

三维强风暴动力-电耦合数值模拟研究 II: 电结构形成机制*

孙安平 言穆弘 张义军 张鸿发

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

黄美元

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

文中利用文献[1]所建立的三维强风暴动力-电耦合模式模拟研究了 CCOPE (Cooperative Convective Precipitation Experiment) 计划 1981 年 7 月 19 日的一次强雷暴过程, 分析了该雷暴云中电结构的时空演变特征和形成机制, 讨论了起电、降水和对流三者间的相互关系。结果表明, 感应和非感应起电机理是雷暴云电结构形成的主要机制, 冰相物的出现大大增强了雷暴中的起电过程。雷暴云中最大电场出现的时间与最大固态降水强度的出现基本同时, 但比最大液态降水强度和最大上升速度出现的时间略有滞后, 云中最大上升速度与最大液态降水强度基本同时出现。云中最大电场出现的时段正好是最大上升速度达到最大值后回落的阶段。雷暴云中起电活动的强弱还受云中微物理过程的发展和冰相物出现时间的影响, 对流运动与起电过程的关系主要体现在对流运动影响着云中的凝结和冻结过程, 从而与冰相物出现的时间有关。而仅仅依靠对流运动对正负离子的输送机制不可能产生云中接近放电的临界电场。

关键词: 起电机理, 雷暴云, 电结构。

1 引 言

很多的观测都表明雷暴云中的空间电荷呈双极性或三极性分布, 其中主正电荷区高度位于 -20°C 层左右, 负电荷区高度位于 -10°C 层左右, 而次正电荷区高度位于 0°C 层左右。Takahashi^[2], Chi^[3], 言穆弘^[4-6] 和 Helsdon^[7] 等都利用二维模式讨论了雷暴中电结构的形成原因, 得出感应和非感应起电机理是形成雷暴内电结构的主要因素, 非感应起电机理不仅对雷暴中的电结构的形成有贡献, 更重要的是它决定着降水粒子所携带电荷的极性, 此外, 雷暴云中的液态水含量也是影响云内起电过程的一重要因素。

文献[8]利用 CCOPE (Cooperative Convective Precipitation Experiment) 计划 1981 年 7 月 19 日的

雷暴云综合观测资料对建立的三维强风暴模式进行了检验。本文在文献[8]的基础上分析该雷暴云内部电结构时空演变特征和形成机制。

2 结果分析

2.1 雷暴云的宏观动力特征

模拟结果表明, 在模拟到 21 分钟时初始云泡形成(云水比含量大于 0.1 g/m^3), 云底温度较高为 20°C 左右。此时云中最大上升气流速度为 10.0 m/s 。第 26 分钟时在 2.5 km 左右通过云水自动转换形成雨水。模拟到 30 分钟时, 在主上升气流上方 -10°C 到 -20°C 区域, 冰晶首先通过凝华和云水匀质冻结而形成, 但比含量很小(小于 0.01 g/m^3), 而过冷雨滴通过异质核化冻结形成霰。42 分钟时上升气流速度明显增加, 此时最大上升速度达到 21.5 m/s , 并且

* 初稿时间: 2001 年 6 月 11 日; 修改稿时间: 2001 年 10 月 9 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40135010 和 49975002), 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(210037)。

看到此时由于受弱环境切变风的影响, 雷暴云中上部上升气流区略向迎风侧倾斜, 而在云底部向背风侧倾斜, 另外由于雷暴云下部冷堆的作用, 在云下部雷暴移动的前方出现下沉气流, 下沉气流速度为-3.0 m/s(图1)。此时云顶高已接近14 km, 云内最大含水量区域范围加大, 分布在4.0~8.0 km之间, 含水量最大达到10.0 g/m³, 这时在云顶已明显出现云砧, 云中已出现了大量的冰相物, 其中冰晶在11.0 km高度上最大含量达到0.3 g/m³, 冰雹和霰的含量分别达到0.006 g/m³和0.005 g/m³, 这一阶段地面也已开始出现降水(图2a~f)。46分钟地面开始降雹, 此后由于云内降水物拖曳作用的不断增强, 整个云区内上升气流越来越弱, 模拟至54分钟时, 雷暴云内上升气流大大减弱, 并且在雷暴云底后部出现冷出流, 此时冷堆的厚度也增至4.0 km左右, 在雷暴云下部完全为下沉气流所控制, 其最大下沉速度达到3.8 m/s。虽然此时在雷暴云中上部还维持着较弱上升运动, 但上升速度已大大减小, 最大值仅为2.5 m/s。此时云内凝结(华)过程大大减弱, 相应释放的潜热减少, 另外由于雷暴中大量的液态和固态降水消耗了云内的过冷水和冰相物的含量, 使得此时云中总水含量最大值急剧减少为1.4 g/m³, 并且由于受下沉气流的作用, 此时含水

