

春季一次超级单体过程的成因分析

廖小华¹ 杨琴² 马月¹ 郑熊莲¹ 况孟奇¹

(1 重庆市云阳县气象局, 云阳 404500; 2 重庆市气候中心, 重庆 401147)

摘要: 利用常规观测资料、卫星资料以及多普勒天气雷达资料, 分析了2016年4月27日午后发生在鄂西北的一次超级单体风暴过程。结果表明: 高空冷槽、上干冷下暖湿、强垂直风切变等提供了良好的环境条件; 汉江河谷喇叭口地形、湖陆风环流、中尺度地面辐合线以及低层暖湿气流产生的扰动与雷暴出流导致超级单体强烈增强; 多普勒天气雷达特征表现为中气旋、低层有界弱回波区、典型钩状回波等超级单体特征, 同时出现了三体散射、旁瓣回波等大冰雹特征; 强的垂直风切变使得雷暴更有组织性并具有更长的生命史, 有利于强对流天气的产生。

关键词: 三体散射, 超级单体, 中气旋, 有界弱回波区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.006

Analysis on Weather Process of Supercell Storm in Spring

Liao Xiaohua¹, Yangqin², Ma Yue¹, Zheng Xionglian¹, Kuang Mengqi¹

(1 Yunyang Meteorological office of Chongqing Province, Yunyang 404500 2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147)

Abstract: Based on conventional observation, satellite and Doppler radar data, a supercell storm in northwest of Hubei that happened on the afternoon of 27 April 2016 was analyzed. The results show that the upper trough, warm moist air in the lower atmosphere and cold dry air in the upper and strong vertical wind shear provided a very good environmental condition. The trumpet-shaped topography of the Hanjiang River valley, the circulation of land and sea winds, the mesoscale surface convergence line, the disturbance produced by warm moist airflow of low layer and the cold pool outflow resulted in a strong enhancement of the supercell storm. The main characteristics of Doppler weather radar were meso-cyclone, bounded weak echo region, typical hook echo, etc. that were supercell storm features. Three body scatter signature (TBSS) and the side-lobe echo of large hail appeared at the same time. The strong vertical wind shear made the thunderstorm more organized and lasted longer, which is beneficial to the severe convective weather.

Keywords: TBSS, supercell storm, meso-cyclone, bounded weak echo region

0 引言

由于鄂西北地区特定的地理环境和特殊的地形地貌, 形成了鄂西北地区复杂多变的气候, 气象灾害种类繁多, 出现频率高。超级单体风暴是发展最为旺盛的对流风暴系统^[1], 也是产生强降水、冰雹、龙卷和短时大风等灾害性强对流天气最为主要的风暴系统之一。廖玉芳等^[2]研究指出热力不稳定趋势和较大的垂直风切变条件非常有利于超级单体的产生。黄荣等^[3]对地形强迫作用影响分析指出, 上游的强雷暴产生的冷池出流被抬高, 冷空气叠加在地面 γ 中尺度热辐合中心之上, 使山前局地大气层结更不稳定; 另一方面, 强冷池出流产生的边界层高层偏北风与近地面弱

的偏南风构成有利于对流新生的垂直风切变, 地面热辐合中心、边界层热力和动力不稳定的增强共同作用是局地雷暴新生的主要机制。张萍萍等^[4]对鄂北地面中尺度分析表明中尺度辐合线为冰雹天气发生提供了抬升条件, 促进强对流天气爆发, 垂直水汽分布上, 中低层干盖的形成有效地抑制了边界层对流的发展, 为不稳定能量的积聚创造了有利条件。

2016年4月27日下午到傍晚, 丹江口、老河口、谷城出现了大风、冰雹和短时强降水等强对流天气, 导致农作物大面积受灾。丹江口市石鼓镇的最大冰雹直径达4 cm; 丹江口市城区出现了直径1.5 cm的冰雹, 22 m/s的大风, 狂风刮倒不少树木; 谷城出现了风速为32 m/s的大风天气, 同时伴随着冰雹和雷雨天气。

本文使用常规观测资料、卫星IR1图像资料以及多普勒雷达资料, 从环流背景、水汽条件、不稳定能量、抬升条件等方面综合分析, 对该次发生在鄂西

收稿日期: 2019年10月21日; 修回日期: 2020年5月25日
第一作者: 廖小华(1987—), Email: 871465376@qq.com
通信作者: 马月(1994—), Email: 251159187@qq.com
基金项目: 湖北省气象局基金项目(2018J05)

