

基于 RAMS V6.0 的非感应起电机制评估和雷暴初期电荷结构模拟*

李万莉¹⁾ 刘冬霞¹⁾ 郝秀书^{1)†} 傅慎明²⁾ 段树¹⁾ 陈羿辰¹⁾

1) (中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2) (中国科学院大气物理研究所国际气候与环境中心, 北京 100029)

(2011年5月11日收到; 2011年6月20日收到修改稿)

数值模式是研究雷暴内起电和电荷结构的重要工具. 本文将 Takahashi (1978) 和 Saunders (1991) 两种主流非感应起电机制加入最新版本的中尺度模式 RAMS (Version 6.0), 建立了一个区域大气 - 电耦合中尺度雷暴云模式, 据此对发生于北京的一次雷暴过程首次放电前的电荷结构和水成物粒子起电情况进行了较成功的模拟. 结果表明, Takahashi (1978) 和 Saunders (1991) 方案模拟的雷暴电荷结构在电场达到击穿阈值时均呈现三极性特征, 但 Takahashi 和 Saunders 方案模拟的雷暴电荷结构演变过程有一定的差异, Takahashi 方案的电荷结构从起电到放电都是三极性特征, Saunders 方案的电荷结构从反偶极性演变为三极性. 此外, 两种方案的模拟结果均表明雨滴是雷暴云低层的正电荷载体, 聚合物和霰是高层的主要电荷载体, 霰的电荷中心分布形态与雷暴云的总电荷分布形态相似.

关键词: 非感应起电参数化方案, RAMS V6.0, 三极性, 反偶极性

PACS: 92.60.Pw, 21.10.Ft

1 引言

数值模式是研究雷暴内起电和电荷结构的重要工具. 20世纪70年代, Takahashi^[1] 最早利用二维云模式模拟了雷暴云内的电结构, 之后随着一系列实验室起电试验^[2,3] 及飞机或气球穿云观测^[4] 的开展, 人们认识到非感应起电是云内的主要起电机制. 云粒子间在相互碰撞时, 由于碰撞界面的表面特性和生长速度的不同, 大小粒子间会产生电荷转移. 目前, 关于非感应起电机制有两种主要的观点, 一种观点认为转移的电荷取决于云温和液态水含量^[2], 而另一种观点则认为转移的电荷与有效液态水含量有关^[3].

许多学者利用数值模式研究了云的非感应起电机制. Helsdon 和 Farley^[5], Ziegler 等^[6], 言穆弘等^[7] 建立了二维积云起电模式, 讨论了冰相云中粒子间碰撞的非感应起电机制对雷暴闪电结构形成的作用, 发现非感应起电效率依赖于液态水含量和反转温度的选取. Helsdon 等^[8] 在包括动力和

微物理过程的两维雷暴云起电模式 (SEM) 中对比分析了两种非感应起电机制, 研究表明雷暴云内的电荷结构一般是三极性或偶极性结构. Rawlins^[9] 最早将三维积云对流模式与非感应起电机制耦合, 得出冰相间的起电转移的电荷是 $10 \times 10^{-15} - 65 \times 10^{-15}$ C. Mansell 等^[10] 在三维的 SEM 模式中引入了非感应起电机制, 通过对一次多单体雷暴云的模拟表明, 不同的起电机制可能会产生不同的云电荷结构. 孙安平等^[11]、郭凤霞等^[12] 将非感应起电机制引入三维强风暴动力 - 电耦合数值模式中, 对比分析了不同的电参数化方案所产生的云电荷结构差异, 指出雷暴云各类水成物粒子分布的演变及相应的流场条件是决定空间电荷结构、进而决定放电特征的关键因素.

自然界雷暴云的起电过程和电荷分布会受到大气动力、热力和下垫面条件等的影响, 并且电荷会随着气流的演变出现平流和扩散, 因而建立大气 - 电耦合模式能在一定程度上反映雷暴内的电荷演变过程. 由于区域大气模式 RAMS 对微物理过

* 国家自然科学基金重点基金 (批准号: 40930949)、中国博士后科学基金 (批准号: 119100581F) 和中科院百人计划项目资助的课题.

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

程有较好的描述,因此,Altaratz 等^[13]曾在 RAMS V4.3 中引入了 Takahashi^[2]和 Saunders^[3]两种非感应起电机制,建立了 RAMS V4.3-电耦合模式,并对发生于地中海的冬季雷暴进行了模拟研究,指出 Takahashi 非感应起电机制呈现的是三极性电荷结构,而 Saunders 非感应起电机制是反偶极性电荷结构.刘冬霞^[14]利用 RAMS V4.3-电耦合模式对发生于北京的一次强雷暴进行了较成功的模拟.然而,RAMS V4.3 建立于 2000 年,版本过于陈旧,目前已经被最新的 RAMS V6.0 所淘汰.RAMS V6.0 模式相对于旧版本进行了大量的改进,明显地提高了模拟性能,邓小花^[15]利用不同版本的 RAMS 模式对具有较复杂地形的区域进行模拟,对比结果表明 RAMS V6.0 版本的模拟效果较旧版本有了很大改善,因此基于更新版本的 RAMS V6.0 建立大气-电耦合模式是有必要的.本文将对新建立的 RAMS (Version 6.0)-电耦合模式进行介绍,并利用该模式对发生于北京夏季的一次雷暴过程进行模拟,然后检验模式的模拟结果,从而为更深入地研究雷暴闪电活动提供有效的工具.

2 RAMS V6.0-电耦合模式的建立

2.1 RAMS V6.0 模式的介绍

区域大气 RAMS 模式是美国科罗拉多州立大学在 1986 年结合 3 个相关模式 (CSU 云/中尺度模式、流体静力的云模式和海陆风模式) 发展起来的具有多用途的区域大气模拟系统,模式基本方程组为三维、非静力、Reynolds 平均的原始方程.1988 年新一版的 RAMS 模式产生,之后逐渐发展更新,2000 年 Version4.3 建立,之后更新为 Version4.4 和 Version5.0,2006 年 RAMS V6.0 建立.Version6.0 相对于旧版本来说有了很大的改进:在源程序代码方面所有的数据类型用 F90 定义,应用了 Module 和指针,增加了代码文件的数量;所有读入和输出数据格式为 HDF5,节省了大量的空间;采用新的 FDDA 同化观测资料方案,并在参数设置中可选和进行控制;新增了 E-eps, E-1 次网格方案, Kain-Fritsch 积云参数化方案, Recycle 初始化方案,水汽和冷凝物的同化方案,积云反转方案, Urban canopy 参数化方案,采用陆面模块 LEAF3,新增 NDVI 用于计算叶面积指数、植被覆盖度、植被反照率、植被粗糙度,并节约了大量计算机时(引自 RAMS V6.0 用户手册).RAMS V6.0 的微物理过程采用谱

分布(伽马函数),主要包括云滴、雨滴、冰晶、雪晶、霰、聚合物和雹七种水成物粒子,各种粒子的转化过程主要包括云滴和冰晶的核化、水汽的蒸发和冻结、冰相粒子的融化、升华和凝华、各种粒子间的碰撞以及次生冰晶机制等^[16].

