

华南暴雨试验天气雷达数据处理及暴雨 中尺度结构个例分析*

梁海河 阮征 葛润生

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

文中描述了华南暴雨试验多普勒天气雷达数据的处理方法,建立了一套集图像显示、数据预处理及风场反演分析为一体的多普勒天气雷达的分析应用系统。该系统生成了三维正方形网格和经纬度网格的回波强度值,以及经噪声控制和速度扩展的径向速度风场,提交了华南暴雨试验雷达数据库。该文以 1998 年 6 月 9 日 08:00(北京时)探测数据为例,给出了华南暴雨试验区内 4 部多普勒天气雷达的反演雨强图和两部雷达的风场反演拼图,并进行了暴雨中尺度风场结构的初步分析。

关键词:华南暴雨试验 多普勒天气雷达 雷达数据处理

引 言

在华南暴雨试验期间,共有 7 部天气雷达在试验区内进行了组网观测,收集了较丰富的雷达原始观测数据。这些雷达原始数据在雷达坐标系中以二进制的量化数存储,不能直接表示为气象产品,使用时存在很大困难。多普勒径向速度的噪声和速度模糊,也直接影响了风场信息的使用。为方便雷达观测数据的进一步分析和使用,本文建立了华南暴雨数据处理系统,其中包括:(1)原始数据格式的统一转换和数据校验,(2)雷达格点数据和产品生成,(3)径向速度预处理,(4)雨强和风场反演与拼图。本文将阐述华南暴雨试验多普勒天气雷达数据的处理系统,并尝试给出反演风场和雨强拼图的应用试验,可供我国台站业务人员处理和使用新一代天气雷达数据借鉴。

1 试验区内的雷达数据探测

在华南暴雨试验区域内 7 部天气雷达的布局如图 1 所示。其中,长乐、厦门和汕头是国产 714SD 多普勒天气雷达,探测距离为 300 km;香港是 EEC 多普勒天气雷达,探测距离为 250 km;建阳、阳江和韶关是 713C 和 714S 数字化天气雷达,探测距离是 240 km。表 1 给出了各个雷达的性能参数。4 部多普勒雷达布于沿海岸线上,可有效地监测沿海和近海海域的天气情况。雷达的布局与海岸走向一致,基本覆盖了华南沿海和近海区域,探测区域在 $110^{\circ} \sim 121^{\circ} \text{E}$ 、 $20^{\circ} \sim 28^{\circ} \text{N}$ 范围之内,区域中心约为 115.5°E 、 24.0°N 。

* 本文由“海峡两岸及其邻近地区暴雨试验”项目 98-002 课题资助。
2002-10-11 收到,2003-07-04 收到修改稿。

以 200 km 有效探测距离计算,可探测区域约为 400 km×1000 km。

试验期内,加密观测间隔时间为 1 h,跟踪观测为 0.5 h,在 6 次降水天气过程的加密观测中共获得各类雷达观测资料约 4000 个时次,8 GB 的原始数据。

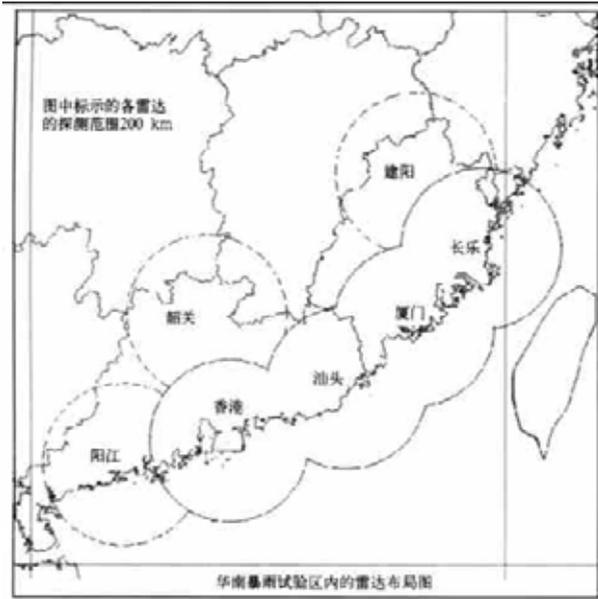


图 1 华南暴雨试验区内的雷达布局图
(实线为多普勒雷达,虚线为常规雷达)