量高值区降落至3.0 km以下, 由于地面降雨和降雪, 云内最大雨水含量从42分钟时的5.0 g/m³减小为0.4 g/m³。

2.2 雷暴云各阶段上的电结构宏观特征

图3为模拟雷暴云在第30, 42和54分钟3个时刻的空间电结构分布。图3a, b和c分别表示空间电荷浓度、垂直和水平电场强度(实线为正值, 虚线为负值)。图中空间电荷浓度单位为 $\times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 电场强度的单位为kV/m(下同)。模拟结果可见,

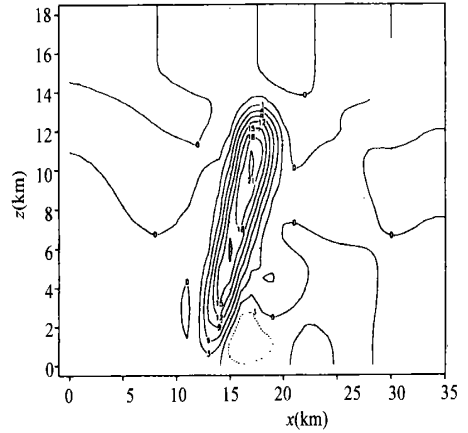


图1 雷暴云第42分钟垂直速度场在 y = 18 km 沿 x - z 剖面分布(实线表示正值, 虚线表示负值)

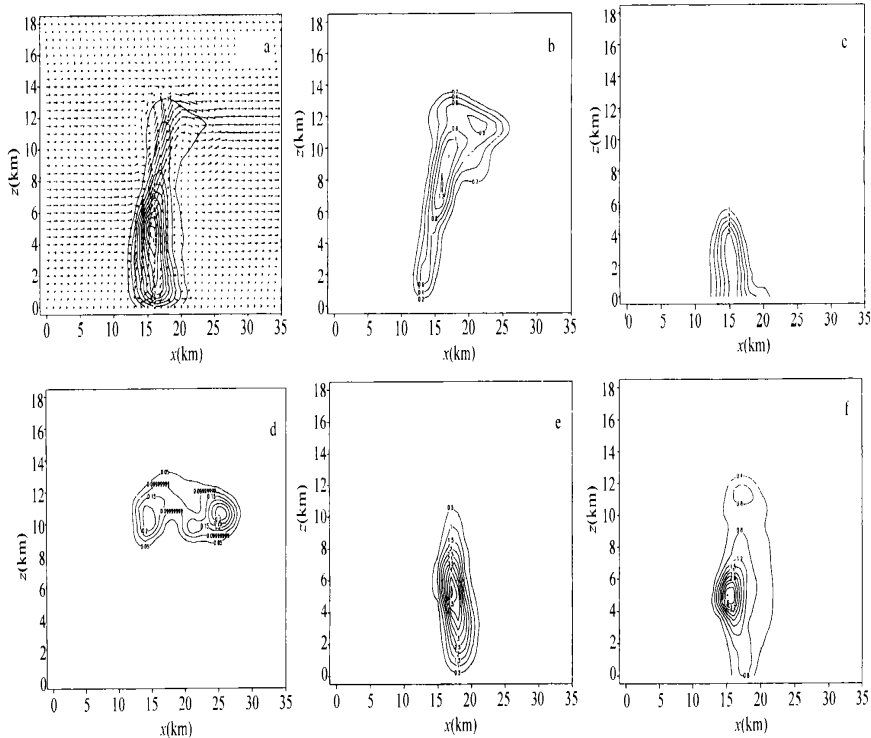


图2 第42分钟雷暴云总水(ρ_{qT})和各种水成物粒子含量的空间分布
(a. 总水成物, b. 云水, c. 雨水, d. 冰晶, e. 冰雹, f. 霰; 单位: g/m³)

在雷暴云发展初期,首先在 3.0 km 高度上开始形成了负电荷中心,中心电荷浓度最大值为 $0.023 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ (图 3a₁),相应地在 1.0 km 和 4.0 km 分别形成正负电场中心,在水平方向上同样也形成了正负电场的偶极性分布,此时云内最大水平和垂直电场分别为 0.75 kV/m 和 1.0 kV/m (图 3b₁~ c₁)。虽然此刻垂直电场很小,但比晴天电场大数倍,因而为感应起电机提供了较大的背景电场。

当雷暴云发展到 42 分钟时,云内三极性电荷结构已很明显,此时正负最大电荷浓度分别达到 $0.4 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 和 $1.35 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$,负电荷中心、上

