

黄丽萍, 管兆勇, 陈德辉, 等. 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. 大气科学, 2008, 32 (6): 1341~1351
Huang Liping, Guan Zhaoyong, Chen Dehui, et al. Numerical simulation experiments of a thunderstorm process based on a high-resolution mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1341~1351

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

黄丽萍^{1, 2} 管兆勇¹ 陈德辉² 马明³

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/数值预报基地, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 雷暴数值预报的实际应用离我们还有多远? 本文对此进行了尝试, 即利用一个复杂的高分辨率中尺度气象模式驱动一个三维雷电模式, 在只采用常规气象观测资料的条件下, 对北京的一次实际雷暴过程进行模拟试验, 分析了雷暴云的宏观动力、微物理过程及电结构的时空变化特征以及其可能的相互作用机制。结果表明: 利用高分辨中尺度模式预报出的三维气象场作为雷电模式的初始场, 完全可以不需添加虚假的扰动来触发雷暴云的发展, 高分辨中尺度模式的预报场本身所包含的水平非均匀、垂直强非静力性及较强的对流不稳定信息足够促发雷暴云的剧烈发展; 用较为真实的三维气象场作为初始场模拟产生的电场分布特征与云微物理分布特征及环境气象要素的分布结构非常协调, 得到的雷暴云的电荷结构特征以及电结构随时间的演变特征更为复杂, 更真实的体现了实际雷暴云本身发展的复杂性, 同时, 模式能够模拟出合理的云闪及正负云地闪, 且模拟的闪电频数随时间发展演变趋势基本与观测实况基本吻合, 从而表现了对雷电天气潜在的预报能力。本次模拟的北京雷暴云在发展过程中, 水物质霰的最大质量比、最大正电场强度及闪电频数随模拟时间的演变发展趋势非常相似。

关键词 高分辨中尺度模式 雷暴模式 非均匀初始场 电结构

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1341-11

中图分类号 P446

文献标识码 A

Numerical Simulation Experiments of a Thunderstorm Process Based on a High-Resolution Mesoscale Model

HUANG Liping^{1, 2}, GUAN Zhaoyong¹, CHEN Dehui², and MA Ming³

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *State Key Laboratory of Disaster Weather/Center for Numerical Prediction Research, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*

3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract How far will the thunderstorm numerical forecast be used routinely? To answer this question, a three-dimensional thunderstorm electrification and lightning model coupled with a high-resolution mesoscale model is used to simulate a thunderstorm process occurring in Beijing. In this paper, the characteristics of spatial-temporal evolutions of kinematics, microphysics and electrification, as well as the probable interaction between them are analyzed. Results show that a thunderstorm can be triggered without adding an artificial perturbation cell, in which the initial

conditions are provided by the high-resolution mesoscale model. The meteorological information from the mesoscale model includes horizontal nonhomogenous and vertical nonhydrostatic information and intense convective instability can accelerate the thunderstorm development violently. The simulated electrical field, cloud microphysics field and background fields are reasonable, and the electrical structure and its spatial-temporal evolution are more complex, which is closer to the real character of thunderstorm. At the same time, the coupling mesoscale weather model with the electrical and lightning model can simulate a profuse amount of reasonable cloud flashes and negative (positive) polarity cloud-to-ground (CG) flashes, and also the temporal evolution characteristics of cloud ground flash frequency are basically near to the observations. This indicates that the model has potential in the research and forecast of thunder weather. The case simulation reveals that the temporal evolution trends of flash frequency, the maximum graupel mixing ratio and the maximum positive electric field intensity are very similar.

Key words high-resolution mesoscale model, thunderstorm model, nonhomogeneous initial field, electrical structure

1 引言

雷暴是发展旺盛的强对流现象,它往往伴随强风骤雨、雷击、强降水、冰雹以及龙卷等剧烈天气活动,一方面它可以造成洪涝灾害,另一方面也以闪电伴随的强电流、强电场造成人类生命财产的损失,特别是由于微电子器件的广泛应用以及信息技术的快速发展,闪电灾害的危害程度和造成的经济损失及社会影响也越来越大,因此对雷暴的研究和预报有重要意义。

随着探测技术的发展、实验室结果的增多以及高性能计算机的快速发展,数值模式成为研究雷暴云发展过程中动力、微物理和电过程三者间相互作用机制的重要手段之一^[1, 2]。Chiu^[3]、Latham 等^[4]和 Takahashi^[5]分别建立了二维轴对称模式讨论雷暴内电荷分离机制,此后,Helsdon 等^[6]和 Ziegler 等^[7]进一步讨论了雹(霰)-冰晶间非感应起电机机制对雷暴云内电结构形成的作用。言穆弘等^[8, 9]建立了中国第一个二维轴对称模式(该模式包含相对较为完善的微物理过程和起电过程),研究环境参量、动力及微物理对电活动的影响^[10, 11],讨论了尖端放电对空间电荷层形成的作用及其时空演变特征^[12, 13]。张义军等^[14]在此基础上引入放电过程参数化,讨论雷暴电活动与动力、降水间的相关性。Rawling^[15]最早建立包含扩散、传导和非感应起电机机制的三维模式,但由于微物理过程处理得过于简单,模拟结果较差。James 等^[16]建立了一个较为完整的三维模式,详细讨论非感应起电机机制对雷暴电结构的影响。孙安平等^[17, 18]在冰雹云模式基础上引入较成熟的起电机机制以及云内放电参数化方案,

建立了三维强风暴动力-电耦合模式,较好地描述了风暴中动力、微物理和电结构的发展演变过程,郭凤霞等^[19]、张义军等^[20]和孙安平等^[21]研究了电活动与动力的关系。Mansell 等^[22]开发的起电放电模式,其放电参数化采用随机放电模式,模拟的闪电通道与真实闪电的三维分叉结构非常相像。

以上研究工作中,雷电模式经历了二维、三维发展过程,起电放电参数化方案也越来越复杂越来越精确,但是,其模拟过程中都采用水平均匀的初始场,再加上一个人工扰动来启动对流运动,其初始场的时间地点及强度都是人为给定的。这种方法对于研究雷暴云动力、微物理及电过程的发展机制发挥了很好的作用,但显然对实际雷暴云预报研究来说是不足的。雷暴云发生发展的环境一般来说是水平不均匀的,它往往具有复杂的三维结构特征,依靠背景环境场提供发展的重力不稳定条件、水汽来源和对流启动条件。而在较为真实的三维环境背景场下雷暴云电过程的时空变化特征是怎样的?目前还没有这方面的研究。

