

冯桂力, 王俊, 牟容, 等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 68-74.

一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析^{* 1}

冯桂力¹ 王 俊² 牟 容³ 刘冬霞⁴

1 山东省气象科学研究所, 济南 250031

2 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

3 重庆市气象台, 重庆 401147

4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

提 要: 2005 年 6 月 21 日山东北部出现了一次中尺度对流系统, 并伴有地面灾害性大风。作者综合闪电定位资料、雷达和卫星资料详细分析了这次中尺度对流系统的闪电活动特征, 结果表明, 在系统初始发展阶段地闪频数快速增加, 成熟阶段地闪频数一直较高, 且都在 20 次/5 min 以上, 在减弱消散阶段, 正地闪比例超过负地闪。负地闪多发生在对流降水区, 而正地闪则对应于稳定的层状云降水区。逐小时地闪次数峰值滞后于云顶最低温度峰值, 小于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云覆盖面积峰值滞后于地闪次数峰值。这次地面大风主要是较强下沉气流底部外流造成的, 利用 WINDEX 计算的地面最大风速潜势与观测的阵风值非常接近。地面大风阶段对应着剧烈的闪电活动, 地闪频数的跃增略提前于地面强风发生时间, 这对灾害性天气过程的监测预警具有一定的参考价值。

关键词: 中尺度对流系统, 地闪, 灾害性大风, 多普勒雷达

Characteristics of Lightning Activity in a Thunderstorm with Damaging Straight-Line Wind

FENG Guili¹ WANG Jun² MU Rong³ LIU Dongxia⁴

1 Shandong Research Institute of Meteorology, Jinan 250031

2 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

3 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: One severe mesoscale convective system with damaging straight-line wind occurred on 21 June 2005 in northern Shandong Province. Based on the analysis of lightning activities, radar echoes and cloud images, it was found that the cloud-to-ground (CG) flash rates increased rapidly at the initial developing stage, and they were very high (about above 20 fl per 5 minutes) all along the mature stage. At the dissipating stage, positive CG flashes gradually dominated. Almost all negative CG flashes occurred in the convective precipitation regions, whereas most positive CG flashes corresponded to stratiform precipitation regions. The hourly flash rate lagged behind the minimum brightness temperature, and the area of cold cloud shield with temperature colder than $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ lagged behind the hourly flash rate. Strong wind at the surface occurred in or near the regions with dense CG flashes. The pulse of CG flash rate was slightly ahead of the occurrence of severe surface wind. The damaging straight-line wind was due to downbursts. The maximum wind speed observed at weather station was approximate to the maximum potential speed calculated by WINDEX.

Key words: mesoscale convective system, cloud-to-ground lightning, damaging wind, Doppler radar

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206、国家自然科学基金项目(40505001)、山东省气象基金 2005sdqxj01 资助
2008 年 10 月 28 日收稿; 2009 年 11 月 21 日收修定稿
第一作者: 冯桂力, 主要从事雷电物理和预警技术研究. Email: fenggl@lzb. ac. cn

引言

中尺度对流系统(MCS)所伴随的天气现象通常比较剧烈,常带来暴雨、冰雹、雷暴大风,甚至出现龙卷和下击暴流等猛烈致灾天气,给国民经济建设和人民生命财产带来严重损失。由于中尺度对流系统的上升运动比较剧烈,相应云内的起电放电过程也比较活跃。近些年来,随着闪电探测技术的飞速发展,国内外利用闪电定位系统获取的资料对强对流天气过程进行了大量的观测,并取得了许多有意义的结果^[1-2]。发现雷电资料可以有效地改进强对流天气的诊断和预报,冰雹大风过程的正地闪比例明显高于普通雷暴^[3-6]。结合地面降雹观测资料发现降雹发生在正地闪比较活跃的阶段,负地闪频数峰值通常提前降雹0~20 min,正地闪频数峰值一般滞后于降雹开始时间^[7]。近年来,雷雨大风天气带来的灾害越来越多,也越来越严重,而引发地面灾害性大风的下击暴流也一直是预报的难点^[8-13],为了进一步加深对中尺度雷暴大风过程闪电特征的认识,本文将利用地面雷电探测定位网、多普勒天气雷达、卫星观测以及常规天气资料对一次MCS过程的闪电特征予以分析,并利用大风指数(WINDEX)来探讨地面灾害性大风的原因,为雷电活动和灾害大风的预警预报积累基础资料。

