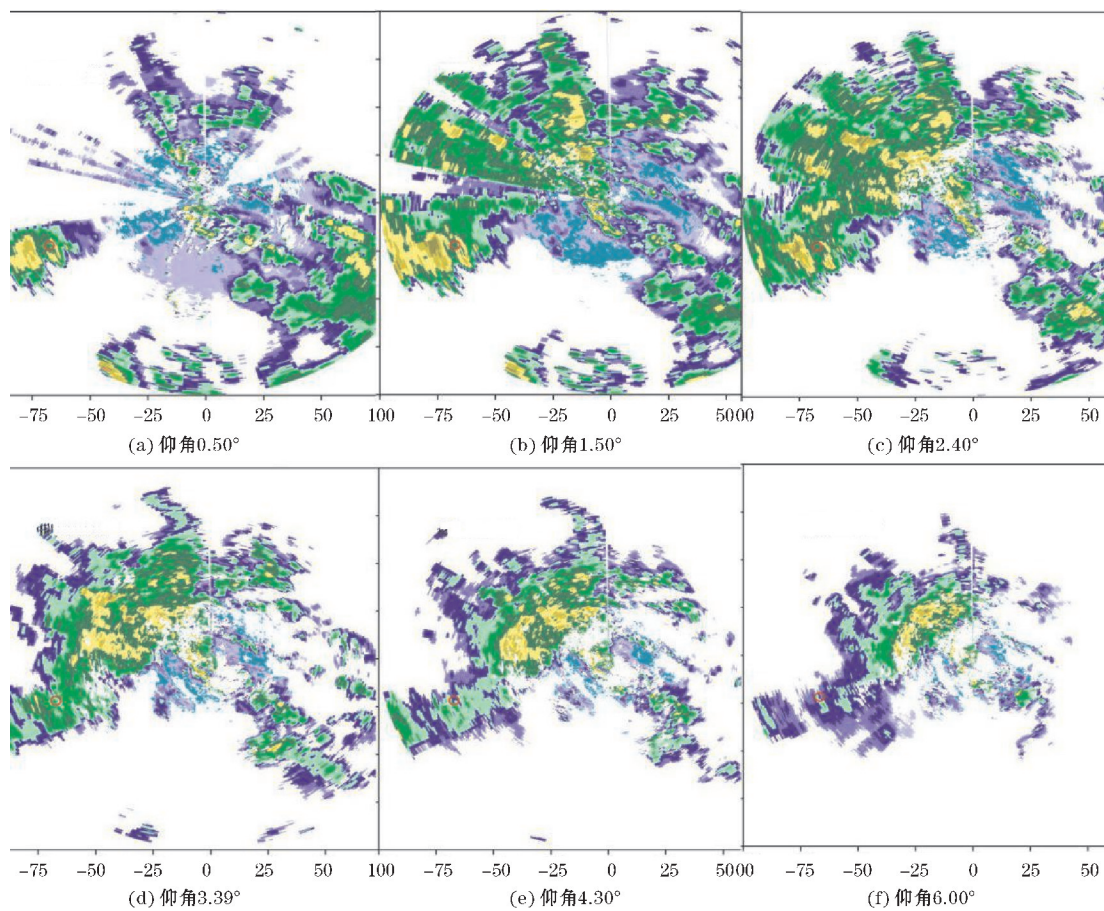


图 6 站点的 6 个不同仰角的雷达回波图

还可以看出,站点处的雷达反射率从第 0 层到第 6 层逐渐减小,有随着仰角增加而递减的变化趋势。站点降水区域的雷达回波强度变化趋势,先是雷达反射率增高一点然后减小,说明这是一次由小到大的暴雨过程,并非是突如其来的一次暴雨。

4.2 雷达反射率比较

已知雨滴谱数据是地面观测要素,而雷达数据是距地面有一定高度的数据,并且还要考虑雨滴粒子下降时会影响测量的各种要素。在已知站点的经纬度时,通过距离公式求出两点间的距离71112.4 m。假设仰角为 2°,则此时雨滴的下落高度大约是  $\tan 2^\circ \times 71112.4 = 2483.245$  m,雨滴下落速度大约为 6 m/s,则下落需要 413.9 s,即 6.9 min,所以,在选取雷达数据

时,最好多选取两组,此次暴雨过程前 5 ~ 10 min 的数据都应包括在数据分析中。

选用 2020 年 6 月 6 日 19:30–21:55 的数据,主要降雨时间在 20:26–21:14,平均降雨量达到 35 mm/h,平均分钟雨量达到 0.59 mm/min。