2.2 起电参数化方案

水成物粒子的直径、浓度、降落末速度、云温、液态水含量是影响粒子碰撞起电的主要因素,而云温、液态水含量等又受到环境因素的影响.本文将起电参数化方案引入 RAMS V6.0 的微物理过程,并与大气的动力、热力过程相关联,在模式中综合考虑雷暴内对流、电传导、粒子扩散和湍流扩散等过程引起的电荷产生和输送.由于雷暴闪电引起的电场很快降低,随之又会很快恢复,整个起电和放电过程较复杂^[17-21],因此本文暂时只考虑雷暴云首次放电前的起电过程,将两种主要的非感应起电机制 Takahashi^[2](以下简称 TAK78)和 Saunders^[3](以下简称 S91)参数化方案与 RAMS V6.0 耦合.

利用平均落速差近似,大小两种粒子碰撞时电荷密度转移率为

$$\frac{d\rho_g}{dt} = \frac{\pi}{4} \int \int (D_g + D_i)^2 |V_g - V_i| E_{gi} n_i(D_i) n_g(D_g) \delta Q dD_i dD_g, \quad (1)$$

其中, ρ_g 是某类粒子所荷的电荷密度, D_g 和 D_i 表示不同粒子的直径, V_g 和 V_i 代表不同粒子的末速度, $n(D)$ 是粒子的数浓度, E_{gi} 是碰撞系数. δQ 是每个粒子每次碰撞时转移的电荷,其值取决于具体的非感应起电参数化方案.两种方案如下.

方案 1 根据 Takahashi^[2] 的实验结果,粒子每次碰撞转移的电荷量是温度和液态水含量的函数,如文献 [2] 图 8 所示.需要指出的是, Takahashi^[22] 对每次碰撞转移的电荷量增加了修正因子(根据粒子直径和末速度计算),关系式如下:

$$\alpha = 5 \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^2 |V_g - V_i| / V_0 \quad (2)$$

其中 D_i 是粒子的直径, V_g 和 V_i 代表不同粒子的末速度, D_0 和 V_0 定为 $100 \mu\text{m}$ 和 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. α 的上限是 10.

方案 2 是根据 Saunders^[3] 首先提出的有效液态水含量的概念

$$\delta Q = B D_i^a |V_g - V_i|^b \delta q, \quad (3)$$

其中 D_i 是粒子的直径, V_g 和 V_i 是粒子的末速度, 系数 B, a, b 是常值 (见文献 [13] 的表 1), δq 是有效液态水含量和温度的函数 (见文献 [13] 的表 2 和图 1).

2.3 电场的计算

为了满足电荷三维空间的分布特征, 每个网格的电势将叠加其余网格点的贡献, 模式中应用标准的七点有限差分近似算法. 计算网格点电势 Φ (标量) 的 Poisson 方程如下:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (4)$$

其中 ρ 是网格点上总的空间电荷密度, ε 是空气介电常数 ($8.859 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2$).

然后电场 E 由电势计算所得:

$$E = -\nabla \Phi. \quad (5)$$

当云内电场强度达到某一阈值时, 就有可能产生闪电. 随高度的增加, 空气密度减小, 相应的单位距离内电子碰撞引起的能量损耗率降低, 因而维持电子能所需的场强较小. 场强击穿阈值的函数表达式为

$$E_{\text{init}}(z) = \pm 167 \rho_{\text{air}}(z), \quad (6)$$

其中 $\rho_{\text{air}}(z)$ 和 $E_{\text{init}}(z)$ 分别是 Z 高度上空气的密度 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和场强 (单位 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$) 击穿阈值 [23].

2.4 模式的设置

2010 年 6 月 16 日 18:40—22:40 (北京时间, 下同) 北京发生了一次较强的雷暴过程, 本文以这次雷暴过程为例, 应用建立的 RAMS V6.0-电耦合模式模拟首次闪电发生前雷暴云中的起电和电荷分布情况. 由于探空数据每天仅有 00 时和 20 时 (北京时) 两个时次, 此次模拟就以北京站 2010 年 6 月 16 日 20:00 的探空资料为初始场 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), 采用湿热泡扰动法, 扰动半径为 1200 m, 最大扰动位温为 4°C . 模式水平格点分辨率为 200 m, 格点数为 300×300 , 垂直方向设置 30 层 (范围 0—15 km), 下垫面启用陆面模块 LEAF3, 辐射参数化方案选用 Chen 方案, 湍流参数化选用 Mellor-Yamada 方案, 微物理过程考虑云滴、雨滴、冰晶、雪晶、聚合物、霰、雹七种水成物粒子, 实验过程假设云滴

浓度为 500 m^{-3} , 用于预测其余粒子的混合比和数浓度. 模式模拟时间段为 1 h, 步长为 2 s.

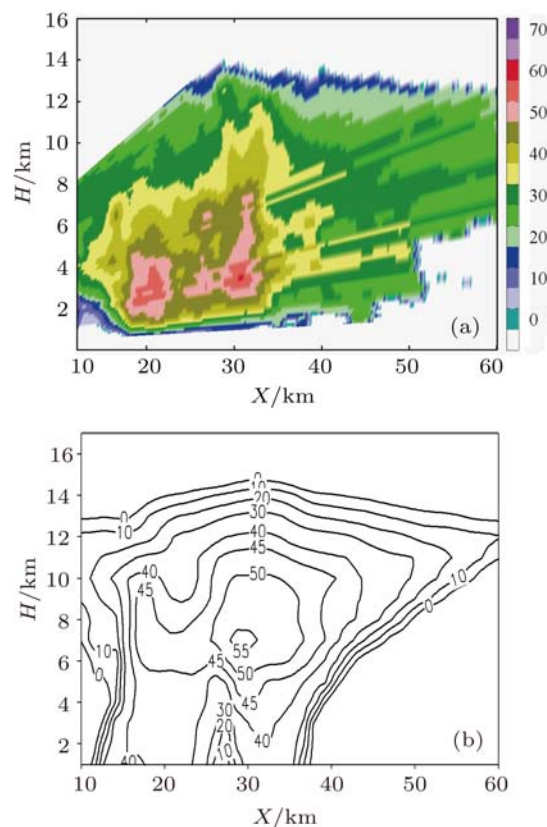


图 1 (a) 实际雷达回波; (b) 模拟雷达回波的 X-Z 剖面 (单位: dBZ)

3 模拟结果和讨论

3.1 云的宏观特征

图 1 给出了中国科学院大气物理研究所 X 波段双极化雷达探测的实际雷达回波和模式积分 30 min 时的雷达回波. 由图 1(a) 可知, 实测云体高度在 14 km 左右, 受风向的影响, 云体向一侧倾斜, 强回波大体位于 10—40 km 水平范围, 云体内部分布着两个强回波中心, 中心强度约为 60 dBZ. 由图 1(b) 可知, 模拟的云顶、云体宽度与实际观测较符合, 云体向一侧倾斜, 另外模拟的云体内部也分布着两个强回波区域, 分别位于 15—35 km 水平范围, 最大回波强度约为 55 dBZ, 比实测值偏小, 说明模式对这次雷暴过程具有良好的模拟能力.

