

文章编号:2096 - 5389(2018)06 - 0001 - 07

强对流天气雷达回波强度相关性对比分析

邹书平^{1,2}, 李 波³, 杨 哲², 曹 水², 李 皓⁴

(1. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省冰雹防控工程技术中心, 贵州 贵阳 550081;
3. 贵州省气象信息中心, 贵州 贵阳 550002; 4. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 为了提高山区复杂地形条件下局地强对流天气监测预警能力, 有效减小天气雷达之间对降水目标物回波的测量误差, 选取贵阳、毕节、遵义三部多普勒天气雷达同步观测体扫资料, 以贵阳多普勒天气雷达站为基准, 对比分析了强对流天气的雷达回波强度的变化特征。初步分析结果表明: 贵阳与遵义、毕节雷达之间观测的回波强度具有一致性的波动特征, 且存在较大的相关性; 贵阳雷达观测的回波强度总体低于毕节、遵义雷达观测数据结果; 两部雷达之间回波强度差异主要是由云和降水对雷达波的衰减所产生。

关键词: 多普勒天气雷达; 同步观测; 回波强度; 对比分析

中图分类号: P412. 25; P458. 1⁺21 **文献标识码:** A

Correlation analysis on radar echo intensity of strong convective weather

ZOU Shuping^{1,2}, LI Bo³, YANG Zhe², CAO Shui², LI Hao⁴

(1. Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China; 2. Guizhou Provincial Center of Hail Prevention_ Control and Technical Support, Guiyang 550081, China; 3. Guizhou Provincial Center of Meteorological Information Support, Guiyang 550002, China; 4. Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to improve the monitoring and early warning ability of local strong convective weather under complex terrain conditions in mountainous areas, and effectively reduce the measurement error of precipitation target echoes between weather radars, Guiyang Doppler Weather Radar Station was used as a benchmark. The radar echo intensity of strong convective weather was compared and analyzed by selecting the data of simultaneous observations of Guiyang, Bijie and Zunyi Doppler weather radar. The preliminary analysis results show that the echo intensity observed between Guiyang and Zunyi and Bijie radar has consistent fluctuation characteristics and has a large correlation. The echo intensity of Guiyang radar observation is generally lower than that of Bijie and Zunyi radar observation data. Two radar echo intensity difference were mainly produced by cloud and precipitation attenuation of radar wave.

Key words: Doppler weather radar; synchronous observation; echo intensity; correlation analysis

1 引言

随着我国新一代天气雷达观测网络的全面覆盖, 上下游区域性雷达组网在强对流天气实时监测

和分析判断中发挥着重要作用^[1-4]。在山区复杂地形条件下, 新一代天气雷达观测数据不仅受雷达性能参数的限制, 而且也会因地物遮挡而出现探测盲区, 造成天气雷达探测的回波参量的失真, 从而对

收稿日期: 2018 - 07 - 05

第一作者简介: 邹书平(1967—), 男(仡佬族), 正高, 主要从事天气雷达与人工影响天气工作, E-mail: zsping99@qq.com。

资助项目: 国家自然科学基金(41365001): 冰雹云跃增特性与响应时间相关性分析; 黔科合 NY [2011] 3081 号: 贵州冰雹源防控技术研究。

山区局地强对流天气准确分析判断产生一定的影响。史锐等^[5]分析了长江流域 2 部 S 波段和 3 部 C 波段多普勒雷达回波强度特征,表明 S 波段和 C 波段雷达回波强度存在整体性的差异;肖艳娇等^[6]对比分析了长江中游 5 部 S 波段多普勒雷达,结果表明各雷达之间存在强度、高度、位置上的差异。徐八林等^[7-8]分析了高山雷达探测对估测降水的影响,提出改进高山雷达低层回波探测能力的方法。邹书平等^[9]对一次强冰雹天气过程双雷达回波特征参数对比分析,提出山区雷达识别冰雹云回波的技术方法。

