

尹丽云,梅寒,张腾飞,等,2021. 云南中部一次出现多个超级单体雹暴的强对流过程环境场和雷达回波特征[J]. 气象,47(4): 424-438. Yin L Y, Mei H, Zhang T F, et al, 2021. Environmental conditions and radar characteristics of a severe convective hailstorm with multiple supercells in central Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4): 424-438 (in Chinese).

云南中部一次出现多个超级单体雹暴的 强对流过程环境场和雷达回波特征^{*}

尹丽云¹ 梅 寒¹ 张腾飞¹ 孙 玲¹ 金文杰¹ 成佳丽²

¹ 云南省人工影响天气中心, 昆明 650034

² 云南省曲靖市气象局, 曲靖 655000

提 要: 利用常规观测、地面加密自动站、多普勒天气雷达、NCEP(1°×1°)逐 6 h 再分析资料对 2017 年 8 月 23 日云南中部地区一次强对流风暴的环境参数和雷达回波特征进行分析, 结果表明: 此次强对流风暴发生在台风低压前侧、中高纬冷槽后部的强不稳定层结背景下, 地面辐合线和强垂直风切变有利于对流风暴的维持和加强。强对流风暴受地形影响较为明显, 共激发形成 6 个超级单体或类超级单体, 在超级单体发展成熟前 10 min, 3 个降雹超级单体强中心沿地形爬升, 未降雹和小雹超级单体沿地形下降。6 个超级单体或类超级单体呈现出中气旋或 γ 中尺度弱涡旋特征, 最大速度对转动值超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时出现不同程度冰雹, 冰雹直径 $>15 \text{ mm}$ 的超级单体在 $2.4^\circ \sim 3.4^\circ$ 仰角上径向速度值达到中气旋标准, 冰雹直径为 $15 \sim 20 \text{ mm}$ 的超级单体反射率因子质心点较高, 回波核前倾, 具有悬垂回波、弱回波区、回波墙和三体散射特征, 其零速度线后倾, 辐合区高度超过 -10°C 层, 顶部为强辐散区, $-20 \sim 0^\circ\text{C}$ 层回波最大强度超过 55 dBz , 50 dBz 回波厚度 $>6 \text{ km}$, 垂直累积液态水含量 (VIL) 密度 $>2.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冰雹直径 $5 \sim 8 \text{ mm}$ 和未降雹超级单体回波核直立, 悬垂回波特征不显著, 辐合区高度偏低, 辐散区厚度大于辐合区厚度, 不同等温层回波强度差别小, 但 50 dBz 回波厚度 $<6 \text{ km}$, VIL 密度 $<2.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

关键词: 超级单体, 冰雹, TBSS, 中气旋, VIL 密度

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.004

Environmental Conditions and Radar Characteristics of a Severe Convective Hailstorm with Multiple Supercells in Central Yunnan Province

YIN Liyun¹ MEI Han¹ ZHANG Tengfei¹ SUN Ling¹ JIN Wenjie¹ CHENG Jiali²

¹ Yunnan Weather Modification Center, Kunming 650034

² Qujing Meteorological Office of Yunnan Province, Qujing 655000

Abstract: The evolution characteristics of radar echo and environmental parameters of the severe convective storm in central Yunnan on 23 August 2017 are analyzed using conventional observation data, automatic weather station data, Doppler radar data, NCEP ($1^\circ \times 1^\circ$) 6 h reanalysis data. The main conclusions are as follows. This severe convective storm occurred under the background of strong unstable conditions caused by the front side of typhoon depression system moving westward and the rear side of mid and high latitude cold trough. Surface convergence lines and strong vertical wind shear were conducive to the maintenance and enhancement of convective storms. The severe convective storms were influenced significantly by the topography and six supercells or similar supercells were induced during the evolution of convective storms. The strong centers of three hail supercells climbed along the terrain, while the non-hail and small hail

^{*} 国家自然科学基金项目(41265001)、云南省科技惠民专项(2016RA096)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-109)共同资助

2020 年 5 月 9 日收稿; 2021 年 1 月 25 日收修定稿

第一作者: 尹丽云, 主要从事灾害性天气预警预报方法研究. E-mail: xiaoyuyly@163.com

supercells descended along the terrain 10 minutes before the supercells developed to maturity. The six supercells or similar supercells had characteristics of mesocyclone or meso- γ scale vortex. Hails occurred when the maximum velocity to rotation value in the supercell exceeded $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The velocity at elevation $2.4^\circ - 3.4^\circ$ reached the mesocyclone standard when the diameter of hails was bigger than 15 mm. There were the characteristics of higher reflectivity centroid point, echo nuclear tilting forward, weak echo zone, the echo wall and three-body scatter for supercells with 15–20 mm hail particles. In addition, the radial velocity showed the following characteristics. The zero velocity line tilted back, the height of the convergence zone exceeded -10°C layers of supercooled water zone, a strong divergence zone appeared at the top, the maximum echo intensity of the $-20-0^\circ\text{C}$ layer exceeded 55 dBz, the thickness of the 50 dBz echo was more than 6 km, and the density of vertically accumulated liquid water content (VIL) was larger than $2.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. The echo nuclear shows an upright shape, the characteristics of overhanging echoes were not significant, the height of the convergence zone was low and the thickness of the divergence zone was higher than that of the convergence zone, for supercells of non-hail and 5–8 mm small hail particles. The maximum echo intensity of different isothermal layers showed little difference, but the 50 dBz echo thickness was less than 6 km, and the VIL density was less than $2.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Key words: supercell, hail, TBSS, mesocyclone, VIL density

引言

超级单体风暴是所有对流风暴中组织化程度最高、发展最强烈、生命史最长的孤立深对流风暴, Browning(1962)首先提出超级单体的雷达反射率因子特征如钩状回波、中空弱回波区、有界弱回波区等。Donaldson(1970)提出了超级单体“龙卷气旋”的旋转性特征,俞小鼎等(2006)研究指出,风暴中上升运动与环境风垂直切变的相互作用可以产生稳定旋转,加强风暴中的垂直涡度,导致风暴中形成深厚的中尺度气旋。在用雷达探测出现大冰雹的超级单体时, Wilson and Reum(1988)、Zrnić(1987)等研究发现大冰雹粒子对雷达波束的非瑞利散射会造成虚假回波, Lemon(1998)将此现象定义为“三体散射长钉”(TBSS),并通过对一系列大冰雹过程 TBSS 的研究,认为 TBSS 是探测大冰雹的充分但非必要条件。对不同地区超级单体风暴过程的物理量特征进行研究发现,水汽条件、不稳定条件、垂直风切变和中尺度抬升机制等关键因素的变化是超级单体强对流天气发生发展的重要条件(Weisman and Rotunno, 2000; 张桂莲等, 2018; 朱江山等, 2015; 曾明剑等, 2016)。俞小鼎等(2008)、郑媛媛等(2009)、胡胜等(2006)、潘玉洁等(2008)、刁秀广等(2008)、张一平等(2012)、戴建华等(2012)、周后福等(2014)、王易等(2019)、杨波等(2019)、张玉洁等(2019)在多普

勒雷达回波上针对超级单体的旋转特征、雷达反射率特征等开展了深入研究。强对流天气预报业务中常把雷达回波上出现 TBSS、垂直积分液态水含量(VIL)跃增、中气旋、垂直剖面的有界弱回波区、悬垂回波、回波墙作为大冰雹的预警指标(朱敏华等, 2006; 廖玉芳等, 2007; 赵俊荣等, 2011; 冯晋勤等, 2012; 郑艳等, 2014; 陈秋萍等, 2015)。超级单体的中气旋一般表现为气旋式辐合, 但不同移动路径的超级单体风暴中气旋出现的位置和特征有显著差异, 左移超级单体风暴的中气旋呈反气旋式辐合特征, 弱回波区和旁瓣回波及强回波中心位于移动方向左侧(伍志方等, 2014; 付双喜等, 2014)。不同地区超级单体风暴的移动路径、演变、中气旋、TBSS 特征及强对流天气也有显著差异(汪应琼等, 2013; 牛奔等, 2016; 赵桂香等, 2017; 翟丽萍等, 2018; 赵庆云等, 2017), 如何炳伟等(2018)对常德强雹暴三体散射统计分析发现, 反射率因子强度越强, 越易产生 TBSS, 风暴相对雷达位置和移动方向影响 TBSS。

云南地形复杂, 强对流天气较多(尹丽云等, 2010; 2012; 张腾飞等, 2006; 2013), 夏季台风低压减弱西行为云南出现超级单体强对流天气形势之一(张杰和张腾飞, 2019), 云南超级单体雷达回波特征的已有研究中多为回波强度、回波高度的演变分析, 对多次降雹的超级单体风暴长时间维持中气旋、TBSS 特征的研究相对较少。本文结合物理量场和多普勒天气雷达资料, 对 2017 年 8 月 23 日发生在

滇中地区的一次台风低压西行出现多个超级单体的强对流风暴多普勒雷达回波演变特征进行深入分析,探讨云南超级单体风暴的 TBSS、雷达回波垂直结构等特征,为冰雹强对流的预警预报提供科学依据。

