

一次超级单体的多普勒特征和数值模拟特征对比分析¹

胡 胜¹ 于华英² 胡东明¹ 蔡安安¹ 伍志方¹

(1. 广州中心气象台, 广东 广州 510080; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘 要: 首先利用多普勒雷达分析了影响广州的超级单体的典型特征。从反射率因子产品中可以观测到指状回波、V 型缺口、弱回波区、回波悬垂和回波墙。截取沿着风暴低层入流方向并通过反射率因子核区的垂直剖面, 分析出云内存在两支对峙的上升和下沉气流。随后利用三维对流风暴云模式模拟了此次过程。模拟的最大反射率因子为 75 dBZ, 60 dBZ 回波核区厚度超过了 14 km, 与实际探测值比偏大, 这是模式本身的问题, 其主要原因是没有考虑衰减的影响, 也可能是模式初始扰动偏大和粒子非球形的影响。模式还给出了超级单体强盛时的流场结构: 近地层以辐合气流为主, 为雷暴出流; 其上上升气流占据主导地位, 为辐合风场; 但在顶端没有给出携带降雨粒子的出流所产生的云砧。另外, 模式较好的模拟了云内垂直运动的演变: 开始时, 地面辐合形成有组织的上升气流; 随后上升运动加大, 具有倾斜性, 促使单体进一步发展; 之后, 单体内出现了下沉气流, 与上升气流并存, 但上升气流占主导地位; 风暴强盛时, 近地层辐散加强; 此后, 下沉气流逐步控制云体, 单体迅速减弱。

关键词: 超级单体, 中尺度气旋, 弱回波区, 三维数值模式

收稿日期:

修订日期:

基金项目: 广东省自然科学基金项目(5001121)资助

作者简介: 胡胜(1974-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 研究方向: 大气探测和遥感。

E-mail: guyuesheng@tqyb.com.cn

COMPARISON BETWEEN DOPPLER AND SIMULATED FEATURES FOR A SUPERCELL

Hu Sheng¹, Yu Huaying², Hu Dongming¹, Cai Anan¹, Wu Zhifang¹

(1. Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080;

2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract Firstly, typical features of the supercell, occurred in Guangzhou on August 11th, 2004, are discussed by using the new generation weather radar data. V-notch, finger-echo, weak echo region, overhang and echo-wall are observed from reflectivity products. A vertical cross section of the radial velocity is made along the direction of the low-level inflow and cross the maximum reflectivity core, which displays a part of strong updraft and downdraft. Secondly, the 3-D convective storm model is used to simulate the supercell. The maximum reflectivity and the core thickness of the simulated radar echo are 75dBZ and 14km, respectively. These values are more than the counterparts that are detected by radar. The reason is that attenuation is not calculated in the model. The wind field structure is also addressed when the storm is the strongest. Divergence, caused by thunderstorm outflow, is in the low level. In the middle and high level, convergence is dominant. But the plume is not simulated at the top. Finally, the evolution of the simulated vertical motion is documented. The interaction between environmental wind and updraft, which is formed by the convergence on the ground at the beginning, makes the storm stronger. Then, downdraft occurs and boosts up. When it becomes dominant, the supercell collapses.

Key words: supercell; mesocyclone; weak echo region; 3-D numerical simulation

一次超级单体的多普勒特征和数值模拟特征对比分析¹

胡 胜¹ 于华英² 胡东明¹ 蔡安安¹ 伍志方¹

(1. 广州中心气象台, 广东 广州 510080; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

1 引 言

随着我国新一代多普勒天气雷达布网建设, 许多专家对强对流天气作了深入的研究。朱君鉴等^[1]利用济南 CINRAD/SA 产品分析了 2002 年发生在山东东阿的一次超级单体的典型特征, 认为风暴跟踪信息 (STI)、冰雹指数 (HI)、垂直积分含水量 (VIL)、中气旋 (M) 等产品对强对流有较好的识别和预报能力。廖玉芳等^[2]使用湖南常德雷达于 2002 年 5 月在国内首次观测到三体散射 (TBSS) 和龙卷涡旋特征 (TVS) 这两个分别指示大冰雹和龙卷的雷达回波特征, 并得到了地面报告的印证。2004 年伍志方等^[3]利用广州雷达收集的多个中小尺度天气资料, 对多普勒速度和反射率因子及其导出产品特征进行分型, 并根据不同类型的灾害性天气系统, 对各种特征进行统计分析。郑媛媛等^[4]根据合肥雷达探测资料对 2004 年皖北地区的一次超级单体过程进行了分析, 寻找到出流边界、V 型缺口、弱回波、悬垂、中气旋等特征, 并指出由于常规探测资料较粗的时空分辨率, 因此在预报发生此类强对流天气潜势时具有一定的局限性^[4]。王峰云^[5]等 (2003 年) 利用单多普勒雷达资料对中尺度风场探测技术做了进一步的研究。郑媛媛^[6]等 (2004 年) 利用合肥新一代雷达资料对目前较常使用的三种定量估测降水方法做了对比试验, 分析了误差, 并得到了最佳降水估测区域和方法。

