

# 雷达站网资料在长江流域暴雨试验中的应用

阮 征

邵爱梅

(中国气象科学研究院,北京 100081) (兰州大学,兰州 730000)

**摘要** 阐述了新一代天气雷达站网资料拼图技术在长江流域暴雨试验中的应用,内容包括雷达基数据的处理转换、站网资料的一致性处理方法、不同波段雷达资料的拼图策略、风场反演、结果的综合显示,并以此为基础建立了雷达站网综合拼图软件系统,利用该系统对 2001 年、2002 年长江中下游地区暴雨试验期间的雷达组网中不同型号雷达的探测基数据,进行了资料处理转换和站网综合拼图。

**关键词** 新一代天气雷达站网 数据一致性 综合拼图

## 引言

新一代天气雷达在空间及时间分布上具有较好的连续性,组网雷达资料的综合使用要求临近雷达资料在测量真实性、空间代表性、时间代表性上具有较好的一致。雷达站网资料基数据的反射率因子及平均径向风速的数据处理方法有很大的不同。相邻雷达反射率因子的不一致主要由雷达系统的探测误差以及降水的衰减影响所致。其中探测误差主要包括系统误差和随机误差<sup>[1]</sup>;Herman<sup>[2]</sup>、秦瑜<sup>[3]</sup>等人曾经就降水对雷达回波的衰减进行过研究,认为降水粒子对 C 波段雷达的衰减与粒子的温度、形态以及分布有关。黄炎、葛润生<sup>[4]</sup>就 S 波段及 C 波段雷达对降水的发现能力进行过比较分析,提出 S 波段对降水的发现能力大于 C 波段。平均径向速度资料的处理主要包括速度退模糊及风场反演两方面内容。目前国内发展了如 K 领域频数法<sup>[5]</sup>、变分同化法、区域膨胀法等多种速度退模糊等方法,利用多普勒径向风速反演风场的方法较多,Waldteufel 和 Corbin(1979)提出的 VVP(Volume Velocity Processing)方法即速度体积处理方法<sup>[6]</sup>,陶祖钰(1992)提出 VAP(Velocity Azimuth Processing)方法<sup>[7]</sup>,葛润生、姜海燕等(1995)提出了涡度-散度方法用于单多普勒二维风场反演<sup>[8]</sup>,邱崇践等发展的一种简

单共厄方法<sup>[9]</sup>,各种方法的假定条件不同,相应的适用条件有所不同。

长江地区暴雨试验中采用多普勒雷达组网观测,分别建立了以宜昌为中心的长江中游地区雷达监测网以及以合肥为中心的长江下游地区雷达监测网,本文针对长江地区暴雨试验中多部雷达基数据进行了综合处理分析,并提交了暴雨个例的处理分析结果。

## 1 站网雷达资料的一致性处理

对组网雷达资料的使用首先应对单部雷达进行数据处理及转换。对于雷达反射率因子,利用极坐标与直角坐标的转换公式,将反射率因子从雷达极坐标扫描方式转换为雷达标准等高面上直角坐标方式,即用  $Z(x, y, z)$  代替  $Z(r, \theta, a)$  描述雷达回波强度的空间代表性。

雷达站网资料使用之前,必须对相邻雷达资料探测代表性的一致性、资料空间属性的一致性、资料时间属性的一致性进行分析及处理。

### 1.1 资料测值的一致性处理

根据雷达探测系统的出厂验收标准,反射率因子的定标误差为  $\pm 1$  dBz,对相邻雷达站网资料重叠区域的对比分析发现,不同雷达对相同区域的探测结果差往往大于定标误差,造成这种误差的因素很

多,当确定雷达的方位定标、仰角定标误差在允许范围内后,应选择性能较好、测量精确稳定的雷达测量值作为基值,对其它雷达站资料进行调整,以达到资料探测代表性的一致。

计算相邻雷达的基值误差时,为减少由于降水衰减不均匀带来的偏差,通常选择回波带覆盖范围宽广、降水分布均匀的降水个例,同时为避免距离衰减带来的误差,对相邻雷达资料基值误差分析取样区的选择原则要求取样区中心距不同雷达距离相等,通过对探测误差进行统计分析,得到区域内相邻雷达反射率因子误差分析结果,依次对组网内相邻雷达进行统计分析,最终得到站网相邻雷达的基值误差结果。

