

暴雨的多普勒天气雷达速度辐合风场特征

王 彦^{1,2} 吕江津¹ 周海光² 王丽荣³ 吴彬贵¹

(1. 天津市气象台, 300074; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室;
3. 河北省石家庄市气象局)

提 要: 多普勒天气雷达探测大范围强降水时,其多普勒速度回波特征既不同于单纯的暖(冷)平流的特征(S或反S形)也不同于纯粹的大尺度辐合(散)运动特征(弓状),而是暖(冷)平流和辐合(散)两种运动相结合的风场(称之为复合风场)所产生的多普勒速度特征。应用天津塘沽新一代天气雷达资料,并结合自动气象站资料和改进的EVAD技术,分析2005年8月16日发生在海河流域的一次大范围、长时间的强降雨天气过程的多普勒天气雷达资料。结果表明:(1)当低层出现暖平流和辐合运动相结合的复合风场特征时,即多普勒天气雷达速度场产品表现为自雷达中心开始,在同一距离圈上,一侧的零速度线弯向正速度区的顺转程度明显大于另一侧的零速度线弯向负速度区的顺转程度,即负速度区面积大于正速度区的面积时,降水就增强或维持。(2)当低层出现暖平流和辐散运动相结合的复合风场特征时,对应降水减弱或停止。这种对雷达速度场的辐合辐散分析将对大范围强降水的形成、发展、维持和消散具有很好的临近预报指示作用。

关键词: 暴雨 多普勒天气雷达资料 径向速度场 EVAD技术

Echo Characteristics of Doppler Velocity in a Torrential Event

Wang Yan^{1,2} Lv Jiangjin¹ Zhou Haiguang² Wang Lirong³ Wu Bingui¹

(1. Tianjin Meteorological Bureau, 300074; 2. State Key Laboratory of Severe Weather,
Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. Hebei Meteorological Bureau)

Abstract: Doppler radar, when used in detecting large-scale intense precipitation, has its echo features differing from the warm or cold advection alone (as an S- or anti-S- shape) and also differing from the large-scale convergence or divergence (as a bow-like shape). The features of

资助项目:天津市科委应用基础研究面上项目(07JCYBJC12800)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室(2005LASW02)、公益行业项目(GYHY200706004)和国家自然科学基金(40475017)共同资助

收稿日期:2007年9月29日; 修定稿日期:2008年1月7日

Doppler velocity resulting from the combination of warm or cold advection with convergence or divergence are called the complex wind-field.

Based on the Doppler weather radar data in Tanggu, AWS data and EVAD technique, analysis of Doppler weather radar data from an extensive, persistent strong rainfall event over the Hai river basin on August 16, 2005 was conducted and gave the following results: (1) In the presence of a low-level complex wind-field related to the combination of warm advection and convergence, it can be seen from the Doppler velocity products that, starting from the radar center, the clockwise curvature of a zero-speed line on one side toward the positive velocity zone is more remarkable than the counterpart on the other side towards the negative velocity zone, implying that when the negative speed zone is bigger compared to the maximum positive area, rainfall is reinforced or maintained; (2) In the presence of a low-level complex wind-field resulting from warm advection combined with divergence, the precipitation would be weakened or ceased. Therefore, the study on the convergence and divergence in the radar velocity field gives a good indicator of nowcasting for the formation, development, maintenance and decay phases of a large-scale rainfall event.

Key Words: heavy rainfall Doppler weather radar data radial velocity EVAD technique

引 言

暴雨(强降雨)的产生除与大尺度环流背景有关系之外,还有明显的地域特征。气象学者已经开展过大量研究工作^[1-5],其中长江流域暴雨已经获得一系列成果和观测事实^[1-3],江淮地区暴雨也取得很多进展^[4-5],海河流域暴雨也有若干学者从不同角度做过研究工作^[6-7]。另外,也有若干学者应用新一代天气雷达资料对强降水等做过一些研究工作^[8-10]。但是,应用新一代天气雷达速度回波产品研究暴雨的复合风场特征^[11-13]及动力学演变机制并应用到临近预报还不多见。

