

徐良韬, 张义军, 王飞, 等. 2012. 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的耦合及初步检验 [J]. 大气科学, 36 (5): 1041–1052, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11235. Xu Liangtao, Zhang Yijun, Wang Fei, et al. 2012. Coupling of electrification and discharge processes with WRF model and its preliminary verification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1041–1052.

# 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的 耦合及初步检验

徐良韬 张义军 王飞 郑栋

中国气象科学研究院雷电物理与防护工程实验室, 北京 100081

**摘 要** 本文将雷暴云的起电、放电物理过程引入中尺度的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式, 并对超级单体和飑线过程进行了模拟研究。起电过程在 Milbrandt 双参数微物理方案中写入, 包含霰、雹与冰晶、雪之间的非感应起电机, 以及霰、雹与云滴之间的感应起电机。放电参数化方案只考虑了闪电的整体效应。对一次超级单体的模拟结果表明, 电荷结构呈现正、负、正的三极性结构, 主正电荷区在  $-40^{\circ}\text{C}$  到  $-60^{\circ}\text{C}$  之间, 主负电荷区在  $-10^{\circ}\text{C}$  到  $-30^{\circ}\text{C}$  之间, 下部正电荷区在零度层附近, 总电荷浓度最大值接近  $2\text{ nC/m}^3$ 。这种电荷结构的垂直分布同以往在强对流天气系统中观测到的典型电荷结构一致。对飑线过程的模拟结果表明, 部分单体电荷结构呈现出反的偶极性且飑线中最大电荷浓度小于超级单体。在飑线成熟阶段, 模拟得到的闪电分布与观测的地闪活动在分布型上相似。

**关键词** 起电 中尺度模式 闪电参数化 电荷结构

文章编号 1006-9895(2012)05-1041-12

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11235

## Coupling of Electrification and Discharge Processes with WRF Model and Its Preliminary Verification

XU Liangtao, ZHANG Yijun, WANG Fei, and ZHENG Dong

*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

**Abstract** The processes of cloud electrification and lightning parameterization are introduced into the Weather Research and Forecasting (WRF) model, in which the supercell and squall line are simulated. The numerical formulation of the electrical processes includes the noninductive graupel-ice, hail-ice, hail-snow and inductive graupel-cloud, hail-cloud charge separation mechanisms coupled with the Milbrandt two-moment microphysical scheme. In the meantime, a bulk lightning parameterization is considered in the model. On the one hand, the simulation of supercell produces a normal tripolar charge structure, consisting of a main negative charge region ( $-10^{\circ}\text{C}$  to  $-30^{\circ}\text{C}$ ) with an upper main positive charge region ( $-40^{\circ}\text{C}$  to  $-60^{\circ}\text{C}$ ) and a lower positive charge region (near  $0^{\circ}\text{C}$ ). The maximum total charge density is approximately  $2\text{ nC/m}^3$ . The simulated vertical profile of charge structure is in accordance with the previous classical structure observed in the severe convective weather. On the other hand, the simulation of the squall line shows the inverted dipolar charge structure in some cells and the maximum total charge density is smaller than that of the supercell. Moreover, the simulated distribution of lightning density is similar to the observed cloud-to-ground (CG)

收稿日期 2011-11-28, 2012-04-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41030960、41005006, 公益性行业科研专项 GYHY201006005, 中国气象科学研究院基本科研业务费 2010Z004、122020013726

作者简介 徐良韬, 男, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事雷电物理和中尺度数值模拟研究。E-mail: xult@cma.gov.cn

lightning density in the mature stage of the squall line.

**Key words** charge separation, mesoscale model, lightning parameterization, charge structure

## 1 引言

起电和放电过程是云内重要的物理过程,但实际观测的难度较大,数值模式是研究云内电过程的重要手段之一。而在中尺度模式中耦合起电、放电物理过程,不仅可以更深入地探讨天气系统的电荷结构特征,还可以发展雷电落区及闪电活动强度的预报方法。

雷暴云起电过程的模拟自 1973 年 Pringle et al. (1973) 首次在云模式中引入电过程以来,已经取得了长足的发展,由一维云模式 (Takahashi, 1974; Rawlins, 1982) 发展到三维云模式 (Mansell et al., 2005)。Jennings (1975) 曾指出感应起电机制只能对观测到的强电场有部分贡献, Takahashi (1983) 在对冷积云的模拟中也认识到,感应起电机制并不能形成放电所需要的强电场,最重要的起电机制是非感应的结淞起电,因此后来的大多数模拟研究都以非感应的起电机制为基础。

由于雷暴中的电场不能无限制的增长,因此选用恰当的放电方案将更加符合实际情况。现有的放电过程参数化方案可分为两类,一类是整体放电参数化方案,另一类是精细通道放电参数化方案。整体放电方案相对简单,由 Rawlins (1982) 首先提出,关注的问题比较少,只是对于场强超过击穿阈值的格点按比例削减电荷,后来的研究者 (Takahashi, 1987; Ziegler and MacGorman, 1994) 则在其整体放电方案中考虑了由 MacGorman et al. (1981) 提出的闪电对于高浓度电荷区的效应。比较成熟的精细通道方案主要基于 Kasemir (1960) 的双向先导概念,他认为闪电一旦起始,流光通道会从初始点双向传播,并且闪电通道不仅仅是输送电荷,还会感应出新电荷。Mansell et al. (2002) 在介质击穿模型 (Wiesmann and Zeller, 1986) 基础上提出一种随机介质击穿模型,主要的改进是通道可以在所有末端同时传播,每一步传播的方向依据一定的概率公式随机选择。

国内在云模式起电和放电的研究中也开展了大量的工作。言穆弘等 (1996a, 1996b) 在国内建立了第一个可以模拟积云动力和电力发展的二维时变轴对称模式,并指出感应起电、非感应起电、次

生冰晶起电在积云电荷结构中起着主要作用,张义军等 (1999) 以此为基础对雷暴中的放电过程进行了研究,孙安平等 (2002) 后来又发展了三维的强风暴动力—电耦合数值模式,郭凤霞等 (2007, 2010) 利用该模式对于高原雷暴云电荷结构进行了模拟研究并对首次放电前不同非感应起电参数化方案进行了比较。以上两种模式在积云动力框架内引入了电场力项,也有研究者没有考虑电场力对动力发展的影响,在对流云模式 (马明, 2004; 谭涌波, 2006; 冯桂力, 2008) 或者强风暴冰雹分档模式中 (周志敏和郭学良, 2009a, 2009b) 建立了雷暴云的起电、放电模式。

积云模式能够细致的研究起电、放电的机理,但是只能模拟一个单体,与外界没有交换;再者,由于当前对于 3~6 小时闪电预警、预报的需要,起电、放电的模拟研究开始从云模式过渡到中尺度 (多尺度) 模式上来。Hayashi (2006) 在日本气象厅非静力模式中引入电过程,并对一次雷暴过程进行了预报模拟研究。王飞 (2010) 在 GRAPES\_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 中,引入非感应起电方案对 0~6 小时闪电活动的预报方法进行了研究。黄丽萍等 (2008) 也曾以 GRAPES\_Meso 的预报场作为云模式的初始场,驱动云模式来进行闪电活动的预报。