1 天气过程和资料介绍

2005年6月21日08:00(北京时,下同)500 hPa和700 hPa,华北区域为脊前西北偏北气流控制,850、700、500 hPa三层在东北地区中部都有一低压环流存在,中心在长春北部,同时700 hPa和850 hPa有温度脊与高度脊相伴,暖中心在蒙古中西部附近的中蒙边界。到20:00东北地区中部的低压环流没有明显发展,但略有东移,500 hPa上在北京附近的脊前NNW气流明显增大,比08:00增加 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,700 hPa和850 hPa温度脊加强东移,而且850 hPa在暖脊前部的北京附近形成一东西向的切变。当日地面天气图上在天津、保定、石家庄一线周围有一最高温度达 $39\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温区,17:00在丰台到唐山附近的地面上有风场辐合,这种从低层到地面的明显增温加大了垂直方向上的大气不稳定性,500 hPa风速的明显增大,加剧了垂直方向上的风切变,低层和地面的辐合上升,触发了不稳定能量释放,造成了6月21日夜间至22日凌晨中尺度

对流系统,在鲁北和鲁中地区先后出现雷阵雨天气,并伴有强风和雷电,雨量为小到中雨,地面大风为北到东北风。21日22:30博兴县四个乡镇最大风力达 $28.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,22:42高青县气象站观测最大风速 $27.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (达10级),22:59邹平县最大瞬时风速达到 $29.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (达11级)。强风不仅使农作物、林果、蔬菜遭受重创,而且使许多养殖大棚、广告牌倒毁,直接经济损失达8000万元。

20:00时章丘站(济南东部)探空表明,对流有效位能(CAPE)为 $739\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,K指数为 $35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,总指数 T_T 为 $51.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,0~6 km的垂直风切变为 $18.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,均达到了强雷暴出现的条件。

本文所用的地闪资料由山东电网雷电监测定位系统提供,雷达资料由齐河和滨州多普勒雷达提供,关于雷电定位网的详细介绍请参见文献[14]。

2 闪电活动特征分析

这次中尺度对流系统共发生地闪1220次,正地闪占18.2%。正地闪的最小峰值电流强度为7.0 kA(未经过订正,可视为相对值,下同),最大为169.6 kA,平均峰值电流强度为33.22 kA;负地闪的最小峰值电流强度为-2.7 kA,最大为-49.4 kA,峰值电流强度平均为-10.29 kA。正地闪小于10 kA的仅有2次,Cummins等^[15]认为通常小于10 kA的正地闪是由于系统将云闪误测为正地闪,根据上述观点该系统给出的正地闪资料还是可信的。从正负地闪的峰值电流强度分布可以看出,不论是最大值还是平均值正地闪都明显大于负地闪,是负地闪的3倍之多。

图1给出了MCS地闪频数及正地闪比例的演变情况,可以看出,MCS从滨州北部沿海登陆后发展非常迅速,伴随强烈的对流运动,相应的地闪活动也出现跃增,最大频数为25次/5 min。随后,地闪活动一直呈现增加趋势,到22:30地闪频数由22:25的24次/5 min突然跃增为42次/5 min,且在随后的30 min内都保持在30次/5 min以上。22:30地面观测到10级的强风,这是由雷暴强的下曳气流底部外流产生的,说明地闪活动的跃增提前地面强风5 min。但是正地闪频数是在地面强风发生后开始增加,正地闪比例也随着增加,在00:10—01:00表现得最活跃,平均为10次/5 min,最大为15次/5 min,01:00后正地闪开始减少。00:50左右负地闪频数出现一个峰值,对应雷达资料发现,负地闪主要发生在系统前部新生对流单体内,这些对流单体并