表 1 华南暴雨试验天气雷达参数表

雷达测站	雷达型号*	波长 (cm)	波宽 (°)	增益 (dB)	旁瓣 (dB)	功率 (kW)	灵敏度 (dB)	动态范围 (dB)	信号处理
								对数/线性	强度/速度
长乐	714-SD	10.4	1.2	43	< -25	540	-107	70 80	DVIP PPP
厦门	714-SD	10.4	1.2	43	< -25	540	-107	70 80	DVIP PPP
汕头	714-SD	10.4	1.2	43	< -25	540	-107	70 80	DVIP PPP
香港	EEG-SD	10.7	1.0	44	< -27	750	-112	70 80	DVIP PPP
建阳	713-C	5.6	1.2	42	< -25	250	-105	60	DVIP
韶关	713-C	5.6	1.2	42	< -25	250	-105	60	DVIP
阳江	714-S	10.6	1.2	42	< -25	500	-105	60	DVIP

* S、C:指波段,D:表示是多普勒雷达。

2 回波强度的处理和雨强反演

2.1 原始数据格式的统一和转换

雷达回波的强弱是通过雷达气象方程与气象目标物特性、雷达整机参数以及目标距离等联系在一起,在实际应用中雷达气象方程可改写为:

$$Z = C^1 + 10\log_{10} P_r + 20\log_{10} R \quad (1)$$

式中, C^1 称为雷达常数, P_r 是接收功率 (dBm), R 是目标物到雷达天线的距离 (km)。雷

达原始数据通常指上式中等式右边前两项或三项之和,对于多普勒天气雷达还应包括径向速度和谱宽两项。由于我国的天气雷达型式较多,不同厂家或同一厂家不同时期生产的雷达的原始数据存档方式差异很大^[1]。由于我国天气雷达缺乏统一的数据格式标准,雷达原始观测数据的存放方式有很大的任意性,致使雷达数据格式识别和转换成为一件十分复杂和费时的的工作。为此,本文编制了华南暴雨试验雷达数据格式,并将试验区内的雷达进行了格式转换。华南暴雨试验雷达原始数据格式和产品数据格式均含有一个长度为 512 字节的数据头,用以指示雷达站信息、雷达参数、观测方式和时间,以及数据类型和格式排列方式等。在数据头后排放原始数据或产品数据,原始数据以方位(逆时针)为序(不一定从 0° 开始)按径向排放(由近向远)。图 2 是统一后 714SD 雷达的一个径向原始数据存档格式,0~9 称为径向数据头,10~3071 为要素数据。其中,从 0 到 5 字节是年月日时分秒,6、7 字节为方位角的低位和高位,8、9 字节是仰角的低位和高位。三个要素按库排放。

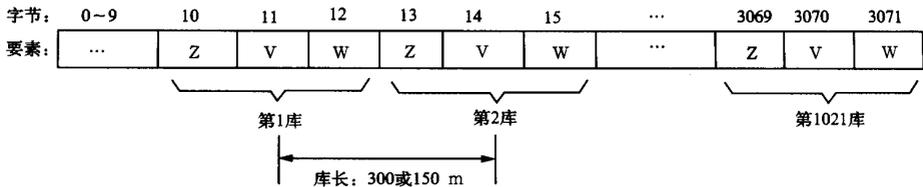


图 2 华南暴雨试验多普勒雷达一个径向上数据排列方式

产品数据包括二维或三维的正方形网格点数据和经纬度网格点数据,产品数据以雷达探测距离圆内接正方形的网格点左上角为起点,由左向右、由上向下按行列顺序排放,行列数取决于雷达探测范围和格距。为方便各类人员使用,产品数据以文本格式给出。在制作正方形网格数据时,应将雷达坐标系转化为直角坐标系,本文采用“反求”的算法求解直角坐标系中的回波强度,即以直角坐标中的 (x, y) 为自变量,求算极坐标中的 (R, θ) ,从 (R, θ) 再求雷达坐标系中的方位、仰角和库序列数,由此可唯一确定空间任一点的数据。地面距离和方位由下式可以求得:

$$\begin{cases} L = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan \frac{y}{x} \end{cases} \quad (2)$$