部正电荷中心和云下次正电荷中心的所在高度分别为 7.0, 12.0 和 5.0 km (图 3a₂)。在云内高度大约为 7.5 km 的高度上形成一很强的负电场中心,中心极值为 16.0 kV/m ,在高度为 12.5 km 和 5.0 km 处形成了两个正电场中心,中心极值分别达到 4.0 kV/m 和 10.0 kV/m (图 3b₂)。此时雷暴云中水平电场同样也达到了最大值 8.0 kV/m ,在云中部和上部水平电场的偶极性分布正好相反(图 3c₂)。与 35 分钟的模拟结果(图略相比发现,35 分钟时雷暴云内的电结构为正负偶极性分布,而没有云下部的次正电荷区。另外,上部正电荷区所在的高度和负

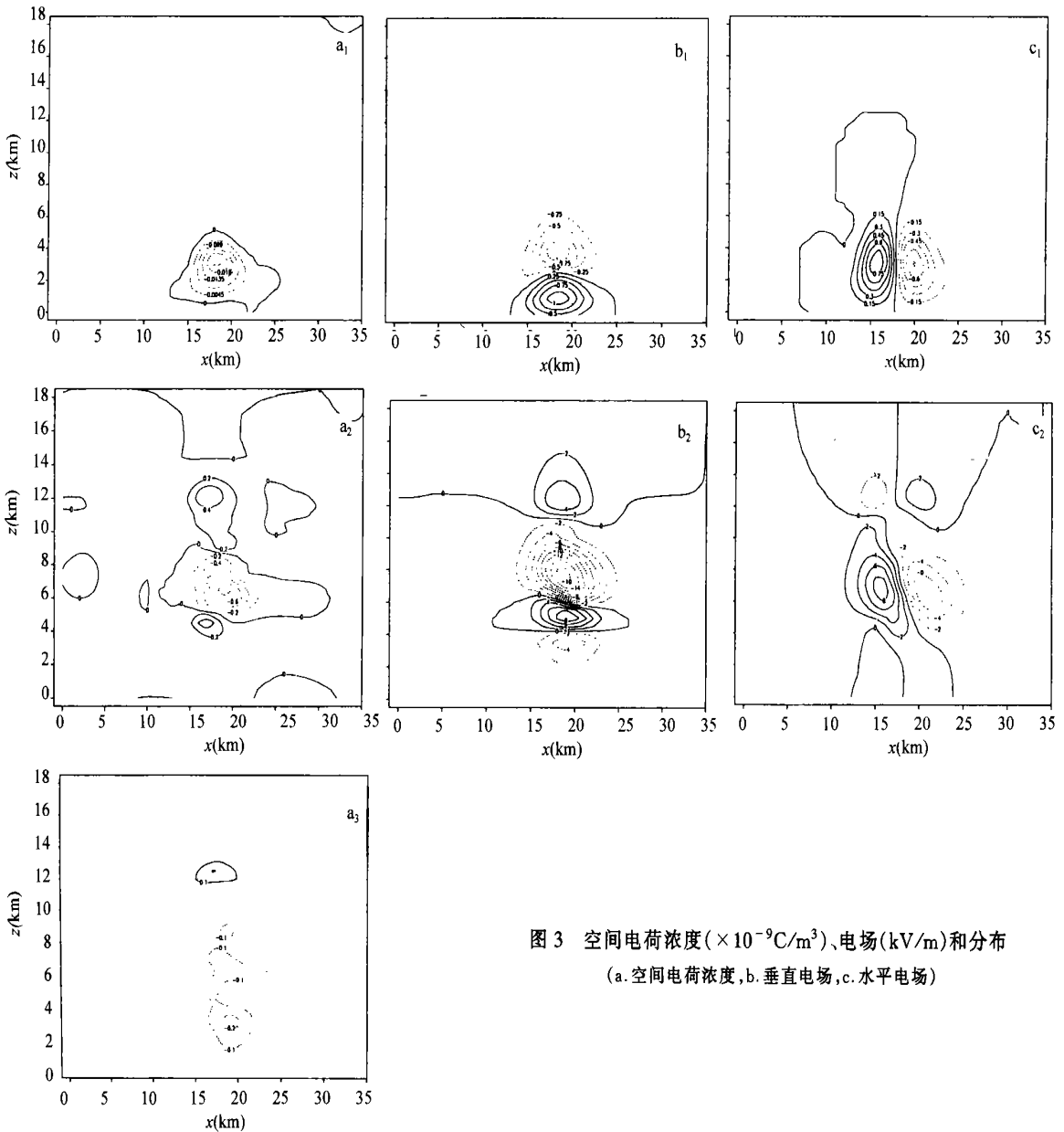


图3 空间电荷浓度($\times 10^{-9} \text{C/m}^3$)、电场(kV/m)和分布
(a. 空间电荷浓度, b. 垂直电场, c. 水平电场)