为了减小贵州山区各天气雷达之间对降水目标物回波的观测差异性,有效改进雷达组网拼图数据产品质量,进一步提高山区局地强对流天气过程的实时监测预警技术水平,同时为人工影响天气作业条件的判断提供技术支持,有必要对贵州新一代天气雷达之间回波特征参数进行对比分析。在此,我们选取了贵阳—遵义、贵阳—毕节雷达之间典型强对流冰雹云天气过程个例,对冰雹云单体回波的反射率因子大小、等高面强度分布、相同扫描仰角特征数据等进行比较,并分析其雷达回波反射率因子差异性产生的原因,提出了基于山区复杂地形条件下的 C 波段雷达组网观测能力的评估方法,从而为弥补单部雷达相互之间的探测盲区与雷达回波产品的应用提供分析判断的依据。

2 资料分析处理技术方法

本文选用了 2011 年 4 月 14 日和 2012 年 4 月 29 日贵州中西部纳雍、大方、息烽、修文、开阳等地出现的两次冰雹天气过程,选取数据来源于对流单体从生成发展到成熟阶段的雷达观测序列资料,分

析资料是贵阳、遵义和毕节的新一代天气雷达体扫基数据文件。其主要技术方法是采用双线性插值技术把极坐标系下的体扫基数据内插到笛卡儿坐标系中,生成所需要的雷达数据图形产品,并按照方位、距离、高度格点和地理信息读取有关数据,以保证不同雷达提取的雷达回波特征参数处于相同位置或同一垂直剖面上,从而得到雷达实际记录的数据产品。在雷达资料处理过程中对地物回波及其他杂波进行识别处理,以消除非气象回波对真实数据的干扰。表 1 是三部新一代天气雷达主要性能参数表。其中,贵阳与毕节、贵阳与遵义、毕节与遵义两两雷达站之间的距离分别为 160 km、125 km、167 km。

表 1 新一代天气雷达主要性能参数
Tab. 1 The CINRAD/CD of Main Performance Parameters

雷达站名	贵阳	毕节	遵义
经度/°E	106.72	105.30	106.91
纬度/°N	26.59	27.30	27.68
海拔高度/m	1 255.0	1 598.0	1 038.0
波长/cm	5.5	5.5	5.5
体扫模式	VCP21	VCP21	VCP21
扫描频率/Hz	900/600	900/600	900/600

注:型号均为 CINRAD/CD

在此选取的强对流天气属于冰雹云,通常用“单体”来描述冰雹云的雷达回波特征。冰雹云单体雷达回波具有反射率因子强、中心结构密实的特点^[10-15]。参照这样选取的冰雹云回波单体,各天气雷达之间对同一单体回波的同步观测具有很好的一致性,这样就最大限度地减少了雷达回波反射率因子提取的误差。表 2 是冰雹云单体回波对比观测取样时段信息表。

表 2 冰雹云单体回波对比观测取样时段信息表

Tab. 2 The Radar Echo Information for Sampling Time Period of Hail Cloud Cell Contrast Observation

序号	编号	降雹时间	发生地	冰雹直径/mm	对比雷达	取样时段
1	20110414	18:34—18:41	纳雍	6	贵阳、毕节	17:38—20:31
2	20120429	18:45—18:50	息烽	5	贵阳、遵义	17:03—20:30

需要指出的是,由于受雷达波长、电磁波衰减、波束宽度、扫描速度以及降水粒子涨落等因素的影响,不同雷达要在同一时间对同一个降水粒子进行观测,实现严格意义上观测同步是不可能的。我们结合新一代天气雷达观测业务特点,为了尽可能地减小在时间上和位置上的不同步,采取以贵阳雷达观测时间和位置为基准,一是两部雷达对比观测的体扫时间差小于 3 min,以减小雷达之间同步观测的