3.2 雷暴云内总电荷分布

模式积分开始后各形态的粒子逐渐形成, 并从雷暴云的中心开始相互碰撞产生电荷转移, 达到电场阈值时发生闪电. 图 2 是电场达到击穿

阈值前 $X-Z$ 剖面不同极性电荷区电荷密度中心对应的量级和所在高度随时间的分布. 由图可见, TAK78 方案模拟的雷暴云起电到放电的时间间隔为 17 min, S91 方案的时间间隔为 15 min.

由于我国对雷暴云内电场结构的观测较少, 本文将模拟结果与其他相关的探测及模拟结果对比,

以检验该模式和参数化方案的适用性. Dye 等^[4]曾在观测实验中测量出雷暴起电到放电的时间间隔为 13 min, Tzur 和 Levin^[24]模拟研究表明雷暴起电到首次放电的时间间隔为 15 min, Norville 等^[25]的模拟结果表明时间间隔为 17 min. 因此本文模拟的雷暴云起电到首次放电的时间间隔是可信的.

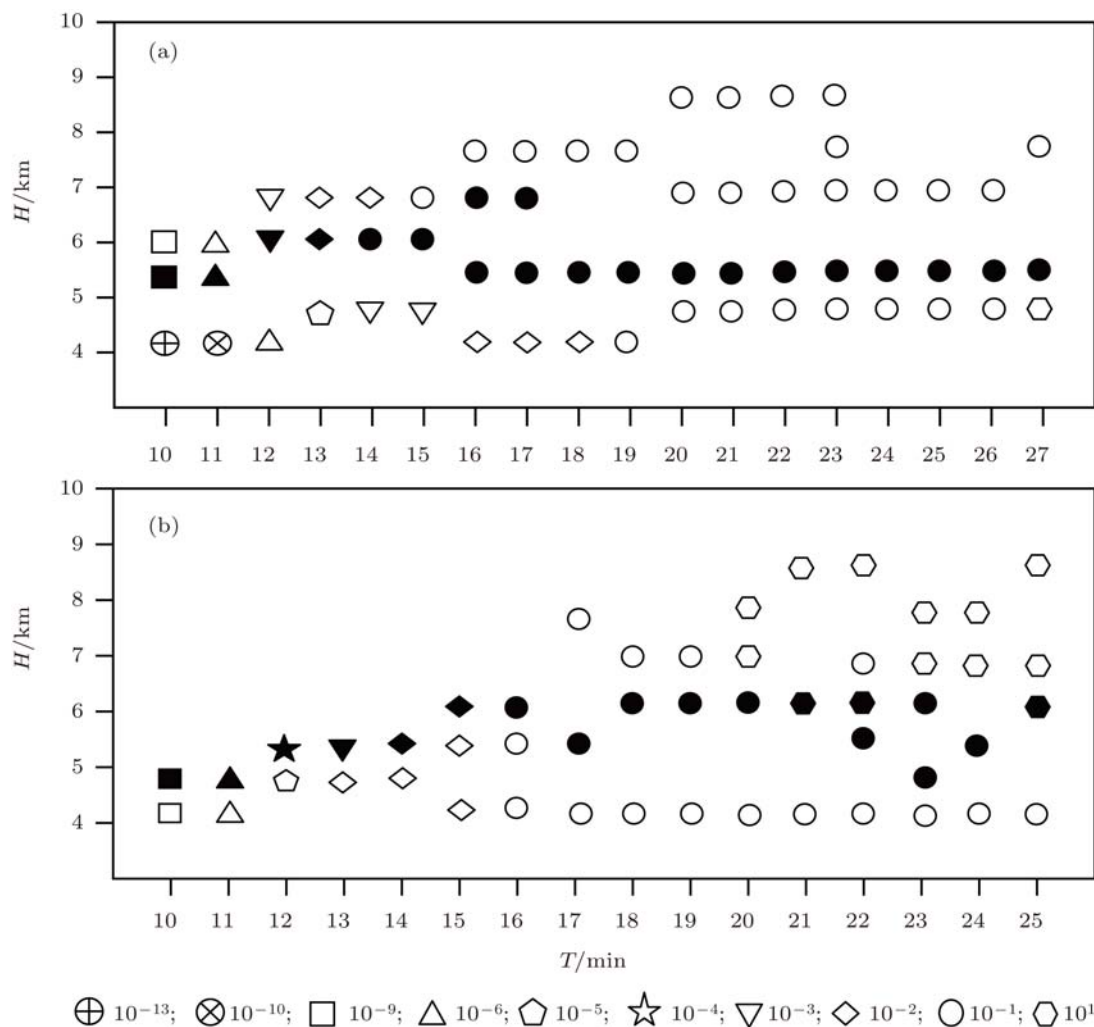


图2 电场达到击穿阈值前不同极性电荷区电荷密度中心的高度 (H) (沿 $Y = 25$ km 的 $X-Z$ 剖面) 随时间 (T) 的分布. 空心符号代表正电荷区, 实心符号代表负电荷区, 不同的符号代表电荷密度 (单位: nC/m^3) 不同的量级; (a) TAK78 方案; (b) S91 方案

由图 2(a) 可见, TAK78 起电参数化方案模拟的雷暴云电荷结构从起电到首次放电的整个过程均呈现三极性特征. 模式积分 10 min 时, 水成物粒子间发生电荷转移, 但此时转移的电荷很少, 上层和中层的电荷密度量级为 10^{-9} nC/m^3 , 低层的量级仅为 10^{-13} nC/m^3 ; 第 11 min 雷暴云上层和中层的电荷密度量级为 10^{-6} nC/m^3 , 低层量级为 10^{-10} nC/m^3 ; 到第 12 min 电荷密度中心的高度增加, 量级增加到 10^{-3} nC/m^3 ; 之后电荷量级不断增加, 到第 15 min 上层和中层的电荷密度量

级增加到 10^{-1} nC/m^3 , 低层的量级为 10^{-3} nC/m^3 ; 第 16 和 17 min 雷暴云的负电荷区出现了两个中心, 第 18 和 19 min 整个电荷结构演变成 3 个中心, 并且在 19 min 不同电荷区的电荷密度量级均达到 10^{-1} nC/m^3 ; 到第 20—22 min 电荷密度中心高度再次增加, 上层正电荷区出现了两个中心, 第 23 min 上层正电荷区出现了 3 个中心, 到第 24 min 整个电荷层又恢复成 3 个中心; 一直到第 27 min 电场达到阈值时, 上层正电荷区的中心高度增加到 8 km 左右, 最低层的正电荷区中心值量

级增加到 10 nC/m^3 . 对比整个过程的电荷密度中心值可知, 在电场达到击穿阈值时各层的电荷密度达到最大, TAK78 方案模拟的此次雷暴云起电区域主要位于 4—9 km 之间.