图 7 是 20:26–21:14 的雷达反射率数据图,共有 10 个文件,将原始雷达数据文件转换得到了 16 个仰角的雷达回波强度。图中纵向表示的是随时间变化的 10 个文件,横向表示的是从文件中得到的第 0 ~ 8 层的 9 点平均雷达反射率。从图 7 可以看出第 6 层以上数据就逐渐为 0。所以,为了研究雷达反射率和雨滴谱反射率之间的相关性,更高层的数据没有研究意义,只需选取 0 ~ 6 层的数据来研究相关程度。

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	11.61111	15.11111	6.22222	15.05556	11.88889	5.33333	0.00000	0.00000	0.00000
1	13.05556	16.66667	3.77778	15.55556	11.50000	12.61111	0.00000	0.00000	0.00000
2	12.77778	14.83333	11.38889	0.00000	0.00000	3.38889	0.00000	0.00000	0.00000
3	10.61111	15.72222	0.00000	3.61111	5.94444	1.33333	0.00000	0.00000	0.00000
4	14.22222	20.38889	7.00000	20.88889	9.66667	9.66667	1.55556	0.00000	0.00000
5	17.83333	22.33333	17.44444	20.83333	19.05556	17.38889	0.00000	0.00000	0.00000
6	18.22222	20.88889	20.72222	19.83333	20.00000	1.66667	0.00000	0.00000	0.00000
7	17.66667	20.11111	19.94444	21.77778	21.44444	3.83333	0.00000	1.50000	0.00000
8	17.72222	23.38889	24.83333	26.72222	27.72222	7.16667	0.00000	1.83333	0.00000
9	22.83333	27.55556	28.55556	27.88889	27.77778	19.72222	1.22222	0.00000	0.00000

图 7 0~8 层的雷达反射率数据图

雨滴谱的数据都是选取 20:30-21:15 的数据,雷达的数据则是选取 20:26-21:14 超前5 min的数据和 20:21-21:09 超前10 min的数据来分析。

表 2 研究的是 20:26-21:14,雷达 0~6 层的 1 点平均、3 点平均、5 点平均和 9 点平均与 20:30-21:15 雨滴谱的雷达反射率数据之间的相关程度。读取了雷达数据之后,考虑到雨滴大小及下降时的速度和周围不可控的影响因素,选取 1 点平均、3 点平均、5 点平均和 9 点平均来测试哪种方式雷达反射率与雨滴谱数据相关度高。从表 2 发现,1 点平均中第 2 层的反射率相关度最高,3 点平均中第 2 层的反射率相关度最高,5 点平均中第 1 层的反射率相关度最高,9 点平均中第 1 层的反射率相关度最高,所以雷达第 2 层的数据和雨滴谱数据的契合度更高。见式(13), $n$ 取值越高,融入的信息越多,数据越准确,相关度更高。

表 2  $n$  点平均相关系数分析

相关系数 (20:26-21:14)	1 点平均	3 点平均	5 点平均	9 点平均
0 层反射率	0.4530	0.5202	0.5389	0.5492
1 层反射率	0.5486	0.5439	0.5699	0.5797
2 层反射率	0.5990	0.5533	0.5588	0.5739
3 层反射率	0.3690	0.3737	0.4084	0.3986
4 层反射率	0.3342	0.2752	0.4651	0.5019
5 层反射率	-0.1118	-0.0969	-0.1389	-0.1188
6 层反射率	0.0609	0.0609	0.1399	0.1418

为消除雨滴粒子下落时时间和速度的影响,选取雷达数据滞后的一段时间,再次比较 9 点平均的均方误差、均方根误差、相关系数和平均绝对误差。

从表 3 可以看出,雷达超前5 min的数据和雨滴谱的雷达反射率数据的相关度明显提高,第 1 层的均方根误差和平均绝对误差达到了最小,并且相关系数达到了 78.12%,所以选择第 1 层的数据更合适。

表 3 9 点平均超前 5 min 相关系数评价表

9 点平均 20:26-21:14	均方 误差	均方根 误差	相关 系数	平均绝 对误差
0 层反射率	510.2034	22.5877	0.7082	22.344
1 层反射率	337.7814	18.3788	0.7812	18.143
2 层反射率	574.7266	23.9735	0.7089	22.939
3 层反射率	464.4613	21.5513	0.8056	20.744
4 层反射率	537.5873	23.1859	0.8326	22.51
5 层反射率	957.7555	30.9476	0.2186	30.182
6 层反射率	1515.8848	38.9343	0.3006	38.671