合到母体雷暴,使系统的对流活动略微有所加强,并产生相对密集的正地闪(图 4d)。

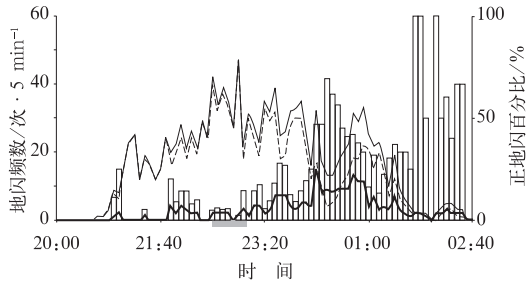


图 1 2005 年 6 月 21 日 MCS 地闪频数随时间的变化
细实线表示总地闪;虚线表示负地闪;
粗实线表示正地闪;直方图为正地闪百分比;
横坐标轴下面的粗线段表示阵风大于 10 级时段

Fig. 1 The evolution of cloud-to-ground lightning (CG) flash rate in the mesoscale convective system that occurred on 21 June 2005

(Thin solid line stands for the total CG lightning, dashed line and thick solid lines stand for positive and negative CG respectively. The histogram stands for the percentage of positive CG. The towwidth line below the time axis stands for the period of whole gale)

3 闪电活动与云图和雷达回波之间的关系

从 GOES-9 逐小时卫星云图上可以清楚发现, 14:00 在靠近渤海湾的河北和辽宁交界处有一片组织松散的积云团,随后该云团在南移过程中迅速发展,到 20:00 云团发展成密实的椭圆形状,云顶最低亮温 $-57.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积达 47000 km^2 。到 21:00 云团冷中心在靠近天津的渤海湾上空,云团前沿已经到达山东北部沿海的无棣县。此时鲁北地区正好为大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的暖低压控制,中心最低气压为 998.9 hPa 。系统从海上登陆后,由于低层入流空气浮力的增加,导致上升气流迅速加强,MCS 出现爆发性增长。22:00 云团迅速向四周扩展,低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积达分别为 65000 km^2 和 34500 km^2 ,云顶最低亮温为 $-60.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 2a),到 22 日 00:00 云顶最低亮温略升为 $-58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,但是云团

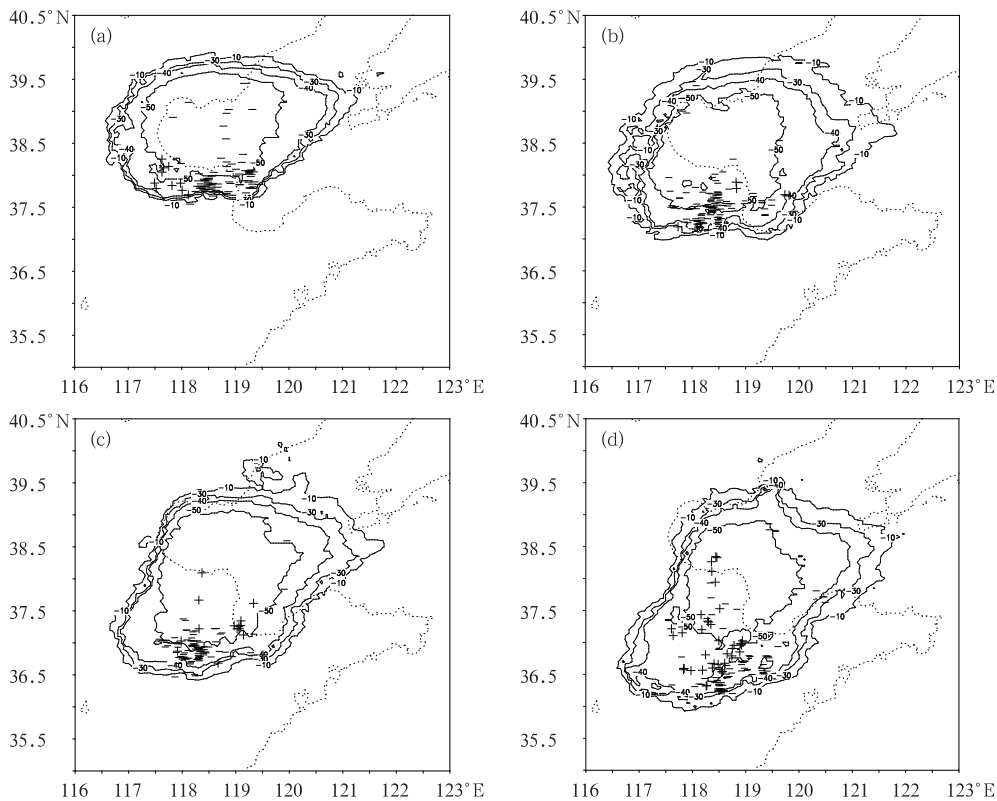


图 2 2005 年 6 月 21 日逐小时红外云图
(a) 22:00; (b) 23:00; (c) 00:00; (d) 01:00。等值线从外向内分别为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$;“+”、“-”分别表示 20 min 内的正负地闪