随机误差的确定通过对多次降水过程选定区域内反射率因子差值进行统计分析,并对每次分析结果进行比较,其差值认为是随机误差。

表1 方位、仰角的距离误差表

	km							
	50 km		100 km		150 km		200 km	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
仰角误差:0.1°	0.0873	0.1222	0.1745	0.2443	0.2618	0.3665	0.3491	0.4887
方位角误差:0.2°	0.1745	0.2443	0.3491	0.4887	0.5236	0.7335	0.6981	0.9773
方位角误差:0.3°	0.2618	0.3665	0.5236	0.7330	0.7854	1.0996	1.047	1.4658

注:其中 *a* 单部雷达误差, *b* 两部雷达误差

### 1.3 资料时间属性的一致性处理

新一代天气组网雷达完成一个体积扫描的时间为5~6 min,为连续不间断观测,雷达起始扫描时间的不一致,导致站网雷达在观测时间上不完全同步,最大时间差为3 min,基本认为站网资料是同步观测的。对相邻雷达站网观测资料时间不同步带来的时间不一致,根据降水系统的移动方向,相邻雷达资料的选取选择上游雷达观测时间早于下游雷达观测时间,以减少由于时间不同步带来的资料不一致。

雷达站网资料的综合利用,在扩大资料覆盖范围的同时,带来资料时间覆盖的延时,雷达站网资料的时间代表性由单站的5~6 min延时到8~9 min。

## 2 雷达综合拼图策略

### 2.1 反射率因子拼图策略

雷达站网资料反射率因子拼图面临的主要问题是不同波段探测结果及相同波段不同雷达站点获取资料的合理使用问题。雷达站网主要采用S波段及C波段两种探测体制,由于S波段雷达较C波段雷

### 1.2 资料空间属性的一致性处理

组网雷达空间一致性处理首先是不同雷达空间地理坐标代表性的统一,因此需要将单部雷达基数据从雷达直角坐标方式转换到笛卡尔坐标系下的直角坐标方式<sup>[10]</sup>,转换时必须考虑地球曲率的影响。

在雷达资料空间代表性达到一致的前提下,还应考虑输出结果空间分辨率的精度对探测资料描述的准确性。我国目前业务运行的雷达大多采用太阳标定法进行定标,方位误差范围为±0.2°~0.3°,仰角误差范围为±0.1°。表1为仰角误差为0.1°、方位角误差分别为0.2°、0.3°时,距离雷达中心不同位置的方位误差及仰角误差。

为达到资料的有效利用,根据表中的误差结果,结果输出的空间水平分辨率定义为1 km×1 km,在进行高度分层处理时采用非等间距差值处理,高度输出间隔低层为500 m,较高高度上的输出为1 km间隔。

达更满足瑞利散射条件,对降水信息的描述更为准确,因此使用雷达组网数据跟踪降水时,充分使用S波段雷达的探测结果。

考虑到雷达波束在传播过程中的距离衰减,同时雷达在扫描过程中取样距离库的空间代表性在近距离处优于远距离处,因此在直角坐标系下,距离雷达较近处的资料空间代表性较好,而距离较远处资料空间代表性较差,对于雷达资料重叠区域,对资料的选取优先考虑距离较近的雷达站资料。

当覆盖重叠区域相同空间位置强度差大于雷达定标误差范围1 dBz时,认为相邻雷达数据出现偏差,对相邻雷达数据进行基值误差订正,基值订正针对雷达探测获取的所有观测资料,使站网雷达回波保持基本一致。对于重叠区域相邻雷达资料应根据所在空间位置、雷达波段等不同情况分别处理,当雷达波段不同时,选择性能较好的S波段雷达数据输出;当波段相同时,对重叠区资料的处理选择距雷达中心较近的数据输出。

### 2.2 径向速度拼图方案

速度退模糊、风场反演、矢量合成是风场拼图的 3 个重要组成部分。不同波段雷达的探测能力不同,目前国内组网雷达 CINRAD/SA 等型号雷达具有距离模糊识别能力,而且最大不模糊速度范围较大,而 C 波段雷达的速度模糊问题不容忽视。

采用变分方法进行速度退模糊。利用雷达体积扫描时间的连续性,将上一次时间的已退模糊风场作为下一时刻退模糊风场的参考值,对一个时次的已退模糊的风场进行三维变分分析,得到的风场作为背景场来退除相邻时次的风场模糊,同时,用移动框架技术解决两次风场结构变化过大的问题。这种方法启动时要求一个时次的已退模糊风场,在没有辅助风场信息的情况下,用 Yamada 和 Chong (1999)的方法<sup>[11]</sup>给出退模糊的基准值,辅以连续性检测来得到启动时刻的已退模糊风场。