2005年8月16—17日海河流域出现了一次大到暴雨、部分地区大暴雨的天气过程。为改进海河流域暴雨的临近预报技术,我们应用天津塘沽新一代天气雷达的基本速度产品定性分析了这次天气过程的冷暖平流与辐合辐散的不同配置在这次降水过程中的不同特点,特别是应用EVAD技术定量分析辐合辐散信息,探讨了多普勒雷达的速度产品在

临近预报中的指示作用。

本文选取了天津塘沽新一代天气雷达(CINRAD/SA)的4次强降水过程资料和自动气象站资料。这4次天气过程均采用VCP21扫描方式获取雷达资料。

1 天气背景与实况

高空槽与副热带高压边缘的暖湿气流配合是形成暴雨的显著特征之一。2005年8月16日00时500hPa天气形势图上(图1),欧亚大陆呈两脊一槽型,其中一支高空槽云系位于贝加尔湖附近,在冷平流的作用下不断地向南输送干冷空气。我国东部地区为副热带高压控制,110°E附近副热带高压脊线位于33°N。分析8月16日00时(世界时,下同)的850hPa流场图,在海河流域内有暖切变。配合全国逐时自动气象站资料分析可以看到,该地区地面有一条比较稳定的东北西南向的辐合线。这种高、低空形势的配置有利于暴雨的发生、发展。

2005年8月16—17日,海河流域下游

普降大到暴雨,部分地区大暴雨,特别是天津地区有6个区县观测站24小时降水量大于100mm,雷达站所在地24小时降水量为100.8mm。

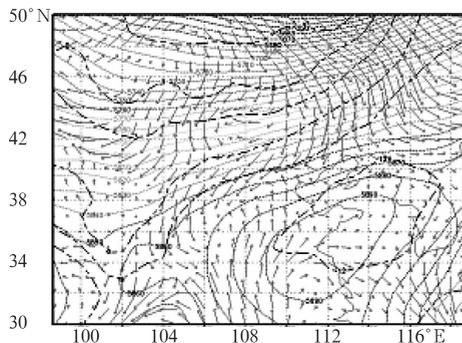


图1 2005年8月16日00时500hPa形势和850hPa流场

2 多普勒天气雷达速度回波产品演变特征

2005年8月16日暴雨天气过程的多普勒天气雷达速度回波特征也表现出既不是单纯的暖平流特征(“S”型),也不是纯粹的大尺度辐合运动特征^[8-10],而是暖平流与辐合、辐散两种运动相结合的风场(称之为复合风场)所产生的多普勒天气雷达速度场在降水形成、维持和消散各阶段表现的不同演变特征。

依据多普勒速度产品特征,并结合自动站降水特点,将这次天气过程划分为3个阶段,分别是:形成阶段为15日22:30至16日01:30;维持阶段为16日01:30—15:30;消散阶段为16日15:30以后。不同阶段的特征如下。

形成阶段:自15日22:30开始,1.5°仰角PPI的速度产品上(图2a,见彩页),近距离约50km范围内,风向随高度一致,1.5km以下为均匀东风;风速随高度也基本稳定维持为 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,这种形势持续至01:30风场结构发生转变,变为“S”型的暖平流结构,形

成辐合流场。这种风场特征说明有利于水汽的辐合抬升,也有利于低层水汽的水平输送。

维持阶段:又包括两个降水强盛阶段,第一阶段:01:30—07:30;第二阶段:12:00—15:30。第一阶段开始产生降水时,相应的速度回波特征也随之转变,02:03随着降水的增强,暖平流结构和辐合信息的叠加(图2b,见彩页),雷达近距离约50km范围内,暖平流的“S”型结构叠加辐合的弓形结构表现为自雷达中心开始,零速度线弯向正速度区的顺转程度明显大于弯向负速度区的顺转程度;也就是说零速度线在雷达站的南侧弯曲程度更加明显,在北侧更趋缓于直线,即负速度面积区域大于正速度面积区域。至05:24,低层1.5km以下辐合信息明显加强,除维持上述结构外,它的最大流入速度绝对值($15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)大于最大流出速度绝对值($10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);并且最大流入速度面积大于最大流出速度的面积,表明低层是辐合运动。而3.0km以上有明显的高层辐散特征。此时对应的降水也达到最强阶段,这种配置的维持使得降水也随之持续约6小时。至07:30,雷达50km范围内低层辐合逐渐减弱,最大正速度和负速度值均为 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,正速度面积和负速度面积基本相同,高层辐散程度降低,对应实况的降水也在减小。但是暖平流结构一直还继续维持,预示还有可能再发展。第二阶段为12:00以后,在12:00(图2c,见彩页)速度回波特征又一次发生改变,50km距离内,在1.5km高度以下由原来单纯的暖平流逐渐又一次的叠加了辐合系统,这种辐合系统加强重复出现上述的特征,实况降水也又一次加强,且维持到15:27。最终暖平流结构破坏,降水减少。

