

毕旭,徐军昶,杨亦典,等.两次下击暴流天气的环境背景及多普勒雷达特征[J].陕西气象,2021(5):1-8.

文章编号:1006-4354(2021)05-0001-08

两次下击暴流天气的环境背景及多普勒雷达特征

毕旭^{1,2},徐军昶³,杨亦典¹,郭庆元¹

(1. 西安市气象台,西安 710016;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 西安市公共气象服务中心,西安 710016)

摘要:利用西安地面自动观测站资料、MICAPS 资料和西安多普勒雷达资料对发生在陕西西安地区的两次下击暴流天气过程进行分析,结果表明:(1)2017 年 7 月 10 日下击暴流发生在伴有冷空气侵入的环境背景场中,中空垂直风切变弱,0~6 km 垂直风切变为 10 m/s,有弱的潜在不稳定能量;(2)2017 年 7 月 22 日的下击暴流发生在副热带高压西北侧高温高湿的环境中,由局地热力条件触发,0~6 km 垂直风切变为 6 m/s,垂直风切变弱,有中等强度的潜在不稳定能量;(3)7 月 10 日、7 月 22 日两次天气过程中下沉气流同位相叠加,造成地面产生更加有破坏性的灾害性大风;(4)下击暴流初生时,下沉气流导致对流体中高层整体对流减弱,反射率因子减小,当下沉气流产生导致中层径向辐合出现后,中层辐合增强后产生的补偿作用,使得对流体中径向辐合区上部的对流得以再次增强,反射率因子出现短时增大,并维持了对流体底层辐散下沉。

关键词:西安;下击暴流;多普勒雷达;中层辐合;反射率因子增强

中图分类号:P458:TN958.2

文献标识码:A

下击暴流是由对流体中的强下沉气流形成的。王秀明等^[1]、廖晓农等^[2-3]对产生下击暴流的环境条件进行了分析研究,发现绝大多数干型雷暴大风产生在对流有效位能较小但对流层中低层环境风垂直切变比较大的环境中,而湿型雷暴大风则多发生在热力不稳定的条件下。下沉对流有效位能和对流层低层环境大气温度垂直递减率明显增加并接近干绝热,这对即将到来的下击暴流具有指示意义。刘烈霜等^[4]认为缺少天气尺度系统的动力支持,单体对流被抑制,单体也快速崩塌,下沉运动迅速占据主导。在中国多普勒天气雷达观测网布设以来,国内专家做了大量多普勒雷达资料应用的分析研究。对超级单体风暴、多单体风暴、飚线风暴和弓形回波等产生的下击暴流多普勒雷达回波进行了广泛的分析,认为反射率因子核心下降、中层径向辐合区(MARC)、低层

辐散等特征回波^[5-11]可作为预警下击暴流的指示性回波特征。采用数值模式,对下击暴流的模拟取得了很好的进展。杜爱军等^[12]基于特征回波对下击暴流进行三维仿真模拟,肖艳娇等^[13]对中层径向辐合区特征设计了三维识别算法方案,孔凡铄等^[14]、孙凌峰等^[15]采用三维强风暴冰雹云分档模式对下击暴流进行数值模拟。李梦捷等^[16]采用 WRF 模式对下击暴流进行了模拟,对下击暴流产生的机理进行了深入分析探讨,为下击暴流的发生预报预警提供了很好的指导。本文将对 2017 年 7 月份发生在西安地区的两次下击暴流天气进行分析,以期为该类天气的预报预警提供参考。

1 天气过程实况

2017 年 7 月 10 日 12—18 时(北京时,下同),西安市及其上游地区出现了对流性天气。17:15—17:35 在西安市阎良区出现了大风,17:31 西安市

收稿日期:2019-09-16

作者简介:毕旭(1974—),男,陕西米脂人,学士,高工,主要从事预报预警及相关技术研发工作。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室重点基金课题(2019Z-8)

阎良区自动气象站(109.22°E, 34.66°N)观测到瞬时风速 32.8 m/s。2017 年 7 月 22 日 16:00—19:00, 西安市出现对流天气, 16:47 西安市灞桥区气象站(109.04°E, 34.32°N)最大瞬时风速 33.1 m/s。这两次大风天气持续时间短, 影响范围小, 均造成大树倒伏、建筑物损毁。

2 影响系统分析

2.1 地面影响系统

2017 年 7 月 10 日 08 时地面填图资料及海平面气压场分析图(图略)显示, 中国东北—华北—陕西关中地区为一冷锋, 西安处于冷锋前部。

2017 年 7 月 22 日 08 时地面填图资料及海平面气压场分析图(图略)显示, 四川—陕西为一热低压, 西安处于热低压中, 08—17 时热低压持续发展, 其中心海平面气压由 1 002.5 hPa 下降至 998.5 hPa 以下。