利用中尺度 (多尺度) 模式进行起电、放电模拟除了可以进行闪电预报的方法研究外,还能够对不同天气系统的电结构特征进行深入分析。Altartatz et al. (2005)、刘冬霞 (2010) 和李万莉等 (2012) 在美国科罗拉多大学 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 模式的不同版本中, Barthe et al. (2005) 在法国的 Meso-NH 模式中, Mansell et al. (2010) 在美国 CoMMAS (Collaborative Model for Multiscale Atmospheric Simulation) 模式中以及 Fierro and Reisner (2011) 在一个飓风模式中都耦合了电过程并对不同的天气进行了相应的研究。这些模式在动力框架中并没有考虑电场力,也没有考虑电过程对于云微物理等过程的反馈影响,因此可以称之为中尺度 (多尺度) 单向耦合起电模式。

虽然研究者在不同的中尺度 (多尺度) 模式中引入了起电、放电的物理过程,但是在 WRF

(Weather Research and Forecasting) 模式中进行电参量的计算仍然没有实现。WRF 模式在实际业务和科研中有着广泛的应用, 借由 WRF 模式发展闪电活动预警、预报的方法有望取得更好的效果, 此外, WRF 模式包含了 WRF-Chemistry 模块, 而闪电本身就是氮氧化物的产生源同时电活动又受到气溶胶粒子等因素的影响, WRF 中电活动模拟的实现有利于深入地讨论这种相互关系。因此, 在 WRF 中引入起电、放电的物理过程是必要的。

WRF 模式有其自身的架构, 计算电场时泊松方程的求解需要考虑并行的实现, 同时该模式具有多种微物理方案, 具体在何种方案中实现起电、放电的模拟并取得最好的效果也是一个值得探讨的问题。本文在 WRF 模式中引入起电、放电的物理过程, 尝试实现在该中尺度预报模式中对闪电活动的模拟, 模式的动力框架中并没有考虑电场力的影响。文章将首先介绍所选择的微物理方案以及耦合的感应、非感应起电机理, 然后对于选取的放电参数化方案进行讨论, 最后在完成 WRF 模式中起电、放电耦合的基础上, 对理想超级单体和一次飑线过程进行了模拟并对耦合后的模式进行检验。

## 2 模式

本文采用 NCAR (National Center of Environmental Prediction)、NCEP (National Centers for Atmosphere Research) 联合开发的中尺度 WRF (3.2.1 版本) 数值模式, 该模式采用全可压、非静力方程, 分为欧拉高度坐标和欧拉质量坐标两种坐标体系, 水平网格为 Arakawa C 网格。

### 2.1 起电物理过程与微物理过程的耦合

WRF 模式中有多种微物理方案, 2010 年新引入的 Milbrandt 微物理方案过程较为全面, 因此起电和放电的物理过程将在该方案中写入。Milbrandt 双参数微物理方案是由 Milbrandt and Yau (2005a, 2005b) 提出, 考虑了水汽、云滴、冰晶、雪、雨、霰、雹等七种水物质 (见表 1)。

表 1 Milbrandt 双参数方案中的微物理变量

Table 1 The microphysical variables in the Milbrandt two-moment parameterization

| 水物质 |                          |
|-----|--------------------------|
| 数浓度 | 云滴, 冰晶, 雪晶, 雨滴, 霰, 雹     |
| 混合比 | 云滴, 冰晶, 雪晶, 雨滴, 霰, 雹, 水汽 |

为了进行电参量计算, 在 WRF 模式中引入新的变量, 包括冰晶、雨、雪、霰、雹和云水六种水成物的电荷浓度 ( $Q_{ei}$ 、 $Q_{er}$ 、 $Q_{es}$ 、 $Q_{eg}$ 、 $Q_{eh}$ 、 $Q_{ec}$ ) 和总电荷浓度 ( $Q_{esum}$ ), 这七个变量作为微物理方案的预报量跟随模式进行计算, 同时引入诊断变量, 垂直电场强度 ( $E_v$ ) 以及参数化的格点闪电数 ( $F_n$ )。本文的耦合也为单向耦合, 将起电、放电物理过程引入微物理方案后, 没有考虑电过程对于云微物理过程的反馈影响。

### 2.2 电荷的守恒

每种水成物粒子所携带的电荷浓度 ( $\rho_x$ ) 的变化由以下方程来进行计算:

$$\frac{\partial \rho_x}{\partial t} = A_{dv}(\rho_x) + T_{urb}(\rho_x) + S_{ource}(\rho_x) + S_{edim}(\rho_x), \quad (1)$$

方程右端的前两项代表电荷的平流和湍流扩散, 其跟随各种水成物在模式中进行一致的计算。第三项代表了电荷的源汇, 主要包括云中的起电以及放电对电荷的削减, 同时要计算粒子相态转化造成的电荷转移, 假定在蒸发和凝结过程中不发生电荷的转移。最后一项代表电荷的沉降, 主要是由于携带电荷的粒子发生沉降而导致。每个格点上的总电荷浓度等于该格点所有水成物携带电荷的总量。

#### 2.2.1 非感应起电

非感应起电主要考虑包括霰粒子与冰晶, 雹粒子与冰晶、雪相互碰撞的物理过程, 粒子的非感应起电速率  $\partial \rho_{xy} / \partial t$  根据如下公式计算 (Mansell et al., 2005):

$$\frac{\partial \rho_{xy}}{\partial t} = \iint \frac{\pi}{4} \delta Q (1 - E_{xy}) (D_x + D_y)^2 |V_x - V_y| n_x(D_x) n_y(D_y) dD_x dD_y, \quad (2)$$

其中,  $D_x$ 、 $D_y$  为相互碰撞粒子的直径,  $|V_x - V_y|$  为粒子间的相对落速,  $E_{xy}$  为聚集系数,  $n_x$ 、 $n_y$  为粒子数浓度,  $\delta Q$  为两种冰相粒子单次碰撞时的加权平均电荷转移量。方程 (2) 可以化为如下形式 (Mansell et al., 2005):

$$\frac{\partial \rho_{xy}}{\partial t} = \beta \delta Q (1 - E_{xy}) E_{xy}^{-1} (N_{CLxy}), \quad (3)$$

其中,  $\beta$  为计算低温时电荷转移的强制系数,  $N_{CLxy}$  为两种粒子碰撞时的数浓度变化率, 单次碰撞的电荷转移采用以 Jayaratne et al. (1983) 实验为基础的 GZ 方案 (Gardiner et al., 1985; Ziegler et al., 1991):

$$\delta Q = k D_i^m (\delta v)^n \delta L f(\tau), \quad (4)$$

$k$  为比例系数,  $D_i$  为冰晶或雪的粒子直径,  $\delta v$  为相互碰撞粒子的下落末速差,  $\delta L$  为有关液态含水量的参数,  $f(\tau)$  为关于反转温度和环境温度的参数,  $\delta L$  和反转温度计算使用谭涌波 (2006) 根据实验修正后的公式。

### 2.2.2 感应起电

在环境电场存在的条件下, 粒子间相互碰撞就会产生感应起电。在本文中考虑霰粒子、雹粒子同云滴之间的感应起电机理, 感应起电计算使用如下方程 (Ziegler et al., 1991):

$$\frac{\partial \rho_x}{\partial t} = \left( \pi^3 / 8 \right) \left( \frac{6.0 V_x}{\Gamma(4.5)} \right) E_{xc} E_r n_c n_{0x} D_c^2 \times \left[ \pi \Gamma(3.5) \varepsilon \langle \cos \theta \rangle E_z D_x^2 - \Gamma(1.5) \rho_x / (3 n_x) \right], \quad (5)$$