由图 2(b) 可见, 应用 S91 参数化方案模拟的电荷结构在第 10—16 min 呈现反偶极性特征, 第 17—25 min 为三极性特征. 与 TAK78 方案相同, 模式积分第 10 min 时雷暴云开始起电, 电荷量级为 10^{-9} nC/m^3 ; 之后电荷密度的量级不断增加, 中心所处的高度也在增加, 到第 15 min 低层正电荷区出现两个中心, 第 16 min 电荷密度的量级达 10^{-1} nC/m^3 , 第 17 min 电荷结构演变为三极性特征, 上层正电荷区中心的高度达 8 km; 到第 20 min 上层正电荷区出现两个中心, 量级达 10 nC/m^3 ; 第 22、23 min 上层正电荷区和中间负电荷区均出现两个中心, 第 24 min 上层正电荷区有两个中心, 到第 25 min 电场达到击穿阈值时各中心的值达到最大. S91 方案模拟的此次雷暴云起电区域主要位于 4—9 km 之间.

图 3 给出了电场达到击穿阈值时两种非感应起电参数化方案所得的粒子总电荷密度的 X - Z 剖面. 由图 3(a) 可见, 积分 27 min 后 TAK78 方案的

云内电场到达了击穿阈值 (图略), 形成了很明显的以 -15°C 为中心的三极性电荷结构, 其电荷中心值分别为 $0.88, -0.9, 1.0 \text{ nC/m}^3$, 下层的正电荷区域大于上层的负电荷和正电荷区域. 图 3(b) 表明, 积分 25 min 后 S91 方案的云内电场达到了击穿阈值 (图略), 形成了以 -20°C 为中心的三极性电荷结构, 电荷中心值分别为 $1.8, -1.7, 0.7 \text{ nC/m}^3$ (最下层正电荷区在 3 km 之下量级较小, 图中没显示出). 在电场达到击穿阈值时, 两种方案都得到了三极性电荷结构. 实际雷暴的电荷结构从简单的偶极性、反偶极性到三极性以及更复杂的电荷结构都是存在的, 但大量的观测表明雷暴云的电荷结构以三极性特征为主, Stolzenburg 等 [26] 分析了 50 个不同种类的雷暴, 发现在对流系统中雷暴云普遍呈现三极性电荷结构; 赵中阔等 [27] 对中国甘肃地区高原的一次单体雷暴云进行了穿云探测, 指出中国内陆高原地区雷暴云内存在三极性电荷结构; Krehbiel 等 [28] 通过观测得到了三层主电荷区域的电荷结构, 主负电荷区位于中间层 5—6 km 高度处, 上层则为上部的正电荷区. 许多观测结果 [4,29] 都证实了云内的这种电荷分布.

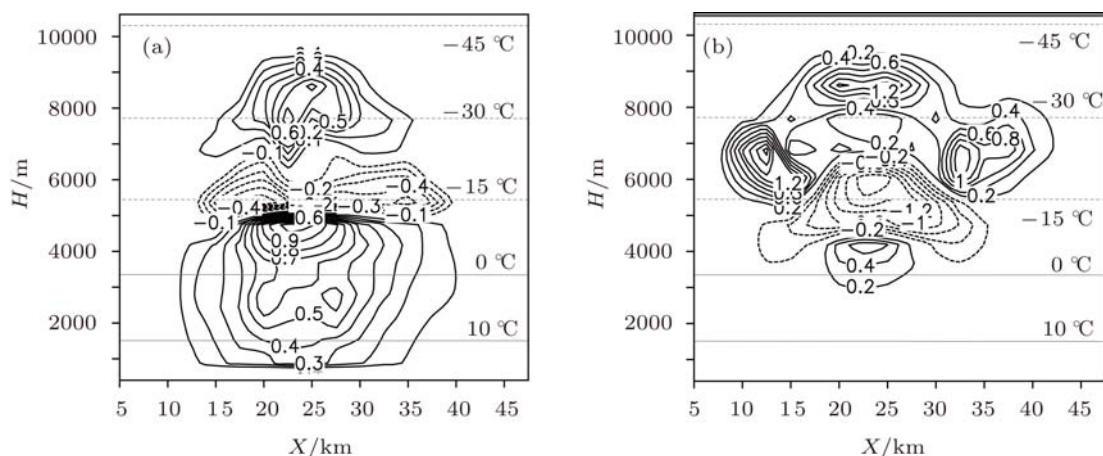


图 3 电场达到击穿阈值时的粒子总电荷密度 (单位: nC/m^3) 沿 $Y = 25 \text{ km}$ 的 X - Z 垂直剖面 (a)TAK78 参数化方案; (b)S91 参数化方案

综上可知, 本文建立的 RAMS V6.0-电耦合模式 TAK78 方案模拟的电荷结构从起电到放电呈三极性电荷结构, S91 方案模拟的电荷结构有从反偶极性向三极性电荷结构演变的过程, 两种方案在电场达到阈值时的电荷结构均是三极性特征. 另外, 两种方案模拟的电荷结构演变特征和云电荷的分布形状有一定的差异, 这是因为二者采用不同的实验条件, 并且利用不同的因子来对粒子碰撞所转移

的电荷进行参数化, TAK78 方案利用液态水含量, 而 S91 方案考虑的是有效液态水含量, 这是二者具有一定差异的原因. 即使大量的观测验证了雷暴云中的三极性电荷结构, 但反偶极性结构也是存在的, 这在其他模式中也有类似结构. 例如 Mansell 等 [30] 利用不同方案对一次多单体雷暴云的模拟结果表明, S91 方案最初产生的是反极性的电荷结构, 随之出现正常极性的电荷结构; Mansell 等 [10] 在三维

的 SEM 模式中引入了 S91 方案, 模拟结果表明其产生的电荷结构由最初的反极性逐渐变为偶极性或三极性; Williams^[31] 指出雷暴云的电荷结构一般被认为是偶极性 (在 -10°C — 25°C 有一个主负电荷区, 在其上有一个正电荷区) 或三极性 (在 0°C 附近还有一个小的正电荷区). 因此虽然 TAK78 方案和 S91 方案模拟的电荷结构演变特征有一定的差异, 但很难说何种方案正确或错误. 另外, 本文利用两种方案模拟的电荷密度在首次放电时的量级为 0.1 — 10 nC/m^3 . 对比以往的研究, Marshall 等^[30] 通过观测指出电荷密度的值在 0.2 — 13 nC/m^3 之间, Stolzenburg 等^[26] 研究了对流区域中的电荷结构, 表明成熟雷暴中的电荷密度位于 0.5 — 3 nC/m^3 . 因此该模式模拟的电荷密度量级是合理的.

