

程斌,冯桂力,杨仲江,等. 冰晶繁生对雷暴云非感应起电影响的数值模拟[J]. 气象,2012,38(6):669-678.

# 冰晶繁生对雷暴云非感应起电影响的数值模拟<sup>\*1</sup>

程 斌<sup>1</sup> 冯桂力<sup>2</sup> 杨仲江<sup>1</sup> 余蜀豫<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

2 山东省雷电防护技术中心,济南 250031

**提 要:** 为了研究冰晶繁生在雷暴云发展过程中对非感应起电过程的影响,利用三维雷暴云模式在理想层结环境下,对雷暴云内各种水成物粒子、电荷以及电场分布情况进行数值模拟。模拟结果表明:在雷暴云发展和成熟阶段,有繁生过程参与的雷暴云中下部存在一个冰晶聚集区域,从而使得云内冰晶的数量较无繁生过程增大约 15%~18%,且聚集的区域范围更大;同时,繁生过程的加入也使得霰粒子数量也比无繁生过程时增大约 20%;霰-冰非感应电荷转移的正区一般位于霰粒子浓度高值区附近,而负区位于冰晶和霰粒子浓度高值区相重合的区域;冰晶繁生过程通过影响雷暴云中冰晶和霰粒子浓度和分布位置,使得雷暴云非感应起电的强度和位置发生改变,导致云内起电过程提前约 5~6 min。

**关键词:** 冰晶繁生, 冰晶浓度, 霰粒子浓度, 非感应起电

## Numerical Simulation of the Influence of Ice Crystal Multiplication on Non-Inductive Electrification in Thunderstorm

CHENG Bin<sup>1</sup> FENG Guili<sup>2</sup> YANG Zhongjiang<sup>1</sup> YU Shuyu<sup>1</sup>

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Shandong Technical Centre of Lightning Protection, Jinan 250031

**Abstract:** In order to study the influence of ice crystal multiplication on non-inductive electrification during the development of thunderstorm, a three-dimensional numerical model of thunderstorm was used to evaluate the distribution of the variant particles, charge and the electric field in the thunderstorm with an ideal environment. The result shows that there is an ice crystal gathering area in the lower part of the thunderstorm with ice crystal multiplication during its development and mature stage. It makes the number of ice crystals in the case of multiplication increase by 15%–18% and the gathering area become larger compared to the condition without multiplication. And multiplication also makes the number of graupel particles in the condition with multiplication increase about 20%. The positive charged region always occurs nearby the area with high graupel concentration, while the negative charged region always appears in the overlap region with the high ice and graupel concentrations. Multiplication firstly influences the ice and graupel concentration and spacial distribution, then makes the non-inductive electrification in thunderstorm more powerful and location change, and even the electrification process in single cell storm starts ahead 5–6 min.

**Key words:** ice crystal multiplication, the concentration of ice crystals, the concentration of graupel particles, non-inductive electrification

\* 山东省气象局“山东省雷电监测预警服务系统项目”资助

2011 年 7 月 27 日收稿; 2012 年 2 月 27 日收修定稿

第一作者: 程斌,主要从事雷暴云的数值模拟研究. Email:gogogocb@126.com

## 引言

随着电子产业的发展,雷电灾害对通讯、电力、航空等行业和日常生活的影响越来越大,人们对雷电各方面的现象与物理机制的研究也逐渐深入<sup>[1-6]</sup>。为了有效地对雷电灾害进行防御,关键问题是弄清雷暴云起电和放电的物理机制。到目前为止,大量的室内实验和云内实际观测研究认为以下 5 种起电机理较为完善,分别为正负离子的扩散和电导起电、感应起电、非感应起电以及次生冰晶起电。非感应起电是在过冷水存在的条件下,霰(雹)与冰晶(雪晶)碰撞时,由于碰撞界面的表面特性和生长速度的不同,从而使大小粒子间产生电荷转移的起电机理,其起电率依赖于液态水含量、反转温度,同时也与冰晶的浓度和尺度有密切的关系。Kuettner 等<sup>[7]</sup>经研究发现,非感应起电和感应起电的共同作用,使雷暴云电场值达到所需的击穿阈值。Ziegler 等<sup>[8]</sup>经模拟研究发现,穿云飞机所测到的最大电场值,比只加入了非感应起电机理的模拟结果还要小一些,且在早期起电中,非感应起电起主导作用。另外,一系列的实验室研究<sup>[9-12]</sup>及飞机穿云观测<sup>[13]</sup>的结果,普遍证实非感应起电机理是雷暴内最重要的起电机理之一。此外,非感应起电机理引起的电荷变化率较大,更重要的是该机制中决定电荷转移极性的反转温度决定了雷暴云内的电结构。

冰晶的繁生是发生在云内的微物理过程,指的是:云中冰晶或冻滴等冰相粒子,由于破碎等过程产生新的冰晶个体的各种过程,Hobbs 等<sup>[14]</sup>对各地云的观测表明,冰晶浓度可比活化冰核浓度高出几个量级,例如当温度在 $-15\sim-5^{\circ}\text{C}$ 左右时,冰晶浓度与冰核浓度之比 $Rm=10^4\sim10^5$ ,但当温度在 $-30\sim-25^{\circ}\text{C}$ 时, $Rm\approx 1$ <sup>[14-15]</sup>,说明冰晶繁生引起雷暴云中冰晶数目和质量的变化<sup>[16]</sup>,这会对非感应起电产生一定的影响,因此研究冰晶繁生过程对非感应起电的影响是必要的。Hallett 等<sup>[17]</sup>根据实验结果指出,在冰晶繁生过程中一次转移的电荷量平均为 $10^{-14}\text{C}$ ,但并未将此结论参数化后进行数值模拟。孔凡铤等<sup>[18-19]</sup>将冰晶繁生过程参数化后加入到三维冷云数值模式中,得到冰晶繁生过程主要改变了云的微物理结构特征,但该模式中并没有加入电过程。言穆弘等<sup>[20-21]</sup>利用二维时变轴对称模式,模拟积云动力和电过程发展,模式中考虑了冰晶繁生过程。

但是其并没有针对冰晶繁生对非感应起电的影响作深入的研究和探讨。

为了研究冰晶繁生过程,对雷暴云发展过程中水成物粒子的浓度和空间分布以及非感应起电的影响,本文在三维雷暴云数值模拟研究的基础上,通过调整模式程序中的参数化方案,来分别模拟在理想层结环境下,加入和未加入冰晶繁生过程时,雷暴云各种水成物粒子、电荷以及电场分布的变化,通过对两种不同情况下的模拟结果进行对比分析。

## 1 模式及参数化方案介绍

### 1.1 模式设置

三维雷暴云模式,是在许焕斌等<sup>[22]</sup>开发的三维非静力弹性强对流(雹)云数值模式的基础上,将几种以实验数据为基础、比较成熟的起电和放电机理的参数化方案耦合到强对流云模式中而开发出来的。模式方程、概念和计算框架见文献<sup>[23]</sup>。模式考虑了除水汽外,云滴、雨滴、云冰、雪、霰和雹等 6 种水成物粒子,以及它们之间的相互作用以及相互转化关系。以上水成物粒子,均用带有双参数的伽马函数 $N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\lambda D)$ 来描述粒子谱。并考虑了 5 种目前比较成熟的雷暴云起电机理:电导起电、正负离子扩散起电、感应和非感应起电,以及次生冰晶起电机理,可以根据需要自行选择其中一种或多种加入到模式中。该模式的模拟区域尺度为 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ ,垂直 $15\text{ km}$ ,水平格距 $1\text{ km}$ ,垂直格距 $0.5\text{ km}$ 。由于主要目的是研究探讨次生冰晶繁生过程对雷暴云内非感应起电的影响,故模式中只考虑非感应起电和次生冰晶起电,而未加入电导起电、正负离子扩散起电和感应起电,并主要模拟雷暴云发展的前期过程。

### 1.2 参数化方案介绍

在冷云中有三种最重要冰晶繁生机制,分别是:(1)辐枝状、针状等易脆冰晶与霰粒、其他冰晶或大滴相碰撞引起机械破碎;(2)冰质粒在淞附较大云滴时引起碎冰屑脱落;(3)大过冷水滴在冻结过程中发生破裂而产生次生冰晶。本文所用到的模式中,只考虑后两种冰晶繁生过程。

Hallett 等<sup>[24]</sup>发现:当温度在 $-8\sim-3^{\circ}\text{C}$ 区间内,霰(雹)并冻直径大于 $24\ \mu\text{m}$ 的云滴时会产生次生

冰晶,这就是所谓的冰晶繁生过程(以下简称 H—M 过程)。淞附过程中冰晶的产生率  $P_1$ ,采用许焕斌等<sup>[22]</sup>中的霰并冻云水的冰晶繁生参数化方案。即

$$P(T) = \begin{cases} 0 & T > 270.06 \text{ K 或 } T < 265.16 \text{ K} \\ 1 - 0.25(T - 268.0)^2 & 268.16 \text{ K} \leq T \leq 270.16 \text{ K} \\ 1 - \frac{(T - 268.0)^2}{9} & 265.16 \text{ K} \leq T < 268.16 \text{ K} \end{cases}$$

则  $P_1 = \frac{P(T)}{250} \frac{\pi}{4} \rho_g a \int_{D_{0g}}^{D_{0h}} N_{0g} \exp(-\lambda_g D_g) D_g^2 D_g^b dD_g \cdot \int_{D_{c0}}^{\infty} N_{0c} D_c^2 \exp(-\lambda_c D_c) dD_c$ , 其中  $N_{0c}$ 、 $N_{0g}$  分别为云滴谱和霰粒子谱的分布截距,  $D_{0g}$ 、 $D_{0h}$  分别为霰粒子和冰雹的直径,  $D_{c0} = 24 \mu\text{m}$ ,  $\rho_g$  为霰粒子的密度,  $a$  取值为  $2115 \text{ cm}^{1-b} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $b$  为常数,取值为 0.8。

实验表明在较低温度下,大水滴滴(一般直径大于  $100 \mu\text{m}$ )冻结时有一部分会破碎产生次生冰晶。因此大滴冻结过程冰晶的产生率  $P_2$ ,其冰晶繁生参数化方案参见文献<sup>[22]</sup>。Koenig 观测表明产生次生冰晶的过冷滴下限直径为  $250 \mu\text{m}$ ;Hobbs,Brownscombe 得到较小滴冻裂的最佳温度区为大致在  $-32 \sim -7^\circ\text{C}$  之间,以  $-15^\circ\text{C}$  附近最有利,此时冰晶浓度与冰核浓度之比  $R_m = 1 \sim 2.5$ <sup>[14-15]</sup>。故本文取过冷滴下限直径  $D_{or} = 250 \mu\text{m}$ ,  $R_m = 1.5$ ,有利温度范围参考 Pruppacher 等<sup>[15]</sup>和孔凡铀等<sup>[19]</sup>的一些结论取  $-25 \sim -5^\circ\text{C}$ 。则冻结过程中冻结的数量  $I_{PN} = \frac{\pi}{6} B' N_{or} \left\{ \exp[A'(T_0 - T) - 1] \right\} \int_{D_{or}}^{\infty} D_r^2 \exp(-\lambda_r D_r) dD_r$ , 其中  $B' = 10^{-4} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $A' = 0.66^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $N_{or}$  为雨滴谱的分布截距。则该过程中,冰晶的产生率  $P_2 = 1.5 \times I_{PN}$ 。另外,为了能让冰晶繁生过程对非感应起电的影响更为明显,在模式中假设:繁生过程中所产生的所有次生冰晶,全部参与到非感应起电当中去。

非感应起电率受诸多因素的影响,如云内温度、液态水含量、相对降落末速、碰撞粒子的尺寸等。而且目前实验室的结果仅能应用于结淞的冰粒子(霰、雹)与冰雪晶之间的碰撞分离起电参数化,因此模式中只考虑了霰(雹)和云冰、霰(雹)与雪之间的非感应起电。则根据以上理论,参考 Mansell 等<sup>[25]</sup>的参数化方案,则大小粒子碰撞弹开所引起的非感应起电的电荷变化量为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \int_{D_{L1}}^{D_{L2}} \int_{D_{S1}}^{D_{S2}} \frac{\pi}{4} \Delta q_{LS} (1 - E_{LS}) \times |V_L - V_S| (D_L + D_S)^2 n_L(D_L) n_S(D_S) dD_L dD_S$$

在  $-5^\circ\text{C}$  附近 ( $-3^\circ\text{C} \sim -8^\circ\text{C}$ ),霰与直径大于  $24 \mu\text{m}$  的云滴并冻,平均 250 次可产生一个冰晶,繁生几率  $P(T)$  如下:

式中,  $D_L$  和  $D_S$  分别是大(雹、霰)、小(冰晶、雪晶)粒子直径,  $E_{LS}$  是碰并系数,  $|V_L - V_S|$  是相对降落末速差,  $n_L$ 、 $n_S$  分别是大小粒子数浓度,  $\Delta q_{LS}$  是一次碰撞反弹的电荷转移量,每两个粒子每次碰撞时转移的电荷,其取值依据不同的非感应起电参数化方案而有所区别。本文中主要考虑 Takahashi<sup>[9]</sup> 提出的参数化方案,该方案是依据实验结果得出(以下简称 TAK 方案)。

### 1.3 模式初始场

强对流天气发生时,大气温湿层结的典型结构通常为上干下湿的不稳定层结。而许爱华等<sup>[26]</sup>通过对比分析两次致灾的雷电天气过程发现:强雷电过程往往伴随着上干下湿的“喇叭口”湿度垂直分布,层结廓线呈“漏斗”型。于是在模式中,我们参考许焕斌<sup>[27]</sup>图 1 给出了一个理想的温湿层结分布。

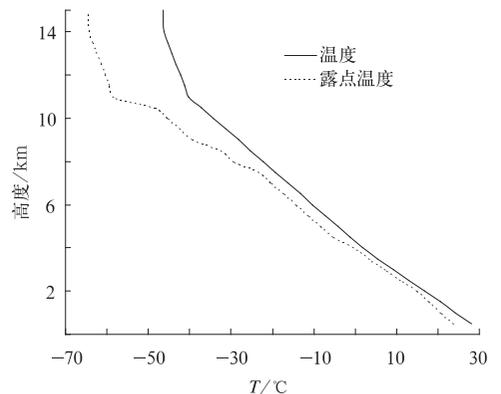


图 1 理想的强对流温湿层结曲线分布图  
Fig.1 Temperature and dew-point profiles in the ideal strong convection (dashed line is dew-point and solid line is temperature)

将图 1 中的探空资料输入模式,选取热湿泡启动方式,该启动方式是在模式域的低层加一有限范围的比周围环境偏高的湿热扰动场,并通过垂直运动方程的浮力项来建立初始对流。扰动场  $x, y, z$

方向的半径分别为 7、6 和 4 km。最大扰动温度为  $2.0^{\circ}\text{C}$ 。模式中采用了轴对称形式的椭球体扰动函数:

$$T = T_0 + \Delta t \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\right)$$

$$Q_v = Q_{v0} + (Q_{vs} - Q_{v0}) \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\right)$$

其中:

$$\beta = \left[ \left( \frac{x - x_c}{x_r} \right)^2 + \left( \frac{y - y_c}{y_r} \right)^2 + \left( \frac{z - z_c}{z_r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

## 2 结果分析

模式共模拟了 90 min,基本上完整地模拟出了强对流的各个主要宏观发展阶段。图 2 为模拟的最大上升气流随时间的变化。从该图中,我们可以将整个雷暴过程大致的划分为:发生发展阶段(0~45 min),成熟阶段(46~60 min)以及减弱阶段(61~90 min)。为了排除所采用的放电参数化方案对模拟结果的影响,且非感应起电过程在雷暴云发展的前两个阶段较为活跃,故选取这两个阶段中,模拟结果对比较为明显的两个时刻作为分析对象,分别为:42 和 54 min。

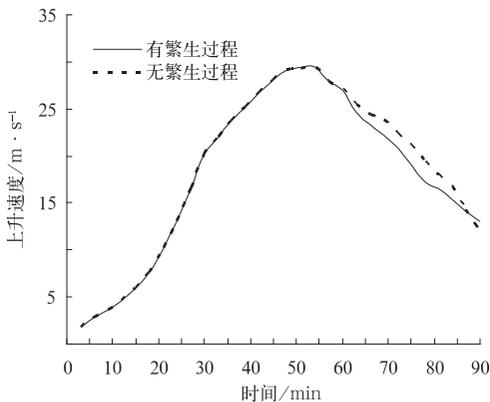


图 2 模拟的最大上升速度随时间的变化  
Fig. 2 Temporal variations of simulated maximum updraft velocity without (dashed) and with (solid) multiplication

### 2.1 发展阶段

图 3 和图 4 为 42 min 沿  $Y=22$  km 冰晶、霰粒子浓度以及霰-冰非感应起电转化速率的  $X-Z$  剖面图。其中图 3a, 3c 表示未考虑冰晶繁生过程冰晶和

霰粒子浓度,而图 3b, 3d 则表示加入了冰晶繁生过程后冰晶和霰粒子浓度。图中最外围的点线表示云中各水成物粒子的总含水量为  $0.0001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的等值线(下同)。从图 3a 中可以很明显地看出:在雷暴云的发展阶段,未考虑冰晶繁生的雷暴云中,冰晶主要位于云的中上部  $Z=14\sim 23$ (单位:500 m,下同)高度处,初步估计这里的冰晶主要由核化作用形成,由于受到上升气流的影响而分布在雷暴云的中上部,最大浓度为  $711.0 \text{ L}^{-1}$ ;而从图 3b 中则可以发现,加入了冰晶繁生的雷暴云,出现了两个冰晶浓度高值区域,一个位于雷暴云中上部  $Z=8\sim 13$  高度的繁生层内;另一个则出现在雷暴云中上部  $Z=14\sim 23$  处。由于后者位置与图 3a 中冰晶高值区的位置几乎一致,可以断定也是由核化作用形成的;而中部的冰晶浓度高值区,中心最大值达到  $119.6 \text{ L}^{-1}$ ,与冰晶繁生速率高值区(约  $5.1 \text{ L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )有很好的对应关系,说明此处的冰晶主要由冰晶繁生形成。对比两图可以很容易地发现,由于冰晶繁生过程的存在,雷暴云内冰晶浓度高值区的范围更广,进而使得雷暴云内总的冰晶数量比无繁生过程时增加了近 15%,有利于雷暴云内起电过程的发生和发展。另外,从图 3c、3d 中可以发现,霰粒子浓度的空间分布,在冰晶繁生过程的作用下略有不同。图 3c 中霰粒子主要聚集于  $Z=13\sim 18$  高度范围内,但是浓度仅为约  $11.1 \text{ L}^{-1}$ 。而图 3d 中,可能是由于冰晶繁生过程的影响,除了雷暴云中上部以外,霰粒子主要聚集于中部  $Z=9\sim 13$  高度处,与冰晶繁生速率较大区域位置基本一致,中心浓度最大值达到  $92.7 \text{ L}^{-1}$ ,是无繁生过程模拟结果的数倍,使得雷暴云内总的霰粒子数较未加入繁生过程时增加约 21%。而且其与雷暴云中上部存在的冰晶浓度高值区位置几乎一致,这有利于雷暴云内非感应起电的发生,通过对比图 4a, 4b, 4c, 4d 也能说明这一点。

图 4a 和 4b 是在 TAK 参数化方案下,霰-冰非感应电荷转移率剖面图。图中的正区,表示霰-冰非感应碰撞后霰粒子带正电,而在负区中则带负电。左边正区的中心高度在  $Z=13$  附近,与图 3c 中霰粒子高值区中心相接近,最大电荷转移率为  $0.63 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。右边负区的中心高度在  $Z=16$ ,冰晶和霰粒子浓度高值区交界处附近,最大电荷转移率为  $7.21 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。再来看图 4b,由于冰晶繁生过程的影响,非感应电荷转移率呈上负下正结构。负区主要位于雷暴云中上部冰晶和霰粒子浓度高值

区重合的部分,中心最大电荷转移率与图 4a 很接近。正区的范围较图 4a 明显增大,其中中心下降至  $-10^{\circ}\text{C}$  层附近的繁生层内,该区域为霰粒子高值区

和冰晶繁生活动强烈的区域,中心最大电荷转移率增加至  $31.58\text{ pC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ,几乎是图 4b 中无繁生过程时的 5 倍。

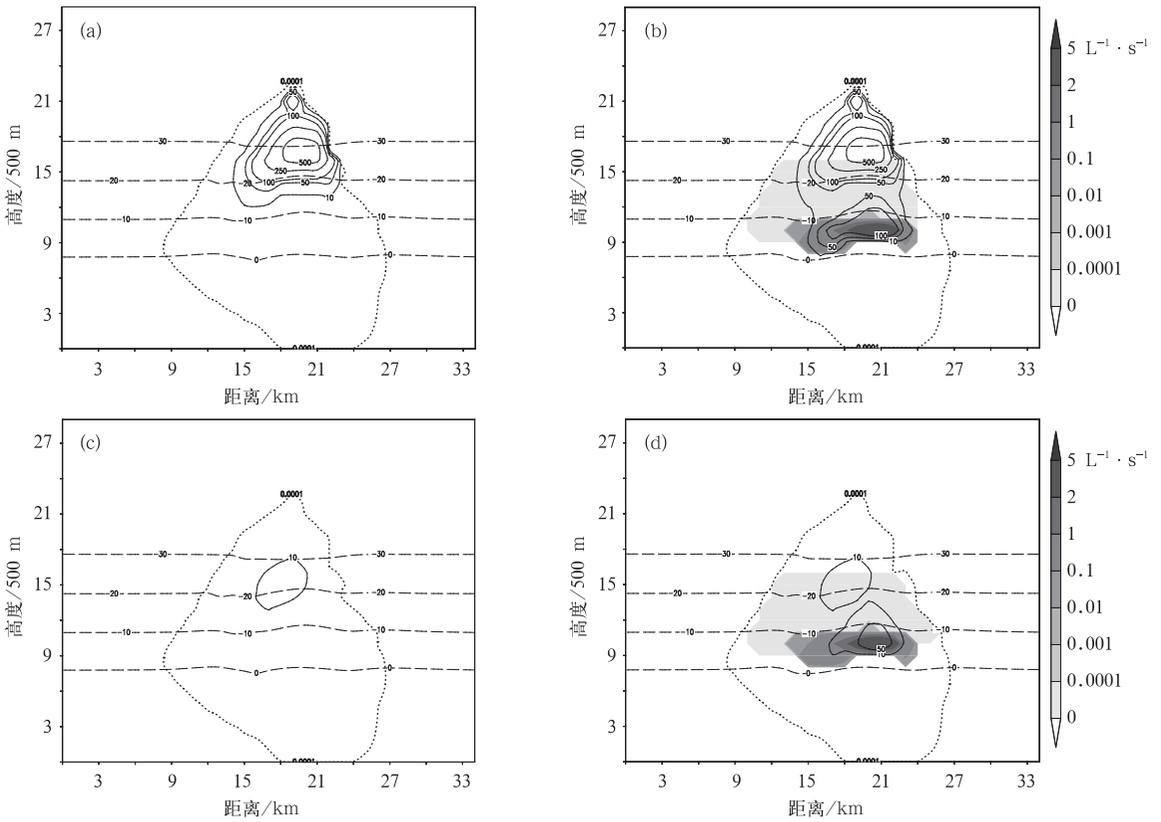


图 3 TAK 方案下,42 min 时沿  $Y=22\text{ km}$  冰晶(a,b)和霰粒子(c,d)浓度空间分布(单位:  $\text{L}^{-1}$ )的 X-Z 剖面图 (a),(c)未考虑冰晶繁生过程冰晶和霰粒子浓度,(b),(d)加入冰晶繁生过程冰晶和霰粒子浓度 (阴影区表示冰晶繁生速率,单位:  $\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,点线表示总含水量为  $0.0001\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的等值线)

Fig. 3 The space distribution of ice and graupel particles based on TAK parameterization in the X-Z plane while  $Y=22\text{ km}$  at 42 min (unit:  $\text{L}^{-1}$ ) (a),(c)without and (b),(d)with multiplication (The shaded shows the ice crystal multiplication rate (unit:  $\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dotted line: the contour of cloud water content  $0.0001\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

未加入冰晶繁生过程时,由于冰晶主要集中在雷暴云中上部  $-20^{\circ}\text{C}$  层以上区域,而霰粒子主要聚集于  $-20^{\circ}\text{C}$  层附近,与冰晶聚集区域的下半部分重合,故从图 4c 中发现,空间电荷浓度大致以  $-20^{\circ}\text{C}$  层为分界线形成上正下负的结构。根据 Takahashi<sup>[9]</sup> 的实验结果,在云水含量高和温度低的区域,冰晶和霰(雹)粒子的碰撞过程使得霰(雹)粒子带负电荷,而冰晶带正电荷。故图 4c 中正区的中心高度在  $-30^{\circ}\text{C}$  附近,最大电荷浓度为  $0.121\text{ nC}\cdot\text{m}^{-3}$ ,主要是由带正电的冰晶构成;而负区则主要位于  $-20^{\circ}\text{C}$  层以下  $Z=9\sim 15$  范围内,主要是由带负

电荷霰粒子构成,中心电荷浓度为  $-0.095\text{ nC}\cdot\text{m}^{-3}$ 。而图 4d 中,空间电荷浓度从上到下呈正负正负四极性结构。最上层的正区位置和强度与图 4c 类似,其下方的负区由于繁生过程的影响,范围明显增大与图 4b 中的负区的位置有很好的对应关系,且强度也有所加强,中心最大电荷浓度为  $-0.875\text{ nC}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是未加入繁生过程时的 10 倍。再往下是一个  $-6^{\circ}\text{C}$  层附近的正区,其在垂直气流的作用下弯曲变成倒“U”型结构,其中心位置也即图 4b 中正区的中心位置,同时与雷暴云中上部霰粒子高值区以及冰晶繁生速率最大的区域相一致,因为该区域内云水

含量较小(图略),故霰粒子在碰撞后带正电。因此该区域内由非感应碰撞后带正电的霰粒子构成,中心最大电荷浓度值为  $1.568 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而由于  $0^\circ\text{C}$

附近位于繁生层下方,由于带负电荷的雨滴的存在而形成负区,中心最大浓度  $-0.662 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

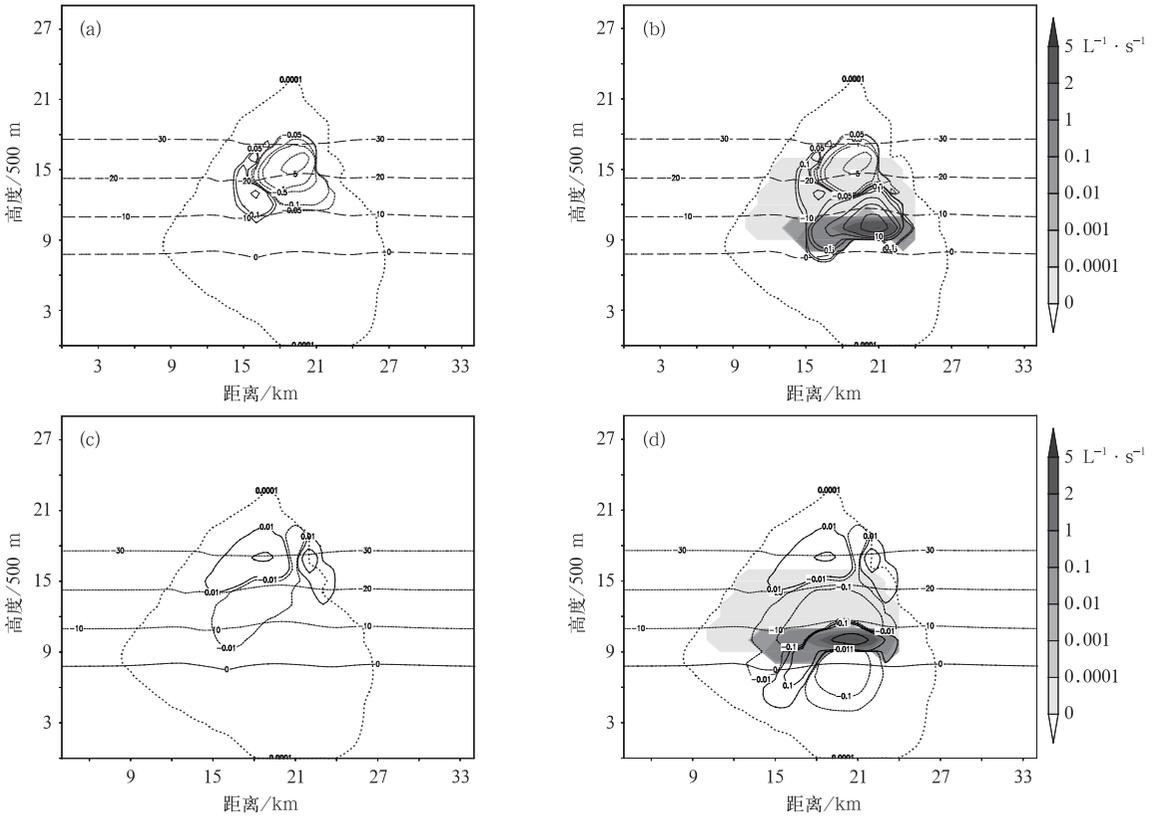


图 4 TAK 方案下,42 min 时(a,b)霰-冰非感应电荷转移率(单位:  $\text{pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )和 (c,d)空间电荷浓度(单位:  $\text{nC} \cdot \text{m}^{-3}$ )沿  $Y=22 \text{ km}$  的  $X-Z$  剖面图

(a),(c)未考虑冰晶繁生过程,(b),(d)加入冰晶繁生过程,实线表示正值,虚线表示负值 (阴影区表示冰晶繁生速率,单位:  $\text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,点线表示总含水量为  $0.0001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的等值线)

Fig. 4 (a),(b) Transfer charge rate of ice-graupel collision (unit:  $\text{pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and (c),(d) space charge concentration based on TAK parameterization along the cross-section of  $X-Z$  at  $Y=22 \text{ km}$  at 42 min (unit:  $\text{nC} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

(a),(c) without and (b),(d) with multiplication; solid line is positive value and dashed line is negative value (The shaded shows the ice crystal multiplication rate (unit:  $\text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Dotted line: the contour of cloud water content  $0.0001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

## 2.2 成熟阶段

图 5 为 54 min 时,沿  $Y=22 \text{ km}$  处冰晶和霰粒子浓度模拟结果的  $X-Z$  剖面图。从图 5a,5b 中可以发现,在  $-10^\circ\text{C}$  层以上均出现一个垂直延伸至云顶,范围很大的冰晶浓度聚集区,中心位于  $Z=20$  左右,中心最大值为  $2192 \text{ L}^{-1}$ 。这些冰晶均由核化作用形成,并在云内上升气流的作用下被带至云顶。而加入了繁生过程后,雷暴云中下部繁生区域内冰

晶的浓度较 42 min 时更大,最大值达到了  $572 \text{ L}^{-1}$ ,使得总的冰晶数量比未加入繁生过程的雷暴云增加了约 18%,且使得冰晶分布区域有所增加。另外,通过对比图 5c,5d 也可以看出,霰粒子的空间分布由于繁生过程的影响,略微有些变化。在两个模拟结果中,54 min 时霰粒子均主要位于雷暴云中上部  $-10^\circ\text{C}$  层以上区域,其中心与雷暴云中上部冰晶浓度高值区中心几乎重合,中心最大浓度分别为:约  $93.8 \text{ L}^{-1}$  和  $90.6 \text{ L}^{-1}$ 。另外,加入了繁生过程,雷

暴云中下部-10 ~ 0℃层之间,冰晶繁生区域范围内,还存在一个小范围的霰粒子聚集区。其中心高值区与冰晶繁生强烈的区域十分接近,最大浓度达到了约 97.2 L<sup>-1</sup>,总的霰粒子数量较未加入繁生过

程时增大了约 17%。由此可见,冰晶繁生过程并不仅仅对冰晶的数浓度和分布位置有影响,而且对于霰粒子的浓度和分布位置的影响也相当的显著。

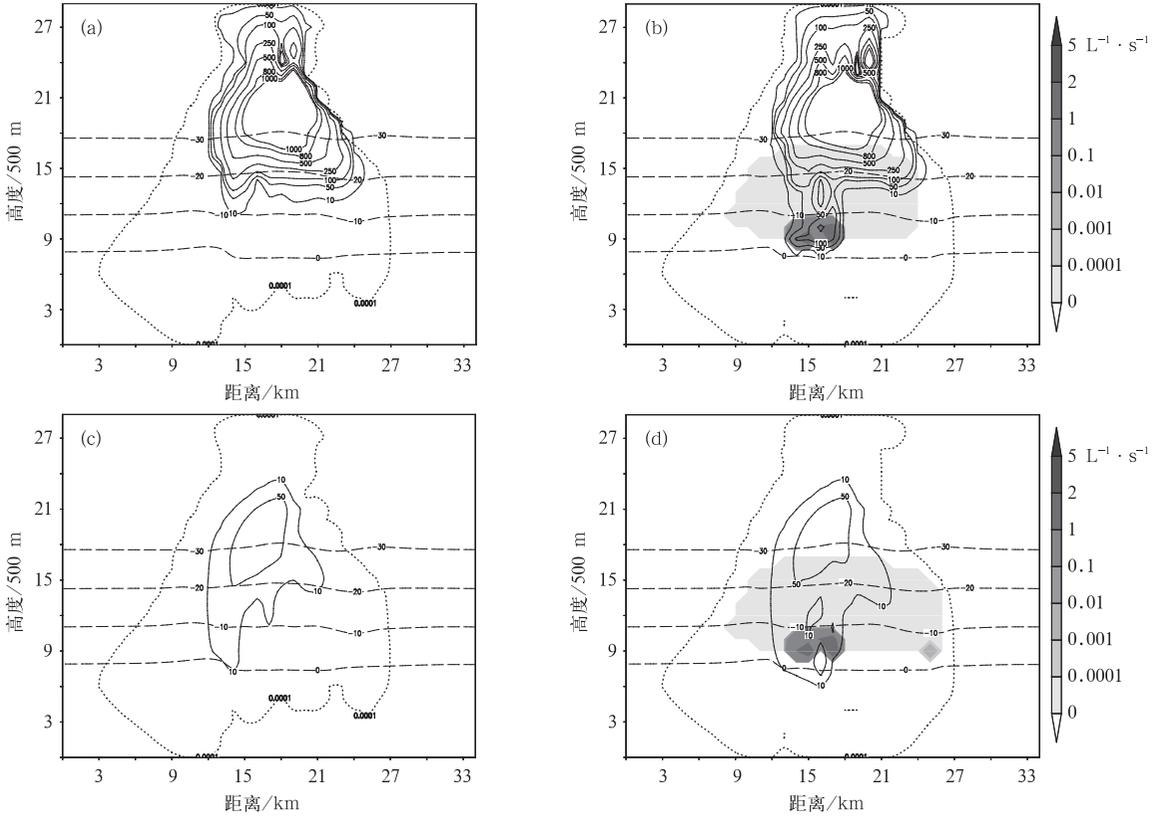


图 5 情况同图 3,时间为 54 min  
Fig. 5 The same as Fig. 3, but at 54 min

图 6a,6b 是 54 min 时, Y=22 km 处非感应电荷转移率的剖面图。未加入冰晶繁生过程时,非感应电荷转移率从左往右呈正负正结构,见图 6a。两个正区均位于 Z=14,霰粒子浓度高值区中心附近(浓度均大于 10 L<sup>-1</sup>),中心最大非感应电荷转移率分别为 14.22 和 51.34 pC · m<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup>。而负区中心则位于-30℃层附近,冰晶与霰粒子高值区重合的区域,这里温度较低故霰粒子在碰撞后带负电,中心最大非感应电荷转移率为-8.76 pC · m<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup>。而图 6b 中可以发现,非感应电荷转移率也呈从左往右的正负正结构,但是左边正区明显向下延伸且强度加强,中间的负区范围明显减小。左边的正区整体高度有所下降,其中心位置则位于 Z=10 高度,冰晶繁生强烈的区域。这里云水含量较少,也是霰粒子的另一个高值区,最大非感应电荷转移率为 50.87 pC · m<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup>。中间的负区则位于冰晶

和霰粒子浓度高值区,这里温度较低的区域,中心最大非感应电荷转移率为-8.32 pC · m<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup>,故霰粒子在碰撞后带负电。而右边的正区则位于冰晶高值区的下边缘,霰粒子浓度较大的区域,温度介于-30~-13℃之间,但是云水含量比较大,故形成正区,最大非感应电荷转移率为 53.95 pC · m<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup>。综合图 4a,4b 以及图 6a,6b 的结果可以发现,在 TAK 参数化方案下,霰-冰非感应电荷转移率的正区均位于霰粒子浓度高值区中心附近,而负区则位于冰晶和霰粒子浓度高值区重合区域,这与郭凤霞等<sup>[28]</sup>的结论相类似。

从图 6c 中可以看到,54 min 时未加入繁生过程的模拟结果中,从上到下空间电荷结构总体上呈正负正结构。但由于 54 min 属于雷暴云的成熟阶段,其内部的上升气流和水平风场的强度仍然较大,受到这些因素的影响,空间电荷结构变得较为复杂。

在雷暴云的中上部,仍是主要由大量冰晶所形成的正区,范围和中心最大浓度较之前一阶段有所增大,达  $0.331 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。顶层正区下方  $-30 \sim 0^\circ\text{C}$  范围内,为雷暴云对流较强区域,云水含量相对较低(图略),碰撞后冰晶带负电而霰粒子带正电,该范围内冰晶的浓度较高,且云内带负电的霰粒子在该区域区域形成一个形状不规则,倾斜的负电荷区,最大电荷浓度为  $-2.815 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其右侧的正电荷区则主要由带正电的霰粒子组成,并在下沉气流的影响下向雷暴云下部延伸,中心最大电荷浓度为  $2.333 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而图 6d 中空间电荷结构从上到下,大致呈现的是如图 4d 中的四极性结构。其中  $-30^\circ\text{C}$  层以上仍主要是由冰晶构成的正电荷区,中心最大电

荷浓度也与图 6d 较为接近,为  $0.329 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雷暴云中部  $-30 \sim 0^\circ\text{C}$  范围内为冰晶繁生层,云水含量相对较小,碰撞后霰粒子带正电,冰晶带负电。在  $-30 \sim -10^\circ\text{C}$  层内,冰晶粒子浓度较大,故形成一负区,中心高度位于  $-20^\circ\text{C}$  层附近,电荷浓度为  $-1.476 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而直径较大且分布高度较低的霰粒子,则构成了该层下方的主正电荷区,中心最大浓度达  $3.170 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ ,比图 6c 的值稍大,且主正区的位置分布与霰粒子聚集区以及繁生速率较大的区域十分接近。 $-10^\circ\text{C}$  层以下为范围较大的负区,其主要由带负电的冰晶和雨滴构成,中心高度较低,最大电荷浓度值为  $-2.126 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

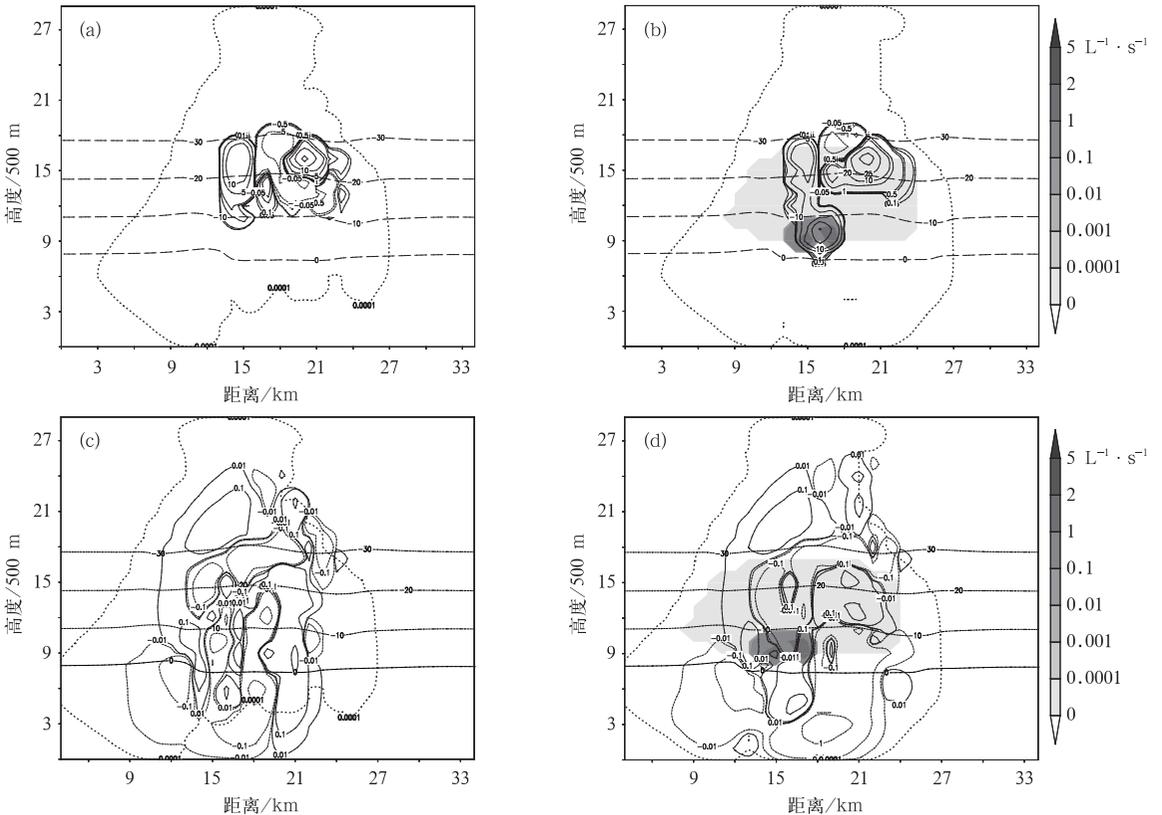


图 6 情况同图 4,时间为 54 min

Fig. 6 The same as Fig. 4, but at 54 min

## 2.4 垂直电场随时间的变化

为了进一步说明繁生过程对非感应起电的影响,将模式中  $39 \sim 51 \text{ min}$  的垂直电场的模拟结果,列于表 1。从表中可以看出,无论繁生过程存在与否,垂直电场总体上呈增加的趋势。表 1 中,在雷暴

云的发展阶段(42 min 时),无繁生过程的模拟结果中,正负垂直电场的最大值分别为  $1.18$  和  $-0.78 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而加入了繁生过程的正负最大垂直电场值则分别为  $44.49$  和  $-32.18 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,两者相差数十倍。与 42 min 时有繁生过程中,冰晶以及霰粒子数量较无繁生过程中的增大不少相对应。而对

比其他时刻正负垂直电场的结果,也能看出,加入了繁生过程的雷暴云中,无论正或负垂直电场均比未加入繁生过程的雷暴云,约增大数倍至数十倍。另外,39 min 时有繁生过程的正负最大垂直电场值则分别为 15.25 和  $-4.21 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,而未加入繁生过程时要达到与这接近的数值,则要到 45 min 左右,晚了将近 6 min。

通过表 1 的数据可以看出,冰晶繁生过程的加入,使得雷暴云内,较强垂直电场值的出现,较未加入繁生过程时提前约 5~6 min。而且雷暴云内垂

直电场明显比未加入繁生过程时要大。这些都间接证明了冰晶繁生过程的加入,对雷暴云中的非感应起电过程有促进作用。本文中为了突出冰晶繁生对非感应起电的影响,在进行模拟时仅考虑了冰晶繁生起电与非感应起电机理,而其他的一些较为重要的起电机理,如:感应起电、离子扩散起电以及离子电导起电机理等,都未加入到模式中。因此得出的电场值偏小,这间接表明感应起电机理在雷暴云前期电场发展的重要性。

表 1 模拟的不同时刻无繁生过程和有繁生过程的最大垂直电场

Table 1 The simulated maximum vertical electric fields without and with multiplication in different time

时间/min	39	42	45	48	51
无繁生垂直电场/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ;正	0.06	1.18	10.94	25.16	45.16
无繁生垂直电场/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ;负	-0.03	-0.78	-11.61	-24.42	-43.98
有繁生垂直电场/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ;正	15.25	43.49	63.34	74.20	88.64
有繁生垂直电场/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ;负	-4.21	-32.18	-44.17	-51.09	-57.87

### 3 结果与讨论

本文通过对比分析三维雷暴云模式中有冰晶繁生过程和无冰晶繁生过程的模拟结果,初步探讨了在给定一个上干下湿理想温湿层结环境下,冰晶繁生对雷暴云中非感应起电过程的影响。初步结果如下:

(1) 在雷暴云发展和成熟阶段,由于冰晶繁生过程的加入,直接影响了雷暴云中冰晶和霰粒子浓度和分布位置,使得云内冰晶总数较无繁生过程存在时,增大约 15%~18%,且冰晶浓度高值区范围更大;另外,繁生过程对霰粒子的浓度和分布位置也有类似的影响,云内霰粒子总数较无繁生过程存在时,增大约 20%;

(2) 冰晶繁生过程,使得 42 min 时,非感应电荷转移速率较未加入繁生过程时要大,并且非感应电荷转移率正区一般位于霰粒子浓度高值区附近,而负区位于冰晶和霰粒子浓度高值区重合区域附近;

(3) 繁生过程的加入,使得雷暴云内垂直电场值均比未加入繁生过程时要大,且较强的垂直电场值出现的时间提前约 5~6 min。

本文所使用的探空资料为一假设的理想情况,可能会使得模式的输出结果较使用其他探空资料更

明显,故今后计划利用有雷暴过程的真实探空资料作为背景场,来模拟和检验模式的模拟效果;另外本文所使用的模式仍有些不够完善的地方,这些都有待于在今后的工作中加以补充和完善。

### 参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [2] 刘恒毅, 董万胜, 王涛, 等. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别[J]. 气象, 2009, 35(3): 49-59.
- [3] 冯桂力, 王俊, 牟容, 等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 68-74.
- [4] 李家启, 王劲松, 申双和, 等. 基于 ADTD 系统监测的雷电流幅值累积概率特征分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 226-231.
- [5] 陈双, 王迎春, 张文龙, 等. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. 气象, 2011, 37(7): 802-813.
- [6] 张霞, 王新敏, 王全周, 等. 郑州雷电发生的环境场特征及潜势预报[J]. 气象, 2010, 36(6): 95-100.
- [7] Kuettner J P, Sartor J D, Levin Z, et al. Thunderstorm electrification - Inductive or non-inductive[J]. J Atmos Sci, 1981, 38: 2470-2484.
- [8] Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm[J]. J Geophys Res, 1991, 96: 12833-12855.
- [9] Takahashi T. Riming electrification of charge generation mechanism in thunderstorms[J]. J Atmos Sci, 1978, 35: 1536-1548.
- [10] Jayaratne R, Saunders C, Hallett J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1983, 109: 609-630.

- [11] Brooks I M, Saunders C P R, Mitzeva R P, et al. The effect on thunderstorm charging of the rate of rime accretion by graupel [J]. *Atmos Rea*, 1997,43:277-295.
- [12] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. *J Geophys Res*, 1991,96:11007-11017.
- [13] Dye J E, Jones J J, Winn W P, et al. Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana cumulonimbus [J]. *J Geophys Res*, 1986,91: 1231-1247.
- [14] Hobbs P V, Radke L T. Res Rept. No. VIII[R]. Cloud Physics Group, Dept of Atmos Sci, University of Washington, 1974.
- [15] Pruppacher H R, Klett J D. *Microphysics of Clouds and Precipitation (Edit 2nd)* [M]. D Reidel Publishing Company, 1997:355-697.
- [16] Cantrell W, Heymsfield A. Production of ice in tropospheric clouds: A review[J]. *Amer Meteor Soc*, 2005,86:795-807.
- [17] Hallett J, Saunders C P R. Charge separation associated with secondary ice crystal production[J]. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 2230-2235.
- [18] 孔凡铀,黄美元,徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (I) 模式建立及冷云参数化[J]. *大气科学*, 1990,14 (4): 441-453.
- [19] 孔凡铀,黄美元,徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (II) 繁生过程作用[J]. *大气科学*, 1991, 6:78-88.
- [20] 言穆弘,郭昌明,李贞和,等. 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*, 1996,39:52-64.
- [21] 言穆弘,郭昌明,李贞和,等. 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*, 1996, 39:65-77.
- [22] 许焕斌,段英,刘海月. *雷云物理与防雷的原理和设计* [M]. 北京: 气象出版社, 2004:100-147.
- [23] 冯桂力. 强对流天气的闪电特征及其与动力和降水结构关系的研究[D]. 中国科学院博士论文, 2008.
- [24] Hallett J, Mossop S C. Production of secondary ice particles during the riming process[J]. *Nature*, 1974;249.
- [25] Mansell E R, MacGorman D, Ziegler C L, et al. Simulated three dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(D9):4075, doi: 10. 1029/2000JD000244.
- [26] 许爱华,李玉塔,郑婧,等. 两次致灾雷电天气过程对比分析[J]. *气象*, 2008,34(4):71-79.
- [27] 许焕斌. *人工影响天气现状与展望(李大山主编)* [M]. 北京: 气象出版社, 2002:251-324.
- [28] 郭凤霞,张义军,言穆弘. 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*, 2010,34(2):361-373.