从表 4 可以看出,雷达数据超前 10 min 的相关系数达到了 0.9 以上,在选取平均绝对误差越小的情况下,层数是20:21-21:09的第 3 层雷达反射率数据相关度更高。均方误差 426.3591 dBz,均方根误差 20.6485 dBz,相关系数 0.9438,平均绝对误差为 20.076 dBz。雨滴谱的实时观察数据对估测雷达超前 10 min的数据相关度高,可以根据雨滴谱实时数据修正雷达观测的反射率,提高雷达回波检测的准确度。

表 4 9 点平均超前10 min相关系数评价表

9 点平均 20:21-21:09	均方 误差	均方根 误差	相关 系数	平均绝 对误差
0 层反射率	463.7581	21.5350	0.8907	21.428
1 层反射率	297.8805	17.2592	0.8793	17.116
2 层反射率	453.0237	21.2844	0.8804	20.589
3 层反射率	426.3591	20.6485	0.9438	20.076
4 层反射率	469.2707	21.6627	0.9376	21.093
5 层反射率	928.9825	30.4792	0.5720	30.026
6 层反射率	1517.0069	37.9488	0.0859	38.671

4.3 雷达反射率估测降水应用

通过表 5 的数据,计算出的雨滴谱反射率因子与雨强之间的相关系数为 90.45%,均方误差为 339.68 dBz,均方根误差为 18.43 dBz,平均绝对误差为 15.87 dBz,说明雨滴谱反射率因子在一定程度上可以反映降雨过程,可用来估测遵义地区的降水发展方向。



表 5 一次暴雨过程的雨滴谱反射率因子及雨强数据表

反射率因子/dBz	30.89	35.93	40.52	61.66	40.51	42.53	44.65	43.38	39.81	34.94
雨强/(mm/h)	7.11	15.28	30.61	35.46	34.27	48.7	79.79	62.85	29.72	12.88

已知  $Z$  和  $I$  之间存在相关关系,为提高雷达回波强度预测降水过程的准确度,需要先找到雨滴谱计算的反射率因子和雷达反射率因子之间的关系,然后找到  $Z$ - $I$  的相关关系。

图 8 绘制了 4 条曲线,蓝色曲线绘制的是雷达反射率因子随时间变化图(雷达反射率因子数据时间区间 19:32–21:52),橙色曲线绘制的是雨滴谱计算的反射率因子随雨滴谱时间的变化图(雨滴谱反射率因子时间区间 19:30–21:40),绿色曲线绘制的是雷达反射率因子和雨滴谱反射率因子的 1 次平均值随时间的变化图,红色曲线绘制的是雷达反射率因子和雨滴谱反射率因子的 3 次平均值随时间的变化图。可以发现雷达与雨滴谱反射率因子的变化趋势相似,数据却相差甚远。

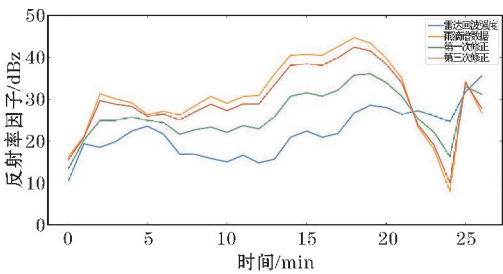


图 8 雨滴谱反射率因子和雷达反射率因子修正图

苏立娟等<sup>[10]</sup>研究发现,雷达回波数据可能强度较弱,需要进行修正。而在对雷达反射率因子进行 1 次平均和 3 次平均修正后发现,修正 1 次后的雷达反射率因子曲线和雨滴谱反射率曲线相关度为 86.65%,均方误差 42.68 dBz,均方根误差 6.53 dBz,平均绝对误差 5.86 dBz。修正 3 次后的雷达反射率因子曲线和雨滴谱反射率曲线相关度达到了 99.59%,均方误差 2.67 dBz,均方根误差 1.63 dBz,平均绝对误差 1.47 dBz。说明随着相关评价系数的提升,修正后的雷达回波数据能够反映雨滴谱计算的反射率。

如图 9 所示,横轴表示雨强,纵轴表示雷达反射率因子。由它们之间的关系式知  $1 \text{ dBz} = 10 \lg Z$ ,拟合曲线  $Z = AI^B$ , $A$ 、 $B$  为参数,一般取 300 和 1.4,但得出的拟合效果差,而数据取  $Z = 0.05I^{2.52}$  时,反映出来的拟合效果好。从图 9 发现源数据点不均匀地分散在拟合曲线两端,端点源数据点大多高于拟合曲线,并且源数据点基本都没在拟合曲线上,故拟合效果不好。