电荷区范围有所变化, 雷暴云上部正电荷极值区高度在 35 分钟时为 8.5 km, 42 分钟升高到 12.0 km, 负电荷区极值区高度在两个时次内虽然变化不大 (大致为 6.5 km), 但整个负电荷区向云下扩展。当雷暴云发展到 54 分钟时, 云中次正电荷区消失, 而主正电荷区最大空间电荷浓度只有 $0.2 \times 10^{-9} \text{C}/\text{m}^3$, 负电荷区最大电荷浓度仅为 $-0.2 \times 10^{-9} \text{C}/\text{m}^3$ (图 3a₃)。

2.3 各阶段电结构形成机制分析

表 1 为 3 个时刻雷暴云内各种水成物电荷密度对空间电荷结构的总体贡献统计表。从表 1 中可

表 1 不同时刻各种水成物电荷密度对雷暴内电荷结构的总体贡献(单位: $\times 10^{-9} \text{C}/\text{m}^3$)

	次正电荷区			主正电荷区			负电荷区		
	54分	30分	42分	54分	30分	42分	54分	30分	42分
云滴	/	0.6	/	-0.02	-0.4	-0.002	/	-0.5	/
雨滴	/	/	/	-0.003	-0.95	/	/	/	/
冰晶	/	2.4	0.2	/	/	/	/	/	/
冰雹	/	-0.12	/	/	-0.12	/	/	0.18	/
霰	/	-2.48	/	/	-0.25	-0.2	/	0.75	/
空间电荷浓度	/	0.4	0.2	-0.023	-1.35	-0.2	/	0.43	/

注: ‘/’ 表示该项不存在。

随着雷暴云内部对流运动的增强以及冰相水成物粒子的增多, 云中的各种起电机作用贡献越来

见, 对于雷暴云的不同发展时刻, 组成各个电荷区的水成物种类不同。30 分钟时云内的负电荷区主要由携带负电荷的云滴和少量的雨滴组成, 其中云滴的电荷密度占 87%, 雨滴的电荷密度占 13%。云滴和雨滴是通过离子扩散、电导两种起电机机制荷电的。此时非感应起电机机制由于不存在冰相粒子而不起作用, 对于感应起电机机制, 虽然此时云中出现了雨水, 但因云雨滴之间的碰撞分离作用小, 故起电率也很弱。由于云滴较多的吸附了负离子, 因而形成了单极性结构。

越大, 电荷的累积也越来越多。当雷暴发展到 42 分钟时, 5 种水成物粒子都携带了一定的电荷(图 4), 此

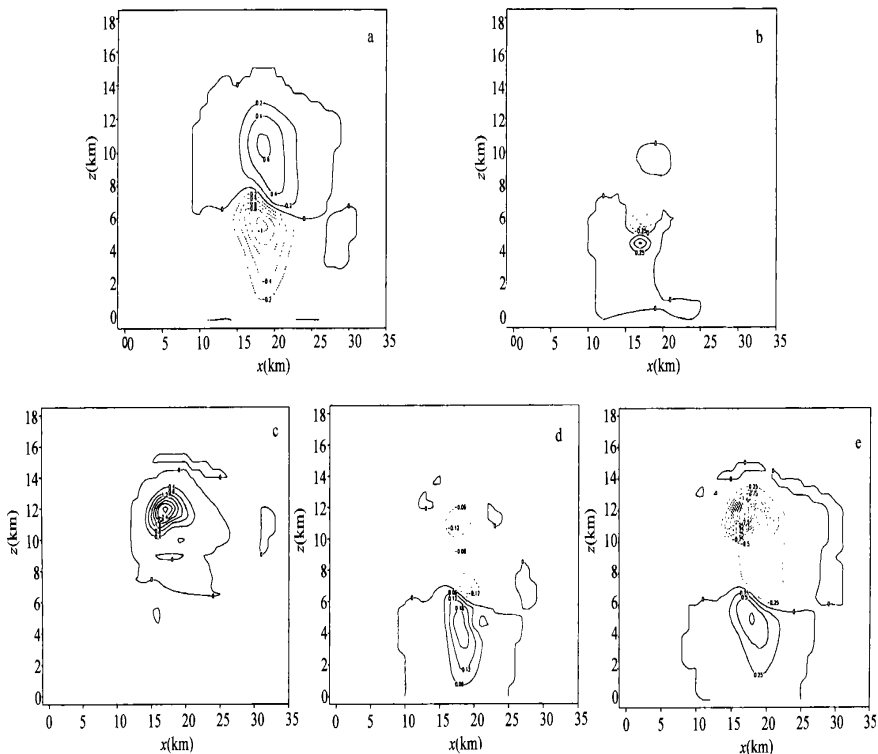


图 4 各种降水粒子电荷密度($\times 10^{-9} \text{C}/\text{m}^3$)沿 $y = 18 \text{ km}$ 的 $x - z$ 剖面分布