风场反演采用由简单共厄方法发展的两步变分分析方法,首先假设风场在空间上满足二次多项式,在这一假设下反演出一个比较光滑的风场作为背景风场,然后在网格点上反演它的详细结构。从多个个例反演试验和双雷达对比结果来看,方法反演效果稳定,能得到水平风场的基本结构。

将直角坐标系下的结果投影到笛卡尔坐标系下,对重叠区域内得到的相邻雷达反演风的  $u$ 、 $v$  分量进行矢量合成,从而得到雷达水平风场的矢量拼图结果。

### 3 雷达综合拼图系统

在实现了雷达站网资料处理转换、风场反演、雷达拼图算法的基础之上,建立了一套站网雷达综合处理集成显示软件系统,利用该系统对长江流域暴雨试验提交的多部雷达基数据进行了综合处理分析,该软件系统软件流程如图 1 所示。

### 4 个例应用

长江流域暴雨试验中参加组网观测的雷达型号不同,有 CINRAD/SA、CINRAD/SB、CINRAD/CC、CINRAD/CCJ 等多种型号。在对多部雷达资料进行误差订正时,发现雷达反射率因子在不同程度上存在着系统误差,选择运行时间相对较长、数据可靠性较好的宜昌雷达资料作为基准数据,对其他雷达数据进行误差订正,实现反射率因子的一致性处理。

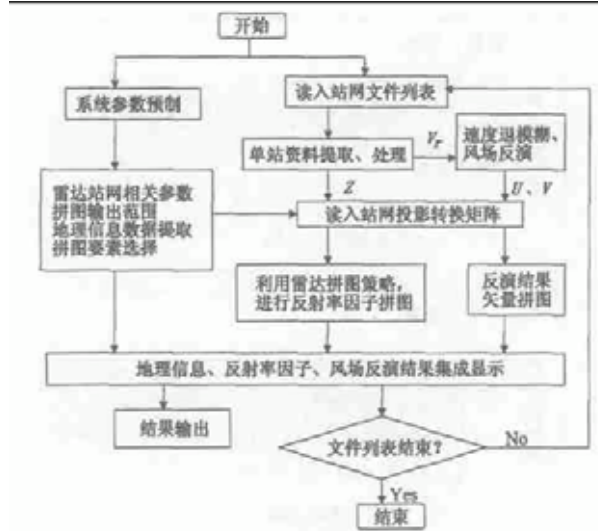


图 1 雷达站网基数据综合拼图流程图

对风场反演结果的拼制,采用两步变分方法获得单部雷达风场反演结果,将其结果进行矢量合成,得到较大范围、分布较为连续的风场分布。

#### 4.1 反射率因子拼图

为简化雷达探测系统误差的订正,对雷达方位定标误差严重的资料不予使用。利用概率分布方法对系统误差进行订正<sup>[12]</sup>。图 2 为 2002 年长江流域 6 月 27 ~ 28 日一次暴雨过程相邻雷达的采样区域回波反射率的概率分布。雷达探测系统误差较为明显,荆州雷达回波功率谱分布较弱,雷达回波平均小 8 个 dBz,常德雷达回波功率谱分布较强,较宜昌雷达平均大 8 个 dBz,南昌、长沙分布较为一致。

对雷达系统随机误差的订正建立在对取样区域样本在时间上较为连续的跟踪,通过对 2002 年长江流域暴雨试验的几次暴雨过程取样区域样本的回波反射率概率分布统计特征分析,得到的误差分布结果一致,认为站网雷达的随机误差不影响资料的使用。

图 3(见图版 1)为 2002 年 973 外场试验长江流域雷达站网分布图,其中图 3a 为中游地区雷达站网分布,图 3b 为下游地区雷达站网分布图。其中阴影部分代表雷达扫描覆盖范围,彩色填充区域为雷达有效数据范围,背景为 1:400 万的地形高程数据。长江中游地区雷达站网拼图范围为 109.8° ~ 117.5° E, 26.6° ~ 32.5° N。根据误差分析结果,采用上述的雷达拼图策略,以宜昌雷达数据为基准数据,对组网内其他雷达基数据进行基值订正及拼图处理,得