Fig. 2 The evolution of hourly cloud image at 22:00 (a), 23:00 (b), 00:00 (c), 01:00 (d) BT 21 June 2005

(Isolines from the outside stand for $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. “+” and “-” stand for positive and negative CG flashes within 20 min, respectively)

继续向四周扩展, 低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积达到最大为 41000 km^2 (图 2c), 随后系统开始减弱, 低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积开始减小, 06:00 后完全消失。

GOES-9 卫星每到整点从北向南开始对全圆盘进行扫描观测, 对北半球的扫描时间约为 10 min , 为了分析云顶温度与闪电活动之间的关系, 将整点前后各 10 min 内的闪电叠加在云图上(图 2)。图 2 表明地闪主要发生在系统的前部。绝大多数闪电发生在云顶温度低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云区内, 只有个别闪电落在高于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云区内。从地闪的空间分布来看, 负地闪比较密集, 正地闪比较稀疏, 且分布在负地闪的后部。

图 3 给出了逐小时的低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云覆盖面积、云顶最低温度和地闪次数的分布, 其中每小时地闪次数为整点前后各 30 min 内发生的地闪数量。从图 3 可以清楚看出, 地闪次数和低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云盖面积随时间演变基本一致, 冷云团面积随着地闪次数的增加而增加, 23:00 地闪次数达到了峰值 $414\text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$, 1 小时后冷云团面积达到了最大值(为 41100 km^2); 随后冷云盖面积随着地闪次数的下降而减小。从云顶最低温度的分布曲线可以看出, 19:00—22:00 云顶最低温度一直呈下降趋势, 22:00

达到最低值 $-60.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 23:00 以后云顶最低温度开始升高。从峰值出现的时间来看, 逐小时地闪次数滞后云顶最低温度, 冷云覆盖面积滞后于地闪次数。

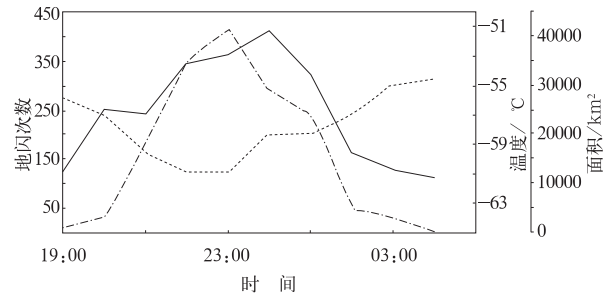


图 3 逐小时地闪次数(点划线)、低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云覆盖面积(实线)及云顶最低温度(虚线)的分布。

Fig. 3 Evolution of CG flash rate per hour (dash-dotted), the area of brightness temperature $<-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (solid line) and the minimum brightness temperature (dotted line) hour by hour

图 4 给出了 2005 年 6 月 21 日齐河多普勒雷达组合反射率和观测时刻前后各 5 min 内地闪的叠加图, 也清楚地表明地闪主要发生在 20 dBz 以上的回波区域内, 负地闪多发生在 25 dBz 以上的回波区, 对应于对流降水区; 而正地闪多发生在 25 dBz 以下, 对应于稳定的层状云降水区。