时间差;二是采取地理信息格点叠加方法,确定回波最大强度、方位和距离,以减小位置的偏移量。

3 回波强度相关性对比分析

3.1 回波强中心最大反射率因子

在比较不同距离上的目标物回波强弱时,不能直接比较云雨粒子群总的后向散射功率 P_r 的大小,而是比较它们反射率因子 Z 值的大小。反射率因

子 Z 定义为单位体积内所有散射粒子的直径的六次方之和,即: $Z = \sum D_i^6$, 单位是 mm^6/mm^3 。由于不同云雨粒子的 Z 值范围很大,通常又用 dBz 度量云雨的强度,其定义为:

$$\text{dBz} = 10 \lg(Z/Z_0)$$

$$Z_0 = 1 \text{ mm}^6/\text{mm}^3$$

这样用 dBz 表示回波强度,它只取决于气象目标物本身,与天气雷达参数、目标距离无关^[16]。

在概率论中,相关关系是指当一个或几个相互联系的变量取一定的数值时,与之相对应的另一变量的值虽然不确定,但它仍按某种规律在一定的范围内变化。变量间的这种相互关系,称为具有不确定性的相关关系。相关系数是研究变量之间线性相关程度的量,用 r 表示,计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$
$$= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

其中, x_i 表示第 i 个 x 样本数据, y_i 表示第 i 个 y 样本数据, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 表示平均值, n 表示样本数据的序号。

在此,以 2011 年 4 月 14 日(编号 20110414)和 2012 年 4 月 29 日(编号 20120429)两次强对流冰雹天气过程为例,分析最大反射率因子时序变化特征。图 1 和图 2 分别是贵阳与毕节、贵阳与遵义雷达之间雷达回波最大强度 dBz 值随时间序列变化图。

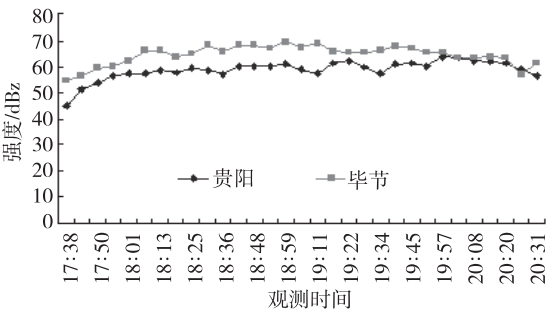


图 1 2011 年 4 月 14 日 17 时 38 分—20 时 31 分回波最大强度时序变化情况(20110414)

Fig. 1 The Radar Echo Maximum Strength of Change in Time Series(2011. 4. 14 17: 38—20: 31)

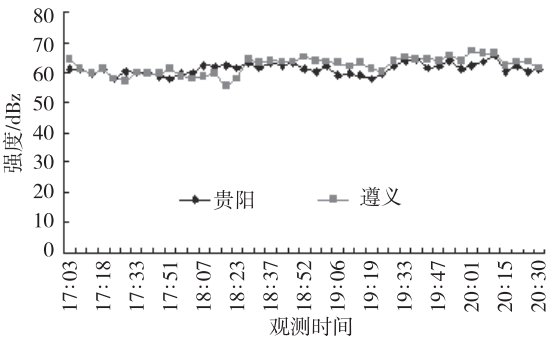


图 2 2012 年 4 月 29 日 17 时 03 分—20 时 30 分回波最大强度时序变化情况(20120429)

Fig. 2 The Radar Echo Maximum Strength of Change in Time Series(2012. 4. 29 17: 03—20: 30)

表 3 是两部对比雷达之间回波强度差的最小值、最大值、平均值、相关系数以及取样距离范围的数据表。贵阳与毕节雷达之间的回波强度平均相差 5.4 dBz ; 贵阳与遵义雷达之间雷达回波强度平均相差 0.9 dBz 。

表 3 回波强度差的最小值、最大值、平均值和相关系数

Tab. 3 The Radar Echo Strength Difference of Minimum Value, Maximum Value, Average Value and Correlation Coefficient