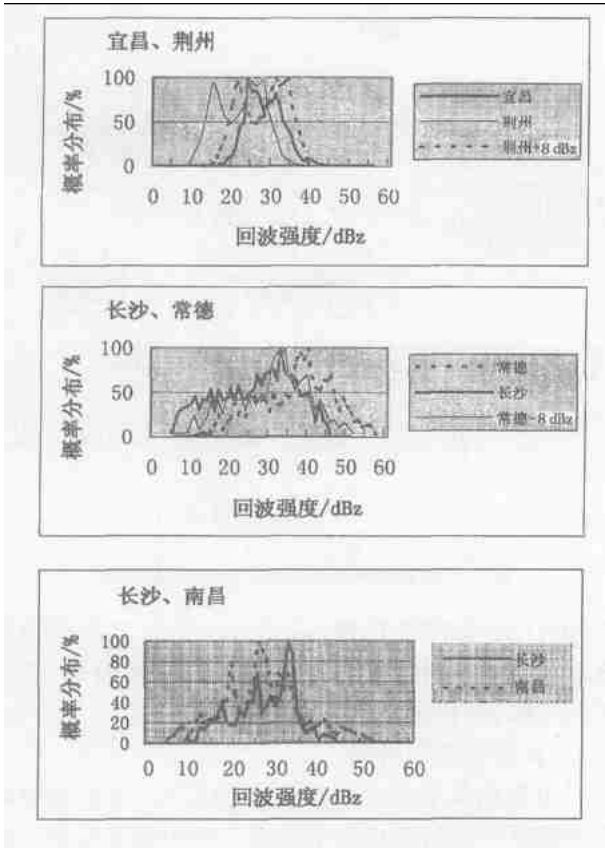


图 2 长江中游地区相邻雷达采样区域重叠回波强度概率分布图

到了多个暴雨过程的雷达连续监测结果。图 4(见图版 1)给出了 2002 年 6 月 27 ~ 28 日长江地区一次暴雨过程的雷达站网拼图结果,雷达拼图产品输出空间水平分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,雷达测站为宜昌、常德、长沙、南昌,其中图 4a、b 分别为 6 月 27 日 22:44、6 月 27 日 23:05(北京时,下同)拼图结果输出,图中不难发现回波强度具有较好的连续分布,并对雨带有良好的连续跟踪能力。

#### 4.2 水平风场拼图

图 5(见图版 1)为 6 月 27 日 22:44 图(5a)、6 月 27 日 23:05(图 5b)风场反演结果与雷达回波强度拼图结果叠加图,图中在风出现复合的区域,对应回波强度的大值区,且回波的移动方向与风场反演结果基本一致。图 6 为 2002 年 6 月 27 日 20:00 700 hPa 高空风观测与相应时刻常德、长沙、南昌 3 km 高度风场反演结果拼图输出、雷达站点分布叠加显示,在长江中游区域 5 部雷达的覆盖范围内,分布有 6 个探空站,测站间距离近百公里,而雷达反演风场的结果可以提供空间分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 、

时间步长为 6 min 分布的连续高密度输出。图中可见,在 3 km 高度上实际观测风为偏西走向,利用 3 部雷达站的风场反演结果拼图流场呈东西走向,局部出现了风场的复合。