消散阶段:15:30(图2d,见彩图)时以后,低层辐合系统减弱。正速度区面积在增加,负速度区面积在减少,正速度最大值由原来的 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,负速度最

大值由原来的 $15\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 逐渐地正速度区域的面积大于负速度区域的面积。另外, 辐合的高度也在不断降低, 降水也随之减弱停止。

上述分析表明, 整个降水过程暖平流和辐合运动相结合的复合风场的多普勒速度回波特征是: 当低层的多普勒速度回波出现暖平流和辐合运动相结合的复合风场特征时, 表现为负速度区面积大于正速度区面积, 或者说自雷达中心开始, 在同一距离圈上, 一侧的零速度线弯向正速度区的顺转程度明显大于另一侧的零速度线弯向负速度区的顺转程度, 对应降水增强且维持。当低层的多普勒速度出现暖平流和辐散运动相结合的复合风场特征时, 表现为负速度区面积小于正速度区面积, 相应降水减弱或停止。

3 多普勒天气雷达基本反射率产品演变特征

配合多普勒天气雷达速度产品, 将对应 3 个阶段的雷达基本反射率产品演变特征分析如下。

形成阶段: 15 日 22:30 (图 3a, 见彩页) 在雷达站近距离呈大面积的非降水回波。主要表现为雷达探测范围内有 20dBz 以下的弱回波。同时, 在约 $270^\circ/80 \sim 100\text{km}$ 有零散的中尺度的对流单体回波, 这表明此时大气层结是稳定的。随着时间推移, 零散的中尺度对流单体回波不断生成并自西南向东北方向移动, 并且活跃对流区不断向北扩展, 而非降水回波区域不断缩小。

维持阶段: 02:30 (图 3b, 见彩页) 不断有中尺度的对流单体回波生成发展或出现合并现象, 回波强度超过 55dBz, 回波顶高度超过 10km, 出现了第一阶段明显的强降水。此后, 降水逐渐减弱。但是到 12:00 以后, 雷达回波再次呈现出加强的趋势, 形成了一条东北—西南向、长度约 360km、宽度约 80km 的

强回波带, 回波强度 40dBz, 回波顶高度接近 10km。该回波带中回波单体不断向东北方向发展, 而回波带整体向东南方向移动, 造成第二阶段的强降水过程 (图 3c, 见彩页)。