2.2 高空影响系统

2017 年 7 月 10 日 08 时 500 hPa 高空图(图略)上, 副热带高压在亚洲东部断裂为两部分, 东部位于西太平洋地区, 西部位于青藏高原及以西地区, 两高之间为宽广槽区, 西安处于槽后的偏北气流当中。温度槽落后于高度槽, 槽后冷舌伸展到西安地区, 中高层有冷空气南下入侵。10 日 08 时西安站(57131)探空图(图 1)显示, 850 hPa 及以下, 随着高度升高风向从西南风转为偏西风, 700~500 hPa 风速为 8~10 m/s 的西北风, 400 hPa 以上为较为一致的偏西风, 400 hPa 风速为 20 m/s。 $\Delta T_{(850-500)} = 35^\circ\text{C}$ 。0~6 km 垂直风切变约 10 m/s, 0~3 km 垂直风切变为 3 m/s, 垂直风切变弱。KI 指数为 18 $^\circ\text{C}$, SI 指数为 -1.68 $^\circ\text{C}$,

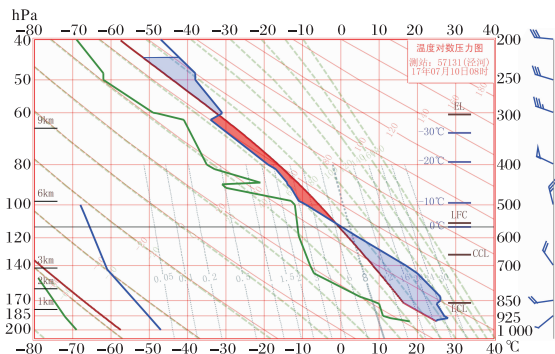


图 1 2017-07-10T08 西安站(57131)探空图

CAPE 值为 497.7 J/kg, 有弱的潜在不稳定能量, 有利于对流天气发生。低层 850 hPa 以下有逆温, 有利于不稳定能量的积聚。

2017 年 7 月 22 日 08 时 500 hPa 高空图(图略)上, 西太平洋及中国东部地区受副热带高压控制, 副热带高压西脊线伸展到 87°E 以西, 西安市处于副热带高压之中, 西安泾河探空站位势高度为 592 dagpm。

2017 年 7 月 22 日 08 时西安探空图(图 2)显示, 850 hPa 及以下, 随高度升高风向由偏东风转为西南风, 700~500 hPa 为 4~6 m/s 偏南风, 400 hPa 以上为一致偏东风。 $\Delta T_{(850-500)} = 26^\circ\text{C}$ 。0~6 km 垂直风切变为 6 m/s, 0~3 km 垂直风切变为 5 m/s, 垂直风切变弱。KI 指数为 42 $^\circ\text{C}$, SI 指数为 0.41 $^\circ\text{C}$, CAPE 值为 1 291.6 J/kg, 有中等强度的潜在不稳定能量。

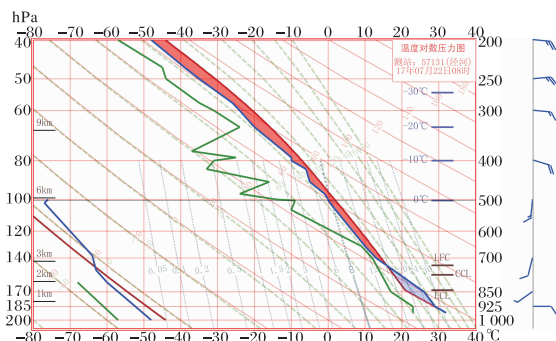


图 2 2017-07-22T08 西安站探空图

与文献[1-3]分析结果相比, 这两次下击暴流天气过程均发生在低层弱的垂直风切变环境中, 较为少见。

3 西安多普勒雷达回波特征

3.1 组合反射率因子

3.1.1 2017 年 7 月 10 日过程 10 日 12:22, 西安多普勒雷达组合反射率因子图(图略)上, 西安市阎良区北偏西方向 80~150 km 处开始有对流生成, 之后对流逐渐发展加强, 有单体不断生成、消散, 并逐渐向偏南方向移动; 16:26 对流体在持续向东南方移动过程中, 逐渐发展成一条西北—东南向长约 150 km 的发展旺盛的带状回波(图 3a 白色椭圆圈中); 之后带状回波逐渐减弱、断裂; 17:01 断裂的回波带中有反射率因子 ≥ 50 dBz

