

刘晓璐, 范思睿, 汪俊, 等. 龙门山脉东麓一次强风暴灾害气象特征分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 102–110. [LIU Xiaolu, FAN Sirui, WANG Jun, et al. Analysis on Meteorological Characteristics of a Strong Storm Disasters in the Eastern Foot of Longmen Mountain [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 102–110. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.019.]

龙门山脉东麓一次强风暴灾害气象特征分析*

刘晓璐^{1,2}, 范思睿^{1,2}, 汪 俊³, 徐成勇⁴

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 2. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 3. 绵阳市气象局, 四川 绵阳 621000; 4. 德阳市人工影响天气办公室, 四川 德阳 618000)

摘 要: 利用常规加密地面观测资料、L波段探空资料及多普勒天气雷达资料, 对2016年5月5日傍晚发生在德阳什邡市的一次强降水超级单体风暴进行了综合气象分析。风暴发生前的垂直探空资料显示出整层大气非均匀结构、中层蜂腰结构、风场整体顺滚流、对流层顶超低温等特征; 多普勒雷达观测显示, 风暴右前侧出现V型缺口, 风暴中层出现有界弱回波区, 中气旋从中层向高层及低层发展等强降水超级单体特征; 垂直累积液态含水量与垂直累积液态含水量密度的演变特征对于冰雹云的形成与衰减、强降水的产生及地面大风有较好的指示作用。

关键词: 强风暴; 灾害; 强降水超级单体; 多普勒雷达; 冰雹; 短时强降水; 中气旋; 龙门山脉东麓

中图分类号: P458; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)01-0102-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.019

超级单体是一种具有特殊结构的单体强雷暴, 比正常成熟雷暴的水平尺度要大得多, 云体中低层雷达回波的水平尺度可达几十公里, 维持时间可达几个小时, 常伴有强风、局地暴雨、冰雹、下击暴流甚至龙卷。Browning^[1]最早提出了超级单体的概念, 之后 Browning 等^[2-4]根据雷达资料得出超级单体的动力结构模型, 提供了一些识别超级单体的雷达回波特征。Donaldson^[5]首次利用多普勒雷达观测到了超级单体中的中气旋, Browning^[6]重新定义超级单体为具有中气旋的对流单体。Lemon 等^[7]根据多普勒雷达观测资料提出了新的超级单体概念模型, 并沿用至今。Moller 等^[8]在观察了众多个例后提出超级单体有不同的形式: 经典超级单体(C, Classic Supercell)、弱降水超级单体(LP, Low Precipitation Supercell)、强降水超级单体(HP, High Precipitation Supercell)。本文研究的个例属于强降水超级单体。随着我国新一代天气雷达的布网, 我国许多学者对于超级单体做了分析研究, 国内对超级单体风暴的研究也较多, 冯晋勤等^[9]发现90%以上的超级单体中尺度气旋是与冰雹、雷雨大风、短时强降水等强对流天气相联系的; 俞小鼎等^[10-12]研究了龙卷和强降水超级单体风暴, 提出深厚持久的中气旋是超级单体最本质的特征; 吴芳芳等^[13-14]对强降水超级单体发

展的各个阶段雷达回波特征进行分析。

超级单体在雹云中所占比例仅10%, 其中有80%造成雹灾, 四川盆地的超级单体出现频率较少。2016年5月5日17:00-20:00龙门山脉东侧的德阳什邡市出现局地强降水和冰雹, 并伴有短时阵性大风和雷电, 农作物受灾面积上千公顷, 预计经济损失近亿元, 此次风雹灾害是由超级单体直接影响所致。为了进一步解释本次强对流天气过程的发展演变特征, 本文将试图通过利用各种气象观测手段, 对各种气象资料进行分析, 揭示本次强对流天气过程的气象特征, 寻找降雹天气的形成原因, 为今后出现同类型的冰雹天气的短时临近预报预警和及时有效开展人工防雹作业有着重要意义。

1 资料选取

雷达资料: 绵阳 CINRAD/SC 新一代天气雷达基数据资料, 仰角分别为0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°。探空资料: 温江探空站L波段探空秒数据。自动站资料: 区域气象站逐小时常规气象资料。

* 收稿日期: 2017-06-12 修回日期: 2017-08-10

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406032); 四川省气象局科研项目(2015-青年-01, 2015-青年-18)

第一作者简介: 刘晓璐(1983-), 女, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事研究方向为人工影响天气研究. E-mail: suoyingchuang@

2 天气概况

16: 00–20: 00 的全省累计降水量超过 40 mm 的气象站点共 5 个, 且均位于德阳什邡境内, 最大值 88.1 mm 出现在湔氐镇龙居寺村, 该 4 h 时段的降水量集中在 18: 00–19: 00 的 1 h 内, 由图 1 看出, 18: 00–19: 00 降水量超过 20 mm 以上站点达 6 个, 湔氐镇龙居寺村出现最大降水量 86.6 mm, 剩余 5 站分别为湔氐 63.4 mm, 湔氐镇龙泉村 54.1 mm, 冰川镇爆竹园村 44.9 mm, 冰川镇五马村 27.7 mm, 灵杰 20.6 mm, 分布在以湔氐镇为中心的 10 km 范围内, 强降水局地性、阵性特征明显。据民政部门的统计 18: 00–19: 00 什邡市的部分乡镇如湔氐、冰川、洛水和师古等地有降雹, 最大冰雹直径达 2~3 cm (图 1 中 ▲)。18: 00–19: 00 瞬时极大风速, 有 3 站达 6~7 级, 有 14 站达 4~5 级, 且强风站点集中在德阳什邡与成都彭州邻近地区 10 km 范围内。可见该次强对流天气造成的强降水、强风、强降雹的时间主要在 18: 00–19: 00, 空间集中在德阳什邡的沿山地区, 初步判定为中尺度强对流天气。

