吴海英,陈海山,刘梅,等,2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象,43(2):141-150.

长生命史超级单体结构特征与形成维持机制*

吴海英[1,2] 陈海山[1] 刘 梅[2] 沈 阳[2]

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

2 江苏省气象台,南京 210008

提 要:利用地面加密自动站、多普勒天气雷达等观测资料及 NCEP 再分析资料对 2015 年 4 月 28 日冷涡背景下发生在苏皖地区的强对流天气过程进行了分析,重点探讨了此次过程中导致苏南区域性冰雹的长生命史超级单体风暴结构特征及形成维持机制。结果表明:冷涡后部偏北急流的建立及其携至南下的冷平流,促进了条件性不稳定层结和深层垂直风切变的发展,为强对流天气的发生提供了有利的环境。地面中尺度低压及与之伴随的辐合线是对流风暴的触发机制之一。长生命史超级单体风暴起源于对流层中层,成熟阶段具有高度组织化的动力结构,风暴内伴有显著旋转特征,中层旋转最为明显,风暴内中层及以下对应较深厚的辐合区,风暴顶则表现出明显的辐散特征,有利于风暴内上升气流和风暴低层暖湿入流的增强,促进了低层较丰富的水汽向风暴内输送,导致对流风暴的垂直增长和强烈发展。冰雹出现前后,风暴顶高、质心高度呈现波动特征,冰雹出现在对流风暴顶高及质心高度迅速下降阶段,质心高度下降趋势更显著。超级单体风暴较长时间维持与对流层中层持续南下的冷平流、强垂直风切变的维持及风暴内旋转特征持续有关。

关键词:超级单体风暴,条件性不稳定,垂直风切变,旋转

中图分类号:P458 **文献标志码**:A **DOI**:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.002

Structure Characteristics, Formation and Maintenance Mechanism of Supercell with Long Life Cycle

WU Haiying[1,2] CHEN Haishan[1] LIU Mei[2] SHEN Yang[2]

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: Based on the surface dense automatic station data, Doppler radar data and NCEP/NCAR reanalysis data, the strong convective weather occurring over Jiangsu and Anhui Provinces on April 28, 2015 under the background of cold vortex was analyzed. Moreover, the structure characteristics, formation and maintenance mechanism of the supercell storm with long life cycle, which led to the regional hail in this weather process, were also significantly studied. The results showed that the formation of the northerly jet at the back of cold vortex and cold advection which was carried to the south promoted the development of conditional unstable stratification and deep vertical wind shear, providing a favorable environment for the occurrence of severe convective weather. Surface mesoscale depression and the accompanied convergence line were one kind of the triggering mechanisms. Supercell storm with long life cycle occurred in the middle troposphere and had highly organized dynamic structure at its mature stage. The storm had the significant rotation characteristics, especially in middle layer. The middle and low layer of the storm corresponded with deep convergence zone, while the top of the storm presented obvious divergence feature. Such

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006)、江苏省科技支撑计划(BE2013730 和 BE2015731)及江苏省自然科学基金(BK20131459)共同资助

2016 年 7 月 13 日收稿; 2016 年 10 月 27 日收修定稿

第一作者:吴海英,主要从事灾害性天气预报技术研究. Email:951129833@qq.com

通信作者:陈海山,主要从事陆面过程和气候数值模拟研究. Email:haishan@nuist.edu.cn

veritical distribution of divergence field enhanced the intensity of rising flow within the storm and the warm, humid flow in the low level of the storm, making the abundant water vapor in low level transported into the storm, so the convective storm increased vertically and developed intensively. The top height of the storm and the centroid height showed features of wave motion before and after the hail occurring. The hail happened at the rapid descending stage of the above two heights, and the centroid height had more obvious descending trend. The maintenance of supercell storm was related to the constant southerly cold advection in the middle troposphere, the strong vertical wind shear and rotation feature inside the storm.

Key words: supercell storm, conditional instability, vertical wind shear, rotation

引 言

冰雹天气是具较大破坏力的自然灾害之一,通常由强烈发展的超级单体风暴所致。超级单体风暴极易引发灾害性强天气,故一直以来广受关注,相关研究可以追溯到 20 世纪 50—60 年代。“超级单体”最早被提出用来表征对流风暴成熟阶段的准静稳状态(Browning,1962),雷达探测发现超级单体风暴内存在比较清晰的弱回波区(weak echo region, WER)或有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)(Browning and Donaldse, 1963)。Donaldson(1970)首先通过多普勒天气雷达观测到超级单体中的“龙卷气旋”(Brooks,1949),之后大量的雷达观测进一步证实了风暴内部中气旋的存在,基于此,Browning(1978)提出内含深厚中气旋的对流单体称为超级单体风暴。针对超级单体风暴的研究目前主要集中在两个方面:一是对超级单体风暴依存环境的研究,如统计表明江淮地区龙卷超级单体风暴发生在蕴含丰富对流能量的极不稳定大气中(周后福等,2014),导致强龙卷的超级单体风暴易产生于边界层内垂直风切变较大,水汽充沛的环境中(郑媛媛等,2009;吴芳芳等,2013;张一平等,2012;曾明剑等,2016)。另一方面随着中尺度数值模式的快速发展及各种探测资料的逐渐丰富,越来越多的研究开始揭示超级单体风暴内部细微结构特征及产生不同天气类型的超级单体内部环流特征的差异(陈秋萍等,2015;刁秀广等,2011;冯晋勤等,2012;伍志方等,2014),超级单体风暴形成、发展及传播方式或有不同,但风暴内出现的中气旋是其最突出的共同特征(俞小鼎等,2008;朱江山等,2015)。作为一种深对流,超级单体风暴组织、维持与发展涉及不同物理过程之间的相互作用,陈明轩等(2012)在对一次强降水超级单体风暴发展过程的数值模拟研究发现中低层垂直风切变对超级单体风暴内部中气旋形成有重要作用,与雷暴相伴的冷池及出流在风暴发展及消亡阶段表现出不同特征且对风暴演变有明显贡献。