由于天气雷达的探测距离一般在几百公里之内,地球曲率在水平方向的影响可以不考虑,这样由地面距离 L 可以得出探测斜距 R ,即:

$$R = L / \cos(E_L) \quad (3)$$

式中, E_L 为已知的天线仰角。探测斜距 R 由库长和库序列数确定。

在雷达坐标系中,正北方是 0° ,以顺时针方向为正。因此,天线方位角 $A_z(0^\circ \sim 360^\circ)$ 与极坐标系中的 θ 存在如下关系(第一象限,其它象限可类推):

$$A_z = 90^\circ - \theta \quad (0^\circ \leq A_z < 90^\circ) \quad (4)$$

通常回波高度 h 的计算必须考虑到地球曲率的影响,而采用:

$$h = H_0 + R \sin(E_L) + \frac{R^2 \cos^2(E_L)}{\frac{8}{3}r} \quad (5)$$

其中, H_0 为天线到地面的高度, R 为回波到天线的距离(斜距), r 是地面到地心的长度。

雷达观测的库长、库序列数、天线方位和仰角可由原始数据文件头中获取, 通过利用式(2)、(3)、(4)和(5), 即可求出正方形网格点值, 水平网格距分别取为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, 垂直格距取为 1 km 。当“反求”算法所需的库序列数、方位与雷达实际观测时的库序列数、方位不是同一取值时, 采用在空间位置上最近的值。由于考虑到雷达数据已是空间取样的方位和距离的平均值, 华南暴雨试验雷达数据未再进行插值平均, 在应用这些数据时可根据具体的需要作插值或平均处理。

由于天气雷达采用的坐标系的水平面, 是与地球半径相垂直的平面。雷达确定的东西方向与纬度线不重合, 在制作经纬度网格数据时, 应考虑到纬度随距离的变化。在假定地球是球体的情况下, 天气雷达坐标与经纬度坐标的关系为^[2]:

$$W_i = 90^\circ - \arccos \left[\cos(90^\circ - W_0) \cos\left(\frac{L}{R_m}\right) + \sin(90^\circ - W_0) \cdot \sin\left(\frac{L}{R_m}\right) \cdot \cos(\phi) \right]$$

$$G_i = G_0 + \arccos \left| \frac{\cos\left(\frac{L}{R_m}\right) - \cos(90^\circ - W_0) \cdot \cos(90^\circ - W_i)}{\sin(90^\circ - W_0) \cdot \sin(90^\circ - W_i)} \right| \quad (6)$$

式中, G_0 、 W_0 是雷达天线所在位置的经纬度, G_i 、 W_i 是目标物的经纬度, L 是目标物到天线之间的地面距离, R_m 是等效地球半径。

利用公式(2)和(6)可求得任一经纬度上的值, 这里不再详述。华南暴雨试验雷达数据除提供原始数据和产品数据外, 还提供了图像产品, 其中包括反射率的平面位置显示(PPI)、等高面PPI、回波顶高、组合反射率、反演雨强、垂直累积液态含水量, 以及径向速度和谱宽等。

2.2 回波强度的校验

华南暴雨试验天气雷达规范了定标方法, 并在外场试验开始前, 由试验组与厂家联合对各部雷达进行了标定。由于雷达在试验观测过程中各项参数可能会发生变化(包括器件更换), 因此通常应在一定时间内要进行再一次的标定, 才可能保证雷达探测数据的可靠性。由于受试验条件限制, 华南暴雨试验雷达未能进行再次标定。图3给出了汕头714SD多普勒天气雷达在1998年4月11日的两个对数接收机通道的定标曲线。图3中横坐标是公式(1)的前两项 Z' , 纵坐标是量化数, 其中的标定曲线在 $-32 \sim 20$ 之间的方差为 0.52 dB , 相关系数为 0.99 , 表明标定曲线线性较好, 基本符合要求。但是标定曲线的动态范围只有 50 dB 左右(标定曲线线性部分对应的横坐标长度), 利用公式(1)可知, 在距雷达 100 km 处最大可测得的回波强度不到 55 dBz , 最小可测回波也只有 $8 \sim 15 \text{ dBz}$; 在 10 km 处的最大可测强度为 35 dBz 时即达到饱和。因此, 在一定的参照条件下, 对华南暴雨试验天气雷达观测数据作适宜的校验是必要的。香港和台湾多普勒天气雷达采用连续的立体扫描观测模式, 且具有自动标校能力, 因此通过香港与汕头、台湾与长乐和厦门雷达对相同回波同时观测资料的统计分析, 结合地面雨强的加密观测资料, 以及雨强与回波强度的反演结果^{[3][4]}, 对3部714SD雷达的回波强度作了适宜的调校。校验结果为汕头和厦门站回波偏低, 约为 10 dB 和 7 dB , 长乐站偏高, 约 5 dB , 在本文向华南暴雨试验提