(a. 云滴, b. 雨滴, c. 冰晶, d. 冰雹, e. 霰)

表2 感应和非感应起电机制 42分钟时电荷密度转换量占各种水成物电荷密度的百分比(%)

	转换率占云滴 总电荷 密度的百分比	转换率占雨滴 总电荷 密度的百分比	转换率占冰晶 总电荷 密度的百分比	转换率占冰雹 总电荷 密度的百分比	转换率占霰粒子 总电荷密度的百分比
PERC	1	88	/	/	/
PEHC	6	/	/	3	/
PEGC	18	/	/	/	8
PEHI	/	/	10	7	/
PEGI	/	/	13	/	10
NPEHC	34	/	/	25	/
NPEGC	41	/	/	/	33
NPEHI	/	/	31	65	/
NPEGI	/	/	46	/	49

注: ①‘/’表示该项不存在。

② PE 和 NPE 分别表示感应和非感应起电机制, 后面两个字母表示相碰撞的两种水成物粒子种类, C, R, I, G 和 H 分别表示云滴、雨滴、冰晶、霰和冰雹。

时云内负电荷区主要由云滴、雨滴以及一部分由雷暴云上部降落至中部的冰雹和霰粒子的电荷组成, 其中雨滴所携带的负电荷贡献最大(占负电荷区总电荷浓度的 70%), 云滴次之(占负电荷区总电荷浓度的 29%), 最大负电荷浓度达到 $1.35 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 。云内上部正电荷区主要由冰晶和云滴组成, 其中冰晶粒子的电荷密度达到 $2.4 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 云滴的电荷密度达到 $0.6 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 。而该区域中霰和冰雹携带负电荷, 最大值分别为 $2.48 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 和 $0.12 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 所以最大正电荷浓度约为 $0.4 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ (表 1), 而云下部次正电荷区主要由霰、冰雹组成, 它们的最大电荷密度分别达到了 $0.75 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 和 $0.18 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 分别占该区空间电荷浓度的 81% 和 19%。最大正电荷浓度与主正电荷区差不多为 $0.43 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 。54 分时云中上部正电荷区由残留在云砧处的冰晶组成, 而负电荷区由云中、上部降落至融化层以下的霰粒子组成, 此时正、负电荷浓度极值仅为 $0.2 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 和 $0.2 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ 。

由于 30 分钟和 54 分钟两个时刻雷暴中电结构为初期发展和最后消亡阶段, 云内起电过程较弱, 云内电结构代表性不好, 另外考虑到离子扩散和电导起电率在量级上比感应和非感应起电率小, 因而以下将着重分析 42 分钟时感应和非感应起电机制引起的电荷密度转换值。表 2 为几种主要的感应和非感应起电机制引起的电荷密度转换量占各种水成物总电荷密度的百分比。从表 2 中可见, 42 分时云滴同冰雹粒子和霰粒子碰并引起的非感应起电过程是云水荷电的主要机制, 这二者产生的电荷密度之和占云水总电荷密度的 75%, 其次是云滴同冰雹粒子和霰粒子

碰并引起的感应起电过程, 这二种碰并过程都使云水携带正电荷, 霰和雹为负电荷。贡献最小的是云、雨滴之间的感应起电过程。但对于雨滴来说, 云、雨滴之间的感应起电过程是雨滴荷电的主要来源(88%), 雨滴携带负电荷, 云滴为正电荷。同云水相似, 冰晶荷电的主要机制也是同冰雹粒子和霰粒子碰并引起的感应和非感应起电过程, 其中感应起电过程产生的电荷密度占冰晶总电荷密度的 23%, 而非感应起电过程产生的电荷密度占冰晶总电荷密度的 77%。起电过程使冰晶带负电荷, 霰和雹带负电荷。对于冰雹和霰粒子来说, 冰雹-冰晶和冰雹-云滴间的非感应起电过程引起的电荷转换量占冰雹电荷密度的 90%, 霰-冰晶和霰-云滴间的非感应起电过程引起的电荷转换量占冰雹电荷密度的 82%。根据本文模拟结果, 冰雹和霰粒子同小粒子间的非感应起电过程是两者荷电的主要途径, 感应机制次之。

