

李亚珺,张广庶,文军等. 沿海地区一次多单体雷暴电荷结构时空演变. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3203-3212, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 003.

Li Y J, Zhang G S, Wen J, et al. Spatial and temporal evolution of a multi-cell thunderstorm charge structure in coastal areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(10): 3203-3212, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 003.

沿海地区一次多单体雷暴电荷结构时空演变

李亚珺,张广庶,文 军,王彦辉,张 彤,范祥鹏,武 斌

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 寒区旱区陆面过程与气候变化重点实验室,兰州 730000

摘 要 利用闪电放电辐射源三维时空分布测量,分析了山东低海拔地区一次多单体雷暴过程的电荷结构演变以及与回波强度的关系. 结果表明对流云区电荷结构是典型的上正下负电偶极结构,且随着雷暴发展正负电荷层强度增大,高度抬升. 负电荷区处在 40 dBz 以上的强回波区域中,正电荷层处在约 40 dBz 区域中. 层状云区也有类似结构,只是强度弱,高度低. 观测到的四层电荷结构是出现在对流区消散阶段,此时,由于云体不同部位的不同消散程度,电荷结构发生断裂,云体前部正负电荷区下沉,云体中部正负电荷区高度变化不大,但负电荷区域变薄,呈现出四层电荷结构. 从本例结果说明,雷暴优势起电机机制通常能形成电偶极或三极性结构,多极结构可能不是起电形成. 本文还分析了一次负地闪传输过程,和宏观电荷结构很好吻合,说明利用三维定位系统观测,可以较好地描述雷暴宏观电荷结构.

关键词 电荷结构,回波范围,正电荷区,负电荷区

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 003

中图分类号 P427

收稿日期 2011-11-29, 2012-02-17 收修定稿

Spatial and temporal evolution of a multi-cell thunderstorm charge structure in coastal areas

LI Ya-Jun, ZHANG Guang-Shu, WEN Jun, WANG Yan-Hui,
ZHANG Tong, FAN Xiang-Peng, WU Bin

Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract The spatial and temporal variations of charge structure and the relationship with intensity of radar echo of a thunderstorm in lower altitudes, Shandong of China, have been analyzed with the radiation sources of lightning discharge three-dimensional mapping system. The results indicate the charge structure was typical dipolar in the convective areas. The intensity of positive charge region was increased and the height of location was lifted with the development of thunderstorm. The negative charge region is in the area where the intensity of radar echo was more than 40 dBz and the positive charge region was in the 40 dBz radar echo area approximately. The charge structure was also inferred dipolar with low charge height and weak charge intensity in stratiform areas. In the dissipation stage of thunderstorm, the charge structure was ruptured for the different dissipation level of different part in cloud. The positive and negative charge regions sank in the front of the cloud, and the height of the positive and negative charge region

基金项目 国家自然科学基金重点项目(41030960);国家自然科学基金项目(41075002,40775004);公益性行业科研专项(GYHY201006005-03)共同资助.

作者简介 李亚珺,女,1982年生,博士研究生,主要从事大气电学研究. E-mail:liyajun@lzb.ac.cn

changed little in the middle part of the cloud, whereas the negative charge region was attenuated. So the charge region had four layers in convective areas during dissipation stage. The above result shows that the advantage charge generation mechanism often generates dipole or tripole charge structure and does not generate multipole charge structure. This paper also analyzes a negative cloud-to-ground flash discharge process. Its charge structure is the same with the thunderstorm charge structure. So the thunderstorm charge structure can be illustrated by the observation of three-dimensional lightning mapping system.

Keywords Charge structure, The range of radar echo, Positive charge region, Negative charge region

1 引言

雷暴内电荷时空结构非常复杂,宏观尺度而言,通常呈现经典偶极性电荷结构,即云上部为正电荷区,下部为负电荷区^[1].但实际上,雷暴内正负极性电荷分布非常复杂,不同类型雷暴,不同地区雷暴^[2-3]以及在雷暴的不同发展阶段,会有差别很大的电荷结构.早在1992年Rust^[4]利用探空电场仪观测发现Oklahoma中尺度对流系统中存在三个以上的电荷区.随着闪电辐射源三维定位系统的发展,Zhang Y J等^[5]利用美国新墨西哥矿业学院发展的基于GPS的同步技术的VHF辐射源定位系统(简称LMA),研究了两次超级单体雷暴的电荷结构,发现在雷暴的主体部分(对流区)雷暴电荷结构呈现反三极性并与正负地闪的产生有直接关系.利用LMA对一次产生龙卷风的雷暴电荷结构分析发现在开始阶段具有上负下正的反偶极性电荷结构,但随着雷暴发展逐渐变得复杂,在后期形成了反三极性电荷结构^[6].冯桂力等^[7-8]和刘东霞等^[9]也都利用雷电定位网的资料分析了地闪活动在中尺度对流天气系统以及冰雹云中的演变过程及其关系.由于闪电放电是产生于强电场区,即空气能够发生击穿的区域中,而闪电辐射源的时空演变,反映了强电场区的时空演变.因此随着闪电辐射源三维定位系统的发展,强电场区的时空分布可以被跟踪.因此,本文将利用三维闪电定位辐射源的资料与同步雷达资料结合,分析雷暴电荷结构及其时空演变,并且讨论与回波强度之间的关系.此项研究是中科院寒旱所2007—2008年在山东地区两年雷电综合观测试验的一项内容^[10-12].李亚珺等^[10]利用闪电宽带电场三维定位系统已得到了一些初步的结果.本文将对2008年6月29日发生在山东地区一次中尺度多单体雷暴过程中对流云区和层状云区的电荷结构演变

过程进行深入详细分析,并研究其与闪电活动和回波强度之间的关系.