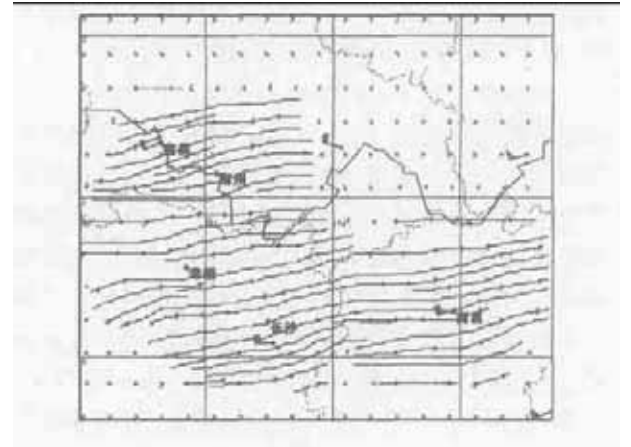


图 6 700 hPa 高空风观测与 3 km 高度风场反演拼图、雷达站点分布叠加图

#### 5 小结

(1) 实现了多普勒雷达基数据的处理转换、风场反演、相邻雷达资料的综合处理,并建立了一套较为完整的雷达站网基数据拼图软件系统。

(2) 完成了雷达站网资料的探测一致性处理、空间一致性处理、时间一致性处理,提出了对站网资料有效利用的拼图策略。

(3) 进行了较为合理的相邻雷达反射率因子误差订正,通过对平均径向速度的退速度模糊、风场反演、矢量合成,实现了雷达站网风场反演结果拼图。

该软件系统为长江流域暴雨试验提供了站网资料拼图结果,同时基于新一代天气雷达的暴雨监测和临近预报业务系统的站网资料综合使用将以该系统为基础并在此基础上加以完善。

#### 参考文献

- 1 张沛源.天气雷达定标、终端更新培训讲义.北京:中国气象科学研究院,1999
- 2 梁海河.多谱勒天气雷达速度退模糊处理方法.应用气象学报,2002,13(5):591-599
- 3 Herman B M, Battan L J. Calculation of Mie backscattering of microwaves from ice spheres. Q. J. Roy. Meteor. Soc.,1961,87:223-230
- 4 秦瑜.雨对 5 厘米波长电磁波的散射和衰减.雷达气象文集.北京:气象出版社,1981

- 5 黄炎,葛润生,713 雷达和 843 雷达探测降水能力的比较.大气探测文集.北京:气象出版社,1983.185 - 189
- 6 Waldfuehl P, Carbin H. On the analysis of single Doppler radar. J. Appl. Meteor., 1979, 18: 532 - 542
- 7 陶祖钰.从单部 Doppler 雷达速度场反演风矢量场 VAP 方法.气象学报, 1992, 50: 81 - 90
- 8 姜海燕.一种新的单部多普勒雷达反演技术:[硕士学位论文].北京:中国气象科学研究院,1995
- 9 邱崇践, Qin Xu.由单部 Doppler 雷达资料反演水平风场的简单共厄方法的改进方案.应用气象学报, 1996, 7(4): 421 - 429.
- 10 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. '98 华南暴雨科学试验研究.北京:气象出版社, 2003. 39 - 45
- 11 Yamada Y, M Chong. VAD-based determination of the Nyquist interval number of Doppler velocity aliasing without wind information. J. Meteor. Soc. Japan, 1999, 77: 447 - 457
- 12 刘黎平, 张沛源, 梁海河, 等. 双多普勒雷达风场反演误差和质量控制.应用气象学报, 2003, 14(1): 17 - 29

## Application of Radar Network Data in CHeRES Experiment

Ruan Zheng

( Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Shao Aimei

( Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract:** The integrated mosaic technique of new generation Doppler weather radar network was applied in the CHeRES experiment. The technique includes the processing and conversion of radar volume scanning data, the uniform processing of radar network data, the strategy to make radar data mosaics for different bands, the wind field retrieving and the composite result display. Also based on this technique, the application software system was developed, which was used for the volume scanning data obtained from vari-type radars in the CHeRES experiment in 2001 and 2002, and some data mosaic results are given.