2.4 雷暴云电结构随时间的演化特征及其成因

图 5 为 15~50 分钟正负电荷极值区高度随时间的变化特征。由于 50 分钟后雷暴云内的电荷总体结构变化不大, 只是量值上有所减小, 因而图中只分析到 50 分钟。图中右边坐标轴表示云中左边坐标轴相应高度上的平均温度, 实线、虚线和点划线分别表示负电荷、正电荷和次正电荷区。从图 5 中可以详细地看到随着雷暴云的发展, 云内的电荷分布形式从单一的负极性结构转变为上正下负的双极性结构, 尔后随着云内冰相物的出现, 又转变成为三极性结构。从 15 分钟到 30 分钟云中的负电荷区由云滴和雨滴组成, 由于离子扩散和电导机制使二者都携带负电荷, 同时提供了感应起电机制的背景电场; 15~30 分钟

这一阶段,云中上升气流增加幅度不是很大,因而负电荷中心高度变化缓慢。30分钟开始由于云滴同雨滴之间的感应起电作用,使得云滴携带正电荷,而雨滴携带上了负电荷,此刻云中上升气流也迅速增强,在气流的分选作用下,云滴在上升气流的输送下向云上部运动,加之出现正电荷的冰晶,33分钟左右云内的电结构开始变为双极性结构,并且正电荷中心不断向上运动。当雷暴云发展到37分钟时由于冰雹和霰粒子从云中上部逐渐下落至云底,使得在5.0 km高度处开始出现次正电荷区,随着云中冰雹和霰粒子向云滴的下落,该正电荷区高度也在逐渐下降直到48分钟时消失。同样从42分钟开始由于地面降雨,云中负电荷中心也随之降落,并逐渐减弱,48分钟以后组成负电荷区的水成物主要是从云上部降落至此的融化冰雹粒子。45分钟以后云砧内的残留冰晶粒子维持着云上部的正电荷区。

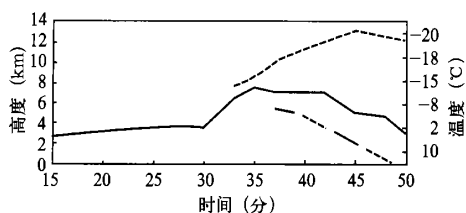


图5 雷暴云内正负电荷中心高度随时间的变化
(实线、虚线和点划线分别表示负电荷、上部正电荷和次正电荷中心,右面坐标轴表示左面高度坐标轴相应高度处的温度值)

此外,由相应的温度分布看到,在35~42分钟时负电荷中心所在温度大致为 -15°C ,42分钟以后负电荷中心所在温度有所增加。正电荷中心只有在45分钟后才维持在大约为 -25°C 的高度上,在其它时段其所在高度变化较大,并不是一恒定值。同样次正电荷中心只有在刚刚出现时维持在 -5°C 左右,其所在高度很快下降。Krehbial等^[9]认为在一般雷暴云中 -20°C 以上有正电荷集聚,在 $0\sim-20^{\circ}\text{C}$ 之间有负电荷积聚。通过上面结果的分析可知,模拟得到的结果与Krehbial的结论比较一致。但以上模拟结果也显示这种电结构特征并不是云中恒定的情况,随着雷暴云内动力和微物理过程的演变和发展,云内电荷分布高度是变化的。而且对于不同环境下发展起来的雷暴情况也不同,这一结果于言穆弘^[5]的结论比较一致。

综合图4和表1结果,模拟云体有明显的三极

性电荷结构,其分布与数值与Helsdon模拟结果较一致(Helsdon,1987,图1-B)^[7],也与国外很多观测记录^[10-12]类似,较多偏重研究总体空间电荷分布。本文在揭示总体空间电荷时空分布同时,较多关注不同水成物电荷的分布,其目的是想深入研究电结构与云内微观和动力过程之间的关系。

云内电结构观测也只是总空间电荷浓度,值得提到的是Stolzenburg^[13]的综合性观测,利用气球携带电场仪和探空对15次中尺度对流系统和13次孤立雷暴进行云内电场观测,并利用高斯定理反演云内电荷结构,得到很明显的三极电荷结构(文献[13]中图2),下部正电荷区浓度 $0.5 \times 10^{-9}\text{C}/\text{m}^3$,主负电荷区浓度 $1.0 \times 10^{-9}\text{C}/\text{m}^3$,上部正电荷区浓度 $0.7 \times 10^{-9}\text{C}/\text{m}^3$ 。其数值和位置高度与本文模拟结果基本一致。