供的数据中均作了适宜的调整。

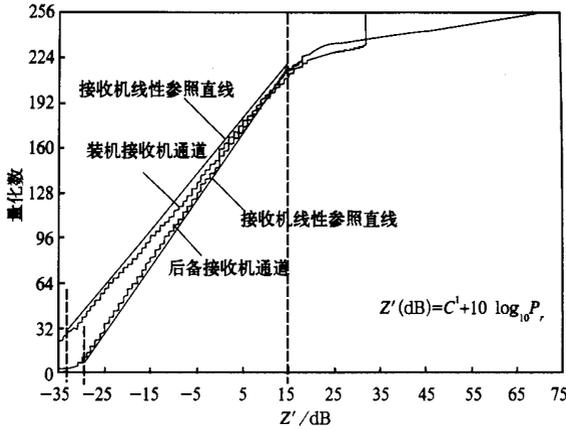


图 3 汕头雷达两台接收机定标曲线(1998 年 4 月 11 日)

2.3 回波拼图和雨强反演个例试验

经上述方法处理后,雷达回波强度以直角坐标系或经纬度坐标系给出,本文以经纬度网格回波强度值绘制了雷达反演雨强拼图试验。1998 年 6 月 8 日 08:00 至 11 日 08:00,在广东、福建出现了一次强降水过程,降水分布范围较广,强中心出现在香港。试验区内的各多普勒雷达对这次过程进行了较好的密集观测,选用 4 部多普勒天气雷达(香港、汕头、厦门和长乐)的加密观测的回波强度资料进行试验,给出雷达拼图和反演雨强。

为消除地物影响采用 3 km 高的回波强度。在雷达重叠探测区,以回波强度大的取值。在取值交接处,进行平滑处理。从拼图(图略)中可清楚地看到在香港东部、汕头的西部有一片强回波区,香港和汕头的两部多普勒雷达同时对这片回波进行了观测,两部雷达的拼图显现了该回波区的完整状况。本文用 Z-I 关系即 $Z = AI^b$ (A, b 是常数),取初始值 $A = 200, b = 1.6$ 反演了雨强,并利用基准雨量计和地面加密观测站多点平均校准法校准了雨强值,进而形成了反演雨强场(图 4)。文献[3]将此反演结果引入了中尺度数值模

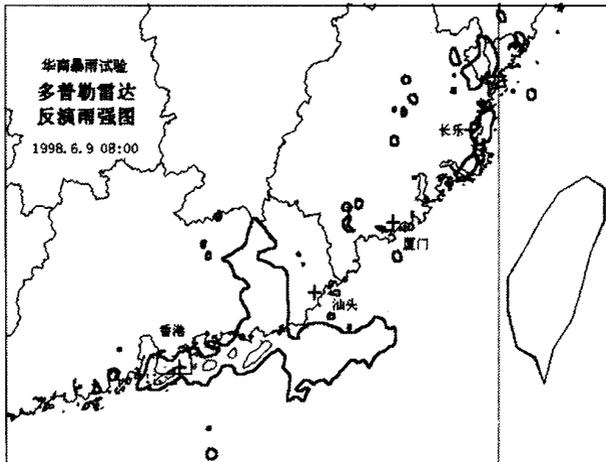


图 4 试验区内香港、汕头、厦门和长乐反演雨强图

式的初始场,并获得了较好的3~6h的短时预报结果。

3 风场处理和反演的集成与应用个例分析

我国对单多普勒天气雷达风场反演技术的研究,近年来取得了很大进展^{[5][6][7]},但是应用到实际中得以检验的并不多。本文于1995年在CAMS业务雷达上开始了这方面的尝试,在1998年华南暴雨外场观测试验中进一步开展了风场处理和风场反演应用试验。这一工作有利于促进风场反演技术的发展,以及单多普勒雷达反演风场假定条件的改善^[8],同时在业务上提供了一个有用的风场处理和应用平台^{[9][10]}。