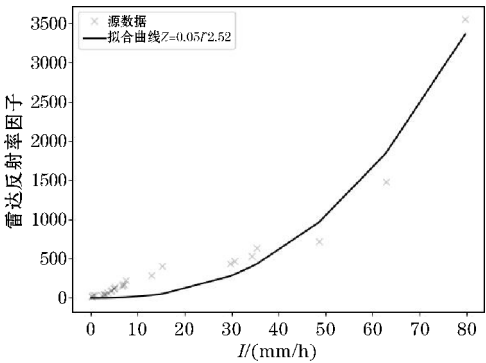


图 9 雨强和原雷达反射率因子的拟合曲线

图 10 的拟合曲线为  $Z = 133.98I^{1.12}$ 。从图 10 可以看出,源数据点基本分布在拟合曲线两侧,并且大多数源数据点在拟合曲线上,没在拟合曲线上的数据点都均匀分布在小范围内曲线两边,故拟合效果很好。

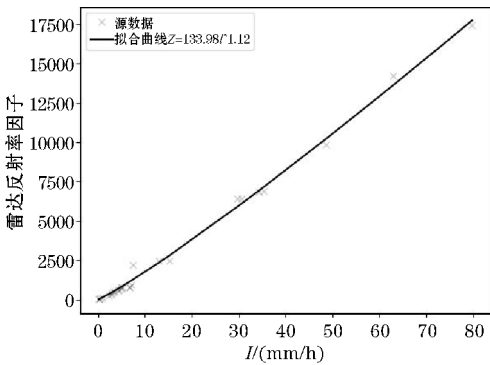


图 10 雨强和第 3 次修正后的雷达反射率因子的拟合曲线

修正后的雷达回波数据参考白先达等<sup>[11]</sup>研究的  $Z$ - $I$  关系后,研究预测降水的准确度。结果发现,根据  $Z$ - $I$  关系计算出的雨强和雨滴谱数据计算的雨强,两者相关系数达到 99.53%,均方误差为 4.06 dBz,均方根误差为 2.01 dBz,平均绝对误差为 1.52 dBz。因此说明,使用修正后的雷达反射率因子来估计雨强,在误差范围内是准确的,这提高了雷达回波反射率因子估测降水的准确性。

5 结束语

研究了贵州遵义一次暴雨降水过程的雨滴谱和在此过程中天气雷达的图像变化趋势。分析了在此过程中雨滴粒径大小对于雨强的贡献程度,比较了不同雨强下的雨滴谱分布,并做了相关关系分布拟合。根据

雷达数据绘制了本次暴雨过程的不同层雷达回波图,将天气雷达的雷达反射率与雨滴谱中根据公式计算的雷达反射率作了相关程度的比较,并修正雷达回波反射率因子,再利用  $Z-I$  关系用雷达反射率因子去估测雨强大小,提高雷达回波反射率因子预测降水的准确度。

(1)在本次降雨过程中,中粒径的雨滴对降水强度的贡献最多,小粒径的雨滴和大粒径的雨滴贡献相对较少。可以看出小粒径的贡献主要集中在0.5 mm直径的雨滴,中粒径的贡献很均匀在5%左右,大粒径的贡献最少。

(2)研究了粒子数密度、降水强度和质量加权平均直径的曲线图,在其中找了A、B、C、D 4点进行分析,A点和B点两点的说明粒子数密度相同,降水强度不同,降水强度越大的质量加权平均直径也越大。C点和D点两点的说明质量加权平均直径相同,降水强度不同,降水强度越大的粒子数密度越大。

(3)此次暴雨过程M-P分布  $N(D) = 241.26e^{-1.36D}$ ,和Gamma分布  $N(D) = 428.32D^{0.46}e^{-1.89D}$ 。分析图像得到M-P分布和Gamma分布对小粒径的拟合度都差不多,M-P分布和Gamma分布对中等直径大小的雨滴的拟合效果上差别较大,M-P分布拟合效果没有Gamma分布对中等直径大小的雨滴的拟合效果好。M-P分布和Gamma分布对大直径雨滴的拟合度也相似区别不大。

(4)绘制站点不同仰角的雷达回波图,观察到了雷达反射率的变化趋势。随着仰角的变化,同一个位置上的雷达反射率不同,仰角越高,所检测到的区域越少。根据雷达回波图可以看到降水区域的变化趋势,先是雷达反射率增高一点然后减小,说明此次暴雨是一次由小变大的暴雨过程,不是一次骤降的暴雨过程。