编 号	20110414	20120429
最小值	-2	-7
回波强 最大值	10. 0	4. 5
度差/ dBz 平均值	5. 4	0. 9
相关系数	0. 63	0. 63

通过回波强度时序变化和相关性分析表明,各雷达之间的回波强度具有很好的一致性波动变化特征,且雷达回波强度存在正相关,相关程度显著。

3. 2 相同扫描仰角层最大反射率因子

新一代天气雷达采用 VCP21 体扫模式,即大约每 6 min 一次的 9 层(0. 5°、1. 5°、2. 4°、3. 4°、4. 3°、6. 0°、9. 9°、14. 6°、19. 5°)立体扫描,组成 PPI 基数据。表 4 是贵阳和毕节(编号 20110414,等距离 98. 8 km)、贵阳和遵义(编号 20120429,等距离 97. 5 km)立体扫描模式下相同扫描仰角所对应的最大反射率因子和对应回波高度数据表。其中,回波高度通过测高公式求得(见 4. 2)。

图 3、图 4 分别是编号 20110414 和 20120429,在同一扫描仰角下的两部雷达观测回波强度 PPI 图。从图示同样反映出同一扫描仰角的两部雷达之间回波强度区域相似程度,以及覆盖范围大小的差异性。

表 4 相同扫描仰角下所对应的最大反射率因子表

Tab.4 The Radar of Maximum Reflectivity Factor Corresponding to the Same Scan Elevation Angle

编号	20110414(等距离 98.8 km)				20120429(等距离 97.5 km)			
站名—时间	贵阳—19:40		毕节—19:39		贵阳—18:02		遵义—18:01	
层数/仰角	强度/dBz	高度/km	强度/dBz	高度/km	强度/dBz	高度/km	强度/dBz	高度/km
1—0.5°	55	2.7	31.5	3.0	52.5	2.7	60	2.4
2—1.5°	61	4.4	59.5	4.8	60	4.4	59	4.1
3—2.4°	58	6.0	66	6.3	59	5.9	58	5.7
4—3.4°	60.5	7.7	68	8.0	58.5	7.6	52	7.4
5—4.3°	57.5	9.2	64.5	9.6	54.5	9.1	46	8.9
6—6.0°	52	12.2	49	12.5	36	12.0	26.5	11.8
7—9.9°	19	18.8	28	19.2	/	/	23.5	18.4
8—14.6°	14	26.7	12.5	27.1	/	/	/	/
9—19.9°	/	/	/	/	/	/	/	/

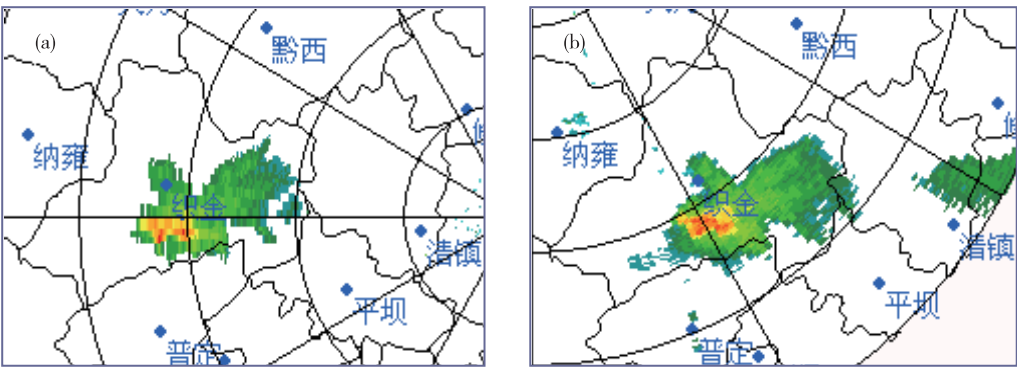


图 3 2011 年 4 月 14 日雷达回波强度对比 PPI(仰角 1.5°)(a:贵阳,19 时 40 分 b:毕节,19 时 39 分)