2 资料分析

2.1 雷暴过程闪电活动时空分布及雷暴总体特征

选择2008年6月29日一次雷暴,位于我国东部中纬度山东滨州地区,观测区域海拔高度约为0到10 m左右.图1和图2分别是整个雷暴过程中正负地闪和云闪发生频数随时间变化图和辐射源密度等值线水平分布图.在10:40(北京时,文中时间均为北京时)时刻左右,雷暴距离主站约100 km时,观测仪器开始收到闪电数据,16:50雷暴消散,持续时间约6 h.

这次雷暴过程共测得闪电539例,其中云闪285例,正地闪46例,负地闪208例.在观测开始阶段接收到的闪电快电场波形大多为双极性脉冲,Rakov^[13]等人把这类脉冲称之为云闪放电的初始击穿脉冲,而另一类型的双极性窄脉冲被Smith^[14]等人称之为“袖珍云闪”,本文把这两类都归结为云闪.从图1可见,雷暴过程以云闪为主,且负地闪发生频数远大于正地闪.云闪、负地闪和正地闪频数随雷暴发展的各个阶段而不同,2.2节将讨论其原因.从图还可见,13:00—15:30闪电发生频数远高于其它时刻,最高闪电频数达到了3.5次/分钟.

图2是雷暴在10:40—16:50时间段内发生的辐射源密度等值线水平分布图.坐标原点为测网中心站位置,图中用红色三角形标注.从图可见,闪电主要发生在距离中心测站约100 km范围内,高于50/km²的辐射源密度区域范围为东西方向-60 km到20 km左右,南北方向0到-30 km.

本例是一个中尺度多单体风暴,生命期长达6 h,水平尺度延伸约100 km以上,在10:40—16:50时段内多个单体经历了发展、旺盛和消亡期,单体之

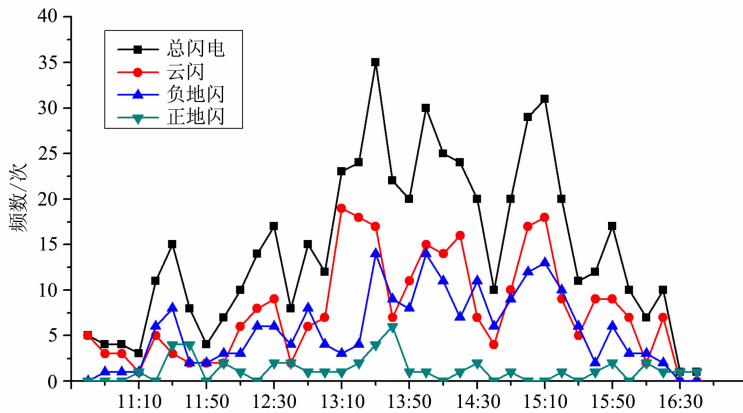


图1 2008年6月29日雷暴过程每10分钟各类型闪电频数随时间演变图
Fig. 1 The evolution of various type of flashes lightning rate per 10 minutes for the thunderstorm that occurred on 29 June, 2008

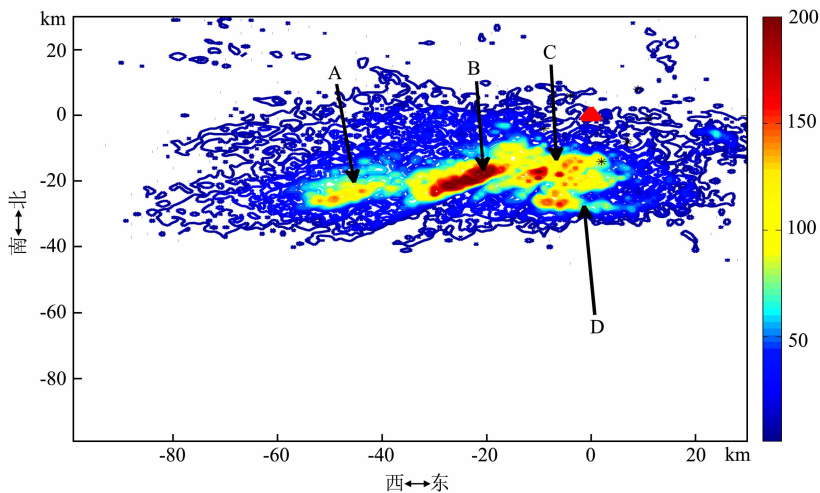


图2 2008年6月29日雷暴过程10:40—16:50(北京时间)时段闪电辐射源密度等值线分布图
图中红色三角形为观测网中心站位置.

Fig. 2 The intensity of lightning radiation sources distribution map with contour between 10:40 to 16:50 (Beijing Time) for the thunderstorm that occurred on 29 June, 2008
The red triangle symbol stands for the central observation station.

间也有合并、分裂过程,雷暴云内电荷结构也随之演变.由于发展初期风暴离测站在100 km以外,定位系统精度差,故本文选取该雷暴13:00—15:30时段内已基本并合的一个单体作为重点描述,该单体经历发展、旺盛和消亡阶段.图3是13:00—15:30雷暴发展过程中2.5 km高度上各个阶段具有代表性的CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 回波图.雷达是每6分钟一次体扫,得到各个仰角的PPI (Plan Position Indicator),对各个仰角的PPI做内插,从而得到不同位置、不同高度的RHI (Range Height Indicator)及CAPPI图.从图3可见,13:08几个单体开始合并,于13:38已基本合并为一个较强的单体,雷暴发展旺盛.14:20强单体开始消散、分裂,于15:30基本消散.