(5)比较此次20:26-21:14的暴雨过程的 $n$ 点平均相关系数分析,得到雷达第一层和第二层的数据与雨滴谱数据的契合度更高。随着 $n$ 取值越高,融入的信息越多,数据越准确,相关度更高。则9点平均处理的数据比1点平均、3点平均和5点平均的数据准确度更好。为了消除雨滴粒子下落时时间和速度的影响,分析了9点平均的相关系数,发现了雷达超前5 min的数据和雨滴谱的雷达反射率数据的相关度提高明显,第一层的均方根误差和平均绝对误差达到了最小,相关系数达到了78.12%,而雷达数据超前10 min的相关系数甚至达到了0.9以上。因此可以根据雨滴谱实时数据修正雷达观测的反射率,提高雷达回波预测的准

确度。

(6)通过计算雨滴谱雷达反射率及雨强之间的相关系数,研究雷达回波强度和雨滴谱雷达反射率之间的关系,修正雷达回波反射率,拟合 $Z-I$ 关系曲线。修正后的雷达回波反射率利用 $Z-I$ 关系曲线估测雨强大小,从而实现雨滴谱实时数据修正雷达观测的反射率,提高雷达数据预测降水准确度。

## 参考文献:

- [1] 张洪胜,何宏让,张云,等.南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析[J].气象与环境科学,2017,40(3):71-78.
- [2] 濮江平,张昊,周晓,等.对流性降水雨滴谱特征及其与雷达反射率因子的对比分析[J].气象科学,2012,32(3):253-259.
- [3] 姚正兰,谢和林,宋芳.遵义市暴雨气候特征分析[J].贵州气象,2017,41(2):14-19.
- [4] Marshall J S, Palmer W. THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE [J]. J Meteor, 1948, 5 (4):165-166.
- [5] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology. 1983, 22 (10): 1764-1775.
- [6] 王福增,王秋淞,何山,等.贵州正安夏季雨滴谱特征分析[J].成都信息工程大学学报,2020,35(6):689-696.
- [7] 王文玲,张微,高玉宏.基于Parsivel激光雨滴谱仪的夏季雨滴谱特征分析[J].黑龙江气象,2018,35(1):20-22.
- [8] 霍朝阳,阮征,魏鸣,等.雨滴谱gamma函数拟合方法的分析与评估[J].科学技术与工程,2018,18(34):1-10.
- [9] 谷晓平,廖留峰,段莹,等.贵州2020年汛期不同历时强降水雨量特征分析[J].暴雨灾害,2020,39(6):586-592.
- [10] 苏立娟,郑旭程,达布希拉图,等.基于雨滴谱仪建立不同性质降水 $Z-I$ 关系并与雷达作对比分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(6):103-108.
- [11] 白先达,王艳兰,孙莹.雷达定量测量降水[J].气象科技,2011,39(1):61-65.



## Raindrop Size Distribution Characteristics of a Rainstorm in Zunyi Area and its Application in Radar

WEN Kai, WANG Fuzeng, WANG Qiusong, ZHOU Qiuling

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** According to the raindrop size distribution data of a rainstorm observed by OTT Parsivel Laser Weather Sensor, weather radar observation data and automatic station precipitation data in Zunyi, the raindrop size distribution parameters and distribution characteristics of raindrop size distribution in the process of rainstorm was analyzed, which could found that the contribution rate of medium-size raindrops is the largest. Meanwhile, the mass weighted average diameter is negatively correlated with the particle number density. Moreover, the Gamma distribution has a better fitting effect than the M-P distribution for the medium particle size when fitting the average raindrop size distribution, while the fitting effect for the large and small particle size is similar. By comparing the relationship between the radar echo intensity and the radar reflectance of the characteristic parameters of the raindrop size distribution, the radar echo intensity is corrected by taking the average of three times, the results showed: the correlation coefficient between the corrected data and the radar reflectance factor of the raindrop size distribution is as high as 99.59%, and the mean square error and mean absolute error are small. Then the  $Z-I$  relationship between the corrected weather radar reflectivity factor and the rainfall intensity calculated by the raindrop size distribution was constructed, and the fitted  $Z-I$  relationship curve ( $Z = 133.98I^{1.12}$ ) was obtained. The accuracy of the rain intensity obtained by the weather radar reflectivity factor and the rain intensity calculated by the raindrop size distribution reached 99.53%, by using the fitted  $Z-I$  relationship. Overall, using radar echo reflectance modified by raindrop size distribution parameters could estimated more accurately.

**Keywords:** raindrop size distribution; radar reflectivity; rainfall intensity; Zunyi area