其中, 下标  $x$ 、 $c$  分别代表霰 (雹) 和云滴,  $D_x$ 、 $D_c$  为霰 (雹) 和云滴的特征直径,  $n_x$  和  $n_c$  为霰 (雹) 和云滴的粒子数浓度,  $V_x$  是霰 (雹) 粒子的群体平均落速,  $\Gamma(x)$  是伽马函数,  $n_{0x}$  为霰 (雹) 粒子的截距数浓度,  $\langle \cos \theta \rangle$  是反弹角度的余弦平均值,  $E_z$  是垂直方向的电场强度,  $E_{xc}$  是碰撞系数,  $E_r$  是反弹系数, 各系数的选取同 Ziegler et al. (1991) 相一致。

### 2.2.3 电荷的沉降

各种水成物是电荷携带者, 所以各种粒子的沉降也会造成电荷的沉降, 沉降使用如下公式计算 (Milbrandt and Yau, 2005a):

$$\frac{\partial \rho_x}{\partial t} \Big|_{\text{SEDI}} = \frac{1}{\rho_{\text{air}}} \frac{\partial (\rho_x V_{\text{NX}})}{\partial z}, \quad (6)$$

其中,  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度,  $V_{\text{NX}}$  为粒子下落末速。

### 2.3 放电参数化

本文模拟采用整体放电参数化方案。在计算出每个格点上的总电荷浓度后, 电势  $\Phi$  的计算利用泊松方程求解:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (7)$$

其中,  $\rho$  是格点上的总电荷浓度,  $\varepsilon$  是介电常数, 取  $8.8592 \times 10^{-12}$  F/m。电场的计算利用:

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi. \quad (8)$$

泊松方程 (7) 利用超松弛迭代法求解, 上下边界条件均取为 0, 定义场强垂直向上为正。本文主要采用整体放电参数化方案, 击穿阈值随高度变化 (Marshall et al., 1995):

$$E_{\text{break}} = 167 \rho_{\text{air}}(z), \quad (9)$$

其中,  $\rho_{\text{air}}(z)$  为随高度变化的空气密度, 在这里作

为一个无量纲量, 击穿阈值  $E_{\text{break}}$  单位 kV/m。格点闪电数  $F_n$  在地面格点上计数, 每个地面格点的垂直方向上, 如果有一个或多个格点场强超过击穿阈值, 则对垂直方向上所有场强大于 20 kV/m 的格点进行电荷泄放, 并对这些格点上水成物粒子的荷电量削减 20%, 同时在地面格点上记录一次闪电事件。放电过程对每个地面格点独立计算, 相邻或者不相邻的地面格点都发生放电的情形, 在每个地面格点上记录一次闪电事件。在中尺度模式中时间步长可达十几秒甚至数十秒, 每个时间步长内都可能发生多次闪电, 所以每个时间步长内要对放电部分进行循环计算。

使用耦合后的微物理方案计算时, 每一个时步内, 首先进行包括起电、电荷转移以及沉降等与微物理过程有关的计算, 然后利用电荷分布计算场强并进行放电参数化, 之后进入下一个时步。

## 3 模式设计与结果

### 3.1 理想的超级单体的模拟试验

模拟利用 WRF quarter-ss 理想试验, 该试验为三维网格结构, 使用了 Weisman and Klemp (1982) 所分析的探空曲线, 能够模拟理想的超级单体。模拟区域取水平  $80 \times 80$  格点, 分辨率 2 km, 垂直高度 20 km, 共 41 层, 模拟时间步长 12 s, 共模拟 140 min, 每 2 分钟有 1 次结果输出。模拟使用耦合了起电、放电物理过程的 Milbrandt 双参数方案, 由于分辨率已经可以解析到对流的发生, 所以不采用积云参数化方案。

图 1 分别给出了模拟区域中心的垂直剖面上, 第 20、30、60、90 分钟时总电荷浓度的空间分布。模拟的初始阶段的电荷结构呈上正、下负, 表现了正常的偶极性结构, 随着超级单体发展, 负电荷区下部开始出现一个正电荷区, 表现为正、负、正的三极性电荷结构。主正电荷区在  $-40^\circ\text{C}$  到  $-60^\circ\text{C}$  之间, 最大浓度小于  $1 \text{ nC/m}^3$ , 主负电荷区在  $-10^\circ\text{C}$  到  $-30^\circ\text{C}$  之间, 最大浓度为  $-1 \text{ nC/m}^3$  左右, 下部正电荷区在  $0^\circ\text{C}$  层附近, 最大正电荷浓度在  $0.5 \text{ nC/m}^3$  左右。

在第 40 分钟时, 沿模拟区域中心处垂直向上取一条总电荷浓度和垂直场强的廓线 (如图 2), 可以看出, 在垂直方向一共存在正、负、正三个电荷中心, 电场被分为四个部分: 下部正电荷中心以下为负, 下部正中心到负中心之间为正, 负中心到上部正中心之间为负, 上部正中心以上为正。场强的

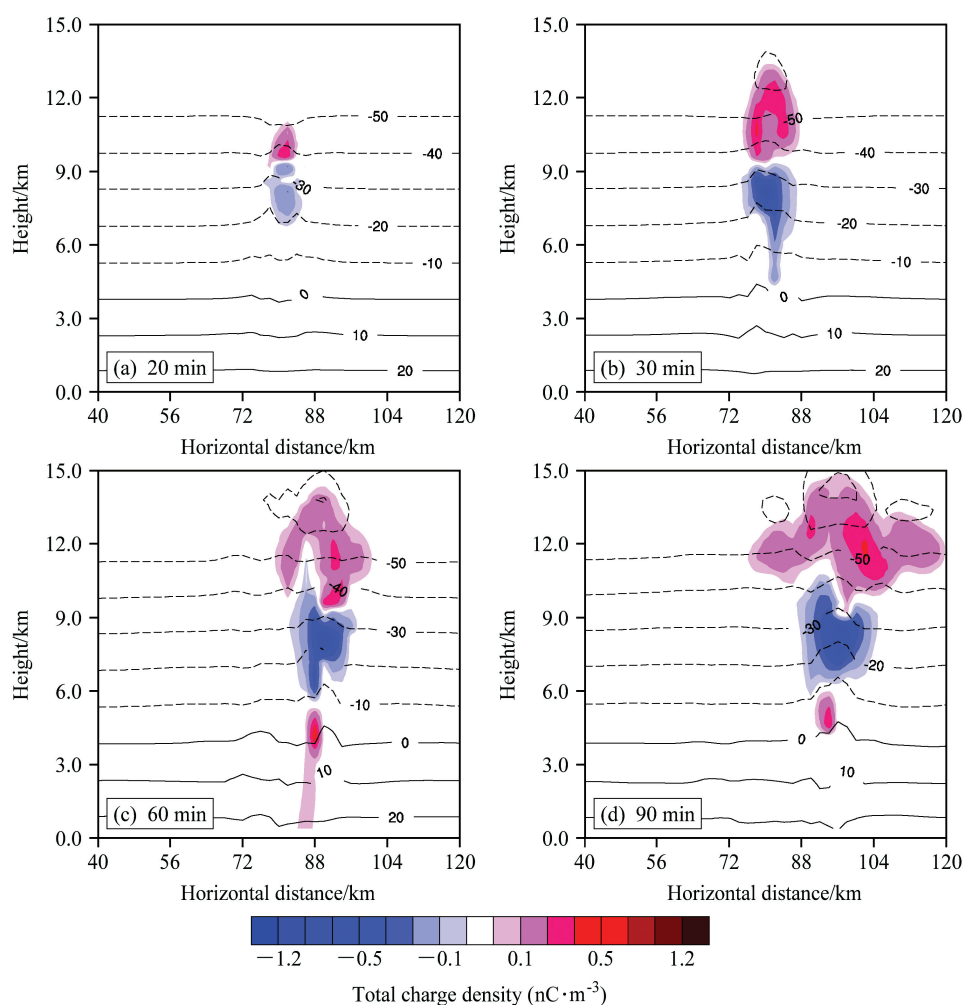


图1 不同时刻的总电荷浓度空间分布的模拟结果: (a) 第20分钟; (b) 第30分钟; (c) 第60分钟; (d) 第90分钟。等值线: 等温线 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.1 The distributions of simulated total charge density in different time: (a) 20th minute; (b) 30th minute; (c) 60th minute; (d) 90th minute. The contour lines are isotherms (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