2.2 雷暴云内电荷结构与雷暴演变过程相关分析

本文利用三维闪电辐射源定位资料来判别电荷结构及其极性,基本概念如下:辐射源产生主要是由于该点附近空气被击穿以及流光传输所致,由于正负离子迁移率有量级之差,负离子快速流动(负流光)能产生频繁的强辐射,通常在正电荷区域内才能产生持续快速的负流光传输,接收到持续频繁的辐射源点. Thomas等^[15]对闪电辐射强度的分析表明,在正电荷区的闪电辐射源功率远远大于负电荷区.当然在负电荷区域中有时也能接收到频繁辐射源点,但由于正流光速度低,其强度弱、传输距离短、辐射很弱,这种现象是局地负极性击穿放电所致.相应辐射源点空间分布也较弥散,时间上也不连续,且会出现离开密集区向下(或向上)稀疏传输.因此,可以

利用辐射源点空间分布密集程度来确定高浓度电荷区(即强电场区)及其极性. 近代研究指出, 雷暴电荷结构多正电偶极和三极性结构, 也有少量反电偶极结构和多极结构, 且正负电荷层都是相隔出现. 这些研究符合起电理论, 只有正负电荷载体被分离, 被带到不同高度, 才能形成层状结构. 对于电荷层的判别作如下步骤: (1) 首先确定具有层状分布的辐射源密集区和较稀疏区. (2) 对于密集区, 若水平方向上出现较多向下(或向上)传输辐射源点, 则是负电荷区, 否则是正电荷区. (3) 正(负)电荷层的相邻高度层是负(正)电荷层. (4) 稀疏层是负电荷层. (5) 负地闪初始触发区位于负电荷层中. 本文除了分析电荷结构外, 还同时结合雷达回波资料, 分析与回波强度的关系. 并且还分析了一次云闪和地闪闪电放电通道三维时空定位及其发展过程, 推断出正负电荷区时空位置, 进一步来证实上述宏观电荷结构的可靠性. 整个雷暴过程分为发展、成熟和消散三个阶段即三个时段. 雷达回波剖面选取, 按照雷暴单体向测站移动路径, 从距离约 50 km 接近到约 10 km, 选择能扫描到中心强度区域的方位角和相应时刻(选择该时段内最大强度的一次体积扫描)作 RHI 剖面. 基本上能反映三个阶段特征, 同时为了比较, 选择具有层状云结构的方位作 RHI 剖面. 在 RHI 剖面上叠加相应时段空间(一个体扫 6 分钟)的辐射源分布, 单体水平尺度约 40 km.

2.2.1 雷暴发展阶段

从图 1 可见, 在 13:00—13:38 时段内, 闪电发生频数进入第一个高峰期, 云闪、负地闪和正地闪先后达到了峰值. 图 4a 为 13:32 时刻雷达回波 RHI 剖面和闪电辐射源叠加图, 对流中心离中心站约 50 km. 从图可见, 在单体中心部位, 5~8 km 高度之间辐射源点分布很密集, 8~10 km 间也有稀疏辐射点. 而 5 km 高度以下, 辐射点稀少, 因此 5~10 km 为正电荷区, 而下层约 3~5 km 间为负电荷区, 呈现偶极性电荷结构. 图 4a 中箭头是等效于所有闪电向上传输的垂直通道, 在 3 km 高度上有大量辐射源点向上发展, 是闪电的初始区, 在进入 5~8 km 高度后转为水平发展(图中深黑线). 从图还可见, 辐射源起始区域位于强对流区中心, 最大回波强度达到 55 dBz, 负电荷区平均在 40~50 dBz 回波区域内, 水平尺度达到 30 km, 高度达到 5 km, 但水平分布稀疏. 而正电荷区辐射源空间分布很密集, 即击穿过程强, 但回波强度小, 大多数辐射源集中在 30~40 dBz 之间, 且也弥散到 20~30 dBz 区域中. 在单体

中心区域, 云顶伸展到 12 km, 说明中心有很强的上升气流, 携带大量带正电水成物粒子向上运动, 使辐射源点能延伸到 10 km 高度上. 上述结果说明, 负电荷是被大水成物粒子(例如雨滴、软雹)所携带, 正电荷被小粒子(例如云滴、冰晶)携带.

在图 4a 对流单体的前端是层状云区, 在此时段内也产生了少量辐射源点, 主要也是集中在 5~8 km 高度间的正电荷区中, 下部负电荷区辐射源点很少, 两电荷区域之间也无显著的辐射源连接通道, 是一个较弱的负电荷区. 正电荷区域中的辐射源也是来自下部负电荷的向上传输但强度不大且较为弥散, 进入正电荷区域后, 水平传输距离很短, 没有形成流光通道, 但也产生一些云闪. 从上可见, 层状云中正负电荷区域都较弥散, 没有形成明显层状电荷结构.

2.2.2 雷暴成熟阶段

图 4b 是在 13:38—14:20 时间段内辐射源与具有代表性的雷达回波叠加图, 在此阶段内几个雷暴单体已演变合并为一个较强的单体移向中心站, 距离约 40 km. 回波强度大于 55 dBz 的区域水平发展, 且高度达到了 6 km, 雷暴进入对流旺盛时期. 从图可见, 密集辐射源上升到 8~12 km 的高度上, 但在 5~7 km 仍有少量辐射源出现. 所以, 电偶极结构高度抬升, 5~7 km 为负电荷区, 8~12 km 为正电荷区, 雷暴电荷结构仍然维持上正下负的偶极性电荷结构. 但相对雷暴发展阶段, 电荷区的高度有所抬升, 且电荷区厚度增加. 这表明雷暴在强发展时期, 上升气流增强, 使得电荷区的浓度和强度都有所增加. 结合回波分析可知, 负电荷区仍对应 30~55 dBz 强回波区, 而正电荷区内辐射源仍然集中在 25~30 dBz 中等回波区内, 并向低回波区发展(10~25 dBz), 且来自负电荷区的等效传输通道在进入正电荷区域后向二个方向发展(图 4b 中黑色箭头所指). 图 4c 为此时段内相应层状云区辐射源与雷达回波叠加图, 与图 4a 比较可见, 层状云区域也在发展, 尽管最大回波强度仅约 20~25 dBz, 但水平区域在扩大, 云顶也伸展到 12 km 高度. 此层状云区相应的密集辐射源区高度抬升到 8~10 km, 而在 3~4 km 高度区域, 辐射源也比图 4a 层状云区域明显增多. 辐射源呈现明显的双层结构, 这两层电荷区分别对应 2~4 km 的负电荷区和 8~10 km 正电荷区, 两层电荷区之间有约 4 km 厚度的间距, 且有明显的辐射源垂直通道连接. 与图 4b 比较可见, 在层状云区, 负电荷区辐射源集中在雷达回波 20~