1 资料及数据

雷达资料取自昆明雷达站的 CINRAD/CC 多普勒雷达,雷达波长为 5 cm,天线海拔高度为 2515 m,扫描半径为 150 km,资料为连续 VPPI 观测,数据平均间隔时间为 6 min,每个 VPPI 资料共 14 层;冰雹资料取自云南省气象灾情直报系统、天气形势场资料来自 MICAPS 客观分析场资料、FNL 1°×1°全球再分析资料来自美国国家环境预报中心(NECP)/美国国家大气研究中心(NCAR),地形数据来自于 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)航天飞机雷达地形测图任务得到的数字地形高程模型(DEM)的 SRTM3 数据,其空间分辨率为 3 s,高程基准为 EGM96 的大地水准面,平面基准为 WGS84,标称绝对高程精度为±16 m,绝对平面精度为±20 m。

2 天气实况、环流形势和物理量特征

2.1 天气实况

2017年8月23日11—16时(北京时,下同),受

第 13 号台风天鸽减弱西行影响,云南中部多个中尺度对流系统(MCS)自东向西移动过程中,玉溪市的红塔区、峨山、通海、新平、元江和红河石屏县的部分乡镇先后遭受雷电、暴雨、大风和冰雹灾害袭击(图 1,表 1),从区域自动站资料显示,12:50—15:45 共有 13 个测站监测到 6 级以上大风,峨山自动站于 13:42 出现 $21.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 9 级大风,通海自动站于 14:12 出现 $20.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 8 级大风。短时强降水主要出现在 12—16 时,玉溪自动站 13—14 时的小时雨量为 32 mm,通海高大站 14—15 时的小时雨量为 38.5 mm,石屏县牛街站 15—16 时小时雨量

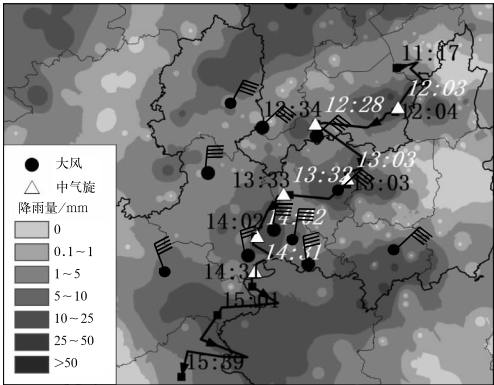


图 1 2017 年 8 月 23 日 11—16 时云南中部强对流风暴移动路径和强对流天气实况
(阴影为降水,三角为中气旋,圆点为 $>17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风)
Fig.1 Moving path of severe convective storm and distribution of severe convective weather in central Yunnan in 11:00—16:00 BT 16 August 2017
(shaded: precipitation, triangle: mesocyclone, dot: wind speed $>17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

表 1 2017 年 8 月 23 日强对流风暴过境出现降水、大风、冰雹站点及时间

Table 1 Stations and time chart of precipitation, strong wind, hail during the severe convective storm on 23 August 2017

自动站	极大风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	大风时间/BT	降水/mm	冰雹持续时间/BT	冰雹直径/mm
黄草坝烤烟站	11.0	12:50	20.9		
玉溪自动站	16.5	13:05	44.1	13:00—13:12	15
峨山自动站	21.1	13:42	16.1	13:44—14:15	20
丫勒站	12.7	13:58	2.3		
塔甸站	13.2	13:58	13.6		
骆子菁交通站	13.3	14:02	10.5		
通海高大站	20.3	14:12	38.6	14:31—14:37	5
新平自动站	14.3	14:31	6.1		
杨武交通站	13.8	14:34	24.9		
磨盘山站	14.9	14:43	23		
青龙厂站	12.3	14:49	24.3		
石屏牛街站	19.6	15:00	47.1	15:01—15:17	8
元江交通站	14.9	15:45	23.7		

为 47.1 mm。4 个站点监测到直径 8 mm 以上的冰雹,红塔区小石桥乡、峨山双江街道、通海县高大乡、石屏牛街镇分别在 13:00—13:12、13:44—14:15、14:31—14:37 和 15:01—15:17 出现直径为 5~20 mm 冰雹。此次强对流过程共导致 7 个县、区农作物受灾面积为 42.19 km²,其中烤烟受灾面积为 25.64 km²,直接经济损失为 1.2 亿元。

2.2 环流形势

导致此次超级单体发生的大尺度环流形势为“天鸽”减弱为热带低压,沿副热带高压(以下简称副高)南侧西行,沿地形爬升形成强烈不稳定层结,高层弱冷空气渗透,中低层低压北侧偏东气流流向云南输送高温高湿能量所致。利用 NECP(1°×1°)逐 6 h 再分析资料对此次强对流过程分析可见,2017 年 8 月 23 日 08 时(图 2a)500 hPa“天鸽”减弱为热带低压,沿 25°N 副高脊线(588 dagpm)南侧向西移动,台风低压倒槽明显,贵州—云南东部存在东风急流,急流出口区位于广西、贵州西部和云南东部地区,40°N 以北中高纬横槽缓慢东移,槽后冷空气南下不明显,700 hPa 上云南大部地区为副高脊线(588 dagpm)控制,以偏东风为主,850 和 500 hPa 温度差($T_{850-500}$)小于 26℃,中低层环境温度垂直递减率小,条件静力不稳定性小,不利于强对流天气的发生

(吴芳芳等,2013)。23 日 14 时(图 2b)热低压中心西移至 24°N、112°E,倒槽向广西西南部—云南中部西伸明显,东风急流加强,急流出口区位于云南中南部地区,在云南玉溪、昆明形成明显风速辐合,700 hPa 上滇中地区相对湿度由 08 时的 70% 增加至 90%(图略),表明随着热带低压不断西行,偏东气流输送的水汽不断向云南中部汇聚。同时副高减弱东退,横槽在逐渐东移过程中转竖,槽后偏北气流携带了部分弱冷空气南下,从 14 时的 $T_{850-500}$ 变化可以明显看到, $T_{850-500} \geq 28^\circ\text{C}$ 的范围呈舌状向南延伸至台风低压前侧, $T_{850-500}$ 大值中心与急流出口区基本重合,温度垂直递减率加大。许爱华等(2014)研究指出,上干冷、下暖湿的不稳定层结导致低层气层增温增湿明显,与上层的温、湿度差越来越大,大气温、湿度垂直递减率增加,低层空气负浮力增强,容易出现冰雹、大风等强对流天气。14 时高层南下的弱冷空气和中低层台风低压前侧偏东急流带来的暖湿气流刚好形成上干冷、下暖湿的结构配置,有利于不稳定层结和对流天气的发生发展。

可见减弱的热带低压在沿副高南侧西行中,低压前侧东北急流与不断南下的中高纬槽后冷空气形成强烈不稳定,激发的强对流沿副高 588 dagpm 脊线向西南方向移动,受地形影响强对流单体生消频繁,出现多次冰雹强对流过程。

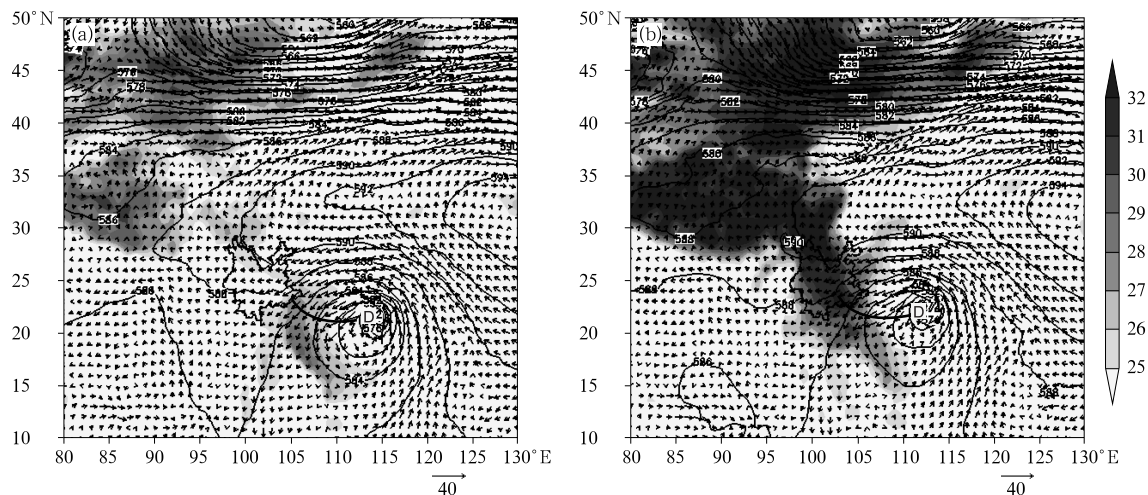


图 2 2017 年 8 月 23 日 08 时(a)、14 时(b)环流形势综合配置

(粗黑实线为低压倒槽线;黑色实线为 500 hPa 高度场,单位: dagpm;

箭头为 700 hPa 风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;阴影为 $T_{850-500}$,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 2 Comprehensive configurations of weather circulation situation at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 23 August 2017

(Black thick solid line is the trough of typhoon depression; black solid line is the height field at 500 hPa, unit: dagpm; vector is the wind field at 700 hPa, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; the shaded is $T_{850-500}$, unit: $^\circ\text{C}$)