最大值处在不同电荷区的分界点, 电荷浓度较小处, 而在正、负电荷中心, 场强往往较小, 趋近于零。这种电荷结构和场强的垂直分布同 Stolzenburg et al. (1998) 在中尺度对流复合系统对流区域的上升气流中所观测和分析的电结构十分相似。

在模拟时间内, 整个模拟空间区域中总电荷浓度 (图 3a) 的最大值能够达到约  $2 \text{ nC/m}^3$ , 一般维持在  $1 \text{ nC/m}^3$  左右。最大正电荷浓度的变化较为剧烈, 最大负电荷浓度则相对平稳。最大上升速度 (图 3b) 维持在  $50 \text{ m/s}$  左右, 在 40 分钟后虽然没有大的波动, 但是也有一些小的起伏。相比而言, 最大下降速度则更为平稳, 量值也只有  $20 \text{ m/s}$ 。最大场强的变化 (图 3c) 则主要在  $60\sim 80 \text{ kV/m}$  之间, 最大可以到  $100 \text{ kV/m}$ 。图 3c 中还给出了每个时间间隔内 (120 s) 各地面格点上发生闪电数目的最大值, 模拟

的闪电数目基本在 50 次/120 s 左右。因为发生放电的格点其电场会有明显变化, 所以电场最大值主要来自于那些未发生放电但电场强度较高的点。如果分析云内固定点的场强变化, 会由于起电放电的影响而产生较剧烈的变化, 而空间最大电场值受放电影响小, 变化较为平缓, 可以作为一个反映雷暴整体发展状况的参考变量。需要指出的是, 电荷浓度最大值、最大电场强度以及闪电数目都与所采用的闪电参数化方案密切相关。

图 4 显示了不同粒子最大电荷浓度廓线随时间的演变特征, 取了各个高度层上电荷浓度绝对值最大的点, 从图中可以看出, 总电荷浓度的分布呈现了明显的多层结构, 不同粒子的主要荷电属性不同, 霰粒子和雹粒子主要荷负电, 霰粒子位置略低, 雪和冰晶则主要荷正电。在模拟的前 50 min 内, 霰

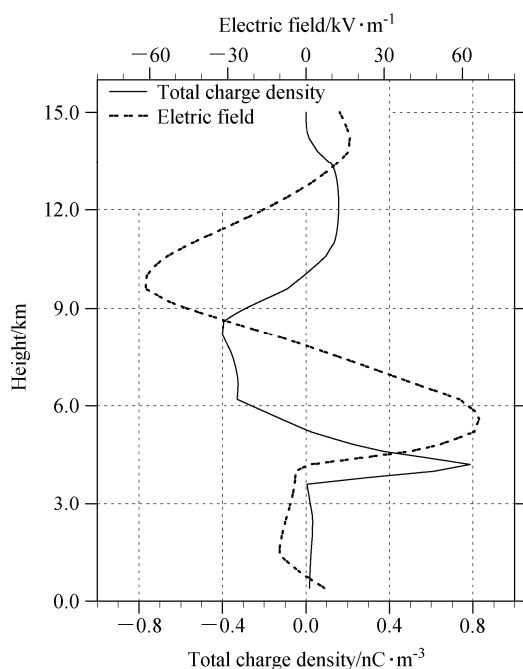


图2 模拟到第40分钟时模拟区域中心的总电荷浓度和垂直场强的廓线

Fig.2 The simulated profiles of total charge density and vertical electric field at the domain center at the 40th minute

粒子、冰雹同冰晶之间的起电起主要作用，此时的下部正电荷区较小且强度较弱。50 min 后，雹粒子同雪晶间的起电才开始起作用，雪晶荷正电且位置较低，加强了云下部的正电荷区。模拟的雨水主要荷正电荷，电荷浓度比主要荷电粒子电荷浓度小一个数量级左右，云水电荷浓度由于较小，在图4中没有给出。在整个模拟中，非感应起电起了较主要的作用，而感应起电则较弱，Ziegler et al. (1991) 也得出感应起电较弱的结论。

从超级单体的模拟结果来看，模拟的电荷浓度空间分布、场强垂直廓线以及模拟的闪电数目都在合理的范围内，接下来在一次飑线过程中来检验起电、放电的合理性。

### 3.2 华北一次飑线过程的模拟试验

本文选取2009年6月16日发生在华北地区一次飑线过程进行模拟。模拟试验采用两重网格双向嵌套方案，两重网格的水平分辨率分别为9 km、3 km，网格点数分别为403×355、352×322。模拟中心为(39°N, 117°E)，垂直层次均为28层。试验的物理参数设置如下：两层网格微物理方案均使用耦合了起电、放电物理过程的Milbrandt双参数方案，辐射选取RRTM长波辐射方案和Dudhia短波

辐射方案，边界层方案使用YSU行星边界层方案。外层网格使用了KF eta积云参数化方案，内层网格关闭了积云方案。模拟时间从2009年6月16日0000 UTC到2009年6月16日1200 UTC，总计12小时，两层网格时间步长分别为30 s、10 s，每1小时输出1次结果。

图5为模拟时间内1100 UTC的观测和模拟的组合反射率对比，实况雷达数据使用了由国家气象信息中心提供的北京雷达站(Z9010)的数据。虽然模拟的雷达回波范围分布较广，但是对比观测结果可以看出，模式能够大致地再现飑线的主体回波结构。模拟的最大回波强度在50 dBZ左右，与实际观测基本一致，在空间位置上有一定的偏差，模拟的回波位置整体比实际略偏东北。沿图5b中所示黑色虚线，对飑线的主体结构做一个垂直剖面，分析电荷浓度的空间结构以及与反射率分布的关系。

图6为1100 UTC时沿图5b黑色虚线所示的垂直剖面中的反射率(彩色阴影)和总电荷浓度(等值线)分布。与图1对比可以发现，不同于超级单体，飑线剖面中的部分雷暴单体空间电荷浓度分布呈现了上负、下正的结构。回波最强的部分都对应了正电荷浓度区，下部正电荷浓度区在0°C附近，最大正电荷浓度0.18 nC/m³，负的电荷区位于正电荷上方，分布的范围较广，主要位于在-5°C到-20°C之间，最大负电荷浓度为-0.36 nC/m³。飑线中最大电荷浓度比超级单体要小，这主要是因为飑线中的单体相比于超级单体的发展没有那么旺盛。