近年来,气象模式的分辨率越来越高,物理过程越来越复杂,但是,能否用气象模式驱动雷电模式,模拟出较为真实环境背景场下的雷暴电特征,使得雷电数值预报朝实际应用迈上一大步?本文基于此出发点,利用耦合到高分辨率中尺度模式中的雷电模式,研究探讨非均匀初始场驱动雷电模式的可能性,并对北京一次雷暴过程的动力、微物理过程及电结构的时空变化特征进行模拟分析。

2 模式结构和计算

GRAPES 雷电模式是将中国气象科学研究院

大气探测研究所的三维雷电模式耦合到高分辨中尺度预报系统 GRAPES_Meso 中建立而成的。用 GRAPES 高分辨区域模式模拟出的三维非静力平衡环境背景场驱动三维雷电模式, 从而模拟雷电天气中积云动力和电过程发展。

2.1 新一代全球/区域多尺度通用数值分析与预报一体化系统的中尺度预报系统

GRAPES_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System 全球/区域同化预报系统) 是中国气象局自主创新研制的新一代中尺度数值预报系统, 是一个全球与有限区域通用、静力与非静力可选的多尺度数值预报模式^①。模式的主要特点包括: (1) 采用全可压原始方程; (2) 静力平衡与非静力平衡可以开关式置换; (3) 半隐式半拉格朗日时间平流方案; (4) 经纬度格点的网格设计; (5) 水平 Arawawa C “跳点” 格式设置; (6) 三维矢量质点轨迹计算方法; (7) 高度地形追随坐标; (8) 尺度有限区域模式和全球区域模式通用; (9) 拉格朗日“准守恒”平流格式; (10) 垂直方向非均匀“跳层”, Charney-Philips 垂直分层设置。模式所有预报变量写成矢量形式是:

$$\mathbf{X}_i = (u, v, w, \pi, \theta, q_x),$$

其中, u, v, w 为三维风场, 位温

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p},$$

气压变量

$$\pi = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/c_p},$$

T 为温度, p_0 为 1000 hPa 气压, p 为气压, R 为气体常数, c_p 为干空气定压比热, q_x 根据微物理参数化方案的不同包含不同类型的水物质含量, 较为复杂的微物理过程参数化方案包括水汽、云滴、水滴、霰、雪及冰晶等 6 种水物质。模式包含了多种目前较为先进的物理过程参数化方案^[23~25]。

2.2 三维雷电模式

中国气象科学研究院大气探测研究所研发的三维雷电模式是在对流云催化数值模式的基础上加入起电和放电参数化方案, 使得该云模式具备了模拟云中电过程的功能。该模式垂直方向采用笛卡尔直角坐标系, 忽略地转偏向力, 采用非静力平衡方

程; 湍流参数化方案采用 Klassen 一阶闭合法; 微物理过程考虑凝结蒸发、碰并、自动转化、核化繁生及融化冻结等积雨中 27 种主要微物理过程; 包含的起电参数化主要有: 在云中冰相粒子和过冷水滴共存条件下, 霰/雹与冰晶/雪晶碰撞回弹的非感应起电、霰/雹与云滴碰撞的感应起电及霰碰撞大云滴造成冰晶繁生的次生冰晶起电, 放电参数化为最新的随机放电模式。预报量除了与 GRAPES 相同的 u, v, w, π, θ 、水汽、云水、雨水、冰晶、霰、冰雹的比含水量外, 还包含相应的比浓度以及云水、雨水、冰晶、霰、冰雹的电荷密度, 还有为了计算云雨自动转化过程引入云滴谱宽度。马明^[26]不仅详细描述了模式方程、概念和数值计算框架, 同时也给出了云模式和起电参数化的模拟能力检验, 其结果表明模拟的雷暴云宏观特征、云内含水量结果以及云内电场与实验观测结果基本一致; 放电参数化方案的检验结果表明模拟的云内闪电的启动、发展特征和通道的几何结构特征有合理的一致性。

2.3 模式计算

由国家气象中心全球中期天气预报系统 T213 模式预报场为高分辨区域 GRAPES 模式提供初始场和侧边界条件; GRAPES 模式的预报场驱动三维雷电模式进行雷暴云电过程的模拟。GRAPES 模式及三维雷电模式的计算区域为 (38.05°N~41.05°N, 114.72°E~117.72°E), 水平分辨率为 1 km×1 km, GRAPES 模式的时间步长为 30 s, 三维雷电模式的时间步长为 4 s, 垂直分辨率为 500 m。

3 模拟结果

本文利用上述雷电与 GRAPES_meso 耦合的 GRAPES 雷电模式, 对发生在北京 2004 年 6 月 21 日下午的一次雷暴闪电天气进行模拟, 用以分析相对真实的三维环境场下雷暴云闪电活动的演变过程、云宏观微观气象条件与雷暴云起电放电关系以及雷暴云的电荷特征和放电特征。GRAPES_meso 的初始场由 T213 模式分析场提供, 用其预报场为 GRAPES_meso 提供侧边界资料, 起报时间为 2004 年 6 月 21 日 00 时 (国际协调时), 积分时效 6 小时, 雷电模式的初始场为 GRAPES_meso 模式的 6

① 陈德辉主持撰写。《新一代多尺度数值预报系统 (区域)》技术手册 (内部交流)

小时预报场, 积分时效 90 min。模拟的电过程中, 采用的是 Gardiner 等^[27] 非感应起电参数化方案, 感应起电参数化为中等强度的感应起电, 即有效反弹率 E_{re} 为 0.01。