消散阶段: 15:27 (图 3d, 见彩页) 以后, 海河流域下游回波逐渐减弱东移而消散。

上述表明, 雷达基本反射率产品也是探测实时降水的有效方法之一, 如果将基本反射率与基本速度产品相互结合分析, 将对降水的形成、维持和消散更有预报价值。

4 单多普勒天气雷达资料对降水过程的动力诊断分析

上述定性分析了强降水过程的雷达速度回波产品和基本反射率产品的演变特征。下面再应用 EVAD 技术^[8] 进一步量化分析这种复合风场信息及其与强降水的演变关系。

4.1 EVAD 计算方法简介

1960 年代初, Lhermitte 和 Atlas^[8] 提出了单部多普勒天气雷达测量风场的一种方法, 称为 VAD (Velocity Azimuth Display) 技术, 应用这种方法, 单部多普勒天气雷达能够得到降水区中各高度上的平均风向和平均散度等。由文献[8], 在 VAD 方法中, 因为 V_f 实际上为雷达有效照射体积内平均大气垂直速度和雨滴在静止大气中的平均下落末速度之和, 因此, 当雷达高仰角探测时, 使 V_f 对径向速度 V_r 的贡献不可忽略, 由于 V_f 的不确定及在水平方向上的不均匀性, 将导致利用 VAD 方法求得的水平散度有较大的误差。为了克服这个缺点, Srivastava 等人 (1986) 将 VAD 方法加以改进和推广, 提出 EVAD 方法。EVAD 方法最关键的假设是在某一高度层的厚度中, 水平散度和垂直速度 V_f 在较小的高度间隔内不变, 为某一常

数。这样就能应用在此间隔内不同的仰角或不同距离的径向速度资料,得到多个 a_0 值,然后应用最小二乘法,把散度信息提取出来,然后利用最小二乘法求取散度值。

上述 Srivastava 等人的 EVAD 方法假设条件有问题,违背了回归变量方差在独立变量的范围内为一常数的基本假定,故分离水平散度的效果不好,并且在实际计算过程中,使用最小二乘法求散度估计值时,矩阵为病态,导致无法求解。Thomas^[11] 在 Srivastava 的基础上,提出用带有权重的最小二乘法分离水平散度的技术解决求解的问题,分离的效果有所改善。

Thomas 的权重函数为:

$$\gamma_k = \frac{1}{\text{var}(Y_k)n_k} = \frac{r_k^2 \cos^2 \alpha_k}{4\text{var}(a_1)_k n_k} \quad (2)$$

其中: γ_k 为这一层内第 k 个距离的权重, n_k 为这一水平层内第 k 距离圈所在仰角上的距离圈总数。

本文就是利用 Thomas 权重函数法改善的 EVAD 技术计算大气平均散度的应用软件,计算得出的结果。

4.2 降水过程动力分析

利用上述方法对这次天气过程的雷达资料进行处理,计算 10~50km 范围内的平均散度,结果如图 4。

对比分析图 4 和逐小时平均雨量(图 5)表明:在降水形成阶段,低层 1km 辐合呈加强趋势,这种低层辐合的存在,预示未来降水天气的出现。在降水维持阶段的第一阶段,低层 1km 的辐合进一步加强,最强达到了 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,出现时间为 05:20,同时 2km 辐散也呈加强趋势,这种形势使降水达到了强盛阶段,以后 1km 的辐合逐渐减弱,降水也随之减弱。维持阶段的第二阶段,1 km 的辐合又一次出现了最强值为 $-1.7 \times$

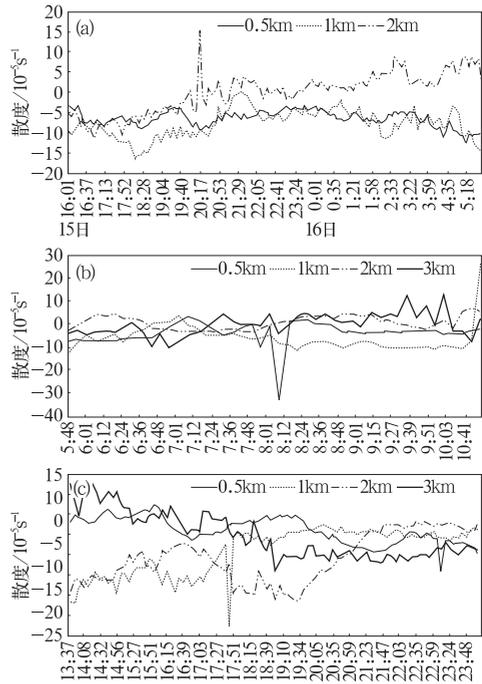


图 4 不同高度平均散度随时间的演变

- (a) 15 日 16:01—16 日 5:36
- (b) 16 日 5:48—10:48
- (c) 16 日 13:37—17 日 0:00

10^{-4} s^{-1} 。同时,3km 的辐散特征继续维持。降水又一次出现峰值。两个降水峰值与 1km 的最强辐合基本吻合。消散阶段,1km 辐合逐渐减弱,降水也逐渐减弱。说明由 EVAD 方法定量计算得到的散度信息能够很好地反映降水的峰值特征。