由于“噪声”和速度模糊的存在,必须对多普勒天气雷达的风场进行预处理。华南暴雨试验多普勒天气雷达风场资料采用“K-邻域频数法”处理“噪声”,包括补缺测点、消除尖点、平滑数据等,并以“双径向”法和“可视化人机交互”法进行了速度模糊消除^[11]。图5(彩图左)是华南暴雨试验IOP#6汕头多普勒天气雷达的风场的一次观测结果。图6(彩图左)是取自图5(彩图左)中方位为 122° 的径向速度廓线,从该图中能较清晰地看出速度模糊及其分布状况。图5(彩图右)是经“K-邻域频数法”处理及单径向速度扩展^[11]后的图像,图中噪声得到了抑制,补充了风场缺测资料,回波区边缘杂乱的区域得到了修正,而且保持着原有形状和结构。图6(彩图右)是经“单径向”速度扩展而未经“K-邻域频数法”处理的结果,图中仍有缺测值需要补充,但通过“K-邻域频数法”的参数调整,这些值可得到较好修正(详见文献^[11])。在向华南暴雨试验数据库提供的雷达风场资料中,均进行了噪声和退模糊处理,结合可视化人机交互方法,风场预处理结果是满意的。

在速度预处理的基础上,我们选择了VAD方法^[12]、涡度-散度方法^[6]将反演风场准实时地与强度场、地形、风场模型等进行了集成显示和处理,为业务天气系统分析和外场试验观测提供了方便。图7(彩图)是一次强对流降雹过程的回波强度与反演风场的叠加显示。由图可见,测站西南地区存在一个中尺度速度辐合带,呈东西走向,长约50~60km,最大风速在10m/s以上。与之相对应的回波强度图也呈东西走向,范围大致相同。二者重叠显示可清楚地看出,回波带内是明显的辐合区,回波带移向的前方为偏南风,后方为北风,南北气流汇合后,在回波带内形成偏东风。从VAD分析知,测站近地层为东南风,随高度增加风向变为偏南风,在1km处由西南风向东南风转变。事实上,在强回波带生成之前或初期这里就存在一个气流汇合区,强回波带形成后移向其下风方向的这一区域。在移离这一气流汇合区之后,回波开始减弱。因此,依据风场结构产品就可以对强回波天气系统的发生、发展和演变情况,可能提前做出预报。

对强对流天气的探测和预警中,人们更希望看到云体内的三维流场结构。本文以华南暴雨试验IOP#6的厦门和长乐两部714SD雷达进行了三维反演风场的拼图试验。图8(彩图)是1998年6月10日两个时次的反演风场拼图,反演风场与850hPa上的水平流场形式一致。对于沿海无常规观测区,这些风场信息显得更为重要。在08:48的拼图上,反演风场呈现4个强风速区域,分别位于厦门和长乐两部雷达的西南和东北部地区。在09:40的拼图上,厦门西南部的风场(限于篇幅,其它三个强风速区域本文不再讨论)得到了加强,垂直速度由3.8m/s加强为6.0m/s,水平风速也有所加强,与垂直速度由弱到