图 1 给出了雷暴模式初始温湿场分布图。可以看出, 无论是水平分布还是垂直结构, 水汽中心都与温度高值区吻合得非常好, 这种环境结构非常有利于雷暴云的发展。

3.1 雷暴云的宏观动力特征

模拟结果表明, 很快在模拟 2 min 时初始云泡就已形成(云水比含量大于 0.1 g/kg), 此时云底温度为 10°C 左右, 云顶高度大约只到 3.5 km 处, 云中最大上升气流速度只有 5.0 m/s。在 5~20 min 之间, 云体迅速发展, 垂直上升速度由 5 m/s 迅速发展至 30 m/s (图 2a), 云顶在 8~19 min 之间以 12.9 m/s 的速度快速到达 13 km, 第 12 min 分别在 4 km 左右和 4.5 km 左右通过云水自动转换有雨水生成, 同时在 4.5 km 左右, 在主上升气流上方 -3°C 左右的区域中, 冰晶首先通过凝华和云水匀质冻结而形成, 随后 1 min 内过冷雨滴通过异质核化冻结形成霰。云体发展到 32 min (图 2b) 时, 最大上升气流速度已达 44 m/s, 云顶高度仍然在 13 km 左右, 此时云内最大含水量区域范围都加大(图 3), 最大含水量达 8 g/kg, 位于 7~12 km 处, 垂直范围较大, 高层在环境风场的作用下, 云顶明显出现云砧, 云中已出现大量的冰相物, 其中冰晶在 10.0 km 高度上最大含量达到 1.2 g/kg, 霰的最大含量在 8.5~11 km 处达到 7 g/kg, 雹最大含量在 8.5~11 km 处达到 0.055 g/kg, 由各种水物质分布图可看出, 此时云中上部水物质主要由冰相物组成, 冰相物尤其是霰的量级已超过云雨水的量级, 地面在 26 min 时开始降雹, 随后模拟到 30 min 时出现降水。此后 10 min 左右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有所减弱, 40 min 左右的上升降到 25 m/s, 云体高度也向下降低了 1~2 km 左右, 降水和降雹也逐渐停歇。但随后 10 min 左右由于此云团身后发展出的新云团单体并入其中, 云团得以进一步的发展, 到了 49 min 左右, 地面重新出现降水和降雹, 此时最大垂直速度达到 44 m/s, 云顶高度达到 14 km, 最大含水量在 10~11 km 处达到 11 g/kg, 云中冰晶在 10.0 km 高度上最大含量达到 0.45 g/kg, 霰的最

大含量在 11 km 处为 10 g/kg, 云水和雨水的最大值则位于较低的高度上, 分别在 3.5~9 km 和 4.5 km 处值为 3.5 g/kg 和 4.5 g/kg。随后的 35 min 左右云团处于成熟阶段, 降水和降雹逐渐加强, 整个云体逐渐向前向下移动, 模拟至 86 min 时垂直上升速度降到 20 m/s, 但由于其身后还有新云团的发展, 整个云体并没有消散, 由于计算机资源及雷暴云模式本身的限制, 模拟时间只有 90 min, 基本包含了雷暴云单体的发展、成熟阶段及消散的开始时期, 下面主要分析雷暴云发展和成熟阶段的电场特性。

3.2 雷暴云各阶段上的电结构宏观特征

通过分析模拟雷暴云在各个时间的空间电结构分布可以发现, 模拟到 14 min 时(图略), 即冰相水物质形成 1~2 min 后, 在非感应起电机作用下, 冰晶带正电荷, 霰雹带负电荷, 电荷结构在初始阶段是上负下正的偶极结构, 负电荷中心在 6 km 高度处, 温度到达 -8°C, 中心电荷浓度为 $-0.02 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 正电荷中心在 5 km 高度处, 温度为 -4°C, 中心电荷浓度为 $0.03 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 其位置处于上升气流和总水成物比质量很大的区域。同时, 在温度为 -7°C 左右的 5.8 km 高度处也形成了正电场中心, 中心场强只有 2.1 kV/m, 其上下分别有一个很弱的负场强中心, 最大值分别为 0.6 kV/m 和 0.9 kV/m。随后的两分钟, 云体向上迅速发展, 电荷浓度向上发展得很快, 模拟到 16 min 时, 在非感应和感应两种机制同时作用下, 电荷浓度在 16.22°E 处形成了上正、中负、下正的三极性电荷结构, 其中最大正电荷中心在 9.5 km 附近电荷浓度达到 $0.9 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 负电荷中心在温度为 8.2 km 高度附近电荷浓度达到 $1.5 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$, 而下层正电荷中心在 7 km 高度附近电荷浓度也达到 $0.6 \times 10^{-9} \text{C/m}^3$ (图 4a)。此时电场强度也迅速发展, 下部 7.5 km 高度处中心值为 70 kV/m 左右的正电场、中部 9 km 高度处中心最大值达到 109 kV/m 的负电场以及上部 10.5 km 处强度为 14 kV/m 的次正电场中心一起形成了电场三极结构(图 5a)。同时, 全场最大电场在较高的高度 9 km 处达到设定的放电阈值 130 kV/m, 出现了第一次云闪, 为负云闪。

随着雷暴云的进一步发展, 电荷浓度的中心值量级没有大的变化, 但随着云体范围的扩大以及雨

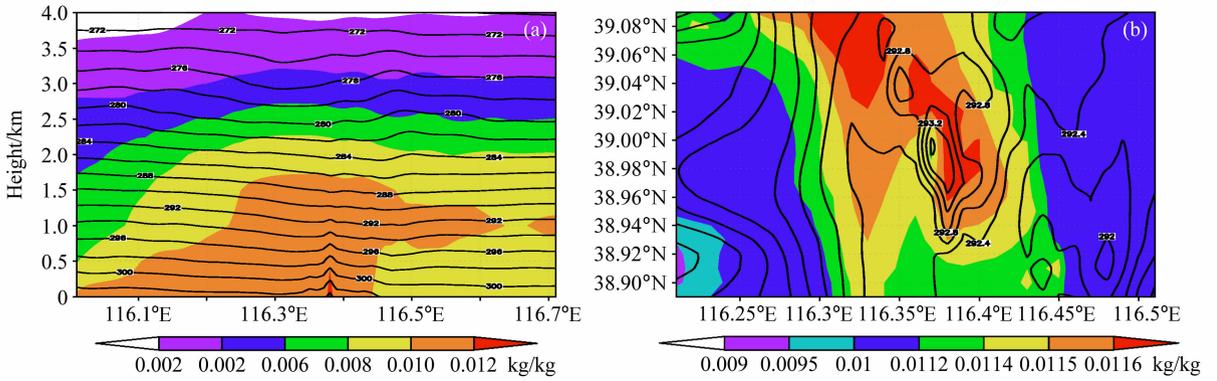


图 1 雷暴模式初始比湿(彩色)和温度(等值线, 单位: K)场分布: (a) 沿 38.94°N 经度-高度剖面; (b) 1 km 高度处水平分布
 Fig. 1 Distributions of initial temperature (isoline, units: K) and specific humidity (colour) of the thunderstorm model: (a) Longitude-height cross section along 38.94°N; (b) horizontal distribution at 1-km height