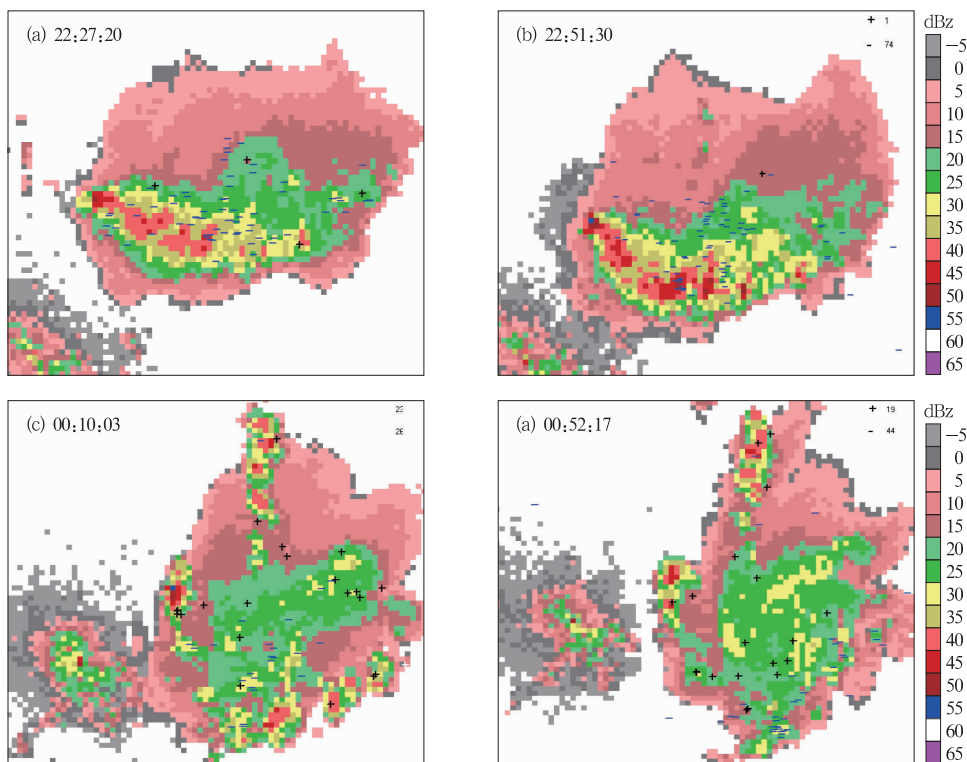


图 4 2005 年 6 月 21 日齐河多普勒雷达组合反射率和地闪分布演变图

Fig. 4 The distribution of CG lightning superposed on composite reflectivity on 21 June 2005 (a) 22:27; (b) 22:51; (c) 00:10; (d) 00:52. “+”、“-”分别表示 10 min 的正、负地闪
 (a) 22:27, (b) 22:51, (c) 00:10, (d) 00:52. “+” and “-” stand for positive and negative CG flashes within 10 min , respectively

4 大风原因分析

这次 MCS 表现出明显的弓状回波特征(图 4b), 研究表明^[16], 最强的雷暴下曳气流常发生在弓状回波的中心前部附近。从图 5 可清楚看出最大风速 ($27.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 就出现在弓状回波位置, 且位于强回波 (50 dBz) 的稍前方。从 2005 年 6 月 21 日 22:00 滨州和齐河多普勒雷达都清楚地发现 MCS 前部的

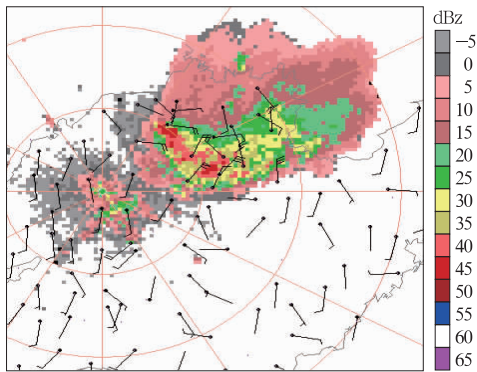


图 5 2005 年 6 月 21 日 22:57 齐河雷达组合反射率与 23:00 地面风场的叠加图

Fig. 5 The surface wind at 23:00 superposed on the composite reflectivity of Qihe Doppler radar at 22:57 BT 21 June 2005