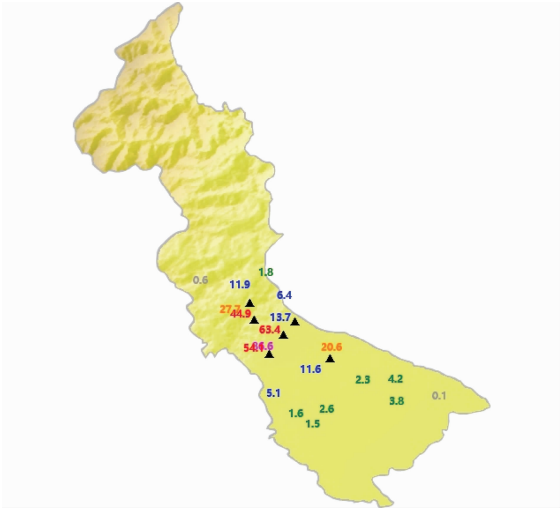


图 1 2016 年 5 月 5 日 18: 00–19: 00 德阳什邡降水 (单位: mm) 及降雹 (▲) 分布

3 大气物理量场特征

德阳什邡位于这次强对流天气发生的重灾区, 其西南方位 50 km 距离的温江探空站的探空曲线垂直分布变化可以反映本次强对流天气发生区上空的热力情况。

表 1 温江探空站物理参数

		2016-05-04	2016-05-05	2016-05-05	2016-05-06
		20: 00	08: 00	20: 00	08: 00
不稳定指数	CAPE 对流有效位能/(J/kg)	1583	317.8	2650	65.5
	CIN 对流抑制能量/(J/kg)	296.5	271.6	109	180.5
	K 指数/℃	25	38	40	34
	SI 指数/℃	0.79	0.74	-1.2	0.32
	LFC 自由对流高度/m	4848	3241	2233	4143
特殊温度层高度	0℃高度/m	5022	5039	4905	4499
	-10℃高度/m	6151	6258	6292	6302
	-20℃高度/m	7578	7528	7726	7932
	-30℃高度/m	8813	8839	8975	9312

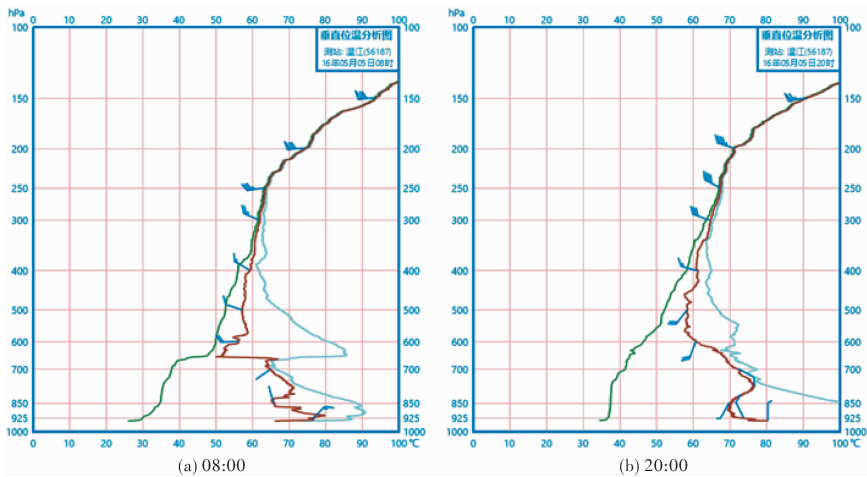


图 2 2016 年 5 月 5 日 08: 00 及 20: 00 的温江探空站 V-3θ 图 (绿色 θ 线, 黄色 θ_{se} 线, 蓝色 θ_{sc} 线, 单位: °C)

由表 1 的温江探空站常用强对流参数看出, 对流有效位能 CAPE、对流抑制能量 CIN、K 指数、SI 指数在 2016 年 5 月 5 日 08:00 并未显示出明显的强对流特征, 20:00 的参数值则有较好的强对流特征, 但此时正是强对流发生时, 可见这些参数对于 12 h 间隔的预报不具有优势, 由于降雹多发生在午后, 如果增加 14:00 的探空加密观测或许可以弥补这一缺憾, 这正与廖晓农等^[15]的研究结果一致。

V- θ 图是用单站探空资料计算绘制出的垂直方向上的二维图, 纵坐标表示气压的对数, 横坐标表示温度, V 是探空资料中的风矢量, 含有风向、风速, θ 则分别是 θ (位温)、 θ_{se} (以露点计算的假相当位温)、 θ_{se}^* (饱和状态下的假相当位温)^[16]。目前一些研究^[17-19]利用 V- θ 图, 从大气结构均匀性、滚流、超低温等 3 方面对大气垂直结构变化特征进行分析, 对于灾害性天气的预报具有较好的指导作用。

由图 2 的 V- θ 图看出 2016 年 5 月 5 日 08:00, θ 线在 850 hPa、500 hPa、400 hPa 附近出现折拐, 特别是高层的左倾显著, 表明热力不稳定。 θ_{se} 与 θ_{se}^* 在二条曲线配置情况看, 地面~925 hPa 二者均随高度增加而增加, 表明近地层存在逆温层, 层结稳定, 有利于不稳定能量累积; θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在 850~630 hPa 出现一致折拐, 该层之间存在不稳定层结。

θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在 800~630 hPa 小于 5℃, 水汽充沛; 640~500 hPa 两线温差 10℃~30℃, 空气干燥; 400 hPa 以上两线靠近, 整层大气水汽充分。这种上下干, 中间湿的蜂腰结构表明水汽分布极不均匀, 有利于冰雹强对流天气的形成。

地面~850 hPa 风向逆时针旋转, 有冷平流, 700~400 hPa 风向随高度顺时针旋转, 有暖平流, 有利于强对流天气发生; 从风速上看, 700 hPa 为 0 m/s, 500 hPa 为 4 m/s, 300 hPa 为 10 m/s, 250 hPa 为 13 m/s, 说明温江探空站上空垂直风切变大, 上层强风抽吸下层气流, 促进上升气流的发展, 这种强垂直风切变有利于强对流天气的发生和发展, 是出现超级单体的必要条件。除了 300~250 hPa 为一层浅薄的逆滚流, 700~300 hPa、250~150 hPa 均为顺滚流, 配合当时的 θ 非均匀结构, 预示着未来 24 h 之内将有强对流天气发生。

在对流层顶附近, θ 线在 197~183 hPa 出现明显左倾的折拐特征, 表明在该高度层即 12.5 km 左右存在超低温层。超低温现象有利于过冷水滴移到了什邡中部。回波面积与体积逐步发展增强, 在 16:14-16:39 及 16:49-17:00 内回波发展

的存在, 促进雹胚成长为冰雹, 为冰雹的形成提供有力的温度条件。地面增温加热, 对流层上层降温冷却, 将会导致对流层大气的热力结构不均匀, 加剧垂直方向的空气运动, 从而促使对流发展, 同时加大了低层水汽向中高层输送。

2016 年 5 月 5 日 20:00 的探空图上看, θ 线随高度升高出现多个高度与 T 轴近乎垂直, 折拐现象在多个层次交替出现; θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在地面~500 hPa 之间多个高度层出现明显左倾, 非均匀特征明显。

θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在地面~850 hPa 差值为 30℃, 且在 730~630 hPa 差值小于 5℃, 630~500 hPa 差值超过 10℃, 形成蜂腰特征, 这种低层和高层湿、中层干的结构有利于强对流的形成, 不过这种水汽的不均匀的强度较 08:00 已减弱。

700~250 hPa 顺滚流, 250~150 hPa 逆滚流, 逆滚流层较 08:00 增高、加厚。

θ 线在 200 hPa 有左倾折拐, 超低温层较 08:00 更加浅薄且降低到 12.2 km, 超低温层有厚度减弱的趋势。

由此可见, 整层大气非均匀结构方面, 降雹前 θ 线在高层有明显左倾, θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在中层与低层出现不规则折拐, 降雹后蜂腰特征明显减弱。风场结构方面, 降雹前整体层顺滚流, 降雹后逆滚流增厚。降雹前对流层顶附近有超低温现象, 降雹后超低温层厚度减少, 高度降低。

4 雷达回波特征

选取距离什邡湔氐 75 km 的绵阳雷达资料, 对照文献^[11]的标准, 可以判定 3.4°仰角、4.3°仰角、6.0°仰角在什邡湔氐上空的高度分别为 5.4 km、6.6 km、8.9 km, 对照表 1 中 2016 年 5 月 5 日 08:00 的特殊层高度发现分别超过 0℃层高度、-10℃层高度与 -30℃层高度。本文将结合特殊层温度、高度的垂直分布对此次超级单体的回波特征进行分析。

4.1 风暴演变的雷达回波特征

造成什邡湔氐镇发生冰雹、大风、强降水的超级单体起生成于德阳与成都交界的最北端, 靠近彭州一侧。

第一阶段: 风暴形成发展阶段。16:09 彭州与什邡北部交界区域北部出现强度超过 45 dBz 的小面积雷达回波区, 且最大回波值位于 6 km 以下, 之后对流单体逐步向东南方向发展, 并且由北端南较强, 45 dBz 回波超过 6 km, 但是没有继续向上发展超过 7 km, 超过 30 dBz 的回波面积由 16:09