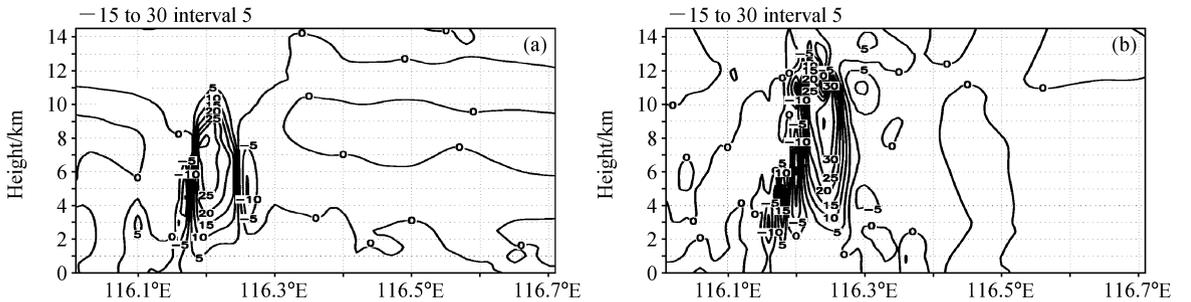


图 2 模拟雷暴云垂直速度场(单位: m/s)沿 38.64°N 的经度-高度剖面: (a) 16 min; (b) 32 min
 Fig. 2 Longitude-height cross section of simulated vertical velocity (m/s) along 38.64°N: (a) 16 min; (b) 32 min

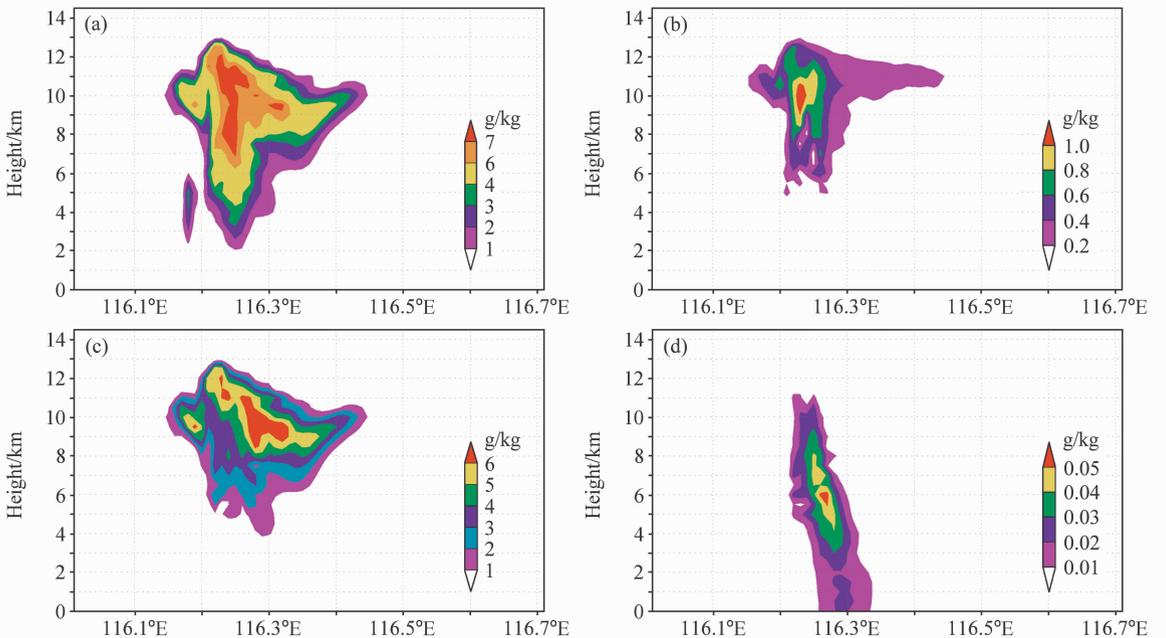


图 3 模拟第 32 min 雷暴云总水成物和各种水成物粒子含量沿 38.64°N 的经度-高度剖面(单位: g/kg): (a) 总水成物; (b) 冰晶; (c) 霰; (d) 冰雹
 Fig. 3 Longitude-height cross sections of simulated 32-min hydrometeors-mixing ratio (g/kg) along 38.64°N: (a) Total hydrometeors; (b) ice; (c) graupel; (d) hail

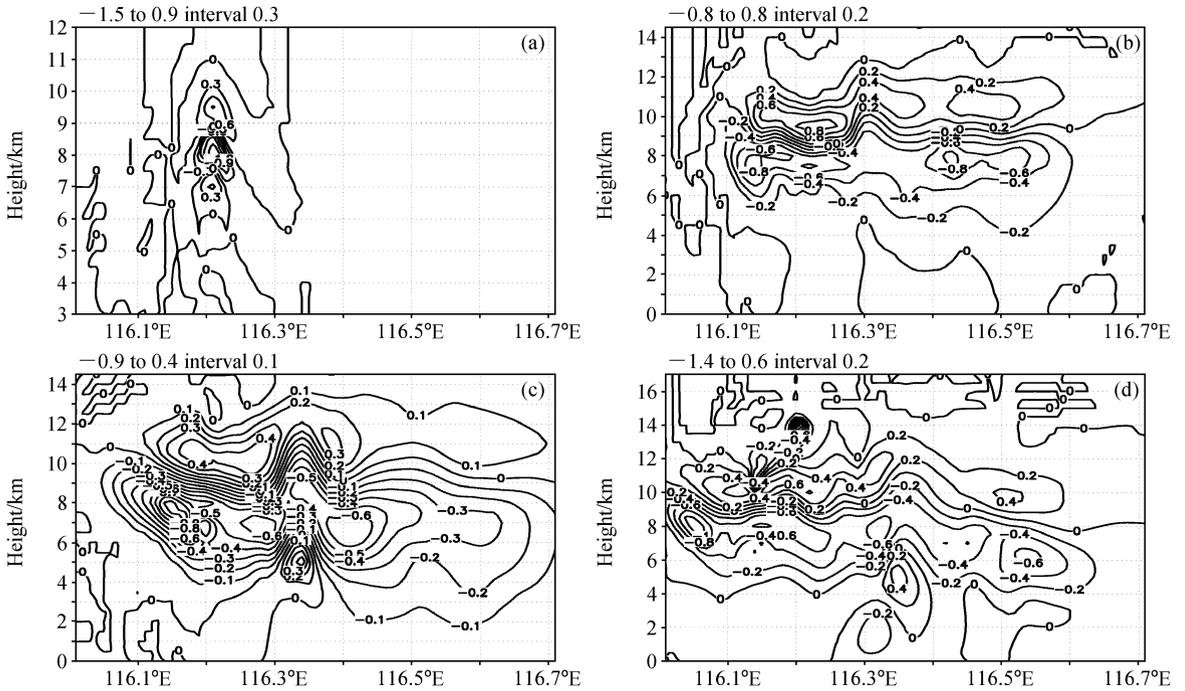


图4 模拟雷暴云第83 min电荷浓度沿38.64°N经度-高度剖面(单位: $10^{-9}\text{C}/\text{m}^3$): (a) 16 min; (b) 48 min; (c) 61 min; (d) 83 min