另一方面, 国内许多学者开展了冰雹云的数值模拟的研究工作。许焕斌等^[7]和王谦等^[8]分别于 1990 年建立了液相微物理过程的三维强对流云模式。孔凡铀等^[9]发展了包含较详细的冰相微物理过程的三维冰雹云模式, 并进行了一系列的冰雹云数值模拟。随后, 洪延超^[10]对该模式作了较大的发展, 微物理过程采用了更接近实际的双参数谱演变方案, 可以计算可作为冰雹胚胎的冻滴和霰的浓度与含水量, 加入了人工催化过程, 适合于研究强风暴的动力学特性和微物理结构以及催化防雹等问题。刘术艳等^[11]模拟了 1996 年 6 月 29 日发生在北京的一次超级单体风暴过程, 给出了弱回波区、悬挂回波以及回波墙等典型特征。肖辉等^[12]则模拟了 1998 年 7 月 2 日发生在武汉的特大暴雨个例, 从云微物理学角度研究这次特大暴雨形成的云物理过程及其对暴雨形成的影响。

2004 年 8 月 11 日下午, 广东省出现了一系列的强对流过程, 其中有 1 个超级风暴单体严重影响了广州; 它属于热带超级单体, 呈现出钩状回波、中气旋、弱回波区、强反射体等特征。单体移经的地区出现了雷雨大风和强降水, 其中花都区花山镇平山村还降了大拇指粗的冰雹, 持续时间约十分钟。此次过程致使农作物大面积受损, 住房、工棚、厂房倒塌和损坏 2227 间, 7 人受伤, 一人遭雷击死亡, 直接经济损失超过 5000 万元。本文利用广州多普

收稿日期:

修订日期:

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (5001121) 资助

作者简介: 胡胜 (1974-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 研究方向: 大气探测和遥感。

E-mail: guyuesheng@tqyb.com.cn

勒天气雷达资料对这个超级单体的典型特征进行了讨论;然后采用三维对流风暴云模式模拟了该过程的回波特征和流场特征,并与雷达实际探测的结果做对比分析。

2 超级单体的多普勒特征分析

2.1 超级单体路径和演变过程

2004年8月11日12时(北京时间),在清远和韶关交界处、惠州北部先后生成了孤立的风暴,这些单体逐步加强并缓慢南移。13时,珠江三角洲大部分地区也相继出现了局地对流系统的发展。13时33分,位于从化至惠州一带的风暴带出现了分裂的迹象。至14时03分,风暴带断裂,分成两个强单体继续南移,其中西侧的那个单体将影响广州。14时27分吞并小单体,强度进一步加强。在接近广州时,该南下单体的低层气流与广州局地减弱单体的强大低层辐散出流相互作用,形成一个非常强烈的辐合区域,促使单体再次发展。15时21分,单体最为强盛,呈现出许多典型特征。此后,超级体内下沉气流逐渐占据主导地位,至16时03分,单体减弱明显,呈消亡之势。这个超级单体的路径见图1,其演变过程见图2。