Fig.3 The Radar Echo of Strength Comparison in PPI (Elevation 1.5°)(a:Guiyang, 2011.4.14 19:40 b:Bijie,2011.4.14 19:39)

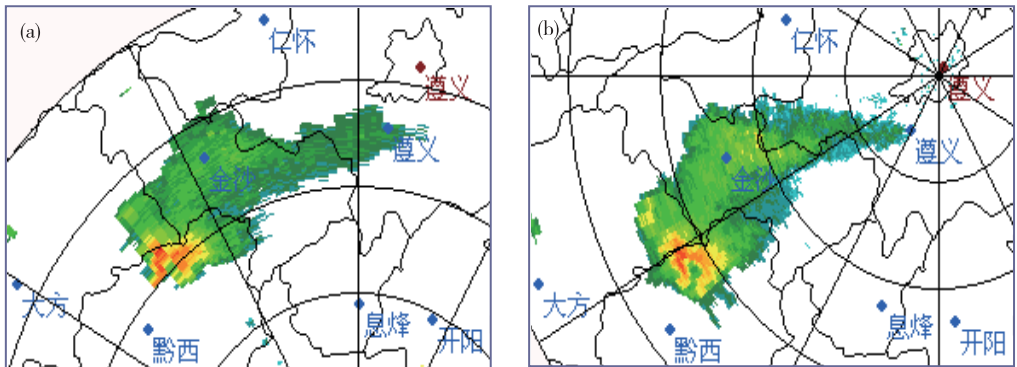


图 4 2012 年 4 月 29 日雷达回波强度对比 PPI(仰角 1.5°)(a:贵阳,18 时 02 分 b:遵义,18 时 01 分)

Fig.4 The Radar Echo of Strength Comparison in PPI (Elevation 1.5°)(a: Guiyang, 2012.4.29 18:02 b: Zunyi,2012.4.29 18:01)

3.3 等高面最大反射率因子

等高面反射率因子(CAPPI)是同一等高度平面反射率因子数据图形产品,它可以直观地对比两部雷达在同一高度平面上的回波分布状况。我们选取以两部雷达观测到的目标物等距离的 3 km 和 6 km 等高面反射率因子(CAPPI)数据图形产品进行对比分析。

表 5 是 3 km 和 6 km CAPPI 最大反射率因子数据表。其中,贵阳和毕节雷达之间最大反射率因子

相差 3 dBz,而贵阳和遵义雷达之间则相差 7 dBz。

表 5 3 km 和 6 km CAPPI 最大反射率因子

Tab.5 The Radar Maximum reflectivity factor of 3 km and 6 km CAPPI

编 号	等高面	毕 节	贵 阳	遵 义
20110414	3 km	59 dBz	58 dBz	/
	6 km	63 dBz	60 dBz	/
20120429	3 km	/	59 dBz	56 dBz
	6 km	/	58 dBz	51 dBz

图5、图6 分别是贵阳和毕节(编号 20110414, 等距离 98.8 km)、贵阳和遵义(编号 20120429,等距离 97.5 km)天气雷达观测 3 km 和 6 km CAPPI 图。