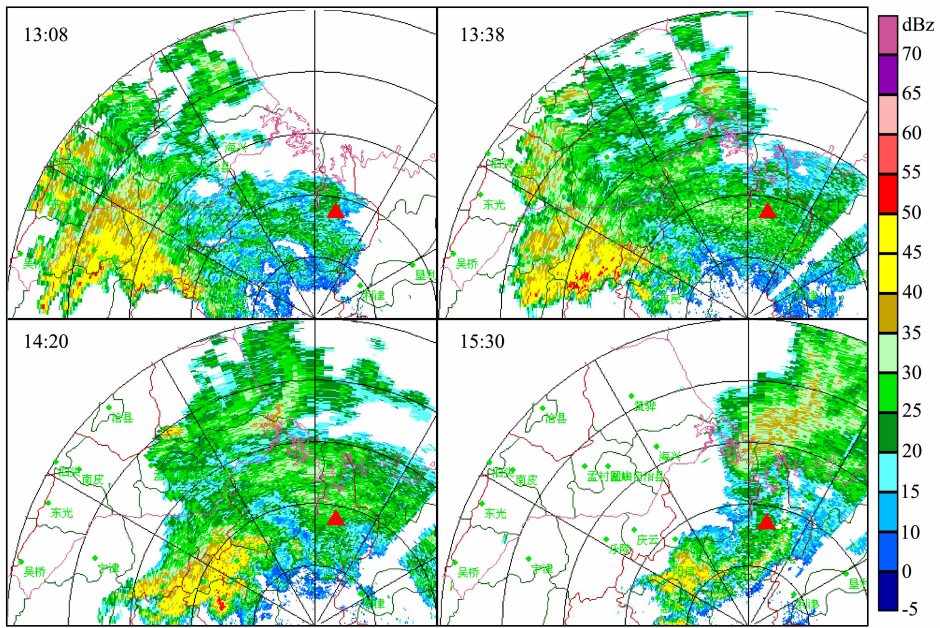


图 3 雷暴移动过程 2.5 km 高度上各时段雷达回波图

图中圈之间间距为 30 km. 红色三角形为测网中心站位置.

Fig. 3 The CAPPI at the height of 2.5 km with different time on 29 June, 2008

The distance between two adjacent circles is 30 km, and the red triangle symbol stands for the central observation station.

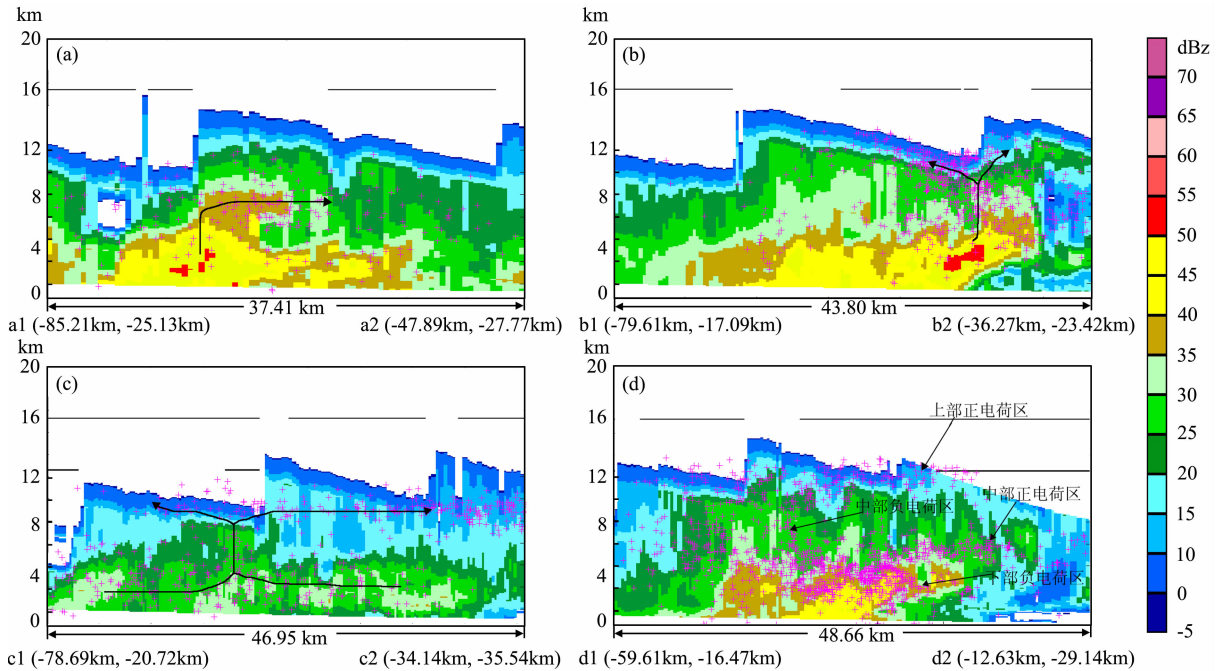


图 4 对流区和层状云区雷达回波剖面与对应体扫时间内闪电辐射源区域叠加图

(a) 13:32 时刻对流区; (b) 14:07 时刻对流区; (c) 14:07 时刻层状云区; (d) 14:38 时刻对流区.