3.3 微物理过程对电荷分布的影响

由于电场对微物理过程的影响在云内出现强电场时段才起作用, 模式主要模拟云初始起电到首次放电阶段, 未考虑水成物粒子起电对雷暴云微物理过程的反馈. 图 4 给出了各类水成物粒子的最大混合比、最大混合比所在的高度以及最大垂直速度在积分 30 min 内随时间的变化. 由图可知, 边界

层的热泡加剧了对流的发展, 在积分第 3 min 液态水 (雨滴) 开始形成, 主要位于云底部 2 km 左右; 随着上升气流的加强, 更多的液态水被带到了 4 km 之上, 在第 9 min 大量液态水在 5 km 的高度发生冻结, 形成了冰晶, 部分冰晶随着气流上升继续增长, 促进了雹的产生. 紧接着第 10 min 在 6 km 左右形成雪晶, 之后雪晶与过冷水的接触导致过冷水在雪晶的表面凝结, 第 11 min 在 6 km 左右产生霰, 同时冰晶和雪晶的增长过程促进了聚合物的形成. 随着上升气流的增加, 更多的水汽被输送到高空, 雷暴云中的霰、聚合物、雹的数量迅速增长, 霰的增长速度最快, 冰晶和雪晶增长较慢, 这是由于大量水汽在上升气流的作用下达到了更高的高空, 促进了霰和雹的形成. 在第 19 min 霰的混合比达 2.44 g/kg , 之后开始缓慢地减小, 部分霰与其余水成物粒子的相互作用促进了聚合物的持续增长, 雹、雨滴的含量在第 20 min 后仍然持续增长, 而冰晶和雪晶缓慢减小. 从图 4(b) 可见, 第 17 min 后随着降雨的出现, 雨滴最大混合比所在的高度逐渐减小, 但随着对流的增强, 大量的聚合物和霰被带到了雷暴云的上层. 因此, 雷暴云高层的电荷载体主要是霰和聚合物, 中层主要是冰晶和雪晶, 低层主要是雹和雨滴.