上述研究提高了对超级单体风暴结构及成因的认识,但由于这类对流尺度的风暴生消演变迅速,其形成发展过程中的细节特征仍需深入分析和认识。2015 年 4 月 28 日,在冷涡背景下,苏皖地区出现一次较大范围的强对流天气过程,期间以区域性冰雹造成的灾害尤为严重,通过对这次强对流天气过程的分析,特别讨论了过程中造成苏南地区的区域性强冰雹的长生命史超级单体风暴结构演变特征及触发维持机制,以期对超级单体风暴及其产生的强天气预报有一定的参考性。

1 天气概述与资料

1.1 天气实况与灾情

受华北冷涡后部冷空气影响,2015 年 4 月 28 日下午至上半夜江淮地区出现了一次较大范围的强对流天气,期间伴有冰雹(图 1a)、雷暴大风(图 1b)、短时强降水等强对流天气。28 日 15:35 江苏沛县最早出现冰雹,随后,六合(18:06)、仪征(18:28)、丹阳(19:26)、句容(20:33)和吴江(21:40)6 个基本站相继出现冰雹(图 1a),六合站最大冰雹直径 50 mm。此外,据相关报道,徐州、宿迁、淮安、盐城、南京、扬州、镇江、常州、无锡、苏州等市的局部地区也出现了冰雹,冰雹导致农作物及室外设施受灾严重,据江苏民政部门统计,此次强对流过程造成 61.07 万人受灾,因灾死亡 5 人,损坏房屋 77045 间,倒塌 134 间,农作物受灾面积 48906.983 hm^2,成灾面积 21732.043 hm^2,绝收面积 1637.12 hm^2,直接经济损失 68195.9687 万元。

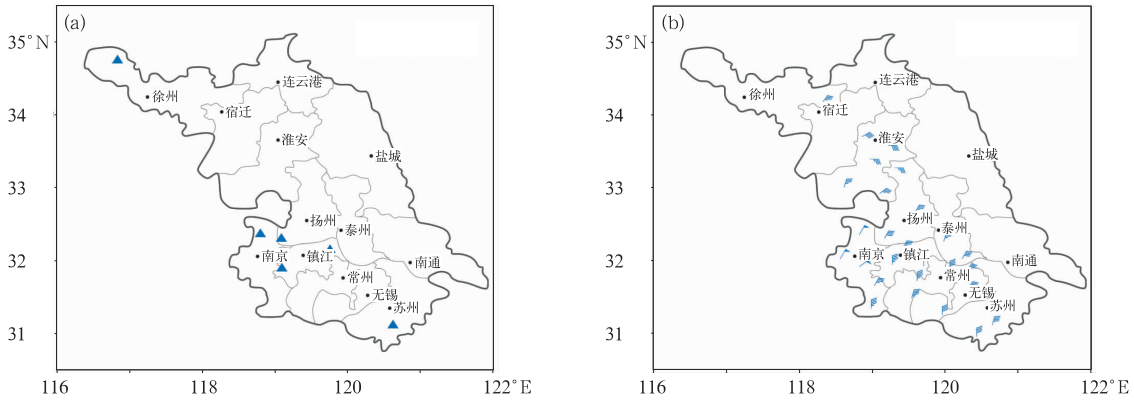


图 1　2015 年 4 月 28 日(a)冰雹实况和(b)雷暴大风实况

Fig. 1　Observed weather of (a) hail, (b) thunderstorm gale on 28 April 2015

1.2　环流形势

2015 年 4 月 28 日 08 时，500 hPa 上(图 2a)，亚洲中高纬呈两槽一脊型，脊位于贝加尔湖附近，其两侧各有一低槽，其中位于鄂霍茨克海西侧的低槽南部形成一切断低涡，与温度槽相配合，该切断低涡位于华北地区，非常深厚，与之对应的气旋性环流自 925～200 hPa 均清晰可见，但在对流层低层，温度场与高度场配置与中高层相反，850 hPa 及以下的低涡与东伸的暖舌相配合(图略)，由此形成上冷下暖的不稳定层结。28 日午后随着冷涡逐渐南落，500 hPa 涡后迅速建立起一支中尺度偏北风急流(图略)，位于苏皖交界区，偏北气流携冷空气南下促进了层结不稳定的发展，同时增强了中低层垂直风切变，为强对流天气的发生构建了有利的环境。地面上(图略)，江淮地区发展和移动的中尺度低压是对流的触发机制之一。图 2b 是用 14 时温度、露点订正后的徐州站探空，图中显示，该站附近对流层中低层风随高度逐渐顺转，近地面为偏南风，700 hPa 及以上转为西北风，这意味着大气低层伴有暖平流，促进了大气层结不稳定的发展，此时对流有效位能高达 2882 J·kg^{-1}，远超过 4 月江苏产生冰雹时对流有效位能统计平均值约 1100 J·kg^{-1}，充沛的能量为对流风暴迅速发展提供有利条件；环境的水平风垂直切变较大，0～6 km 垂直风切变为 27 m·s^{-1}，有利于对流后续的组织化发展。0℃层仅位于 3.6 km，对流层中层北风将携相对干冷的空气侵入，使得冰雹实际融化层高度低于0℃层高度

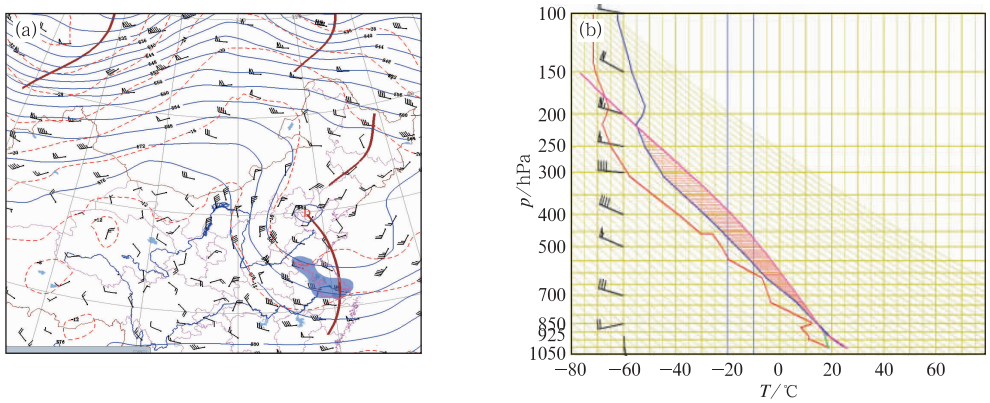


图 2　2015 年 4 月 28 日 08 时(a)500 hPa 风、高度(实线，单位：dagpm)与温度场(虚线，单位：℃)及(b)徐州站订正 T-ln$p$ 图

(蓝色阴影区为强对流发生区)

Fig. 2　The 500 hPa wind, height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: ℃) (a), Xuzhou Station revised T-ln$p$ diagram (b) at 08:00 BT 28 April 2015

(Blue shaded area indicates the region with severe convection)

(俞小鼎,2014),约在 3.1 km,这样的融化层高度有利于大冰雹的产生。

1.3 资料

本文分析涉及资料包括常规地面及探空资料、苏皖两省地面自动站资料、南京站、徐州站多普勒雷达资料、江苏雷达拼图资料以及 1°×1°的 NCEP 再分析资料。

2 对流风暴结构演变特征

2.1 强对流过程中雷达回波演变

2015 年 4 月 27 日夜间受东移高空槽影响,江淮地区及黄淮南部出现了一次强对流天气,28 日早晨江淮东北部仍残留有分散的弱降水回波,其他地区天气转晴。28 日中午,江淮、黄淮大部分地区地面增温明显,加之前期降水导致的近地层水汽丰富,13:00 前后,位于地面中尺度低压附近的山东嘉祥地区开始有孤立的尺度较小的对流单体生成(图略),单体发展迅速,在其快速向东南方向移动期间,沿地面中尺度低压中心向南伸展的辐合线上不断有对流单体激发出来,逐渐形成一条较强的对流回波带,带上对流单体发展旺盛,从 16:30 的雷达拼图(图 3a)可以看出,这条对流回波带上已镶嵌有若干个发展旺盛的超级单体风暴,超级单体中心强度均超过 60 dBz,沿对流回波带所作的反射率因子垂直剖面(图 3b)显示,回波带上对应的多个超级单体风暴顶高伸展至 14～18 km,并呈现出强回波中心(>60 dBz)高悬和回波悬垂结构特征,内部风场中伴有明显的旋转特征——中气旋(图 3c),结合实况可知,这条对流回波带上的多个超级单体先后在苏皖北部交界多处产生冰雹。

另外,距这条强对流回波带东侧约 80 km 处也有一条与之近平行的较窄的回波带(图 3a),结合此时地面风场(图略)发现,东侧回波带是在地面偏东风与东北风之间的弱辐合区中形成的,但与其西侧形成于中尺度低压及相配合的辐合线附近的强回波带相比,无论从地面辐合强度、地面能量储备等条件均弱得多,故东侧回波带强度明显弱于前者,并且其在南移过程中逐渐减弱、断裂与前者相合并,使得回波区范围进一步扩展,强回波带位于回波区的左侧

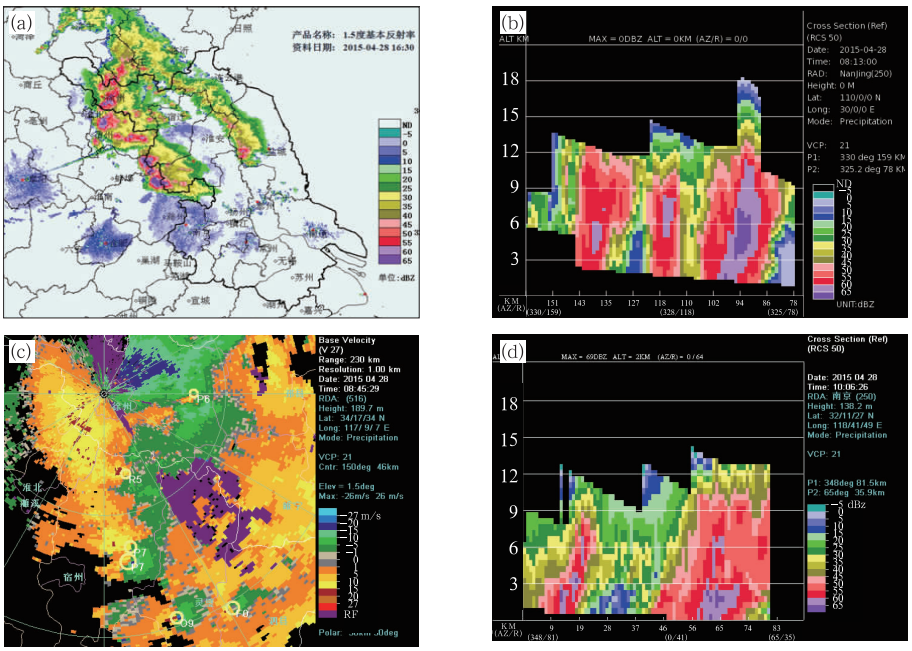


图 3 2015 年 4 月 28 日(a)16:30 基本反射率(1.5°仰角),(b)16:13 反射率因子垂直剖面,(c)16:45 基本速度(1.5°仰角,黄圈为识别的中气旋),(d)18:06 反射率因子垂直剖面

Fig. 3 (a) Base reflectivity at 16:30 BT (at 1.5°elevation), (b) vertical cross-section of base reflectivity at 16:13 BT, (c) base velocity at 16:45 BT (at 1.5°elevation, yellow rings depict mesocycle), (d) vertical cross-section of base reflectivity at 18:06 BT 28 April 2015

边缘,带上的对流风暴发展强盛,并快速向东南方向移动。18:06,强对流回波带前端的超级单体风暴移至南京六合,从此时该超级单体垂直剖面(图 3d)可以看出,对流风暴依旧强盛,风暴顶超过 12 km,但很明显之前高悬的强回波中心已降至地面,与之对应的风暴内部风场中,中低层伴有较深厚的中气旋(图 7d),此时六合出现 50 mm 的大冰雹,并伴有 20 $m \cdot s^{-1}$的雷暴大风。之后,该超级单体风暴继续向东南方向移动,途经仪征、镇江、丹阳、常州、无锡、苏州、吴江,在上述地区接连导致强冰雹,22:00 移入上海,在上海西部地区造成强对流天气,之后逐渐减弱消散。

在该超级单体风暴发展移动过程中,速度场中一直伴有较深厚的中气旋特征、同时探测到三体散射、V 型缺口等大冰雹的典型特征。追溯其生命史发现,该风暴起源于 15:00 蚌埠附近的孤立对流单体,发展非常迅速,期间经历与周边对流单体间的合并、分裂、再发展,16:00 前后发展为超级单体风暴,移动过程中一直维持强盛的对流结构,至 23:30 左右逐渐消散,生命史长达 8～9 h。该超级单体风暴长时间维持,并造成江苏苏南地区的区域性冰雹天气,那么,在其形成、发展和维持过程中其结构特征是如何演变的?

2.2　长生命史超级单体的风暴结构

利用南京站多普勒雷达资料分析该超级单体风暴在形成、发展、维持过程中结构的演变特征。风暴的初始对流源自 15:00 在蚌埠附近生成的孤立对流单体,对流单体发展迅速,1 h 后即发展为超级单体风暴。从雷达识别出该风暴顶高、底高及质心高度演变趋势可以看出(图 4a),超级单体风暴形成于对流层中层,质心较高,并逐渐向下伸展,在其整个生命史中对流发展非常旺盛,风暴单体的最大反射率因子维持在 60 dBz 以上(图略),风暴顶基本维持在 10 km 以上,风暴单体的质心平均高度约 5～6 km。最强盛时,回波强度达 70 dBz,顶高超过 15 km。值得注意的是,尽管超级单体风暴在其生命史的大多时段发展旺盛,无论风暴顶高还是质心高度均维持较高值,但期间仍存在波动,以下三个时间段波动较为清晰:(1)17:47—17:53—18:09;(2)18:39—18:51—19:33;(3)20:39—21:39—21:51。结合天气实况可知,这三段波动正对应对流风暴产生冰雹前后,冰雹出现在质心高度下降期间,几乎接近于质心高度下降区间的最低点(图 4a 中红色箭头)(六合 18:06、丹阳 19:26、吴江 21:40)。与风暴顶高相比较,质心高度的下降趋势更清晰,这或可解释为对流风暴在酝酿至降雹期对流发展旺盛,酝酿期云体垂直尺度相对稳定,降雹期云体垂直尺度的减弱趋势略逊于由于云中较大粒子迅速下降而造成的质心下降。与风暴垂直尺度及质心的变化相对应,从超级单体风暴内部垂直积分液态水含量(VIL)的时间变化中也可清晰地捕捉到冰雹出现时 VIL 迅速下降的征兆,而这一变化与三次质心的明显下降几乎同时,下降之前,VIL 值维持在 60～70 $g \cdot m^{-2}$较高水平震荡。另外,除与质心三次明显下降相对应以外(图 4b中红色箭头),20:27—20:33 VIL 值也出现明显下降(图 4b 中黑色箭头),6 min 内从 58 $g \cdot m^{-2}$降至 30 $g \cdot m^{-2}$,20:33 该对流风暴在句容造成冰雹,对应时刻风暴质心也略有下降,而风暴顶变化不大。

超级单体风暴是一准静稳态的风暴系统,其内部风场及由此衍生的动力结构的高度组织化是其能够强烈发展并较长时间维持的主要原因之一。18:06,六合出现了直径 50 mm 的冰雹,此时沿该超级单体风暴径向的速度垂直剖面显示,风暴内部中层(3～6 km)为较深厚的辐合区,从径向流入与流出气流的垂直分布来看,辐合中心位于 3 km 附近,此高度上紧邻的径向流入/流出速度分别对应±15 $m \cdot s^{-1}$,3 km 以下的低层风场则以径向流入气流为主要特征,从气流的分布与风暴相对位置来看,风暴低层伴有一支较强的暖湿入流,对应明显的辐合区。风暴高层至顶部(9～15 km)为流出气流,风暴高层至顶部风场中辐散特征非常显著。此时风暴底部伴有径向风速超过 20 $m \cdot s^{-1}$的大风区出现,对流风暴顶部强烈的抽吸作用增强了风暴底层入流气流,导致六合附近大风的出现。利用多普勒天气雷达径向速度反演雹暴系统进入雷达站 30 km 半径前不同高度的平均散度和平均垂直速度(徐芬等,2007)。从反演得到的风暴移经前周边环境平均的散度场(图 4d)和垂直速度场(图略)的演变来看,16:30 开始,低层辐合逐渐发展,30 min 后中高层辐散也明显增强,相应地,上升运动随之增强,17:00—18:00 高低层散度场反位向增长至最大,17:40,风暴附近平均垂直速度也达到最大,此时风暴发展至最强盛期,之后上升运动有所减弱,约20 min 后,超级单体在六合产生了大冰雹。

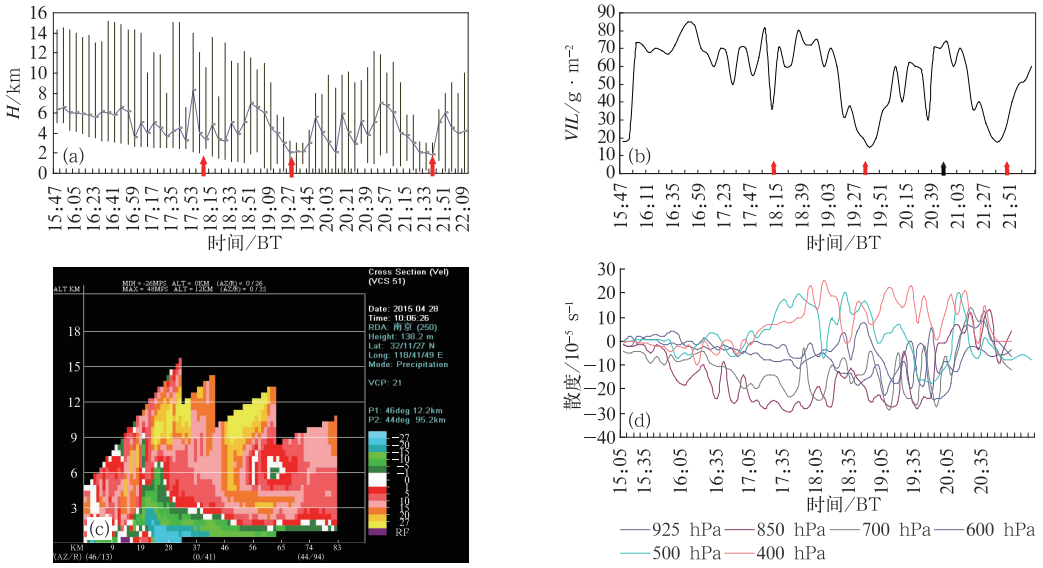


图 4 超级单体风暴结构演变

(a)风暴底高、顶高(柱状)及质心高度(曲线)时间变化,(b)垂直积分液态水含量时间变化,(c)18:06 速度径向垂直剖面,(d)散度时间变化

Fig. 4 The variation of storm structure

(a) temporal evolution of the bottom and top heights (column) and mass center height (curve), (b) temporal evolution of vertically integrated liquid water content, (c) radial vertical cross-section of base velocity at 18:06 BT, (d) temporal evolution of divergence in storm

超级单体风暴移经前,周边环境高低层的平均散度场反位向增长,有利于移入风暴进一步发展。期间结合雷达探测资料所反映的对流风暴内部风场的演变(图略)可知,不同高度上散度场如此变化一定程度上有利于风暴内上升运动和风暴低层的入流气流的增强,使低层较丰富的水汽向风暴内输送并随上升气流进一步上输,促进了风暴云体的垂直增长和强烈发展,这一过程出现在超级单体风暴的发展酝酿期,降雹期间则对应超级单体风暴的减弱。但值得注意的是,在这个超级单体风暴发展演变过程中,即使当强冰雹降落、对流能量迅速释放时,超级单体风暴仅仅经历了短暂减弱,其内部环流并未崩溃,且此后再度发展并在相当长的一段时间内维持,接连产生了冰雹,那么该超级单体风暴何以能够较长时间维持?

3 超级单体触发与维持机制

3.1 超级单体的形成和传播

从地面风场和雷达回波的叠加图可以看出,超级单体风暴的发生发展与地面中尺度低压密切相关。28 日上午,地面上,鲁苏皖交界处维持一中尺度低压,对应地面风场中闭合的气旋性环流。午后(图 5a),中尺度低压内开始有零散对流单体形成,同时在由该低压中心向南伸展的辐合线附近也不断有对流单体生成,对流发展迅速,很快沿辐合线形成南北向的强对流回波带(图 5b),带上有若干发展旺盛的对流风暴,这些对流风暴大多发展为内部蕴含有深厚中气旋的超级单体风暴。值得关注的是,15:00 前后形成于蚌埠附近一孤立的小尺度对流单体,很快并入这条强对流回波带,位于回波带最南端,该单体正是未来强烈发展并在江苏苏南地区产生一系列强冰雹的长生命史超级单体风暴。在对流层中层涡后西北气流的引导下,地面中尺度低压、与之相伴随的辐合线及其上的对流风暴迅速向东南方向移动。18:00 前后(图 5c),位于对流回波带最南端的超级单体风暴进入南京北部六合境内,产生大冰雹和雷暴大风天气,之后继续向东南方向移动(图 5d),期间该超级单体风暴对流旺盛,接连在苏南地区造成冰雹和雷暴大风天气。

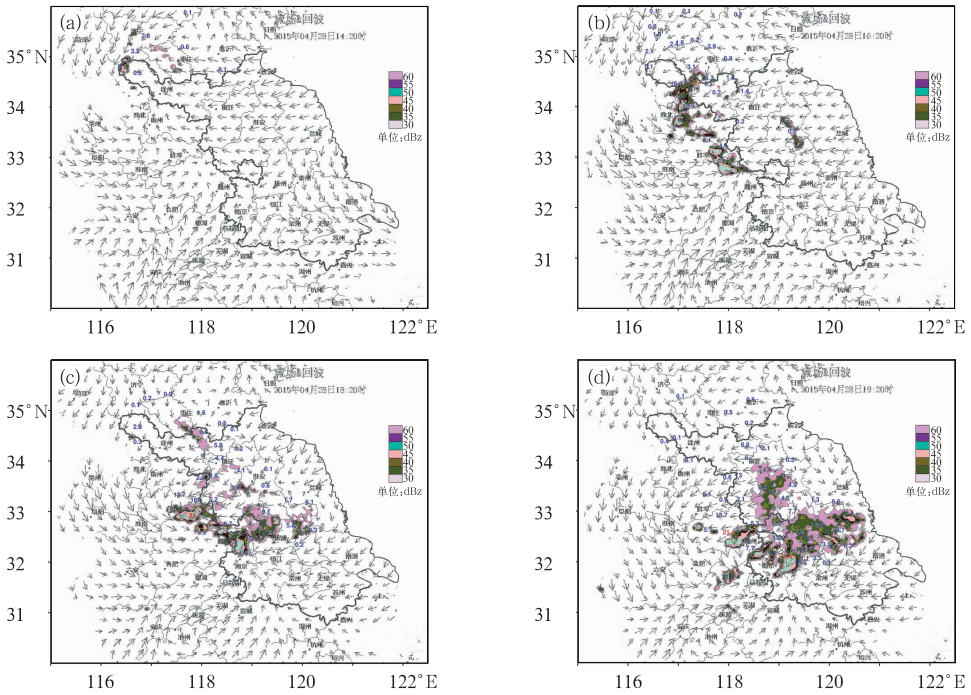


图 5　2015 年 4 月 28 日(a)14:20,(b)16:20,(c)18:20,(d)19:20 地面风场(自动站)与反射率因子(1.5°仰角)演变

Fig. 5　The variation of surface wind (automatic weather station) and base reflectivity (at 1.5° elevation) on 28 April 2015 (a) 14:20 BT, (b) 16:20 BT, (c) 18:20 BT, (d) 19:20 BT

3.2　维持机制

3.2.1　不稳定层结的维持和发展

中尺度低压附近产生的对流风暴为何能较长时间维持且在移动过程中接连产生冰雹天气？它所依存的热力环境如何演变？从 28 日 16 时的地面假相当位温的分布(图 6a)可以看出，此时江苏东北部是 θ_{se} 相对低值区(θ_{se}＜330 K)，而江苏西部、南部及安徽境内地面呈现明显的高温高湿特征(θ_{se}＞335 K)，θ_{se} 中心位于安徽中部，中心值超过 345 K，苏皖中北部交界处则是 θ_{se} 锋区所在处，午后形成的强对流回波带是在中尺度低压及辐合线上产生的，此处恰与 θ_{se} 锋区相对应，锋面抬升作用促进对流的强烈发展。午后对流层中层冷涡后部有冷平流补充南下，加之近地面气温回升，导致苏皖地区中低层不稳定层结进一步发展，沿 119°E 的假相当位温的垂直剖面图(图 6b)显示，14 时苏皖地区(30°～34°N)近地面处于较暖湿的环境中，900 hPa 以下 θ_{se} 超过 330 K，θ_{se} 随高度呈递减特征，对流层中层 700 hPa 附近出现一中心值为 316 K 低值区，这一低值区与冷涡后部的偏北风急流相对应(图略)，这意味着对流层中层冷涡后部干冷空气的补充南下促进了不稳定层结的发展。

超级单体风暴进入苏皖南部能较长时间的维持与其所处的环境密切相关。通过分析苏皖南部各层平均的对流稳定度的演变(图 6c)来了解超级单体风暴未来移经环境中不同层次大气对流稳定度的变化差异。28 日 08 时，对流层低层(1000～700 hPa)大气已经具有对流不稳定特征，此时，中层 700～500 hPa 层结则相对稳定，午后受涡后冷平流影响，使苏皖南部对流层中层逐渐由稳定层结转为条件性不稳定层结，而低层大气依旧维持不稳定特征，从而导致该地区大气层结不稳定进一步发展，为强对流天气的产生提供了有利的不稳定环境。20 时，对流层低层的对流稳定度呈现逐渐趋稳特征，特别是边界层内(1000～850 hPa)趋稳特征较为明显。值得关注的是，对流层中层 700～600 hPa 不稳定层结仍在发展，一定程度上减缓大气层结的趋稳现象，这使得超级单体风暴能够继续移行在不稳定环境中，不断获取对流能量而得以较长时间的维持和发展。与其他层次有所不同，20 时苏皖南部对流层中层(700～600 hPa)不稳定层结仍在继续发展，原因何在？

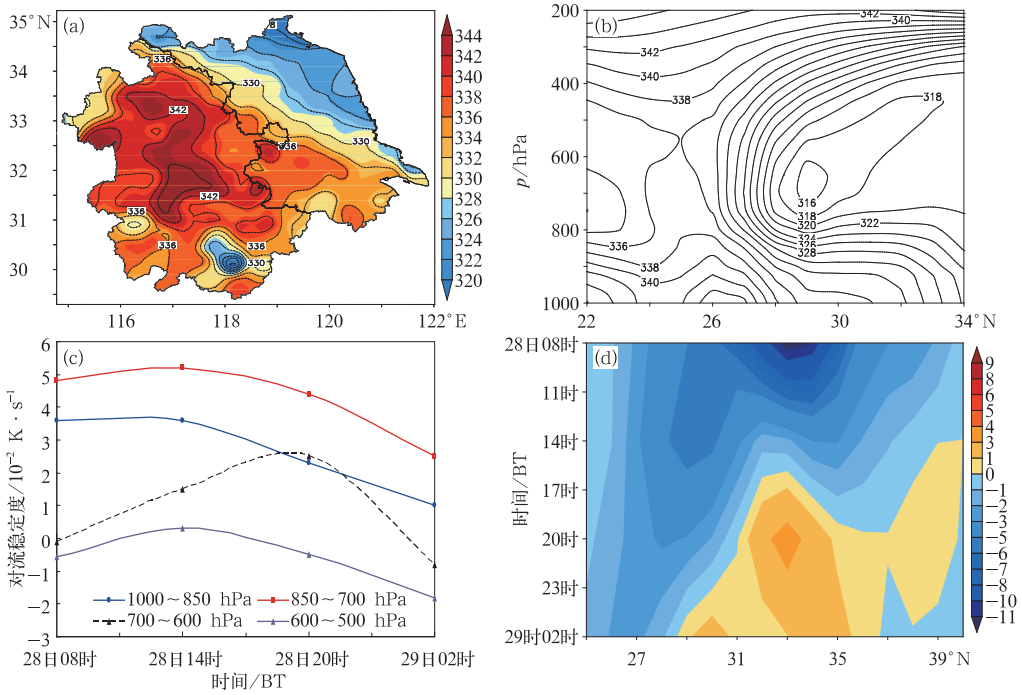


图 6 2015 年 4 月 28 日(a)16:00 地面假相当位温(单位:K),(b)14:00 沿 119°E 假相当位温 θ_{se} 垂直剖面(单位:K),(c)各层区域平均(31°～32°N、118°～121°E)对流稳定度时间变化,(d)沿 119°E 600 hPa 温度平流时间变化(单位:10^{-5} ℃·s^{-1})

Fig. 6 (a) Surface potential pseudo-equivalent temperatureat 16:00 BT (unit: K), (b) vertical section of potential pseudo-equivalent temperature along 119°E at 14:00 BT (unit: K), (c) temporal evolution of averaged covection stability over 31°—32°N and 118°—121°E for all levels, (d) temporal evolution of temperature advection along 119°E at 600 hPa (unit: 10^{-5} ℃·s^{-1}) on 28 April 2015

此时对流层中层冷涡后部偏北风增强并向南扩展,使苏皖南部中上层仍受冷平流影响,从各层的温度平流的变化来看,600 hPa 的冷平流略大于其他层次,该层上沿 119°E 的温度平流时间演变(图 6d)图显示,28 日 08—14 时,江淮及以南地区均为冷平流区,14 时,对流发生区附近逐渐开始出现暖平流,这可能与对流发展过程中的潜热释放有关,冷平流区随时间推移逐渐向南扩展。20 时,冷平流区主要位于 31°N 及以南的苏南地区,中层持续的冷平流正是该地区大气层结不稳定的维持或重建的原因之一。

3.2.2 深厚的强垂直风切变及风暴内部旋转特征的维持

强的深层垂直风切变有助于形成有组织的长生命史对流风暴系统。图 7a 是 28 日 14 时 0～6 km 垂直风切变的分布,图中显示,在冷涡后部西北气流控制下黄淮及江淮西部正对应一中心值为 20 m·s^{-1}的垂直风切变大值区,较强的垂直风切变环境将会促进午后在这一地区激发出对流风暴组织化的发展。随着冷涡逐渐南掉,涡后一支西北急流增强并进一步向南伸展。20 时(图 7b),垂直风切变大值区南压至苏皖南部,切变值增大,中心超过了 24 m·s^{-1}。强垂直风切变环境有利于水平涡度发展,当上升气流分布不均匀时,一定程度上将导致水平涡度向垂直涡度转换,有利于风暴内部的涡度迅速发展(Markowski and Richardson,2010),因而使移动在此间的风暴内部环流旋转性增强、结构更紧密、更有组织并能够持久。

超级单体风暴移动发展过程中的风场结构显示(图略),在强垂直风切变环境中,风暴内出现明显旋转特征,水平旋转气流的存在将有助于维持风暴内上升气流和下沉气流共存的稳定状态,并使风暴获得进一步发展。18:06,超级单体风暴在六合产生大冰雹,此时风暴内部伴有明显中气旋(图 7c),从风场的垂直剖面图上(图7d)可以看出,强垂直风切变

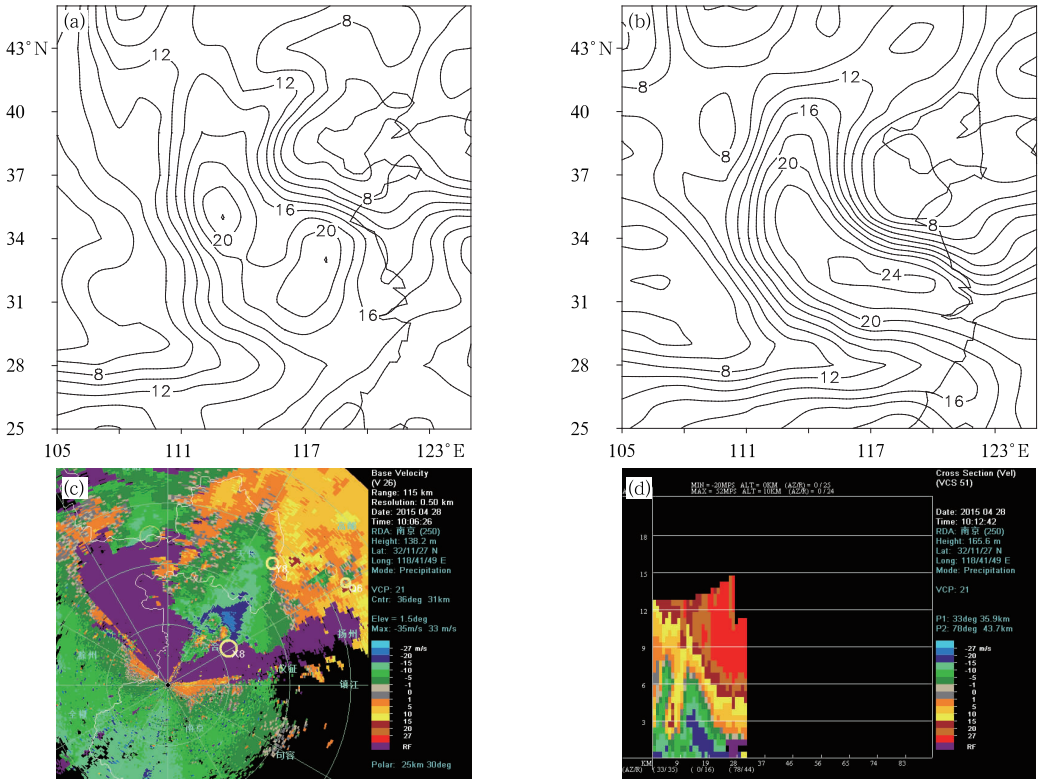


图 7　2015 年 4 月 28 日(a)14:00 和(b)20:00 0～6 km 风垂直切变(单位：m·s^{-1})，(c)18:06 基本速度(1.5°仰角，黄圈为识别的中气旋)，(d)18:06 速度切向垂直剖面

Fig. 7　Vertical wind shear from surface to 6 km heght at (a) 14:00 BT and (b) 20:00 BT (unit: m·s^{-1}), (c) base velocity at 18:06 BT (at 1.5° elevation, yellow rings depict mesocycle), (d) tangential vertical section of base velocity at 18:06 BT on 28 April 2015