北境内的超级单体过程,从天气尺度、中尺度并结合雷达资料进行多尺度分析,揭示此次过程发生发展的机制。

1 环流背景分析

2016年4月27日08时天气图上,500 hPa亚洲中高纬呈两槽一脊形式,鄂西北位于高空槽后西北气流中,槽后有强的冷平流;700 hPa切变线主要位于长江中下游沿江一带,鄂西北为一致的偏北气流控制;925 hPa在鄂西北有辐合线存在,有干冷空气和暖湿空气的汇合。形势配置为高空冷平流强迫类,高空西北气流造成强风速垂直切变,高空干冷平流使得0℃和-20℃层较低;中高层强干冷平流,产生强位势不稳定层结。

27日14时海平面气压场可以看出,在河南东南部有一高压中心,河北一带也为高压区,河南西部和鄂

西北地区处于低压区,白天以多云为主,午后地面气温快速上升,鄂西北14时最高温度已经达到29℃。当高空有干冷空气侵入时^[5],容易形成上冷下暖的对流不稳定形势,随着高空冷槽东移进入湖北省,触发对流不稳定能量释放,形成强对流天气。

2 大气温湿状况及不稳定性分析

4月27日08时安康站探空图可以看出(图1),低层850 hPa的温度露点差小于2℃,空气湿度较大,700 hPa以上温度露点差开始变大,其湿层浅薄,低层暖湿^[6],而中层干冷。此时, $T_{850}-T_{500}=24℃$,大气层结不稳定进一步发展,CAPE指数08时较小,用14时地面温度订正,达1692.3 J/kg,不稳定能量不断累积,为强雹暴的发生提供了有利条件。0℃和-20℃层分别为3410 m和6481.5 m,高度略偏低。但由于是在春季,且位于鄂西北山区,季节和山区地形有利于

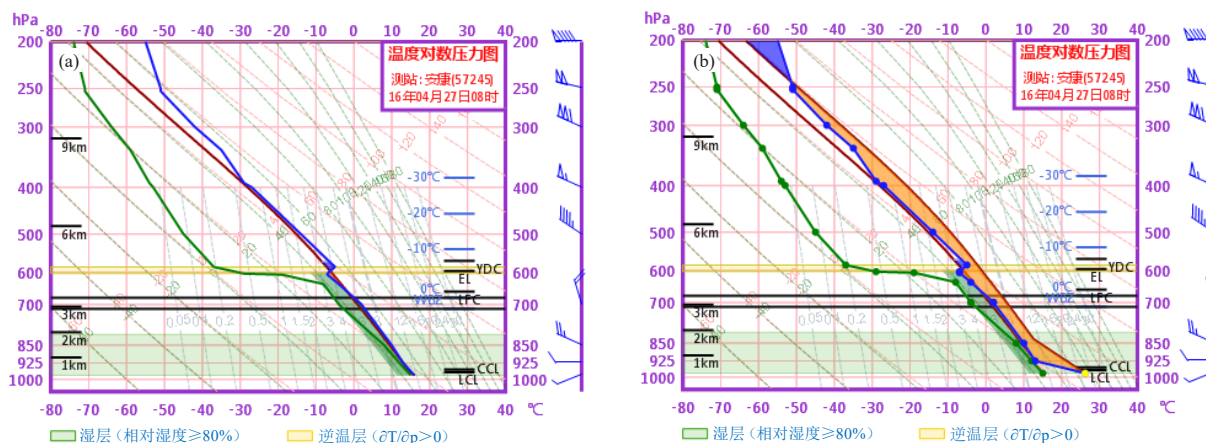


图1 2016年4月27日08时订正前(a)和订正后(b)的安康探空曲线

Fig. 1 Pre-revision (a) and post-revision (b) T - $\ln p$ at Ankang at 08:00 BT on 27 April 2016

强对流性风暴的发生、发展。

分析安康探空资料,发现低层为暖平流,而中高层(700~400 hPa)为干冷平流,有利于对流不稳定发展。而高低层风向、风速都有较大的变化,中高层有强的偏北气流,使得干冷空气随北风侵入。0~500 hPa速度差达16 m/s以上,存在强的风速垂直切变。可见,十堰地区周边维持上冷下暖不稳定层结,高低空之间有明显的垂直风切变,有利于增加低空的水汽,同时有利于启动抬升机制使得对流不稳定区域能量得以释放,促使强对流天气爆发。