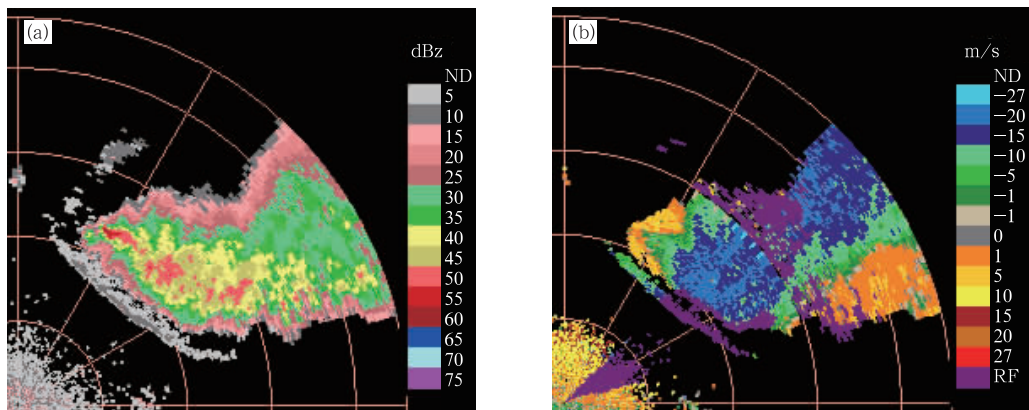


图 6 2005 年 6 月 21 日 22:51 齐河多普勒雷达的强度(a)和速度(b)分布图(仰角为 0.5°)

Fig. 6 Reflectivity (a) and radial velocity (b) of Qihe Doppler radar at 22:51 BT 21 June 2005. Elevation angle is 0.5°

入流导致回波出现弓状, 干冷入流的下沉造成局部的强风灾害, 相应地面测站出现强烈的升压、降温增湿现象, 其中滨州站气压升高 6.2 hPa , 温度降低 8.5°C 。

利用单多普勒雷达四维变分同化技术^[18-19]反演得到了三维流场, 图 8 为 1 km 高度处的水平流场和反射率分布图, 在齐河雷达站东北 140 km (坐标

边界, 说明雷暴已经进入成熟阶段。在低仰角 (0.5°) 的强度图上(图 6a), 外流边界表现为一条狭窄的带状回波, 宽度约为 6 km , 高度 2 km 左右, 在速度图(图 6b)上是一条低层辐合带。雷达连续观测表明对流线向西南方向移动(移向测站), 而 1.5 km 高度以下盛行西南风, 由此不难看出外流边界为一低层辐合区。雷暴外流边界在卫星云图中通常表现为弧状积云线^[17], 此时由于高层云砧的遮蔽影响, 对流云线与母体雷暴连在一起, 到 22 日 01:00 和 02:00 由于雷暴减弱消散, 弧状对流云线清楚可辨, 远离雷暴母体约 70 km 。由于外流边界的移速大于雷暴母体, 切断了进入雷暴母体的暖湿气流, 加速了雷暴母体的消亡。通过上面的分析可以看出, 这次中尺度对流系统产生的灾害性大风主要是较强下沉气流底部外流造成的。

22:39 降水强中心正好位于滨州雷达测站上空, 多普勒雷达的速度图(图 7)清楚表明, 低层为东北风, 随着高度的增加逆转为西北风, 说明整层为冷平流。中层 $5 \sim 6 \text{ km}$ 表现出明显的辐合特征, 而 9 km 以上又表现出辐散特征, 说明对流云体的中上层依然为上升气流所控制。 $2.5 \sim 5.0 \text{ km}$ 为强盛的北风控制, 最大风速中心(达 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 在 3.5 km 处, 这就是风暴后部的入流, 也正是中层后部的干冷

为 $105, 97$) 处, 存在一个明显的速度辐散中心, 即下沉气流中心位于强回波后部, 向前的外流气流经过强回波区时明显增强, 充分说明降水粒子的拖曳作用和蒸发冷却作用对下沉气流的加速作用。

为了进一步分析这次大风的成因, 我们引入 McCann 为预报下击暴流提出的一个大风指数——WINDEX^[20], 该经验性指数反映了中低层温、湿特

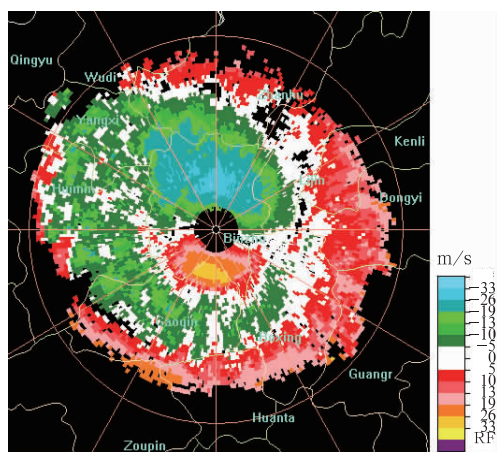


图7 2005年6月21日22:39时滨州多普勒雷达的速度图(仰角为 14.6°)

Fig. 7 Radial velocity of Binzhou Doppler radar at 22:39 BT 21 June 2005. The elevation angle is 14.6°

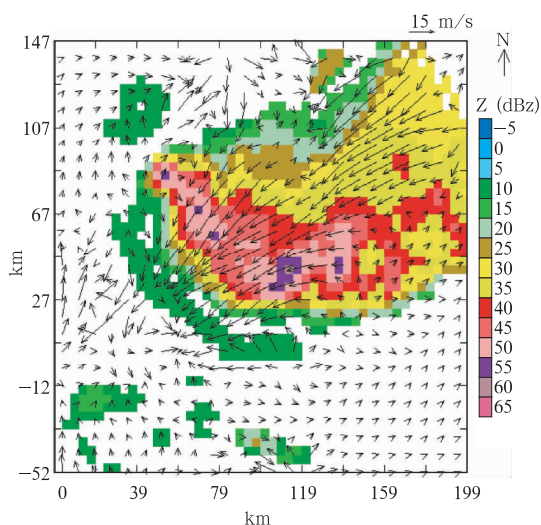


图8 2005年6月21日22:51 1 km高度层的反射率和水平流场分布图

Fig. 8 Horizontal wind field retrieved and reflectivity at 1.0 km height at 22:51 BT 21 June 2005

性对地面大风可能产生的共同作用。其表达式为:

$$WINDEX = 5[H_M R_Q (\Gamma^2 - 30 + Q_L - 2Q_M)]^{0.5}$$

其中 H_M 为 0°C 层距地高度(AGL),以 km 为单位; $R_Q = Q_L/12$,但不能大于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Γ 为地面与 0°C 层之间的直减率($^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$); Q_L 为近地面 1 km 层厚度内的平均混合比($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); Q_M 为 0°C 层处混合比; $WINDEX$ 的单位为 knot(哩/小时),乘以 0.5147 就可以转化为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

利用 6 月 21 日 20 时章丘探空资料计算结果为

$WINDEX = 28.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 已经达到了 11 级风的标准。22:42 高青县气象站观测的最大风速为 $27.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (达 10 级),与计算值非常接近。

4 结论与讨论

通过对这次 MCS 过程的地闪活动和地面灾害性大风的原因进行分析得出如下结论:

(1) 在 MCS 发展的初始阶段地闪频数开始表现为快速增加。在 MCS 的成熟阶段地闪频数一直较高,都在 20 次/5 min 以上。在消散阶段,地闪频数急速下降。这次 MCS 的负地闪占绝对优势,仅在减弱阶段,正地闪所占比例有所增大,甚至超过负地闪。

(2) 负地闪主要发生在 $>25 \text{ dBz}$ 的对流区,尤其易发生在 $>40 \text{ dBz}$ 的强对流区;而正地闪多发生在 25 dBz 以下,对应于稳定的层状云降水区。

(3) 从峰值出现的时间来看,逐小时地闪次数滞后云顶最低温度,冷云覆盖面积滞后于地闪次数。说明在系统发展到最大顶高后,地闪活动还将有所加强;地闪活动达到峰值之后,雷暴云上部会继续向外延伸,冷云盖面积继续增大。

(4) 地面大风阶段对应着剧烈的闪电活动,初步揭示闪电活动信息对灾害性大风具有指示意义。同时,当 MCS 出现弓状回波,并且闪电活动非常活跃(即闪电频数出现跃增)时,应当高度关注由下击暴流引发的地面灾害性大风。

(5) 利用 $WINDEX$ 计算的地面最大风速潜势与观测的阵风值非常接近,表明 $WINDEX$ 在预报夏季暴流潜势中有参考的价值。

通过上面的分析发现地面大风阶段对应着剧烈的地闪活动,下面对该现象进行讨论:在正常的三极性电荷结构的配置下,低层弱正电荷的存在能够增加局地电场,从而有利于负地闪的发生^[21],这已经被越来越多的学者认可。一维、二维起电模式也证实,如果低层正(负)电荷参与放电的话,负(正)地闪更容易发生^[22-23]。Mansell 等^[24]通过更加详细的三维模拟研究也同样发现,没有低层电荷区的存在正负极性地闪都不会发生,也已经得到了观测证实^[25],对地放电的电荷主要来自 5~9 km 高度范围内。由于本次雷暴过程的地闪以负极性为主,可以推断出云的中上部以负电荷为主,且主要由大冰粒子(如霰粒、软雹等)所携带。21:45 回波顶高达

14.6 km, 大于 40 dBz 的强回波达到 12 km, 而在发生地面大风时段, 回波顶下降为 12.0 km, 大于 40 dBz 的强回波下降为 6.5 km, 风暴质心从 7 km 降到 3 km。随着雷暴质心的下降, 雷暴云内的电荷区也必然随之下降, 相应主负电荷区高度的降低减小了对地面距离, 容易将负电荷输送到地面形成负地闪。从上面的分析可以发现, 大风阶段对应着剧烈的地闪活动, 进一步说明闪电活动信息对灾害性天气具有指示意义。与对流强度弱的普通雷暴相比, 伴有灾害性大风的雷暴过程的中小尺度结构更加明显, 更加具有组织性, 其闪电频数较高, 成熟至消散阶段的正地闪比例明显高于普通雷暴。冰雹云生命史中正地闪比例通常高于没有冰雹的雷暴大风过程, 降雹多发生在负地闪频数开始下降、正地闪频数开始增加的阶段, 多数降雹过程也会伴有地面大风^[7]。

尽管上述的分析初步揭示出雷电信息在强对流灾害性天气的预警和预报中具有一定的参考价值, 然而, 对雷暴大风过程闪电活动特征的全面认识还需要积累更多的个例, 尤其应该增加云闪的探测和分析, 以便加深对雷暴放电规律的全面认识。

参考文献

- [1] 张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 610-620.
- [2] 郗秀书, 张义军, 张其林. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 646-658.
- [3] Reap R M, MacGorman D R. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117: 518-535.
- [4] Stolzenburg M. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122: 1740-1750.
- [5] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122: 1671-1697.
- [6] 陈哲彰. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征[J]. 气象学报, 1995, 53(3): 367-374.
- [7] 冯桂力, 郗秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 289-299.
- [8] 殷占福, 郑国光. 一次强风暴三维结构的观测分析[J]. 气象, 2006, 32(9): 9-6.
- [9] 毕旭, 罗惠, 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.
- [10] 刘峰, 李萍. 华南一次典型 MCC 过程的成因及天气分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 76-82.
- [11] 易笑园, 宫全胜, 李培彦, 等. 华北飊线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象, 2009, 35(2): 34-40.
- [12] 王莉萍, 崔晓东, 常英, 等. 一次飊线天气的非常规气象资料特征分析[J]. 气象, 2006, 32(10): 88-93.
- [13] 刘峰. 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟[J]. 气象, 2008, 34(2): 18-24.
- [14] 冯桂力, 郗秀书, 袁铁, 等. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 211-220.
- [15] Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network[J]. J Geophys Res, 1998, 103D: 9035-9044.
- [16] 陆汉城. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 131.
- [17] 巴德 M J 等. 卫星与雷达图像在天气预报中放入应用[M]. 卢乃锰等译, 北京: 科技出版社, 1998: 302-307.
- [18] 牟容, 刘黎平, 许小永, 等. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. 气象, 2007, 33(1): 11-18.
- [19] 牟容, 余君, 刘德. 重庆 2008 年 7 月 21 日强对流天气成因及其特征[J]. 气象, 2009, 35(5): 49-54.
- [20] 孙翠艳, 冯桂力. WINDEX 在民航济南机场的应用举例[J]. 气象, 2004, 30(4): 36-39.
- [21] Jacobson E A, Krider E P. Electrostatic field changes produced by Florida lightning[J]. J Atmos Sci, 1976, 33: 103-117.
- [22] 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 雷暴云下空间电荷层形成的数值研究[J]. 大气科学, 2001, 25(1): 16-24.
- [23] Marshall T C, Stolzenburg M. Electrical energy constraints on lightning[J]. J Geophys Res, 2002, 107, 4052, doi: 10.1029/2000JD000024.
- [24] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model[J]. J Geophys Res, 2002, 107, 4075, doi: 10.1029/2000JD000244.
- [25] Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure[J]. J Atmos Sci, 2005, 62: 4151-4177.