霰粒子同冰晶碰撞获得电荷极性的反转温度是一个随液态水含量变化的值，在本文所使用的起电方案中，液态水含量小于1 g/m³时反转温度为-13.8°C，当液态水含量大于1 g/m³时，反转温度随着液态水含量增加而增加。图7中给出了1100 UTC时沿图5b黑色虚线所示的垂直剖面中霰粒子(图7a)和冰晶(图7b)的混合比(阴影)与电荷浓度(等值线)的分布。由图7中可以看出霰粒子同冰晶粒子荷电的中心区域都都比较低，在-10°C温度层左右。同时从两种粒子混合比分布位置来看，霰粒子主要分布区域也偏低，冰晶粒子虽然主体分布在比较高的位置，但是在0°C到-10°C也有一定分布。这也说明该次过程中可能是由于霰粒子同冰晶碰撞起电的位置偏低，使得霰粒子荷正电，冰晶粒子荷负电，从而导致了部分单体电荷结构的反转，呈现了反偶极性。粒子间的起电位置偏低，也与飑线

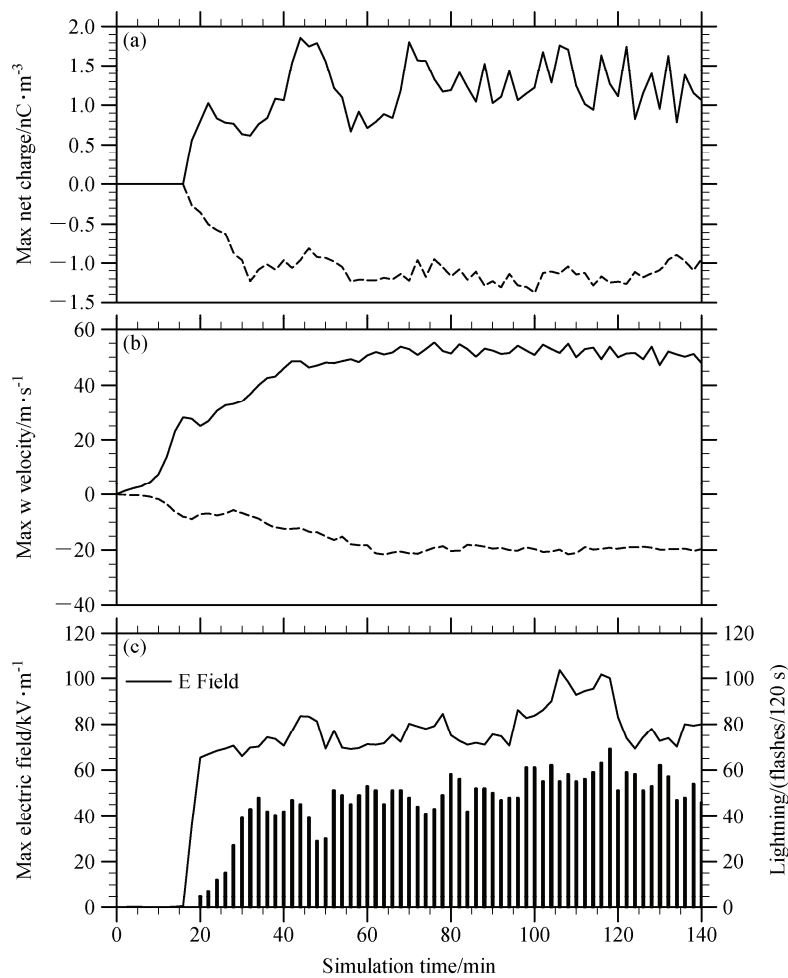


图3 模拟得到的不同参量随时间的变化: (a) 最大净电荷浓度; (b) 最大垂直速度; (c) 最大电场 (曲线) 及闪电数 (直方图)。实线: 正值; 虚线: 负值

Fig.3 Variation of simulated parameters with time: (a) The maximum total charge density; (b) the maximum vertical velocity; (c) the maximum electric field and lightning number (histogram). Solid line indicates positive value and dashed line indicates negative value

的发展高度有关。这些单体电荷极性反转是否也同液态水含量有关, 在讨论中将进一步说明。

由于模式中引入了整体放电参数化方案, 所以可以模拟格点闪电数目, 利用中国气象局气象探测中心提供的全国地闪监测网数据进行对比分析。实测地闪数据在划分为  $9\text{ km}\times 9\text{ km}$  的网格中进行统计, 模拟地闪密度使用外层  $9\text{ km}$  网格的数据进行计算。图 8 为飑线成熟阶段 1000 UTC 到 1200 UTC 的两小时累积观测总地闪密度和模拟闪电密度分布图, 图 8a 为观测结果, 图 8b 为模拟结果。在模式的调整阶段, 模拟的闪电活动较少, 未进行对比分析。从图 8 中可以看出, 模拟的闪电分布同实际的地闪密度分布具有相似的分布型, 模拟的闪电活动基本能够落在实际闪电活动范围内, 主要的不同在于, 模拟的闪电区域相对集中而且量值上较大。

模拟的闪电密度是实测地闪密度的数倍, 这首先可能是由于模拟的偏差, 但也可能受另外两个方面因素影响。一方面现有基于陆地的地闪探测网并不能探测到所有的地闪, 另一方面, 因为在放电参数化方案中没有对地闪和云闪进行区分, 模拟结果包含了云闪和地闪, 而实测的仅是地闪。模拟的闪电区域相对集中应当同放电参数化方案的选择有关, 特别是放电阈值的选取。由图 6 可以看出, 电荷浓度较大的区域主要在对流核中, 模拟出的闪电也较多, 而在对流核周围延展较广的对流区或层云区, 虽然雷达回波强度能够达到  $40\text{ dBZ}$  以上, 但是其电荷浓度却较小, 在这些区域内只模拟出较少的闪电, 而实际中这些区域也存在分布较广的闪电活动, 这说明在现有放电参数化方案下, 模式在这些电荷浓度较小的区域还难以真实地反映闪电活动。