安康站的 T - $\ln p$ 图所反映的强热力不稳定、较强对流有效位能和较强的垂直风切变为午后强对流发生提供了热力和动力不稳定条件^[7]。低层一定湿度以及中高层干冷空气的卷入,0℃层和-20℃层高度都较低,有利于产生大冰雹。

3 中尺度对流系统的特征分析

3.1 卫星云图

从FY2可见光连续卫星云图可以看出,27日14时30分,河南西部和十堰交界处有一带状云系发展,其主体云系向东南方向移速较快,尾部云系由于山脉的阻挡作用,移速较慢。14时30分至17时00分,中尺度对流云系快速发展,尾部云系逐渐发展到鄂西北地区。

3.2 雷达回波特征

从十堰雷达回波的连续演变可以发现,此次强冰雹天气过程雷达回波呈现出典型的“钩状”“弱回波区”“回波悬垂”“旁瓣假回波”“三体散射长钉”等特征,回波强度高及移动速度快等特征。同时,此次强对流过程回波垂直发展高度高也预示着强降雹的发生。在强回波阶段,强度大于50 dBz的强回波顶高

超过7 km, 强回波核心对应高度在5~6 km以上。

3.2.1 弱回波区和有界弱回波区

2016年4月27日下午发生在鄂西北强烈雹暴雷达回波的四分屏显示, 分别是15时58分0.5°、1.5°、2.4°、4.3°仰角的反射率因子图。0.5°(图2a)和4.3°(图2d)仰角的反射率因子图上的双箭头指示同样

的地理位置, 在0.5°仰角上, 双箭头指向风暴的低层入流缺口, 箭头前方是构成入流缺口的一部分低层弱回波区, 而在4.3°仰角(图2d), 箭头前侧是超过60 dBz的强回波中心, 即在低层与入流缺口对应的弱回波区之上有一个强回波悬垂结构, 为前倾结构, 这是强烈风暴的特征之一。

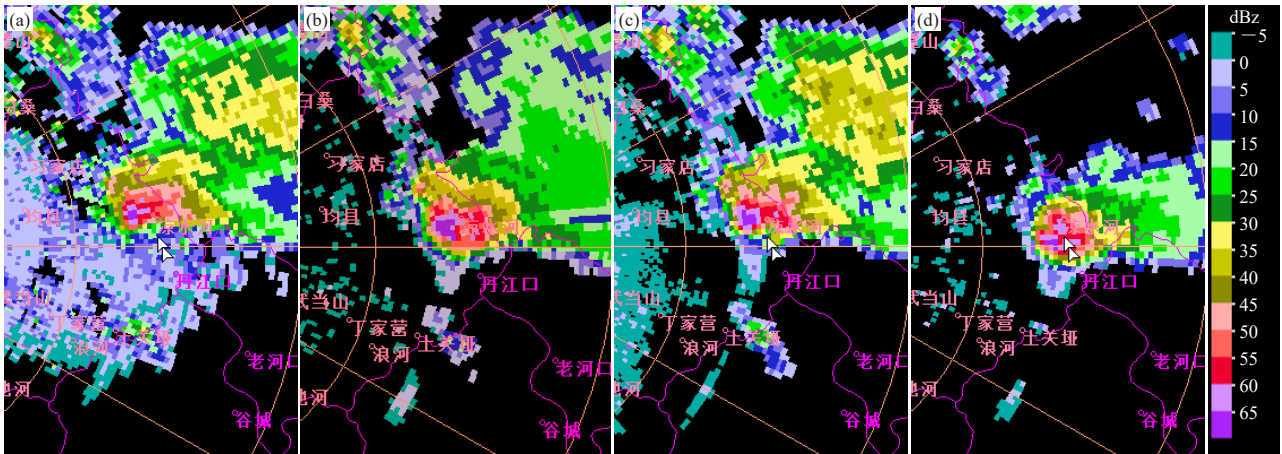


图2 2016年4月27日15:58十堰雷达0.5°(a)、1.5°(b)、2.4°(c)和4.3°(d)基本反射率

Fig. 2 The basic reflectivity of Shiyang Radar at 0.5° (a), 1.5° (b), 2.4° (c), 4.3° (d) at 15:58 BT on on 27 April 2016

该强对流风暴强中心达到了65 dBz, 并向东南方向继续移动, 尺度继续扩大, 并沿着偏东入流方向有倒“V”形缺口^[8]。在相应径向速度图上出现明显的中气旋特征, 沿着入流方向穿过最强回波位置的反射率因子剖面图可以看到开始出现反射率因子自低往高向低层入流一侧倾斜的特征, 呈现出明显的弱回波区、回波悬垂、回波墙等特征。超级单体强度达到顶峰, 风暴前侧的典型“V”形缺口的反射率因子很强, 在1.5°、2.4°、3.4°仰角强回波的右侧均出现了与强回波同步移动的旁瓣回波, 旁瓣回波强度在5~10 dBz。

通过最强反射率因子核心作垂直剖面显示, 位于回波悬垂上的50 dBz以上的强回波核心位置高度超过6.5 km, 在-20 °C层等温线高度以上, 剖面左侧的强回波区域对应大冰雹的下降通道, 回波强度也超过60 dBz, 其右边是弱回波区和位于弱回波区上面的回波悬垂, 水平尺度超过10 km。

3.2.2 大风特征

从此次强冰雹天气过程十堰雷达径向速度图的连续演变可知, 在各个主要降雹时段, 相对应的不同仰角雷达径向速度图上分别呈现出典型的“大风区”“中气旋”“入流缺口”等中小尺度天气特征。对照鄂西北此次降雹出现的时间, 降雹区、强回波区与速度图上典型中小尺度天气系统出现的区域相

符合^[9]。中层径向辐合, 有明显的中气旋, 雷暴移动快。中气旋持续时间较长, 至少持续了4个体扫。

3.2.3 垂直积分液态含水量 VIL

从垂直积分液态含水量产品中可以看出(图略), 回波位于丹江口市境内时VIL值先增大后减小再增大的过程, 最大达到40 kg/m³。当回波移入老河口后, 重新发展加强, VIL值也是先增大后减小再增大的过程。当VIL值增加到很大, 尔后开始减小时, 表明即将降雹, 而突然减小的VIL值预示着地面大风的开始, 结合实况发现, 丹江口、谷城、老河口地面降雹和大风出现的时间都存在很好的对应关系。

3.2.4 大冰雹识别标志一旁瓣假回波和三体散射

通过对主要降雹时段雷达回波强度特征分析发现, 在27日15时58分十堰雷达3.4°仰角和16时53分襄阳雷达2.4°仰角上, 强降雹的主要时段于较高仰角同时出现了旁瓣假回波和三体散射长钉(TBSS)现象。

4 中尺度系统在超级单体风暴演变中的作用

4.1 地形对超级单体的作用

鄂西北地区北部为秦岭山脉, 西南部为大巴山脉, 两者在鄂西北汉江河谷地区形成了一个明显的喇叭口地形, 而十堰市郧阳区则与南阳市淅川县交界处为西北—东南走向的山谷^[10]。

从十堰雷达监测的回波演变特征可以看出, 12时

20分在鄂、陕、豫交界偏北处,形成了由普通单体构成的多单体风暴,并向ESE移动。13时42分多单体风暴后侧A单体(图3)向南移入郟阳与浙川交界山谷的北部,并迅速发展,A单体得以加强的原因可能是气流越过山脊进入山谷后,地形强迫产生上升运动,白天山坡升温快,山谷升温慢,形成山谷风效应,共同作用使得A单体从山区进入山谷后增强,14时12分发展为普通单体风暴,最强回波超过了65 dBz,而前侧东部多单体则向ESE移动并逐渐减弱消失。

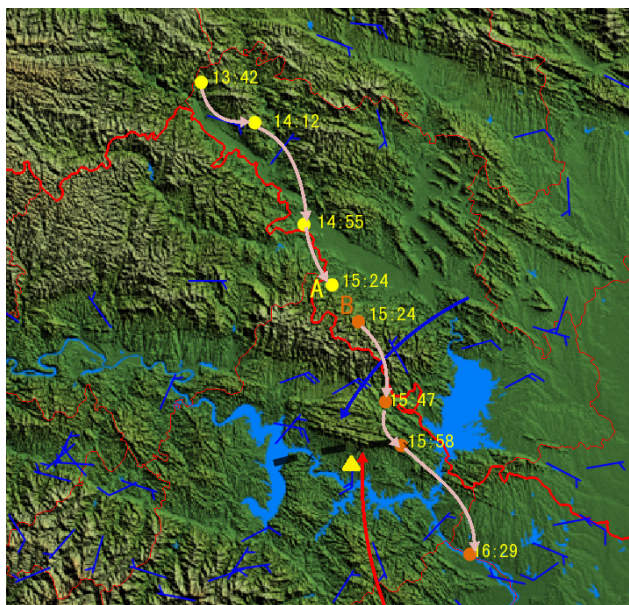


图3 强雷暴单体移动路径

(黄色圆点为单体A,橙色圆点为单体B,黄色三角形为丹江口檀山站,蓝色风矢为27日16时地面风,蓝色箭头为冷性东北风显著气流,红色箭头线为暖性偏南风显著气流,黑色断线为地面辐合线)

Fig. 3 Movement path of severe thunderstorm cells (The yellow dot is monomer A, the orange dot is monomer B, the yellow triangle is Danjiangkou Tanshan Station, the blue wind is ground wind at 16:00, the blue arrow is the significant northeast wind airflow, the red arrow is the warm southerly significant airflow, the black broken line is the surface convergence line.)

单体A沿山谷向SSE移动,14时55分由山谷进入郟阳区东部低山地区,受地形产生的抬升作用,回波快速发展,并于15时03分达到最强,但由于此处山地坡度较小,单体A并未发展成超级单体。15时24分单体A进入丹江口市与浙川县交界处的秦岭东段余脉,并向南传播生成单体B,单体A原地减弱消失,而单体B则向南移动,与呈东西走向山脉相交,由于丹江口北部山脉坡度大,地形产生的强迫抬升作用强。15时47分移动至丹江口石鼓镇一带并发展为强风暴单体。16时地面加密场上湖北丹江口北边等温线为22℃,南

边等温线为24℃,有2℃的温差,此时东北干冷气流与偏南暖湿气流在汉江河谷地区形成热力环流,形成当日最强的地面辐合线,地形抬升和中尺度地面辐合线共同作用使得B单体在河谷地区明显增强,此时对流风暴达到了最强,并有明显的超级单体特征。

4.2 中尺度地面辐合线的作用

通过分析地面加密观测资料,12时在鄂、陕、豫交界偏北处建立了东北—西南向中尺度地面辐合线,对应有回波发展,此后地面辐合线沿山谷东移南压,对流风暴也随之移动。

15时03分在河南浙川西部与十堰郟阳交界处,单体A发展为强对流回波单体(图4),该单体有明显前倾结构,处于成熟阶段。之后该单体迅速减弱,15时地面加密场上北边等温线为20℃,南边等温线为22℃,有2℃的温差,加上北部有对流单体影响,有降水发生,偏北干冷气流与东南暖湿气流形成热力环流,形成了中尺度地面辐合线,为雷暴的传播和加强创造了有利条件,15时24分在A单体前侧形成单体B(图3),由此可见中尺度地面辐合线对于对流单体的传播起到了关键作用。

15时58分,地面加密资料显示浙川南部冷池的强度较明显增加,强的冷池流出使东北风达到8 m/s,此时丹江口檀山站南风也达到了当天最强,达6 m/s,在十堰丹江口中部分产生了强的水平风切变。此时对流风暴达到了最强,并有明显的超级单体特征。

结合地面中尺度辐合线和雷达回波的演变特征,可以看出地面中尺度辐合线对对流风暴的产生、发展、传播发挥了重要作用,当中尺度地面辐合线达到最强时,对应的对流风暴也发展至最强。

4.3 湖陆风环流

此次过程主要受高空冷槽影响,500~925 hPa鄂西北地区以东北风或东风为主,南风范围小,强度弱。丹江口檀山站位于鄂西北喇叭口东侧,受地形影响该站08—11时以东风为主,12时转为偏南风并逐渐增大,16时达到最强,最大风速为6.6 m/s。在十堰雷达风廓线也可以看出,从14时24分至16时06分在1.5 km以下的低层为南风,风速在4~8 m/s。由于陆地温度存在很强的日变化,而汉江河水表温度变化慢,中午开始,陆地和汉江河水形成温度梯度,致使檀山站附近形成了由汉江河吹向陆地的偏南风,随着气温的升高,湖风也随之达到最强。