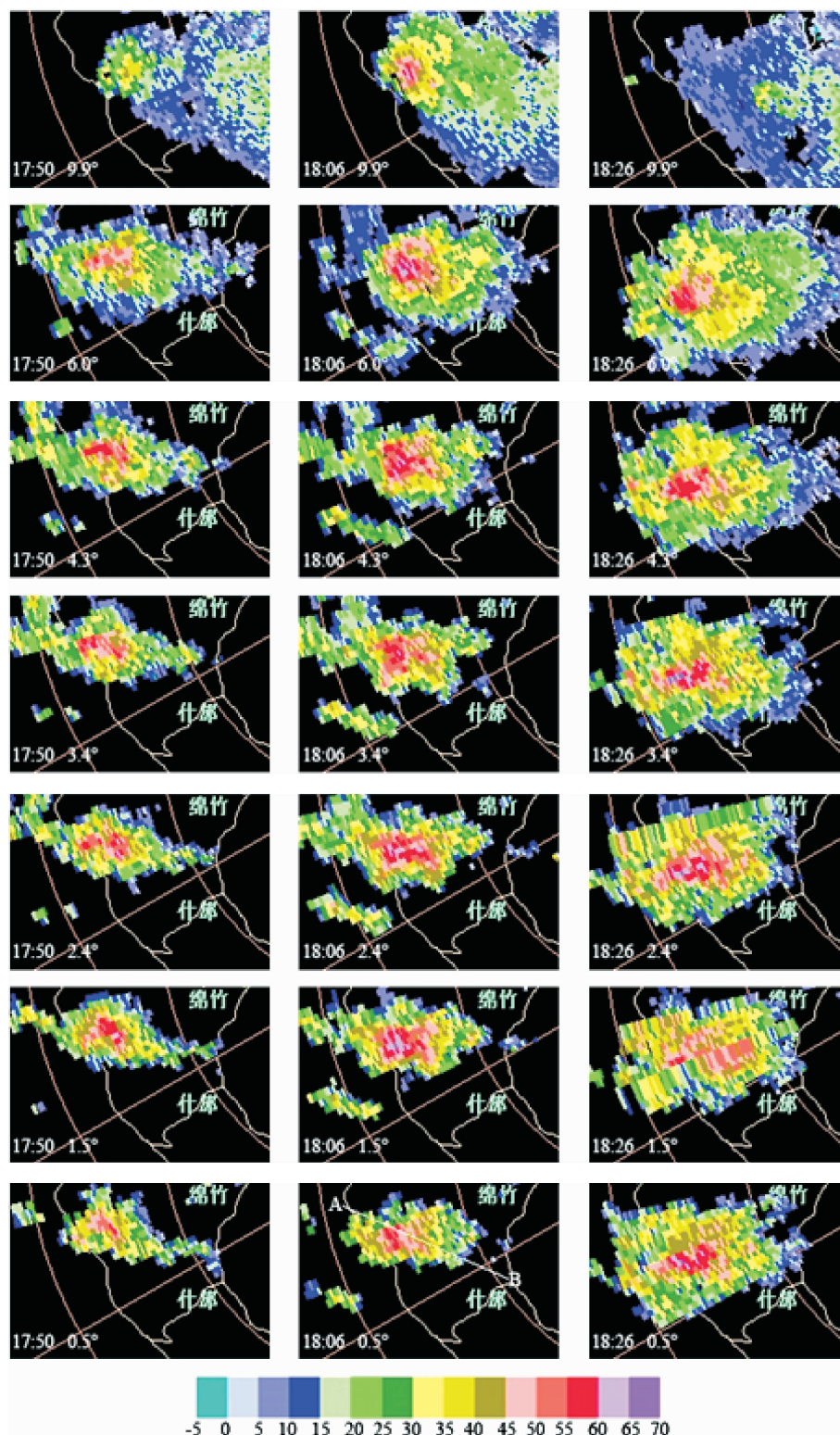


图3 2016年5月5日17:50、18:06、18:26不同仰角的雷达基本反射率(单位: dBz)

的 83 km^2 , 增长到了 17:20 的 136 km^2 , 为超级单体的酝酿能量。17:35 的 4.3° 仰角的雷达回波强度达 49 dBz , 说明此次体扫 45 dBz 的回波强度超过 -10°C 层高度, 之后的两个体扫时刻 17:40、17:45 在 4.3° 仰角回波强度达 52 dBz 、 58 dBz , 同时 6° 仰角的回波强度也超过 50 dBz , 说明风暴

持续向上发展, 50 dBz 也超过 -30°C 层高度, 45 dBz 回波高度超过 -10°C 层高度的情况已持续 3 个体扫, 冰雹预警指标已经达到阈值^[20]。

第二阶段: 风暴成熟阶段(图3)。17:50 回波面积和回波强度发展迅速, 2.4° 仰角回波强度超过 62 dBz , 6° 仰角回波强度超过 55 dBz , 向东南扩

展的云砧范围明显增大,并向中高层扩展,风暴顶位于低层高反射率因子梯度区之上,反射率因子向入流一侧倾斜,此时云体内风场开始变化,对流单体开始逐步发展为强风暴。17:55的 $0.5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 仰角最强回波均超过60 dBz, 9.9° 仰角回波强度也超过45 dBz,强回波面积较上一体扫明显增大。18:01强风暴持续发展, 9.9° 仰角回波强度超过55 dBz,回波顶高达20.4 km为该次风暴生命史中的最高值, 3.4° 仰角以上即5 km以上强回波中心向东侧倾斜。

18:06,风暴达到最强烈的超级单体阶段,虽然回波顶高较上一体扫回落到14.6 km,但是从低层 $0.5^{\circ} \sim 9.9^{\circ}$ 仰角回波强度均超过60 dBz,强中心回波在 6° 仰角达68 dBz的强回波, 9.9° 仰角约15 km高处的回波强度达到62 dBz。 0.5° 与 1.5° 仰角反射率因子出现明显V型缺口(FFN),由于风暴此时依然为向东南方向移动,因此该V型缺口位于风暴移动风向的右前侧,此时已经可以判定该超级单体为强降水超级单体。在 3.4° 仰角的V型缺口中心包围着强度最小为22 dBz的小范围弱回波,风暴顶移出低层高反射率因子梯度区而位于弱回波区上空,沿风暴移动方向并穿过风暴反射率因子核心(图3AB直线)做垂直剖面图(图4)看出强回波中心下方的5 km附近存在一个有界弱回波区(BWER),强度仅27 dBz,其右侧出现明显悬垂结构,其左侧出现从地面到高空的强大回波墙,超级单体概念模型特征显著。强反射率因子(60 dBz)达到的高度超过12 km,结合图2的超低温层高度分析,可以推测冰雹粒子的形成高度为12.5 km。

