

# 强风暴电过程对霰粒子含量和谱分布影响的数值模拟研究<sup>\*1</sup>

周志敏<sup>1,2,3</sup> 郭学良<sup>2,4</sup> 崔春光<sup>1</sup> 李兴宇<sup>2</sup> 徐桂荣<sup>1</sup> 赵玉春<sup>1</sup>

ZHOU Zhimin<sup>1,2,3</sup> GUO Xueliang<sup>2,4</sup> CUI Chunguang<sup>1</sup> LI Xingyu<sup>2</sup> XU Guirong<sup>1</sup> ZHAO Yuchun<sup>1</sup>

1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉, 430074
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029
3. 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京, 100081
4. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

1. *Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China*

2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3. *Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2009-09-23 收稿, 2011-03-17 改回.

**Zhou Zhimin, Guo Xueliang, Cui Chunguang, Li Xingyu, Xu Guirong, Zhao Yuchun. 2011. A simulative study of the influence of electric processes on the content and the size distribution of graupel in a severe thunderstorm. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(5): 830-846**

**Abstract** A three-dimensional hail-bin cloud model coupled with electrification process was developed and used for simulating influences of electric processes on water content and number density of graupel (considering the effect of electric fields on hydrometeors through electric field force) in a severe thunderstorm in Beijing City in China. The results show that: (1) The water content of relatively smaller-size graupel is influenced more by the electric processes, which may later have an indirect effect on the content of relatively bigger-size graupel. In the center areas of graupel content, the electric field is not maximum or minimum, whose influences on the graupel with larger-size and the maximum graupel content ( $Q_{gMax}$ ) are relatively less. Therefore, little changes occur in the time evolution of  $Q_{gMax}$ . (2) On the whole, in the model domain, the influence of electric process on microphysical processes, which will influence the number density of graupel, is different in different regions; where the electric field is stronger, the influence of electric process on the graupel with smaller-size is more direct than that with larger-size. The influence of electric processes on the size distribution of graupel is less at areas where electric field is weaker. (3) In the process of formation and development of graupel, electric processes show no influence on the position of the maximum cloud water content, and the position has important influence on accretion of graupel. Therefore, the formation and distribution of graupel would not be highly influenced by electric processes. Although the size distribution of graupel changes a little, the position of the maximum graupel content does not change notably. Therefore, electric processes are able to influence the total quantity and the region of hail-fall, but not notably.

**Key words** 3D hail-bin cloud model, Electric process, Graupel content and size distribution

\* 资助课题: 中国气象局云雾物理重点实验室开放基金项目(2009005)、中国气象局武汉暴雨研究所开放基金项目(IHR2008G07)、国家自然科学基金项目(40805055, 40975025, 41075038)。

作者简介: 周志敏, 主要从事云降水物理、大气电学及暴雨研究。E-mail: zmzhou@mail.iap.ac.cn

通讯作者: 郭学良, 从事云降水物理研究。E-mail: guoxl@cma.gov.cn

**摘要** 利用建立的耦合电过程三维冰粒子分档模式(通过引入电场力来考虑电场对粒子的影响),模拟研究了北京一次强雷暴发展过程中电过程对霰粒子含量、数浓度的影响。结果发现:(1)相对小的霰粒子含量受电过程直接影响较大,这种影响累积后,会对相对较大的霰粒子含量产生间接作用。在冰雹发展的初期和成熟期的部分阶段,电场对霰粒子最大含量所处空间位置基本没有影响。而在冰雹发展的成熟期向衰败期过渡时的部分时刻,电场对其稍有影响。在霰粒子最大含量处,直径相对较大的霰粒子决定着总的霰粒子含量。(2)总体来说,直径较小的霰粒子数浓度受电场影响较大,直径较大的霰粒子数浓度受电场影响较小。由于霰粒子含量中心大直径粒子较多,而其受电场的影响相对较小,并且该处电场也小于电场极值,故其最大含量受电场影响相对较小。所以,在此次个例的模拟过程中,霰粒子最大含量的时变曲线变化很小。(3)考虑电过程情况下,在霰粒子数浓度最大处,小直径霰粒子数浓度要么增加,要么略微减少,而大直径霰粒子要么进档增长受阻,要么数浓度减少。对不同直径的霰粒子来说,电过程既有可能使其数浓度增加,又有可能使其数浓度减少。当电场较大时,电过程对小直径霰粒子的影响比较直接,而对大直径霰粒子的影响相对间接;当电场较小时,电过程对霰粒子的谱分布影响相对较小。

**关键词** 三维冰雹云冰晶粒子分档模式,电过程,霰粒子含量和谱分布

**中图法分类号** P427

## 1 引言

20世纪70年代以后,冰雹云数值模式开始出现。Wisner等(1972)、Kachurin等(1974)、Takahashi(1976)及许焕斌等(1985,1988,1990)、孔繁铀(1990,1991)、洪延超(1998)、郭学良等(2001a,2001b)都建立了不同的冰雹云模式,对一些个例进行了模拟研究,并模拟得出了一些强风暴云中的霰(雹)生长特征。随着雷暴云起电、放电观测及参数化的发展,研究者在大部分冰雹云模式中加入了电过程。如Takahashi(1978)在其模式中讨论了非感应起电对电过程的重要性,孙安平等(2004)、张义军等(2004)及郭凤霞等(2004)、侯团结(2007)在孔繁铀(1990,1991)建立的冰雹云模式中讨论了电过程的不同特性,冯桂力(2008)也在许焕斌等(1990)的模式中加入了电过程,研究了强对流天气的闪电特征及其与动力过程和降水结构的关系。Rawlins(1982)和Takahashi(1978)的研究表明,当雷暴云发展比较旺盛时,在电场较强的局部区域,降水粒子所受电场力和重力为同量级,此时降水粒子在云内下落时除了受到自身重力和拖曳力的控制外,电场力也起着重要作用。因此,降水粒子的下落末速度将受到某种程度的改变。Gay等(1974)通过试验和理论计算发现,对半径为1.5 mm的降水粒子,当其携带-160 pC的电量时,在100 kV/m的垂直电场内,其下落末速度将改变0.6 m/s左右。Beard等(1980)在该研究结果的基础上,考虑了降水粒子在下落过程中因形变而引起的下落末速度的变化。结果发现,对于300  $\mu\text{m}$ 半径的粒子,在100 kV/m的

电场中,其下降速度增加了8%。

孙安平等(2004)利用三维强风暴动力-电耦合模式模拟计算强风暴中电过程对动力发展的影响。发现电场力直接影响雷暴中微物理过程,尤其是水成物粒子的降落末速度,从而在云体成熟阶段对雷暴发展有较大影响。张义军等(2004)利用同样的模式模拟了在风暴演变过程中,电活动对冰雹增长及地面降雹的影响。指出带电冰雹与云内强电场作用使得地面降雹量增加约50%,雹块直径增大0.7 mm,降雹时间滞后约3 min。并发现强电场通过对水成物下落末速度的作用来影响冰雹的微观增长过程,即主要是影响碰并过程和冰雹融化过程。电活动使冰雹源和汇总量都减少,但汇总量减少更多,致使冰雹总量增加,数目减少,冰雹长得更大,更易降落到地面。但是,由于张义军等(2004)在模式中只讨论起电时段的影响,通过增大时空平滑人为限制了电场最大值,所以,模式中最大电场仅为16 kV/m。

以往考虑电过程的冰雹云模式大都采用“体积水”方案,无法对霰(雹)粒子的谱分布变化进行详细分析。在冰粒子分档模式中加入电过程,则可对该问题进行初步讨论。本文利用建立的模式,对2001年8月23日(北京时,下同)发生在北京的一次典型雷暴过程,在引入和不引入电过程(通过引入电场力来考虑电场对粒子的影响)两种情况下进行霰粒子特性对比,主要从霰粒子最大含水量和数浓度等方面进行分析。在分析过程中,不对电场进行人为限制,而是在电场达到阈值后就引入放电过程,使其自然变化。

## 2 模式描述

数值模式以中国科学院大气物理研究所三维强风暴冰雹分档模式(郭学良 2001a, 2001b)为基础,在模式中建立了起电和放电过程,把云物理过程与电过程进行耦合,研究强风暴的电荷结构形成机理。

模式中包含感应和非感应起电过程,其中,感应起电过程采用 Chiu(1978)参数化方案,考虑云水和霰之间的电荷转移。非感应起电过程采用 Takahashi(1978, 1984)参数化方案(简称 TAK 方案),考虑冰晶、雪团和霰之间的电荷转移。在水成物电荷浓度源汇项中,增加除碰撞以外的质量变化而导致的电荷转移,目前,没有考虑与水汽相关的微物理过程,转移的电荷与水成物表面积成正比。

在一般的积云环境中,各种水成物粒子主要受重力和空气阻力的作用,而忽略了电场力对云滴和冰晶下落末速度的影响。但在强电场环境中,必须考虑电场力对各种粒子的作用。

在下面的公式中,下标  $x$  表示水成物类别。对云滴和冰晶,当可以忽略重力作用且粒子所受斯托克斯阻力和电场力平衡时,粒子的下落末速度为

$$v_x = \frac{q_{ex} E_z}{6\pi\rho_w r_x \gamma} \quad (1)$$

其中,  $q_{ex}$  表示单个水成物粒子的荷电量(C),  $E_z$  表示垂直电场(V/m),  $\rho_w$  为液态水密度( $\text{kg/m}^3$ ),  $r_x$  为水成物半径(m),  $\gamma$  为动力学粘性系数。

对雨滴、雪粒子和霰粒子,当重力、斯托克斯阻力和电场力达到平衡时,单个粒子满足方程

$$\frac{1}{2}\pi r_x^2 C_D \rho_a v_x^2 = \frac{4}{3}\pi r_x^3 g (\rho_w - \rho_a) + q_x E_z \quad (2)$$

其中,  $C_D$  为拖曳阻力系数,  $\rho_a$  为空气密度,  $g$  为重力加速度,  $q_x$  表示单个水成物粒子的质量(kg)。

对以上方程求解则得

$$v_x = \left( \frac{8\pi r_x g (\rho_w - \rho_a)}{3\pi C_D \rho_a} + \frac{2q_x E_z}{\pi r_x^2 C_D \rho_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

以上处理方法和孙安平等(2002)相同,其他起电及放电过程处理详见文献(孙安平等, 2002; 周志敏等, 2009)。

模式的水平范围为  $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$ , 网格距  $1 \text{ km}$ , 垂直范围  $19 \text{ km}$ , 格距  $0.5 \text{ km}$ 。采用热泡启动, 扰动中心在模拟区域中心, 扰动半径为  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ , 扰动高度为  $2 \text{ km}$ , 最大扰动位温为  $1.5 \text{ K}$ 。

大时间步长为  $5 \text{ s}$ , 小时间步长为  $0.125 \text{ s}$ , 积分时间为  $80 \text{ min}$ 。

所用探空资料能够较好地代表强风暴的环境层结条件(付丹红等, 2003)。

## 3 结果分析

### 3.1 整个模拟过程中垂直电场极值的变化

从垂直电场的极值随时间的变化(图 1)可以看到,在此个例的发展过程中,  $t = 11 \text{ min}$  时,霰粒子开始形成,首次放电的时间为  $t = 16.5 \text{ min}$ 。霰粒子形成以后,首次放电前,正负电场迅速增加。而首次放电以后,电场变化比较剧烈。由于放电的原因,在  $18\text{--}20 \text{ min}$ ,正电场从  $80$  降到  $40 \text{ kV/m}$ ,负电场从  $-115$  降到  $-70 \text{ kV/m}$ 。而随非感应起电过程发展使电荷重新积聚,电场又重新开始增大,增大到一定程度又开始重新放电。  $t = 46 \text{ min}$  时,负电场达到极值,为  $-121 \text{ kV/m}$ 。2 min 以后,正电场也达到了极值,为  $115 \text{ kV/m}$ 。  $t = 50 \text{ min}$  以后,正负电场极值的减小比较缓慢,与  $18\text{--}40 \text{ min}$  阶段电场变化的剧烈形成鲜明对比。由于此时上升气流衰减很大,水成物都下落到了较低的高度,正负电荷区域高度也随之降低。尽管此时的正负电场值都比较大,但产生放电所需要的电场阈值也增大。因此,  $t = 50 \text{ min}$  后电场的减弱主要由降水粒子不断将电荷带到地面而产生。

起电和放电对水成物的影响,最终将通过电场来体现。正、负垂直电场经历了剧烈变化和平缓变

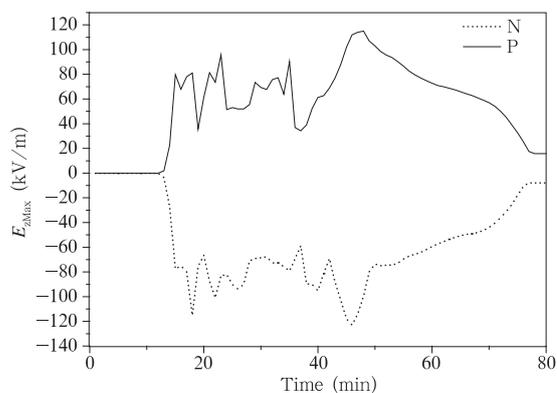


图 1 垂直电场极值  $E_{z\text{Max}}$  随时间变化曲线  
(N 表示负电场, P 表示正电场)

Fig. 1 Temporal changes in the maximum and minimum vertical electric field  
(N is for negative and P is for positive)

化两个阶段。

### 3.2 电过程对霰粒子含量的影响

#### 3.2.1 电过程对不同直径范围霰粒子含量的影响

根据霰粒子直径  $D$  的大小,将其分为  $D < 1$  mm、 $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm 及  $D > 5$  mm 3类。本文比较了考虑电过程和不考虑电过程情况下,不同大小

的霰粒子含量的差异,给出考虑电过程后不同直径的霰粒子含量增量与未考虑电过程时霰粒子含量比值随时间变化(图2)。整个模拟中,在电场作用下, $D < 1$  mm的霰粒子总含量增加0.82%, $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm的霰粒子总含量增加0.46%, $D > 5$  mm的霰粒子总含量增加0.33%。说明小直径霰粒子所

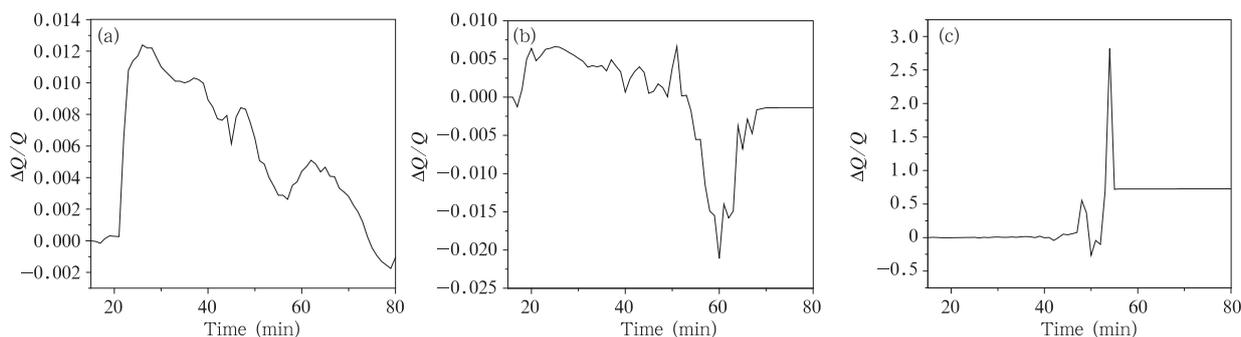


图2 考虑电过程后不同直径  $D$  的霰粒子含量增量  $\Delta Q$  与未考虑电过程时霰粒子含量  $Q$  比值随时间的变化 (a.  $D < 1$  mm, b.  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm, c.  $D > 5$  mm)

Fig. 2 Temporal changes in the ratio between the increment of graupel content ( $\Delta Q$ ) with electric processes and the graupel content ( $Q$ ) without electric processes: (a)  $D < 1$  mm, (b)  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm, (c)  $D > 5$  mm

受电场直接影响更大,但增加量并不明显。

从图2a可以看出, $D < 1$  mm的霰粒子含量在整个变化过程中主要呈增加趋势,而总体趋势则是增加逐渐放缓,增加的比值最大值不超过0.014,即增加不太明显。而图2b中, $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm霰粒子质量在51 min以前主要呈增加趋势,从第52分钟开始,霰粒子质量开始减少,并且,在第60分钟时减少最多,此时减少的霰粒子质量与不考虑电过程时的霰粒子质量比值约为0.02,此后,霰粒子的减少速度开始放缓,其总体变化也不太明显。图2c中, $D > 5$  mm的霰粒子质量在第54分钟发生的变化最大,增加的霰粒子含量约是未考虑电过程时含量的3倍。从第55分钟开始,该增量稳定在0.72倍左右。在本文中, $D > 5$  mm的霰粒子对应的是第13、14和15档,分别为5.11、7.10、9.85 mm。通过对比该3档霰粒子含量的时变曲线(图略)发现,第13档霰粒子含量的时变曲线和图2c基本上相同,而第14档和第15档霰粒子含量的变化同第13档相比,所起的作用较小,可以忽略不计。

尽管图2c中时变曲线的极值较大,但是其持续时间并不长,这也说明电过程对相对较小的霰粒子进行作用后,会对相对较大的霰粒子有一个累积的影响。

在分档模式中,霰粒子源项的主要贡献因子为霰粒子对云滴的碰并搜集(CLcg),冰雹对雨水的搜

集增长(CLrg,在本个例中,该物理量量级较小,文中不再考虑),过冷雨滴的冻结形成霰(FRrg)以及雨滴的异质核化(NUrg);汇项的主要因子则为霰粒子的融化(MLgr),霰粒子的升华(VDgv)等。

表1 电过程对不同直径范围霰粒子不同微物理过程产生的增量(k t)

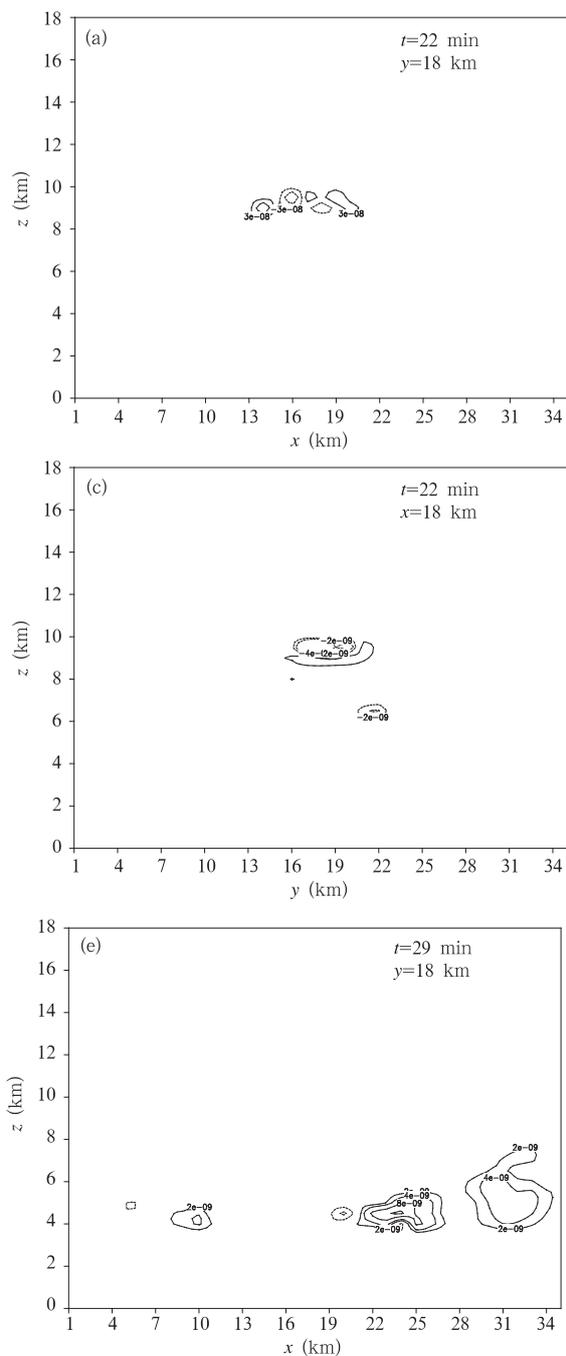
Table 1 The increment of the various microphysical processes for the different size of graupel caused by electric processes (unit: kt)

直径	NUrg	VDgv	CLcg	MLgr	FRrg
$D > 5$ mm	0.733	0.003	0.042	0.335	7.02
$1 \text{ mm} \leq D \leq 5$ mm	2.017	0.422	0.215	-9.14	11.9
$D < 1$ mm	0.40	0.14	0.145	0.50	1.10
总计	3.15	0.565	0.402	-8.305	20.02

表1为考虑电过程后上述物理量的增量变化(直接用表示微物理过程的符号表示增量)。可以看出, $D < 1$  mm的霰粒子,电过程增大了所有影响其生长的微物理量,FRrg所受的影响最大,为1.1 kt。MLgr所受影响次之,VDgv和CLcg增量大体相等。总的来说,这些微物理过程所受电过程影响而导致的的质量变化量级相当。源项增加大于汇项,所以,该直径范围霰粒子含量增加; $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm的霰粒子,电过程除了使MLgr总量减少9.14 kt外,其他量都增加。FRrg依然变化明显,增加了11.9 kt,而VDgv和CLcg量级相对较小,分别为

0.422和0.215 kt。该直径范围霰粒子源项增加,而汇项减少,因此,导致霰粒子含量也增加。 $D > 5$  mm的霰粒子,电过程依然使所有影响霰粒子增长的微物理量增加,FRrg明显增加,为7.02 kt,NUrg值增加0.733 kt,CLcg增加0.042 kt,比NUrg小1个量级,比FRrg则小2个量级。和该直径范围霰粒子一样,霰粒子源项增加大于汇项,因此,含量也增加。

由于本模式中霰粒子的质量和直径的3次方成



正比,尽管 $D < 1$  mm的霰粒子增量小于其他直径范围霰粒子,但对其本身变化已经比较大(和不考虑电过程比较,增加最明显)。

虽然从表1的数据上看,电过程对不同直径范围的微物理过程源汇项总量基本上都是增加为主,但实际上,在每一个时刻,不同空间位置、不同直径霰粒子的不同源汇项均有增有减。

从考虑电过程后 $D < 1$  mm的霰粒子源、汇项增量变化(图3)可以看出,第22分钟时NUrg增量

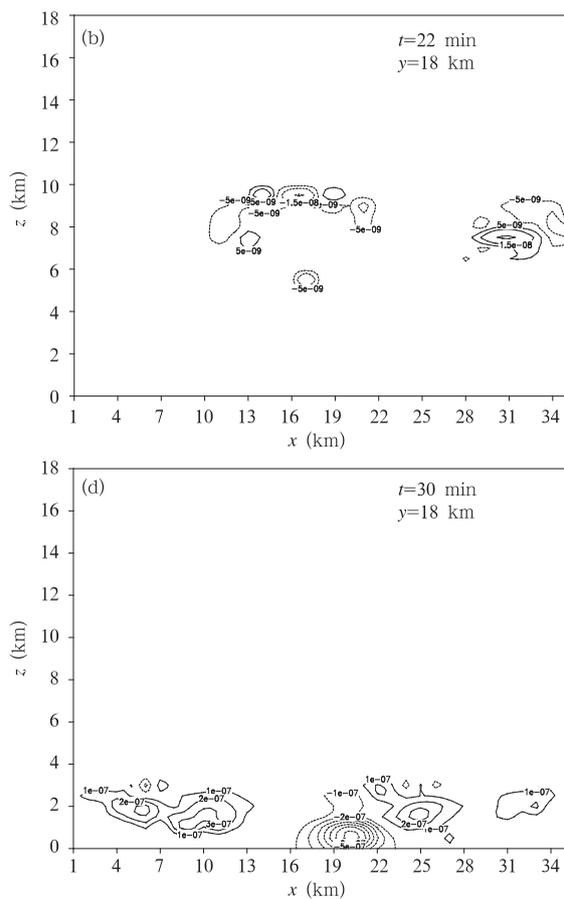


图3 电过程作用下 $D < 1$  mm霰粒子相关的微物理过程在垂直剖面上的变化量

(a. NUrg, b. CLcg, c. FRrg, d. MLgr, e. VDgv; 单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Fig. 3 Vertical section of the increase of the various microphysical processes for the graupel with  $D < 1$  mm caused by electric processes

(a. NUrg, b. CLcg, c. FRrg, d. MLgr, e. VDgv; unit:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

(图 3a)在  $y = 18 \text{ km}$  的垂直剖面上呈正负交替分布,其极值分别为  $-1.8 \times 10^{-7}$  和  $1.8 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ 。同时刻同样垂直剖面上,CLcg 增量(图 3b)也是交替分布,其极值量级比 NUrg 小,分别为  $-4 \times 10^{-8}$  和  $4 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。该物理量增量出现负值,说明电作用并不仅仅是增强霰粒子与云滴之间的碰撞系数,也有可能使其减小。CLcg 增量负值区域表明,该区域的霰粒子与云滴间碰撞效率减小。第 22 分钟在  $x = 18 \text{ km}$  的垂直剖面上 FRrg

增量(图 3c)分布表明,正负值区域范围大体相当,极值分别为  $-1.6 \times 10^{-8}$  和  $0.6 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ ,与 CLcg 增量相当。第 30 分钟时,小直径霰粒子在零度层以下融化增量的分布(图 3d)表明,在  $x = 16 \text{ km}$  至  $x = 24 \text{ km}$  范围,电作用导致 MLgr 明显减少,其极值分别为  $-8 \times 10^{-7}$  和  $4 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ 。小直径霰粒子的升华变化(图 3e)说明,此时该剖面上 VDgv 以增加为主,只在小范围存在减少现象,变化量级也较小,极值分别为  $-0.6 \times 10^{-8}$  和  $1.4 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。

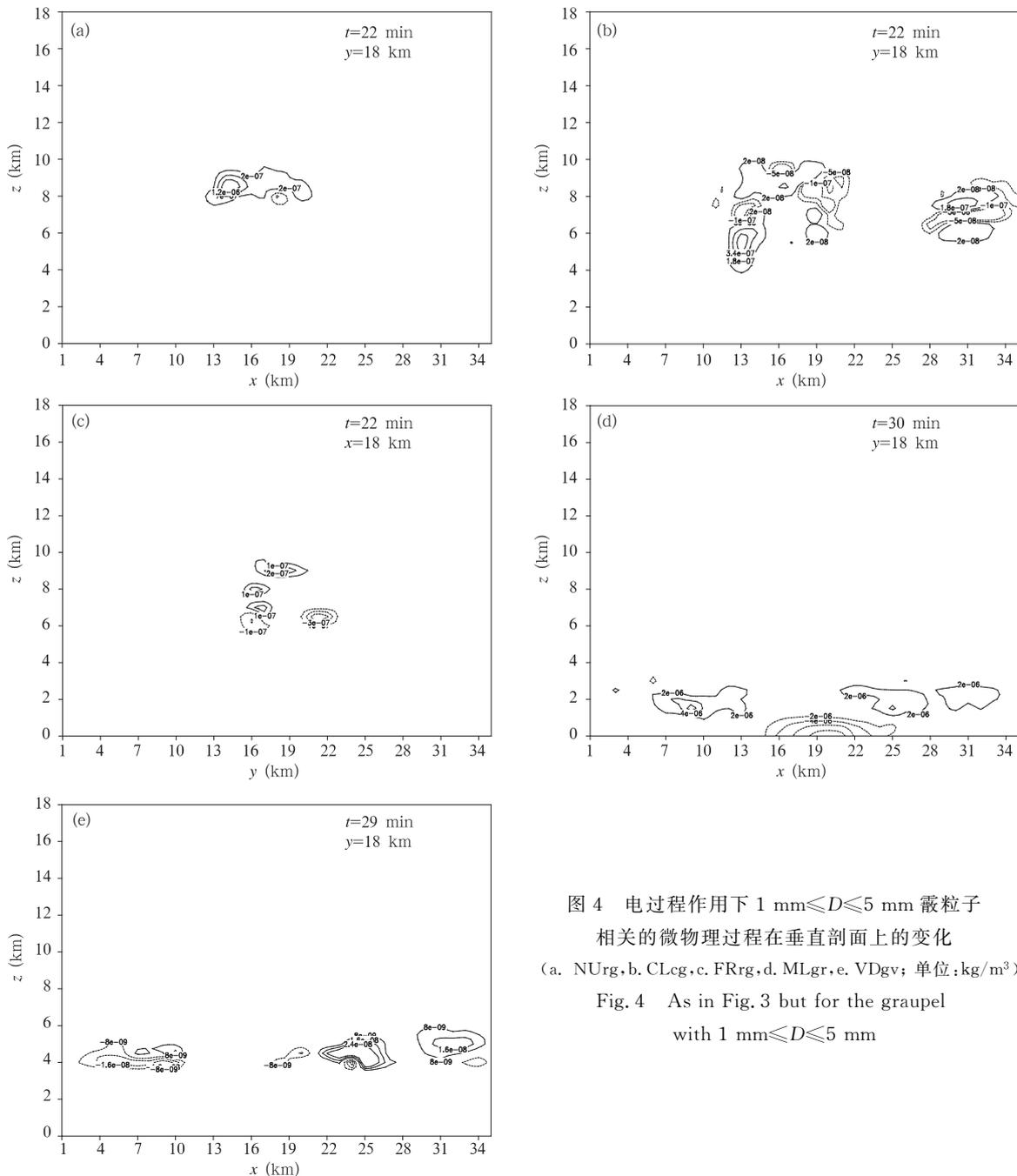


图 4 电过程作用下  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5 \text{ mm}$  霰粒子相关的微物理过程在垂直剖面上的变化 (a. NUrg, b. CLcg, c. FRrg, d. MLgr, e. VDgv; 单位:  $\text{kg/m}^3$ )

Fig. 4 As in Fig. 3 but for the graupel with  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5 \text{ mm}$

电过程对  $1\text{ mm} \leq D \leq 5\text{ mm}$  霰粒子微物理过程的影响(图4)表明,当第22分钟时,在  $y=18\text{ km}$  的垂直剖面上,NUrg 以增加为主(图4a),只在小范围存在减少现象,其极值量级相对图3a 要大,分别为  $-0.8 \times 10^{-6}$  和  $1.8 \times 10^{-6}\text{ kg/m}^3$ 。CLcg 则存在较大范围的正负交替分布现象(图4b),说明电过程在不同区域改变(或增大或减小)了霰粒子与云滴之间的碰撞效率,其极值分别为  $-3 \times 10^{-7}$  和  $5 \times 10^{-7}$

$\text{kg/m}^3$ 。图4c中FRrg 增量依然是正负相间,极值分别为  $-7 \times 10^{-7}$  和  $3 \times 10^{-7}\text{ kg/m}^3$ 。第30分钟时(图4d),在  $y=18\text{ km}$  的垂直剖面上,和小直径霰粒子相比,该直径范围的霰粒子MLgr 变化量级较大,并且,减少区的范围也较大,极值分别为  $-1.0 \times 10^{-5}$  和  $0.8 \times 10^{-5}\text{ kg/m}^3$ 。而图4e所示的VDgv 变化范围比图3e大,但量级则依然较小,极值分别为  $-3.5 \times 10^{-8}$  和  $4.5 \times 10^{-8}\text{ kg/m}^3$ 。

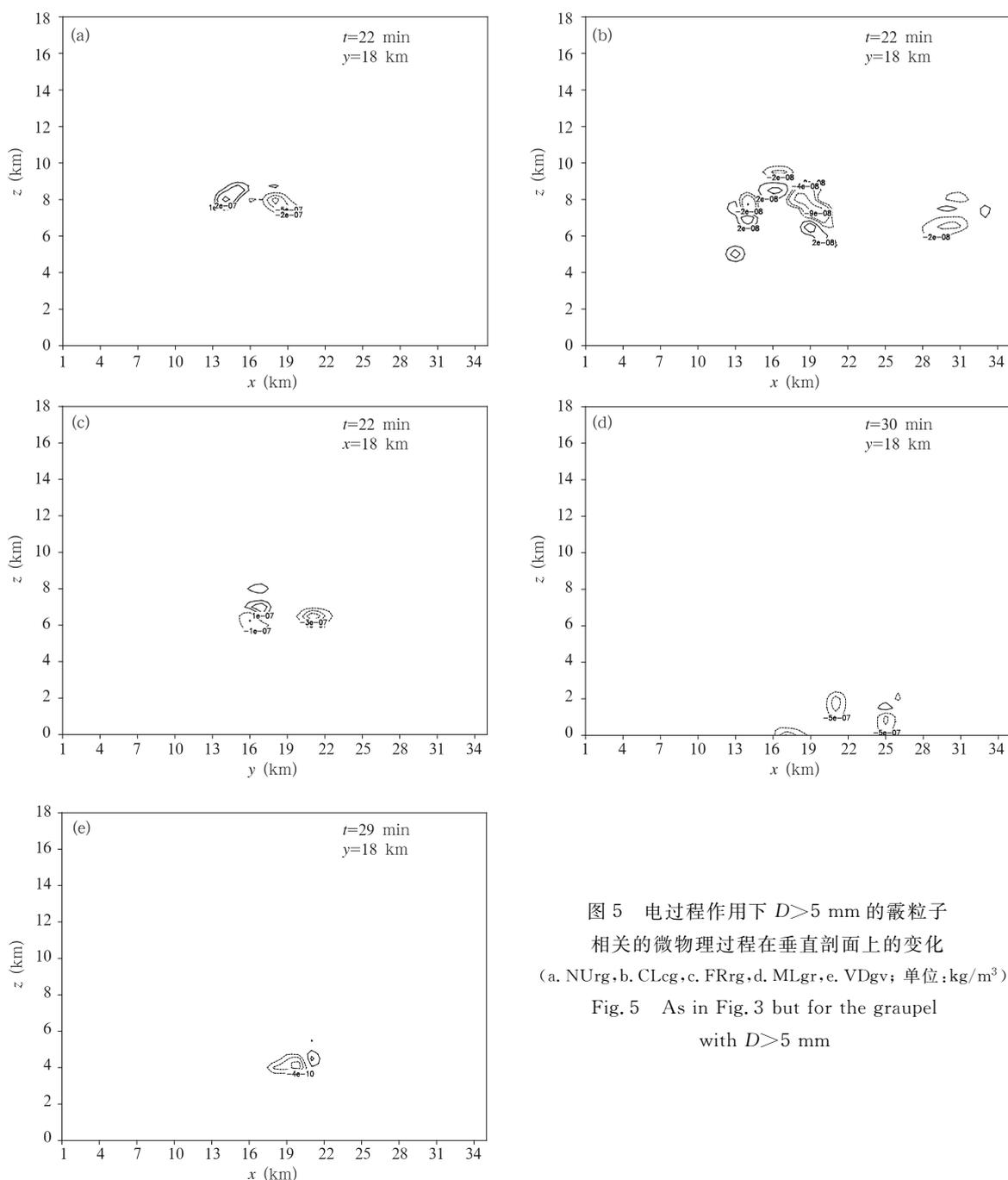


图5 电过程作用下  $D > 5\text{ mm}$  的霰粒子相关的微物理过程在垂直剖面上的变化 (a. NUrg, b. CLcg, c. FRrg, d. MLgr, e. VDgv; 单位:  $\text{kg/m}^3$ )  
Fig. 5 As in Fig. 3 but for the graupel with  $D > 5\text{ mm}$

电过程对  $D > 5 \text{ mm}$  的霰粒子微物理过程的影响(图 5)表明,  $NURg$  的变化范围依然不大(图 5a), 正负交替, 其极值量级和图 4a 相当, 分别为  $-1 \times 10^{-6}$  和  $0.5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ 。电过程对  $CLcg$  的影响范围依然较大(图 5b), 不过其量级不大, 极值分别为  $-1.2 \times 10^{-7}$  和  $1.0 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ 。从  $FRrg$  增量的垂直剖面(图 5c)可以看出, 其变化量级和范围与直径 1—5 mm 霰粒子的情况相似。在第 30 分钟时(图 5d),  $y = 18 \text{ km}$  的垂直剖面上  $MLgr$  变化和图 3d、图 4d 相比, 范围减小, 极值量级与图 4d 相当, 比图 3d 小, 分别为  $-3 \times 10^{-6}$  和  $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ 。第 29 分钟时(图 5e), 在  $y = 18 \text{ km}$  垂直剖面上电作用使  $VDgv$  以减少为主, 其极值量级也变小, 分别为  $-1.4 \times 10^{-9}$  和  $1.0 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^3$ 。

从图 3、4 和 5 的分析可以看出, 电过程对影响霰粒子含量的微物理过程的作用比较复杂。在不同时刻、不同空间位置, 对不同直径霰粒子的不同微物理过程作用也不相同。对某一微物理过程, 电作用既可能使其增加, 又可能使其减小。因此, 分析电作用对霰粒子的总体影响, 主要从最终的结果入手。从图 2 可见, 电过程对小直径霰粒子的影响相对要大一些。对霰粒子与云滴间的碰撞效率来说, 电过程既可能使其增强, 又可能使其减弱, 从表 1 可以看出, 电过程对  $CLcg$  的最终影响是使其增加, 总的结果应该是增强了碰并效率。

### 3.2.2 电过程对霰粒子最大含量的影响

严格来说,  $D < 1 \text{ mm}$  的霰粒子应该称为小冰粒子, 而  $D > 5 \text{ mm}$  的霰粒子应称为冰雹。为了讨论方便, 在本文将其统称为霰粒子。图 6 给出了考虑电过程时霰粒子最大含量( $Q_{gMax}$ )随时间的变化曲线。

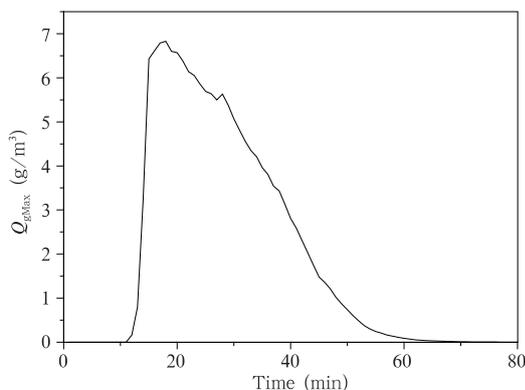


图 6  $Q_{gMax}$  随时间变化曲线

Fig. 6 Temporal changes in the maximum graupel content  $Q_{gMax}$  (unit:  $\text{g/m}^3$ )

事实上, 从霰粒子产生开始的每一时刻, 在考虑电过程和不考虑电过程条件下的  $Q_{gMax}$  值并不相同, 但其差异很小。考虑电过程及不考虑电过程的  $Q_{gMax}$  分布曲线基本重合, 在少数时刻含量值最大相差约 7% (以不考虑电过程的  $Q_{gMax}$  值为标准)。因此, 图 6 也基本上可以表示不考虑电过程时的霰粒子最大含量时变曲线。

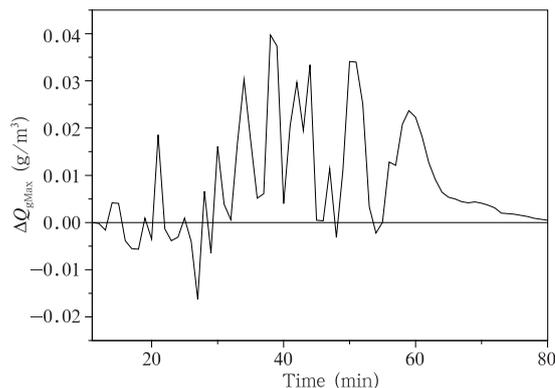


图 7 考虑电过程与不考虑电过程时霰粒子最大含量差( $\text{g/m}^3$ )随时间的变化

Fig. 7 Temporal changes in  $\Delta Q_{gMax}$  (unit:  $\text{g/m}^3$ )

从上述两种情况下  $Q_{gMax}$  之差( $\Delta Q_{gMax}$ )随时间的变化(图 7)可知, 考虑电过程后, 第 30 分钟以前,  $Q_{gMax}$  主要表现为减小, 此后则主要表现为增加, 但总体  $Q_{gMax}$  是增加的。随着电过程发展的不同阶段, 其增加幅度也呈现出较大的波动。不过, 其最大增量仅为  $0.04 \text{ g/m}^3$ , 说明电过程并没有对  $Q_{gMax}$  产生显著影响。

模拟至 26 min 以前,  $Q_{gMax}$  所处网格坐标位置在两种情况下是一样的。从第 27 分钟开始, 部分时刻的  $Q_{gMax}$  所处位置发生变化。

表 2 给出 27—53 min 时段  $Q_{gMax}$  值及其所处网格位置。第 53 分钟以后, 由于  $Q_{gMax}$  值太小, 不予考虑。在该时段, 表中没有记录的時刻表示  $Q_{gMax}$  所处位置没有发生变化。

从表 2 中的数据也可看出, 考虑和不考虑电过程条件下的  $Q_{gMax}$  并没有发生太大变化。并且, 两种条件下的  $Q_{gMax}$  变化情况也并不固定。例如, 27 min 时, 考虑电过程时的  $Q_{gMax}$  值比不考虑电过程时小  $0.02 \text{ g/m}^3$ , 而 30 min 时, 则大  $0.02 \text{ g/m}^3$ 。即电场对  $Q_{gMax}$  的影响趋势并不唯一, 既可能使  $Q_{gMax}$  减小, 又可能使  $Q_{gMax}$  增大, 但其影响并不明显。

表2 不同时刻霰粒子最大含量  $Q_{gMax}$  所处网格位置及其最大值

Table 2 The value of  $Q_{gMax}$  and the position of  $Q_{gMax}$  at the different time

时间	$Q_{gMax}$ 所处网格位置		$Q_{gMax}$ 值 ( $g/m^3$ )	
	有电过程	无电过程	有电过程	无电过程
27 min	(22,18,30)	(22,18,31)	5.50	5.52
30 min	(22,19,32)	(22,19,31)	5.07	5.05
35 min	(18,16,32)	(17,16,31)	3.96	3.94
40 min	(18,17,32)	(17,17,31)	2.81	2.80
48 min	(15,19,32)	(15,19,31)	1.01	1.02
49 min	(15,19,32)	(15,19,31)	0.87	0.86
50 min	(16,20,32)	(16,20,31)	0.74	0.70
51 min	(16,20,32)	(15,20,32)	0.60	0.56
52 min	(15,20,32)	(16,20,31)	0.48	0.46
53 min	(16,20,32)	(16,20,31)	0.374	0.370

从表2给出的27—53 min  $Q_{gMax}$  所处网格位置可知,考虑电过程后其变化并不明显,基本都只是移动了一个网格点。而27 min以前,  $Q_{gMax}$  的位置却没有发生变化。即在冰雹发展的初期和成熟期的部分阶段,电场对  $Q_{gMax}$  所处网格位置基本没有影响。而在冰雹发展的成熟期向衰败期过渡时的部分时刻,电场对  $Q_{gMax}$  所处位置也只有较小的影响,仅偏移一个网格点。

弄清楚霰粒子最大含量处的谱分布,将有助于分析  $Q_{gMax}$  受电过程的影响。从图6中选取霰粒子含量的最大极值点(对应  $t = 18$  min)和局部极值点(对应  $t = 28$  min)进行讨论。最大极值点的网格点坐标为(24, 19, 17),局部极值点的网格点坐标为(21, 19, 31)。

考虑电过程条件下,  $t = 18$  min 时,从坐标点(24, 19, 17)处的霰粒子谱分布(图8)可以看出,  $0.6 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$  的霰粒子数较多,  $1 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$  的霰粒子占了霰粒子总数的较大一部分。此时,该处霰粒子发展到了第13档,即最大直径为5.1 mm。由于霰粒子的质量与半径  $D$  的三次方成正比,因此,第7档( $D = 0.72 \text{ mm}$ )到第10档( $D = 1.9 \text{ mm}$ )的霰粒子对该处霰粒子含量贡献更大。

考虑电过程条件下,  $t = 28$  min 时,坐标点(21, 19, 31)处的霰粒子谱分布(图9)与图8相似,  $0.6 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$  的霰粒子数目居多,  $1 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$  的霰粒子占较大一部分,直径较大的霰粒子对该处的含量贡献较大。并且,该处霰粒子也发展到了第13档。与图8不同之处在于  $D < 0.6 \text{ mm}$  的霰粒子数目更少,并且,第10档的霰粒子数最多,而图8

中则是第6档霰粒子最多,不过,其质量贡献较小。即  $t = 28$  min 时,格点(21, 19, 31)处依然是相对较多的较大直径霰粒子影响着总的霰粒子含量。

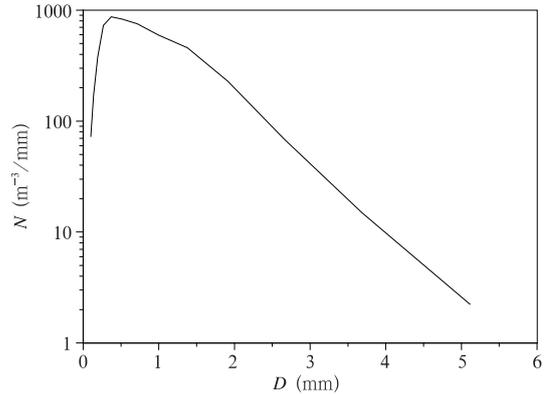


图8  $t = 18$  min 时坐标点(24, 19, 17)处的霰粒子谱分布

Fig. 8 Size distribution of the graupel at the coordinates (24, 19, 17) at  $t = 18$  min

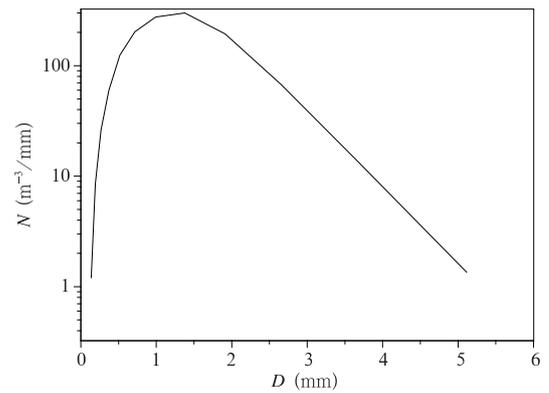


图9  $t = 28$  min 时坐标点(21, 19, 31)处的霰粒子谱分布

Fig. 9 As in Fig. 8 but for the coordinates (21, 19, 31) at  $t = 28$  min

因此,霰粒子最大含量处,直径相对较大的粒子影响着霰粒子的总量,但是,大直径的粒子由于其数浓度有限,对霰粒子总量的影响也有限。

综上所述,相对小的霰粒子含量受电过程直接影响较大,但是,这种影响累积后,会对相对较大的霰粒子产生间接影响。在冰雹发展的初期和成熟期的部分阶段,电场对  $Q_{gMax}$  所处网格位置基本没有影响,而在冰雹发展的成熟期向衰败期过渡时的部分时刻,电场对  $Q_{gMax}$  所处位置稍有影响。在  $Q_{gMax}$  所处位置,直径相对较大的霰粒子影响着总的霰粒子含量。

### 3.3 电过程对霰粒子数浓度的影响

#### 3.3.1 电过程对不同直径范围的霰粒子数浓度的影响

整个模拟时段,从不同大小的霰粒子(依据3.2节的标准分为4类,即 $D < 1$  mm、 $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm、 $D > 5$  mm及 $D = 10$  mm)在模拟域内数浓度增量随时间的变化(图10)可见,不同直径范围的霰粒子数浓度总体均呈增加趋势。直径越小的霰粒子,受电过程影响越大,大直径霰粒子受电过程影响稍小。 $D < 1$  mm的霰粒子(图10a)在整个模拟过程中主要呈增加的趋势,从第56分钟开始,略有减少,

比 $1 \text{ mm} < D < 5$  mm的霰粒子数浓度的增量大一个量级。图10b中霰粒子浓度在某些时刻稍有减少,但总体是增加的。 $D > 5$  mm的霰粒子数浓度变化量的量级则更小,并且,增减幅度呈现出较大波动(图10c)。霰粒子最大直径能达到10 mm,其数浓度变化量级进一步减小,并且,该变化只在少数时刻表现出来(图10d)。在电过程作用下, $D < 1$  mm的霰粒子数浓度增加了1.16%; $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm的霰粒子数浓度增加了0.35%。 $D > 5$  mm的霰粒子数浓度增加很少。

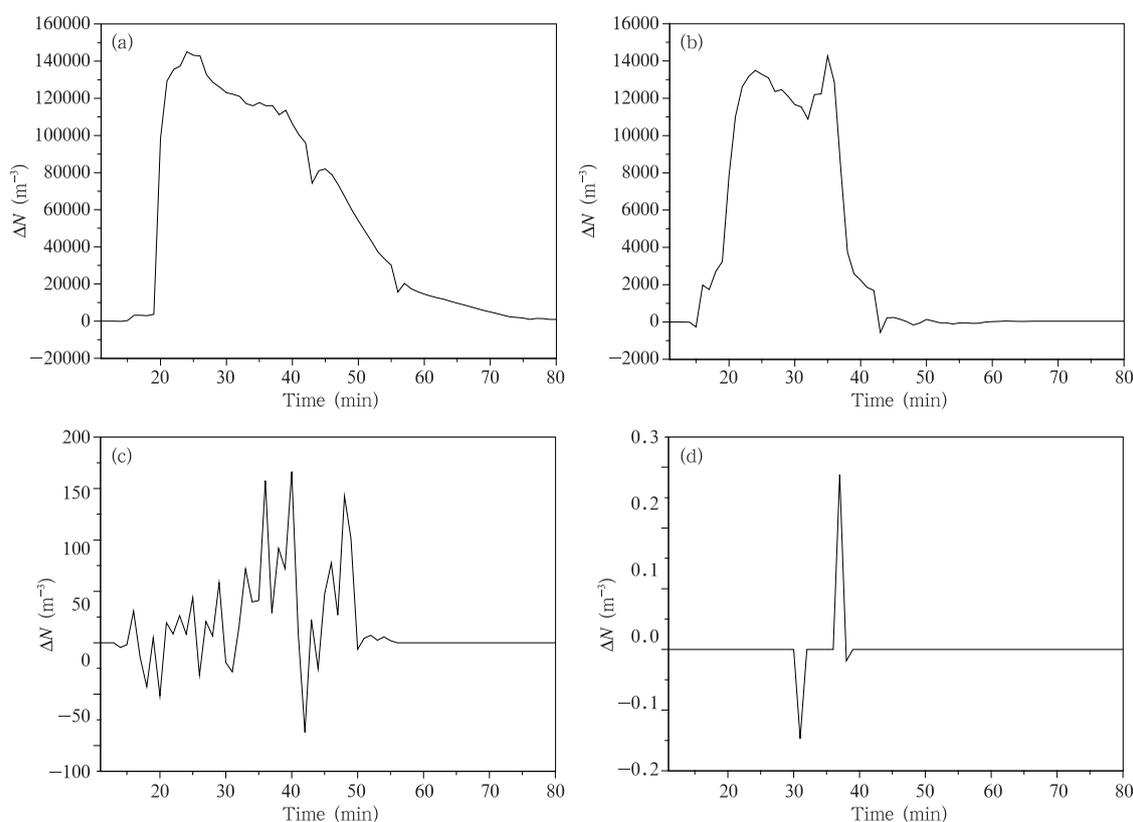


图10 电过程导致不同直径的霰粒子数浓度在整个模拟区域增量的时间变化  
(a.  $D < 1$  mm, b.  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm, c.  $D > 5$  mm, d.  $D = 10$  mm)

Fig. 10 Temporal changes in the increment of the number density of graupel for the different diameters by electric processes in the whole simulation domain:  
(a)  $D < 1$  mm, (b)  $1 \text{ mm} \leq D \leq 5$  mm, (c)  $D > 5$  mm, and (d)  $D = 10$  mm

上述结论只是一个总体影响,并不表示所有时刻都如此。下面选择两个不同时刻、不同垂直剖面上的电场与霰粒子含量变化之间的关系进行讨论。

图11给出考虑电过程后霰粒子含量(阴影区)与垂直电场(图11a<sub>1</sub>和图11a<sub>2</sub>,等值线)以及霰粒子增量(图11b<sub>1</sub>和图11b<sub>2</sub>,等值线)之间的配置关系。

从图11a<sub>1</sub>可知, $t = 20$  min、 $y = 18$  km的垂直剖

面上,霰粒子存在两个含量中心。左侧的含量中心处于上升气流区,右侧含量中心则处于上升中心的反气旋侧,并且含量值比左侧中心大。此时,该剖面上的正负电场极值分别为58和-63 kV/m。位置较高的霰粒子含量中心与负电场极值区比较接近,但并不重合。而较低的霰粒子含量中心则处于较弱的负电场区域,距下部正电场中心约4 km。图11b<sub>1</sub>中,霰粒子

含量的增量在不同区域表现出不同的变化,有增有减,范围有大有小。但该变化在霰粒子总含量相对较小的区域(相对较小直径霰粒子的分布区域)表现得尤为明显。例如,该剖面上在  $x=1-13$  km 的水平范围,霰粒子含量变化主要表现在  $0.5 \text{ g/m}^3$  等值线周

围,距含量中心较远;在  $x=22-35$  km 的水平范围,霰粒子含量的变化也仅限于  $0.5-3.5 \text{ g/m}^3$  等值线范围。而霰粒子含量中心的周围区域(大直径霰粒子存在区),霰粒子含量基本没有变化。

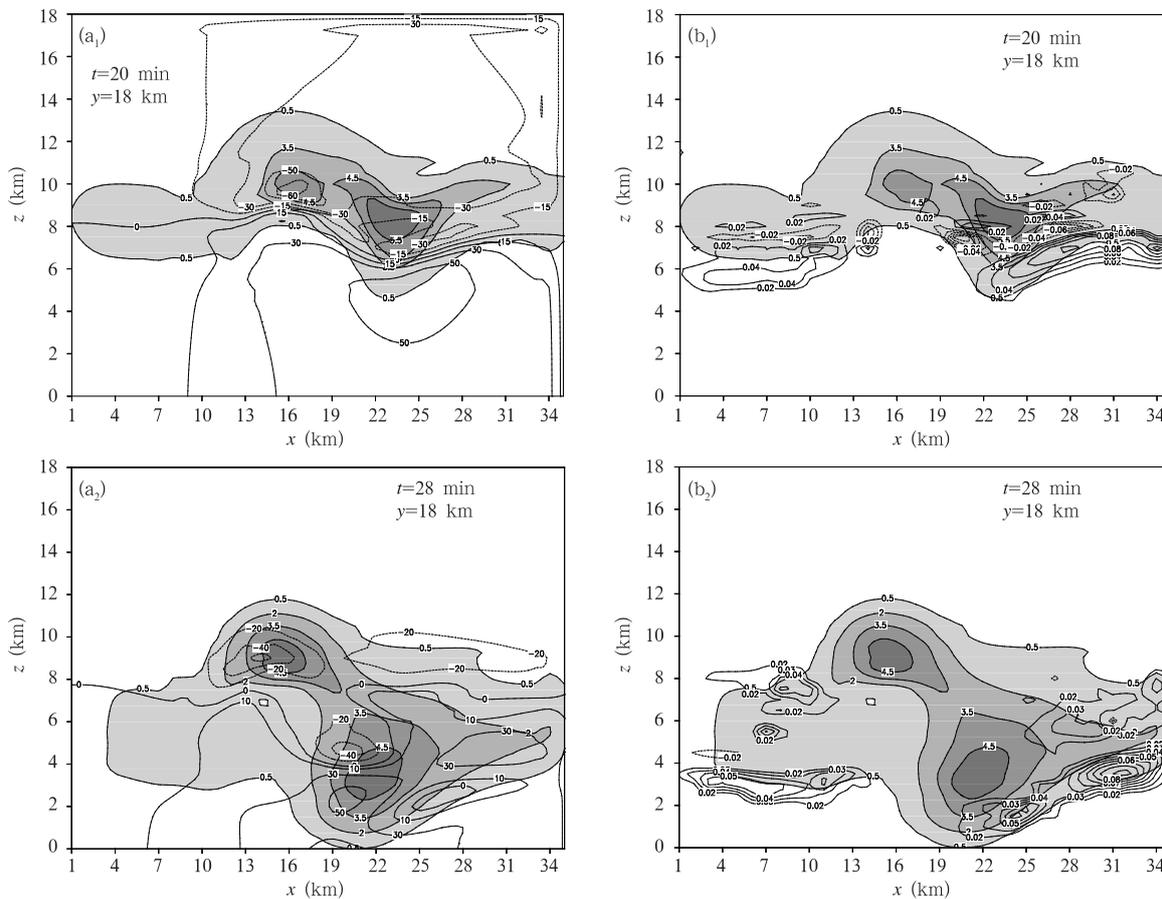


图 11 霰粒子含量(阴影区,  $\text{g/m}^3$ )和垂直电场( $a_1$ 、 $a_2$ . 等值线,  $\text{kV/m}$ )及霰粒子增量( $b_1$ 、 $b_2$ . 等值线,  $\text{g/m}^3$ )垂直剖面分布

Fig. 11  $x-z$  sections of the graupel content (shaded area, unit:  $\text{g/m}^3$ ) and vertical electric field ( $a_1$ ,  $a_2$ , contour, unit:  $\text{kV/m}$ ), and the increment of graupel content ( $b_1$ ,  $b_2$ , contour, unit:  $\text{g/m}^3$ )

同样,从图 11 $a_2$  可以看出,  $t=28 \text{ min}$ 、 $y=18 \text{ km}$  的垂直剖面上,霰粒子也出现两个含量中心。随着强风暴云的发展,上升气流反气旋侧的含量中心降到较低高度。而左侧的含量中心依然在上升气流区附近,中心极值依然小于右侧极值。此时,该剖面上的空间电荷浓度分布较为复杂,电场也出现了多个中心。正负电场极值分别为  $55$  和  $-70 \text{ kV/m}$ 。左侧霰粒子含量中心离较高处的负电场极值中心依然较近。右侧霰粒子含量中心离局部正电场中心和局部负电场中心都比较近,但也并不重合。图 11 $b_2$  中,霰粒子增量的变化规律和图 11 $b_1$  相似,  $x=1-13 \text{ km}$  水平范围的含量变化主要分布于  $0.5 \text{ g/m}^3$  等值线周围(相对

较小直径霰粒子分布区),  $x=20-35 \text{ km}$  水平范围的含量变化主要分布于  $0.5-3.5 \text{ g/m}^3$  等值线区间(相对较小直径霰粒子分布区)。

对图 11 的分析还表明,霰粒子含量中心与电场的极值中心并不重合。即霰粒子含量中心的电场小于电场极值。由于霰粒子含量中心相对较大的粒子多一些,而直径较大的霰粒子受电场的影响相对较小,并且,该处的电场也小于电场极值,其最大含量受电场影响相对较小。因此,霰粒子最大含量的时变曲线变化很小。

不同直径范围的霰粒子受电场作用程度不同,相对小的直径霰粒子数浓度变化较大,而相对大直

径的霰粒子数浓度变化较小,而并不是直径最小的霰粒子所受影响就最大。

在  $y = 18$  km 垂直剖面上,在图 11 中的两个时

刻选择了 4 个区域,分析霰粒子在该区域谱分布的变化(图 12); $t = 20$  min 时, $x$  为 1—13 km,垂直高度 2—4 km (图 12 a<sub>1</sub>、12 b<sub>1</sub>); $t = 20$  min 时, $x$  为

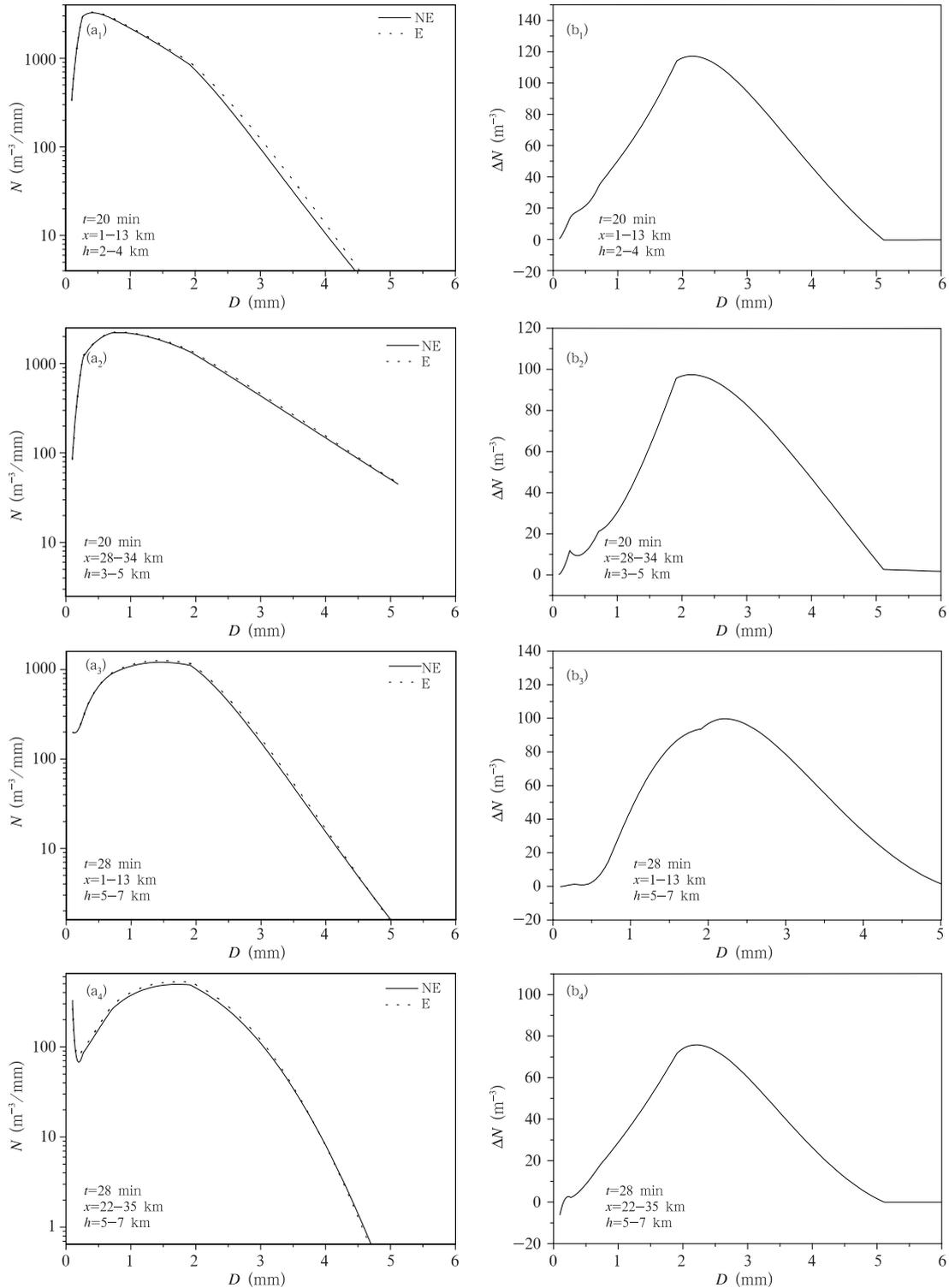


图 12  $y = 18$  km 垂直剖面上,考虑和不考虑电过程时霰粒子的谱分布(a<sub>1</sub>—a<sub>4</sub>)以及不同尺度霰粒子数浓度增量随时间的变化曲线(b<sub>1</sub>—b<sub>4</sub>)

Fig. 12 Size distributions of graupel (a<sub>1</sub>—a<sub>4</sub>) with electric processes (E) and without electric processes (NE) and the increment of number density of the graupel with different size (b<sub>1</sub>—b<sub>4</sub>) for the different time at  $y = 18$  km

28—34 km,垂直高度 3—5 km(图 12a<sub>2</sub>、12b<sub>2</sub>); $t = 28$  min 时, $x$  为 1—13 km,垂直高度为 5—7 km(图 12a<sub>3</sub>、12b<sub>3</sub>); $t = 28$  min 时, $x$  为 22—35 km,垂直高度范围同上(图 12a<sub>4</sub>、12b<sub>4</sub>)。“E”表示考虑电过程,“NE”表示不考虑电过程(下同)。

从图 12a<sub>1</sub>—12a<sub>4</sub> 霰粒子的谱分布可以看出,各个直径范围的霰粒子浓度基本上都是增加的。图 12b<sub>1</sub>—12b<sub>4</sub> 能够更清楚地描述霰粒子浓度的变化,均说明此时电过程对  $2\text{ mm} < D < 3\text{ mm}$  霰粒子的数浓度增加更明显。对于  $D < 1\text{ mm}$  的霰粒子则浓度的变化相对较小。而  $D > 5\text{ mm}$  的霰粒子电过程对

其作用并不明显。充分说明电过程对相对较小直径粒子作用明显,是一个累积的结果,但并不说明任何空间、任何时间均如此,即  $D < 1\text{ mm}$  的霰粒子并非在所有时刻受电过程影响都最明显。

霰粒子总的数浓度和总含量增量随时间变化(图 13)说明,总浓度随时间的变化规律与图 10a 中  $D < 1\text{ mm}$  的霰粒子数浓度变化规律相似,说明电过程使小直径冰粒子数浓度增加较明显。总含量的时变曲线规律与图 10b 中  $1\text{ mm} \leq D \leq 5\text{ mm}$  的冰粒子含量变化规律相似,说明该直径范围的粒子对霰粒子总含量的贡献最大。

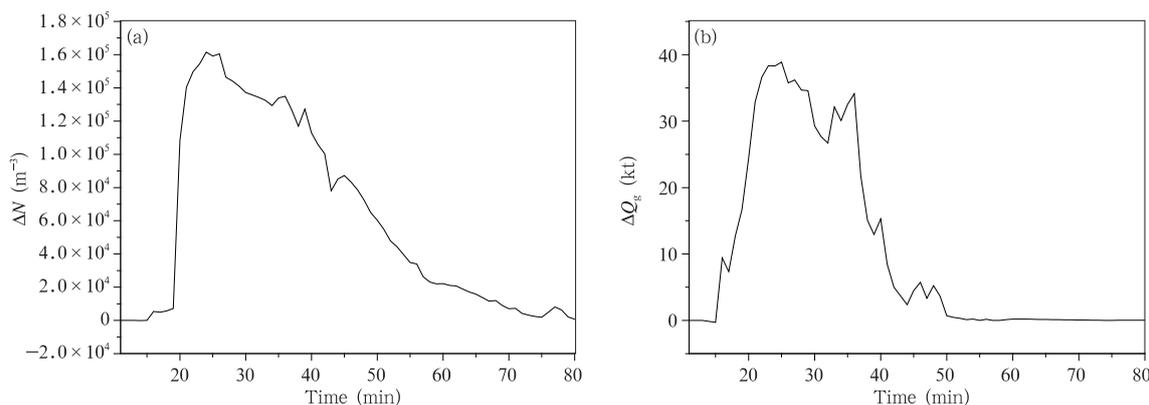


图 13 增加的霰粒子总浓度(a)和总含量(b)随时间的变化曲线

Fig. 13 Temporal changes in the increment of the total number density (a) and total content (b) of graupel

从以上分析可知,在电过程作用下,霰粒子质量变化区域主要表现在小直径霰粒子的分布区。从累积的效果上来看,电场对小直径霰粒子数浓度的影响相对较大,而对大直径霰粒子数浓度的影响相对较小。

### 3.3.2 电过程对霰粒子最大数浓度及其空间位置的影响

从霰粒子最大数浓度( $N_{gMax}$ )随时间变化曲线(图 14)可以看出,考虑电过程以后,在  $t = 19$ — $21$  min 时段, $N_{gMax}$  有一定程度的增加; $t = 26$ — $28$  min 时段  $N_{gMax}$  明显减少; $t = 39$ — $49$  min 时段  $N_{gMax}$  少量增加。而其他时段  $N_{gMax}$  没有明显变化,即  $N_{gMax}$  主要在 3 个时段发生变化。

表 3 是模拟时间在 15—56 min,考虑电过程和不考虑电过程条件下  $N_{gMax}$  所处网格坐标及其数值。15 min 以前的  $N_{gMax}$  位置没有发生变化,56 min 以

后,由于  $Q_{gMax}$  值已经比较小,所以不再考虑。可以看出,电过程对  $N_{gMax}$  的影响时刻比较早,并且,相对于  $Q_{gMax}$  其影响也较不规则。 $t = 15$  min 时,考虑电过程后导致  $N_{gMax}$  所处位置的  $y$  坐标平移了 5 个格点,其数值没有太大变化。 $t = 20$  min 时,电过程使  $N_{gMax}$  所处的  $x$  坐标平移了 6 个格点, $y$  坐标和  $z$  坐标分别平移了 1 个和 3 个格点, $N_{gMax}$  的值也发生了较大的变化。 $t = 24$  min 时,尽管  $N_{gMax}$  值并没有太大区别,但是,电过程导致  $N_{gMax}$  所处位置的  $x$  坐标偏移了 10 个格点, $z$  坐标偏移了 5 个格点。即电过程使  $N_{gMax}$  在雷暴云发展初期及成熟期初期的某些时刻所处位置发生了较大变化。除了  $t = 32$  min 时的  $N_{gMax}$  位置平移了 6 个格点外,表中其他时刻的  $N_{gMax}$  位置变化与  $Q_{gMax}$  变化相似,即只平移一个格点。

为了讨论电过程对  $N_{gMax}$  处霰粒子谱分布的影

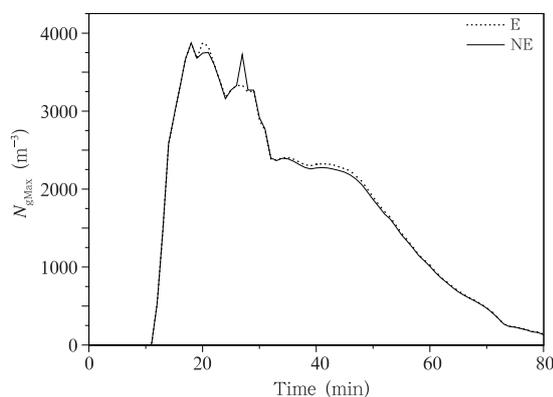


图 14 霰粒子数浓度极值增量随时间变化曲线

Fig. 14 Temporal changes in the increment of the maximum number density of graupel (Solid line is with electric processes and dotted line is without electric processes)

表 3  $N_{gMax}$  所处的网格位置及其数值

Table 3 The values and coordinates of

时间	$N_{gMax}$ for the different time			
	$N_{gMax}$ 所处网格位置		$N_{gMax}$ 值 ( $m^{-3}$ )	
	有电过程	无电过程	有电过程	无电过程
15 min	(18,15,15)	(18,20,15)	2939.3	2953.3
20 min	(29,19,17)	(23,18,20)	3877.4	3743.4
24 min	(34,17,18)	(24,17,23)	3183.6	3157.2
27 min	(17,21,18)	(17,18,18)	3331.3	3725.8
28 min	(16,21,18)	(16,20,18)	3240.6	3270.6
30 min	(19,22,18)	(18,20,18)	2885.7	2918.1
32 min	(33,14,24)	(17,20,18)	2388.5	2400.6
44 min	(25,17,31)	(24,18,31)	2285.0	2238.9
52 min	(25,19,31)	(24,20,31)	1711.7	1680.9
56 min	(24,20,31)	(24,21,31)	1349.6	1331.8

响,从图 14 所示  $N_{gMax}$  发生变化的 3 个时段分别选取  $t = 20$ 、27、42 min 的 3 个时刻进行分析。

如表 3 所示,  $t = 20$  min 时,考虑电过程后  $N_{gMax}$  位于网格点 (29, 19, 17) 处,此时该处垂直电场为  $-63$  kV/m。不考虑电过程时  $N_{gMax}$  位于网格点 (23, 18, 20) 处。从这两个格点处的霰粒子谱分布 (图 15) 可以看出,  $t = 20$  min 时,考虑电过程后,在  $N_g$  最大处,直径较小的霰粒子明显比不考虑电过程时的  $N_g$  最大处数目多。而随着直径的增加 (大于  $0.515$  mm, 第 6 档),考虑电过程后的霰粒子数呈减少趋势。考虑电过程前,在  $N_g$  最大处霰粒子的最大直径为  $5.11$  mm,即该处霰粒子发展到了第 13 档。而考虑电过程后,  $N_g$  最大处的霰粒子最大直径为  $3.68$  mm,即该处霰粒子只发展到了第 12 档。

即在  $t = 20$  min 时,对于这两个格点上的  $N_g$ ,电过程的作用增加了小直径霰粒子的数目,但是减小了大直径霰粒子的数目,并在一定程度上阻止了最大直径霰粒子的进一步生长。

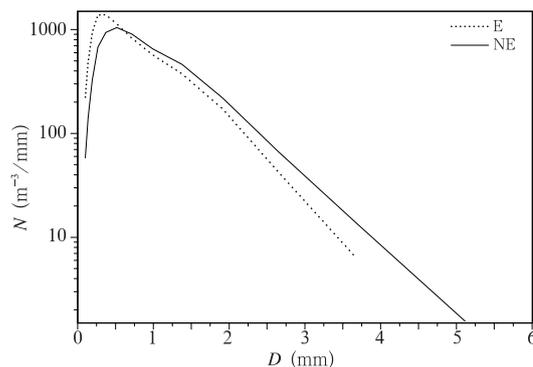


图 15  $t = 20$  min 时,网格点 (29,19,17) 处 (有电过程,点线)和网格点 (23,18,20) 处 (无电过程,实线)的霰粒子谱分布

Fig. 15 Size distributions of graupel at the coordinates (29,19,17) (with electric process, dotted line) and at the coordinates (23,18,20) (without electric process, solid line) at  $t = 20$  min

$t = 27$  min 时,考虑电过程后  $N_{gMax}$  位于网格点 (17, 21, 18) 处,该处垂直电场为  $-89$  kV/m。不考虑电过程时  $N_{gMax}$  位于网格点 (17, 18, 18)。从两个格点处的霰粒子谱分布 (图 16) 可知,在  $t = 27$  min 时,考虑电过程的条件下,  $N_g$  最大处所有档 (即所有直径范围) 的霰粒子数都比不考虑电过程时  $N_g$  最大处的霰粒子数少。虽然小直径范围的霰粒子变化也较明显,但与图 15 相比,变化没有那么大。尽管如此,考虑电过程后,  $N_g$  最大处所有档霰粒子数的相对较少还是导致了图 14 中  $t = 27$  min 时  $N_{gMax}$  的突然减少。此时,两个位置上的霰粒子都发展到了第 13 档,即最大直径都为  $5.11$  mm。在该时刻,对这两个格点上的霰粒子来说,电过程的作用使所有直径范围的霰粒子数目都有所减少,小直径的霰粒子数目减少较多,大直径霰粒子数目则变化较小。

$t = 42$  min 时,考虑和不考虑电过程条件下的霰粒子最大数浓度都在同一个网格位置 (25, 17, 31) 上。从图 14 可知,此时考虑电过程后,该处的霰粒子数浓度略有增加。由于增加的幅度比较小,可以通过表 4 来观察电过程对该处霰粒子数浓度的影响。

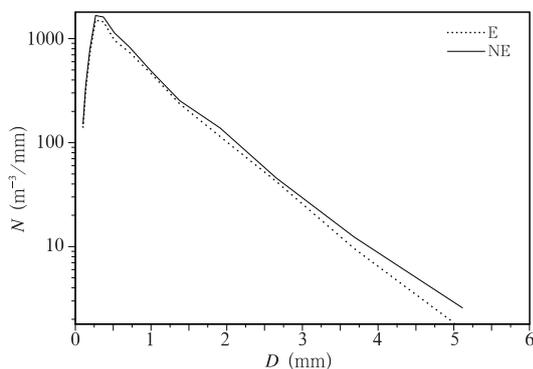


图 16  $t = 27$  min 时, 网格点(17,21,18)处(有电过程时数浓度最大处,点线)和网格点(17,18,18)处(无电过程时数浓度最大处,实线)的霰粒子谱分布

Fig. 16 Size distributions of graupel at the coordinates (17,21,18) (with electric process, dotted line) and at the coordinates (17,18,18) (without electric process, solid line) at  $t = 27$  min

表 4  $t = 42$  min 时, 霰粒子档数、相应直径(单位:mm)及数浓度(单位: $m^{-3}$ )

Table 4 The size (unit: mm) and number density (unit:  $m^{-3}$ ) of graupel for each hail category at the coordinates (25,17,13) at  $t = 42$  min

档数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
直径	0.1	0.14	0.19	0.27	0.37	0.52	0.72	0.99	1.38	1.91	2.65
数	E 12.2	30.1	74.2	166	313	468	533	432	217	68.4	7.9
浓度	NE 12.3	30.1	73.7	165	307	455	517	422	215	67.8	7.8

子数量增加,而  $t = 27$  min 时,考虑电过程后,小直径的霰粒子数量减少。在  $t = 42$  min 时,考虑电过程后,  $N_g$  最大处的网格点位置上,小直径的霰粒子和大直径霰粒子的数浓度变化较小,直径处于中间的霰粒子数浓度则变化相对较大。

在模式中,导致霰粒子数浓度增加的微物理过程主要有过冷水的冻结、雨滴异质核化以及雪团的自动转化等,导致霰粒子数浓度减少的微物理过程主要有霰粒子的融化、升华等。因此,电过程主要通过影响上述微物理过程来影响不同直径的霰粒子的数浓度。由于小直径霰粒子受电场力的直接影响相对较大,因此,  $t = 20$  和  $27$  min 时,小直径霰粒子数浓度变化相对比较大。对大直径霰粒子来说,尽管受电场的直接影响相对较小,但是,在分档模式中,霰粒子是从小到大进档发展的,即小直径霰粒子的累积变化会间接影响到大直径霰粒子的发展。因此,在  $t = 20$  min 时,考虑电过程后,最大霰粒子直径只发展到第 12 档。

总之,在模拟网格区域,导致霰粒子数浓度变化

从表 4 可知,  $t = 42$  min 时,霰粒子在该格点上无论是否经历电过程,都只发展到了第 11 档,即最大直径为 2.65 mm。并且,两种条件下的霰粒子都主要分布在第 5 档到第 9 档,该直径范围的数浓度变化相对也较大一些。在该时刻,垂直电场的值较小,为  $-8.8$  kV/m。

从以上 3 个时刻 ( $t = 20$  min,  $t = 27$  min,  $t = 42$  min) 的霰粒子谱分布和数浓度的分析可以发现,电过程对  $N_{gMax}$  影响主要发生在电场相对较大之处,并且,该影响对小直径的霰粒子更明显。但是,电过程对霰粒子的影响是比较复杂的。从图 15 和 16 可知,  $t = 20$  min 和  $t = 27$  min 两个时刻,考虑和不考虑电过程条件下,  $N_g$  最大处的网格点位置上的霰粒子谱分布比较相似。并且,电过程对其有一个共同影响:使直径较大的霰粒子数目有所减少。不同之处在于,  $t = 20$  min 时,考虑电过程后,小直径的霰粒

的微物理过程受电过程的影响在不同时刻和不同位置是不一样的。对不同直径的霰粒子,既可能使其数浓度增加,又可能使其数浓度减少。当电场较大时,电过程对小直径霰粒子的影响比较直接,而对大直径霰粒子的影响相对间接;当电场较小时,电过程对霰粒子的谱分布影响较小。

#### 4 结论与讨论

利用建立的耦合电过程的三维冰粒子分档模式,模拟研究了北京 2001 年 8 月 23 日一次强雷暴发展过程中电过程对霰粒子含水量、数浓度的影响。结果发现:

(1) 相对小的霰粒子含量受电过程直接影响较大,这种影响累积后,会对相对较大的霰粒子含量产生间接作用。在冰雹发展的初期和成熟期的部分阶段,电场对霰粒子最大含量所处空间位置基本没有影响。而在冰雹发展的成熟期向衰败期过渡时的部分时刻,电场对其稍有影响。在霰粒子最大含量处,直径相对较大的霰粒子影响着总的霰粒子含量。

(2)总的来说,直径较小的霰粒子数浓度受电场影响较大,直径较大的霰粒子数浓度受电场影响较小。由于霰粒子含量中心大直径粒子较多,而其受电场的影响相对较小,并且该处电场也小于电场极值,因此其最大含量受电场影响相对较小。所以,此次个例的模拟过程中,霰粒子最大含量的时变曲线变化很小。

(3)考虑电过程情况下,在霰粒子数浓度最大处,小直径霰粒子数浓度要么增加,要么略微减少,而大直径霰粒子要么进档增长受阻,要么数浓度减少。对不同直径的霰粒子来说,电过程既有可能使其数浓度增加,又有可能使其数浓度减少。当电场较大时,电过程对小直径霰粒子的影响比较直接,而对大直径霰粒子的影响相对间接;当电场较小时,电过程对霰粒子的谱分布影响相对较小。张义军等(2004)对个例进行数值模拟时发现,带电冰雹与云内强电场作用可使地面降雹量增加约50%,雹块直径增大0.7 mm,降雹时间滞后约3 min。电活动使冰雹源、汇总量都减少,但后者减少更多,总体效果使冰雹总量增加,数目减少,冰雹长得更大,更易降落到地面。 $D > 5$  mm的霰粒子可以称为软雹,而此次个例中,电活动使之源汇项均增加,而前者增加更多,因此总体效果导致地面降雹增加了0.29 kt,不过降雹时间并没有变化。张义军等(2004)的模拟结果认为,电作用使霰粒子总量减少约4.6%,变化并不明显。而本文模拟的个例,直径小于1 mm的霰粒子总含量增加了1.3%, $1 \text{ mm} \leq D \leq 5 \text{ mm}$ 的霰粒子总含量增加了0.53%,而 $D > 5$  mm的霰粒子总含量则增加了0.49%,不同直径范围霰粒子含量变化也并不明显。尽管结果相似,但是微物理过程的变化却不相同。产生这种结果的原因主要有两个:一是模式考虑微物理方案以及放电过程的差异,二是个例的不同。不同微物理方案侧重的微物理过程不同,不同个例的冰雹产生环境也有差异。比如对本模式来说,FRrg和NUrg是一个非常重要的霰粒子源项,CLcg的影响相对较小,而张义军等(2004)使用不同模式所模拟的个例中,CLcg则是非常重要的源项,而NUrg作用则较小。

张义军等(2004)也发现,强电场通过对水成物下落末速度的作用来影响冰雹微观增长过程。限于目前相关的实验比较少,很多耦合电过程的模式中要么省略了这种调整,要么用简单的参数化方法来

实现。但水成物下落末速度的调整直接影响到微物理过程源汇项、潜热释放项等重要参量,省略或简化该调整都是不严格的。本文采用的调整方法与张义军等(2004)相同,也需要进一步改进。为了更加合理地研究电过程对冰雹形成和发展的影响,迫切需要大量精密实验和合理的参数化方法来完善此调整作用。

目前,大部分耦合电过程的数值模式主要是通过引入电场力来考虑电场对粒子的影响,本文也主要是采用该方法初步讨论电过程对霰粒子含量和谱分布的作用。而文章所讨论的问题和结论实际上与模式建立时所采用的电反馈机制有关,如果模式中改变电反馈形式,改变闪电参数化方法,或者引入其他一些非线性因素之后,可能结果会有所不同。因而,需要在模式中引入完善的电反馈机制,才能更合理地通过数值模式讨论电过程的影响。

## 参考文献

- 付丹红,郭学良,肖稳安等. 2003. 北京一次大风和强降水天气形成过程机理的数值模拟. 南京气象学院学报, 26(2): 190-200
- 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]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 179pp
- 郭凤霞,张义军,鄒秀书等. 2004. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究. 高原气象, 22(3): 268-274
- 郭学良,黄美元,洪延超等. 2001a. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I: 模式建立及冰雹的循环增长机制. 大气科学, 25(5): 707-720
- 郭学良,黄美元,洪延超等. 2001b. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II: 冰雹粒子的分布特征. 大气科学, 25(6): 856-864
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 56(6): 641-653
- 侯团结. 2007. 雷暴云起电过程的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 65pp
- 孔繁铀,黄美元,徐华英. 1990. 对流云中冰相的三维数值模拟 I: 模式建立及冷云参数化. 大气科学, 14(4): 441-453
- 孔繁铀,黄美元,徐华英. 1991. 对流云中冰相的三维数值模拟 II: 增生过程的作用. 大气科学, 15: 78-88
- 孙安平,言穆弘,张义军等. 2002. 三维强风暴动力-电耦合数值模式研究 I: 模式及其电过程参数化方案. 气象学报, 60(6): 722-731
- 许焕斌,王思微. 1985. 一维时变冰雹云模式. 气象学报, 43(1): 13-24
- 许焕斌,王思微. 1988. 二维时变冰雹云数值模式. 气象学报, 46(2): 227-236
- 许焕斌,王思微. 1990. 三维可压缩大气中云尺度模式. 气象学报, 48(1): 80-90
- 孙安平,张义军,言穆弘等. 2004. 雷暴电过程对动力发展的影响研

- 究. 高原气象, 23(1):26-32
- 张义军, 孙安平, 言穆弘等. 2004. 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, 47(1):25-32
- 周志敏, 郭学良. 2009. 强雷暴云中电荷分层分布与形成机理的三维数值模拟研究. 大气科学, 33(3):600-620
- Beard K V. 1980. The effects of altitude and electrical forces on terminal velocity of hydrometeors. *J Atmos Sci*, 37:1363-1367
- Chiu Chinshan. 1978. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependant cloud model. *J Geophys Res*, 83:5025-5049
- Gay M J, Griffiths R F, Latham J, et al. 1974. The terminal velocity of charged raindrops and cloud droplets falling in strong electric fields. *Quart J Roy Meteor Soc*, 100:682-687
- Kachurin L G. 1974. A numerical model for a hailstorm // 9th Inter Conf on Cloud physics, 545-548
- Kuettner J. 1950. The electrical meteorological conditions inside thunderstorms. *J Meteor*, 7:322-332
- Rawlins F. 1982. A numerical study of thunderstorm electrification using a 3D model incorporating the ice phase. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108:779-800
- Takahashi T. 1976. Hail in an axisymmetric cloud model. *J Atmos Sci*, 33(8):1579-1601
- Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J Atmos Sci*, 35:1536-1548
- Takahashi T. 1984. Thunderstorm electrification—A numerical study. *J Atmos Sci*, 41:2541-2558
- Wisner C H, Orville D, Myers C. 1972. A numerical model of a hail bearing cloud. *J Atmos Sci*, 29(6):1160-1181