图 1: 8 月 11 日影响广州的超级单体路径

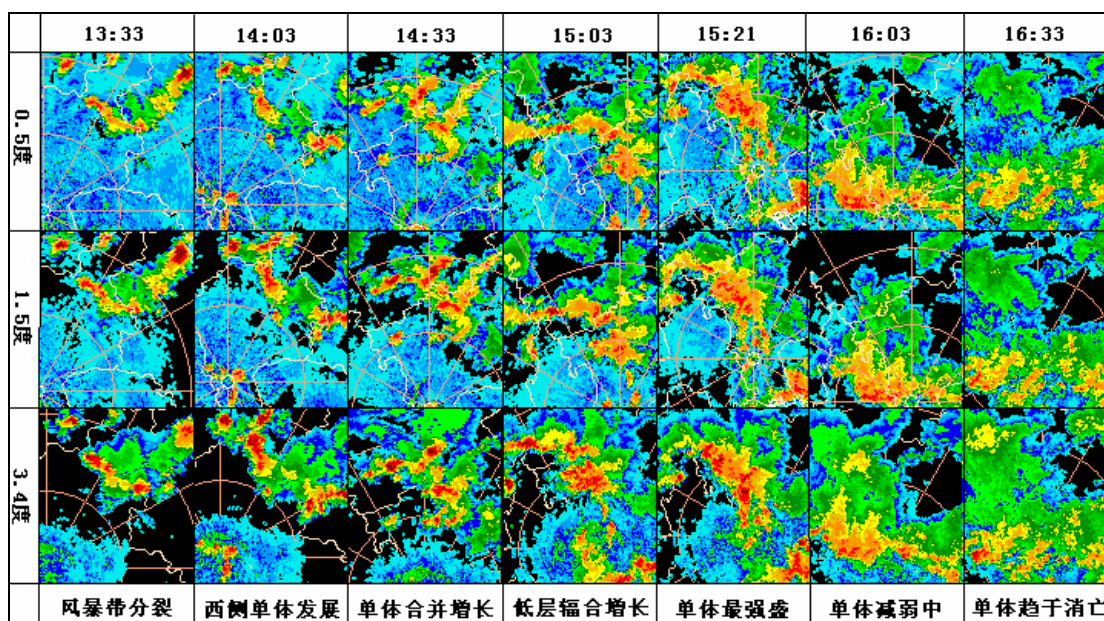


图 2：影响广州的超级风暴单体演变过程

2.1 反射率因子产品分析

15 时 21 分超级单体最为强盛：3.4° 仰角反射率因子 PPI 可以看到指状回波部分（图 3d）（此前 15 时 03 分在类似位置出现了 V 型缺口，见图 3c，这也是超级风暴单体常见的特征之一）。文中截取了沿着风暴低层入流方向并通过反射率因子核心区的反射率因子垂直剖面（图 3a）：白色箭头指向的是弱回波区，对应单体内强烈的上升气流区；在上升气流的顶部是回波悬垂（红色箭头指示），该区域内反射率因子大部分超过了 57 dBZ，最大达到 66 dBZ，此处也是冰雹增长区，这个超级单体的回波悬垂特征非常明显，相应的地面也观测到了冰雹；在弱回波区的后侧是直立的回波墙（蓝色箭头指示），它是下沉的降水粒子所形成的。图 3b 是垂直入流方向的剖面，可以清楚的看到反射率因子核心区（超过 57 dBZ 部分）向上、向下伸展，达到 8 km 的高度，说明这是一个成熟的超级单体。