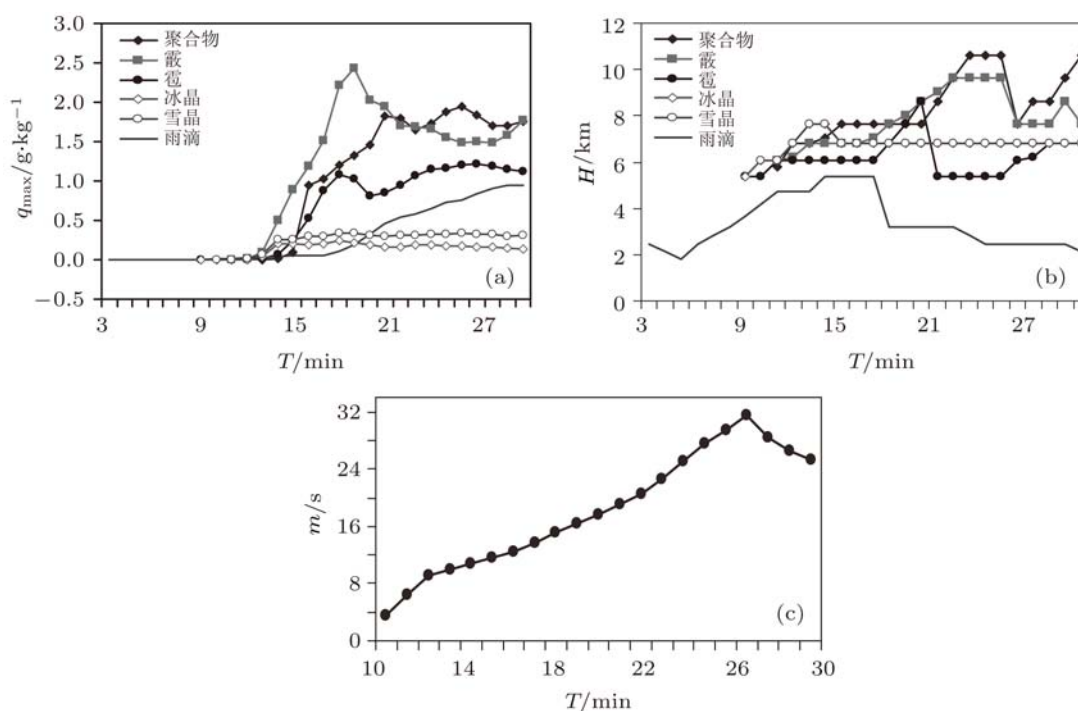


图 4 各类水成物粒子的 (a) 最大混合比, (b) 最大混合比所在高度和 (c) 最大垂直速度随时间的变化

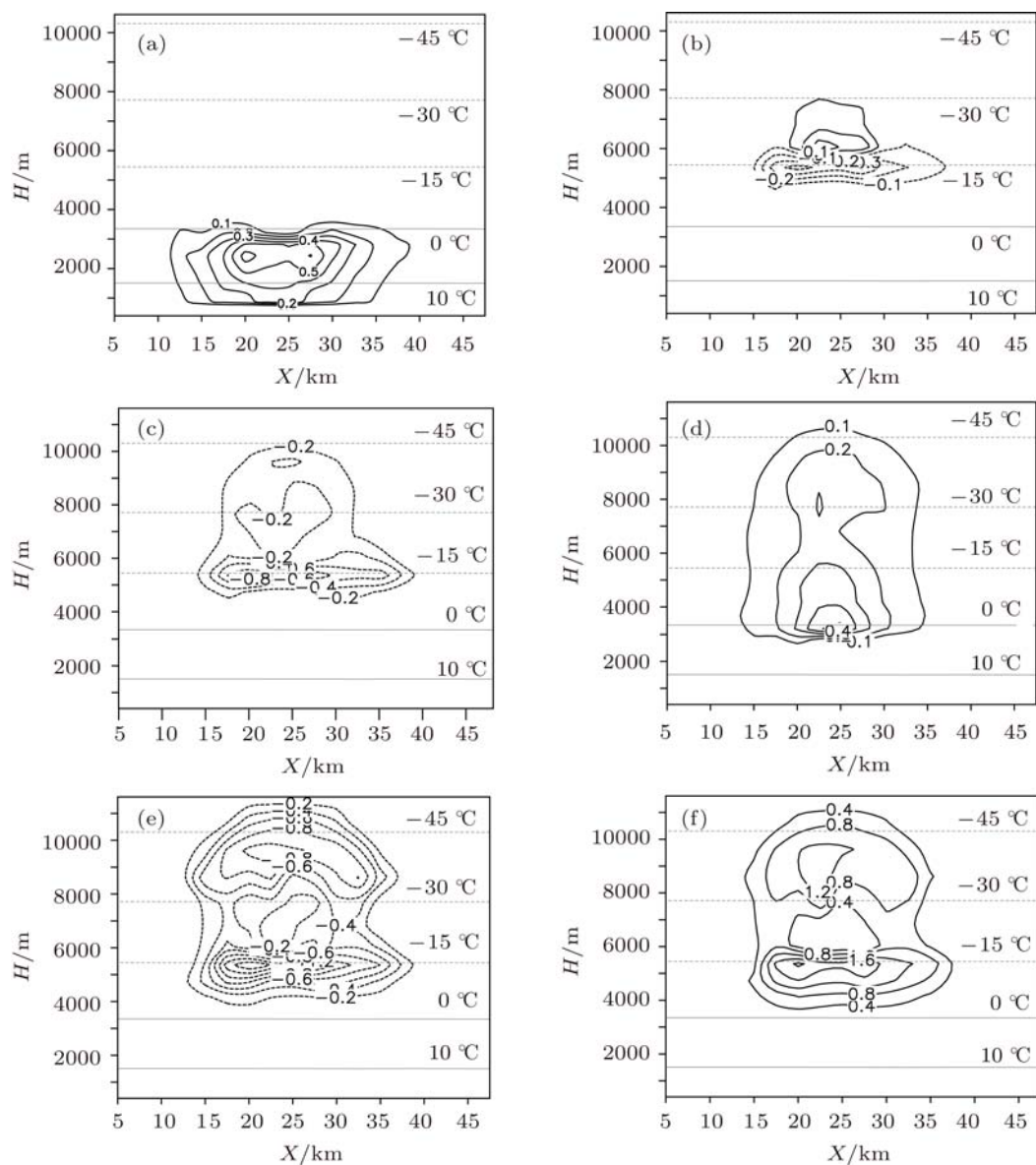


图5 利用 TAK78 方案积分 27 min 时的水成物粒子电荷密度 (单位: nC/m^3) 沿 $Y = 25 \text{ km}$ 的 X - Z 垂直剖面 (a) 雨滴; (b) 冰晶; (c) 雪晶; (d) 雹; (e) 聚合物; (f) 霰

图 5 给出了电场达到击穿阈值时 TAK78 方案模拟的各水成物粒子电荷密度的 X - Z 垂直剖面。可以看出, 在 0°C 之下雨滴间的碰撞和结合使位于雷暴云下层的雨滴带上了少量的正电荷。从分布形态来看, 雨滴是雷暴云低层主要的正电荷载体, 中心的电荷密度为 $0.6 \text{ nC}/\text{m}^3$, 雹和霰是正电荷的主要载体, 聚合物和雪晶是负电荷的主要载体。冰晶、雪晶、聚合物、霰的大值中心均位于 5 — 6 km 间, 雹的大值中心位于 3 — 4 km 间, 结合图 4 分析原因可知, 冰晶和雪晶主要位于 6 km 左右的高度, 雹主要位于 6 km 以下, 而聚合物和霰位于 6 km 以上, 因此在 5 — 6 km 间大量的冰晶、雪晶和霰、聚合物相互碰撞发生电荷转移, 而在 6 km 高度以上

主要是聚合物和霰之间的相互作用, 二者在 9 km 左右分别有一大值中心。雹自身的重量造成了其大值中心位于雷暴云低层, 但是本次过程的上升气流较强, 在 27 min 时达到 30 m/s 以上, 有少量的雹此刻被带到了 10 km 的高度。本文模拟的结果表明霰主要带正电荷, 这与文献 [13] 的模拟结果有一定的差异。Takahashi^[2] 实验表明当液态水含量为 1 — $2 \text{ g}/\text{m}^3$, 温度大于 -10°C 时, 霰容易带正电荷, 小于 -10°C 且液态水含量较大或较小时, 带正电荷。另外, 霰在雷暴云低层的电荷量级最大。Mansell 等^[10] 分析表明, 随着雷暴云进一步发展, 大范围降水出现, 上升速度减弱, 霰带正电荷的区域将位于雷暴云中下部, 因此该方案模拟的结果与

事实是相符的. 对比图 3 还可看出, 霰的正电荷中心与雷暴云总电荷结构的中心位置较为对应, 霰的

电荷分布形状与聚合物相似.

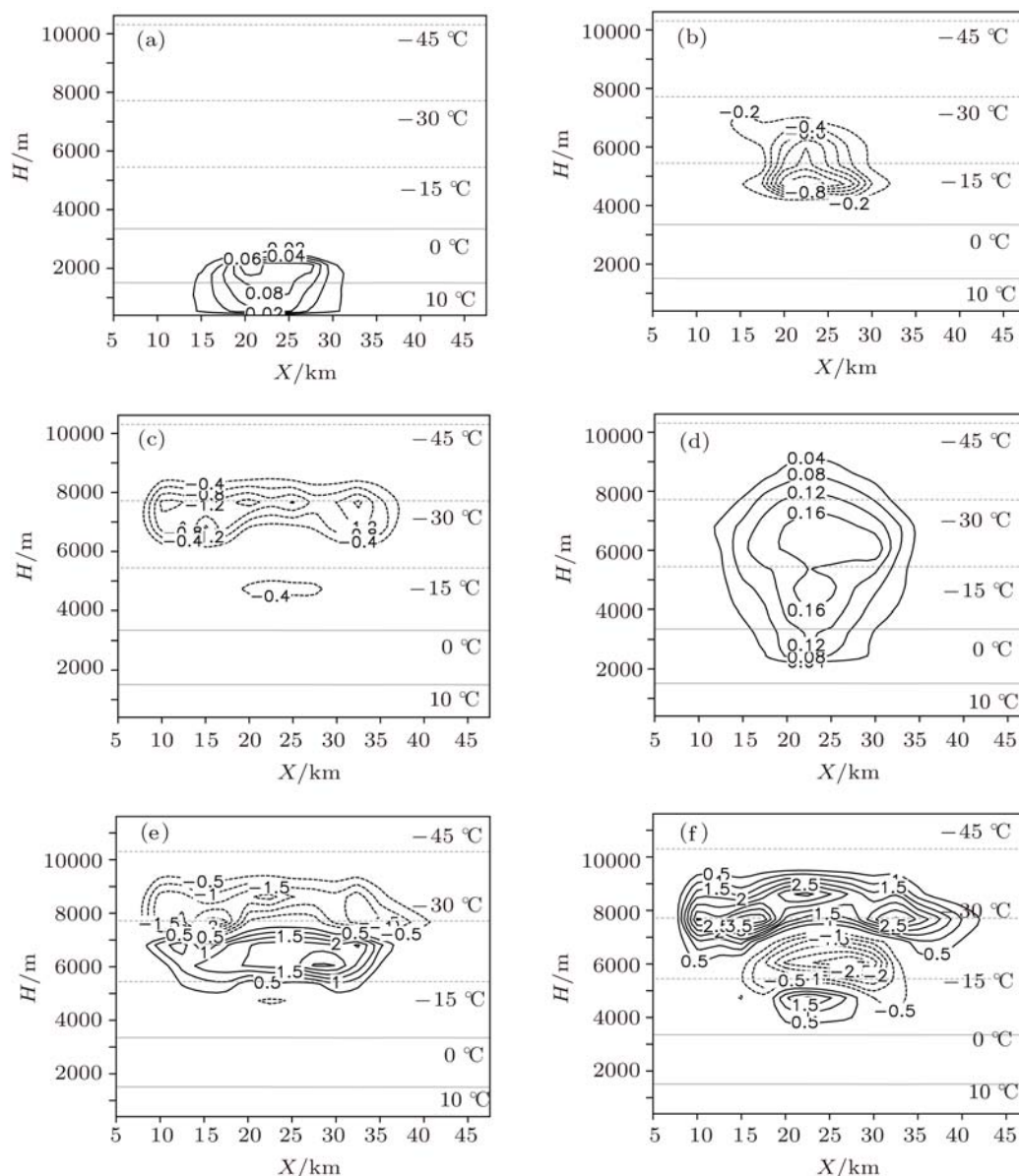


图 6 利用 S91 方案积分 25 min 时的粒子电荷密度 (单位: nC/m^3) 沿 $Y = 25 \text{ km}$ 的 X - Z 垂直剖面 (a) 雨滴; (b) 冰晶; (c) 雪晶; (d) 霰; (e) 聚合物; (f) 霰