Fig. 4 Longitude-height cross sections of simulated charge concentration ($10^{-9}\text{C}/\text{m}^3$) along 38.64°N : (a) 16 min; (b) 48 min; (c) 61 min; (d) 83 min

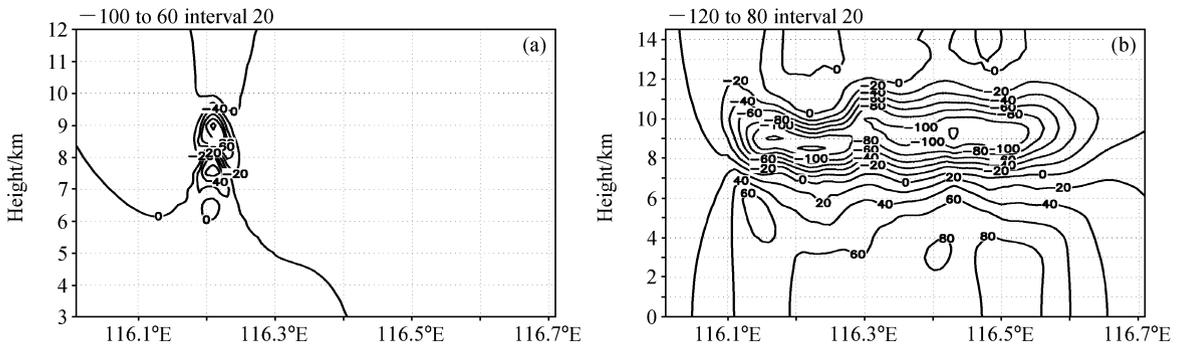


图5 模拟雷暴云的电场强度沿38.64°N经度-高度剖面(单位: kV/m): (a) 16 min; (b) 48 min

Fig. 5 Longitude-height cross sections of simulated electric field intensity (kV/m) along 38.64°N : (a) 16 min; (b) 48 min

水冰雹的下落,其水平和垂直空间范围大大增加,电荷浓度的垂直结构变化较多,开始大多为上正下负的偶极结构(图4b)或者在此基础上上部有次负电荷中心存在的三极性结构,模拟到55 min后,电荷结构转变为上正、中负、下正的三极性电荷结构(图4c),有时还会出现较为复杂的上正、中负、中正、下负的垂直电荷结构(图4d),这些复杂的电荷结构不仅是感应和非感应机制作用下生成的,还有可能受放电过程而带来的电荷重新分配的影响所致。

垂直电场强度上正、中负、下正的三极结构变化不大(图5b),有时上部的正电场中心的上方会出现次负电场中心,中部的正电场强度变化不大但其空间范围尤其是水平方向迅速扩展,下部的正电场中心强度和范围都随时间逐渐增强增大,尤其向下扩展得很快,模拟到24 min时,地面最大电场强度已达到80 kV/m ,水平方向也从16 min的 0.04° 纬距跨度发展到24 min的 0.6° 纬距跨度。

随着整个电场向下发展,模拟到27分24秒时出现第一次地闪,为正地闪。图6a为这次正地闪

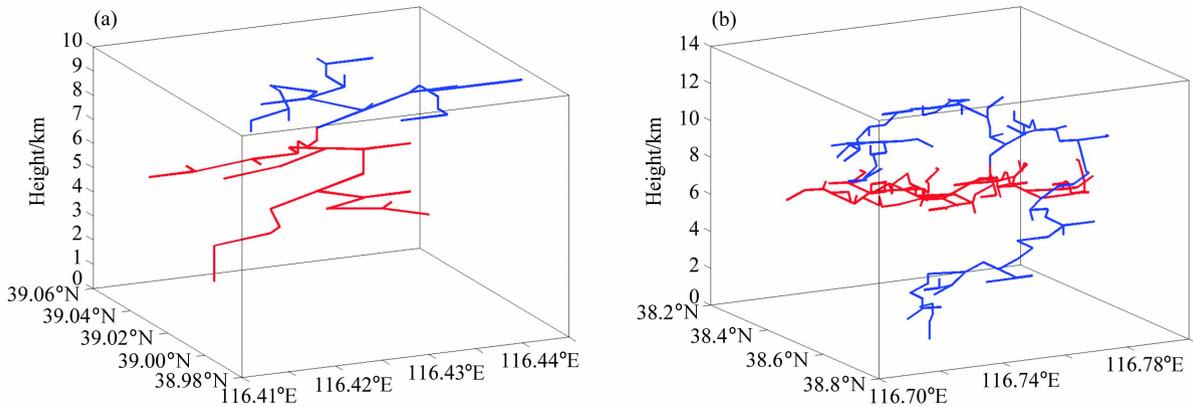


图 6 模拟雷暴云的闪电放电图像：(a) 正地闪；(b) 负地闪。红（蓝）线为正（负）先导通道

Fig. 6 Simulated lightning images for (a) positive cloud-to-ground (CG) flash and (b) negative CG flash. Red (blue) line: the channel of positive (negative) leader