2.3 物理量特征

强对流过程中的水汽和凝结核要形成大冰雹粒子,必须具备以下三个环境条件:较强的不稳定层结、中低层一定的水汽条件和强烈的抬升动力条件(俞小鼎等,2006)。在抬升运动和不稳定层结条件下,水汽和凝结核在过冷水层循环增长,霰粒子通过碰并、淞附作用增长为大冰雹粒子,同时水平风垂直切变有利于抬升低空水平涡度、加强螺旋度和辐合强度,从而加强超级单体中的垂直涡旋,水平风场垂直切变的大小决定了强对流的组织程度和生命史(Goodman et al,1988)。

图 3 为沿 24.36°N 、 102.6°E (强冰雹出现区域)的物理量特征场时间-高度剖面图,2017 年 8 月 22 日 14 时,由于中高纬横槽在东移过程中逐渐转竖,引导槽后干冷空气南下, θ_{se} 冷舌稳定维持在 $200\sim 600\text{ hPa}$ 中高层并不断向南向低层渗透,形成相对湿度 $<60\%$ 的深厚干冷层,8 月 23 日 08 时冷空气势力达到最强,340 K 冷中心向低层延伸至 700 hPa 附近,同时热带低压不断西行向云南中部推进,前侧偏东急流带来的暖湿空气势力逐渐加强,23 日 08 时, 102.6°E 以东为深厚偏东气流控制,冷、暖两股气流开始在 24.36°N 、 102.6°E 附近区域交汇,23 日 14 时,干冷空气和暖湿空气势力相当,从叠加的风场看(图 3a),深厚的暖湿空气在西推过程中不断迫使干冷空气爬升,形成上干冷(低能低湿)下暖湿(高能高湿)的不稳定层结特征,假相当位温垂直递减率明显加大,有利于冰雹、大风和雷暴等强对流天气的

发生。垂直风场上(图 3b),从 8 月 23 日 02 时开始, 24.36°N 、 102.6°E 上空中层由于干冷空气入侵, $500\sim 300\text{ hPa}$ 形成明显的下沉运动,下沉速度最大值达 $4.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。23 日 08 时偏东急流逐渐西推至 102.6°E 附近,冷暖气流开始交汇形成抬升运动, $700\sim 400\text{ hPa}$ 开始转为上升运动,14 时抬升运动明显加剧,上升速度最大值达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。8 月 23 日 08 时(图 4a)云南大部地区 K 指数 $<36^{\circ}\text{C}$,中部及以北地区 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变为 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,达到强垂直风切变标准。农孟松等(2011)研究指出强垂直风切变有利于对流风暴的维持、加强并影响其移动路径。地面 10 m 风场上,风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏东气流影响云南中部地区,表明暖湿气流开始从低层向西推进,700 hPa 上水汽在云南中部及以东地区形成明显辐合,此时水汽、层结不稳定和垂直风切变中心值不吻合,强对流还没开始发展。14 时(图 4b) 24.36°N 、 102.6°E 附近地面 10 m 偏东气流明显加强,风速加大到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面中尺度辐合线位于偏东气流出口区,与 $3.8\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量辐合区对应, $44\sim 48^{\circ}\text{C}$ 的 K 指数大值中心区对应 $0\sim 6\text{ km}$ 大于 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的垂直风切变中心区。可见 2017 年 8 月 23 日 14 时在 24.36°N 、 102.6°E 附近上空冷暖气团的交汇使得水汽条件、能量条件和抬升动力条件均有利于强对流天气的发生,垂直风切变大值区、层结不稳定高值区和水汽通量辐合区在云南中部 24.36°N 、 102.6°E 区域几乎完全重合,对应着超级单体强对流风暴的发生区域。

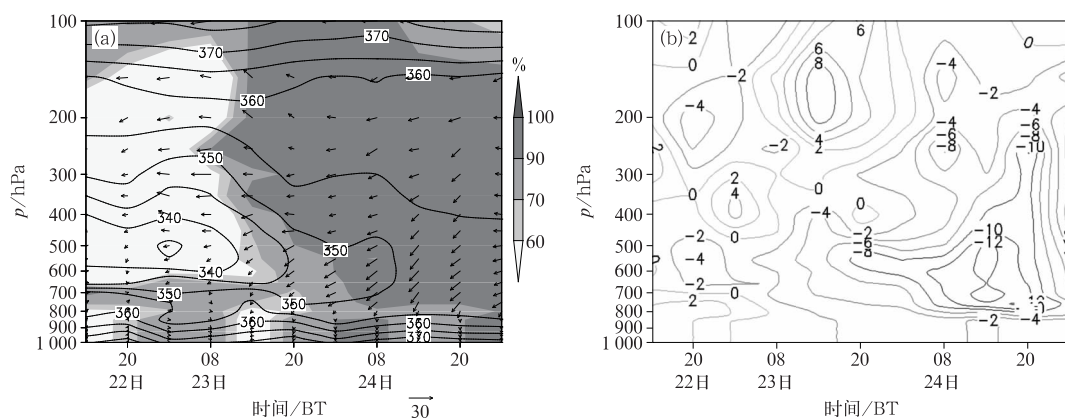


图 3 2017 年 8 月 22 日 14 时至 25 日 02 时沿 24.36°N 、 102.6°E 的(a) θ_{se} (实线,单位:K)、相对湿度(阴影)和风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b)垂直速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)时间-高度演变

Fig. 3 Time-height evolution diagram of along 24.36°N , 102.6°E (a) θ_{se} (solid line, unit: K), relative humidity (shaded) and wind field (arrow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

(b) vertical velocity of wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) from 14:00 BT 22 to 02:00 BT 25 August 2017

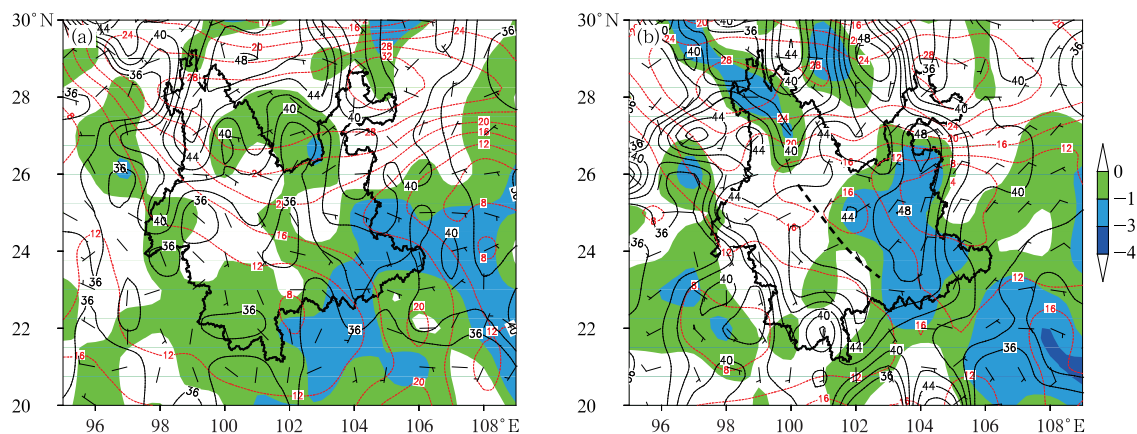


图4 2017年8月23日08时(a)和14时(b)K指数(黑色实线,单位:°C)、0~6 km垂直风切变(红色虚线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、700 hPa水汽通量散度场(填色,单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、地面10 m风场(风羽,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Distribution of K index (black solid line, unit: °C), 0–6 km vertical wind shear (red dashed line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), water vapor flux divergence at 700 hPa (colored, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 10 m wind (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 23 August 2017

3 多普勒雷达回波特征

3.1 超级单体雷达回波演变分析

从多普勒雷达回波图(图5)上可看出,这是一次由多个强对流单体跳跃式发展并形成超级单体的过程,为清楚反映出强对流单体发展演变特征,按超级单体出现时间顺序对6个超级单体进行编号。11:17 单单体对流回波开始在东风急流出口区前侧、海拔为1930 m的丘陵地带发展,沿东北风急流向西南方向移动(图略),受海拔高度不断抬升影响,对流单体回波迅速发展。11:41 单体分裂为两块回波并以层云相连,南侧1号对流单体12:04(图5a,图6a)移至昆明雷达站东南方50 km左右并发展成熟,回波顶高为8.5 km,强回波强度为56 dBZ,径向速度图上6.5 km以下出现明显辐合,2.4°~3.4°(5.8~6.4 km)仰角出现明显正负速度最大中心,核区直径为8 km,转动速度为 $8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到弱切变标准(俞小鼎等,2006),雷达PPI上有明显弱回波区、“V”型缺口等超级单体回波特征,反射率因子核区径向方向出现TBSS,强度场上TBSS长度为8 km,径向速度场上TBSS长度为10 km,垂直剖面上可见假尖顶回波、悬垂回波区(>55 dBZ)和穹隆(图略)。当天08时昆明站探空资料显示,0°C层高度为5.5 km,−10°C层高度为7.3 km,可见此时强