单体 A(图 3b 白色椭圆中)在 16:55—17:40 影响西安市阎良区,17:31 西安市阎良区观测站监测到 32.8 m/s 大风。统计 10 日 16:55—17:40 影响阎良区的单体 A 各仰角最大反射率因子,结果见表 1。17:01—17:06 一个体扫的时间内,单体 A 中 0.5°、1.5°仰角最大反射率因子迅速增大,且

大于 4.3°仰角的最大反射率因子,4.3°仰角最大反射率因子减小,反射率因子大值区域面积逐渐减少,表明单体 A 反射率核心下降。17:12 以后,各仰角最大反射率因子逐渐减小,反射率因子大值区域面积持续减少,表明单体 A 持续减弱。17:40 以后单体 A 逐渐消散。

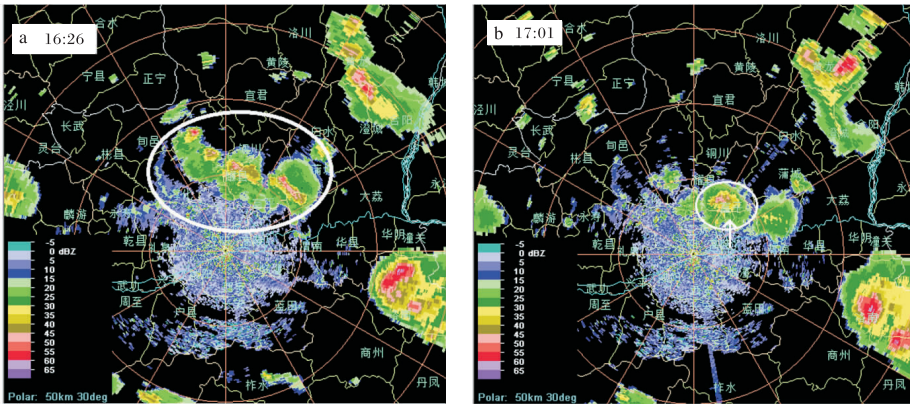


图 3 2017-07-10 西安多普勒雷达组合反射率因子(a 图中白色椭圆中为带状回波带;b 图中白色椭圆中为单体 A,白色箭头所指区域为阎良区)

表 1 2017-07-10 不同时刻西安多普勒雷达影响阎良区的单体 A 不同仰角最大反射率因子 单位:dBz

时刻	0.5°	1.5°	2.4°	3.4°	4.3°	6.0°	9.9°
16:55	38	43	53	53	53	43	48
17:01	48	53	48	53	48	43	43
17:06	53	53	53	53	48	43	48
17:12	48	48	48	53	48	48	43
17:18	48	48	48	48	48	43	43
17:23	43	43	43	43	43	38	38
17:29	38	43	43	43	43	38	38
17:35	38	38	38	38	38	38	33
17:40	33	33	33	33	33	33	33

3.1.2 2017 年 07 月 22 日过程 22 日 13:00 前后,西安南部秦岭山区受局地热力作用影响,逐渐有对流单体生成,生成的对流单体缓慢向东移动。15:29 对流单体东移过程中逐渐发展成弓形回波(图 4a 白色椭圆中),弓形回波的前方在局地热力作用下有新单体 1 生成(图 4a 白色箭头所指)。之后,单体 1 逐渐发展为东西向带状回波。15:58 弓形回波和其运动方向前部的带状回波开始交汇

合并,有反射率因子 ≥ 60 dBz 回波生成,交汇合并的对流体向北移动,其移动前方持续有新单体生成。16:21 前后在合并的回波北侧,有新单体 2 生成,16:32 单体 2(图 4b 中白色单箭头所指)中出现 ≥ 65 dBz 的强回波,16:47 单体 2 在西安市灞桥区产生 33.1 m/s 的地面大风。

15:58 以前弓形回波和前方的单体 1 发展形成的带状回波中一直有 ≥ 55 dBz 的强回波维持。15:58 回波开始交汇合并在一起,交汇合并的回波中 4.3°、6.0°仰角上出现 ≥ 60 dBz 的回波,并且出现了“三体”散射回波。16:03 合并的对流体各仰角反射率因子持续增大,对流增强。16:09 合并的对流体反射率因子核心开始下降,合并后的对流体中有下沉气流产生。16:15 交汇合并的对流体中 ≥ 50 dBz 的回波面积持续增大,0.5°仰角上出现 ≥ 60 dBz 的回波,14.6°仰角(高度 10.6 km)上最大反射率因子持续增大,出现 ≥ 40 dBz 的反射率因子。16:21 合并的对流体逐渐减弱,在其北侧,新生的单体 2 中反射率因子迅速增大,单体 2 中最大反射率因子 ≥ 55 dBz(表 2)。