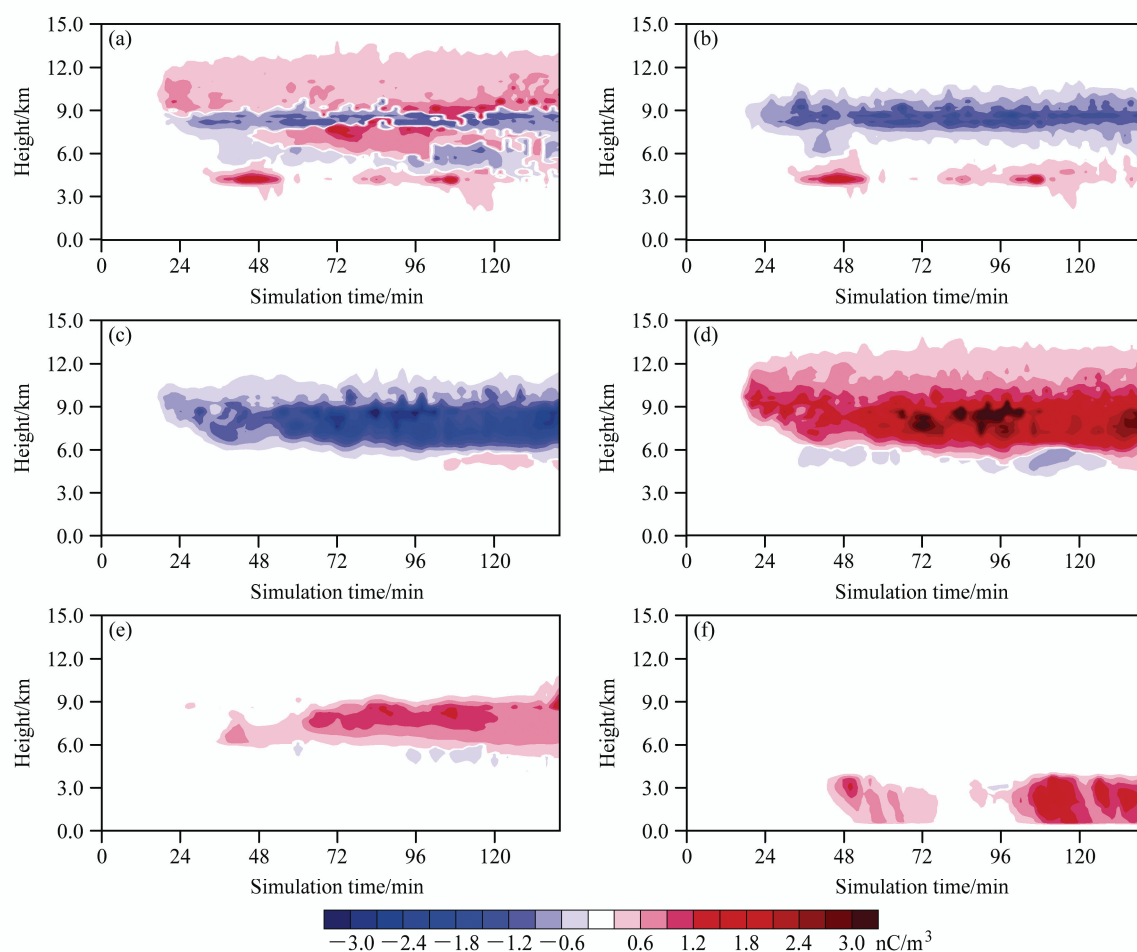


图 4 不同粒子最大电荷浓度廓线随时间的演变: (a) 总电荷浓度; (b) 雹粒子电荷浓度; (c) 霰粒子电荷浓度; (d) 冰晶电荷浓度; (e) 雪晶电荷浓度; (f) 放大 30 倍的雨滴电荷浓度

Fig.4 The profiles of maximum charge density for different particles with time: (a) Total charge density; (b) hail; (c) graupel; (d) ice; (e) snow; (f) rain ( $\times 30$ )

同时, 由于模式对动力和云的模拟同实际存在一定的偏差, 所以闪电活动的模拟也会相应地受到影响。

## 4 结论与讨论

本文将不同水成物粒子的电荷浓度参量引入 WRF 模式, 同时将霰、雹与冰晶、雪之间的非感应起电机理以及霰、雹与云滴之间的感应起电机理耦合进了 Milbrandt 双参数微方案, 并采用了整体放电参数化方案, 实现了在 WRF 模式中起电、放电的模拟。耦合后的模式能够模拟三维的空间电荷结构和场强分布, 可以对不同天气系统的电结构特征进行分析。由于 WRF 本身是一个中尺度预报模式, 而且采用了放电参数化方案, 因此耦合后的模式还具有闪电活动的预报价值。

利用耦合起电、放电物理过程后的 WRF 模式对理想超级单体和一次飑线过程进行了模拟, 并与实际观测结果进行了初步对比, 主要结论如下:

(1) 超级单体中, 模拟的空间电荷结构呈现了正、负、正的三极性分布, 主正电荷区在 $-40^{\circ}\text{C}$ 到 $-60^{\circ}\text{C}$ 之间, 主负电荷区在 $-10^{\circ}\text{C}$ 到 $-30^{\circ}\text{C}$ 之间, 下部正电荷区在零度层附近。总电荷浓度最大值接近 $2\text{ nC/m}^3$ , 霰、雹同冰晶粒子间的非感应起电在整个起电物理过程中起了较主要的作用, 感应起电则较弱。有研究者也得出感应起电较弱的结论 (Ziegler et al. 1991)。这些结果与已有的物理认识相一致, 表明模拟的电荷结构具有一定的合理性。

(2) 现有的放电参数化方案下, 模拟的最大电场强度在 $100\text{ kV/m}$ , 参数化的闪电数目每 2 分钟在 50 次左右。超级单体中模拟的电荷结构和垂直场强

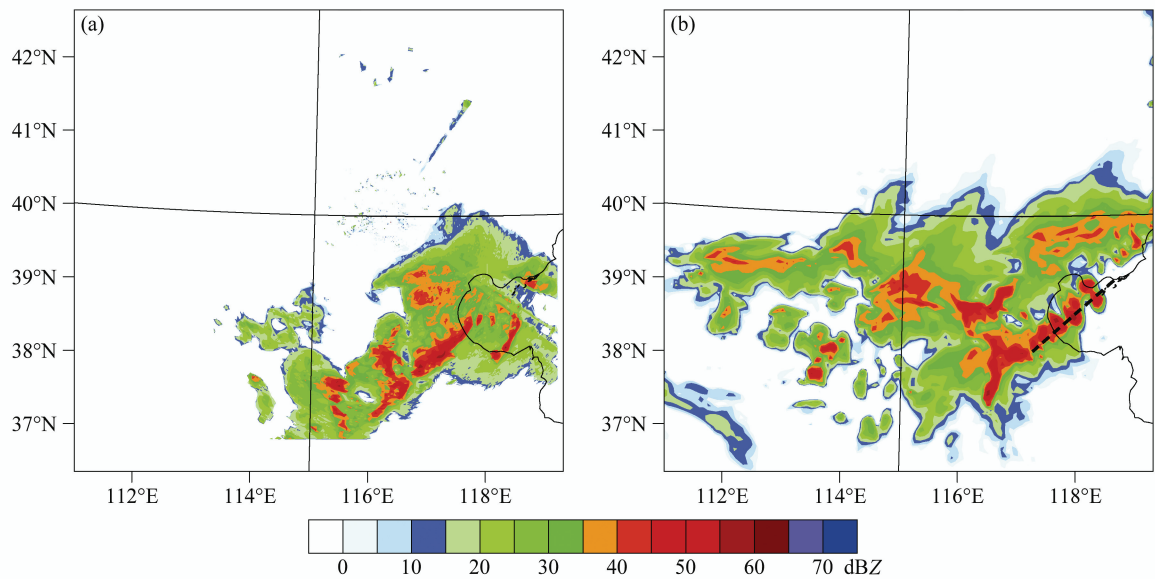


图 5 1100 UTC 时雷达组合反射率的 (a) 观测和 (b) 模拟结果  
Fig.5 The (a) observation and (b) simulation of radar combined reflectivity at 1100 UTC