**Key words:** new generation Doppler weather radar network, data consistency, integrated mosaic

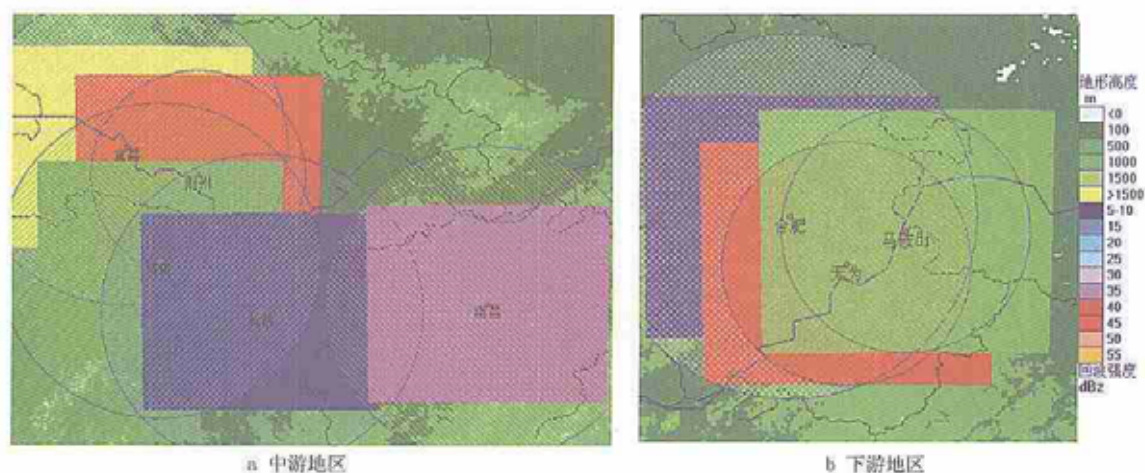


图3 2002年“973”暴雨试验长江流域雷达站网分布图

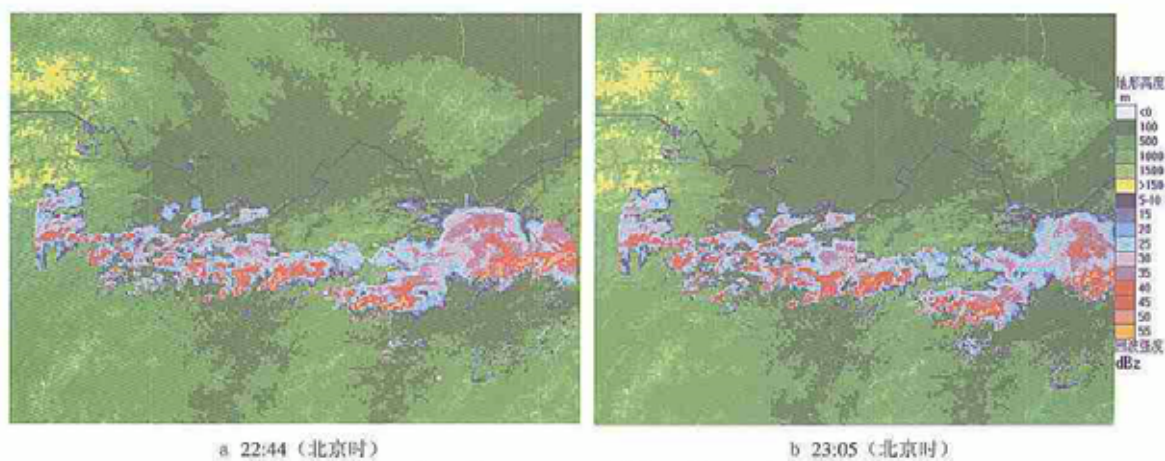


图4 2002年6月27日3 km高度长江中游地区雷达拼图

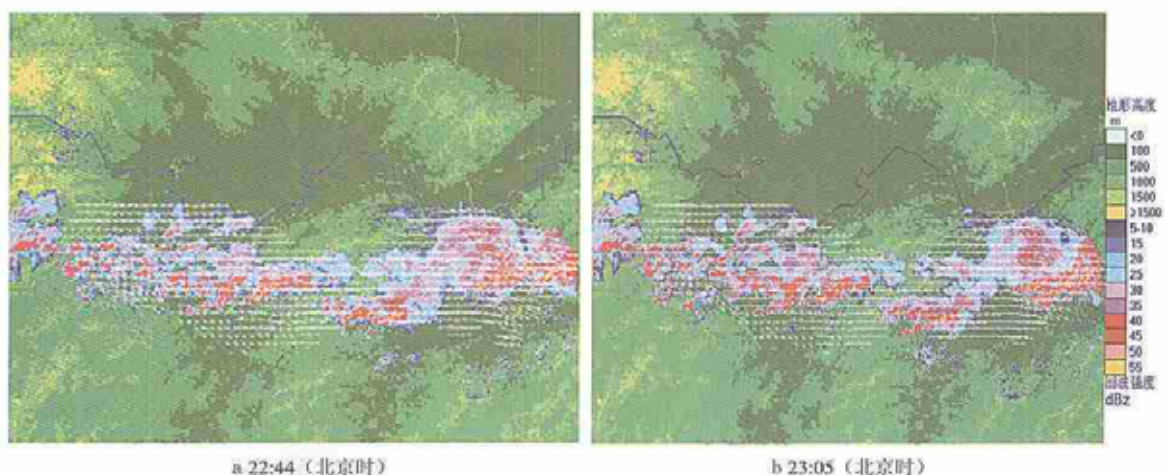


图5 2002年6月27日3 km高度风场反演拼图与回波强度拼图叠加图