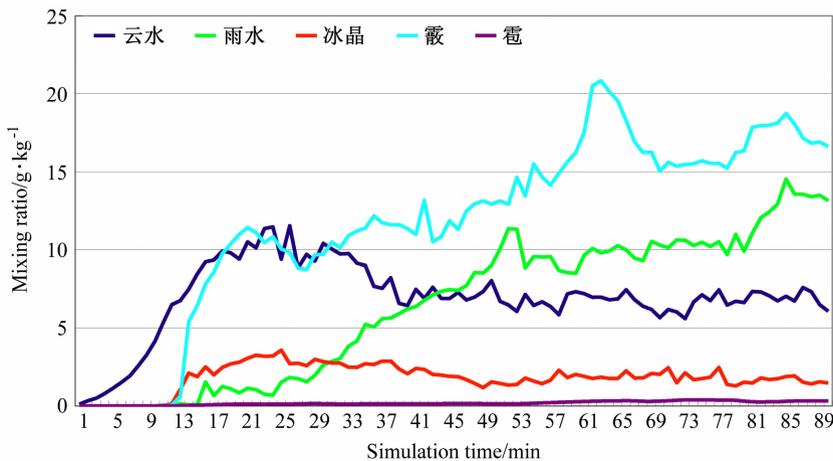


图 7 各水成物最大质量比随模拟时间演变图

Fig. 7 Time evolution of the simulated maximum hydrometeor mixing ratio

的闪电通道图，通过分析 27 min 的电荷浓度（图略）可以看到，在闪电初始点附近，电荷浓度为上正下负的偶极结构，正电荷位于 7.5~11 km 高度处，中心值达 $1 \times 10^{-9} \text{ C/m}^3$ ，负电荷位于 5~7.5 km 高度处，中心值为 $0.7 \times 10^{-9} \text{ C/m}^3$ ，在 7.5 km 高度处，正、负电荷区的交界处附近同时也是垂直电场强度最大的地方，闪电在下部的负电荷区初始击穿后先形成垂直闪电通道，之后，正先导在下方负电荷区向下发展，发展过程中伴随有明显水平方向的发展，负先导在正电荷区发展，通道更倾向于水平分布，正负通道发展都有明显的分叉结构。图 6b 是 33 分 28 秒发生的一次负地闪通道图。对应 33 min 的电荷密度场（图略）可以发现，闪电起始

点在 9.5 km 高度处，同样位于正负电荷区交界处附近、电场强度最大的地方，主要电荷浓度基本上仍为上正下负的结构，正电荷位于 9.5~11.5 km 高度处，中心值为 $0.5 \times 10^{-9} \text{ C/m}^3$ ，负电荷位于 4~9.5 km 高度处，中心值为 $0.8 \times 10^{-9} \text{ C/m}^3$ ，但在正电荷区上方还存在一很弱的次负电荷中心；闪电是由主要的正负电荷区产生的，与 27 min 的正地闪不同，这次负电闪起始于上部的正电荷区，初始击穿形成垂直闪电通道后，闪电呈现明显的双层结构，正负先导都转为明显的水平结构，但负先导经过一段时间的水平延伸发展，转而向下发展，形成了负地闪。这两次的闪电通道与 Shao 等^[28]用甚高频干涉仪观测得到的闪电通道结构是一致的，说

明模拟的闪电结果是合理的。

3.3 雷暴云随时间的演化特征

图7给出了模拟的各水成物最大质量比随模拟时间的变化趋势。可以看到,伴随着雷暴云的迅速发展,云滴浓度在26 min 到达最大值 11.53 g/kg,此时垂直上升气流最大值为 40 m/s,云顶高度达到 13.5 km,随着对流的进一步发展,上升气流最大值在 34 min 左右达到最大值 47 m/s,云顶高度在 31 min 时达到最大值 14 km (提前上升气流最大值 3 min)。由于其他水成物的产生,云滴从 30 min 开始迅速减少,而在上升气流达到最大的同时,雨滴、冰晶、霰开始快速增长,冰晶于 25 min 达到最大值 3.57 g/kg,随后的 20 min 左右其值下降较快,到 49 min 时浓度到达较低值 1.17 g/kg,接着

冰晶浓度稍稍有所增加,但变化不明显,其最大浓度在 1.2 ~ 2.2 g/kg 上下浮动;而霰在较强的上升气流的支持下,从 13 min 开始出现,其最大浓度一直以较快的速度增长,于 63 min 达到最大的 20.83 g/kg,且其最大质量比下降缓慢,90 min 时还达到 16 g/kg 左右;雨水浓度发展趋势与霰浓度发展相接近,开始一直以较快的速度增长,分别在 52 min 及 85 min 时达到 11.34 g/kg 和 14.53 g/kg,之后缓慢下降;而雹质量比量级较小,其开始也一直处于增长趋势,76 min 时达到最大值 0.39 g/kg,之后其最大值稍有所下降,但变化不大。