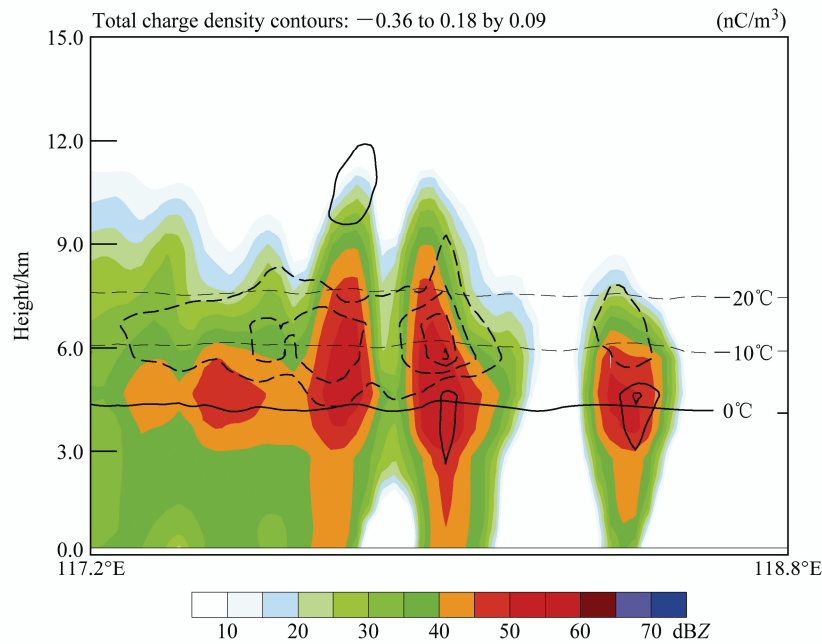


图 6 1100 UTC 时沿图 5b 黑色虚线所示垂直剖面中的反射率 (彩色阴影) 和总电荷浓度 (等值线) 分布。实、虚线：正、负值  
Fig.6 The distributions of reflectivity (shaded area) and total charge density (contour lines) in a vertical cross section along the black dashed line in Fig. 5b at 1100 UTC. Solid line indicates positive value and dashed line indicates negative value

的分布廓线同中尺度对流复合系统对流区域的上升气流中所观测和分析的电结构十分相似。

(3) 飗线中，主负电荷区位于 $-5^{\circ}\text{C}$ 到 $-20^{\circ}\text{C}$ 之间，下部正电荷区在零度层附近。部分单体电荷结构呈现了上负、下正的反的偶极性电荷结构。分析发现粒子间相互碰撞的起电位置的温度偏高，使得

霰粒子荷正电，而冰晶粒子荷负电，导致了电荷结构极性的反转。飗线成熟阶段地闪活动观测与模拟闪电活动的对比来看，模拟结果能够部分反映实际的闪电活动，闪电活动的模拟也受到了模式对动力和云模拟效果的影响。

为了进一步诊断飗线中出现电荷结构上负、下

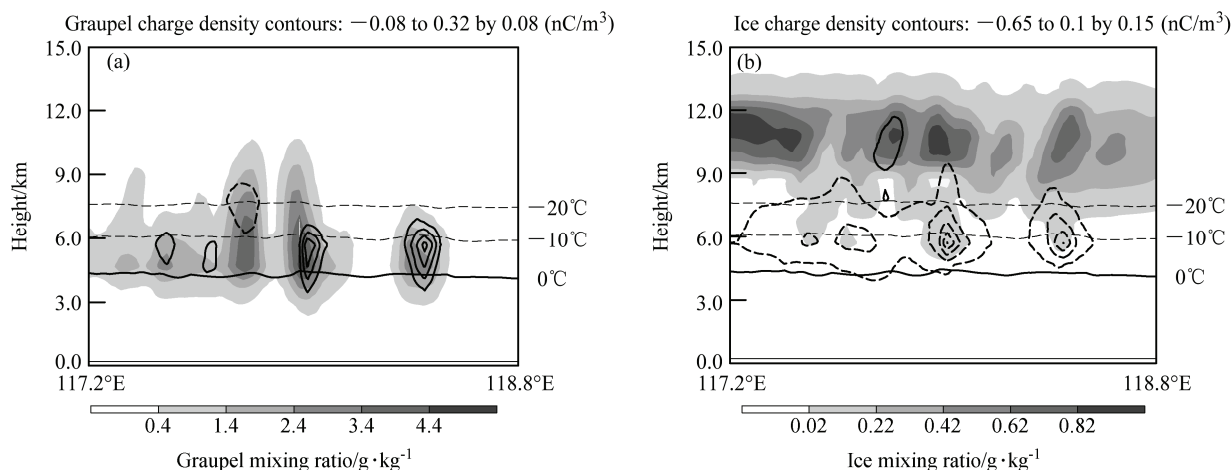


图 7 1100 UTC 时沿图 5b 黑色虚线所示垂直剖面中粒子的混合比 (阴影) 与电荷浓度 (等值线) 的分布: (a) 霰; (b) 冰晶。实、虚线: 正、负值  
Fig.7 The distributions of particle mixing ratio (shaded area) and charge density (contour lines) in a vertical cross section along the black dashed line in Fig. 5b at 1100 UTC: (a) Graupel; (b) ice. Solid line indicates positive value and dashed line indicates negative value

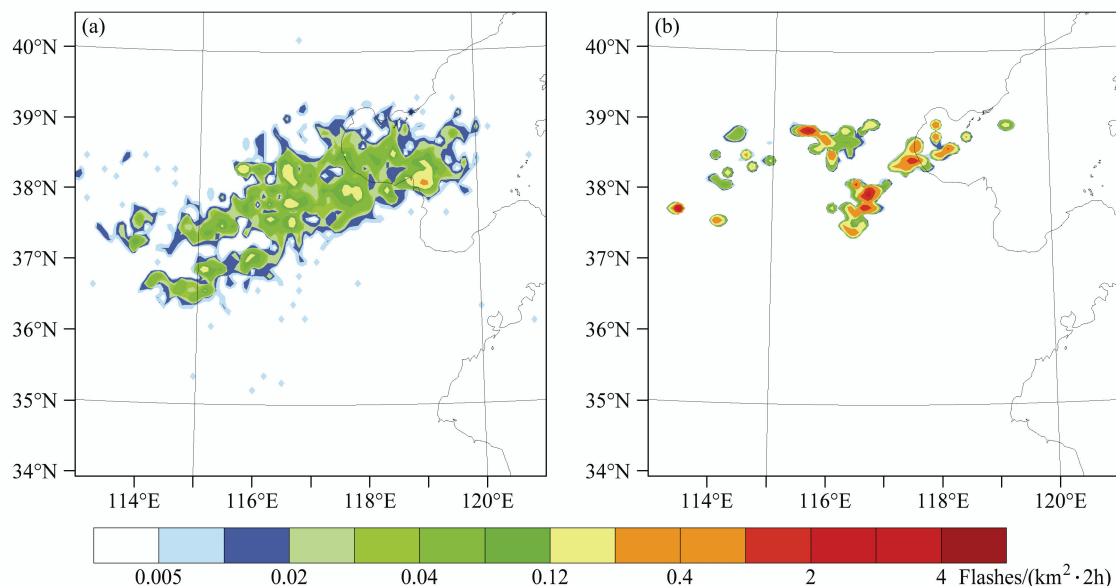


图 8 1000 UTC–1200 UTC 的两小时 (a) 观测地闪和 (b) 模拟闪电的密度分布

Fig.8 The distribution of (a) observed cloud-to-ground (CG) lightning density and (b) simulated lightning density from 1000 UTC to 1200 UTC

正的原因, 我们将反转温度设为定值 $-13.8^{\circ}\text{C}$ 进行重新模拟。模拟发现仍然会出现这种电荷极性反转的情形, 这说明所模拟的爬线中部分单体结构反转并不是由于粒子碰撞分离所处位置的液态水含量过高, 而是起电位置所处的温度偏高。