图中坐标点是中心站为原点, 粉色符号“+”代表发生的辐射源.

Fig. 4 Radiation sources overlaid on vertical cross-section radar reflectivity in convective areas and stratiform areas

(a) 13:32, convective areas; (b) 14:07, convective areas; (c) 14:07, stratiform areas; (d) 14:38, convective areas.

The central station is the origin of coordinates in this figure. The symbol pink “+” stands for radiation source.

35 dBz区域内,正电荷区集中在15~20 dBz区域内,辐射源分布区域很大,较弥散,向上传输的垂直通道和水平伸展不如对流云区明显(图4c中箭头所示).而对流区中,辐射源密集于对流中心区域,尤其是回波梯度大的区域,说明起电和放电过程与上升气流关系密切.

对照图1可见,在图4a时段内,云闪频数已很高,这是雷暴发展阶段正负电荷区域之间的放电.在此时段前,除了云闪频数不断增加外,正负地闪频数都在增加,这是由于发展阶段,回波强度和上升气流都在增强,云内起电和各类放电活动都随之增多,在13:30附近都达到了峰值.此后雷暴发展进入成熟阶段(图4b时段),回波强度和上升气流还在继续增强,此时段内云闪和负地闪频数仍很高,但正地闪频数却急剧下落.从图1可见,在整个雷暴成熟阶段只发生了3例正地闪,根据辐射源定位资料,这3例正地闪都发生在强对流区外围.根据闪电云内击穿过程和流光传输研究^[16-18],对于偶极性电荷结构,云内初始击穿和流光都源于负电荷区,或以向下负流光出云触发负地闪,或以向上负流光传输进入正电荷区,并转向水平发展,通过复杂的云内传输过程,大多数不产生出云流光而形成云闪,部分会触发正地闪.根据三维闪电辐射源定位显示,大部分负地闪是被直接向下负先导触发,也有部分负地闪先经过一段时间的云内发展过程之后产生向下负先导触发负地闪.在雷暴发展阶段,由于下部负电荷区强度不大,向下流光穿过几率高,所以容易触发正地闪.在成熟阶段,下部负电荷区很强,正负电荷区之间以云内放电为主,所以正地闪很少.

2.2.3 雷暴消散阶段

在14:20时刻以后,雷暴进入消亡阶段,距离中心站约10 km,对流单体开始消散,图4d是雷暴消散阶段雷达回波剖面图与闪电辐射源叠加图.从图可见,50 dBz以上的强回波已消失,最强回波仅约40 dBz,且范围缩小很多.云体前部已向下坍塌,云顶高度降到8 km,说明有较强下沉气流,而云体中部向下坍塌较慢,云顶高度仍维持在12 km左右.随着云体不同部位的不同坍塌,电荷结构也发生相应变化,呈现出四层电荷结构(图中箭头所指),云体中部基本维持成熟阶段电荷结构,9~11 km为上部正电荷区,6 km高度左右存在一个负电荷区,电荷区高度有所下降,称之为中部负电荷区.但云体前部两个电荷区高度降落很多,4~6 km高度为正电荷区,2.5~4 km高度为负电荷区,分别称之为中部

正电荷区和下部负电荷区.由此可见,由于云体不同部位的不同消散程度,使原来的电偶极结构发生破裂,分别形成了两个电偶极结构.高度较低的下部电偶极结构中,辐射源频数更密集,尤其在下部负电荷区域中出现非常稠密的辐射源,这可能是由于云体高层下沉气流强于下层,从而使在坍塌过程中,云体在下层被压缩,使负电荷区浓度增大,产生更多击穿.其实,从图4d可以看到,此时强回波区域已被压缩很多,其高度下降了近2 km,负电荷区基本上仍在强回波区域内.由于强回波区是对应雷暴中对流区,而强回波区的强度和范围影响电荷区的浓度和高度^[9].因此受回波强度的影响,下部负电荷区产生很多击穿过程.四层电荷区对应回波强度分布分别是下部负电荷区集中在40~50 dBz回波区域内,中部正电荷区集中在30~40 dBz的区域内,中部负电荷区在20~25 dBz区域,而上部正电荷区在10~20 dBz区域.云体中部两个电荷层回波强度相对较低,辐射源分布也较弥散,即击穿过程较弱,而云体前部两个电荷层的回波强度大,辐射源稠密.此结果说明云内击穿过程很依赖回波强度,且从图可见,大部分集中在强回波边缘地区.对照图1,整个消散阶段云闪和负地闪的发生频率仍很高,与旺盛阶段相似.由于此阶段内负电荷区仍然很强,且仍是电偶极结构,消散过程中也无云砧伸出,所以正地闪触发较困难,只产生了较多云闪和负地闪.在层状云区域仍然维持电偶极结构,但强度相应减弱,高度变化不大(图略).