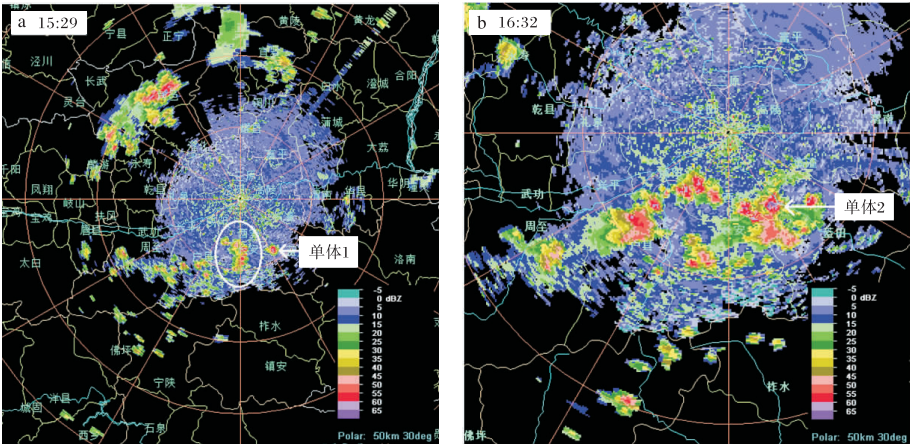


图 4 2017-07-22 西安多普勒雷达组合反射率(a 图中白色椭圆中为弓形回波, 白色单箭头所指为单体 1;b 图中白色单箭头所指为单体 2)

表 2 2017-07-22 不同时刻单体 2 各仰角最大反射率因子 单位:dBz

时刻	0.5°	1.5°	2.4°	3.4°	4.3°	6.0°	9.9°	14.6°	19.5°
16:21	无	无	无	无	15	40	≥55	40	无
16:26	无	无	无	48	58	58	63	63	58
16:32	53	58	58	58	58	≥65	≥65	≥65	53
16:38	53	58	58	58	63	≥65	≥65	≥65	58
16:43	58	63	63	63	63	63	≥65	58	53
16:49	58	63	58	58	58	≥65	≥65	≥65	58
16:55	58	58	63	63	63	≥65	63	≥65	58
17:00	58	63	63	63	63	63	63	63	58
17:06	63	63	63	63	63	63	63	63	58
17:12	63	58	58	58	58	58	63	58	58
17:17	53	53	53	58	58	58	58	53	38
17:23	53	48	48	48	48	48	48	53	33

16:32 单体 2(图 5 中白色双箭头所指,图 5 见第 5 页)中,各仰角反射率因子大值区面积持续增加,14.6°仰角上有“三体”散射回波(图 6h 中白色箭头所指,白色双箭头位于灞桥区)。

单体 2(表 2)中,16:38 4.3°仰角上出现≥60 dBz 的回波,14.6°仰角上出现“三体”散射,19.5°仰角上出现≥55 dBz 回波,对流增强。16:43 1.5°~3.4°仰角最大反射率因子≥60 dBz,14.6°仰角上三体散射回波消失。16:49 2.4~4.3°仰角上反射率因子≥60 dBz 的回波消失,6.0°、14.6°仰角最大反射率因子较 16:43 相同仰角的增大;17:00 以后各仰角最大反射率因子持

续减小,单体 2 对流减弱。

3.2 径向速度图特征

3.2.1 2017 年 7 月 10 日过程 10 日 17:01,单体 A 位于西安市阎良区以北地区,单体 A 中 0.5°、1.5°、2.4°仰角为明显辐散;3.4°仰角无明显辐合辐散;4.3°、6.0°仰角存在明显径向速度辐合,0.5°仰角最小径向速度为-20 m/s,表明单体 A 中已经有下击暴流产生。17:06,单体 A 中 0.5°、1.5°仰角辐散,2.4°仰角辐合辐散并存,3.4°~6.0°仰角辐合较 17:01 相同仰角的辐合明显增强,0.5°仰角最大径向速度为-20 m/s。17:12,单体 A 中 0.5、1.5°仰角为辐散,2.4°仰角

辐合辐散并存, $3.4^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 仰角为辐合, 0.5° 仰角最大径向速度为 -27 m/s, 表明单体 A 中有新的下击暴流产生。17:18, 单体 A 中 $0.5^{\circ} \sim 2.4^{\circ}$ 仰角上为辐散, $3.4^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 仰角上为辐合, 0.5° 仰角最大径向速度为 -27 m/s。17:23, 单体 A 中 $0.5^{\circ} \sim 2.4^{\circ}$ 仰角上为辐散, $3.4^{\circ} \sim 4.3^{\circ}$ 上为辐合, 0.5° 仰角下沉气流区中最大径向速度为 -27 m/s。