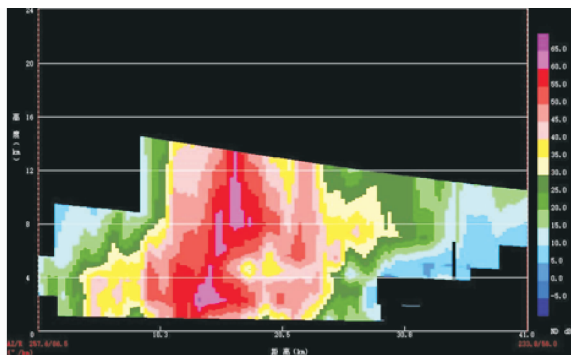


图4 沿图3中AB线反射率因子垂直剖面(单位: dBz)

18:11具有非常明显的V型缺口特征,风暴单体移动前侧V型缺口回波表明强的入流气流进入上升气流,后侧V型缺口回波表明强的下沉气流,18:08滴氏气象站观测到15.6 m/s的地面强风也可以印证这一特征。在 $1.5^{\circ} \sim 2.4^{\circ}$ 仰角强回波两侧出现旁瓣回波, 2.4° 仰角回波强度达到整个超级单体生命史最强值69.5 dBz,可以推测风暴中

的大冰雹粒子由上一次体扫的9 km 降落到3.5 km,不仅反射率因子核心陡然下降, 9.9° 仰角回波顶的强度从此逐步减弱。18:26风暴顶位于低层反射率因子区域中心上空,反射率因子从低层到高层倾斜特征消失,低层反射率因子四周梯度均匀, 0.5° 仰角反射率达64 dBz,此时对应地面的师古站观测到该时段内最强风速达16.3 m/s,表明强下沉气流已经到达地面。低层具有持续丰沛的水汽是强降水发生的重要因素。18:56回波强度持续减弱,风暴西侧出现新回波单体,形成带状回波向西移动。18:16-19:01最强回波中心仅出现在低层的 1.5° 与 2.4° 仰角0.6~1.5 km高度,此时超级单体风暴为低质心系统,这种低质心系统常常伴随强降水,可推断低层的强回波是造成短时强降水的重要特征。

第三阶段:风暴消亡阶段。21:00之后,回波几乎消失,此次风暴过程结束,整个生命史达5 h,超级单体生命史为1.5 h。

4.2 中气旋特征

国外在对超级单体风暴的研究中建立了超级单体风暴的回波结构及径向速度特征的模型和相应中气旋的判别指标,本文依据美国Oklahoma州中气旋统计为基础,利用相关判据^[11]对中气旋进行识别分析。此外,中气旋是相对风暴而言的,即把风暴看作静止时的径向速度图,考虑到风暴运动速度的影响,因此本文中气旋识别通过风暴相对速度产品判断。

17:45在 3.4° 仰角4.5 km上首先出现气旋旋转, 4.3° 仰角上负速度区内出现小范围正速度的逆风区,其他仰角未出现旋转特征,中气旋判定条件未达成。17:50在 1.5° 仰角辐合, 2.4° 及 3.4° 仰角辐合性旋转, 4.3° 仰角5.3 km出现小范围双涡式旋转特征, 6.0° 仰角7.1 km上出现逆风区, 9.9° 仰角出现辐散。结合反射率因子可见,低层辐合,中层旋转,高层辐散的特征形成时刻与反射率因子随高度的出现倾斜的时刻相一致。

18:01低层辐合气流抬升到 1.5° 、 2.4° 仰角上, 9.9° 仰角辐散加强, $3.4^{\circ} \sim 9.9^{\circ}$ 仰角上出现中气旋,中气旋厚度达7 km,垂直尺度超过整个风暴的三分之一。核区直径5 km,旋转速度分别为28 m/s、40 m/s、38 m/s、33 m/s,达中等强度中气旋标准。中气旋核区直径缩小,转动速度加大,中气旋进一步发展对流单体进入成熟阶段。

18:06(图5)在 1.5° 仰角上出现气旋性旋转; 2.4° 仰角上出现反气旋性旋转; $3.4^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 仰角上出现双涡式旋转特征; 9.9° 仰角上负速度区中出现正速度的逆风区,整体呈现辐散特征。 6.0° 仰角反