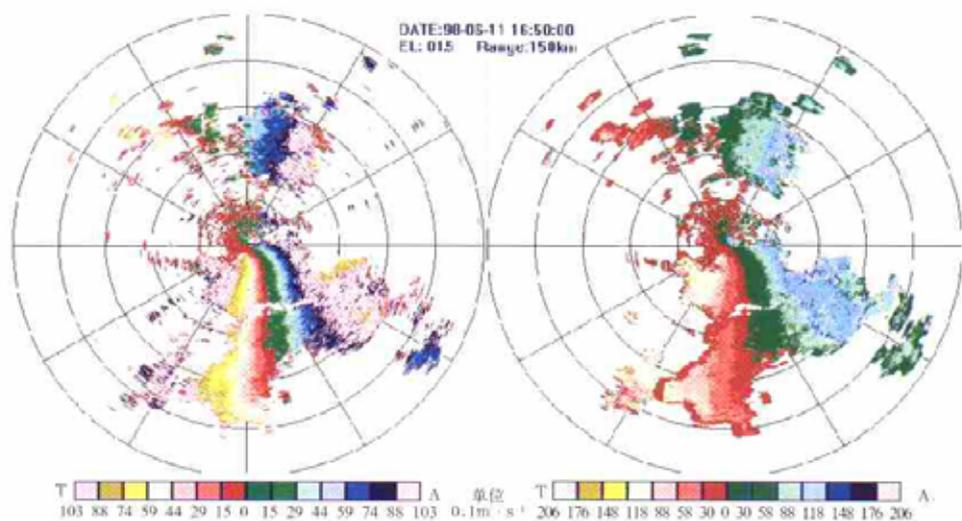


图5 华南暴雨试验IOP#6汕头多普勒天气雷达的PPI观测图
左图未经预处理,右图经“K-邻域频数法”和单径向退模糊处理后的图象

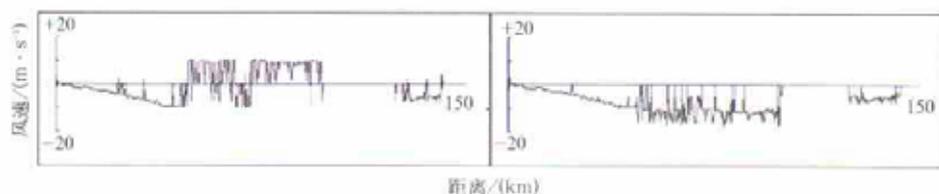


图6 华南暴雨试验IOP#6汕头多普勒天气雷达
1998年6月11日16:50 PPI观测122度方位速度廓线处理前后对比

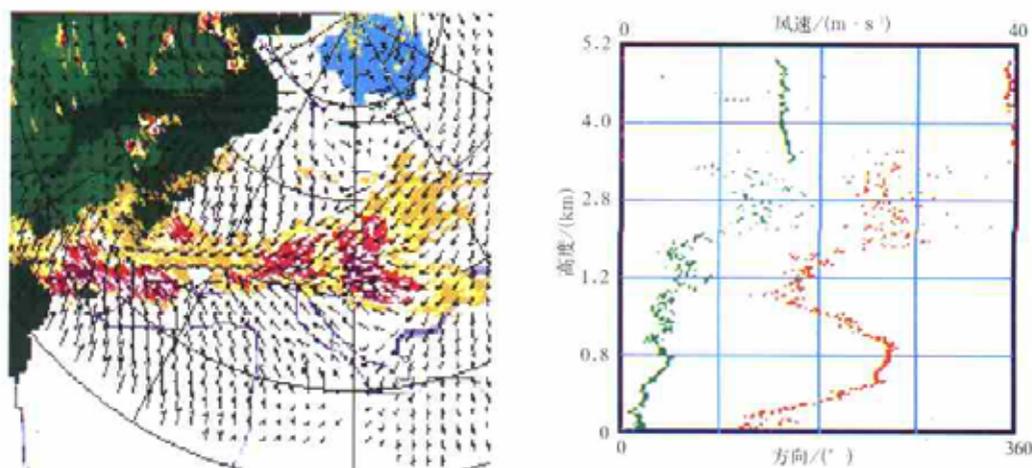


图7 水平风场反演与回波强度叠加分析及VAD反演风场分析
(北京1995年6月22日14:00 CAMS雷达观测,左图距离圈为15 km)