由于闪电的发生具有大的空间随意性, 无法像降水一样观测在固定点上发生的多少, 所以实际的闪电空间特征往往使用闪电密度的概念, 统计每平方千米范围内有多少雷电发生。但模式中计算都是在格点上进行的, 模拟的是固定点上发生的闪电数目。当模拟的空间分辨率改变后, 每个格点上发生

的闪电数目不会有太大改变, 但闪电密度的计算会受到空间分辨率的影响, 因此只有合适的空间分辨率才能使计算的闪电密度同实际观测的闪电密度在量级上具有可比性。现用的放电方案中将每个格点上的一次放电记做一次闪电事件, 如果空间分辨率提高后, 能够将相邻格点上发生的放电判定为同一次闪电, 也能削弱空间分辨率对闪电密度计算的影响。

下一步工作中将进一步完善模式中的起电方案, 把包括次生冰晶起电在内的更多起电机制引入模式, 还要对不同的非感应起电方案进行对比分

析。现有的放电方案中参数的选择多来自精细通道的放电方案, 且具有一定的随意性。在较大时间步长的模拟中, 如何选择合适参数真实地反映时间步长内发生的闪电数也是一个需要探讨的问题。同时在物理过程更加全面的微物理方案中耦合起电、放电物理过程也将是本研究下一步工作的重要内容。

**致谢** 两位匿名审稿专家和编辑对本文的修改提出了宝贵的评阅意见, 在此表示由衷的感谢。

## 参考文献 (References)

- Altaratz O, Reisin T, Levin Z. 2005. Simulation of the electrification of winter thunderclouds using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D20205.
- Barthe C, Molinie G, Pinty J P. 2005. Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model [J]. *Atmospheric Research*, 76 (1–4): 95–113.
- 冯桂力. 2008. 强对流天气的闪电特征及其与动力过程和降水结构关系的研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Feng Guili. 2008. Studies on lightning activity and its relationship with dynamics and prediction structure of severe convective weather systems [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences.
- Fierro A O, Reisner J M. 2011. High-resolution simulation of the electrification and lightning of hurricane Rita during the period of rapid intensification [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68 (3): 477–494.
- Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, et al. 1985. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a Montana summer thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 90 (D4): 6079–6086.
- 郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 2007. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 28–36. Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2007. A numerical study of the charge structure in thunderstorm in Nagqu area of the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 28–36.
- 郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 2010. 雷暴云首次放电前两种非感应起电参数化方案的比较 [J]. *大气科学*, 34 (2): 361–373. Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2010. Comparison of two parameterization schemes for noninductive mechanism before the first discharge in a simulated single cell storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (2): 361–373.
- Hayashi S. 2006. Numerical simulation of electrical space charge density and lightning by using a 3-dimensional cloud-resolving model [J]. *Sola*, 2: 124–127.
- 黄丽萍, 管兆勇, 陈德辉, 等. 2008. 基于高分辨率中尺度气象模式的实际雷暴过程的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1341–1351. Huang Liping, Guan Zhaoyong, Chen Dehui, et al. 2008. Numerical simulation experiments of a thunderstorm process based on a high-resolution mesoscale model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (6): 1341–1351.
- Jayaratne E R, Saunders C P R, Hallett J. 1983. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109 (461): 609–630.
- Jennings S G. 1975. Charge separation due to water drop and cloud droplet interactions in an electric field [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (428): 227–234.
- Kasemir H W. 1960. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge [J]. *J. Geophys. Res.*, 65 (7): 1873–1878.
- 李万莉, 刘冬霞, 郗秀书, 等. 2012. 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 [J]. *物理学报*, 61 (5): 059202. Li Wanli, Liu Dongxia, Qie Xiushu, et al. 2012. Evaluation of noninductive charging mechanisms and simulation of charge characteristic structure in the early thunderstorm based on RAMS V6.0 [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 61 (5): 059202.
- 刘冬霞. 2010. 强雷暴系统中的闪电活动特征及其电荷结构的数值模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Liu Dongxia. 2010. The characteristics of lightning activities and numerical simulation of the charge structure in thunderstorm [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences.
- MacGorman D R, Few A A, Teer T L. 1981. Layered lightning activity [J]. *J. Geophys. Res.*, 86 (C10): 9900–9910.
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D9): 4075.
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D12101.
- Mansell R M, Ziegler C L, Bruning E C. 2010. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (1): 171–194.
- Marshall T C, McCarthy M P, Rust W D. 1995. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 100 (D4): 7097–7103.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3051–3064.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3065–3081.
- 马明. 2004. 雷电与气候变化相互关系的一些研究 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文. Ma Ming. 2004. A study of the relationship between lightning activity and climatic variation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China.
- Pringle J E, Orville H D, Stechmann T D. 1973. Numerical simulation of atmospheric electricity effects in a cloud model [J]. *J. Geophys. Res.*, 78 (21): 4508–4516.
- Rawlins F. 1982. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108 (458): 779–800.
- Sun A P, Yan M H, Zhang Y J, et al. 2002. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification

- coupled model I. Model description and parameterization of electrical processes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 60 (6): 722–731.
- Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 1. Mesoscale convective systems [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D12): 14059–14078.
- 谭涌波. 2006. 闪电放电与雷暴云电荷、电位分布相互关系的数值模拟 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文. Tan Yongbo. 2006. Numerical simulation of relationship of lightning discharge with the space charge and potential distribution in thundercloud [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China.
- Takahashi T. 1974. Numerical simulation of warm cloud electricity [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31 (8): 2160–2181.
- Takahashi T. 1983. A numerical simulation of winter cumulus electrification. Part I: Shallow cloud [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40 (5): 1257–1280.
- Takahashi T. 1987. Determination of lightning origins in a thunderstorm model [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65 (5): 777–794.
- 王飞. 2010. GRAPES 中尺度模式对闪电活动的数值模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Wang Fei. 2010. Numerical simulation of lightning activity using GRAPES\_Meso model [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences.
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (6): 504–520.
- Wiesmann H J, Zeller H R. 1986. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics [J]. *J. Appl. Phys.*, 60 (5): 1770–1773.
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996a. 积云动力和电过程二维模式研究 I. 理论和模式 [J]. *地球物理学报*, 39 (S1): 52–64. Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhengmo. 1996a. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. I. Theory and model [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 39 (S1): 52–64.
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996b. 积云动力和电过程二维模式研究 II. 计算结果 [J]. *地球物理学报*, 39 (S1): 65–77. Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhenmo. 1996b. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. II. Calculation results [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 39 (S1): 65–77.
- Ziegler C L, MacGorman D R, Dye G E, et al. 1991. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 96 (D7): 12833–12855.
- Ziegler C L, MacGorman D R. 1994. Observed lightning morphology relative to modeled space charge and electric field distributions in a tornadic storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51 (6): 833–851.
- 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 1999. 雷暴中放电过程的模式研究 [J]. *科学通报*, 44 (12): 1322–1325. Zhang Yijun, Yan Muhong, Liu Xinseng. 1999. Simulating study of discharge process in the thunderstorm [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 44 (12): 1322–1325.
- 周志敏, 郭学良. 2009a. 强雷暴云中电荷多层分布与形成过程的三维数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 33 (3): 600–620. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009a. A three-dimensional modeling study of multi-layer distribution and formation processes of electric charges in a severe thunderstorm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 600–620.
- 周志敏, 郭学良. 2009b. 强雷暴个例云内闪电与上升气流及液水含量关系的三维数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 31–44. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009b. 3D modeling on relationships among intracloud lightning, updraft and liquid water content in a severe thunderstorm case [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (1): 31–44.