17:29(图6), 单体 A 中 0.5° 、 1.5° 仰角上均为辐散, 2.4° 、 3.4° 上为辐合辐散并存, 4.3° 、 6.0° 上为辐合, 0.5° 仰角出现了速度模糊区, 最大径向速度 < -27 m/s, 表明单体 A 中再次有新的下击暴流生成。17:35, 单体 A 中 $0.5^{\circ} \sim 2.4^{\circ}$ 仰角上为辐散, $3.4^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 仰角远离雷达一侧为明显辐合, 0.5° 下沉气流区中最大径向速度为 -20 m/s。

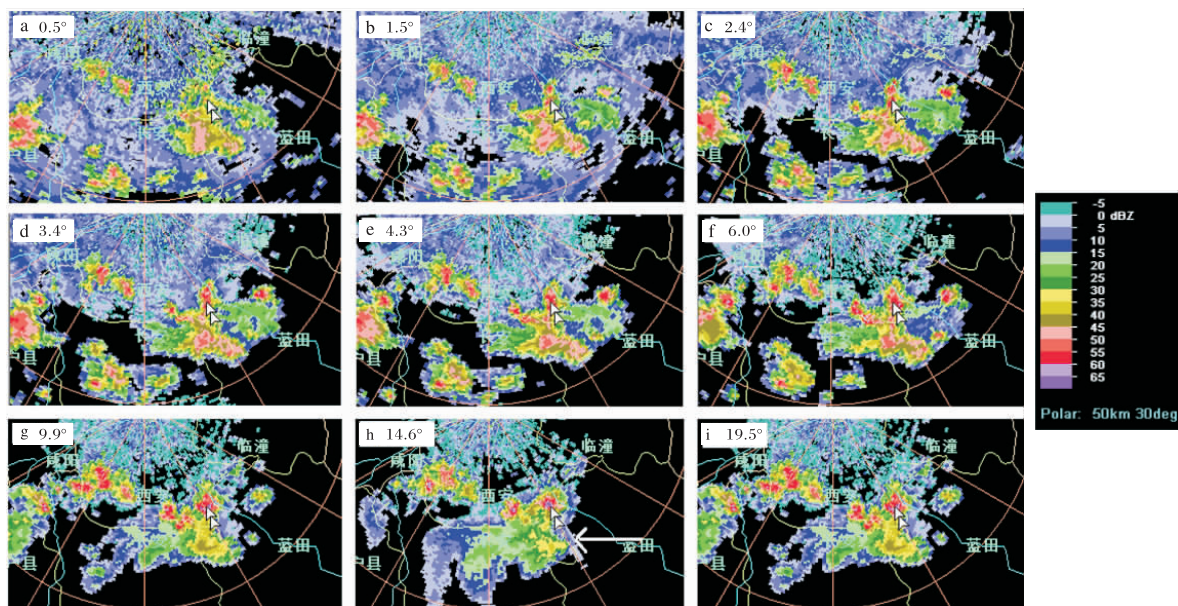


图5 2017-07-22T 16:32 西安多普勒雷达 $0.5^{\circ} \sim 19.5^{\circ}$ 反射率因子图(白色双箭头位于灞桥区)