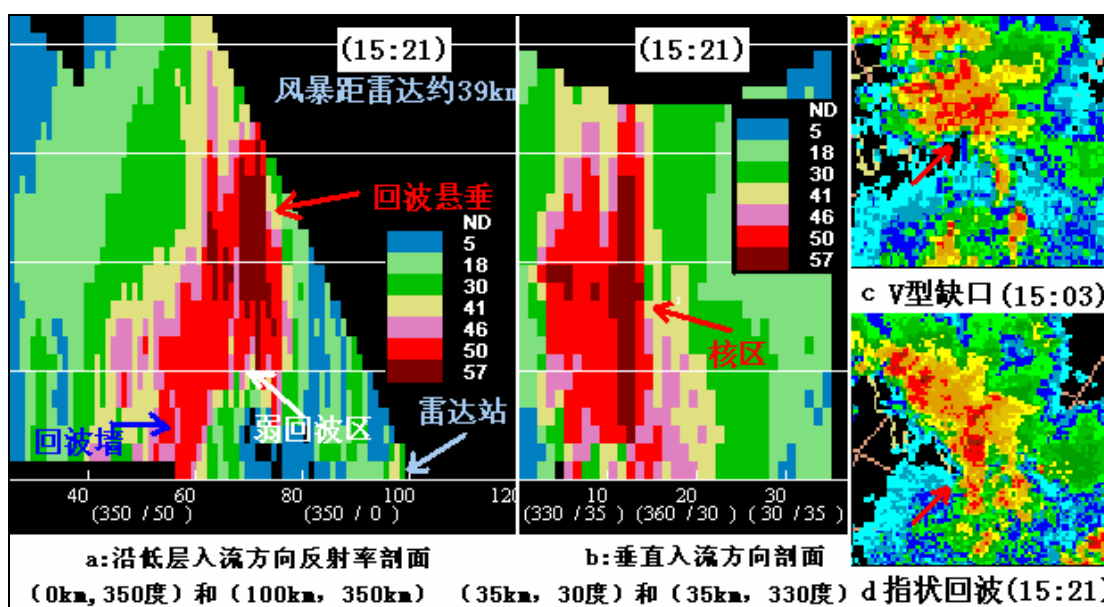


图 3：反射率因子产品图

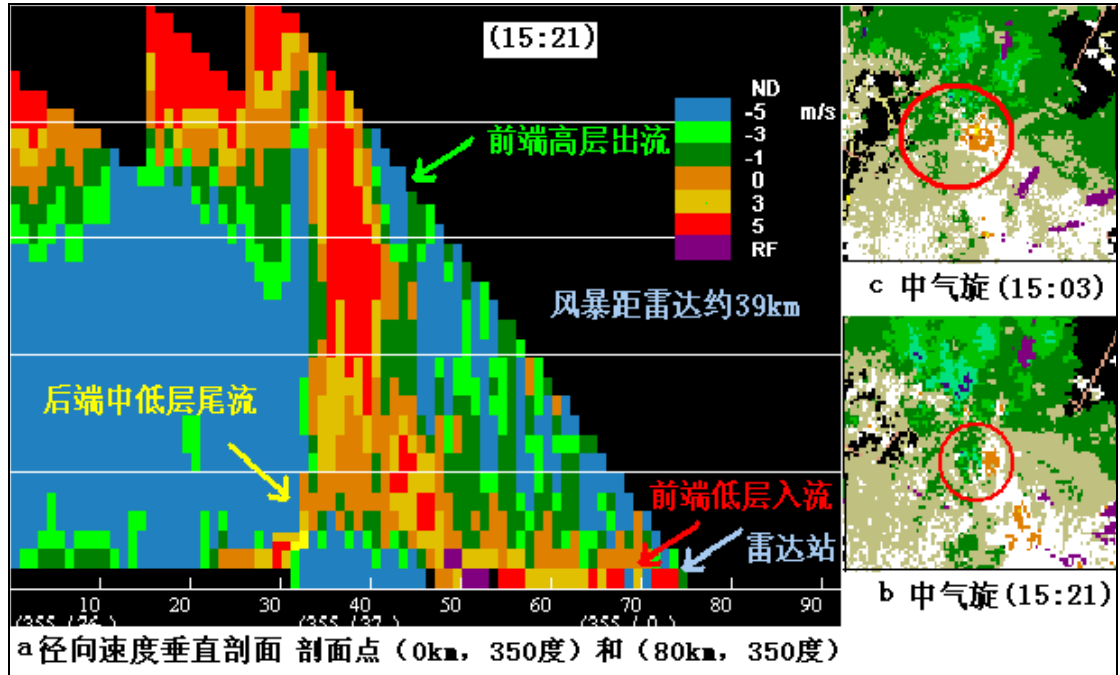


图 4: 多普勒径向速度垂直剖面

2.2 多普勒速度产品分析

15 时 21 分，在 3.4° 仰角的径向速度 PPI 上，发现与指状回波相对应的区域出现了中尺度气旋（图 4b，红色圆圈标明），而且这个中尺度气旋特征早在 15 时 03 分就已经出现（图 4c）。截取沿着风暴低层入流方向并通过反射率核心区的径向速度垂直剖面（见图 4a），在风暴单体的前端（也就是移动方向的一端）是低层入流（红色箭头表示），而前端高层为出流（绿色箭头表示），后端中低层则出现了出流（黄色箭头表示）。这表明：在超级单体内，上升气流从前端低层进入，然后倾斜上升，至高层随高空风向流出；下沉气流从云后中低层流出。这是成熟的超级单体所具有的典型流场结构。

3 影响广州的超级风暴单体的数值模拟

3.1 模式简介

本文采用了中国科学院大气物理研究所建立并发展的三维对流风暴云模式。该模式的动力学框架是一个非静力可压缩的完全弹性方程组，云—降水微物理过程采用双参数谱浓度方案。模式中包含了水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰、冻滴和冰雹等 8 种水物质的微物理过程。模式计算域为 $36\text{ km} \times 36\text{ km} \times 18.5\text{ km}$ ，水平格距 1.0 km ，垂直格距 0.5 km 。用 i 、 j 、 k 分别表示向东、向北、向上的 X、Y、Z 轴上的格点序数。将经过地面观测值订正的探空资料输入雹云模式程序，采用湿热泡方式启动对流云，给极值为 1.5°C 的轴对称位温扰动，扰动区中心坐标为 (18, 18, 7)，位于 3 km 高度，厚度为 6 km 。风暴的模拟时间为 120 min 。文中对 2004 年 8 月 11 日发生在广州的这次强对流过程进行了较为详细的三维云物理数值模拟研究，所用探空为清远探空站 8 月 11 日早晨 08:00 探空（图 5）。

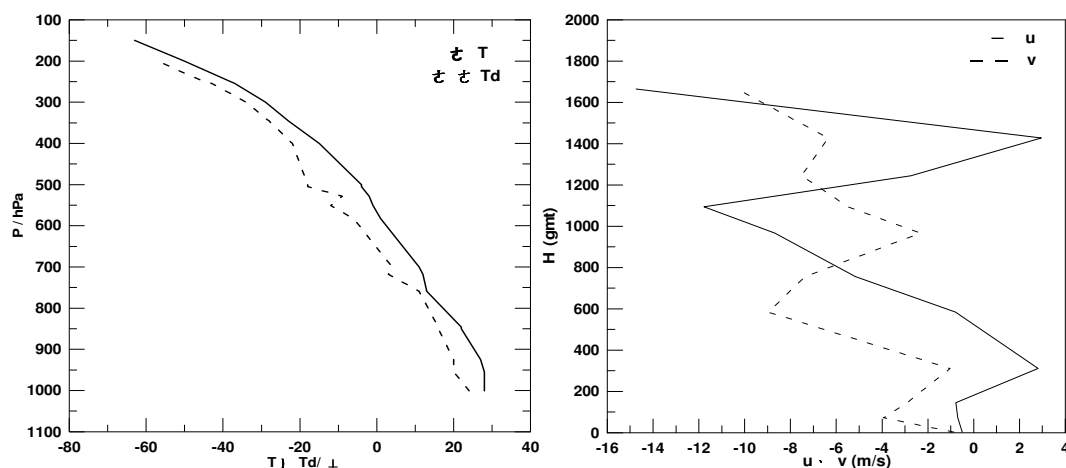


图5 2004年8月11日08:00时清远的温度廓线和风廓线

左图：温度 T （实线）、露点 T_d （虚线）；右图：风廓线 u （实线）、 v （虚线）

3.2 模式模拟的回波特征

在第15分钟，超级单体对流云在约4 km的高度上开始出现雷达回波，随后该回波逐渐增强并向上发展，至第23分钟首次出现了60 dBZ的强回波，对应的高度为6.5 km，同时回波顶高发展到约9 km的高度，此时云内以强烈的上升气流为主。随后对流云进一步向上向下同时伸展，第25分钟，云内出现了最强达75 dBZ的回波中心，相应高度仍保持在6.5 km处（见图6）。在第33分钟，60 dBZ的强回波核区开始及地，该核区的垂直高度已经发展到了约14.5 km，而此时云顶高度为16.5 km，并且云内低层出现了下沉辐散气流，但云内中上部的上升气流仍然强大。到了第35分钟，该单体最为强盛，75 dBZ回波已经及地，形成了及地回波墙，75 dBZ回波核区垂直厚度接近9 km，且60 dBZ回波顶已经发展到15.5 km高度（见图7）；此时，单体内低层的下沉气流增强，与中上层的强劲上升气流形成两支对峙气流；但是模式没有能够模拟出云顶前部辐散出流携带的降水粒子所产生的云砧、以及强烈上升气流区所产生的弱回波区和回波悬垂。此后，回波单体减弱，回波顶高降低，至第37分钟，75 dBZ强中心已经消失，但70 dBZ回波中心仍然维持。到了第41分钟，该单体依然很强，70 dBZ核区厚度保持不变，体内中上层的有组织的倾斜性上升气流依然存在，而在及地回波墙前面的上升气流区中却出现了超级单体最为强盛时没有出现的弱回波区，但回波悬垂并不明显，说明此时模拟的雷达回波出现了再次增强过程（见图8）。随后该单体减弱很快，整个过程接近50分钟。

模式输出的雷达回波比天气雷达实际的探测值要强，这是模式本身的原因。模式中雷达回波计算方法用的是常用的粒子直径6次方关系，并增加了冻滴和冰雹两种水成物，雷达回波强度由雨滴、冰晶、雪花、霰、冻滴和冰雹的回波强度组成。模式计算中没有考虑回波衰减，没有考虑大粒子的非球形的影响（如大水滴在下落过程中的变形的影响），还有如模式所用的粒子谱是一个连续的双参数谱，而实际上粒子谱是离散的，这些均对雷达回波强度的计算产生影响。

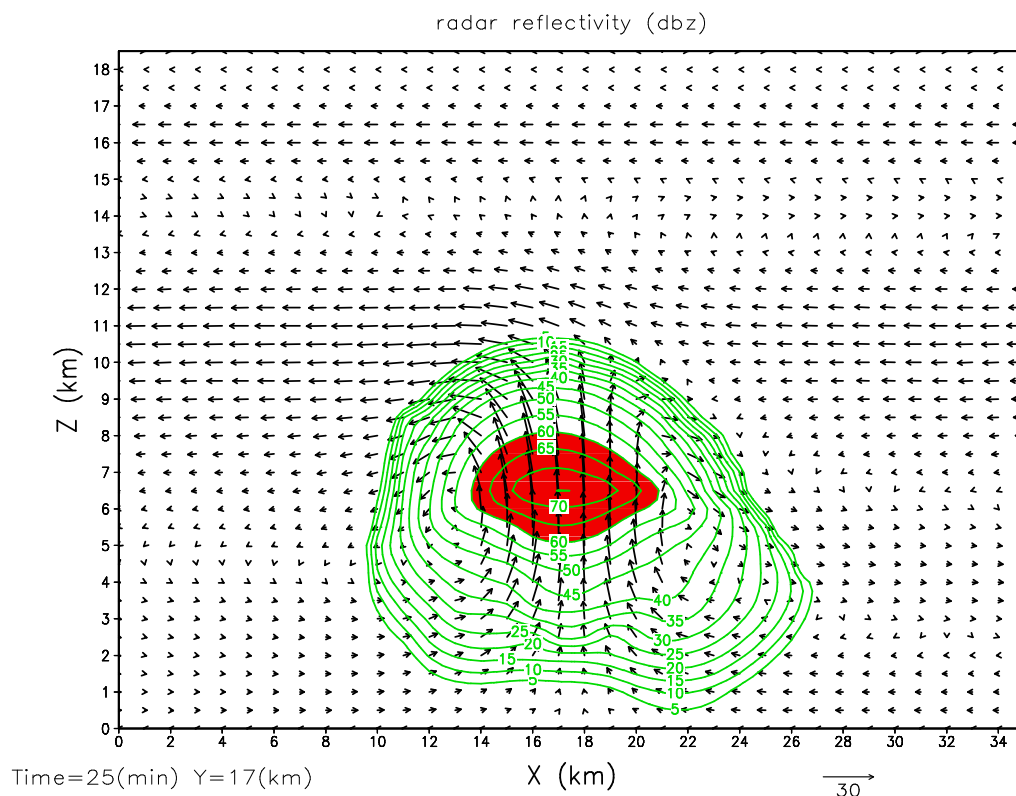


图 6：第 25 min 模拟云出现了最强达 75 dBZ 的雷达回波

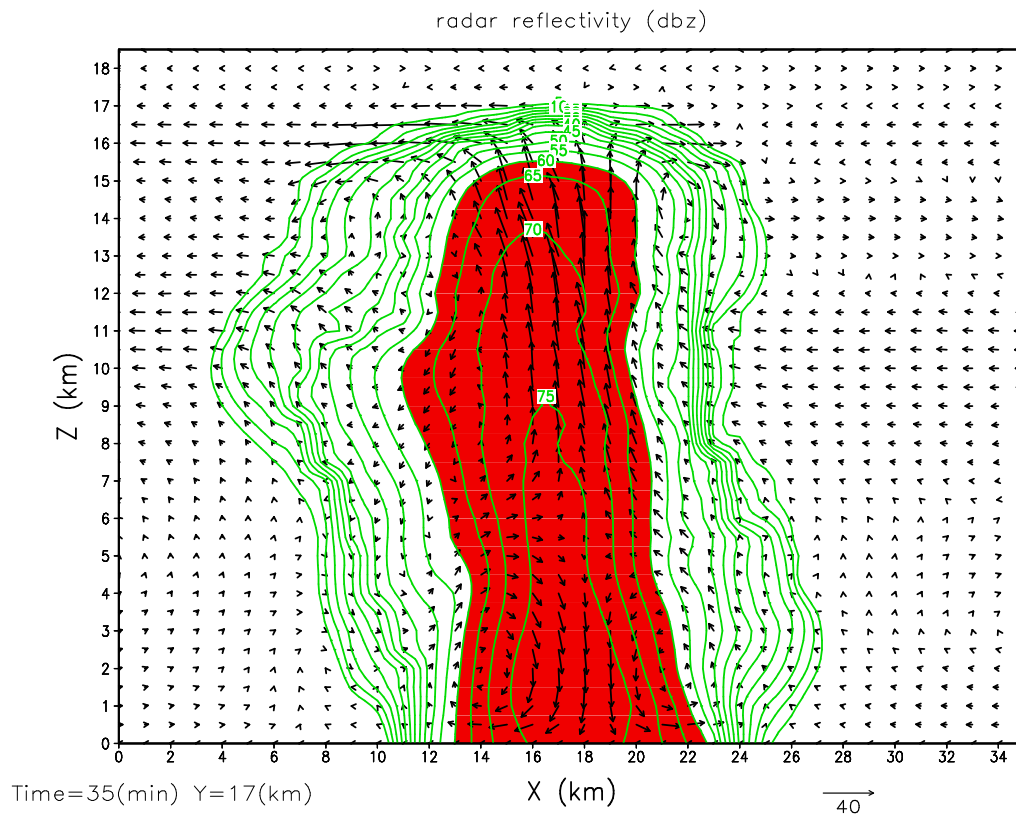


图 7：第 35 min，模拟云雷达回波最为强盛

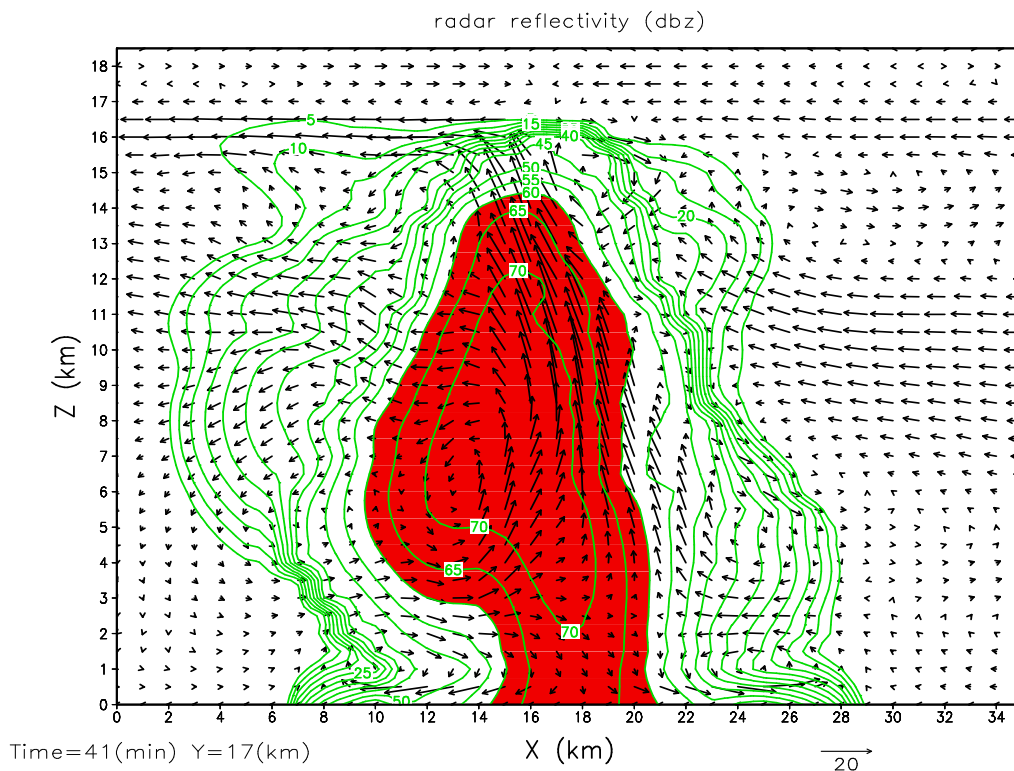


图8：第41 min 雷达回波右侧一端的上升气流区域内出现了弱回波区

3.3 模式模拟的超级单体内的流场结构

首先分析近地层（0.5 km）水平风场变化情况。由模式输出的结果可知，在地面附近，随着时间的推移，气流是先辐合后辐散的。在第5 min地面就开始出现了辐合，并由此产生了垂直上升气流，辐合系统在第21 min达到最大(图9)。此后对流云进一步发展，地面辐合依然存在，至30 min转为辐散气流。第35 min（即超级单体最为强盛），近地面层的水平气流辐散相当强烈，至50 min辐散最为明显，表明该单体已经崩溃。

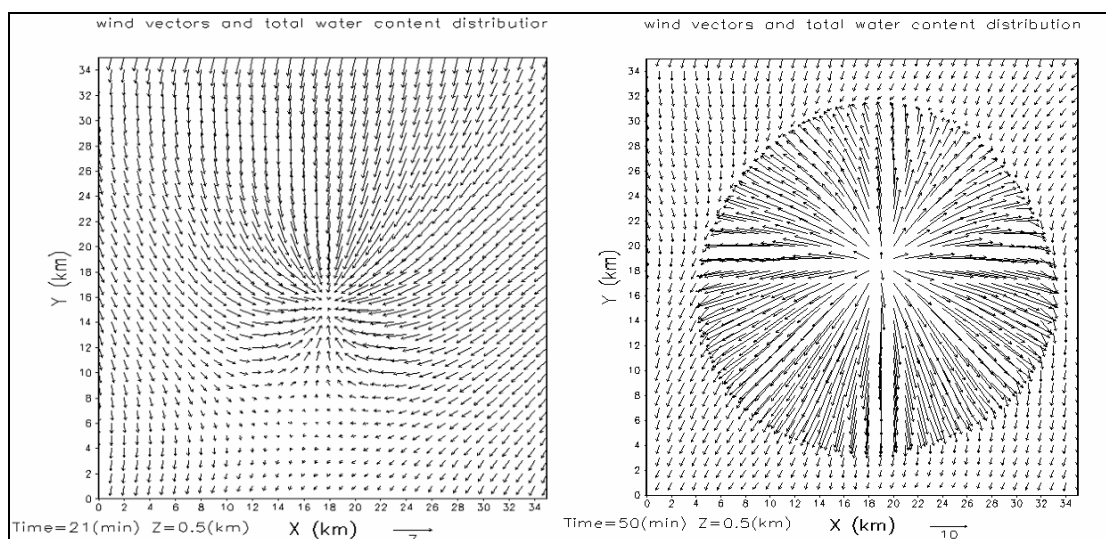


图9：0.5 km 水平风场先后出现的最强辐合和最强辐散

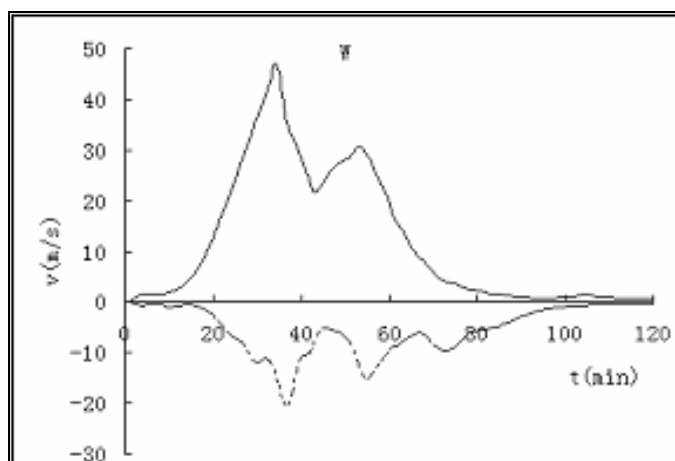


图 10：最大上升气流（实线）和最大下沉气流（虚线）随时间变化曲线

其次，讨论了云内垂直上升气流速度随时间的变化，其强弱反应了云的发展状况。图10给出了该例模拟云中最大上升气流速度和下沉气流速度随时间变化的曲线，其中实线为最大上升气流速度 w_u ，虚线为最大下沉气流速度 w_d ：该个例发展非常迅速，在12 min云内上升气流开始明显增长，呈对称分布。此后有组织的垂直上升气流区抬升，至26 min，其顶部达到12km，并且由于高空存在较大的环境风场，上升气流出现不对称，开始倾斜上升，并在顶部随高空风出流一端出现了涡旋，此时最大上升气流速度为28.8 m/s，而此时下沉气流也得到加强。随着对流云的发展，上升气流和下沉气流均进一步增大，33 min时上升气流速度达到最大值46.9 m/s。其后上升气流减弱后重新加强，至52 min达到第二个高峰，为30.8 min，前面模拟的雷达回波分析中也出现了两次回波增长过程，两者相一致。图中还可以看出，在23~58 min这段长达35分钟的时间里，最大上升气流速度均大于20 m/s，并且与较为强烈的下沉气流共存，表明对流云强盛时期维持较长。52 min以后上升气流速度迅速减小，到64 min减至10 m/s以下，并继续减弱。云内下沉气流在第17 min开始加大，在37 min达到最大，为-20.3 m/s，对应于地面为很强的出流。下沉气流也出现了两次峰值，此后沉气流减小很快。在65 min上升气流与下沉气流达到相同的量值，此后下沉气流速度大于上升气流速度。

最后对超级单体最为强盛时（即第35 min）流场做了分析。在 $y=17$ km处截取垂直速度的剖面（如图11），云内上升和下沉气流是同时存在的，3 km高度以下是下沉气流，而之上是强烈的上升气流，并且上升气流区一直伸展到16.5 km，此时云内最大上升速度为39.4 m/s，最大下沉速度为-19.6 m/s。另外图中也给出了不同高度层次内水平风场辐合和辐散特征：在近地层（如0.5 km）为辐散特征，代表了雷暴出流；从3 km—10 km的这个高度上，主要是风场的辐合区域，区域内的垂直上升气流将降水粒子卷夹向上输送，使得风暴单体极为强盛；而10 km高度之上，则是上升气流的辐散区域；相应的模式输出的0.5 km、3 km、5 km和7 km高度上的水平风场验证上述特征（图略）。上述分析表明此时单体已经得到充分发展，回波已经及地形成降水，降水粒子的拖曳作用使得低层出现了明显的下沉气流；但由于中高层维持强盛上升气流，单体强度能够维持。还有，模拟云顶部的上升气流沿着环境风场倾斜，至顶端出流并很快融入到环境风场中，但并没有表现出因携带降雨粒子而产生云砧的特征。