从图示反映出两部雷达之间回波强度区域相似程度和覆盖范围大小的差异性。

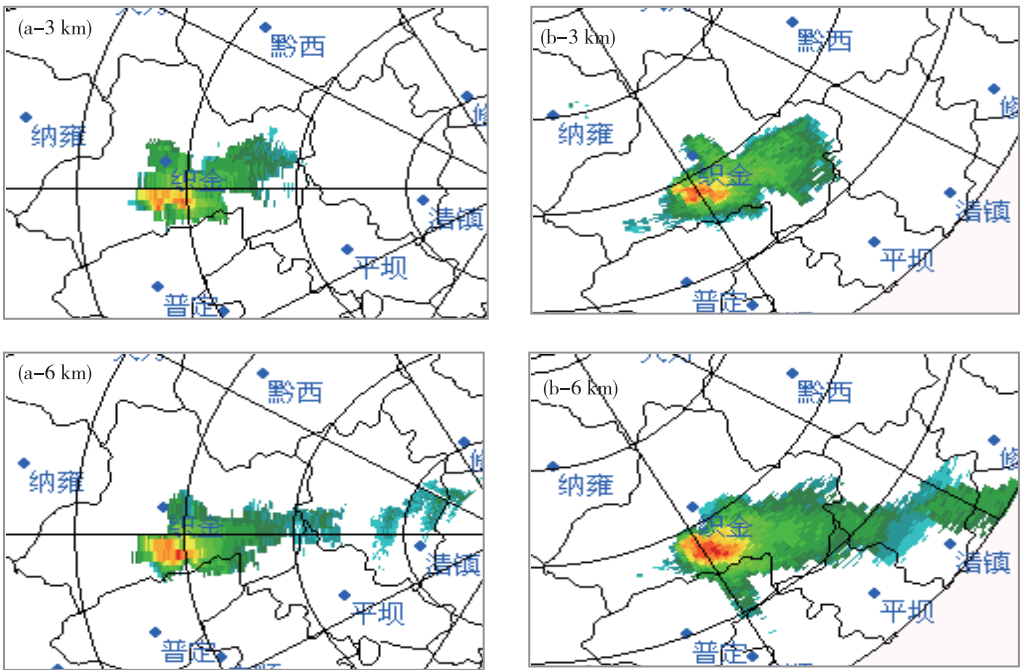


图5 编号 20110414,等距离 98.5 km,3 km 和 6 km CAPPI(a:贵阳-19 时 40 分 b:毕节-19 时 39 分)
Fig. 5 The Radar of 3 km and 6 km CAPPI (No. 20110414, Equidistant 98.5 km, a; Guiyang -19:40 b; Bijie -19:39)