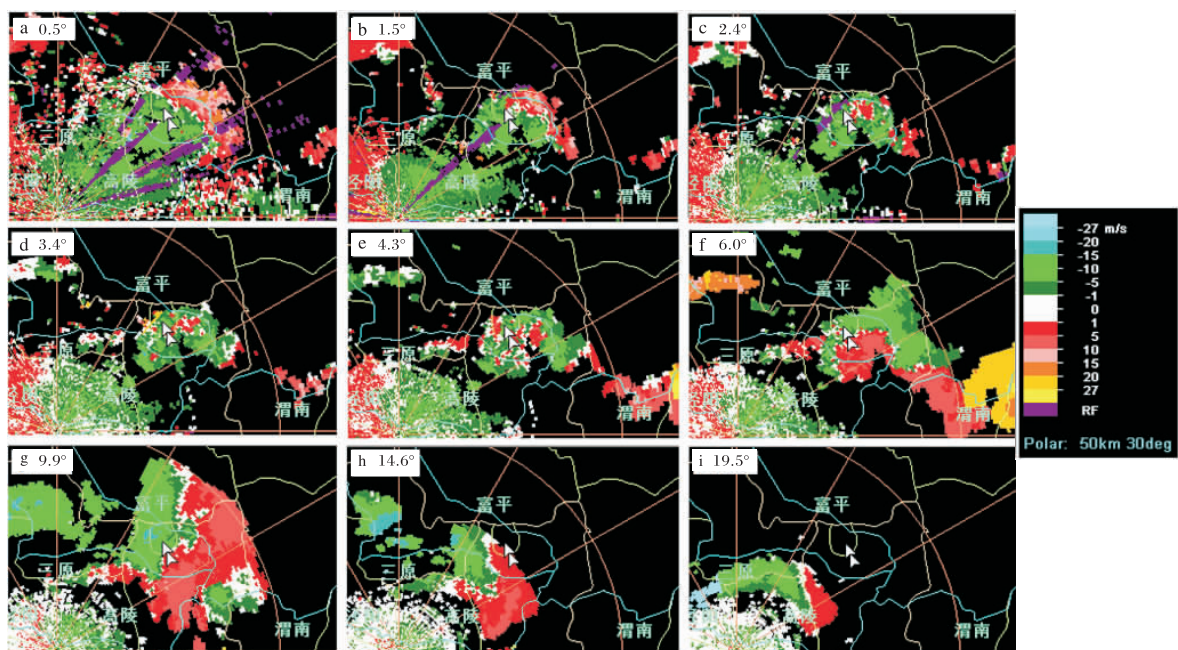


图6 2017-07-10T17:29 西安多普勒雷达 $0.5^{\circ} \sim 19.5^{\circ}$ 仰角径向速度图(白色双箭头位置为阎良区)

3.2.2 2017年7月22日过程 22日15:58合并前的弓形回波中,0.5°仰角上出现辐散,其余各仰角维持明显辐合。单体1中,0.5°仰角上有明显辐散(图7a,图7中所有白色双箭头为单体1),最大径向负速度 ≤ -10 m/s;1.5°~9.9°仰角上为辐合,表明弓形回波和单体1底层有下沉气流产生。合并的对流体中(图7中白色双箭头周边区域),16:03—16:21 0.5°仰角上辐散,最大径向负速度均 ≤ -20 m/s;16:26, 0.5°仰角上辐散,出现 -27 m/s的径向速度(图7f),下沉气流增强,表明此时合并的对流体中有下击暴流发生。

单体2中,16:32—16:38 0.5°仰角为辐散,最大径向负速度为 -15 m/s,3.4°~14.6°为辐合。16:43(图8,图8中白色双箭头位于灞桥区),0.5°仰角辐散,1.5°~14.6°仰角有中层径向辐合,0.5°仰角最大径向速度 ≤ -27 m/s,表明单体2中产生了下击暴流。16:49,0.5°仰角上出现纯辐散区域,辐散区域最大径向负速度 ≤ -27 m/s,1.5°、2.4°上为弱辐散,3.4°仰角上辐散辐合特征不明显,4.3°~19.5°(海拔高度为10.3 km)上为辐合。16:55,0.5°仰角上为辐散,最大径向负速度 ≤ -27 m/s,1.5°~3.4°上为辐散,4.3°~14.6°为辐合。

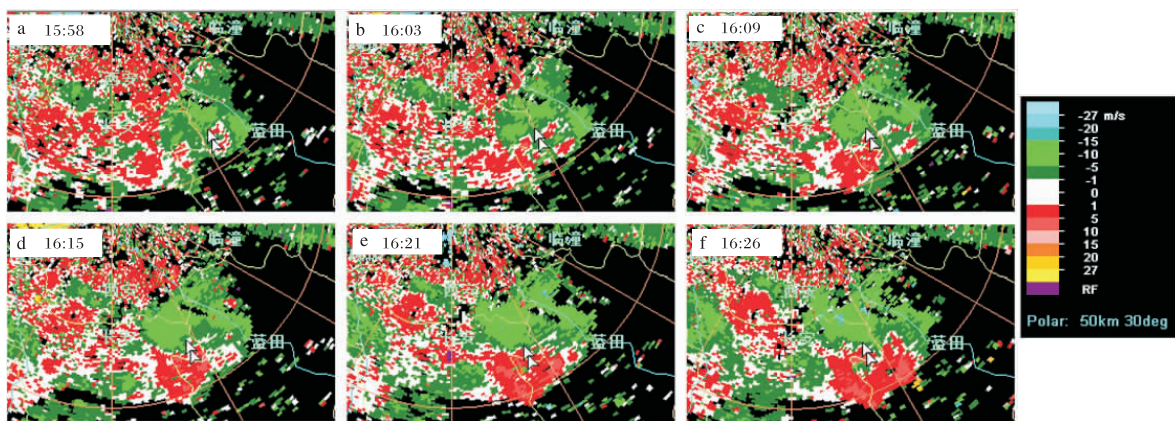


图7 2017-07-22T15:58—16:26 西安多普勒雷达 0.5°仰角径向速度图(白色双箭头位置为单体1)