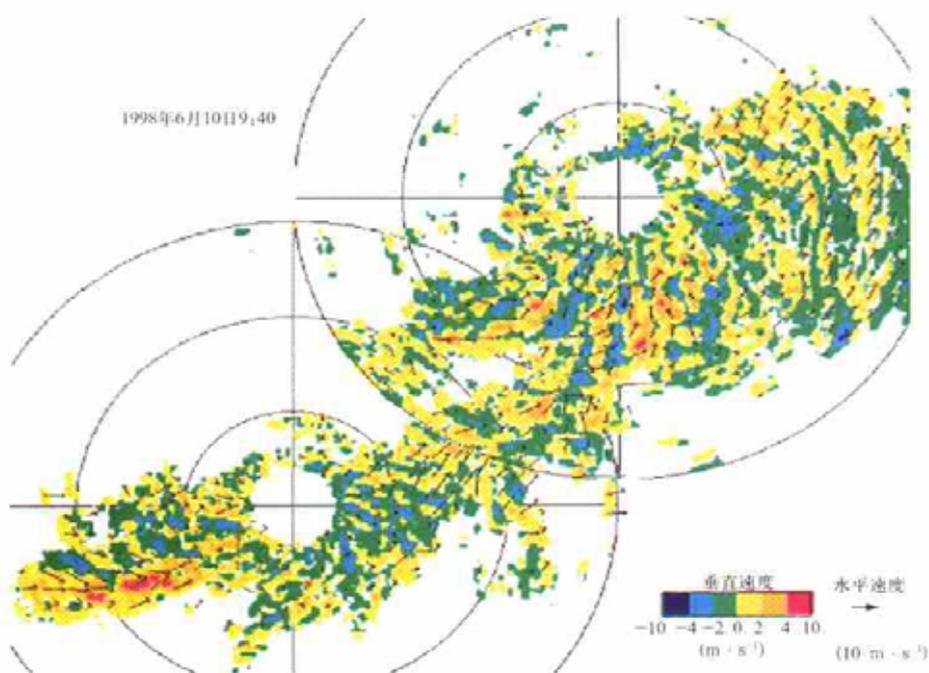
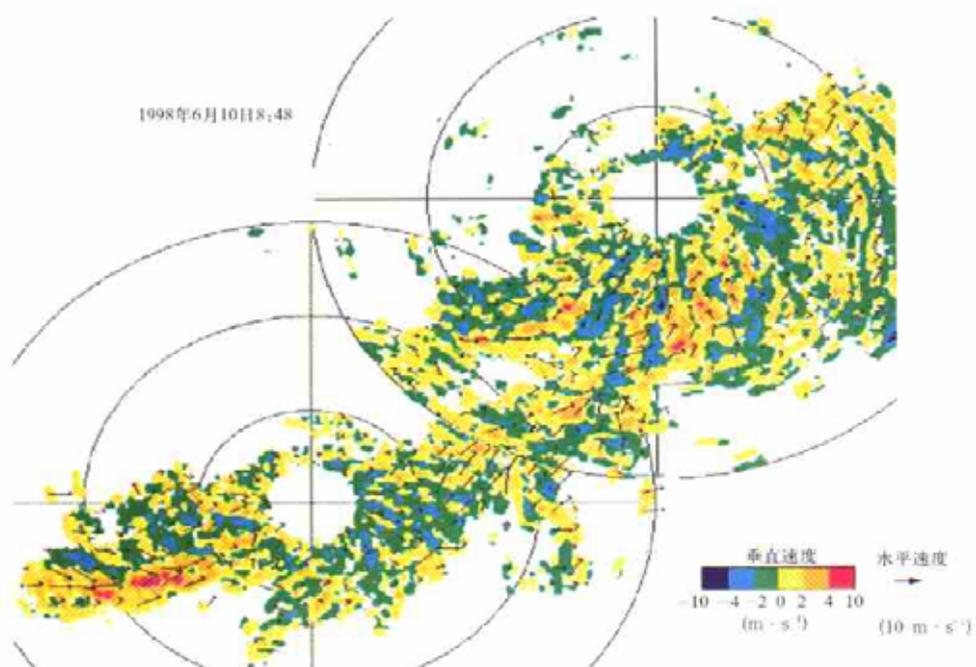


图8 厦门, 长乐雷达反演风场拼图(高度1.5 km, 距离圈为50 kmX10P#6)

强变化相对应,水平辐合由强减弱。从强度看(图略),回波得到了加强,范围变大。由此可见,我们有可能利用多普勒雷达三维风场更多地揭示出中小尺度天气系统的发展演变情况。

为了检验涡度-散度方法反演风场的可靠性,为此将图 7 的反演风场的 u 、 v 水平分量反算出了反演风场的径向风,并与实际径向风计算后获得的均方差为 3.7 m/s 。参照美国 WSR-88D 的 VAD 产品的可靠性指标(均方差 $< 4.85 \text{ m/s}$)^[13],表明该反演方法的可靠性是可行的。