2.3 单个云闪和负地闪传输过程

为了进一步说明上述电荷结构分析的可靠性,我们分别分析了一次云闪和一次负地闪传输过程,图5是利用宽带电场对发生在14:11:57的一次云闪的定位辐射源图,图中各个方向上的距离均以观测中心站为坐标原点.该云闪发生在雷暴成熟阶段的对流云区.从图可见,闪电起始于7 km高度(图5a),此高度为负电荷区上边缘,垂直向上发展到12 km,进入正电荷区后转为水平发展,且水平通道略向下倾斜,通道底部高度约10 km,在上部正电荷区水平发展约10 km后,下部负电荷区也开始出现了较多的闪电辐射源,并在下部负电荷区形成两个分支同时水平发展(图5b, 5e),西北方向的分支传输较远,而东南方向的分支传输距离较短.综上所述,结合图5可知,闪电起始于负电荷区边缘,负电荷区在5~7 km,而正电荷区在10~12 km之间,与之前分析的雷暴成熟阶段对流区雷暴电荷结构有很

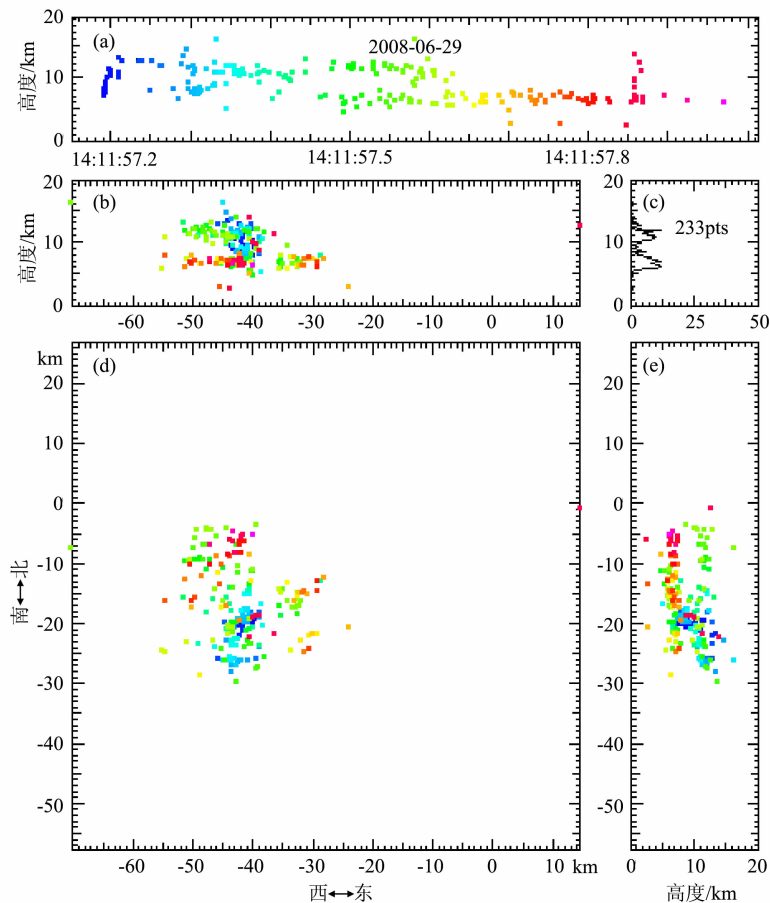


图5 2008年6月29日14:11:57(北京时间)一次云闪放电过程的三维结构

(a) 闪电辐射源高度随时间的变化; (b) 南北方向上的立面投影; (c) 辐射源发生数目随高度的分布;
(d) 平面投影; (e) 东西方向上的立面投影。

Fig. 5 An intracloud flash occurring at 14:11:57 (Beijing Time) June 29, 2008

(a) Height-time plots; (b) North-south ward vertical projection; (c) Height distribution of number of radiation events;
(d) Plan view; (e) East-west ward vertical projection of lightning radiation sources.

好的吻合。

图6是利用宽带电场定位系统对14:38:10时刻发生的一次具有代表性负地闪的定位辐射源图,是处在雷暴消散阶段初期,该负地闪主要以云内传输过程为主,从电场波形判断此次负地闪仅产生一次回击。初始击穿点发生在约4 km高度,是下部负电荷区上边缘,然后向上传输进入中部正电荷区(图6a)。初始击穿点离测站约15 km,辐射源远离测站传输,在离测站约50 km处又返回靠近测站传输(图6b)且分成两个分支,一支在5 km高度,另一支在10 km高度(图6b中红色点)。结合图6d分析,在50 km处已接近中部正电荷区边缘,由于中部负电荷区较弱,它们没有形成中和,其一部分返回原中部正电荷区中传输,另一部分向上进入上部正电荷区传输。这种传输结构证实了4个电荷区的存在。符合雷暴消散阶段电荷结构。从图6还可见下部负电

荷区大部分的辐射源集中在2 km以上,但有极少数的辐射源在2 km以下,从电场波形分析,这些辐射源对应回击前的先导过程以及类似于先导过程的脉冲。通过对以上单个闪电放电传输过程的分析说明了宽带电场三维定位的有效性。

3 结论和讨论

本文通过对闪电放电辐射源三维时空分布测量,分析利用其分布特征来确定电荷结构的可行性。讨论了山东低海拔地区一次具有多单体雷暴过程的电荷结构演变以及与回波强度的关系,这次雷暴过程对流比较旺盛,最高回波顶高达到14.3 km,电荷结构呈现典型电偶极结构。