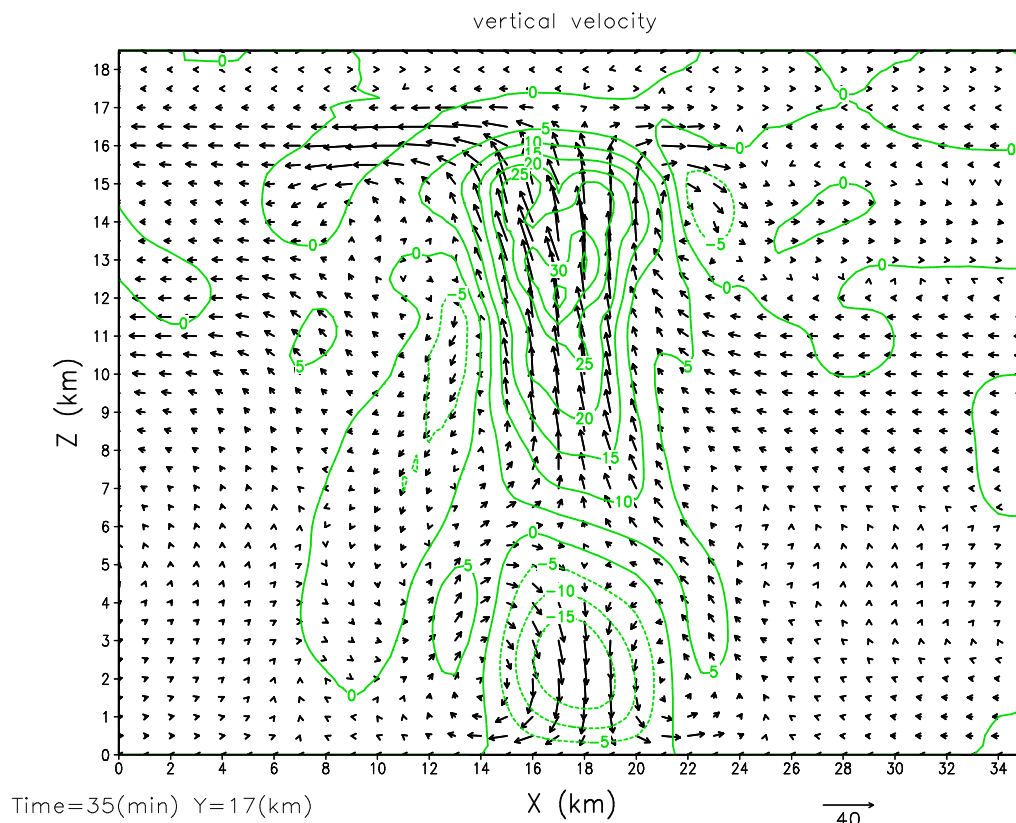


图11：第35分钟 Y=17 km垂直速度剖面图

4 结论

利用新一代多普勒天气雷达和三维对流风暴云模式分析了影响广州的一次超级单体的特征。在超级单体最为强盛时，观测到了指状回波和中气旋。反射率因子垂直剖面图给出了弱回波区、回波悬垂、回波墙等特征。实际探测到的最大反射率因子值为 66 dBZ，回波顶高接近 15 km。数值模式模拟出了超级单体核心区向上、向下强烈伸展，但弱回波区和回波悬垂不明显。模拟的最大反射率因子为 75 dBZ，比实际探测偏大，其主要原因是没有考虑衰减的影响，也可能是模式初始扰动偏大和粒子非球形的影响。

多普勒速度剖面图大致可以观测到云内存在着对峙的上升和下沉气流。而数值模式给出了超级单体强盛时的流场结构：近地层以辐散气流为主；其上是辐合上升气流；上升气流随高度倾斜，但旋转不够强烈，至顶端形成出流并融入到环境风场中，没有给出云砧特征。另外，还模拟了云内垂直运动的演变：初始时地面辐合形成上升气流；随后上升气流加大与环境风场作用具有倾斜性；之后云内出现下沉气流，但上升气流仍占据主导地位；此后下沉气流逐步加强并控制云体，单体减弱。当然，对于其他个例而言，该模式能否准确给出风暴内风场结构信息，还需要进一步的验证。

参考文献

- [1] 朱君鉴，刁秀广，黄秀韶. 一次冰雹风暴的CINRAD/ SA 产品分析[J]. 应用气象学报，2004，15（5）：579-589.
- [2] 廖玉芳，俞小鼎，郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒雷达资料分析[J]. 应用气

象学报, 2003, 14 (6): 656—662.

[3] 郑媛媛, 愈小鼎, 方翀, 等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2005, 62 (3): 317—328.

[4] 伍志方, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20 (3): 391—400.

[5] 王峰云, 王燕雄, 陶祖钰. 单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究[J]. 热带气象学报, 2003, 19 (3): 291—298.

[6] 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J]. 热带气象学报, 2004, 20 (2): 192—197.

[7] 许焕斌, 王思微. 三维可压缩大气中的云尺度模式[J]. 气象学报, 1990, 48 (1): 81—90.

[8] 王谦, 胡志晋. 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟[J]. 气象学报, 1990, 48 (1): 91—101.

[9] 孔凡铀. 冰雹云三维数值模式模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文[M]. 1991.

[10] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式[J]. 气象学报, 1998, 56 (6): 641—653.

[11] 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究[J]. 大气科学, 2004, 28 (3): 385—404.

[12] 刘术艳, 肖辉, 杜秉玉, 等. 北京一次强单体雹暴的三维数值模拟[J]. 大气科学, 2004, 28 (3): 455—470.