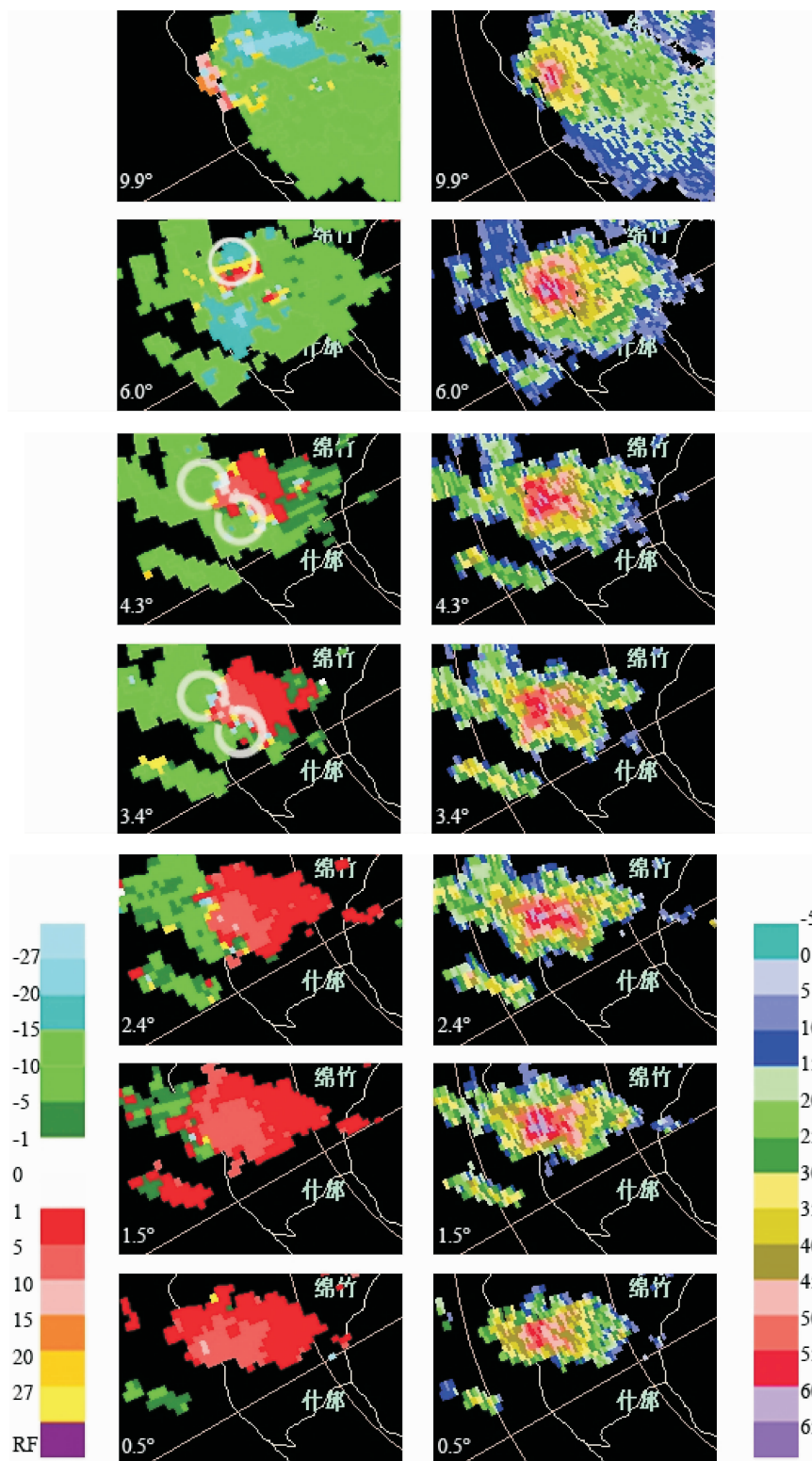


图5 2016年5月5日18:06不同仰角的风暴相对径向速度(单位: m/s)和基本反射率(单位: dBZ)

气旋旋转速度 45 m/s, 达强中气旋标准, 超级单体进入强盛阶段。18:00 左右地面出现密集的降水, 18:08 滴氏出现 15.6 m/s 的地面强风。3.4°、4.3°仰角上的双涡式旋转特征显著, 即在风暴右前侧存在气旋性旋转上升气流, 右后侧存在反气旋性旋转下沉气流。下沉气流在地面风暴后部增强

冷空气堆, 与前方暖湿气流辐合上升, 产生垂直结构的主上升气流, “托住”大粒子增长而产生回波穹窿。大冰雹粒子成长区的底部位于双涡式旋转气流的中上层, 顶部延展到双涡式旋转气流顶层至辐散层的过渡区^[21]。这种深厚的内部环流结构可与环境风相持, 形成近似刚体的风暴柱, 外

层环境风绕过风暴而过,不会吹穿风暴,使风暴得以维持^[22]。

18:11后,反射率因子核心的下降,高层和低层的中气旋旋转速度减弱,中层旋转维持。18:16中气旋旋转半径进一步增大,旋转速度减小,到18:26中层双涡式结构消失,0.5°仰角上旋转速度为39 m/s,此时对应地面的师古站观测到该时段内最强风速达16.3 m/s,表明强下沉气流已经到达地面。中气旋消亡阶段以中气旋的高度迅速降低为开始,并且其旋转速度不断减小,并且低层通常伴有辐散气流。

此次中气旋生命史超过30 min,这与超级单体风暴具有一个持久深厚的中气旋流场结构密切相关,成熟的中气旋流场结构显示出:低层为气旋性辐合,中层为气旋性旋转,高层为辐散,是一个与强对流风暴的上升气流和后侧下沉气流紧密相联系的、持久深厚的小尺度涡旋。风暴减弱阶段,中气旋向低层发展,强烈的旋转下沉气流导致地面出现灾害性强风天气^[23]。

4.3 垂直累积液态含水量与垂直累积液态含水量密度特征

Greene等^[24]提出的一种用来判断对流风暴强度的参量,垂直累积液态水含量(Vertically integrated liquid,简称VIL),其定义为液态水混合比的垂直积分,反映降水云体在某一底面积的垂直柱体内液态水总量,成为判别强冰雹等灾害性天气有效参量之一。根据美国Oklahoma州的统计^[25],出现大冰雹的VIL阈值5月份为55 kg/m²,6~8月为65 kg/m²。但是鉴于VIL的阈值会随着季节、风暴顶高度和雷暴的最大VIL的变化而改变,Amburn等^[26]提出垂直累积液态含水量密度(Vertically integrated liquid density,简称VILD)的概念,其定义为垂直累积液态水含量与回波顶高度之比,经过大量个例研究得出:VILD值为3.5 g/m³对应着90%的强冰雹个例,并指出如果VILD超过4 g/m³,则风暴几乎肯定产生直径超过2 cm的强冰雹。国内外一些研究^[27-32]也表明VIL与VILD均对冰