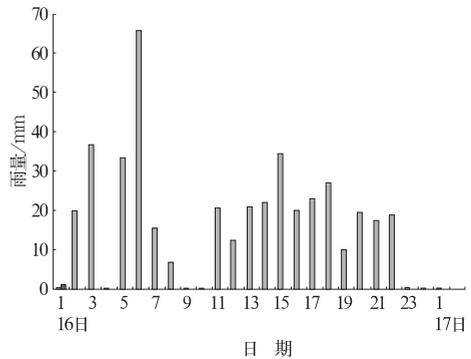


图 5 2005 年 8 月 16—17 日以塘沽雷达站为中心的周围 50km 内逐小时平均雨量

5 其它三次强降水天气分析结果

除了分析上述这次暴雨天气过程外,还定性分析了天津的 2003 年 10 月 10 日强降水天气过程,和 2003 年 11 月 6 日和 2006 年 2 月 6 日两次大雪天气过程。分析这 3 次强降水天气过程,在降水的不同演变阶段,基本对应不同的速度复合风场特征,这对大范围强降水的形成、发展、维持和消散具有很好的临近预报指示意义。

6 总 结

(1) 暖平流和辐合运动相结合的复合风场的多普勒天气雷达速度回波特征是:当低层的多普勒速度回波出现暖平流和辐合运动相结合的复合风场特征时,表现为负速度区面积大于正速度区面积,即自雷达中心开始,在同一距离圈上,一侧的零速度线弯向正速度区的顺转程度明显大于另一侧的零速度线弯向负速度区的顺转程度,对应降水增强且维持。当低层的多普勒速度出现暖平流和辐散运动相结合的复合风场特征时,表现为负速度区面积小于正速度区面积,相应降水减弱或停止。

(2) 由 EVAD 方法定量计算得到的散度信息能够很好地反映降水的动力过程。降水开始之前,低层辐合对未来降水的出现有很好的预示作用;低层辐合、高层辐散加强,有利于降水的发展和维持;低层辐合减弱,甚至出现辐散,同时高层辐散减弱,降水减弱或停止。

(3) 应用天津塘沽雷达的分析还表明,即使是单部雷达的基本速度产品,也能够较

好地获取降水区中特别是强对流降水区中的风场结构特征,并进一步通过分析风场结构特征来判断暴雨的演变规律,用于临近预报。

参考文献

- [1] 倪允琪,周秀骥. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 647-661.
- [2] 刘黎平,邵爱梅,葛润生,等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒天气雷达观测研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 278-283.
- [3] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 675-690.
- [4] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2002 年 6 月 8—9 日陕南大暴雨系统的中尺度分析[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 747-760.
- [5] 杜秉玉, 陈钟荣, 张卫青. 梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究: 中尺度对流回波系统的结构和特征[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(1): 47-55.
- [6] 杨鹏, 于洋, 杨敏, 等. 海河流域南系“63.8”、“96.8”暴雨洪水重现分析[J]. 海河水利, 2005, (1): 1-5.
- [7] 胡欣, 马瑞隽. 海河南系“96.8”特大暴雨的天气剖析[J]. 气象, 1997, 24(2): 8-13.
- [8] 王彦, 吕江津, 王庆元, 等. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 32-36.
- [9] 王彦, 李胜山, 王庆元, 等. 渤海湾海风锋雷达产品特征[J]. 气象, 2006, 32(12): 46-50.
- [10] 东高红, 张志茹, 李胜山, 等. 一次大雪天气过程的多普勒雷达特征分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 75-80.
- [11] 胡明宝, 高太长, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 52-63.
- [12] 夏文梅, 张亚萍, 汤达章. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 787-794.
- [13] 夏文梅, 张亚萍, 王凌震, 等. 复合风场的单多普勒速度特征[J]. 气象科学, 2003, 23(2): 56-63.
- [14] Thomas M, Srivastava R C. An improved version of the extended velocity - azimuth display analysis of single-Doppler radar data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 8(4): 453-456.