的存在，增强了风暴底层的相对入流，使得边界层内出现一支强盛的暖湿气流进入风暴内部，并沿上升气流向上输送，风暴中层 3 km 附近，开始出现径向流出气流，至 6 km，风暴内径向流出与流入气流一直相伴随，如此气流分布结构不但加大了对流层中层的辐合强度，而且导致风暴中层出现显著的旋转特征，最强的旋转位于 3 km 附近，强于低层旋转，这也是对流风暴成熟阶段的特征之一。从雷达识别的中气旋结构相关参数可知，此时中气旋中层切变值达 21×10^{-3} s^{-1}，中气旋直径约为 4.5 km，深度由 2.8 km 伸展至 7.1 km。上述分析可知，超级单体风暴移动过程中，其内部风场中始终与中气旋相伴随(图略)，水平旋转气流将使强旋转区产生较大负压并因此形成向上和向下的垂直气压梯度力，进而导致风暴中流场结构高度组织化，同时能部分抵偿降水物拖曳作用，使超级单体风暴能维持稳定结构并具有较长生命史。

4　结论与讨论

通过对冷涡背景下一次长生命史超级单体的成因与维持机制的分析和探讨，得到以下结论：

(1) 此次强对流天气发生在冷涡背景下，涡后偏北气流加强并携冷空气南下，增强了对流层中低层垂直风切变，促进了不稳定层结的发展，为强对流天气的发生提供了有利的环境。地面上中尺度低压及与之伴随的辐合线是对流风暴的触发机制之一。

(2) 长生命史超级单体风暴起源于对流层中层，在其生命史的大多时段对流发展非常旺盛，风暴质心平均高度约 5～6 km。冰雹出现前后，风暴顶高、质心高度呈现明显波动特征，冰雹出现在对流风暴顶高及质心高度迅速下降阶段，与风暴顶高相比较，质心高度下降趋势更清晰。

(3) 长生命史超级单体风暴内具有高度组织化

的动力结构：风暴内具有显著的旋转特征——伴随有一定伸展厚度的中气旋，其中风暴发展强盛阶段，中层旋转最为明显。风暴中层及以下对应较深厚的辐合区，风暴顶则表现出明显的辐散特征，这在一定程度上促进了风暴内上升运动和风暴低层暖湿入流的强度，有利于低层较丰富的水汽向风暴内输送并导致对流风暴的垂直增长和强烈发展。

（4）对流层中层涡后冷平流的持续及向南推进有利于超级单体风暴未来移经环境中不稳定层结的维持和发展，涡后偏北风增强并向风暴移动下游区扩展，促进了风暴移动下游区垂直风切变的增强，为超级单体风暴的维持发展提供了有利的热动力环境。在强垂直风切变环境中，对流风暴内部风场维持明显旋转特征，产生扰动垂直气压梯度力，进而导致风暴中流场结构高度组织化，使超级单体风暴能维持稳定结构并具有较长生命。

本文针对导致区域性冰雹的长生命史超级单体风暴内部结构演变特征、形成维持机制进行了分析，得到一些认识。超级单体风暴能够较长时间维持，一方面取决于其未来将移经的热动力环境（如大气不稳定层结、强垂直风切变环境能够继续维持或发展），另一方面也与风暴内部结构的演变紧密相关（特别是风暴内部旋转特征及旋转强度能否维持），以上两方面应是预报中我们考虑对流风暴未来发展趋势的关注点。当然，由于超级单体风暴形成及发展有诸多影响因子，各影响因子间的相互作用及贡献差异目前尚未明确，因而文中针对个例研究所得的结论，还需大量的工作加以验证和进一步深入。

参考文献

陈明轩，王迎春，肖现，等，2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析[J]. 大气科学，36(5)：929-944.

陈秋萍，陈齐川，冯晋勤，等，2015. “2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J]. 气象，41(1)：25-33.

刁秀广，杨传凤，李静，等，2011. 济南地区超级单体强度和流场结构分析[J]. 高原气象，30(2)：489-497.

冯晋勤，俞小鼎，傅伟辉，等，2012. 2010年福建一次早春强降雹超级单体风暴对比分析[J]. 高原气象，31(1)：239-250.

吴芳芳，俞小鼎，张志刚，等，2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报，71(2)：209-227.

伍志方，庞古乾，贺汉青，等，2014. 2012年4月广东左移和飚线内超级单体的环境条件和结构对比分析[J]. 气象，40(6)：655-667.

徐芬，夏文梅，吴蕾，等，2007. 多普勒天气雷达速度PPI图散度分布信息提取[J]. 气象，33(11)：21-27.

俞小鼎，2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象，40(6)：649-654.

俞小鼎，郑媛媛，廖玉芳，等，2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学，32(3)：508-522.

曾明剑，吴海英，王晓峰，等，2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象，42(3)：280-293.

张一平，俞小鼎，吴蓁，等，2012. 区域性暴雨过程中两次龙卷风事件分析[J]. 气象学报，70(5)：961-973.

郑媛媛，朱红芳，方翔，等，2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象，28(3)：617-625.

周后福，刁秀广，夏文梅，等，2014. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J]. 气象学报，72(2)：306-317.

朱江山，刘娟，边智，等，2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J]. 气象，41(2)：182-191.

Brooks E M，1949. The tornado cyclone[J]. Weatherwise，2：32-33.

Browning K A，1962. Cellular st ructures of convective storms[J]. Meteor Mag，91：341-350.

Browning K A，1978. The structure and mechanisms of hailstorms[J]. Meteor Monogr，38：1-36.

Browning K A，Donaldson R J，1963. Airflow and structure of atornadic storm[J]. J Atmos Sci，20：533-545.

Donaldson R J Jr，1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor，9：661-670.

Markowski P，Richardson Y，2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. USA：Wiley-Blackwell：21-23.