在雷暴不同发展阶段,雷暴电荷结构随时间在变化,且对流云区与层状云区电荷结构也有所不同。

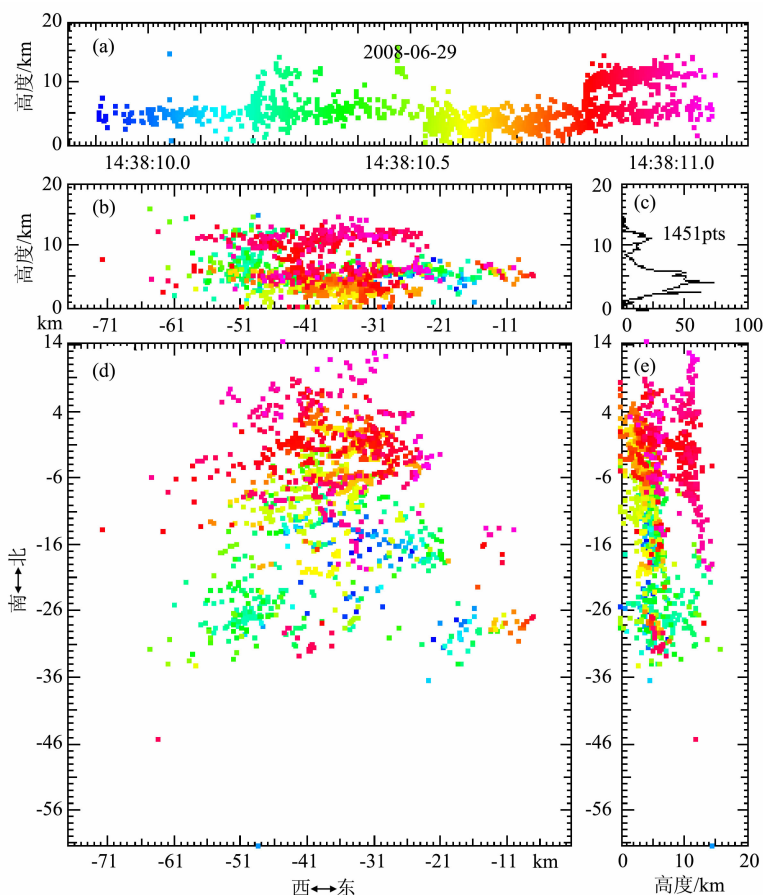


图6 同图5,但为2008年6月29日14:38:10(北京时间)一次负地闪放电过程的三维结构

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for a negative cloud-to-ground flash occurring at 14:38:10 (Beijing Time) June 29, 2008

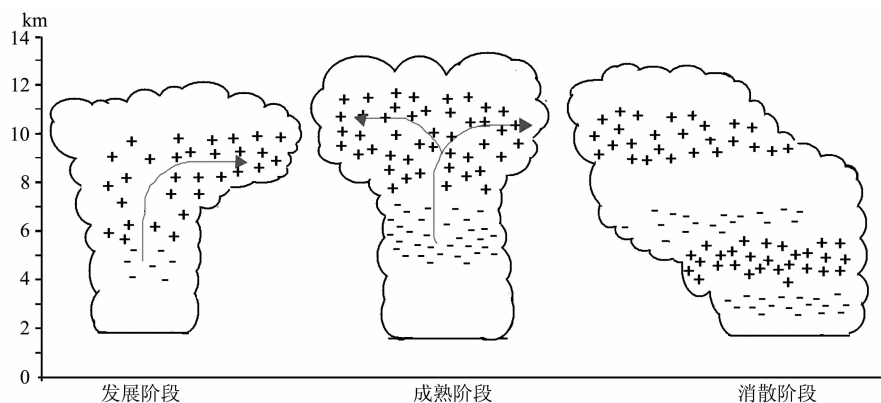


图7 雷暴不同发展阶段电荷结构示意图

Fig. 7 Schematic idealization of the evolution of the 29 June thunderstorm charge structure

图7是此次雷暴过程中电荷结构示意图。

(1) 根据测量放电辐射源时空分布特征,可以很好地确定雷暴云电荷结构是典型的上正下负电偶极结构,正负电荷区的位置和尺度随雷暴不同发展阶段而不同。在初始发展阶段,下部负电荷区域在3~5 km高度之间,处于40~50 dBz强回波区域中,最强回波达到55 dBz,在30~35 dBz回波区上有弥散辐射源点,是局地击穿。上部正电荷区位于5~

10 km高度间,回波强度约20~40 dBz,水平尺度大于负电荷区,辐射源较集中于30~40 dBz内,是以流光的形式传输。在成熟阶段,两个电荷区高度范围都抬升,上部正电荷区在8~12 km高度,下部负电荷区在5~7 km高度,电荷区厚度也加大,且出现非常显著的连接二个电荷区的垂直击穿和流光通道,辐射源密度增大很多,且处于低回波强度10~25 dBz内。在消散阶段,由于云体不同部位的不同

消散度,使电荷电偶极结构发生断裂,呈现出四层电荷结构.云体前部正负电荷区下沉,高度分别为 4~6 km(正),2.5~4 km(负),且下部负电荷区被压缩,产生更多击穿,云体中部正负电荷区高度变化不大,但负电荷区域变薄,上述区域的回波强度也在减弱.

(2)层状云区域也有相似的电偶极结构,但强度弱得多,在发展阶段,上正下负电偶极结构已开始形成,发展到成熟阶段,上正下负电偶极结构开始明显,尽管回波强度很低,最大回波强度在 25 dBz 左右,但双层电荷结构也很明显,高度比对流区要低些,两电荷层之间也出现垂直击穿和流光连接通道,也有放电过程.

从本文分析可见,利用测量放电过程产生的辐射源点时空分布可以较好地判断电荷层极性及相应强电场区时空分布.文章还分析了一次云闪和一次负地闪在云内传输过程,与确定的电荷结构有很好的吻合,说明此方法基本有效.今后的研究还需引入适当的附加条件,尤其是对于负电荷层的确定尚有不不确定性,需要更多的实例观测及配合平均电场网络观测作深入研究.由于本例分析是一个中尺度多单体风暴,生命期长,尺度也大,发展过程中有很多并合过程.尽管起电过程是在一个单体内发生,但电荷结构不复杂,本例是电偶极结构,在整个发展过程中基本结构不变,只是变化强度而已.说明对于一个发展单体,形成电荷结构的优势起电过程是确定的,通常是偶极性或三极性结构.对于云内观测到的复杂电结构,可能是由于云内存在很多单体相互作用的结果,也可能是单体发展过程中的分裂结果,本例发展后期的四极性电荷结构就是云体断裂所致.与雷达回波对比分析发现,较多辐射源集中于强对流区中,起电区处在上部正电荷区和下部负电荷区之间,是冰水共存区.进一步证实了感应和非感应机制是主要优势起电机理.本例没有观测到三极性电荷结构,可能是 0°温度层过高,低层缺乏冰相粒子,不能满足非感应机制中反转温度要求等.由于本文只对一次中尺度多单体雷暴过程的电荷结构及回波特征进行了分析,所以还需要更多的观测资料来进行证实,同时结合数值模式和多部雷达的配合对强对流天气过程电荷结构以及与闪电活动特征的关系做进一步的分析,加深对强对流天气过程的电结构和云物理过程的关系的认识.