图8、9分别为模拟的最大电场强度和闪电频数随模拟时间变化图,可以看到,在雷暴云发展的前 35 min 左右,最大正负电场强度都随着时间呈

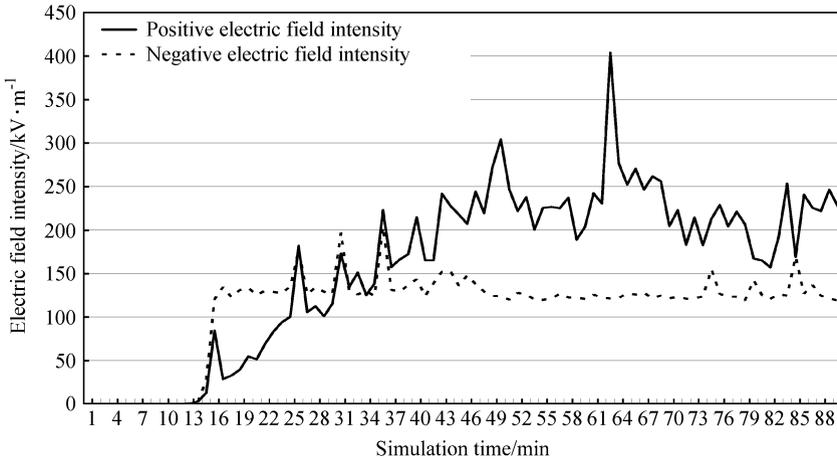


图8 最大电场强度随模拟时间演变图

Fig. 8 Time evolution of the simulated maximum electric field intensity

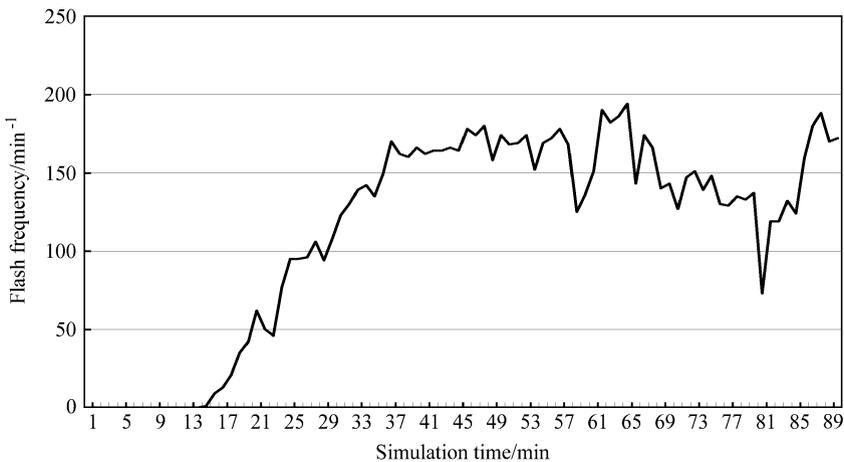


图9 闪电频数随时间演变图

Fig. 9 Time evolution of the simulated total flash frequency

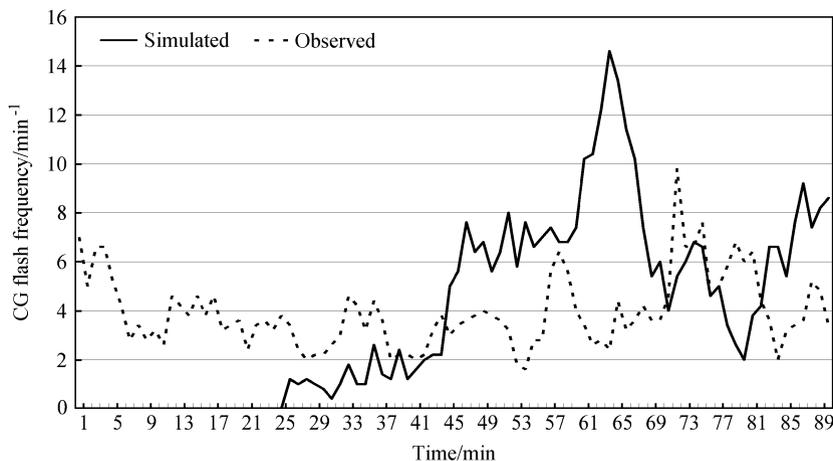


图 10 地闪频数随时间演变图

Fig. 10 Time evolution of the CG flash frequency

现增长趋势,且前 30 min 左右最大负电场强度值基本上大于最大正电场强度,但随后最大负电场强度值变化不大,基本稳定在 120 kV/m 附近,而最大正电场强度值在 30 min 左右超过负电场强度后,仍随时间稳步上升,直到 63 min 达到最大值 403 kV/m,随后才慢慢回落,但仍维持在较高的水平,在 200 kV/m 附近浮动。从闪电频数的时间发展变化来看,在雷暴云发展的前 50 min 左右,闪电频数一直随时间快速上升,随后经过 10 min 左右的上下振荡又迅速增加,在 65 min 左右达到最大值 194 次/min 后缓慢下降,比较其变化趋势与正电场强度变化趋势,不难发现它们随时间的变化趋势基本一致。这与我们设定的闪电域值相关,虽然放电参数化采用的是随机放电参数化方案,但较高的放电域值决定了放电易发生于电场强度较大的地方,所以当电场强度值较大时,放电易发生,从而得到的闪电频数值也会很大。同时,对比正电场强度与水物质霰随时间发展变化图可以发现,正电场强度与霰随时间的发展变化也有着惊人的相似,两者的值都是开始时随时间快速增长,在 60 min 附近达到最大值后其值稍稍下降,然后维持在较高的水平上。由此可见,水物质霰随着雷暴云的发展其浓度及空间范围较大时,霰/雹与冰晶/雪晶碰撞回弹的非感应起电机增强,电荷浓度尤其是水物质霰所带的负电荷浓度的空间范围增大,从而造成电场强度的增强及空间范围的增大;而由于击穿往往发生在电场强度较大的地方,所以电场强度的增强造成闪电频数的增加。

图 10 为地闪频数随时间的变化图,虚线表示

实际观测结果,观测资料来源于中国科学院空间科学与应用研究中心生产的 ADTD 雷电定位系统,实线为模式模拟的结果。由图 10 可见,模拟的地闪频数变化趋势基本与观测随时间的变化趋势一致,它们基本上都为单峰结构,在开始的 1 小时左右呈增长趋势,达到极大值后缓慢减少,且极大值也极为接近;但模拟的地闪频数极大值提前观测极大值约 10 min 左右,且在模拟的后期,地闪频数值相比于观测有些偏大,这可能的原因有:云模式长时间模拟的局限性,模拟过程中设定的放电阈值可能偏小,以及电过程未考虑自由离子电荷项、地面电晕层、电荷屏蔽层等因素。

4 结论

本文首次利用复杂的高分辨率中尺度气象模式驱动三维雷电模式,对北京的一次实际雷暴过程进行了模拟试验,分析了雷暴云的宏观动力、微物理过程及电结构的时空变化特征以及其可能的相互作用机制。结果表明:

利用高分辨中尺度模式预报出的三维气象场作为雷电模式的初始场,完全可以不需添加虚假的扰动来触发雷暴云的发展,高分辨中尺度模式的预报场本身所包含的水平非均匀、垂直强非静力性及较强的对流不稳定信息足够促发雷暴云的剧烈发展;耦合雷电模式对此次北京雷暴电过程的成功模拟为雷电数值预报的实际应用提供了有力的依据,即随着中尺度气象模式的日益完善发展,应用雷电模式模拟雷暴成为可能,雷暴数值预报的实际应用离我们越来越近。

用较为真实的三维气象场作为初始场模拟产生的电场分布特征与云微物理分布特征及环境气象要素的分布结构非常协调,得到的雷暴云的电荷结构特征以及电结构随时间的演变特征更为复杂,更真实地体现了实际雷暴云本身发展的复杂性,同时,模式能够模拟出合理的云闪及正负云地闪,且模拟的闪电频数随时间发展演变趋势基本与观测实况相吻合,从而表现了对雷电天气潜在的预报能力。

与前人所做的模拟结果相比,由于以前都采用水平均匀的初始场添加人为扰动来驱动雷电模式模拟雷暴过程,初始场的给定决定了只能模拟单体雷暴的发展演变过程,也就是说模拟的雷暴过程水平范围较小,气团雷暴形成、成熟和消散的阶段比较明显,雷暴的生命期往往较短,从而造成电场相对要弱,闪电频数也较低,模拟的闪电路径比较简单;而非均匀的中尺度模式预报场驱动雷电模式,由于非均匀初始场包含了更接近真实大气的不稳定信息,往往容易模拟出更为复杂的雷暴演变过程,得到与实际更为接近的闪电频数,大量的更为真实复杂的闪电通道能够被模拟出来。

通过对各种微物理量和电场量随时间的演变趋势的分析可看到:水物质霰的最大质量比、正电场强度及闪电频数随时间的演变发展趋势非常相似。雷暴云对流发展中,上升气流和下沉气流的强弱影响云内微物理过程的发展状况,从而影响云内各种相态水物质的浓度和范围大小,较强的上升气流往往会带来固态水物质含量的增加,而由于各种起电机机制都不同程度依赖于各种水物质的含量及空间范围,尤其是在各种起电机机制中最为重要的霰/雹与冰晶/雪晶碰撞回弹的非感应起电直接依赖于固态水物质霰、雹及冰晶的含量,也就是说,固态水物质的含量及范围直接影响电荷浓度及电场强度的大小和范围,固态水物质霰含量较高且范围较大时,其于冰晶碰撞回弹而带负电荷的机率增加,负电荷浓度的范围得到扩大,从而使得正电场强度的范围及强度增加,而击穿往往发生在电场强度较大的地方,电场强度的大小直接影响闪电频数的大小,正电场强度的增强带来闪电频数的增加。

由于缺少雷暴云电结构的观测,本文对雷暴云电结构的时空变化特征的分析还是初步的,还需更多的模拟结果及观测资料来进一步研究动力、微物理及电结构的相互作用机制。

参考文献 (References)

- [1] 金莲姬, 银燕, 王盘兴, 等. 热带深对流云砧数值模拟及云凝结核数浓度对其影响的初步试验. *大气科学*, 2007, **31** (5): 793~804
Jin Lian-Ji, Yin Yan, Wang Pan-Xing, et al. Numerical modeling of tropical deep convective anvil and sensitivity test on its response to changes in the cloud condensation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 793~804
- [2] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究. *大气科学*, 2007, **31** (3): 425~439
Hu Zhao-Xia, Lei Heng-Chi, Guo Xue-Liang, et al. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 425~439
- [3] Chiu Chinshan. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 5025~5049
- [4] Latham J, Warwicker R. Charge transfer accompanying the splashing of supercooled raindrops on hailstones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1984, **41**: 2541~2558
- [5] Takahashi T. Thunderstorm electrification—A numerical study. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2541~2558
- [6] Heldson J, Farley R. A numerical modeling study of a Montana thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 5661~5675
- [7] Ziegler C, MacGorman D, Dye J, et al. A model evaluation of non-inductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1989, **96**: 12833~12855
- [8] 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 积云动力和电过程二维模式研究 I. 理论和模式. *地球物理学报*, 1996, **39** (1): 52~64
Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhenmo. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. I. Theory and model. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1996, **39** (1): 52~64
- [9] 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 积云动力和电过程二维模式研究 II. 结果分析. *地球物理学报*, 1996, **39** (1): 65~74
Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhenmo. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. II. Calculation results. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1996, **39** (1): 65~74
- [10] 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
Yan Muhong, Liu Xinsheng, An Xuemin, et al. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm. I: Affect of cloud factor. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (4): 425~437

- [11] 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
Yan Muhong, Liu Xinsheng, An Xuemin, et al. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm. II: Affect of environmental factor. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (4): 438~447
- [12] 言穆弘. 雷暴下金属尖端放电后所至空间电荷层分布的数值计算. 大气科学, 1986, **10** (3): 302~309
Yan Muhong. The numerical calculation of space charge layer due to the corona discharge of metaling ground points under thunderstorm. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1986, **10** (3): 302~309
- [13] 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. 大气科学, 2001, **25** (1): 16~24
Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. A numerical study of space charge formation beneath thunderstorm. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2001, **25** (1): 16~24
- [14] 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 雷暴中放电过程的模式研究. 科学通报, 1999, **44** (12): 1322~1325
Zhang Yijun, Yan Muhong, Liu Xinsheng. Model study of discharge process in thunderstorm. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1999, **44** (12): 1322~1325
- [15] Rawling F. A numerical study of thunderstorm electrification using a 3D model incorporating the ice phase. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1982, **108**: 779~800
- [16] Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al. A model evaluation of non-inductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96** (D7): 12833~12855
- [17] 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 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
Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. I: Model description and parameterization of electrical processes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (6): 722~731
- [18] 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 三维强风暴动力-电耦合数值模拟研究 II: 电结构形成机制. 气象学报, 2002, **60** (6): 732~739
Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. II: Mechanism of electrical structure. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (6): 732~739
- [19] 郭凤霞, 张义军, 郗秀书, 等. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究. 高原气象, 2003, **22** (3): 268~274
Guo Fengxia, Zhang Yijun, Qie Xiushu, et al. Numerical simulation of different charge structures in thunderstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (3): 268~274
- [20] 张义军, 孙安平, 言穆弘, 等. 雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 2004, **67** (1): 25~32
Zhang Y J, Sun A P, Yan M H, et al. Numerical modeling for effects of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **67** (1): 25~32
- [21] 孙安平, 张义军, 言穆弘. 雷暴电过程对动力发展的影响研究. 高原气象, 2004, **23** (1): 26~32
Sun Anping, Zhang Yijun, Yan Muhong. Study on influence of electrical processes on dynamical development in thunderstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (1): 26~32
- [22] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (D9): 4075, doi: 10.1029/2000JD000244
- [23] 沈元芳, 黄丽萍, 徐国强, 等. 长波辐射对大气变化的敏感性和在 WRF 模式中的应用检验. 气象学报, 2004, **62** (2): 213~227
Shen Yuanfang, Huang Liping, Xu Guoqing, et al. The sensitivity of long wave radiation to atmospheric changes and the simulating in the weather research and forecast (WRF) model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (2): 213~227
- [24] 徐国强, 黄丽萍, 薛纪善, 等. 中国冬夏季模式降水方案的应用分析研究. 气象学报, 2005, **63** (1): 49~56
Xu Guoqing, Huang Liping, Xue Jishan, et al. Application and study of precipitation schemes in weather simulation in summer and winter over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (1): 49~56
- [25] 沈元芳, 胡江林. GRAPES 模式中的坡地辐射方案及其对短期天气过程模拟的影响. 大气科学, 2006, **30** (6): 1129~1137
Shen Yuanfang, Hu Jianglin. Slope irradiance scheme in GRAPES and its effect on simulation of short-range weather processes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1129~1137
- [26] 马明. 雷电与气候变化相互关系的一些研究. 中国科学技术大学博士学位论文, 2004
Ma Ming. A study of the relationship between lightning activity and climatic variation. Ph. D. dissertation (in Chinese). University of Science and Technology of China, 2004
- [27] Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, et al. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a Montana summer thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90** (D4): 6079~6086
- [28] Shao X M, Krehbiel P R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D21): 26641~26668