对流内虽有大粒子,但粒子增长区位于液态水区,强对流内粒子以液态为主,地面实况对应出现9 mm降水。出现短时强降水后对流单体向西南方向移动过程中迅速减弱消散。在其西北侧2号对流单体迅速发展,受近地面辐合线影响,加上地形抬作用,12:28 该对流单体逐渐发展成熟(图5b,图6b),回波顶高为12.5 km,强回波强度为59 dBZ,高度为6.7 km,径向速度图上呈反气旋式辐合,最强辐合区位于6~9 km高度,上下层辐合区位置略向西北方向倾斜,表明上升气流在上升过程中倾斜,径向速度最大中心出现在4.3°(7.2 km)仰角,核区直径为6 km,转动速度为 $9 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,仍为弱切变特征。对流单体前侧存在弱回波区、“V”型缺口等超级单体回波特征,4.3°仰角上反射率因子核心径向方向的TBSS最长,径向速度场上其长度达到13.5 km,多普勒雷达探测粒子时,雷达电磁波在空中大粒子与地面之间会出现多次散射并返回雷达天线接收机,散射导致路径延长,长钉长度远远长于估计距离,说明在该处粒子开始融化,散射或反射能力极强,旁瓣回波位于8.6 km也证实了这一结论(俞小鼎等,2006),垂直剖面上强回波核(>55 dBZ)呈直立状特征,不利于中尺度涡旋长时间维持。12:34 强对流单体在强降水后迅速减弱,并与后部多个单体合并为一个块状多单体回波,块状回波东南侧的3号对流单体迅速发展,12:57,3号对流单体移动到距离雷达站80 km左右的红塔区小石桥镇附近并逐渐发

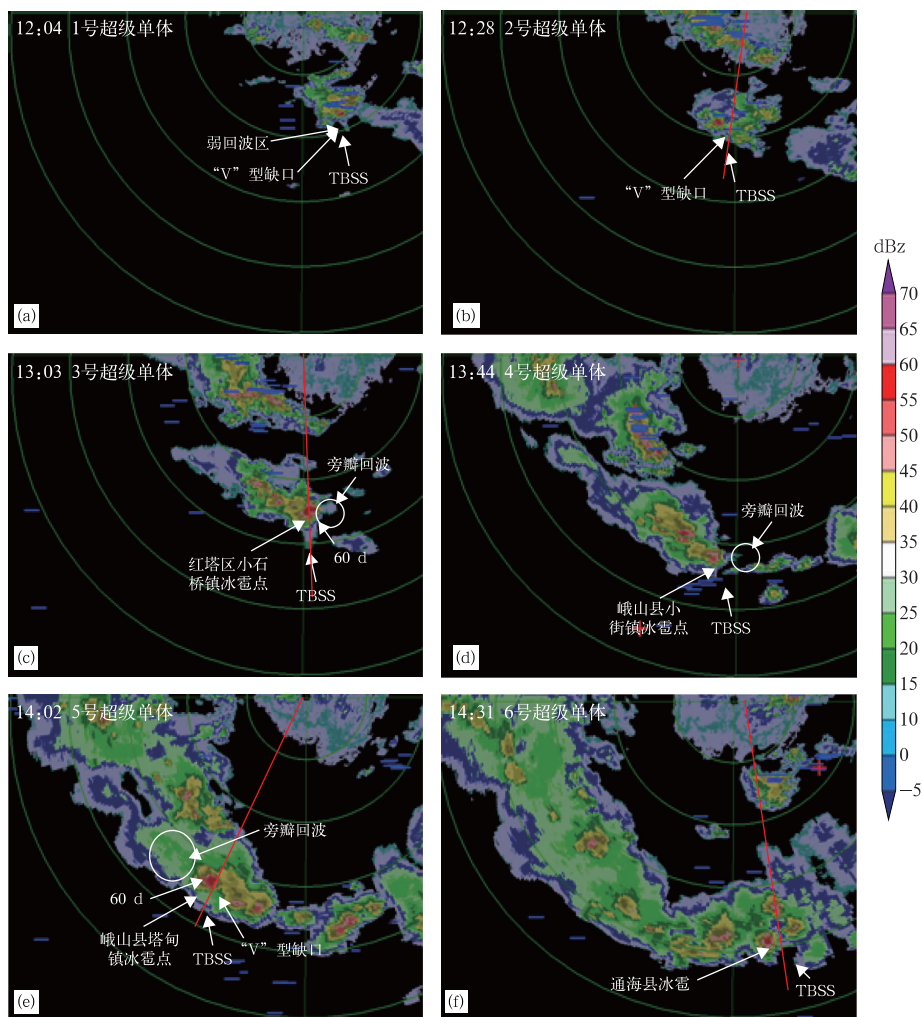


图 5 2017 年 8 月 23 日昆明多普勒雷达 2.4°仰角基本反射率因子和叠加的地闪分布

(a) 12:04, (b) 12:28, (c) 13:03, (d) 13:44, (e) 14:02, (f) 14:31

(“+”“-”分别表示相应回波前 6 min 正、负地闪, 雷达探测范围为 150 km)

Fig. 5 Distribution of Kunming Doppler radar base reflectivity factor at elevation 2.4° with superposed CG flashes on 23 August 2017

(a) 12:04 BT, (b) 12:28 BT, (c) 13:03 BT, (d) 13:44 BT, (e) 14:02 BT, (f) 14:31 BT

(“+” and “-” represent negative and positive CG flashes of corresponding radar echoes in first 6 min of scan time, respectively; scan radius is 150 km)

展成熟, 13:03 达到成熟阶段(图 5c, 图 6c), 回波顶高为 16.5 km, 可见标准超级单体的“V”型缺口、TBSS、旁瓣回波等特征, 最大反射率强度为 60 dBZ, 高度为 7.4 km, 强回波核位于过冷水区。与 12:28 相比, 该时次 1.5°~6.0°(5.2~10.9 km)仰角上均可见清晰 TBSS 特征, 旁瓣回波最大径向速度为 $-22.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 3.4°仰角上反射率因子的 TBSS 长度明显加大, 径向速度的 TBSS 长度明显增加, 但宽度维持不变, 0.5°~6.0°仰角上强回波核的垂直分布呈前倾结构特征, 正负速度最大中心出现在 3.4°

仰角, 核区直径为 7 km, 转动速度为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到弱中气旋标准, 可见气流呈涡旋状倾斜上升, 有利于强对流单体的持续发展, 4.3°仰角上中气旋的正速度值明显小于 2.4°仰角上的正速度值, 此时冰雹区开始下降, 13:03 玉溪红塔区小石桥镇出现冰雹, 冰雹直径为 15 mm, 持续时间为 12 min, 13:21 对流单体持续降雹, 西南移动并减弱。块状多单体则在移动过程中持续受小丘陵地形的抬升作用影响, 东南侧和西北侧又有对流单体生成并快速发展。13:44 东南侧的 4 号对流单体发展成熟(图 5d, 图 6d), 单体

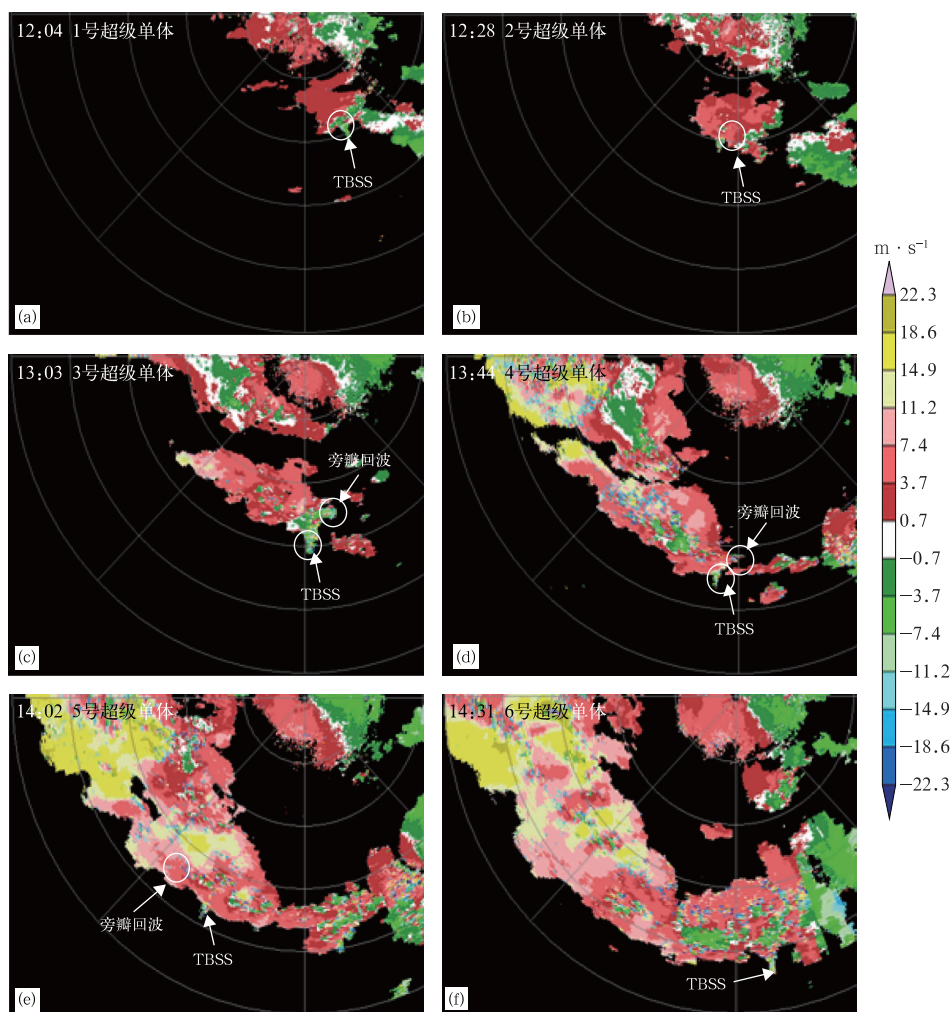


图6 同图5,但为径向速度场分布

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for radial velocity

的强回波直立状特征明显,最强为 59 dBz,高度为 6.6 km,回波顶高为 13.3 km,径向速度图上 6 km 以下出现反气旋式辐合,1.5°~2.4° 仰角出现明显正负速度最大中心,核区直径为 8.6 km,转动速度为 15 m · s⁻¹,PPI 上反射率因子核心等距离圈上出现旁瓣回波、径向方向出现 TBSS 特征,辐合高度偏低,不利于粒子循环增长,垂直剖面上假尖顶回波和旁瓣回波明显,但无明显穹隆,峨山小街镇地面实况出现 5 mm 冰雹和短时强降水。13:50 强对流单体开始减弱消散,块状回波西北侧的 5 号对流单体快速发展成熟,14:02 距离雷达站 100 km 左右,5 号对流单体发展为典型超级单体回波(图 5e,图 6e),强回波强度为 60 dBz,回波顶高为 15.1 km,旁瓣回波强度达 25 dBz,径向速度场上 7 km 以下出现明显辐合,7 km 以上出现明显辐散,1.5°~4.3° 仰角出现明显正负速

度最大中心,核区直径为 8.5 km,转动速度为 18.5 m · s⁻¹,达到中气旋标准,强对流回波前侧有明显弱回波区、“V”型缺口,反射率因子核心的径向方向出现 TBSS,2.4°~3.4° 仰角 TBSS 长度为 10.3 km,垂直剖面上旁瓣回波特征比假尖顶回波特征显著,零速度线由低层向高层后倾,底层入流倾斜上升,有利于强对流超级单体长时间维持,造成峨山塔甸镇出现持续时间为 15 min、直径为 20 mm 的降雹。14:20 超级单体开始减弱消散,块状回波在西南移动过程中逐渐与两侧的块状回波合并,形成一条“弓”状飚线回波带,飚线南段对流单体发展旺盛。14:31 距离雷达站南侧 120 km、位于通海县高大乡飚线南侧的 6 号强对流单体发展为具有超级单体特征的强对流回波(图 5f,图 6f),回波强度为 57 dBz,回波顶高为 15.3 km,1.5° 仰角出现气旋式辐合,正负速度最大

中心核区直径为 9 km,转动速度为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明低层存在弱辐合切变,反射率因子核径向方向的 TBSS 延伸至 3.4° 仰角高度, 2.4° 仰角 TBSS 的径向速度长度最长(10 km), 3.4° 仰角 TBSS 长度明显减小,该高度层开始转为辐散。垂直剖面上同样出现旁瓣回波、假尖顶回波、穹隆等典型超级单体特征,径向速度垂直剖面上零速度线较为平直,低层辐合倾斜特征不明显,不利于大冰雹粒子的生长,14:31—14:37 通海县高大乡出现持续 5 min、直径为 8 mm 冰雹和大风、短时强降水。降雹后飚线南段单体回波生消频繁,15:01 在石屏县 3 个乡镇出现持续 10 min、直径为 6 mm 的降雹,随后以大风和短时强降水为主,该时刻回波移出雷达探测范围,不做详细讨论。

从上述分析可见,受减弱台风低压前侧东北急流和弱冷空气辐合影响,强对流单体开始在玉溪市西北侧生成,向西南方向移动过程中,单单体回波逐渐演变为块状多单体和“弓”状飚线,其中的 6 个强对流单体发展为超级单体。6 个超级单体沿最大反射率核心径向方向均出现 TBSS 特征,但仅有 3 次出现冰雹,与俞小鼎等(2006)的 TBSS 特征只作为超级单体出现冰雹的必要性条件而不是充要条件的说法一致。强度场上 TBSS 特征与径向速度场上 TBSS 相比偏弱,何炳伟等(2018)研究指出,反射率因子上 TBSS 具有明显方位分布特征,当风暴单体移动方向在雷达径向投影分量存在与雷达径向外侧方向相同的分量时,风暴下风方存在覆盖 TBSS 特征的真实回波,导致强度场上 TBSS 特征偏弱,此次强对流过程的移动方向为自东北向西南,风暴单体移动方向在雷达径向投影的分量与雷达径向外侧方向相同,造成强度场上 TBSS 特征偏弱;另一个原因可能与 TBSS 的回波强度一般 $\leq 20 \text{ dBz}$,同时反射率仅显示 5 dBz 及以上回波强度有关。出现超级单体特征的强对流回波涡旋特征明显,13:03 和 14:02 超级单体内最大速度对的转动值达到中气旋标准,其余时次均为弱切变特征,超级单体内最大速度对的转动值超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时次均出现不同程度冰雹。

3.2 超级单体垂直结构特征分析

此次强对流过程分别在 12:03、12:28、13:03、13:44、14:02、14:31 出现超级单体特征(12:03、12:28 的 1 号、2 号超级单体未降雹、13:44、14:31

的 4 号、6 号超级单体出现小冰雹、13:03、14:02 的 3 号、5 号超级单体出现大冰雹),选取 12:28、13:03、14:02、14:31 四个时次的 2、3、5、6 号超级单体,沿图 5 红线做剖面,四个时次反射率因子剖面上,最大强度均超过 58 dBz ,回波核明显,均出现明显假尖顶回波、TBSS,回波顶高超过 12.5 km,径向速度剖面上,均表现出低层辐合、高层辐散特征(图 7)。12:28 的 2 号超级单体强回波区($>50 \text{ dBz}$)呈直立状特征, 59 dBz 反射率因子核心高度为 6.7 km,低于 -10°C 层高度,质心高度偏低,强回波未出现悬垂回波特征,TBSS 特征偏弱,旁瓣电磁波对粒子的探测功率偏低,反映了强对流单体内粒子偏小,径向速度剖面上,从底部 3 km 向上延伸到 8 km 有径向速度辐合区,8~11 km 为高层径向速度强辐散区,辐合辐散区宽度较窄,零速度线呈直立状特征,表明此时强对流单体低层入流的旋转上升特征不明显,不利于超级单体的长时间维持发展,12:34 超级单体特征迅速消失,地面实况以强降水为主表明超级单体典型特征的出现并不是出现冰雹过程的充分必要条件。13:03 的 3 号、14:02 的 5 号超级单体的垂直剖面特征也基本相似,悬垂回波、弱回波区、回波墙特征明显,强回波区自低层到高层向低层入流一侧略有前倾,回波悬垂, $>55 \text{ dBz}$ 强反射率核区位于回波悬垂上方 -10°C 层区域, 50 dBz 强回波高度达 10 km,高于 -20°C 层高度(9.1 km),呈现出高质心的雹暴结构,径向速度剖面上,10 km 左右三体散射特征显著,从底部至 8~10 km 出现明显径向速度辐合区,零速度线向后倾斜,表明低层入流的旋转辐合上升特征明显,高层 10~14 km 为高层径向速度强辐散区,中低层倾斜上升辐合高层辐散的强烈抽吸作用有利于上升运动的发展和长期维持,其中 14:02 径向速度剖面上可见超级单体后侧近地面有下沉气流,强烈的辐散风出流迫使后侧暖湿气流强迫抬升,增强了上升气流和水汽输送。两个时次超级单体高质心、较高回波顶,加上典型超级单体的旁瓣回波、假尖顶回波、悬垂回波特征满足了产生大冰雹的条件,倾斜结构的气流配置、中层以下深厚的辐合区,高层强辐散区、倾斜上升的冷空气入流和后侧东风急流的水汽补充,导致了超级单体上升、下沉气流对的长时间维持和大冰雹粒子的循环增长(张桂莲等,2018)。14:31 出现直径小于 10 mm 冰雹的 6 号超级单体反射率因子垂直剖面上, 58 dBz 反射率因子核心高度为 8.1 km,表现为高质心结构,强回