图 6 是 S91 方案在电场达到击穿阈值时各个水成物粒子电荷密度的 X - Z 垂直剖面. 仍然可看出, 雷暴云低层的雨滴带正电荷, 但电荷量级较小 (为 $10^{-2} \text{ nC}/\text{m}^3$), 而固态粒子 (冰晶、雪晶、聚合物、霰) 之间碰撞的起电率很高, 冰晶、雪晶是负电荷的主要载体, 霰在碰撞过程中带正电荷. 与 TAK78 方案不同的是, 该方案模拟的聚合物和霰的电荷分布形态呈三极性特征, 并且形式相反, 在 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 之下, 霰带正电, 冰晶和聚合物带负电, 在 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间霰带负电荷, 而此时聚

合物带正电荷, 在雷暴云的高层霰又带上了正电. 可见该方案模拟的聚合物和霰在不同温度层间相互碰撞所转移的电荷情况不同, 霰和聚合物的电荷分布形态表明二者发生电荷转移的概率较大. 对比图 3 可看出, 霰的分布形态和雷暴云总电荷的分布形态相似. 该方案在 25 min 时电场达到击穿阈值, 这时的最大垂直上升气流为 28 m/s , 而 TAK78 方案在随后的 27 min 电场达到击穿阈值, 此时的最大垂直上升气流已提高到 32 m/s . 因此 S91 方案模拟的固态粒子所产生的电荷高度较 TAK78 方案小, 这

是由于上升气流的作用.

4 结论和讨论

本文将 TAK78 和 S91 两种主要的非感应起电机加入最新版的区域大气模式 RAMS V6.0, 建立了一个大气 - 电耦合中尺度雷暴云模式, 并据此对发生于北京的一次雷暴首次放电前的电荷结构和水成物粒子起电情况进行了模拟. 结果表明, 模拟的雷暴云形态与实测对应较好, TAK78 方案和 S91 方案模拟的雷暴云起电到放电的时间间隔分别为 17 min 和 15 min, 电荷密度的量级为 10^{-1} — 10 nC/m³, 这都与实际相符. TAK78 方案模拟的电荷结构从起电到放电呈三极性电荷结构, S91 方案模拟的电荷结构有从反偶极性向三极性电荷结构演变的过程, 两种方案在电场达到击穿阈值时的电荷结构均是三极性特征.

雷暴云低层主要是霰和雨滴, 中层主要是冰晶和雪晶, 高层的电荷载体主要是霰和聚合物, 霰和雨滴以带正电为主, 冰晶和雪晶以带负电为主, 霰和聚合物间容易发生电荷转移, 霰的正电荷中心与雷暴云总电荷结构的中心位置较为对应. TAK78 方案和 S91 方案分别在 25 min 和 27 min 达到电场击穿阈值, 27 min 的垂直上升速度较 25 min 时的大, 由于垂直速度的影响, TAK78 方案的水成物粒子较 S91 方案能达到更高的高度.

综合上述, 本文建立的 RAMS V6.0 电耦合模式能对雷暴云的分布形态进行了较好的模拟, 模拟的雷暴云高度和宽度与实际观测比较符合 (前人利用旧版本模拟的结果未与实际雷达回波进行对比^[13,14]), 具有一定的优越性, 但还需要进一步对模拟的电荷分布结构进行检验. 然而, 目前国内对雷暴云电荷结构的穿云观测实验开展得非常少, 1965 年袁箴等^[33] 在南京进行过雷暴云内的电场探空测量, 由于雷暴云内探空难度大, 对探空仪传感器要求高, 此后 40 余年我国一直没有成功的雷暴云内电场探空. 直到 2008 年赵中阔等^[27] 制作了携带 GPS 的强电场探空系统, 在甘肃平凉地区进行了雷暴云内的电场探空实验, 成功观测到了中国内陆高原地区的三极性电荷结构. 由于缺少雷暴云电荷结构的实测资料, 我国学者在近 30 年来仅仅是通过雷暴地面电场反演^[34] 以及云地闪中和的电荷源定位^[35] 等手段对中国内陆部分地区的雷暴云

电荷结构进行推断, 推断的仅仅是雷暴云内极小范围的电荷区域, 不能展现整个雷暴云中的电荷分布. 由于缺少雷暴云电结构的观测, 本文对该模式的检验仅仅是与其他相关的探测 (国外开展的飞机穿云探测、国内在高原地区开展的相关观测等) 及模拟结果进行对比. 对比结果表明, 该模式模拟的三极性电荷结构是雷暴云常见的电荷结构, 具有一定的合理性, 但是雷暴云电结构复杂, 有较强的地域和气候特征, 不同区域的雷暴具有一定的差异性, 并且雷暴还会受环境参量、对流强度以及大尺度背景场的影响. 因此本文的模拟结果还需要结合以后的穿云观测资料对该模式的模拟效果做进一步的校验, 以改进其模拟性能.

本文仅考虑了主流的两种非感应起电机, 而这两种机制基于不同实验室的结果. TAK78 方案^[2] 是将冰晶和过冷滴在与淞附靶接触之前分别置于不同的云室中, 而 S91 方案^[3] 则将冰晶和过冷滴置于同一云室中, 这种差异会显著地影响试验结果. 并且两种方案考虑的因子也不同, TAK78 方案在参数化过程考虑液态水含量, 而 S91 方案考虑有效液态水含量, 从而造成两种方案模拟的电荷结果演变特征和云电荷分布形状有一定的差异, 这在多种数值模式中都得到了类似的结果^[8,10,12-14,23,30]. 因此, 在实验室中再现真实的混合相态的云是改进非感应起电机机制的关键问题, 而这方面的研究一直悬而未决, 有待通过实验、观测和数值模式的结合对非感应起电机机制进行改进. 本文基于两种非感应起电机模拟的电荷结构在起电初期阶段差异明显, 而在起电后期阶段均达到了三极性特征, 并且在首次放电时电荷结构差别不大. 而前人利用 RAMS V4.3 引入两种方案的模拟结果差别较大^[13,14], 不利于揭示雷暴电荷的真实结构.