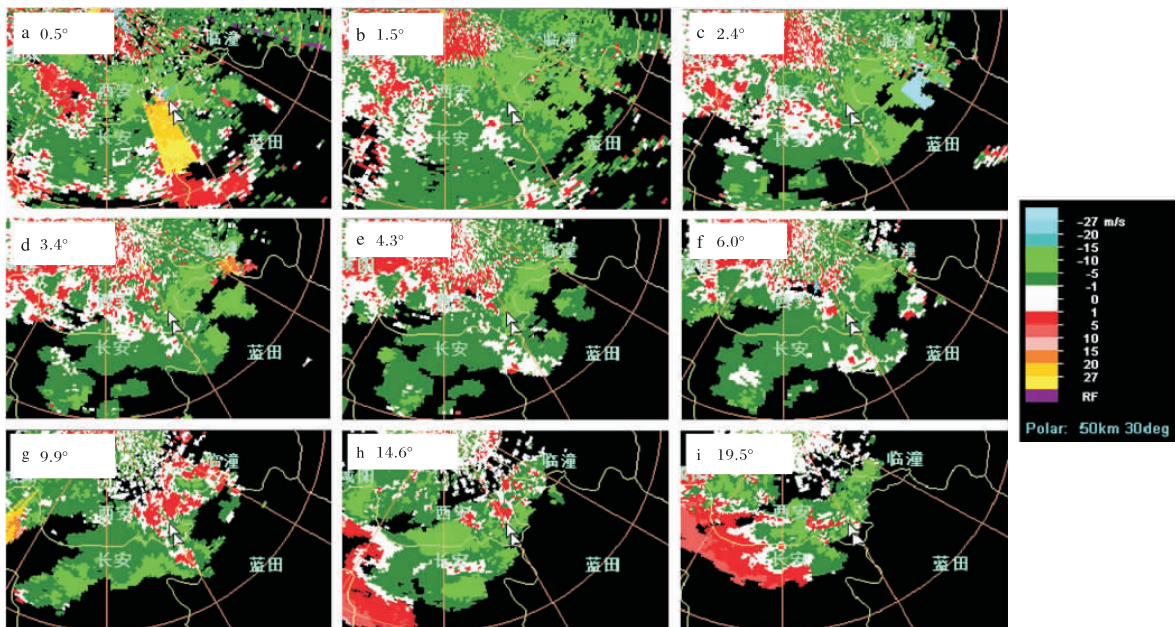


图8 2017-07-22T16:43 西安多普勒雷达 0.5°~19.5°仰角径向速度图(白色双箭头位于灞桥区)

3.3 回波顶高

3.3.1 2017年7月10日过程 如表3所示,10日16:55—17:23,单体A回波顶高维持在8 km左右,17:29—17:35维持在7 km左右,表明单体A中对流不是特别深厚。

3.3.2 2017年7月22日过程 如表4所示,22日16:21—16:32,单体2中雷达回波顶高数值增大,16:32—16:38维持,之后回波顶高数值减小,表明单体2中16:32以前对流迅速增强,16:43以后对流减弱。

表3 2017-07-10不同时刻西安多普勒雷达单体A最大回波顶高

时刻	16:55	17:01	17:06	17:12	17:18	17:23	17:29	17:35	17:40
高度/km	8	8	8	8	8	8	7	7	7

表4 2017-07-22不同时刻西安多普勒雷达单体最大回波顶高

时刻	16:21	16:26	16:32	16:38	16:43	16:49	17:00	17:06	17:12
高度/km	9	12	14	14	12	11	11	11	11

3.4 雷达资料综合分析

3.4.1 2017年7月10日过程 10日16:55之前,在回波带整体持续减弱过程中,单体A继续维持较强的对流。17:01以后单体A反射率因子核心下降,有下击暴流发生。17:12以后各仰角反射率因子最大值持续下降。单体A中0.5°仰角径向速度图上,17:01—17:06最大径向负速度为-20 m/s,17:12—17:23最大径向负速度≤-27 m/s,17:29出现速度模糊,最大径向负速度超过了一27 m/s,17:35—17:40最大径向负速度在(-15~-20) m/s,说明17:01、17:12、17:23前后有3次下击暴流产生。可以看出,在前期产生强下沉气流后,单体A维持较长时间,后期产生两次较强的下击暴流,为地面灾害性大风的形成及长时间维持提供了必要的动力补充,多次下击暴流形成的下沉气流同位向叠加,形成了更加有破坏性的灾害性大风。