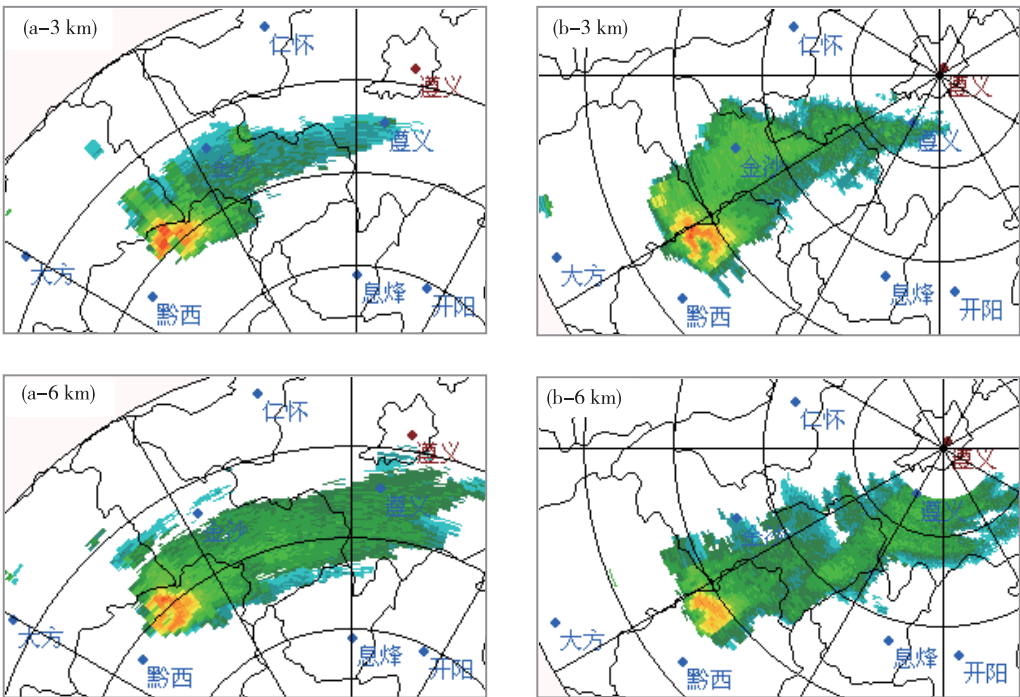


图6 编号 20120429,等距离 97.3 km,3 km 和 6 km CAPPI(a:贵阳-18 时 02 分 b:遵义-18 时 01 分)
Fig. 6 The Radar of 3 km and 6 km CAPPI(No. 20120429, Equidistant 98.5 km,a; Guiyang -18:02 b; Zunyi -18:01)

4 原因分析

从上面分析来看,在这三部雷达之间的反射率因子或多或少存在一定的差异性。特别是贵阳与毕节之间的回波强度相差比较大,相差最大的时段是 18 时 07 分—18 时 59 分,且毕节雷达回波强度明显高于贵阳雷达回波强度,最大相差 10.0 dBz,平均相差 5.4 dBz。这样的探测结果对强对流天气的性质和程度的判断将产生显著的影响。在此,重点分析产生这种差异性的原因。

4.1 雷达波衰减对反射率因子的影响

新一代天气雷达的参数都经过了仔细的校准和标定,以确保雷达对降水目标的准确测量。通常情况下,雷达与目标物之间的云和降水所造成的衰减,主要是由这些粒子对雷达回波的吸收和散射造成的,与雷达波长和探测距离有关^[17]。雷达波长越短、探测距离越远,不同降水粒子对雷达波的衰减程度就越明显^[18]。对于 5.5 cm 波长的雷达波,在穿过径向尺度为 100 km,当雨强为 20 mm/h 的降水时,雷达回波强度可衰减 3~7 dBz;当冰雹直径达到 10 mm 时,雷达回波强度可衰减 5~9 dBz。由于衰减,雷达所显示的降水回波将小于实际的降水区,尤其是在降水区远离雷达的一侧,使得回波范围缩小,形状发生失真,回波中心强度减弱。从图 3 可以看出雷达回波面积明显缩小的情况;从图 4 则可以看出远离雷达一侧回波缺口所导致范围缩小的情况。

4.2 扫描波束指向对反射率因子的影响

雷达波束宽度越小,角度的分辨率越高,探测精度也越高。波束中心高度与仰角和距离有关。在标准大气的情况下,雷达回波高度计算公式如下:

$$H = h + R \sin a + R^2 / 17\ 000$$

式中, h 为天线高度(单位:km), a 为仰角(单位:°), R 是斜距(单位:km), H 是波束中心轴线在斜距 R 离地面的高度(单位:km)。

从表 4 计算出数据结果综合分析来看,在相同扫描仰角和等距离情况下,不同雷达之间所对应雷达回波高度相差 200~400 m。因此,对于两部雷达之间强度差异的产生与垂直空间指向的不一致存在一定相关性。在雷达低仰角扫描情况下,对于单部雷达而言回波强度变化呈一定的线性关系,变化幅度小。通常低仰角产生的差异是由地物遮挡所引起的,而高仰角产生的差异则是空间指向不一致所导致的。因此,当一部雷达距离目标物较近,而另一部雷达距离目标物较远时,这种差异性将尤为

明显。

4.3 雷达设备参数对反射率因子的影响

雷达接收回波的强度,除取决于目标物云和降水的散射特性、探测距离、大气介质等因素外,还与雷达波长、发射功率、脉冲宽度、重复频率、波束宽度、天线增益、接收信号灵敏度等雷达设备参数有关。雷达设备参数的变化主要影响雷达最大探测距离和雷达回波的强弱。通过对贵阳和毕节雷达观测性能参数比较,贵阳和毕节两部雷达脉冲重复频率分别为 1 μ s 和 4 μ s。当脉冲频率增大时,回波接收功率随着增大,使一些弱的降水目标容易发现^[19]。既然雷达能够观测到弱的降水回波,必然就会导致回波面积范围增大,回波强度增强,探测距离增大。从这一点也能够解释为什么毕节雷达观测的回波面积大于贵阳雷达的原因。但不能肯定发射功率、天线增益、接收信号灵敏度等雷达设备参数对回波强弱的影响,需要具体对雷达系统进行检查。