王彦等：暴雨的多普勒天气雷达速度辐合风场特征

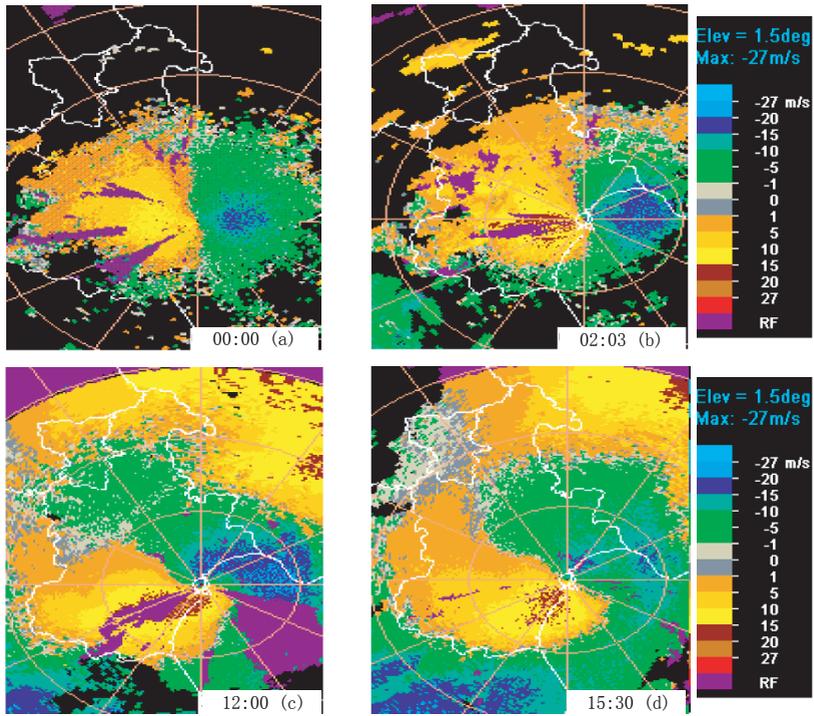


图2 2005年8月16日1.5°仰角PPI的速度回波产品演变图(每圈为50km)

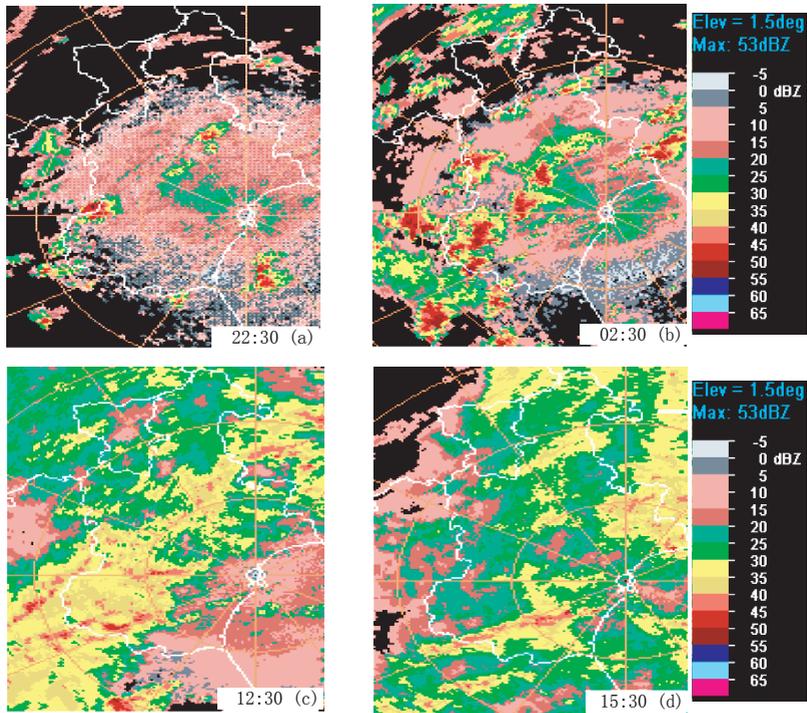


图3 2005年8月16日1.5°仰角PPI的基本反射率产品演变图(每圈为50km)