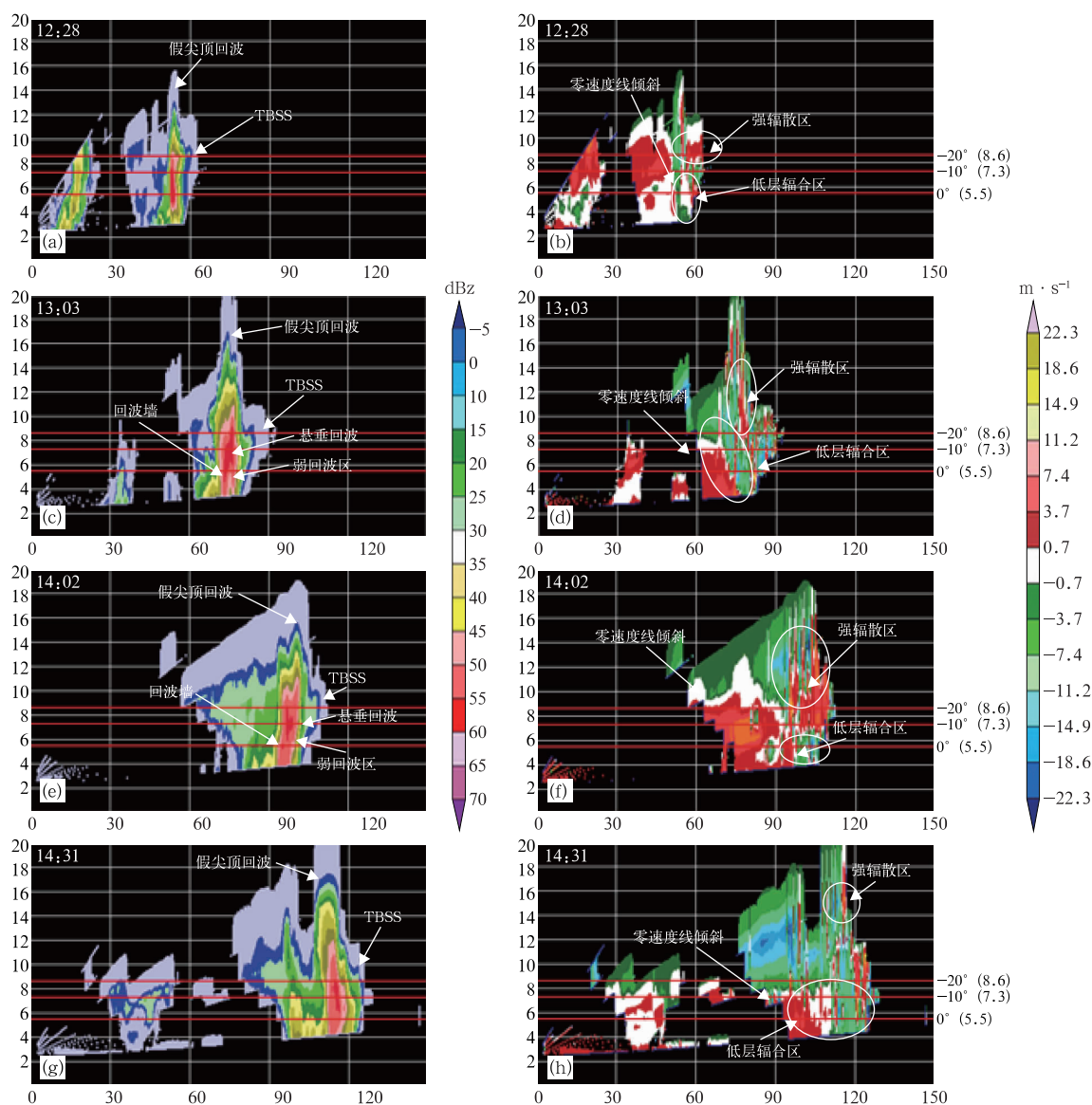


图7 2017年8月23日2、3、5、6号超级单体的多普勒雷达反射率因子(a,c,e,g)

和径向速度场(b,d,f,h)剖面

(a,b)2号12:28,(c,d)3号13:03,(e,f)5号14:02,(g,h)6号14:31

Fig. 7 Cross-sections of radar reflectivity (a, c, e, g) and radial velocity (b, d, f, h)

for the 2nd, 3rd, 5th and 6th supercells on 23 August 2017

(a, b) the 2nd supercell at 12:28 BT, (c, d) the 3rd supercell at 13:03 BT,

(e, f) the 5th supercell at 14:02 BT, (g, h) the 6th supercell at 14:31 BT

波核未出现悬垂回波特征,TBSS特征偏弱,径向速度剖面上,从底部3 km向上延伸到6.5 km高度有径向速度辐合区,零速度线自低层向高层向后倾斜,表明入流的旋转上升特征明显,7 km以上为高层径向速度强辐散区,高层辐散强度明显大于低层辐合强度,高层强烈的抽吸作用使得粒子快速脱离主上升气流区,被带至高层辐散区并下沉,不利于粒子在

循环区增长。

从4个超级单体反射率因子和径向速度剖面分析可见,出现大冰雹粒子的3号、5号超级单体回波具有TBSS、旁瓣回波,反射率因子高质心、强回波区倾斜等特征,径向速度剖面上零速度线倾斜特征、 -20°C 层及以下对应较深厚的辐合区,风暴顶则表现为强辐散特征,这在一定程度上促进了超级单体

内上升运动和风暴低层暖湿入流的强度,有利于低层丰富的水汽向单体内输送并导致单体内的垂直增长和强烈发展(吴海英等,2017)。2号、6号非降雹(小雹)超级单体同样具有TBSS、旁瓣回波特征,但强回波区和零速度线呈直立状、辐合区高度低于 -10°C 过冷水区高度,顶部为强辐散区,辐合区厚度小于辐散区,不利于单体内粒子的垂直增长。

3.3 冰雹与回波强度、VIL 特征

强回波强度、回波高度已被广泛应用在冰雹强对流预警预报中(张培昌等,2001)。VIL密度定义为垂直累积液态水含量(VIL)与强对流风暴顶高度(ET)之比(Amburn and Wolf, 1997),研究表明,VIL密度越大,强对流风暴产生冰雹的概率越大,不同地区出现大冰雹时的VIL密度有较大差异,内蒙古赤峰产生2 cm大冰雹时VIL密度超过 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (张桂莲等,2018)。结合强对流风暴发展整个阶段不同温度层最大回波强度、50 dBz回波厚度($H_{50\text{ dBz}}$)的演变(图8)可以看到,dBz_{max}(最大回波强度)与dBz_{0°C}(0°C层回波最大强度)、dBz_{-10°C}(-10°C层回波最大强度)在强对流风暴演变过程中在50 dBz附近呈波动变化,相关系数为0.86。除第一个中气旋时刻外,其余中气旋时刻三个温度层回波最大强度特征值 $\geq 56\text{ dBz}$ 。dBz_{-20°C}(-20°C层回波最大强度)

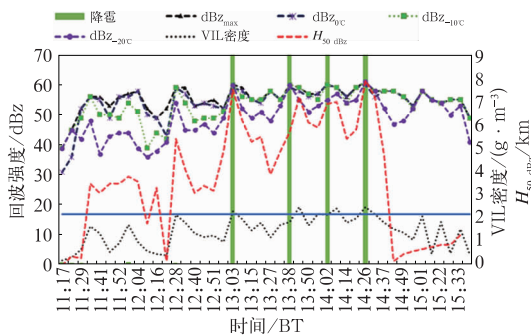


图8 2017年8月23日超级单体演变过程中VIL密度、 $H_{50\text{ dBz}}$ 不同等温层回波强度时间序列

(绿色柱状为降雹时刻,蓝线为VIL密度 $2.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig. 8 The time series of VIL density, the echo thickness of 50 dBz and the maximum echo intensity in different isothermal layers during the evolution of supercell on 23 August 2017

(Green bar is hail time, blue line is the VIL; density threshold of $2.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

在第二个中气旋及降雹时刻跃增至54 dBz以上。 $H_{50\text{ dBz}}$ 在6个中气旋时刻均出现跃增,降雹时刻 $H_{50\text{ dBz}} > 7\text{ km}$,其余时刻 $H_{50\text{ dBz}} \leq 6\text{ km}$ 。VIL密度与 $H_{50\text{ dBz}}$ 的变化基本一致,两者相关系数为0.65,其中降雹时刻VIL密度均超过 $2.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3.4 超级单体移动路径的海拔变化特征

此次强对流风暴从玉溪东部发展并向西南方向移动,进入红河西北部减弱消散。强对流过程激发出6个具有中气旋特征的超级单体,其中2个未降雹,2个出现了5~8 m的小冰雹,2个出现了15~20 mm的大冰雹。从强对流风暴移动路径对应的地形变化看(图9),移动路径的海拔呈波动下降特征。1号对流单体在海拔2018 m的玉溪东部生成,沿海拔爬升并不断发展成熟,11:41升至2350 m,单体回波处于发展阶段,随后海拔下降,12:04单体发展为超级单体,强中心对应的海拔降至最低(1995 m),单体减弱阶段沿地形爬升,但海拔变化幅度较小,12:22在海拔1994 m处消散。12:10,2号单体在1号单体西侧10 km、海拔2106 m处生成并沿海拔爬升,12:28出现超级单体特征,12:34海拔升至2205 m后地形开始下降,单体减弱消散。3号单体在2号单体东南侧20 km,海拔1935 m处生成,向南移动过程中强中心对应海拔高度缓慢下降,12:57强中心对应海拔开始上升,13:03单体出现中气旋和降雹,同时强中心对应海拔增加到1816 m,降雹后地形下降,单体在海拔1640 m处减弱消散。3号超级单体发展成熟阶段,4号单体回波在其南侧海拔1669 m处生成并发展,强回波中心海拔呈先增加后下降再抬升变化,但海拔变化幅度较小,降雹前最高海拔为1740 m,出现中气旋和降雹时强

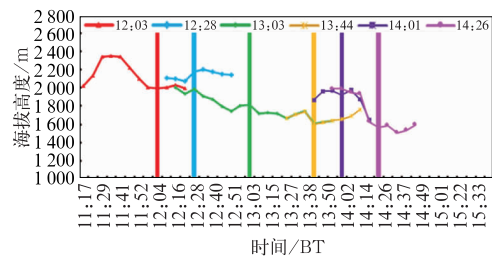


图9 2017年8月23日6个超级单体强中心移动路径对应的海拔高度变化

Fig. 9 Elevation changes corresponding to the moving paths of echo center for six supercells on 23 August 2017

中心对应的海拔最低为 1601 m。13:44,5 号单体回波发展初期强中心对应海拔为 1864 m,随后单体回波强中心对应海拔不断增加,回波也发展迅速,13:56 海拔升至 1966 m 时单体回波发展成熟,14:02 出现超级单体特征和 20 mm 降雹,此时海拔略有下降但幅度较小,降雹过程中海拔升至最大高度(1973 m),14:20 降雹结束时对流单体沿下降至 1648 m 海拔处。6 号对流单体生成初期强中心位于海拔 1987 m 处,随后对流单体沿地形不断下降过程中发展,14:26 单体发展成熟时强中心海拔降至 1568 m,减弱消散阶段强中心对应海拔继续下降。

可见此次强对流风暴过程受地形影响较为明显,整体上强对流风暴强中心移动路径的海拔高度呈下降特征,13:03—14:02 出现降雹的 3 个强单体在发展及成熟前约 10 min 强中心均沿地形爬升,有利于上升气流的加强和过冷水区冰雹粒子的增长,未降雹和小雹的强对流单体在发展及成熟阶段强中心沿地形下降,削弱了云内上升气流的持续发展。2 号强对流单体回波虽然在出现中气旋前沿地形爬升,但海拔变化小,−10℃、−20℃ 层回波强度、VIL 密度偏小,造成超级单体在成熟阶段未能继续发展,随后沿地形下降减弱消散。

4 结论与讨论

4.1 结论

利用常规观测、地面加密自动站、多普勒天气雷达、NCEP(1°×1°)逐 6 h 再分析资料对 2017 年 8 月 23 日云南中部地区强对流风暴的多次超级单体和降雹过程进行了分析,得到以下主要结论:

(1)此次强对流风暴发生在台风低压前侧和中高纬冷槽后部的强不稳定层结背景下,南下弱冷空气和中低层台风低压前侧偏东急流带来的暖湿气流形成上干冷、下暖湿的不稳定层结,低层气层增温增湿明显,与上层的温、湿度差不断增大,大气温、湿度垂直递减率增加,为强对流天气的发生提供了较为有利的环境条件,激发的强对流沿副高 588 dagpm 脊线向西南方向移动,受地形影响强对流单体生消频繁,出现多次冰雹强对流过程。

(2)近地面辐合线和强垂直风切变有利于对流风暴的加强,强对流风暴发展过程中出现 6 个具有中气旋特征的超级单体和类超级单体,超级单体涡

旋特征明显,雷达回波上均出现 TBSS、中气旋特征,TBSS 长度差别显著,出现 15 mm 以上降雹超级单体回波在 2.4°~3.4° 仰角上径向速度达到中气旋标准,其余时刻为弱切变特征,超级单体内最大速度对的转动值超过 10 m·s⁻¹ 时出现不同程度冰雹。

(3)垂直剖面上出现 15~20 mm 大冰雹的超级单体反射率因子质心点较高,回波核前倾,具有悬垂回波、弱回波区、回波墙、TBSS 和假尖顶回波特征,零速度线后倾,辐合区高度超过 −10℃ 层过冷水区,中低层为深厚的强辐合区、高层为强辐散区,有利于上升运动的加强,强风暴不断维持发展,低层水汽随强上升运动向过冷水区输送,冰雹粒子能够快速增长,未降雹和 5~8 mm 小雹的超级单体回波核呈直立特征,悬垂回波特征不显著,辐合区高度偏低,辐散区厚度大于辐合区厚度。

(4)dBz_{-20℃}、H_{50dBz} 和 VIL 密度在出现中气旋特征前跃增明显,尤其以降雹前后的跃增变化最为显著,12:28 中气旋时刻 dBz_{-20℃} 跃增至 54 dBz,但 H_{50dBz} 仅为 5.4 km,VIL 密度为 2.15 g·m⁻³,与 4 个出现冰雹时刻的特征值相比偏小明显。此次强对流风暴过程受地形影响较为明显出现,降雹的 3 个强单体在发展及成熟前约 10 min 强中心均沿地形爬升,未降雹和小雹强对流单体在发展及成熟阶段强中心沿地形下降。2 号强对流单体虽然在 12:28 出现中气旋前沿地形爬升,dBz_{-20℃} 也有较大跃增,但海拔变化小,VIL 密度、H_{50dBz} 偏小,加上回波的直立状特征,造成超级单体在成熟阶段上升气流持续时间短,不利于霰粒子循环增长。

可见在云南复杂的地形地貌下,利用多普勒回波的超级单体特征对降雹进行预警时,除考虑不同等温层回波强度、回波垂直剖面上强度场和径向速度场的中气旋特征时,还需要同时把强回波厚度、VIL 密度、回波强中心移动路径上海拔的变化作为冰雹预警的业务指标,才能有效提高冰雹预警的空报率。

4.2 讨论

本文分析所用雷达资料来自 CINRAD/CC 波段 5 cm 的多普勒天气雷达,从分析结果可见,6 个超级单体出现 TBSS 时刻的反射率因子强度均在 58~60 dBz,未出现 >60 dBz 的强回波,同时作者对 2013—2019 年云南 600 个多冰雹强对流过程降雹

时的最大回波强度统计分析发现,云南较少出现回波强度 >60 dBz 的强雹暴,这与廖玉芳等(2007)利用 S 波段多普勒天气雷达对雹暴的三体散射统计结果略有差异,该统计结果显示,S 波段雷达三体散射的最小反射率因子为 60 dBz,86% 三体散射长钉(TBSS)出现时反射率因子强度 ≥ 63 dBz。史锐等(2004)、刘雨佳等(2014)等通过对山东、安徽 S 波段与 C 波段天气雷达回波强度进行对比分析发现,S 波段和 C 波段雷达对回波强度的探测存在整体性的差异,C 波段雷达在大范围的降雨中有衰减问题,对于较强回波(>30 dBz),S 波段与 C 波段天气雷达测量相同区域回波强度存在较大差异,S 波段雷达探测的平均强度会随着强度增大而增大,C 波段雷达则在远离雷达一侧出现明显衰减,因此在使用 C 波段雷达过程中,需要进行回波衰减订正。结合不同波段回波强度对比分析和 S 波段超级单体回波强度分析结果,初步认为云南 CINRAD/CC 多普勒雷达对强回波的探测存在一定的衰减,超级单体在出现 TBSS 和降雹时刻真实回波强度应存在衰减。但由于目前云南没有不同波段雷达对同一块强对流回波的对比探测,加上云南特殊的地形地貌,仅仅根据长江中下游和平原地区不同波段雷达回波对比误差值来确定衰减系数,缺乏数据支持,在本文的个例研究中难以确定出问题所在,这需要用大量的基数数据进行数值对比分析或其他方法来分析。

参考文献

- 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. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1): 25-33(in Chinese).
- 戴建华,陶岚,丁杨,等,2012.一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析[J].气象学报,70(4):609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al, 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 609-627(in Chinese).
- 刁秀广,杨晓霞,朱君鉴,等,2008.一次长寿命风暴的 CINRAD/SA 雷达反射率及中气旋产品特征与流场结构分析[J].高原气象,27(3):657-667. Diao X G, Yang X X, Zhu J J, et al, 2008. The air flow structure and characteristic of CINRAD-products in a long-life storm[J]. Plateau Meteor, 27(3): 657-667(in Chinese).
- 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. Feng J Q, Yu X D, Fu W H, et al, 2012. Comparative analysis on supercell storm structure of a severe hail shooting in Fujian Province in early spring of 2010[J]. Plateau Meteor, 31(1): 239-250(in Chinese).
- 付双喜,王伏村,郭良才,2014.一次左移反气旋超级单体的观测分析[J].干旱气象,32(6):996-1002. Fu S X, Wang F C, Guo L C, 2014. Observation and analysis of a left-moving supercell[J]. J Arid Meteor, 32(6): 996-1002(in Chinese).
- 何炳伟,胡振菊,高伟,等,2018.常德多普勒天气雷达强雹暴三体散射统计分析[J].气象,44(3):455-462. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2018. Statistical analysis about severe hailstorm TBSS in Changde Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 44(3): 455-462(in Chinese).
- 胡胜,于华英,胡东明,等,2006.一次超级单体的多普勒特征和数值模拟特征对比分析[J].热带气象学报,22(5):466-472. Hu S, Yu H Y, Hu D M, et al, 2006. Comparison between Doppler and simulated features for a supercell[J]. J Trop Meteor, 22(5): 466-472(in Chinese).
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等,2007.强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J].高原气象,26(4):812-820. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm[J]. Plateau Meteor, 26(4): 812-820(in Chinese).
- 刘雨佳,陈洪滨,朱君鉴,2014.山东省 S 波段与 C 波段天气雷达回波强度的对比分析[J].气象科学,34(1):87-95. Liu Y J, Chen H B, Zhu J J, 2014. Comparative analysis of S and C-band radar reflectivity data in Shandong Province[J]. J Meteor Sci, 34(1): 87-95(in Chinese).
- 牛奔,张家国,吴涛,等,2016.鄂西北一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].暴雨灾害,35(1):45-52. Niu B, Zhang J G, Wu T, et al, 2016. Analysis on weather process of supercell storm in northwest of Hubei Province[J]. Torr Rain Dis, 35(1): 45-52(in Chinese).
- 农孟松,祁丽燕,黄海洪,等,2011.桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J].气象,37(12):1519-1520. Nong M S, Qi L Y, Huang H H, et al, 2011. A case study on supercell storm of hail in the northwest of Guangxi[J]. Meteor Mon, 37(12): 1519-1520(in Chinese).
- 潘玉洁,赵坤,潘益农,2008.一次强飑线内强降水超级单体风暴的单一多普勒雷达分析[J].气象学报,66(4):621-636. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N, 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 66(4): 621-636(in Chinese).
- 史锐,程明虎,崔哲虎,等,2004.长江流域多普勒雷达回波强度资料对比分析[J].气象,30(11):27-31. Shi R, Cheng M H, Cui Z H, et al, 2004. Quality analysis of echo intensities from the Doppler weather radars in the Changjiang River Valley[J]. Meteor Mon, 30(11): 27-31(in Chinese).
- 王易,徐芬,吴海英,2019.一次致雹超级单体结构特征分析[J].大气科学学报,42(4):612-620. Wang Y, Xu F, Wu H Y, 2019. Structure characteristics analysis of a supercell hailstorm[J]. Trans Atmos Sci, 42(4): 612-620(in Chinese).
- 汪应琼,李芳,姜玉印,等,2013.湖北宜昌超级单体风暴发生的环境条件分析[J].暴雨灾害,32(1):53-61. Wang Y Q, Li F, Jiang Y

- Y, et al, 2013. Analysis on environment conditions of supercell storms over Yichang, Hubei Province[J]. *Torr Rain Dis*, 32(1): 53-61(in Chinese).
- 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. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in Northern Jiangsu[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(2): 209-227(in Chinese).
- 吴海英, 陈海山, 刘梅, 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. Wu H Y, Chen H S, Liu M, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. *Meteor Mon*, 43(2): 141-150(in Chinese).
- 伍志方, 庞古乾, 贺汉青, 等, 2014. 2012年4月广东左移和飑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. Wu Z F, Pang G Q, He H Q, et al, 2014. Comparative analysis of environmental conditions and structural features for the left moving supercell and the supercell in squall line in April 2012 Guangdong[J]. *Meteor Mon*, 40(6): 655-667(in Chinese).
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等, 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. *气象*, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D P, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. *Meteor Mon*, 40(4): 400-411(in Chinese).
- 杨波, 孙继松, 刘鑫华, 2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. *气象学报*, 77(3): 427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3): 427-441(in Chinese).
- 尹丽云, 张杰, 张腾飞, 等, 2012. 低纬高原一次飑线过程的地闪演变特征分析[J]. *高原气象*, 31(4): 1100-1109. Yin L Y, Zhang J, Zhang T F, et al, 2012. Analysis on lightning activity characteristics of a squall line system in low-latitude plateau[J]. *Plateau Meteor*, 31(4): 1100-1109(in Chinese).
- 尹丽云, 张腾飞, 许迎杰, 等, 2010. 低纬高原中部一次强对流天气过程的多普勒雷达和闪电特征分析[J]. *高原气象*, 29(4): 1026-1035. Yin L Y, Zhang T F, Xu Y J, et al, 2010. Feature analysis of Dopplar radar echo and lightning for a severe convective weather process in center of low-latitude plateau[J]. *Plateau Meteor*, 29(4): 1026-1035(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 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. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(3): 508-522(in Chinese).
- 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. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al, 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. *Meteor Mon*, 42(3): 280-293(in Chinese).
- 张桂莲, 常欣, 黄晓璐, 等, 2018. 东北冷涡背景下超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. *高原气象*, 37(5): 1364-1374. Zhang G L, Chang X, Huang X L, et al, 2018. The environmental conditions and radar echo characteristics of the super cell storm under the background of the northeast cold vortex[J]. *Plateau Meteor*, 37(5): 1364-1374(in Chinese).
- 张杰, 张腾飞, 2019. 云南4次热带系统影响强对流风暴卫星云图和地闪特征[J]. *气象科学*, 39(4): 502-514. Zhang J, Zhang T F, 2019. Satellite cloud picture and CG lightning characteristics of strong convective storm with four times of tropical system influencing in Yunnan[J]. *J Meteor Sci*, 39(4): 502-514(in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 388-396. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 388-396(in Chinese).
- 张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 等, 2006. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. *高原气象*, 25(3): 532-538. Zhang T F, Duan X, Lu Y B, et al, 2006. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its Dopplar radar echo features[J]. *Plateau Meteor*, 25(3): 532-538(in Chinese).
- 张腾飞, 尹丽云, 张杰, 等, 2013. 云南两次中尺度对流雷暴系统演变和地闪特征[J]. *应用气象学报*, 24(2): 207-218. Zhang T F, Yin L Y, Zhang J, et al, 2013. Evolution and cloud-to-ground lightning features of two mesoscale convective thunder storm systems Yunnan [J]. *J Appl Meteor Sci*, 24(2): 207-218(in Chinese).
- 张一平, 俞小鼎, 吴蓁, 等, 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析[J]. *气象学报*, 70(5): 961-973. Zhang Y P, Yu X D, Wu Z, et al, 2012. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(5): 961-973(in Chinese).
- 张玉洁, 苑文华, 张武, 2019. 两次长寿命孤立超级单体风暴结构差异性分析[J]. *高原气象*, 38(5): 1058-1068. Zhang Y J, Yuan W H, Zhang W, 2019. The difference analysis of structure between two long-lived isolated supercell storms[J]. *Plateau Meteor*, 38(5): 1058-1068(in Chinese).
- 翟丽萍, 农孟松, 赖珍权, 等, 2018. 广西“4·20”暖区飑线的形成及结构[J]. *高原气象*, 37(2): 568-576. Zhai L P, Nong M S, Lai Z Q, et al, 2018. Formation and structure of ‘4·20’ warm sector squall line in Guangxi Province[J]. *Plateau Meteor*, 37(2): 568-576(in Chinese).
- 赵桂香, 王晓丽, 王一颀, 2017. 黄河中游地区初春与盛夏 MCC 结构特征比较分析[J]. *高原气象*, 36(6): 1638-1654. Zhao G X, Wang X L, Wang Y J, 2017. Comparative analysis of structure characteristics of MCC over the Yellow River midstream between the spring and the summer[J]. *Plateau Meteor*, 36(6):

- 1638-1654(in Chinese).
- 赵俊荣,郭金强,杨景辉,等,2011.一次致灾冰雹的超级单体风暴雷达回波特征分析[J].高原气象,30(6):1681-1689. Zhao J R, Guo J Q, Yang J H, et al, 2011. Analysis on radar echo characteristic of a supercell storm disaster hail[J]. Plateau Meteor, 30(6):1681-1689(in Chinese).
- 赵庆云,傅朝,刘新伟,等,2017.西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征[J].高原气象,36(3):697-704. Zhao Q Y, Fu C, Liu X W, et al, 2017. Characteristics of mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over Northwest China[J]. Plateau Meteor, 36(3):697-704(in Chinese).
- 郑艳,李云艳,蔡亲波,等,2014.海南一次罕见强冰雹过程环境条件与超级单体演变特征分析[J].暴雨灾害,33(2):163-170. Zheng Y, Li Y Y, Cai Q B, et al, 2014. Analysis of environment condition and supercell evolution for a rare severe hail weather event in Hainan[J]. Torr Rain Dis, 33(2):163-170(in Chinese).
- 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. Zhen Y Y, Zhu H F, Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor, 28(3):617-625(in Chinese).
- 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. Zhou H F, Diao X G, Xia W M, et al, 2014. Analysis of the tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe Region [J]. Acta Meteor Sin, 72(2):306-317(in Chinese).
- 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. Zhu J S, Liu J, Bian Z, et al, 2015. Analysis of cell merger and vortex signature during generation of tornado in Anhui based on Doppler radar observation[J]. Meteor Mon, 41(2):182-191(in Chinese).
- 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等,2006.强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(2):215-223. Zhu M H, Yu X D, Xia F, et al, 2006. Analysis on Strong hail storm three-body scattering signature using Doppler weather radar data[J]. J Appl Meteor Sci, 17(2):215-223(in Chinese).
- Amburn S A, Wolf P L, 1997. VIL density as a hail indicator[J]. Wea Forecasting, 12(3):473-478.
- Browning K A, 1962. Cellular structure of convective storms[J]. Meteor Mag, 91(1085):341-350.
- Donaldson R J Jr, 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 9(4):661-670.
- Goodman S J, Buechler D E, Wright P D, et al, 1988. Lightning and precipitation history of a microburst-producing storm[J]. Geophys Res Lett, 15(11):1185-1188.
- Lemon L R, 1998. The radar "three-body scatter spike": an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2):327-340.
- Weisman M L, Rotunno R, 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics[J]. J Atmos Sci, 57(9):1452-1472.
- Wilson J W, Reum D, 1988. The flare echo: reflectivity and velocity signature[J]. J Atmos Oceanic Technol, 5(2):197-205.
- Zrnić D S, 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value[J]. Radio Sci, 22(1):76-86.