5 结论

通过雷达回波反射率因子 dBz 时序变化、PPI 和 CAPPI 区域面积分布等特征对比分析,结果表明:贵阳雷达观测的回波强度总体低于毕节、遵义雷达观测的数据结果;对比的两部雷达之间回波强度具有一致性波动变化特征,区域分布形态结构基本一致,但对应的最大反射率因子、区域分布存在一定的差异,特别是在较低和较高的扫描仰角所对应强度差值最为明显。当两部雷达之间的回波强度超过正常衰减时,必须考虑探测结果对天气性质和程度的判断。

从数据结果对比分析来看,两部雷达之间回波强度差异主要是由云和降水对雷达波的衰减所产生的。但不排除各部雷达(即使是同一型号)之间也会存在系统测量误差,从而引起对同一降水目标物的探测的回波强度不同的原因。综合分析认为,两部雷达之间回波强度差异不仅受雷达自身性能参数如波长、波束、频率的影响,而且与降水形态对雷达波的衰减有很大的相关性,也与探测仰角、扫描距离、地形遮挡等存在一定的关系。因此,各地应考虑各天气雷达观测数据的差异性对强对流天气变化趋势预测结果所产生的干扰作用。

参考文献

- [1] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 多普勒天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3):456-464.
- [2] 廖玉芳,潘志祥,郭庆. 基于单多普勒天气雷达产品的强对流天

- 气预报预警方法[J]. 气象科学, 2006, 26(5): 564–570.
- [3] 王君军, 王彪, 周博扬. 2017年4月5日贵阳一次飑线天气过程综合分析[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(2): 36–41.
- [4] 蒙军, 杨静, 徐良军, 等. 贵州一次短时强降水雷达演变特征分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(1): 8–15.
- [5] 史锐, 程明虎, 崔哲虎, 等. 长江流域多普勒雷达回波强度资料对比分析[J]. 气象, 2004, 30(11): 27–31.
- [6] 肖艳姣, 刘黎平, 杨洪平. 区域雷达网同步观测对比分析[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 919–927.
- [7] 徐八林, 刘黎平, 许小永, 等. 高山雷达站选址对估测降水的初步分析[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 340–344.
- [8] 徐八林, 刘黎平, 徐文君, 等. 利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析[J]. 气象, 2008, 34(9): 28–33.
- [9] 邹书平, 田楠, 刘国强, 等. 一次强冰雹天气过程双雷达回波特征参数对比分析[J]. 贵州气象, 2012, 36(3): 12–14.
- [10] 吴剑坤, 俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 197–205.
- [11] 邹书平, 李丽丽, 常履福, 等. 贵州山区强冰雹云单体演变特征分析[J]. 贵州气象, 2016, 40(2): 15–19.
- [12] 刘小艳, 蒋汉开, 刘国强. 一次冰雹天气过程的两块雹云防雹效果对比分析[J]. 贵州气象, 2016, 40(1): 50–55.
- [13] 滕林, 贺德军, 陈军, 等. 黔东南一次大范围弱冰雹天气过程分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(5): 39–45.
- [14] 李杰, 吴剑坤, 宋歌, 等. 2016年6月30日北京强冰雹天气分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(5): 51–57.
- [15] 李丽丽, 邹书平, 杨哲, 等. 贵州中部一次多单体冰雹天气的雷达回波特征[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(2): 21–27.
- [16] 王振会, 黄兴友, 马舒庆, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 235–236.
- [17] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 40–50.
- [18] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 19–22.
- [19] 焦中生, 沈超玲, 张云. 天气雷达原理[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 304–305.