雷暴云中的水汽条件、热力场、动力场和微物理过程是影响起电的重要因子, 新版本 RAMS 改进了模式对上述各因子的模拟, 从而能更真实地再现雷暴的发生过程, 这为模式能更好地模拟雷暴云的电荷结构打下了坚实的基础. 模式的模拟结果若能与穿云观测资料对比, 则能进一步检验和改进非感应起电方案的物理参数, 从而能极大地推动中尺度 - 电耦合模式的完善, 因此应十分重视并尽快开展在我国多地区的雷暴穿云探测. 此外, 雷暴云内的起电有可能是多种机制复杂共同作用的综合结果, 所以还应在模式中加入更多的起电机, 并考虑各种机制之间的相互关系.

- [1] Takahashi T 1974 *J. Atmos. Sci.* **31** 2160
- [2] Takahashi T 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 1536
- [3] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 11007
- [4] Dye J E, Jones J J, Winn W P, Cerni T A, Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, Hallett J, Saunders C P R 1986 *J. Geophys. Res.* **91** 1231
- [5] Helsdon J H, Farley R D 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 5661
- [6] Ziegler C L, Macgorman D R, Dye J E, Ray P S 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 12833
- [7] Yan M H, Liu X S, An X M, Zhang Y J 1996 *Plateau Meteorol.* **15** 425 (in Chinese) [言穆弘, 刘欣生, 安学敏, 张义军 1996 高原气象 **15** 425]
- [8] Helsdon J H, Wojcik W A, Farley R D 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 1165
- [9] Rawlins F 1982 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **108** 779
- [10] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, Straka J M 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D12 doi: 10.1029/2004JD005287
- [11] Sun A P, Yan M H, Zhang Y J, Zhang H F, Huang M Y 2002 *Acta Meteorol. Sin.* **60** 722 (in Chinese) [孙安平, 言穆弘, 张义军, 张鸿发, 黄美元 2002 气象学报 **60** 722]
- [12] Guo F X, Zhang Y J, Yan M H 2010 *Chin. J. Atmos. Sci.* **34** 361 (in Chinese) [郭凤霞, 张义军, 言穆弘 2010 大气科学 **34** 361]
- [13] Altaratz O, Reisin T, Levin Z 2005 *Geophys. Res.* **110** D20205 doi: 10.1029/2004JD005616
- [14] Liu D X 2010 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘冬霞 2010 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [15] Deng X H 2009 *MS Thesis* (Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences) [邓小花 2009 硕士学位论文 (北京: 中国气象科学研究院)]
- [16] Walko R L, Cotton W R, Feingold G, Bjorn S 2000 *Atmos. Res.* **53** 171
- [17] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 邴秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [18] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 邴秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [19] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Wang J F, Liu D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 邴秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 王俊芳, 刘冬霞 2011 物理学报 **60** 079201]
- [20] Yang B, Zhou B H, Meng X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8978 (in Chinese) [杨波, 周壁华, 孟鑫 2010 物理学报 **59** 8978]
- [21] Gou X Q, Zhang Y J, Dong W S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 957 (in Chinese) [苟学强, 张义军, 董万胜 2006 物理学报 **55** 957]
- [22] Takahashi T 1984 *J. Atmos. Sci.* **41** 2541
- [23] Hou T J, Lei H C, Niu S J 2009 *Climatic and Environmental Research* **14** 143 (in Chinese) [侯团结, 雷恒池, 牛生杰 2009 气候与环境研究 **14** 143]
- [24] Tzur I, Levin Z 1981 *J. Atmos. Sci.* **38** 2444
- [25] Norville K, Baker M, Latham J 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 7463
- [26] Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 14097
- [27] Zhao Z K, Qie X S, Zhang T L, Zhang T, Zhang H F, Wang Y, She Y, Sun B L, Wang H B 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 3532 [赵中阔, 邴秀书, 张廷龙, 张彤, 张鸿发, 王勇, 余勇, 孙宝来, 王怀斌 2009 科学通报 **54** 3532]
- [28] Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, Hamlin T, Harlin J, Davis M 2000 http://lightning.nmt.edu/nmt_lms/eos/eos.html **21**
- [29] Qie X S, Yu Y, Zhang G S, Liu X S, Guo C M, Watanabe T, Kawasaki Z, Nakano M, Nakamura K, Wang D H, Ushio T 1998 *Plateau Meteorol.* **17** 34 (in Chinese) [邴秀书, 余晖, 张广庶, 刘欣生, 郭昌明, 渡边贞司, 河崎善一郎, 仲野贡, 中村光一, 王道洪, 牛尾知雄 1998 高原气象 **17** 34]
- [30] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4075 doi:10.1029/2000JD000244
- [31] Williams E R 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 13151
- [32] Marshall T C, Rust W D 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 22297
- [33] Yuan Z, Jiang B T, Ren L X, Zhou S J, Zheng D Z 1965 *Acta Meteorol. Sin.* **35** 440 (in Chinese) [袁箴, 蒋本汤, 任丽新, 周诗健, 郑达洲 1965 气象学报 **35** 440]
- [34] Qie X S, Zhang T L, Chen C P, Zhang G S, Zhang T, Wei W Z 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** doi: 10.1029/2004GL022162
- [35] Zhang Y J, Meng Q, Lü W T, Krehbiel P R, Liu X S, Zhou X J 2005 *Chin. Sci. Bull.* **50** 2663 [张义军, 孟青, 吕伟涛, Krehbiel P R, 刘欣生, 周秀骥 2005 科学通报 **50** 2663]

Evaluation of noninductive charging mechanisms and simulation of charge characteristic structure in the early thunderstorm based on RAMS V6.0*

Li Wan-Li¹⁾ Liu Dong-Xia¹⁾ Qie Xiu-Shu^{1)†} Fu Shen-Ming²⁾
Duan Shu¹⁾ Chen Yi-Chen¹⁾

1) (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2) (International Climatic and Environment Sciences Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

(Received 11 May 2011; revised manuscript received 20 June 2011)

Abstract

A new regional thunderstorm model, coupled with two primary non-inductive electrification mechanisms, namely Takahashi (1978) and Saunders (1991) schemes, is developed based on the newest version of RAMS V6.0. Based on the simulation on a thunderstorm in its early stage which occurred in Beijing, the results show that the total charge distribution is tripolar in both schemes when the electric field reaches breakdown value. The results are in agreement with some observations and results of other model. However, the evolution processes and shapes of cloud charge distribution in the two schemes are different. The result of Takahashi's (1978) scheme produces a tripolar charge distribution in the cloud before the first lightning. The Saunders' (1991) scheme produces a transform from inverted dipole distribution to tripolar charge distribution. This is because they used different experimental conditions: different factors lead to different results. The results from both schemes show that the positive charge carrier at a low level of thunderstorm is rain droplet, the aggregates and graupels are located in high level of thunderstorm, and the charge center distribution of graupels is similar to the distribution of total charge in thunderstorm cloud.

Keywords: non-inductive charging mechanism, RAMS V6.0, tripolar charge structure, inverted dipole charge structure

PACS: 92.60.Pw, 21.10.Ft

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 40930949), Postdoctor Science Foundation of China (Grant No. 119100581F), and Hundred Talent Foundation of Chinese Academt of Sciences, China.

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn