

利用多普勒雷达速度资料检验三维 中小尺度模式流场

万 蓉^{1,2} 郑国光³ 王 斌² 杨洪平⁴ 石 燕²

(1. 南京信息工程大学, 210044; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所;
3. 中国气象科学研究院; 4. 中国气象局大气探测技术中心)

提 要: 数值模式调试时, 需要合理快速地将观测资料用于模式的流场检验, 为此建立一种新方法: 将模式输出的三维风场通过正演给出模拟雷达显示, 使模拟风场可以有效地和多普勒雷达的速度产品进行比较。在强降水、冰雹和大风等的个例实验中, 应用上述方法对双参三维冰雹云模式风场处理, 模式给出的模拟雷达结果在主要对流特征上与雷达实测一致。试验表明, 该方法能直观对比多普勒雷达风场资料, 有效检验模式中间过程流场, 在模式研究调试中起到辅助作用。

关键词: 雷达 速度场 中小尺度 三维风场 流场检验

Test of 3D Numerical Model with Velocity Products of Radar: A New Method

Wan Rong^{1,2} Zheng Guoguang³ Wang Bin² Yang Hongping⁴ Shi Yan²

(1. Nanjing University of Information Science and Technology; 2. Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA;
3. Chinese Academy of Meteorological Sciences; 4. Atmospheric Observation Center, CMA)

Abstract: For applying the radar velocity data to test the results of numerical model, a new method is presented to save the wind vectors of 3D numerical model as the radial velocity in the base data format of radar, and to get the simulated radar velocity display as radar volume scan in different inclination with the same color tab of the operational radar. Based on this method, the velocity product of radar can be used to test the 3D wind field simulated by the model. This method can help the programmer to find directly the difference between simulations and observations during the simulation process.

Key Words: radar velocity data meso-scale 3D wind field test

本项目受国家科技部公益研究科技专项 2004DIB3J117, 公益研究专项 2001DIB20105 共同资助

收稿日期: 2007 年 11 月 28 日; 修定稿日期: 2008 年 9 月 3 日

引言

在研究暴雨、冰雹以及沙尘等强灾害性天气的形成机理和演变特性过程中,人们通过大量观测和理论研究建立数值模式;针对具体问题时,需通过与实际探测资料进行观测对比检验,对模式做出调整,如根据本地气候特征、地理条件对模式进行本地参数化调整,提高模拟和预报精度,增强模式适用性^[1]。

三维中小尺度模式的模拟区域水平尺度在百公里以内,空间分辨率小于 10km。根据国内现有的观测条件,模拟区域内对流活动特征(流场、湿度场、降水估计等)的检验主要依靠探空、地面雨量站、天气雷达和卫星等观测资料^[2]来做比较。但探空资料存在站点分布稀疏(大于 100km)、观测间隔长的缺点,从时间和空间上均难以很好满足作为检验中小尺度模式模拟对比观测的需要;地面雨量站提供的降水资料,也仅能对模拟降水的最终结果进行对比,对于模拟的中间物理过程,尤其是中间过程中的风场结构却无法检验。多普勒天气雷达能提供高时空密度的大气探测资料(如反射率因子和径向速度),时空分辨率为 $1\text{km} \times 1^\circ$,每 5~10 分钟完成一个体扫,扫描半径 150~460km,可以满足检验模式模拟结果的要求。雷达观测常在模式试验中被用于对比分析:美国华盛顿大学 Hui Su 等^[3]利用 MM5 中尺度模式进行对流系统三维特征研究,通过雷达反射率比较,发现和 15km 分辨率比较 2km 分辨率模拟的结果和观测结果更一致;杨柳^[5]、雷蕾^[6]等分别利用非静力中尺度数值模式模拟的雷达反射率因子特征,检验了模式对强降水天气过程的模拟能力;孙健^[4]等在华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响进行诊断分析中,通过模拟雷达回波强度和雷达观测的暴

雨回波强度特征比对研究暴雨形成机理。上述研究主要是利用 MM5 模拟的雷达回波强度模块,将模式输出产品转换为模拟雷达反射率与实际雷达反射率的强度产品进行比较。随着雷达技术发展,多普勒天气雷达除了反射率产品外,还能提供风矢量产品,如何将模式模拟的风场转换为类多普勒雷达风场并与观测比较,目前国内尚未见有相关研究。

在如何将模拟的流场和多普勒雷达观测风场相结合方面,国内外研究主要倾向于将雷达资料的风场反演^[7-8]用于同化^[9],但雷达风场反演算法通常是在一定的假设条件下,从一个径向速度量反演推出水平和垂直分量,由于受假设条件的约束,大大影响了适用性。本研究则采用正演方法,尝试将模式输出的三维风场,正演成以雷达站点为中心的径向风,这种以三分量确定一个量的算法理论完备、相对简单易行,可以形成与多普勒雷达观测资料格式相同的 PPI 图形,便于和多普勒雷达观测进行比较达到检验模式的目的。

1 方法流程

雷达观测过程中,运动粒子对雷达电磁波产生散射,并使散射波的相位发生变化,单位体积中的云和降水粒子群的回波信号不仅包含了散射体性质,也包含了散射体运动速度的信息^[10]。多普勒雷达速度是目标运动在雷达观测径向上的分量,代表单位体积内粒子运动在径向上的速度的平均值,径向速度 V_r 的方向是远离雷达和指向雷达(如图 1a);而模式模拟主要采用标准空间网格系统,速度分量分别位于网格元法向边界的中央,为东(V_x)、北(V_y)水平以及垂直向上(V_z)的三维速度分量(如图 1b)。多普勒雷达速度和模式计算的环境场风速,单从图像是不能直观和详细地判断其是否吻合的。为了将两者进行比较,有效的办法是将两种风场统一到同样的坐标系中。

前文已论述将多普勒雷达速度转换到网格坐标上的风场反演的局限性,这里将直角坐标的三维风场统一到雷达极坐标格点上,通过三维分量向一维方向投影,形成类多普勒雷达速度图像。主要包括坐标转换、数据转换和图像显示,步骤如下:

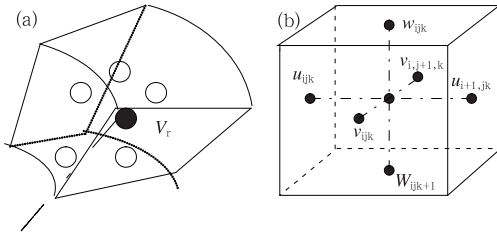


图1 极坐标和模式坐标单位网格示意图

雷达模式网格距取径向 $\Delta r = 1\text{km}$, 方位 $\Delta\theta = 1^\circ$, 仰角 $\Delta\phi$ 随观测模式定; 网格距取 $\Delta x = \Delta y = 1\text{km}$, $\Delta z = 0.5\text{km}$ 。

根据直角坐标和极坐标的关系, 针对中小尺度范围在百公里以内的特点, 在坐标系转换过程中, 直角坐标未考虑地球曲率影响。利用下列关系式建立坐标映射函数 coordinateconversion(float r , float α , float ϕ):

$$x = r \sin \alpha \cos \phi \quad (x \text{ 按就近格点取整数})$$

$$y = r \cos \alpha \cos \phi \quad (y \text{ 按最近的格点取整数})$$

$$h = r \sin \phi \quad (h \text{ 按最近的格点取整数})$$

输入参数为极坐标径向距离、方位角和仰角, 输出以雷达为中心的直角坐标中的对应格点位置: 东西向 x , 南北向 y , 高度 h , 取正东、正北和天顶为正。利用就近取值进行坐标转换, 建立雷达极坐标的格点与模拟区域流场中直角坐标的格点的对应关系(如图2)。

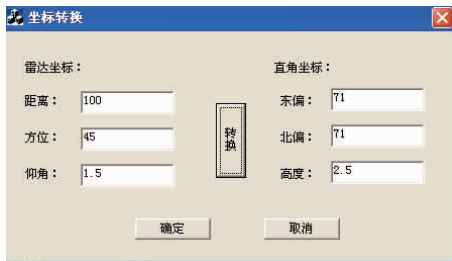


图2 直角坐标和极坐标格点映射示意图

利用坐标映射函数关系, 将模式直角坐标格点上的三维速度分量插值转移到极坐标的每一个格点上。以正东、正北、天顶为正, V_r 远离雷达向外为正。将格点上的三维速度分量 V_x 、 V_y 、 V_z 投影到雷达径向方向, 生成径向速度 V_r [11]:

$$V_r = V_x \cos \phi \sin \alpha + V_y \cos \phi \cos \alpha +$$

$$V_z \sin \phi + V_t \sin \phi$$

多普勒雷达速度反映的是观测单位体积内所有粒子(云和降水粒子)运动速度平均值在径向上的投影, 在观测体积中不仅要考虑模式输出的大气运动状况, 还需要考虑降水粒子重力下落速度 V_t 对径向速度的影响, 因此应在模式输出中加入下降末速度因子 $V_t \sin \phi$ 。

上述转换后, 模式输出的三维风场数据按 WSR-98D 二级文档格式存储, 并以等同于业务雷达的色标进行显示。

2 算法检验

为检验上述算法的可靠性, 利用冰雹云模式模拟一个简单的已知流场: 0.5km 高度层为西北水平气流, 9km 高度层以下以西南气流为主, 9km 以上气流顺转为西北气流, 气流垂直速度为 $0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 无粒子的垂直运动, 按 33 层等高面输出三维风场, 从中选取 6 个等高面(0.5km、2.5km、5.5km、9.0km、11.0km、14.0km)的水平二维风场描述风场的特性, 如图3所示。

通过处理, 模式给出风场模拟雷达速度不同仰角的显示结果(图4, 见彩页), 径向速度大小和方向如色标所示, 暖色表示风远离雷达的方向, 冷色表示指向雷达的方向。从模拟雷达显示的 4.2° 、 5.8° 、 9.7° 、 14.4° 仰角的结果可以看出, 近地层(箭头 a 所示, 高度 0.5km)风向为西北气流; 9km 以下风向随高

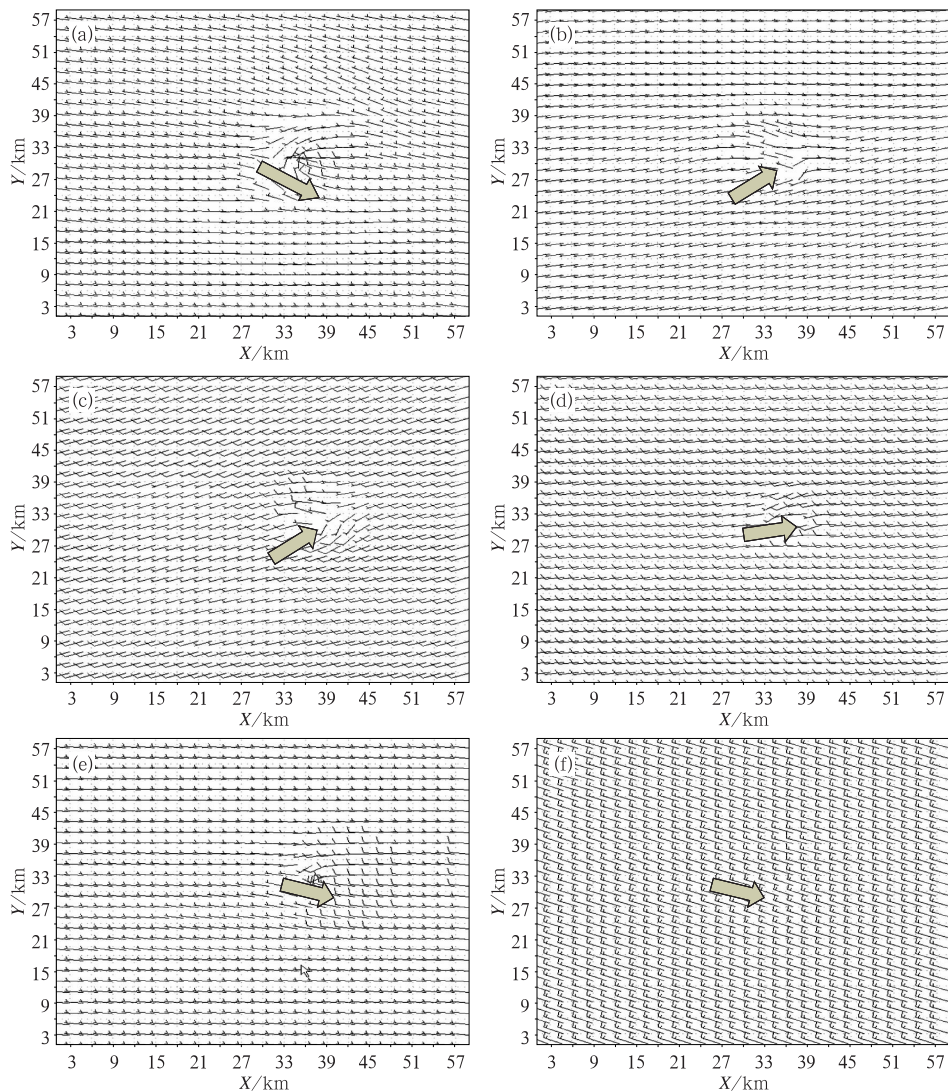


图3 模式输出的不同高度层流场矢量图
水平网格距 1km,垂直网格距 0.5km,覆盖范围 58km×58km×15km

度逆转,零速度线呈正 s 型,箭头 b 所示高度 2.5km 和箭头 c 所示高度 8km 层的风向均为西南气流;在 9km 高度以上,风向发生顺转,零速度线呈反 s 型,西南气流随高度转为西北向气流。

比较该风场和它的模拟雷达显示结果,正演算法给出的模拟雷达结果与该风场一致,说明模式输出流场通过格式和坐标转换后,保持了原有的流场特性,该方法可以有效、准确地用于模式风场向模拟雷达图像的

转换。

3 应用试验

利用这套算法对 2005—2007 年的两个典型强对流天气进行个例试验,受检验的模式选用双参三维冰雹云模式(分辨率 1km×1km×0.5km,覆盖范围 58km×58km×15km),实测采用武汉新一代天气雷达速度资料,径向分辨率 $\Delta r = 1\text{km}$,方位分辨率

$\Delta\theta=1^\circ$, 仰角 φ 随观测模式有所不同。

3.1 冰雹个例

2005年7月16日午后到傍晚,大冶出现了雷雨、大风和局地冰雹等强对流性天气,市区大风达到8级($18.9\sim 20.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),最大降雨量47.6mm。雷达观测资料显示,在大冶和阳新中西部(距离武汉站点82km,方位角 215°)上空出现强回波。4.2°仰角的速度图像可见强逆风区和和强回波位置一致(如图5a,见彩页)。分析不同仰角的速度资料(图略),在5~6km高度范围存在逆风区,

正处于夏季积云 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 的高度范围,再加上午后地面的热力作用,雷雨冰雹剧烈天气极易形成。

用双参三维冰雹云模式模拟,初步分析输出流场,发现存在两个上升速度比较大区域,明显具有积云对流泡形成旺盛期的特点(如图6a,b)。比较图6b和图6c的垂直流场,右上方对流向上升展,高度超过9km。以这次雷雨大风伴冰雹过程为模式试验个例,基于上述的检验方法,利用武汉站雷达实测风场资料对模式试验中间输出流场的模拟雷达显示进行对比。

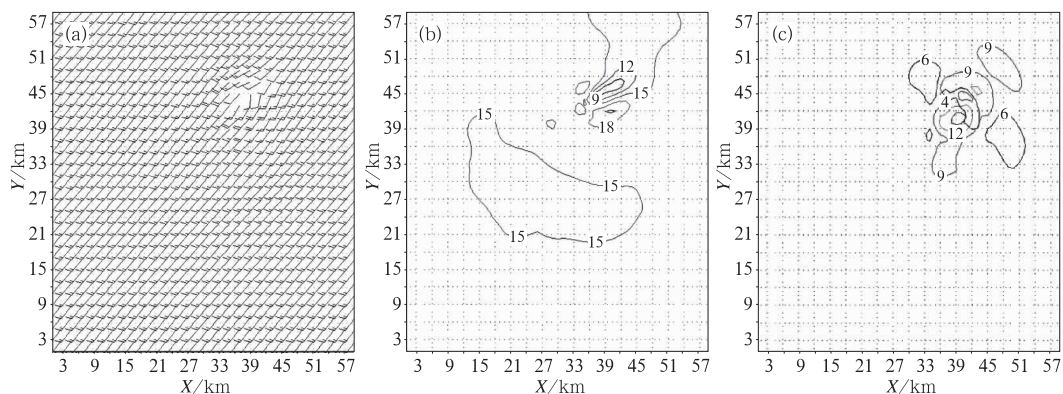


图6 2005年7月6日冰雹大风模拟输出,(a)5km高度水平流场,(b)5km高度垂直速度分布图(c)9km高度垂直速度分布图(实线表示上升速度、虚线是下沉速度)

考虑篇幅,选取4.2°、5.8°、9.7°三个仰角的模拟雷达速度图和实测对比,模拟雷达速度和实测在对流特征上表现一致(每组箭头所指的对应区域),具体表现如下:

(1) 4.2°仰角显示,模式模拟的上层逆风区域的位置与雷达探测符合的比较好(如图5a,见彩页)。

(2) 在5.8°仰角上,出现两个强逆风区域,模式输出的这个特点与雷达实测情况符合(如图5b,见彩页)。

(3) 比较雷达实际观测的5.8°和9.7°仰角上的速度和反射率显示,存在一个伸展较高的回波。在模式模拟的速度图上显示相同特征(如图5b,c,见彩页)。

这说明模式在这次冰雹大风过程模拟中,成功模拟了逆风区和深厚对流特征。

3.2 强风个例

2007年7月27日晚7—9时,武汉自南向北先后出现雷雨和大风,武汉北郊黄陂区地面风速达 $29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,3小时降水4.9mm,大风导致房屋倒塌和人员伤亡等损失。雷达观测资料显示,在黄陂站附近,低空出现强风和强回波区域,1.6°仰角的实测速度图显示径向速度为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,强风区(速度图)和强回波相符合(如图7a,见彩页)。分析不同仰角的速度资料(图略),在2~6km高度范围,径向速度高值区大于 $24.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并随高度向东南倾斜,强中心位于黄陂西南侧,风向南偏西。

用双参三维冰雹云模式模拟这次强风过程,在输出的中间流场中,低层存在强的速度

区域,近地层 1km 为东南风,风速 $25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,更高为西南风,垂直速度从 1.5km 为 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始增加到 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 9km 高度减弱(图略)。基于雷达观测的检验方法,利用武汉站雷达实测风场资料对模式试验中间输出流场的模拟雷达显示进行对比显示,在选取的 3 个低仰角的模拟雷达显示和相应的雷达观测对比中,模式模拟区域内径向速度中心位置 and 实际观测符合,且从不同仰角的模拟雷达速度图可见模拟的风向为南偏东,随高度径向速度高值区向东南倾斜,与实际观测相一致。

4 结果与讨论

对冰雹和强风个例的模拟试验和对比分析表明,基于模式输出的风场模拟雷达结果与雷达实测比较进行模式检验的方法,可以直观检验模式调试中间流场与实测状况差异,对模式的调整可以起到较好的辅助作用。虽然同是将雷达风场资料用于模式,但该方法有别于雷达速度资料同化过程,并未利用雷达风速产品的一维径向风进行风场反演,而是应用模式的三个分量得到一个径向速度,从而回避了风场反演的不确定性问题。

为了得到合理的模式输出流场的模拟雷达结果,模式分辨率越精细越好。模式网格如果过大,在经过输出流场到雷达极坐标插值转换时,会忽略掉中 β 尺度特征,尤其是低仰角的模拟雷达结果,几乎不能反映近地层小尺度对流特征,影响模拟效果,因此要求模式格点分辨率优于 $1\text{km} \times 1\text{km} \times 1\text{km}$;正演算法需要三维模式能够提供中间过程的参量输出,便于中间参量的检验和模式的调整试验。

为增强该方法的实用性和适用范围,该算法在三方面有待改进:一是在雷达观测质量控制基础上,需要对风场的模拟雷达显示结果和雷达速度产品进行进一步定量化比

较;二是增加相应的算法模块,使该方法不仅适用于等高面输出模式(如积云模式、冰雹云模式等)的检验,也适用于等压面输出模式的检验;此外,如何以量化的形式反馈信息,并结合模式特点调整模式参数,也是有待做进一步深入研究的问题。

参考文献

- [1] Nascimento, EDL, Droegemeier, KK. Dynamic adjustment in a numerically simulated mesoscale convective system: Impact of the velocity field[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2006, 63(9): 2246-2268.
- [2] Pielke. 中尺度气象模拟[M]. 北京:气象出版社, 1984: 485-490.
- [3] Hui Su, Shuyi Chen and Christopher S. Bretherton. Three-Dimensional Week-Long Simulations of TOGA COARE Convective Systems Using the MM5 Mesoscale Model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999: 2326-2344.
- [4] 杨柳,苗春生. 2003 年春季江淮一次暴雪过程的模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 379-384.
- [5] 雷蕾,朱伟军,毕宝贵,等. 河南一次强降水过程云和降水结构的中尺度数值模拟[J]. 气象, 2007, 33(4): 16-22.
- [6] 孙健,赵平. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 333-342.
- [7] Thomas amtejka and ramesh c. srivastava, An improved version of the extended Velocity_Azimuth Display analysis of single-doppler radar data[J]. J. Atmospheric and oceanic technology, 1991, 8(4): 453-465.
- [8] 牟容,刘黎平,许小永,等. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. 气象, 2007, 33(1): 11-18.
- [9] 杨毅卜,邱崇践,龚建东,等. 同化多普勒雷达风资料的两种方法比较[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 548-555.
- [10] 林晔. 大气探测学教程[M]. 北京:气象出版社, 1995: 395.
- [11] 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒雷达资料分析与应用[M]. 北京:解放军出版社, 2000.

万蓉等：利用多普勒雷达速度资料检验三维中小尺度模式流场

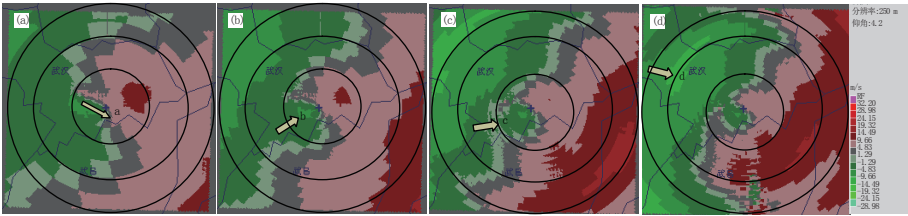


图 4 4个仰角的模拟雷达速度图显示

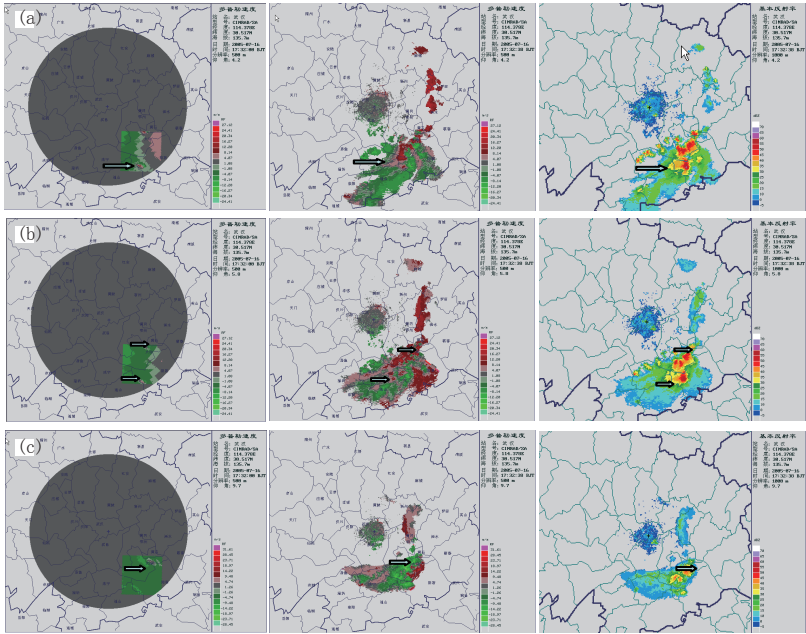


图 5 模式流的模拟雷达速度、实测速度和实测强度
(a) 仰角 4.2° , (b) 仰角 5.8° , (c) 仰角 9.7°

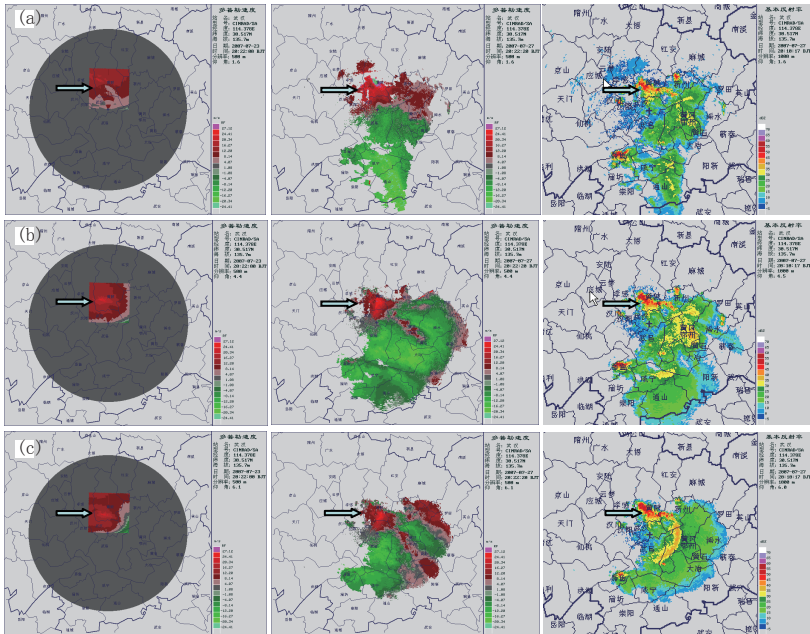


图 7 模拟雷达速度、实测速度和实测强度
(a) 仰角 1.6° , (b) 仰角 4.4° , (c) 仰角 6.1°