单多普勒天气雷达风场反演方法在常规业务观测以外不需要增加额外的人力和物力,有其方便、易实现的特点,但是这种方法都是在一定的假定条件下实现的,总有其局限性。通过使用发现,本文所采用的涡度-散度方法对中小尺度较强涡旋系统的反演效果较好,周海光等^[14]采用数值模拟方法也对比了 4 种单多普勒雷达风场反演方法,表明涡度-散度方法在反演复杂风场时具有优势。

4 小 结

(1) 本文处理了华南暴雨试验 6 次加密观测过程中的多普勒天气雷达数据,在数据库中提供了产品生成和显示软件。华南暴雨试验多普勒天气雷达数据处理和应用集成方法在业务上具有很好的借鉴意义。

(2) 对中尺度系统的风场反演结果表明,研究和开发风场信息处理和应用技术是提高多普勒天气雷达使用效果的有效途径之一。随着我国新一代天气雷达的建设,还有很多工作要做。

(3) 把单部多普勒雷达反演风场与回波强度结合使用,是应用和研究多普勒雷达风场信息的一种新方法,有利于分析和提前预警常规天气图上难于发现的中小尺度系统。

(4) 单部多普勒天气雷达的反演方法都有一定的约束条件,具有局限性,在使用中应该了解其适用条件。另一方面,把反演方法应用于实际工作中,有利于反演方法的检验和改善。

参 考 文 献

- 1 梁海河,张沛源,牛红芳,等. 全国天气雷达终端更新系统. 应用气象学报,2002,13(6):749~754.
- 2 张沛源. 天气雷达空间定位研究. 中尺度气象文集(1). 中国气象科学研究院,1987.
- 3 托亚. 用雷达观测资料改进 MMS 初始场的初步试验研究. 南京气象学院学报,2003,26(5):661~667.
- 4 梁海河. 华南暴雨试验天气雷达数据处理方法. 见:周秀骥主编. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京:气象出版社,2000.
- 5 陶祖钰. 从单 Doppler 雷达速度场反演风矢量的 VAP 方法. 气象学报,1992,50(1):81~90.
- 6 姜海燕,葛润生. 一种新的单部多普勒雷达反演技术. 应用气象学报,1997,8(2):219~223.
- 7 Xu Q, Qiu C J, Yu J X. Adjoint method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler wind data. J. Atomic & Oceanic Tech, 1994,11:579~585.
- 8 姜海燕,葛润生,朱小燕. 华南暴雨试验 IOP#6 期间 6 月 9 日长乐地区强降水风场结构的初步分析. 应用气象学报,2001,12(1):97~101.
- 9 薛秋芳,梁海河,牛红芳. 多普勒雷达信息在短时预报中的应用. 见:中国气象局预测减灾司主编. 天气预报技术论

- 文集,北京:气象出版社,2000.1~5.
- 10 薛秋芳,梁海河,孟青.遥感信息的综合分析及其应用.见:中国气象局预测减灾司主编.天气预报技术论文集,北京:气象出版社,2001.216~219.
- 11 梁海河.多普勒天气雷达风场退模糊方法研究.应用气象学报,2002,13(5):591~599.
- 12 Lhermitte R M, Atlas D. Precipitation motion by pulse Doppler. PrePrints, Ninth Weather Radar Conference, Amer Meteor, 1961. 218~223.
- 13 中国气象局培训中心.新一代天气雷达讲义.北京:中国气象局培训中心,2000.274.
- 14 周海光,张沛源.多普勒天气雷达风场反演方法对比试验.气象,1999,26(1):13~16.

HUAMEX RADAR DATA PROCESSING METHOD

Liang Haihe Ruan Zheng Ge Runsheng

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

A method of processing weather radar data of HUAMEX was presented, and an integration application system was established, including (1) converting raw data format into united format and verifying raw data, (2) producing radar 3-D square grid and latitude-longitude grid data, (3) processing radial velocity, and (4) retrieving rain and mosaic wind filed. 2-D wind field in a hail day was retrieved, and convergence field appearing before echo zone forming was discovered. When the echo moving into convergence field, it became hail. It reveals that hail can be predicted by retrieved wind. In HUAMEX, 3-D wind field from single Doppler was retrieved, and 3-D wind mosaic map was formed by three Doppler radar data, the applications potential for understanding and employing Doppler wind was exhibited.

Key words: Doppler radar Data processing Wind retrieving HUAMEX