2.5 起电过程与对流和降水间的相关分析

雷暴的主要特征是强对流、强降水和强起电,对这些特征的研究已有很长的历史,但这三者之间相互关系的研究还不多见。随着雷电探测技术的发展,尤其是各种雷电定位系统的建立以及人工引发雷电技术的完善和发展,并配合雷达和地面电场观测为研究雷暴电活动与雷暴动力和降水等过程的相关性提供了良好的条件和技术保证,因此,近年来,对于雷暴电活动与雷暴动力和降水之间相关性的研究越来越多并取得了初步结果。Lhermitte和Krehbial^[9]将多普勒雷达导出的空气运动与遥感的放电位置做了综合分析,发现旺盛的电活动开始时间与旺盛的上升气流发展之间有着较好的相关性,后者穿入 $-10\sim-15^{\circ}\text{C}$ 区域。言穆弘^[6]研究发现,只有在强上升气流穿过 -20°C 高度层时才会产生强起电,且发生在达到最大上升速度后出现降落的阶段。上升气流初始降落时段若能继续维持相对较强的上升气流,则可增长次正电荷区的持续时间。

图6和图7为雷暴云整个生命史内最大垂直电场、最大上升速度和最大液态、固态降水强度随时间的分布。由图6和图7看到,由于雷暴云21分钟开始凝结释放潜热,因而从21分钟开始上升速度不断增加,上升速度不断增加又促进了云内凝结和冻结过程的发展,增加了云中水成物粒子的含量和浓度,在33分钟之前,云中水成物粒子含量还很小,因而起电较弱,但从33分钟开始云中起电过程逐渐活跃起来,36分钟由于云中液态降水强度达到最大值 $18.0\text{mm}/\text{h}$,强烈的下沉拖曳作用对流运动开始相

应减弱,到42分钟时最大上升速度减小为27 m/s,在36~42分钟这一阶段,虽然云中上升速度减小,但固态降水强度的逐步增加意味着有更多的冰相物粒子在云中长大并且同云、雨滴之间的碰并过程加强,因而也就增强了云中的感应和非感应起电过程,所以最大电场仍在增加。随着地面降雹(霰)的持续增强,42分钟以后云中冰相物含量大量减少,而冰相物粒子含量的多少决定着云内起电过程的强弱,所以从42分钟开始,云内起电活动开始减弱,最大电场也由42分钟时的最大值16.5 kV/m逐渐减小。到57分钟固态降水结束时,云中最大电场不到1.0 kV/m。

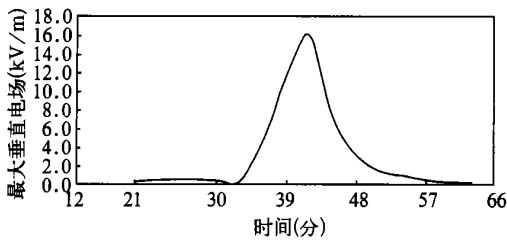


图6 最大垂直电场随时间的变化(单位为 kV/m)

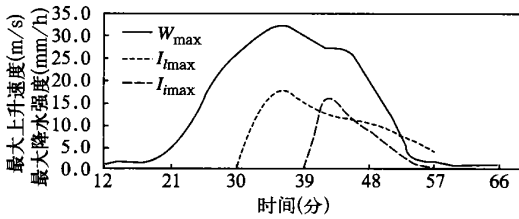


图7 最大上升速度(W_{\max})、液态($I_{l\max}$)和固态($I_{s\max}$)

降水强度随时间的变化

(实线:最大上升速度,虚线:液态,断线:固态,

单位: m/s, 降水强度: mm/h)

可见,雷暴云中最大电场与最大固态降水强度同时出现,而比最大液态降水强度和最大上升速度出现的时间滞后约6 min,云中最大上升速度出现的时间同最大液态降水强度出现的时间基本相同。云中最大电场出现的时段正好是最大上升速度达到最大值后回落的阶段,此结果同言穆弘^[6]的结论比较一致。

由此可见,雷暴云中起电活动的强弱更依赖于云中微物理过程的发展和冰相物的出现时间,对流运动与起电过程的关系主要体现在对流运动影响着

云中的凝结和冻结过程,从而与冰相物出现的时间有关。而仅仅依靠对流运动对正负离子的输送机制不可能产生云中接近放电的临界电场。

3 结 论

文中利用三维强风暴动力和电耦合模式对CCOPE计划中7月19日出现的雷暴进行了模拟分析,讨论了该雷暴内电结构的形成机制,分析了雷暴内空间电结构的时空变化特征。结果表明:

在整个云体发展过程中,首先在中部区域出现负的单极性电荷区,此电荷区主要由云滴和雨滴组成,荷电方式主要为云滴和雨滴靠电导和扩散两种机制吸附自由离子而荷电且携带负电荷。随着雷暴云发展的逐渐成熟,云滴同雨滴之间开始产生感应起电,使得云滴携带正电荷,而雨滴携带上了负电荷,在上升气流的分选作用下,云滴向云上部运动,加之荷正电的冰晶的出现,云内的电结构开始变为双极性结构,并且正电荷中心不断向上运动。此后由于冰雹和霰粒子从云中上部逐渐下落至云下部,使得在云下部开始出现次正电荷区,随着云中冰雹和霰粒子向云底的下落,该正电荷区高度也在逐渐下降,当云中的冰雹和霰粒子大部分降落至地面后,云中次正电荷区消失。同样由于降雨作用,云中负电荷中心也随之降落,并逐渐减弱,在雷暴云发展后期组成负电荷区的水成物主要是从云上部降落至此的融化冰雹粒子,这时云内主正电荷区为残留在云砧内的冰晶粒子组成。

通过对雷暴云内最大上升速度、最大液态降水强度和最大固态降水强度随时间的变化发现,雷暴云中最大电场出现的时间同最大固态降水强度出现时间基本相同,而比最大液态降水强度和最大上升速度出现的时间滞后约6 min,云中最大上升速度出现的时间同最大液态降水强度出现的时间基本相同。云中最大电场出现的时段正好是最大上升速度达到最大值后回落的阶段。雷暴云中起电活动的强弱更依赖于云中微物理过程的发展和冰相物的出现时间,对流运动与起电过程的关系主要体现在对流运动影响着云中的凝结和冻结过程,从而与冰相物出现的时间有关。而仅仅依靠对流运动对正负离子的输送机制不可能产生云中接近放电的临界电场。

参考文献

- 1 孙安平,言穆弘,黄美元.三维强风暴动力-电耦合数值模拟研究I:模式及其电过程参数化方案.气象学报,2002,60(6):

722~ 731

- 2 Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 1536~ 1548
- 3 Chiu C. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time- dependent cloud model. *J Geophys Res*, 1978, 83: 5025~ 5049
- 4 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 积云动力和电过程二维模式研究II: 计算结果. *地球物理学报*, 1996, 39(1): 65~ 78
- 5 言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究I: 云内因子影响. *高原气象*, 1996, 15(4): 425~ 437
- 6 言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究II: 环境因子影响. *高原气象*, 1996, 15(4): 438~ 447
- 7 Heldson, Farley J R. A numerical modeling study of a Montana thunderstorm. *J Geophys Res*, 1987, 92: 5661~ 5675
- 8 孙安平, 言穆弘, 黄美元. 三维强风暴动力-电耦合数值模拟研究—模式的初步检验. *高原气象*, 2000, 19(4): 435~ 440
- 9 Krehbiel P R, Brook M, McCrory R. An analysis of the charge structure of lightning discharge to ground. *J Geophys Res*, 1979, 84(E5): 2432~ 2456
- 10 Williams E R. The tripole structure of thunderstorms. *J Geophys Res*, 1989, 94: 13151~ 13167
- 11 Marshall T C, Marsh S J, Rust W D. Electric field soundings through thunderstorms. In: *Proceeding 8th International Conference on Atmospheric Electricity*, 1988, 70499
- 12 Byrne G J, Few A A, Stewart M F. Electric field measurements within a severe thunderstorm anvil. *J Geophys Res*, 1989, 94: 6297~ 6307
- 13 Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. Electrical structure in thunderstorm convective region. (I): Mesoscale convective systems, 2 Isolated storms. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14059~ 14096

NUMERICAL STUDY OF THUNDERSTORM ELECTRIFICATION WITH A THREE- DIMENSIONAL DYNAMICS AND ELECTRIFICATION COUPLED MODEL II: MECHANISM OF ELECTRICAL STRUCTURE

Sun Anping Yan Muhong Zhang Yijun Zhang Hongfa

(*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Huang Meiyuan

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract

In this paper, a new three- dimensional dynamics and electrification coupled model from reference [1] has been used for simulating a thunderstorm process by observations of July 19, 1981 CCOPE(Cooperative Convective Precipitation Experiment). It analyzes the spatial and temporal development of electric structure within the thunderstorm and development mechanism, and discusses the interactions between electrification, convection and rainfall. Results indicate that inductive and non- inductive charging mechanism play a main role in evolution of electrical structure within thunderstorms, and the electric development depends highly on ice phase micro- physical processes. The appearing time of maximal electric field is the same as appearing time of maximal solid rainfall density, but later than liquid and maximal ascending velocity. And the appearing time of maximal electric field is also the same as starting falling time of maximal ascending velocity. The interactions between electrification and convection mainly are that the convection can affect condensation and freezing processes in the clouds.

Key words: Electrification mechanism, Thunderstorms, Electrical structure.