本研究所采用的是“闪电宽带电场三维定位系统”接收闪电产生的约 0~10 MHz 辐射来定位,基

本原理和 VHF 辐射定位相同,都是采用辐射源到达时间差 TOA 定位技术,只是 VHF 辐射仅产生于击穿过程,而 VLF 除了产生于击穿外,电荷的加速运动也能产生,例如 Shao 等^[19]利用 VLF 三维定位测量到较低高度辐射点,我们也测量到 2 km 高度以下辐射点(图 4),它是回击过程中电荷加速运动产生.应该说 VLF 定位比 VHF 定位更优越些.它除了能表征击穿特征外,还能揭示电荷加速过程.目前定位系统接收到的辐射源点是代表一个区域尺度,达不到定位“绝对点”.对于 VHF,因是击穿产生,所以传输区域尺度小,对于 VLF,若是击穿产生,传输区域也小,若是电流加速产生,(例如较低高度)区域会大些.本系统接收的辐射频率在 10 MHz 左右,基本上还是属于击穿,所以揭示的尺度不大.其实,目前测量技术,还无法连续测量纳秒(10^{-9})量级脉冲序列变化梯度,所以 VHF 定位实际上是根据接收较宽时间尺度的 VHF 作载波分析,其定位区域相对也较大.记录时间尺度的大小取决于数字化设备的性能.当然,随着测量时间精度提高,定位精度及分辨率也将提高.

致 谢 感谢山东雷电观测实验的全体人员的支持,感谢山东省气象局以及滨州市气象局在野外实验中给予的支持.

参考文献(References)

- [1] Krider E P. Electric field changes and cloud electrical structure. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(D11): 13145-13149.
- [2] 张义军,刘欣生,肖庆复.中国南北方雷暴及人工触发闪电电特性对比分析. *高原气象*, 1997, 16(2): 113-121.
Zhang Y J, Liu X S, Xiao Q F. A analysis of characteristics of thunderstorm and artificially triggered lightning in the north and south of China. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 1997, 16(2): 113-121.
- [3] 赵阳,张义军,董万胜等.青藏高原那曲地区雷电特征初步分析. *地球物理学报*, 2004, 47(3): 405-410.
Zhao Y, Zhang Y J, Dong W S, et al. Preliminary analysis of characteristics of lightning in the Nagqu area of the Qinghai-Xizang plateau. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2004, 47(3): 405-410.
- [4] Rust W D, Marshall T C, Jorgensen D P, et al. Electrical structure of mesoscale convective systems. // 9th International Conference on Atmospheric Electricity. St Petesburg, Russia, 1992: 160-165.
- [5] Zhang Y J, Meng Q, Lu W T, et al. Charge structures and cloud-to-ground lightning discharges characteristics in two supercell thunderstorms. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 198-212.

- [6] Wiens K C, Rutledge S A, Tessendorf S A. The 29 June 2000 Supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 62(12): 4151-4177.
- [7] 冯桂力, 郗秀书, 周筠珺. 一次中尺度对流系统的闪电演变特征. 高原气象, 2006, 25(2): 220-228.
Feng G L, Qie X S, Zhou Y J. A case study on characteristics of lightning activity in a mesoscale convective system. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, 25(2): 220-228.
- [8] 冯桂力, 郗秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征. 大气科学, 2008, 32(2): 289-299.
Feng G L, Qie X S, Wu S J. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong province. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(2): 289-299.
- [9] 刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力等. 华北一次强对流天气系统的闪电时空演变特征分析. 高原气象, 2008, 27(2): 358-364.
Liu D X, Qie X S, Feng G L, et al. Analyses on lightning temporal and spatial characteristics in the severe convective weather in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2008, 27(2): 358-364.
- [10] 李亚珺, 张广庶, 王彦辉等. 闪电宽带电场三维定位及其回波特征. 高原气象, 2009, 28(6): 1453-1462.
Li Y J, Zhang G S, Wang Y H, et al. Characteristics of three-dimensional lightning and radar echo using the broadband field lightning mapping system. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2009, 28(6): 1453-1462.
- [11] Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, et al. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 53(4): 591-602.
- [12] Zhang G S, Zhao Y X, Qie X S, et al. Observation and study on the whole process of cloud-to-ground lightning using narrowband radio interferometer. *Sci. China Earth. Sci.*, 2008, 53(5): 694-708.
- [13] Rakov V A, Uman M A. *The Lightning Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [14] Smith D A, Shao X M, Holden D N, et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D4): 4189-4212.
- [15] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Observations of VHF source powers radiated by lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(1): 143-146.
- [16] Liu X S, Krehbiel P R. The initial streamer of intracloud lightning flashes. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(D4): 6211-6218.
- [17] Shao X M, Krehbiel P R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(D21): 641-626.
- [18] 董万胜, 刘欣生, 陈慈萱等. 用宽带干涉仪观测云内闪电通道双向传输的特征. 地球物理学报, 2003, 46(3): 317-321.
Dong W S, Liu X S, Chen C X, et al. Broadband interferometer observations of the bidirectional breakdown process in natural lightning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(3): 317-321.
- [19] Shao X M, Stanley M, Regan A, et al. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(10): 1273-1287.

(本文编辑 何 燕)