5 小结

通过对2016年4月27日鄂西北的超级单体风暴从多尺度天气环境、地形条件及风暴演变过程进行分

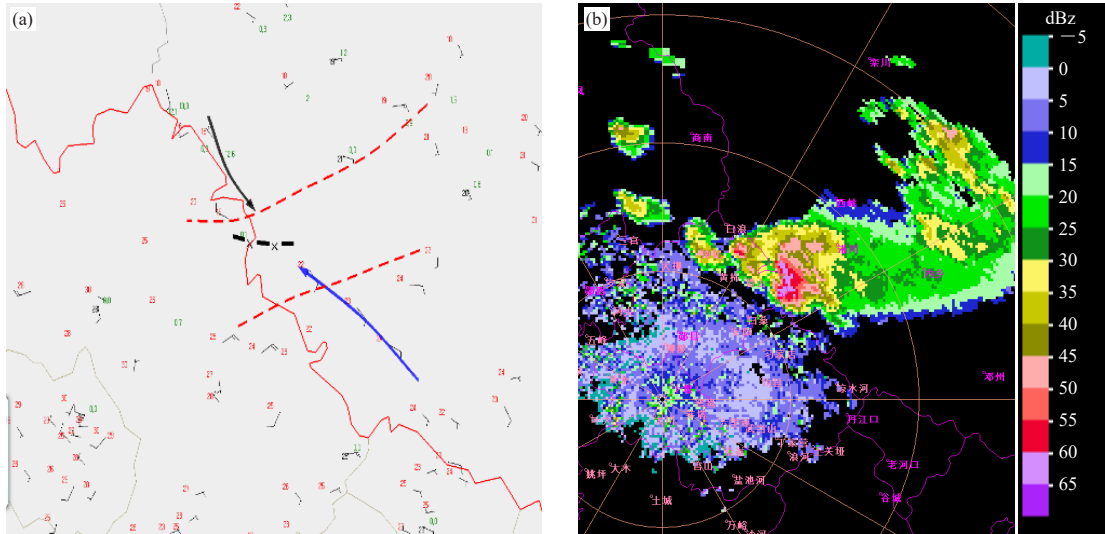


图4 2016年4月27日15:00地面加密场(a)与15:03组合反射率(b)

(红虚线为等温线, 单位 $^{\circ}\text{C}$; 蓝色箭头示意暖湿气流; 黑色箭头示意干冷气流; 黑色断线为地面辐合线)

Fig. 3 The ground encryption field (a) at 15:00 BT and the combined reflectance (b) at 15:03 BT on 27 April 2016 (The red dotted line is the isotherm, unit: $^{\circ}\text{C}$; the blue arrow indicates warm and humid airflow; the black arrow indicates dry and cold airflow; the black broken line is the surface convergence line)

析, 得到以下主要结论:

1) 导致此次超级单体发生的天气系统是高空冷槽后部偏北气流和低层切变线, 超级单体发生前十堰地区有高的对流有效位能、上干下湿层结构、强的垂直环境风切变, 低层有暖平流, 高层有冷平流, 构成了强的上冷下暖的垂直结构, 造成上下强烈的扰动, 提供了中尺度抬升机制, 促进强对流天气爆发。

2) 鄂西北特殊的山区地形、地面中尺度辐合线、湖陆风等中尺度系统, 以及雷暴本身的冷池流出和雷暴出流与低层暖湿气流产生的扰动是超级单体爆发性增强的关键原因。

3) 这次超级单体过程中超级单体最大反射率因子达到65 dBz以上, 相应的反射率因子垂直剖面呈现出典型的有界弱回波区、回波悬垂和有界弱回波区左侧的强大回波墙, 最大回波强度出现在沿回波墙狭长区域的下部。

4) 超级单体回波的相应径向速度图上出现中气

旋, 在近地层中气旋的径向速度特征为辐合式气旋性旋转, 中层为气旋性旋转, 高层为辐散。

参考文献

- [1] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [2] 廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新. 2004年4月29日常德超级单体研究. 南京气象学院学报, 2007, 30(5): 579-589.
- [3] 黄荣, 王迎春, 张文龙. 复杂地形下北京一次局地雷暴新生和增强机制初探. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 232-241.
- [4] 张萍萍, 龙利民, 张宁. 2009年6月6日鄂北冰雹天气过程分析. 气象与环境学报, 2012, 27(2): 10-15.
- [5] 丁建芳, 刘磊, 等. 三门峡一次冰雹天气多普勒雷达资料分析. 气象与环境科学, 2012, 35(3): 49-53.
- [6] 汪应琼, 李芳, 姜玉印, 等. 湖北宜昌超级单体风暴发生的环境条件分析. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 53-61.
- [7] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [8] 郑媛媛, 俞小鼎, 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. 气象学报, 2004, 62(3): 317-328.
- [9] 付双喜, 王致, 君张杰. 甘肃中部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析. 高原气象, 2006, 25(5): 932-941.
- [10] 牛奔, 张家国, 吴涛, 等. 鄂西北一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 暴雨灾害, 2016, 35(1): 45-52.