雹预警具有指导意义。

图6看出从17:30-19:01的1.5 h内,VIL与VILD呈现先增加后减少再增加再减少的特征,在整个过程中有2次显著跃增。

在17:30-17:55期间,VIL呈现17:45前缓慢增加,17:45之后加速增加的两段式增长模式,VIL值增至46.54 kg/m²;而VILD以每个体扫约0.5 g/m³的速率从0.43 g/m³缓慢增加增至3.37 g/m³。到18:01,VIL减少至45 kg/m²,VILD减少至2.40 g/m³,VILD的陡降特征较VIL更明显,地面观测发现18:00左右发生降雹。18:06的VIL与VILD同时出现第一次明显跃增,VIL从45 kg/m²增至80.78 kg/m²增幅达1.79倍,VILD从2.40 g/m³陡增至5.88 g/m³增幅达2.45倍,超过了强冰雹预警值VIL>55 kg/m²,VILD>4 g/m³。到18:11,VIL与VILD同步陡降为60.26 kg/m²,4.45 g/m³,在18:08蒲氏出现的15.6 m/s的强风也说明由强烈的下沉气流拖曳冰雹降落。

18:16发生第二次跃增,VIL与VILD分别达到风暴过程的最大值84.88 kg/m²、6.26 g/m³。VIL在之后的4个体扫直到18:36,逐步减少至30.23 kg/m²。VILD到18:31陡降至2.80 g/m³,18:36微弱回升至2.96 g/m³,同时地面观测到18:20洛水发生降雹,18:26师古最大风速达16.3 m/s,可见VILD的陡降与降雹、地面强风出现的时间吻合,这种第一次降雹结束后VILD值不减反增,预示着第二次降雹更猛烈,风暴破坏力更强。18:41-19:01的VIL与VILD分别维持在22.54~25 kg/m²、2.37~2.67 g/m³,含水量均维持在较高水平。这种长时间保持的高含水量特征,是强降水发生的重要特征。

综上所述,在17:45-17:55期间,VIL的跃增特征较VILD明显,在此期间可提前发布冰雹预警,开展防雷作业。而17:55-18:01和18:16-18:21期间VILD的陡降特征较VIL明显,此时刻对应冰雹降落与地面强风形成,可以发布地面大风预警。

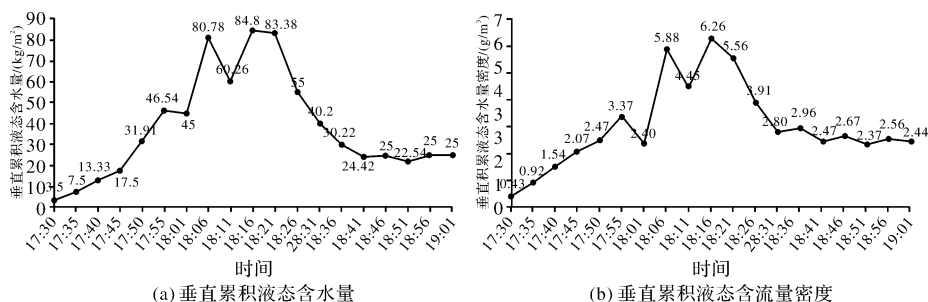


图6 2016年5月5日17:30-19:01的垂直累积液态含水量(单位: kg/m²)
及垂直累积液态含水量密度(单位: g/m³)

5 结论

(1) V-3 θ 图结构分析方法对本次强对流风暴过程有较好的指示作用, 降雹前 θ 线在高层有明显左倾, θ_{se} 和 θ_{se}^* 两条曲线在中层与低层出现不规则折拐, 降雹后中层蜂腰特征减弱。降雹前整体层顺滚流, 降雹后逆滚流增厚。降雹前对流层顶附近有超低温现象, 降雹后超低温层厚度减少, 高度降低。

(2) 本次强风暴出现强降水超级单体特征, 风暴在 18:06 发展鼎盛, 雷达回波强度图上出现明显 V 型缺口, V 型缺口位于风暴移动风向的右前侧, 反射率因子剖面图上出现典型有界弱回波区, 回波悬垂及回波墙。

(3) 超级单体中气旋从中层发展起来, 向上向下发展。中气旋出现双涡式结构特征, 在风暴右前侧存在气旋性旋转上升气流, 右后侧存在反气旋性旋转下沉气流。低层辐合, 中层旋转, 高层辐散的特征形成时刻与反射率因子随高度的出现倾斜的时刻相一致。

(4) 垂直累积液态含水量密度值的跃增-陡降时间与降雹和地面强风的时间吻合。VIL 的跃增特征较 VILD 明显, VILD 的陡降特征较 VIL 明显。VIL 与 VILD 最大值的演变特征对于冰雹云的形成与衰减及强降水的产生有较好的指示作用。

参考文献:

- [1] Browning K A. Cellular structures of convective storms[J]. Meteorological Magazine, 1962, 91: 341-350.
- [2] Browning K A, Ludlam F H. Airflow in convective storm[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 1962, 88: 117-135.
- [3] Browning K A, Donaldson R J. Airflow and structure for a tornadic storm[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1963, 20: 533-545.
- [4] Browning K A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1964, 21: 634-639.
- [5] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. Journal of Applied Meteorology, 1970, 9: 661-670.
- [6] Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms[R]. Boston: American Meteorological Society, 1977.
- [7] Lemon R L and Doswell C A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Monthly Weather Review, 1979, 107: 1184-1197.
- [8] Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. Weather and Forecasting, 1994, 9: 327-347.
- [9] 冯晋勤, 汤达章, 王新强, 等. 新一代天气雷达超级单体风暴中气旋特征分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6): 738-744.
- [10] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [11] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 90-180.
- [12] 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[J]. 大气科学, 2008, 32(8): 508-522.
- [13] 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 285-298.
- [14] 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 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, 2013, 71(2): 209-227.
- [15] 廖晓农, 俞小鼎, 谭一洲. 14 时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用[J]. 气象, 2007, 33(3): 30-34.
- [16] 欧阳首承, 陈毅刚, 林益. 信息数字化与预测[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [17] 欧阳首承, 谢娜, 郝丽萍. 突发性灾害天气的结构预测与应急对策[J]. 中国工程科学, 2005, 7(9): 9-13, 39.
- [18] 王若升, 董安祥, 樊晓春, 等. 溃变理论在西北地区冰雹天气预报中的应用[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 19-24.
- [19] 林文, 林长城, 陈彬彬, 等. 闽西北地区冰雹天气大气垂直结构特征[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 213-218.
- [20] 刘晓璐, 周长春. 川西南山地冰雹雷达预警指标[J]. 气象科技, 2016, 44(2): 252-258, 304.
- [21] 刁秀广, 杨晓霞, 朱君鉴, 等. 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, 2008, 27(3): 657-667.
- [22] 刁秀广, 朱君鉴, 刘志红. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析[J]. 气象学报, 2009, 67(1): 133-146.
- [23] 冯晋勤, 俞小鼎, 傅伟辉, 等. 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, 2012, 31(1): 239-250.
- [24] Greene D R and R A Clark. Vertically integrated liquid water - A new analysis tool[J]. Mon Wea Rev, 1972, 100: 548-552.
- [25] 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩, 等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 456-464.
- [26] Amburn S A and P L Wolf. VIL Density as a Hair Indicator[J]. Weather and Forecasting, 1997, 12: 473-478.
- [27] Winston H A, L J Ruthi. Evaluation of RADAP II severe storm detection algorithms[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986, 61(2): 142-150.
- [28] 郭艳. 江西一次突发性局地强对流天气的雷达回波特征分析[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(1): 30-37.
- [29] 应冬梅, 许爱华, 黄祖辉. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(3): 48-53.
- [30] 李湘, 张腾飞, 胡娟, 等. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 88-93.
- [31] 刁秀广, 朱君鉴, 黄秀韶, 等. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1131-1139.
- [32] 覃靖, 潘海, 刘蕾, 等. 桂北地区强冰雹的雷达临近预警指标分析[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 159-164.

Analysis on Meteorological Characteristics of a Strong Storm Disasters in the Eastern Foot of Longmen Mountain

LIU Xiaolu^{1,2}, FAN Sirui^{1,2}, WANG Jun³ and XU Chengyong⁴

(1. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China*; 2. *Sichuan Weather Modification Office, Chengdu 610072, China*; 3. *Mianyang Meteorological Service, Mianyang 621000, China*; 4. *Deyang Weather Modification Office, Deyang 618000, China*)

Abstract: Using surface observation data, sounding data and Doppler radar data, the high precipitation supercell storm occurred in Deyang Sichuan Province in the night of 5 May 2016 is analyzed in detail. The sounding data before the storm show some severe convective weather characteristics such as heterogeneous structure through the whole atmosphere, wasp waist structure in the middle layer, roll-flow wind field in the almost layers and cooling layer at the troposphere. Storm possesses a inflow V-notch, bounded weak echo region (BWER) at middle level and mesocyclone which develops from middle level to low level and high level. The evolution of vertically integrated liquid and vertically integrated liquid density are a significant signal to the formation and attenuation of hails which accompanied by heavy rain and surface gale.

Key words: strong storm; disaster; high precipitation supercell; Doppler radar; hail; short-time strong rain; mesocyclone; eastern foot of Longmen mountain

(上接第 101 页)

Reconstruction on Flood Disaster in Ganjiang River and Characteristic Diagnosis for the Last 130 Years

WAN Zhiwei, ZHOU Yan, JIA Yulian, LENG Xue, LI Xiaofeng and CAO Xiangming

(*Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*)

Abstract: It is one of the important directions in the global change research that the reconstruction of time serial of paleoflood and the flood disaster events which can provide the basic data for regional drought forecast. In this research, fluvial floodplain deposition from GJ profile were processed to reconstruct the Ganjiang river flood event by ultra-high resolution recording for the last 130 years based on the time scale of AMS-¹⁴C + ¹³⁷Cs/²¹⁰Pb and a number of size indicators and parameters such as average particle diameter, median diameter, sand and coarse silt components, cumulative frequency curve and probability curve. With the ultra-high resolution recording, we can compare the abnormal flooding in Ganjiang river region to the sunspot and ENSO. The results show: the sediments of the Ganjiang River from the past 130 years have been stratified obviously, the grain size characteristics of the sediments in non-flood season are different from those in the flood season. So, 18 different sizes of flood disaster events had been identified. The results of MK test and cumulative anomaly analysis showed that there were two abrupt changes in 1954 and 1977; 1882-1911 and 1943-1977 are drought and flood fluctuations; 1911-1943 belong to flood more than drought and 1977-2014 belong to drought more than flood. Wavelet analysis shows that the period of drought and flood in Ganjiang river basin are 4 years, 16 years, 42 years and 74 years. The results of cross-spectrum analysis show that the period of drought and flood in Ganjiang river basin is related to the period of sunspot in 11 year scale, and it runs through the whole research period. The correlation between drought and flood cycle and ENSO events in the Ganjiang river basin on the 2-8 year scale is likely to be related to the 2-7 year cycle of ENSO.

Key words: River floodplain deposition; sediment size; flood disaster; event