分析17:12 6.0°仰角最大反射率因子较17:06增大的原因,可能是17:06前后反射率因子核心下降,中层径向辐合产生,中层径向辐合产生的补偿作用导致中层径向辐合区上部对流在短小时内加强,从而造成反射率因子增大。

3.4.2 2017年7月22日过程 分析各仰角反射率因子(表2),单体2中16:38 6.0°~14.6°仰角最大反射率因子≥65 dBz,19.5°最大反射率因子为58 dBz。16:43 6.0°~19.5°仰角最大反射率

因子均比16:38时偏小,16:49—16:55 6.0°~19.5°仰角最大反射率因再次增大。对应16:43径向速度图单体2中产生的下击暴流,表明单体2中下击暴流产生时,由于较强的下沉气流导致中高层最大反射率因子减小,并产生了中层径向辐合。中层辐合增强后,中高层最大反射率因子再次增大,同样说明中层辐合的加强起到补偿作用,有效抑制了中高层对流的减弱,使得中层径向辐合区上部的对流继续维持甚至再次增强,同时使得低层的下沉气流继续维持。

4 结论与讨论

(1)2017年7月10日阎良区下击暴流发生在高空槽影响系统中,700 hPa以上高空有冷空气侵入,0~6 km风切变较弱,潜在不稳定能量小。2017年7月22日灞桥区下击暴流发生在副热带高压影响系统中,没有冷空气侵入,0~6 km风切变弱,有中等强度的潜在不稳定能量,地面为热低压,局地热对流为触发机制。

(2)两次灾害性大风均是前期产生下击暴流或者下沉气流后,后期再次产生下击暴流后下沉气流同位相叠加,从而为地面产生更加有破坏性的灾害性大风提供了有利的物质和能量补充。下击暴流的同位相叠加会形成更加有破坏性的大风。

(3)下击暴流初产生时,下沉气流导致对流体中高层整体对流减弱,反射率因子减小。当下沉

气流产生导致中层径向辐合出现后,中层辐合增强后产生的补偿作用,使得对流体中径向辐合区上部的对流得以再次增强,反射率因子有短时的增大,同时补充维持了底层辐散下沉气流。

参考文献:

- [1] 王秀明,俞小鼎,周小刚,等. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象,2012,31(2): 504-514.
- [2] 廖晓农. 北京雷暴大风日环境特征分析[J]. 气候与环境研究,2009,14(1):54-62.
- [3] 廖晓农,俞小鼎,王迎春. 北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J]. 高原气象,2008,27(6): 1350-1362.
- [4] 刘烈霜,刘贵萍,刘开宇,等. 一次下击暴流个例的诊断分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2012, 34(S1):33-38+42.
- [5] 李改琴,吴丽敏,许庆娥,等. 一次下击暴流天气特征分析[J]. 气象与环境科学,2016,39(3): 60-67.
- [6] 毕旭,罗慧,刘勇. 陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J]. 气象,2007,33(1):70-73.
- [7] 吴举秀,周青,杨传凤,等. 2015年7月14日阵风锋及锋后大风多普勒天气雷达产品特征分析[J]. 高原气象,2017,36(4):1082-1090.
- [8] 王俊,盛日锋,陈西利. 一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究Ⅱ:双多普勒雷达反演三维风场分析[J]. 高原气象,2011,30(4):1078-1086.
- [9] 王俊,龚佃利,刁秀广,等. 一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究Ⅰ:以单多普勒雷达资料为主的综合分析[J]. 高原气象,2011,30(4):1067-1077.
- [10] 刁秀广,赵振东,高慧君,等. 三次下击暴流雷达回波特征分析[J]. 气象,2011,37(5):522-531.
- [11] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006,17(4):385-393.
- [12] 杜爱军,魏鸣,王炳赟. 下击暴流的三维仿真和回波特征分析[J]. 灾害学,2015,30(2):186-192+ 234.
- [13] 肖艳姣. 基于多普勒天气雷达体扫资料的 MARC 特征自动识别算法[J]. 高原气象,2018,37(1): 264-274.
- [14] 孔凡铀,黄美元,徐华英. 微下击暴流的数值模拟[J]. 大气科学,1994,18(1):11-21.
- [15] 孙凌峰,郭学良,孙立潭,等. 武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究[J]. 大气科学,2003, 27(6):1077-1092.
- [16] 李梦婕,申双和,李雨鸿,等. 北京一次下击暴流的三维数值模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2013, 7(6):22-29.