

雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用

孙凌 邴秀书 Edward R. Mansell 陈志雄 徐燕 蒋如斌 孙竹玲

Feedback effect of electric field force on electrification and charge structure in thunderstorm

Sun Ling Qie Xiu-Shu Edward R. Mansell Chen Zhi-Xiong Xu Yan Jiang Ru-Bin Sun Zhu-Ling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 169201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180505

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180505>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[近地雷暴电场与羊八井地面宇宙线关联的模拟研究](#)

Simulation study on the correlation between the ground cosmic rays and the near earth thunderstorms electric field at Yangbajing (Tibet China)

物理学报.2015, 64(14): 149202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.149202>

[闪电通道温度诊断中观测距离的影响](#)

Influence of the observation distance on the lightning channel temperature studied by means of spectroscopic diagnosis

物理学报.2014, 63(9): 099203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.099203>

[基于分形理论的飞机雷击初始附着点的数值模拟](#)

Numerical simulations of the lightning attachment points on airplane based on the fractal theory

物理学报.2014, 63(2): 029204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.029204>

[负地闪CPT放电事件的发生规律研究](#)

Occurrence regularity of CPT discharge event in negative cloud-to-ground lightning

物理学报.2014, 63(1): 019202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.019202>

[青藏高原东北部闪电M变化多参量观测](#)

The multi-parameter observation of lightning M changes in northeastern part of the Qinghai-Tibet Plateau

物理学报.2013, 62(18): 189202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.189202>

## 雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用\*

孙凌<sup>1)2)4)</sup> 郅秀书<sup>1)4)†</sup> Edward R. Mansell<sup>3)</sup> 陈志雄<sup>1)4)</sup> 徐燕<sup>1)</sup>  
蒋如斌<sup>1)</sup> 孙竹玲<sup>1)</sup>

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

2) (成都信息工程大学, 成都 610225)

3) (Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, University of Oklahoma and U.S. NOAA/OAR/  
National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA)

4) (中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049)

(2018年3月21日收到; 2018年5月8日收到修改稿)

利用美国国家强风暴实验室(NSSL)发展的耦合了详细起电机制和放电过程的中尺度电耦合数值模式WRF(weather research forecasting)-Elec, 在NSSL云微物理双参数化方案中增加了电场力对霰、雹粒子降落末速度的影响, 完善了WRF-Elec模式的物理过程, 建立了双向耦合WRF-Elec模式. 利用改进后的WRF-Elec模式, 通过敏感性数值实验, 定量分析了雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用. 结果发现: 雷暴云发展旺盛阶段, 由于电场力作用, 霰、雹粒子质量加权平均降落末速度的瞬时变化极值可以超过4 m/s, 但这种情况仅出现在雷暴云内局部区域, 并且维持时间较短; 电场力对直径小且数浓度较低的霰和雹粒子影响较大, 但这种影响不是由单一物理量决定, 而是由电场强度和霰、雹粒子的电荷密度、极性以及粒子的直径与数浓度共同决定; 电场力通过对霰、雹粒子降落末速度的调整, 增强了雷暴云内感应、非感应起电率, 且前者远大于后者, 云内局部产生 $-0.6-1.2 \text{ nC/m}^3$ 总电荷密度的变化, 从而使电荷结构重新分布, 局部垂直电场强度增强5 kV/m, 总闪电数增加, 与此同时, 雷暴云内降水粒子的微观增长过程也发生改变. 总体上, 电场力对雷暴云起电过程的作用为正反馈, 电场力对雷暴云电荷结构的反馈作用不可忽略.

关键词: 电场力, 电荷结构, 反馈作用, WRF-Elec 模式

PACS: 92.60.Pw, 21.10.Ft

DOI: 10.7498/aps.67.20180505

## 1 引言

雷暴云的起电放电是一个复杂的过程. 已有的实验室<sup>[1,2]</sup>和数值模拟<sup>[3-9]</sup>研究表明, 雷暴云内通过感应、非感应等起电机制使各类水成物粒子带电, 并在气流和重力的共同作用下, 在雷暴云内形成垂直方向上正、负交替的电荷区域中心, 当电场强度达到击穿阈值时, 闪电放电发生在两个不同极性的电荷区域之间<sup>[10-12]</sup>, 且以双向先导的形式发展<sup>[13]</sup>. 目前, 对于雷暴起电、放电的观测<sup>[14-17]</sup>及数值模拟<sup>[3-9]</sup>已经取得了大量成果, 但是对于雷暴

云内电场力对起电、放电反馈作用的研究尚少见. 这是因为早期部分学者通过量纲对比认为雷暴内的电场力与浮力加速度相比只是一个小量<sup>[18]</sup>, 因而推断雷暴云内的电场力对动力、微物理及起电、放电的影响可能微乎其微.

随着雷暴云外场观测及云室实验等宏观和微观观测手段的提高以及数值模式中物理过程的不断完善, 越来越多的研究发现, 尽管电场力本身的量级大小无法与其他动力参量相比, 但由于强雷暴中的电场力对各种水成物粒子的下落末速度及粒子间的碰并系数有一定的影响, 因而会造成云内各种水成物粒子的重新分布. Williams和Lher-

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB441401)和国家自然科学基金(批准号: 41630425, 41475002)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjex@mail.iap.ac.cn

mitte<sup>[19]</sup>利用多普勒雷达观测到降水质点下降末速度的逐渐变化与电场变化之间的相关性较好,当然,这种效应似乎只存在于雷暴中的局部区域中,即电场强度接近击穿的区域. Latham和Saunders<sup>[20]</sup>通过云室实验研究指出,在强电化的云中,通过冰晶聚合的方式,雪晶生长率明显增强;Saunders和Wahab<sup>[21]</sup>在此工作基础上进一步指出,当电场超过60 kV/m阈值时,冰晶间碰撞后的合并效率将会增大,冰晶聚合过程增加30%. Schlamp等<sup>[22]</sup>通过模式研究得到强的电场也能够增强水滴与降水元之间的碰并系数,使较大的、快速下落的降水元更容易形成,并且这种过程对于小云滴效果更加明显. Rawlings<sup>[23]</sup>也通过数值模拟指出,当雷暴发展比较旺盛时,在内部局部强电场区域的降水粒子所受到的电场力和重力同数量级,此时降水粒子在雷暴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.

以上研究均表明,在强雷暴中电场力作用不容忽视.随着模式的更新换代及物理过程的不断完善,越来越多的研究者在模式中加入了电场力,研究其对动力、微物理及冰雹过程的影响.孙安平等<sup>[24]</sup>通过在三维强风暴动力-电耦合数值模式中加入电场力,研究了强电场引起的云内微物理场的变化,使得云的中下部区域因相变而释放潜热,造成该区域增温明显,最后影响到动力场的变化.张义军等<sup>[25]</sup>也利用该模式发现强电场的存在总体上使得冰雹总量增加,数目减少,直径增大,使冰雹更易降落到地面.周志敏等<sup>[26]</sup>利用耦合了起电、放电的三维冰粒子分档模式,研究了北京一次强雷暴发展过程中电场力对霰粒子含量、数浓度的影响,指出当电场较大时,电场力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.这些均是在云模式中开展的研究工作,目前高分辨率中尺度模式WRF (weather research forecasting) 不断更新并在实际业务和科研中得到广泛应用<sup>[4,7,9]</sup>,美国国家强风暴实验室(National Severe Storms Laboratory, NSSL)在WRF模式种加入了详细的起电和放电参数化方案,建立了中尺度电耦合数值模式WRF-Elec<sup>[4]</sup>.本文在此模式的基础上,对电场力作用下霰、雹粒子降落末速度的计算公式进行推导,得到更加精确的霰、雹粒子降落末速度.进一步,在NSSL云微物理双参数化方案中对霰、雹粒子降落末速度的计算进行调整和优化,得到物理过程更加完善的双向耦合WRF-Elec模式.最后,利

用改进后的WRF-Elec模式,通过敏感性数值实验,定量分析电场力对于霰、雹粒子降落末速度的影响,进而研究电场力对雷暴云起电和电荷结构的反馈作用.

## 2 WRF-Elec模式及改进

本文采用了由美国强风暴实验室开发的考虑了详细起电、放电过程的中尺度数值模式WRF-Elec,该模式是在三维完全可压缩非静力WRF (V3.7.1) 中的NSSL云微物理双参数方案中,加入了非感应起电、感应起电机制以及粒子在碰撞过程中由于质量转移而改变的电荷量,并且考虑了离子的带电过程.另一方面,在模式的物理模块中加入了放电过程,从而使得WRF-Elec模式能够对雷暴云的起电、放电物理过程进行完整的模拟.

### 2.1 起电参数化方案

WRF-Elec模式中包含了五种非感应起电机制及感应起电机制,Mansell等<sup>[5]</sup>模拟对比了五种非感应起电方案的起电过程,发现基于淞附增长率的RR<sup>[27]</sup>和SP98<sup>[28]</sup>方案对物理条件更加敏感,其产生的电荷结构也更加多样化.Fierro等<sup>[4]</sup>利用加入了SP98方案的WRF-Elec模式模拟了爬线和热带气旋,模拟的总闪电活动分布与观测呈现很好的一致性.基于以上原因,本文采用SP98方案.该方案中,较大的冰相粒子 $x$  (包括霰、雹)与较小的冰相粒子 $y$  (包括冰晶、雪)相互碰撞过程中产生的非感应起电率( $\partial q_{xy}/\partial t$ )的计算公式<sup>[5]</sup>为

$$\frac{\partial q_{xy}}{\partial t} = \beta \delta q_{xy} (1 - E_{xy}) E_{xy}^{-1} (n_{xacy}), \quad (1)$$

式中 $\beta$ 为低温时电荷转移的强制系数, $\delta q_{xy}$ 为粒子间单次碰撞时的加权平均电荷转移量,其值的正负代表了较大冰相粒子 $x$ 同较小冰相粒子 $y$ 碰撞弹开后所获得的电荷极性, $E_{xy}$ 是收集系数, $n_{xacy}$ 为粒子碰撞时的数浓度变化率.单次碰撞的加权平均电荷转移量为

$$\delta q_{xy} = BD_y^a (V_x - V_y)^b q(RAR), \quad (2)$$

式中 $B, a, b$ 为常数; $V_x$ 和 $V_y$ 分别为冰相粒子 $x$ 和 $y$ 的质量加权平均降落末速度; $D_y$ 为冰相粒子 $y$ 的平均体积直径; $q(RAR)$ 为淞附增长率 $RAR$ 的函数<sup>[5]</sup>.

在环境电场存在的条件下, 雷暴云内各种降水粒子通过感应起电机带电荷. 如: 霰和云滴在电场的极化作用下表面产生极化电荷, 当发生碰撞并弹开时, 中和部分电荷后带净电荷的霰与云滴在重力及上升气流的共同作用下分离, 逐渐形成电场. 由于冰晶的低导电性以及较短的接触时间, 模式中未考虑冰晶-冰晶之间的感应起电过程. 另外, 湿增长过程中的霰粒子与云滴之间碰撞后合并而没有机会分离, 因此模式只考虑了干增长过程中的冰相粒子  $s$  (包括霰、冰晶、雹) 同云滴  $c$  之间的感应起电过程, 其感应起电率  $(\partial \rho_s / \partial t)$  计算方程如下:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \frac{\pi^3}{8} \left[ \frac{6.0V_s}{\Gamma(4.5)} \right] E_{sc} E_r n_{t,c} n_{0,s} D_c \times \left[ \pi \Gamma(3.5) \varepsilon \langle \cos \theta \rangle E_z \Delta_{n,s}^2 - \frac{\Gamma(1.5) \rho_s}{3n_{t,s}} \right], \quad (3)$$

式中  $V_s$  为冰相粒子  $s$  的质量加权平均降落末速度;  $\Gamma(x)$  是伽马函数;  $E_{sc}$  是碰撞系数;  $E_r$  是反弹系数;  $n_{t,c}$  和  $n_{t,s}$  为云滴和冰相粒子  $s$  的数浓度;  $n_{0,s}$ ,  $\Delta_{n,s}$  和  $\rho_s$  分别为冰相粒子  $s$  的截距数浓度、特征直径和电荷密度;  $D_c$  为云滴的直径;  $\varepsilon$  是介电常数 ( $8.8592 \times 10^{-12}$  F/m);  $E_z$  是垂直电场强度;  $\langle \cos \theta \rangle$  是反弹角度的余弦平均值.

## 2.2 电场的计算

通过 NSSL 双参数微物理方案中的感应及非感应起电过程的计算, 可以得到空间计算格点上的各种水成物粒子及离子的荷电密度, 并最终得到总电荷密度  $\rho_{tot}$ , 通过泊松方程计算电势  $\Phi$ ,

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho_{tot}}{\varepsilon}. \quad (4)$$

利用并行计算的黑箱多重网格迭代算法 (black box multigrid iterative solver, BoxMG algorithm [29]) 可以求解电场:

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

当云内电场强度达到某一阈值时, 就可能产生闪电. 随着高度的升高, 空气密度减小, 相应的单位距离内电子碰撞引起的能量损耗率降低, 因此维持电子能所需的场强减小, 根据文献 [30], 将电场击穿阈值  $E_{break}$  转换成随空气密度变化, 得到电场击穿阈值  $E_{break}$  的函数表达式为

$$E_{break} = 284 \times \rho_{air}(z) / \rho_0, \quad (6)$$

这里, 284 的单位为 kV/m,  $\rho_0$  为常数 ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ),  $\rho_{air}(z)$  为随高度变化的空气密度, 击穿阈值  $E_{break}$  的单位为 kV/m.

## 2.3 放电参数化方案

为了减少模拟过程中的计算机资源消耗, WRF-Elec 模式采用了整体放电参数化方案, 该方案是在 Ziegler 和 MacGorman [31] 以及 MacGorman 等 [32] 工作的基础上进一步改进的. 计算过程为: 以电场强度超过击穿阈值的点作为放电初始点, 以初始点为中心, 根据影响半径 (可以按照实际模拟需要进行设置) 划定区域、中和部分电荷量, 并且在一个时间步长内, 放电模块会重复计算直到空间内任何一空间格点上电场强度不再超过电场阈值 (具体过程详见文献 [4]). 虽然此方案不能反映一次闪电的微观放电过程随时间的演变, 但是对于闪电的宏观电荷中和的作用效果还是比较好的, 整体上能够反映实际闪电活动的变化趋势.

## 2.4 双向耦合 WRF-Elec 模式的建立

由于原 WRF-Elec 模式为单向电耦合, 即模拟的云内电场力不会对模式原有模拟量产生任何反馈作用. 为了使该模式的物理过程更加完善, 考虑到云内霰、雹粒子为主要的荷电载体, 荷电的霰、雹粒子在电场力的作用下, 降落末速度会发生改变, 从而可能导致碰撞效率和起电效率的改变, 因此, 本文主要针对霰 (g) 和雹 (h) 粒子的降落末速度进行调整. 下面以霰粒子为例, 介绍电场力作用下粒子降落末速度的计算方法.

在一般的积云环境中, 云中大气电场值较低, 当忽略电场力的影响时, 霰粒子主要受重力和空气阻力作用而达到平衡 [23], 单个霰粒子满足如下方程:

$$\frac{1}{8} \pi D^2 C_D \rho_{air} v_g^2(D) = \frac{1}{6} \pi D^3 g (\rho_g - \rho_{air}), \quad (7)$$

式中  $D$  为单个霰粒子的直径;  $v_g(D)$  为单个霰粒子降落末速度;  $g$  为重力加速度;  $C_D$  为拖曳阻力系数, 其值随霰粒子密度  $\rho_g$  线性变化 [6], 由于在 NSSL 微物理方案中霰密度  $\rho_g$  为预测量 [33], 且范围为  $800\text{--}500 \text{ kg/m}^3$ , 因此对于霰粒子,  $C_D$  取值范围为  $0.45\text{--}0.8$ ;  $\rho_{air}$  为空气密度, 得到忽略电场力作用时单个粒子降落末速度  $v_g(D)$  为

$$v_g(D) = \left( \frac{4g(\rho_g - \rho_{air})}{3C_D \rho_{air}} \right)^{1/2} D^{1/2}. \quad (8)$$

在进行格点运算时, 霰粒子质量加权平均降落末速度  $V_g$  的计算公式:

$$V_g = \frac{\int_0^\infty v_g(D)m(D)n(D)dD}{\int_0^\infty m(D)n(D)dD}, \quad (9)$$

式中  $n(D)$  为数浓度分布函数,  $m(D)$  为质量. 将 NSSL 双参数微物理方案的粒子伽马谱分布<sup>[6]</sup>及粒子质量-直径关系代入方程(9)中, 得到忽略电场力时霰粒子质量加权平均降落末速度  $V_g$ :

$$V_g = \left(\frac{4g\rho_g}{3C_D\rho_{\text{air}}}\right)^{1/2} D_g^{1/2} \frac{\Gamma(4.5 + \alpha)}{\Gamma(4 + \alpha)}, \quad (10)$$

式中  $D_g$  为霰粒子的平均体积直径,  $\alpha$  为霰粒子谱的谱形参量.

当考虑电场力的作用时, 重力、阻力及电场力平衡满足如下方程:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{8}\pi D^2 C_D \rho_{\text{air}} v_g^2(D, E) \\ & = \frac{1}{6}\pi D^3 g(\rho_g - \rho_{\text{air}}) + q(D)E_z, \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $q(D)$  为单个霰粒子所带电荷量,  $E_z$  为垂直电场强度. 得到考虑电场力时单个霰粒子的降落末速度  $v_g(D, E)$  为

$$v_g(D, E)$$

$$= \left(\frac{4Dg(\rho_g - \rho_{\text{air}})}{3C_D\rho_{\text{air}}} + \frac{8q(D)E_z}{\pi D^2 C_D \rho_{\text{air}}}\right)^{1/2}. \quad (12)$$

由于该方程积分运算困难, 因此参考 Rawlings<sup>[23]</sup> 方法, 定义单个粒子延迟速度  $v_g^*(D, E)$  为

$$v_g(D, E) = v_g(D) - v_g^*(D, E). \quad (13)$$

$v_g(D)$  可由方程(8)求得, 对方程(13)取平方并利用近似关系

$$\begin{aligned} & 2(v_g(D) - v_g^*(D, E))v_g^*(D, E) \\ & \approx 2v_g(D)v_g^*(D, E), \end{aligned} \quad (14)$$

得到单个粒子延迟速度  $v_g^*(D, E)$  为

$$v_g^*(D, E) = -4q(D)E_z/\pi D^2 C_D \rho_{\text{air}} v_g(D). \quad (15)$$

假设单个霰粒子所带电荷量  $q(D)$  与  $D^2$  成正比, 则有,

$$q(D) = \frac{\rho_g \Gamma(1 + \alpha)}{D_g^2 N_g \Gamma(1 + \alpha + 2)} D^2, \quad (16)$$

式中  $\rho_g$  及  $N_g$  分别为霰粒子电荷密度及数浓度.

利用方程(15), (16)及(9), 得到霰粒子质量加权平均延迟速度  $V_g^*$  为

$$V_g^* = -\frac{4E_z \rho_g \Gamma(1 + \alpha) \Gamma(3.5 + \alpha)}{\left(\frac{4g\rho_g}{3C_D\rho_{\text{air}}}\right)^{1/2} D_g^{5/2} \pi C_D \rho_{\text{air}} N_g \Gamma(3 + \alpha) \Gamma(4 + \alpha)}. \quad (17)$$

因此, 根据方程(13), 得到考虑电场力时霰粒子的质量加权平均降落末速为

$$\begin{aligned} V_{g,E} = V_g - V_g^* & = \left(\frac{4g\rho_g}{3C_D\rho_{\text{air}}}\right)^{1/2} D_g^{1/2} \frac{\Gamma(4.5 + \alpha)}{\Gamma(4 + \alpha)} \\ & + \frac{4E_z \rho_g \Gamma(1 + \alpha) \Gamma(3.5 + \alpha)}{\left(\frac{4g\rho_g}{3C_D\rho_{\text{air}}}\right)^{1/2} D_g^{5/2} \pi C_D \rho_{\text{air}} N_g \Gamma(3 + \alpha) \Gamma(4 + \alpha)}. \end{aligned} \quad (18)$$

对比(10), (17)及(18)式发现, 电场力作用引起的霰粒子降落末速度增量((18), (10)式)与质量加权平均延迟速度  $V_g^*$ ((17)式, 以下简称霰粒子延迟速度)符号相反, 大小与电场强度( $E_z$ )和霰粒子电荷密度( $\rho_g$ )成正比, 与霰粒子平均体积直径( $D_g$ )及数浓度( $N_g$ )成反比, 符号由电场强度( $E_z$ )和电荷密度( $\rho_g$ )共同决定. 对于雹粒子, 同样采用(17)式, 但  $C_D$  取值范围为 0.45—0.6<sup>[6]</sup>, 并将公式中谱形参量、平均体积直径、电荷密度及数浓

度等物理量替换成雹粒子参量进行计算, 得到雹粒子质量加权平均延迟速度  $V_h^*$ (以下简称雹粒子延迟速度). 考虑电场力作用后的降落末速度所代表的物理意义更加全面, 根据(18)式, 将模式中原有的霰、雹粒子降落末速度的计算代码进行替换, 得到更加精确的霰、雹粒子质量加权平均降落末速度, 从而在模式中补充了电场力对模式原有模拟量反馈作用的物理过程, 最终建立双向耦合 WRF-Elec 模式.

### 3 方案设计

本文选取WRF模式中Weisman和Klemp<sup>[34]</sup>经典的热力探空曲线作为模式的初值场来模拟理想超级单体, 相应的探空廓线如图1所示. 由探空图可见, 低层700 hPa附近风场随高度强烈顺转, 西南气流维持, 850 hPa以下露点温度差小, 相对湿度很大, 水汽充沛, 形成了稳定的逆温层(850 hPa附近). 抬升凝结高度为873 hPa, 高度较低, 对流不稳定能量(convective available potential energy, CAPE)值达到2634 J/kg. 综合来看, 充沛的水汽、大的不稳定能量以及风场随高度强烈顺转, 为超级单体的爆发和维持提供了有利条件.

模拟区域设置为200 km × 200 km × 20 km, 水平分辨率为500 m × 500 m, 模式层顶为20 km, 垂直层为41层, 积分步长为3 s, 总模拟时间为90 min.

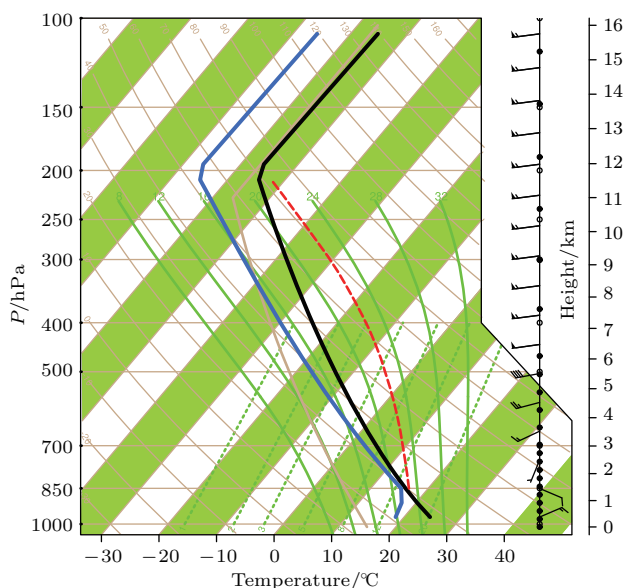


图1 模拟所用的探空廓线(黑线/蓝线为温度/露点温度廓线, 单位°C; 红色虚线与黑线所围的面积为CAPE)

Fig. 1. Sounding profiles used in the simulation (black/blue line is temperature/dew point temperature profile, unit °C; the encircled area by red dotted line and black line is CAPE).

为了定量分析雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用, 分别对不考虑电场力(nonelectric field force, NEF)和考虑电场力(electric field force, EF)算例, 利用霰、雹粒子质量加权平均降落末速度的计算公式(方程(10)及(18)), 对同一个理想超级单体进行敏感性数值实验, 分析雷暴云内电场力对起电、电荷结构以及闪电活动的影响.

### 4 数值模拟实验结果与分析

#### 4.1 不考虑NEF的雷暴发展过程

该超级单体14 min开始产生, 到18 min强回波中心达到45 dBZ, 回波顶高超过10 km. 36 min时单体发展旺盛, 45 dBZ面积明显增大, 强回波中心达到55 dBZ. 44 min强回波中心达到65 dBZ, 位于6 km高度处(图2(a)). 由于64 min后超级单体开始分裂, 为了着重分析电场力对单个超级单体的影响, 因此分析时段选为12—64 min.

由图2可见, 12 min开始, 雷暴云内开始出现强上升气流, 上升速度体积超过35 km<sup>3</sup>, 伴随强上升气流, 大量的水汽被带到雷暴云中上部, 5 g/m<sup>3</sup>云水含量(cloud water content, CWC)位于6—10 km之间, 且其高度随时间变化不大. 雷暴云上升速度体积在20 min出现明显增强, 此时霰粒子通过非感应起电主要带正电荷, 正电荷集中区与高云水含量区域重合, 从而形成了雷暴云中部的正电荷区, 与雷暴云下部通过感应起电带负电的霰及上部由非感应起电带负电的冰晶一起构成了上负、中正、下负的反三极性电荷结构. 量值超过100 kV/m的电场强度主要位于雷暴云中上部6—10 km, 位于主正电荷区与下部主负电荷区之间. 值得注意的是, 从雷暴发展的44 min开始, 上升气流体积再次增大(>150 km<sup>3</sup>), 随着上升气流的不断增强, 在56 min, 整层霰粒子荷正、负电荷量均出现明显的跃增, 电场强度也有明显的增加, 特别是正电场强度在6—8 km出现120 kV/m的极值.

#### 4.2 电场力对霰、雹粒子降落末速度影响

图3给出了EF算例(考虑电场力)模拟计算(17)式得到的霰和雹粒子延迟速度 $V_g^*$ 及 $V_h^*$ 随时间的变化. 由图可见, 电场力对雷暴云中霰和雹粒子下落末速度的影响是从56 min开始明显增强, 这一时刻与56 min开始增强的电场强度相对应. 正 $V_g^*$ 、负 $V_g^*$ 及正 $V_h^*$ 极值均超过4 m/s, 对应峰值时间分别为63, 61, 63 min, 特别是负 $V_g^*$ 极值达到了13.8 m/s, 但是维持时间很短, 随后快速减弱. 负 $V_h^*$ 极值则较小, 仅为0.02 m/s. 需要注意, 延迟速度 $V_g^*$ 及 $V_h^*$ 与降落末速度的增量(18)和(10)符号相反, 因此结合以上分析可知, 电场力的作用增强了霰粒子的下降, 而对雹粒子的降落起减弱作用.

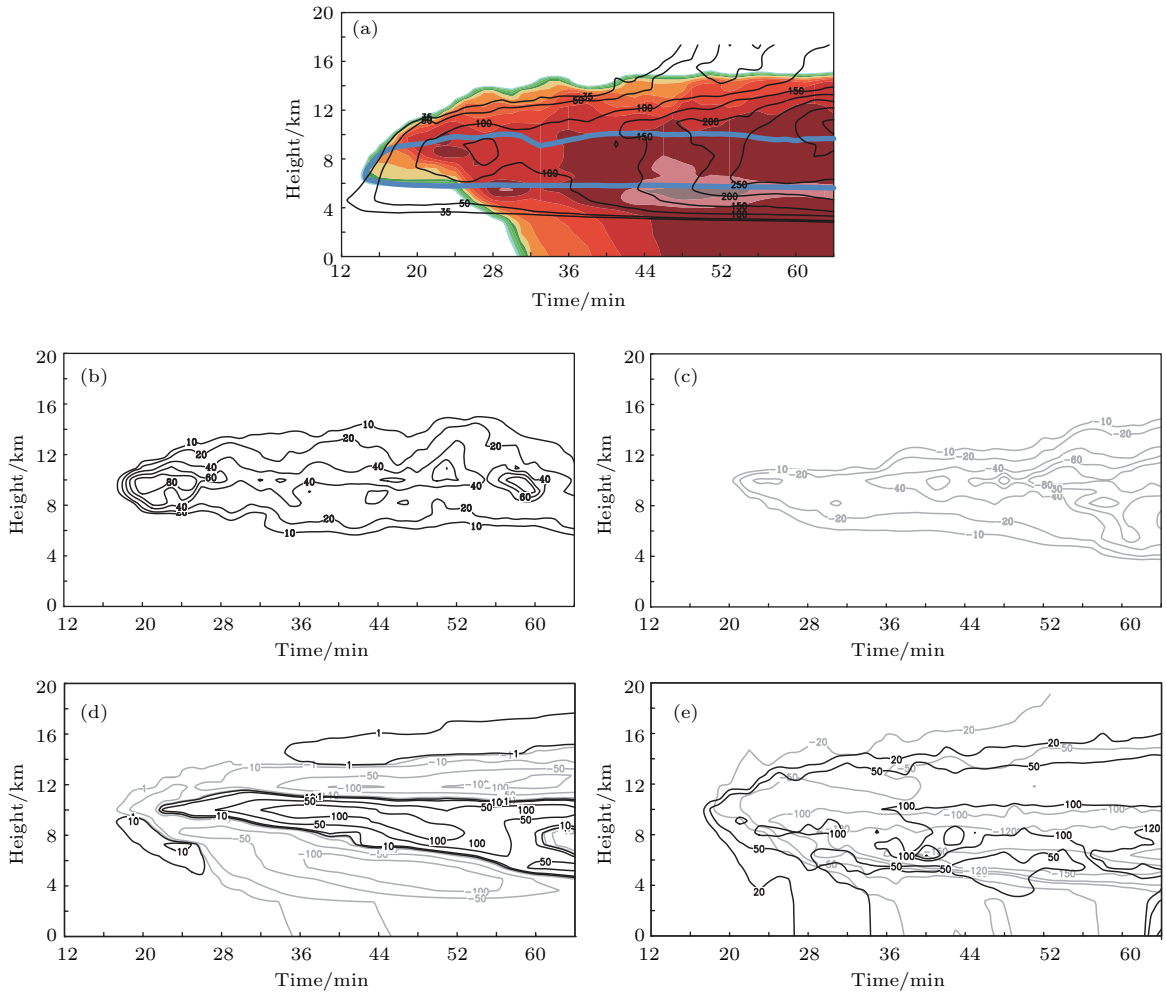


图2 NEF 算例模拟的各物理量高度-时间变化 (a) 最大组合反射率 (填色, 单位 dBZ),  $5 \text{ g/m}^3$  CWC (蓝色线),  $>5 \text{ m/s}$  上升速度体积 (黑色线, 单位  $\text{km}^3$ ); (b) 整层霰粒子荷正电荷量 (黑色实线, 单位 C/level); (c) 整层霰粒子荷负电荷量 (灰色线, 单位 C/level); (d) 整层总电荷量 (黑色/灰色线分别为正/负, 单位 C/level); (e) 电场强度极值 (黑色/灰色线分别为正/负, 单位 kV/m)

Fig. 2. Time-height distribution of (a) maximum reflectivity (shaded, unit dBZ),  $5 \text{ g/m}^3$  CWC (blue line),  $>5 \text{ m/s}$  updraft volume (black lines, unit  $\text{km}^3$ ); (b) layer graupel positive charge (black lines, unit C/level); (c) layer graupel negative charge (gray lines, unit C/level); (d) layer net charge (black/gray lines for positive/negative, unit C/level); (e) peak electric field (black/gray lines for positive/negative, unit kV/m).

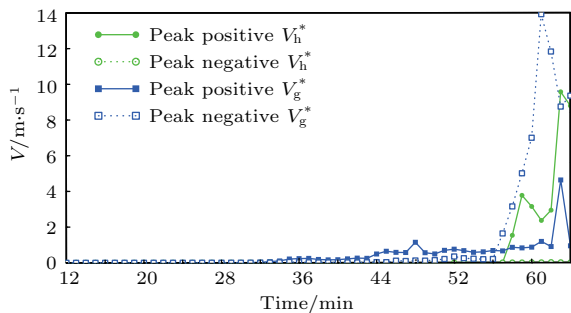


图3  $V_g^*$  及  $V_h^*$  的正、负极值随时间变化 (单位:  $\text{m/s}$ )

Fig. 3. Time distribution of peak positive and negative value of  $V_g^*$  and  $V_h^*$  (unit:  $\text{m/s}$ ).

为了分析霰和雹粒子延迟速度  $V_g^*$  和  $V_h^*$  的变化特征, 将  $|V_g^*|$  及  $|V_h^*|$  划分为三个范围: 小于

$0.1 \text{ m/s}$ ,  $0.1\text{--}1 \text{ m/s}$  以及大于  $1 \text{ m/s}$ . 图4为不同  $|V_g^*|$  及  $|V_h^*|$  范围的电场强度绝对值、电荷密度绝对值、粒子直径和数浓度统计分析 (由于其他物理量变化较小, 不存在量级上的变化, 因此分析时未做考虑). 由图可见, 随着  $|V_g^*|$  和  $|V_h^*|$  的增大, 电场强度与电荷密度绝对值的平均值变化明显, 并呈现显著增加的趋势, 但对于相同范围的  $V_g^*$  和  $V_h^*$ , 霰粒子的电场强度更大. 而随着  $|V_g^*|$  的增加, 霰粒子的直径和数浓度平均值变化并不明显, 但是分布范围变化显著, 且呈减小趋势. 与霰粒子不同, 随着  $|V_h^*|$  的增大, 虽然雹粒子的直径和数浓度变化不明显, 但是仍能看出大致呈现反相关关系. 因此可以得出, 电场力对直径小且数浓度较低的霰、

雹粒子的影响更大,这也与Schlamp等[22]及周志敏等[26]的结论一致.但这种影响并不是由单一物

理量决定,不仅由电场强度及电荷密度所决定,同时还受粒子本身的直径和数浓度影响.

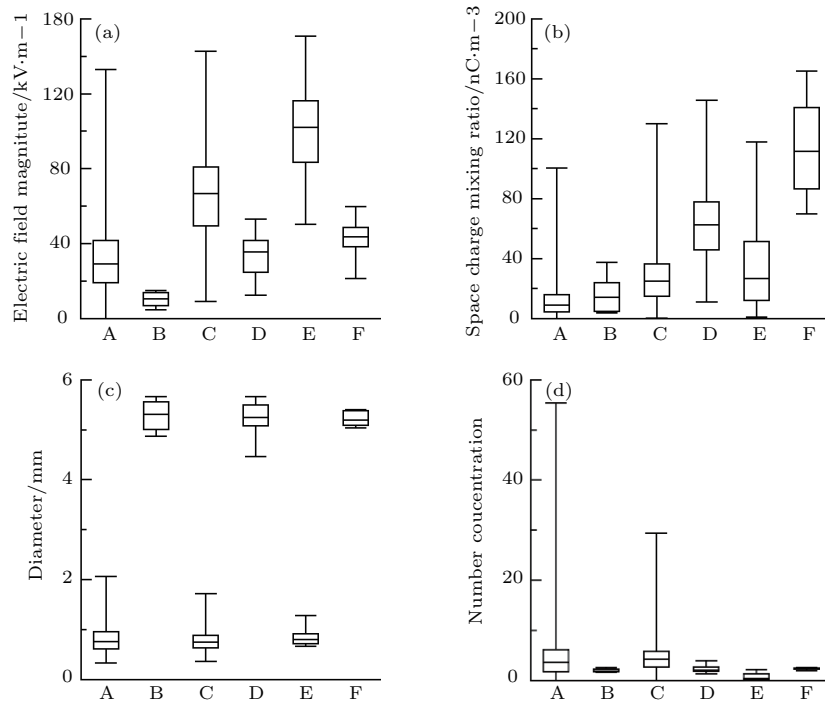


图4 不同 $|V_g^*|$ 及 $|V_h^*|$ 范围的物理量统计分析(A, C, E为 $|V_g^*|$ ; B, D, F为 $|V_h^*|$ ;变化范围: A, B为 $<0.1$  m/s; C, D为 $0.1\text{--}1$  m/s); E, F为 $>1$  m/s) (a) 电场强度绝对值(单位kV/m); (b) 电荷密度绝对值(单位nC/m<sup>3</sup>); (c) 直径(单位mm); (d) 数浓度(单位A, C, E, 10<sup>3</sup>个/kg; B, D, F, 个/kg)

Fig. 4. Statistical analysis of physical quantity in different range of  $|V_g^*|$  and  $|V_h^*|$  (A, C, E,  $|V_g^*|$ ; B, D, F,  $|V_h^*|$ ; A, B,  $<0.1$  m/s; C, D,  $0.1\text{--}1$  m/s; E, F,  $>1$  m/s): (a) The absolute value of electric field (unit kV/m); (b) the absolute value of charge density (unit nC/m<sup>3</sup>); (c) diameter (unit mm); (d) number concentration (unit A, C, E, 10<sup>3</sup> number/kg; B, D, F, number/kg).

### 4.3 电场力对起电和电荷结构的反馈作用

闪电频数可以反映雷暴云起电的强度.图5给出了考虑电场力EF和不考虑电场力NEF两个算例模拟的总闪电频数(1 min内空间格点上的闪电个数总和)及单个计算格点上闪电频数的极值随时间的变化.由图可见,与NEF算例相比,EF算例模拟得到的闪电频数极值有增有减,但是随着雷暴的发展,总闪电频数的差异越来越明显.尤其从50 min开始,EF算例与NEF算例模拟的总闪电频数均呈现明显增加,与此同时,闪电频数的增量(EF-NEF)也越来越大.总体上,雷暴云内电场力对闪电活动为正反馈,但是这种反馈作用并不是一开始就体现,而是在雷暴发展旺盛阶段才出现的,因此可以推测,如果对实际强雷暴系统的完整发展过程进行模拟,这种反馈作用很可能会更加明显.另外,模拟的闪电频数比实际大,这是因为真实闪电是由多个辐射源组成的,并且在计算闪电时,通

常将发生在一定时空范围内的辐射源认为是一次闪电过程,而本次模拟采用的空间分辨率较细,且单个格点上电场强度超过阈值则认为是一次闪电发生,因此造成了模拟总闪电频数比实际大.即便如此,仍然能从两个算例闪电频数的变化趋势发现,整体上,电场力增强了雷暴云内的起电过程及闪电活动.

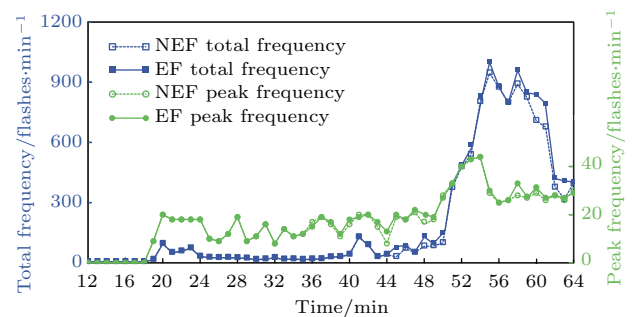
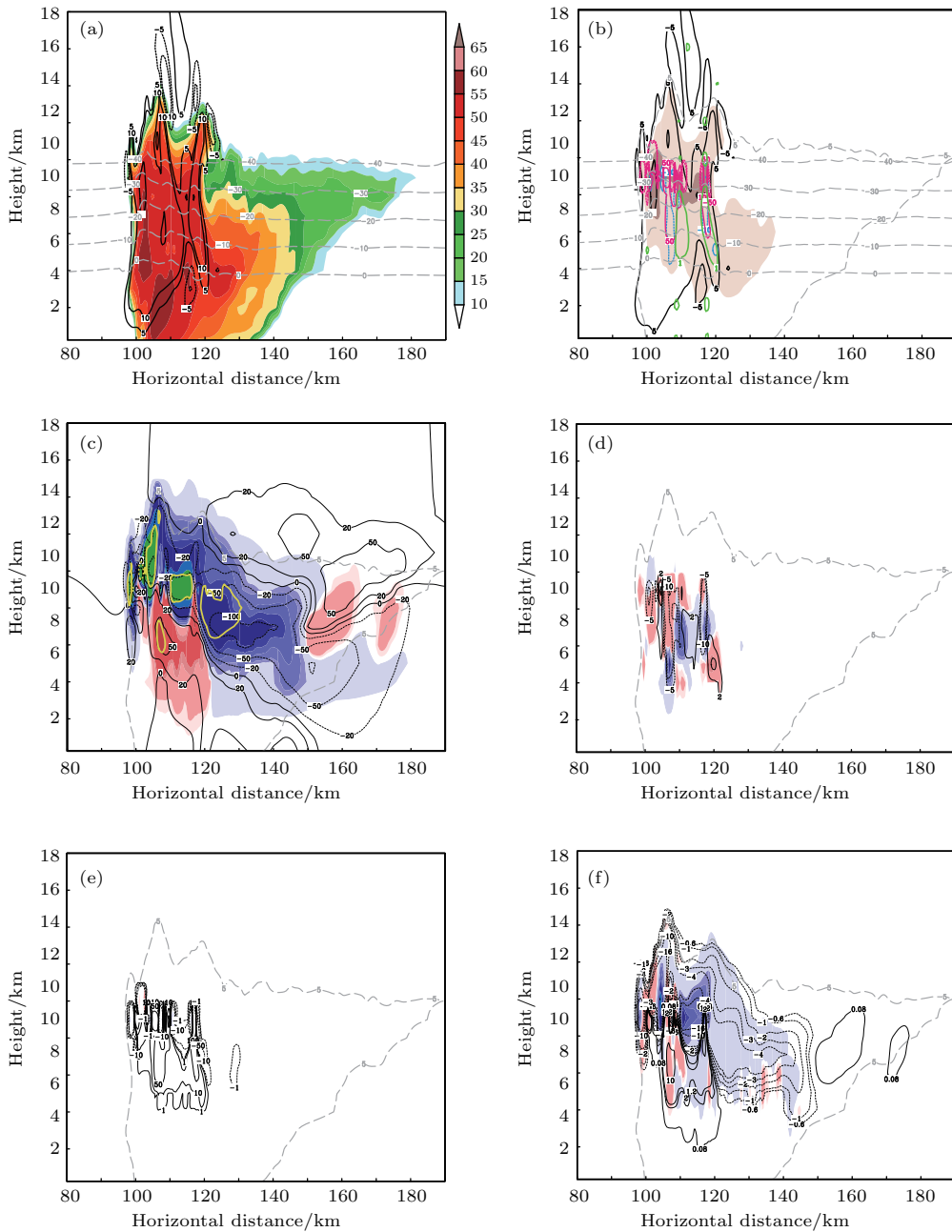


图5 两个算例模拟的空间总闪电频数及空间格点上闪电频数的极值随时间变化(单位flashes/1 min)

Fig. 5. Total lightning frequency and peak lightning frequency in two cases (unit flashes/1 min).

根据图 5, 选取第 60 min 闪电频数出现明显差异的时刻, 分别对 NEF 与 EF 算例模拟的超级单体沿  $y = 114$  km 取剖面, 分析电场力对雷暴云起电及电荷结构的反馈作用. 从图 6 (a) 可见, 该时刻雷暴发展旺盛, 雷达回波顶高超过 12 km, 雷暴云中以上升气流为主, 剖面图上雷达回波中心超过 55 dBZ. 雷暴云内以非感应起电为主、感应起电为辅 (图 6 (b)), 霰粒子通过感应及非感应起电过程形成了上负、下正的电荷结构. 电场力引起的霰粒子降落末速度的增加 (图中黄色实线, 增量为 0.5 m/s) 主要发生在电荷密度低于  $-4$  nC/m<sup>3</sup> 且电场强度小于  $-50$  kV/m 区域, 或电荷密度大于

$2$  nC/m<sup>3</sup> 且电场强度高于  $50$  kV/m 的区域; 而降落末速度减小区域 (图中黄色虚线, 增量为  $-0.5$  m/s) 分布在水平距离 102 km, 10 km 高度处, 该区域电荷密度大, 中心值为  $-90$  nC/m<sup>3</sup>, 但电场强度小, 最大仅为  $20$  kV/m. 对比图 6 (d) 和图 6 (e) 发现, 相对于非感应起电, 电场力对感应起电过程的影响大. 感应起电率的四个增强集中区分别位于: 水平距离 104 km, 9 km 高度及水平距离 120 km, 5 km 高度处, 分别在原感应起电带正电荷基础上增加了  $10$  nC/m<sup>3</sup> 及  $2$  nC/m<sup>3</sup> 正电荷; 在水平距离 108 km, 5 km 高度区域及水平距离 119 km, 7 km 高度区域, 分别在原感应起电带负电荷的基础上增加了



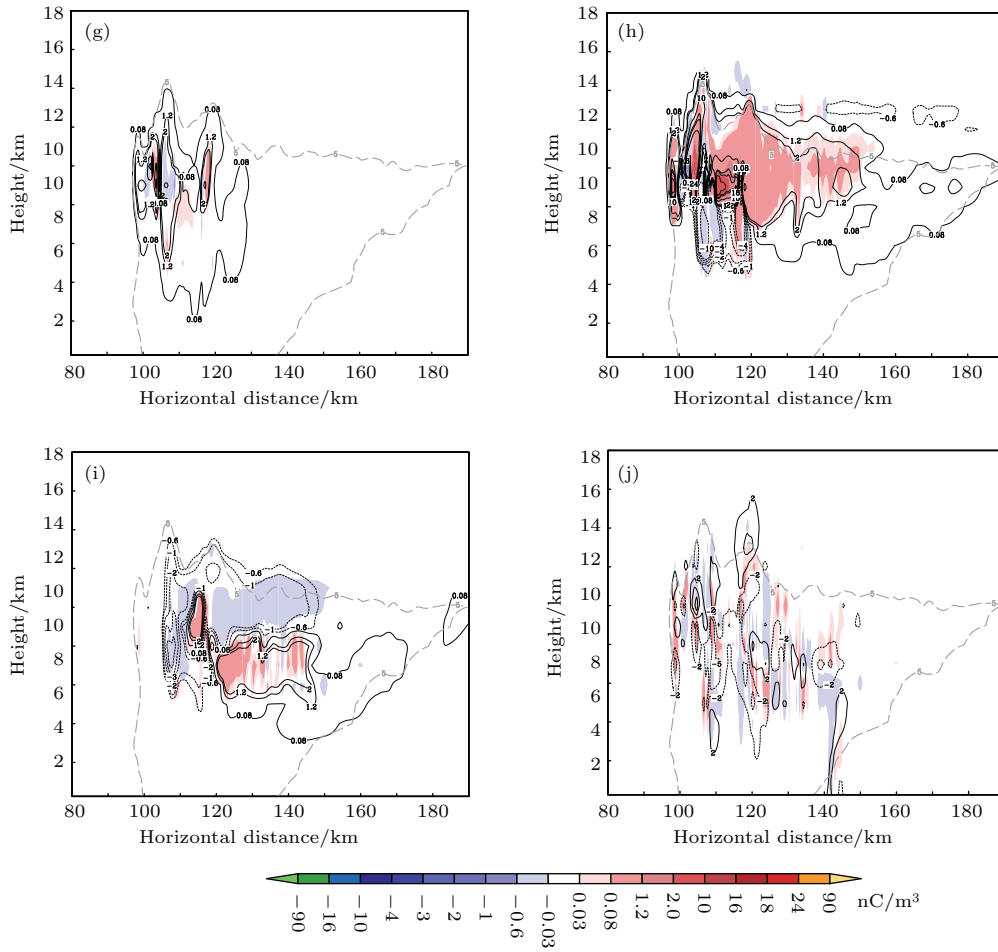


图6 60 min 沿着  $y = 114$  km 剖面的 (a) NEF 算例反射率 (填色, 单位 dBZ) 及  $0, -10, -20, -30, -40$  °C 等温线 (灰色点线, 同 (b)), 黑色实线/虚线分别为上升/下沉气流 (单位 m/s); (b) NEF 算例非感应起电率 (粉色, 实线/虚线为正/负, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), 感应起电率 (蓝色, 实线/虚线为正/负, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), CWC (绿色实线, 单位  $\text{g}/\text{m}^3$ ) 与 5 dBZ 组合反射率廓线 (黑色实线, 同 (b)–(j)); (c) NEF 算例霰粒子电荷密度 (填色, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ )、垂直电场 (黑色, 实线/虚线为正/负, 单位  $\text{kV}/\text{m}$ ) 与降落末速度增量 (增量为 EF-NEF 算例, 黄色,  $\pm 0.5$  m/s, 实线/虚线为正/负); (d)–(i) 分别为 NEF 算例的感应起电率、非感应起电率、霰粒子电荷密度、雹粒子电荷密度、冰晶电荷密度、雪晶电荷密度 (黑色, 实线/虚线为正/负, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ ) 及对应物理量的增量 (EF-NEF 算例, 填色, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ ); (j) 总电荷密度增量 (填色, 单位  $\text{nC}/\text{m}^3$ ) 与垂直电场强度增量 (黑色, 实线/虚线为正/负, 单位  $\text{kV}/\text{m}$ )

Fig. 6. Vertical cross sections at  $y = 114$  at 60 min (a) reflectivity in NEF (shaded, unit dBZ) and the temperature lines (gray dashed lines) of  $0, -10, -20, -30$  and  $-40$  °C were labeled in the (a), (b), the solid/dashed lines for updraft/downdraft (unit m/s); (b) noninductive charging rate (pink contour, solid /dashed lines for positive/negative, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), inductive charging rate (blue contour, solid /dashed lines for positive/negative, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), CWC (green solid contour, unit  $\text{g}/\text{m}^3$ ) and 5 dBZ echo top in NEF (black dashed contour, unit dBZ) in both (b)–(j); (c) graupel space charge density (shaded, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), vertical electric field (black contour, solid /dashed for positive/negative, unit  $\text{kV}/\text{m}$ ) and the increment of fall speed of graupel between EF and NEF cases (EF-NEF, yellow contour,  $\pm 0.5$ , solid /dashed lines for positive/negative); (d)–(i) for inductive charging rate, noninductive charging rate and graupel, hail, ice, snow charge density in NEF (black, solid /dashed lines for positive/negative, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ), respectively, and the increment of corresponding variables (EF-NEF, shaded, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ); (j) the increment of total charge density (shaded, unit  $\text{nC}/\text{m}^3$ ) and the increment of vertical electric field (black, solid/dashed lines for positive/negative, unit  $\text{kV}/\text{m}$ ).

$10 \text{ nC}/\text{m}^3$  及  $4 \text{ nC}/\text{m}^3$  负电荷. 而电场力对非感应起电过程的影响弱, 在 9 km 高度处、水平距离 98 km 及 110 km 非感应起电率均有微弱减少; 水平距离 104 km、高度 10 km 区域, 非感应起电率有

弱增加. 电场力对于霰、雹、冰晶及雪粒子的电荷密度均有不同程度的影响, 相比较而言, 霰及冰晶电荷密度的变化较大. 综合效果, 电场力的作用产生  $-0.6$ – $1.2 \text{ nC}/\text{m}^3$  总电荷密度的变化, 造成  $-5$ –

2 kV/m 电场的改变.

## 5 讨论与结论

本文基于加入详细起电、放电过程的中尺度 WRF-Elec 模式, 推导了电场力作用下霰、雹粒子降落末速度的计算公式, 得到了更加精确的霰、雹粒子降落末速度; 进一步, 调整和优化了 NSSL 云微物理双参数化方案中霰、雹粒子降落末速度的计算代码, 建立了物理过程更加完善的双向耦合 WRF-Elec 模式. 利用改进后的 WRF-Elec 模式, 通过理想数值实验, 定量分析了电场力对于霰、雹粒子降落末速度的影响以及对云内起电和电荷结构的反馈作用, 得到以下结论.

1) 在 14 min 时, 超级单体开始产生, 到 18 min 强回波中心达到 45 dBZ, 回波顶高超过 10 km. 霰粒子通过非感应起电机在高云水含量区域主要带正电荷, 形成了雷暴云中部的正电荷区, 雷暴云下部霰粒子通过感应起电过程荷负电, 与上部由非感应起电荷负电的冰晶一起构成了上负、中正、下负的反三极性电荷结构. 量值超过 100 kV/m 的垂直电场主要位于雷暴云中部的 6—10 km, 位于主正电荷区与下部主负电荷区之间. 随着 56 min 时上升气流的再次增强, 整层霰粒子荷正、负电荷量均出现明显的跃增, 电场强度明显增加.

2) 从 56 min 开始, 雷暴发展旺盛阶段, 电场力对霰、雹粒子下落末速度的影响明显增强. 电场力对单个格点上霰、雹粒子质量加权降落末速度的瞬时改变极值可以超过 4 m/s, 但这种情况仅出现在雷暴云内局部区域, 且维持时间很短. 电场力对直径小且数浓度较低的霰和雹粒子的影响更加明显, 但这种影响并不是由单一物理量决定, 而是由电场强度、电荷密度及粒子本身的直径和数浓度共同决定的. 整体上, 电场力的作用增强了霰粒子的下降, 而对雹粒子的降落起减弱作用.

3) 与未考虑电场力作用的算例相比, 考虑电场力反馈作用后, 模拟得到的单个计算格点上闪电频数的极值有增有减, 但空间总闪电频数呈现增加趋势, 且这种差异并不是一开始就体现, 而是在雷暴发展旺盛阶段才出现的. 电场力通过对霰、雹粒子降落末速度的调整, 增强了雷暴云内感应、非感应起电率, 且前者远大于后者, 造成云内局部产生  $-0.6\text{—}1.2\text{ nC/m}^3$  总电荷密度的变化, 从而使电荷结构重新分布, 局部垂直电场强度增强 5 kV/m.

本文通过理想超级单体的数值模拟, 分析了电场力对霰、雹粒子降落末速度的影响以及对起电和电荷结构的直接反馈作用, 取得了一定的研究成果, 但仍有问题尚未得到解决. 一方面, 电场力通过对粒子降落末速度的调整, 改变了雷暴云起电和电荷结构的同时, 也改变了雷暴云中降水粒子的微观增长过程以及水成物粒子(特别是霰与雹)的源汇项及潜热释放等重要参量. 例如在图 6 的垂直剖面上, 由于电场力的作用, 霰、雹、冰晶及雪四种降水粒子的质量混合比均产生了不同程度的改变, 变化范围分别为:  $-0.09\text{—}0.24$ ,  $-0.16\text{—}0.04$ ,  $-0.04\text{—}0.05$ ,  $-0.01\text{—}0.006\text{ g/kg}$  (图略). 另一方面, 本文只考虑了电场力对降落末速度的影响, 然而越来越多的研究者发现电场力对粒子之间碰并效率的影响也不容忽视, 如 Connolly 等<sup>[35]</sup>及 Lawson 等<sup>[36]</sup>通过飞机穿云观测指出冰晶聚合过程可以发生在低于  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  温度层区域, Pedernera 和 Ávila<sup>[37]</sup>通过实验室研究证实低于此温度的冰晶聚合过程是由不同电荷区之间的强电场引起的, 但是目前还没有相对定量的参数化方案. 因此, 未来迫切需要精确的实验和更合理的参数化方法来完善电场力对雷暴云动力、微物理反馈的物理过程, 并在模式中引入更加完整的电反馈机制, 才能更加合理地在数值模式中考虑电场力的影响.

## 参考文献

- [1] Takahashi T 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 1536
- [2] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 11007
- [3] Li W L, Liu D X, Qie X S, Fu S M, Duan S, Chen Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 059202 (in Chinese) [李万莉, 刘冬霞, 鄒秀书, 傅慎明, 段树, 陈羿辰 2012 物理学报 **61** 059202]
- [4] Fierro A O, Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L 2013 *Mon. Wea. Rev.* **141** 2390
- [5] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, Straka J M 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D12101
- [6] Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C 2010 *J. Atmos. Sci.* **67** 171
- [7] Guo F X, Li Y, Huang Z C, Wang M F, Zeng F H, Lian C H, Mu Y J 2017 *Sci. China: Earth Sci.* **60** 2204
- [8] Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, Zhu J R, Guo X F 2014 *Sci. China: Earth Sci.* **57** 2125
- [9] Xu L T, Zhang Y J, Liu H Y, Zheng D, Wang F 2016 *Sci. China: Earth Sci.* **59** 1414
- [10] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 鄒秀书, 孔祥贞, 张广

- 庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [11] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 郗秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [12] MacGorman D R, Straka J M, Ziegler C L 2001 *J. Appl. Meteor.* **40** 459
- [13] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Wang J F, Liu D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 郗秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 王俊芳, 刘冬霞 2011 物理学报 **60** 079201]
- [14] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J, Wang D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069202 (in Chinese) [曹冬杰, 郗秀书, 段树, 宣越建, 王东方 2012 物理学报 **61** 069202]
- [15] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [16] Wang J F, Qie X S, Lu H, Zhang J L, Yu X X, Shi F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 159202 (in Chinese) [王俊芳, 郗秀书, 卢红, 张吉龙, 于晓霞, 石峰 2012 物理学报 **61** 159202]
- [17] Liu D X, Qie X S, Wang Z C, Wu X K, Pan L X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 219201 (in Chinese) [刘冬霞, 郗秀书, 王志超, 吴学珂, 潘伦湘 2013 物理学报 **62** 219201]
- [18] Vonnegut B 1963 *Meteorol. Monogr.* **27** 24
- [19] Willams E R, Lhermitte R M 1983 *J. Geophys. Res.* **88** 10984
- [20] Latham J, Saunders C P R 1967 *J. Glaciol.* **6** 505
- [21] Saunders C P R, Wahab N M A 1975 *J. Met. Soc. Japan* **53** 121
- [22] Schlamp R J, Grover S N, Pruppacher H R, Hamielec A E 1976 *J. Atmos. Sci.* **33** 1747
- [23] Rawlings F 1982 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **108** 779
- [24] Sun A P, Zhang Y J, Yan M H 2004 *Plateau Meteorol.* **23** 26 (in Chinese) [孙安平, 张义军, 言穆弘 2004 高原气象 **23** 26]
- [25] Zhang Y J, Sun A P, Yan M H, Guo F X, Qie X S, Huang M Y 2004 *Chin. J. Geophys.* **47** 25 (in Chinese) [张义军, 孙安平, 言穆弘, 郭凤霞, 郗秀书, 黄美元 2004 地球物理学报 **47** 25]
- [26] Zhou Z M, Guo X L, Cui C G, Li X Y, Xu G R, Zhao Y C 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **69** 830 (in Chinese) [周志敏, 郭学良, 崔春光, 李兴宇, 徐桂荣, 赵玉春 2011 气象学报 **69** 830]
- [27] Brooks I M, Saunders C P R, Mitzeva R P, Peck S L 1997 *Atmos. Res.* **43** 277
- [28] Saunders C P R, Peck S L 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 13949
- [29] Dendy J E 1987 *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* **8** 673
- [30] Dwyer J R 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 2055
- [31] Ziegler C L, MacGorman D R 1994 *J. Atmos. Sci.* **51** 833
- [32] MacGorman D R, Strake J M, Ziegler C L 2001 *J. Appl. Meteorol.* **40** 459
- [33] Mansell E R, Ziegler C L 2013 *J. Atmos. Sci.* **70** 2032
- [34] Weisman M L, Klemp J B 1982 *Mon. Wea. Rev.* **110** 504
- [35] Connolly P J, Saunders C P R, Gallagher M W, Bower K N, Flynn M J, Choullarton T W, Whiteway J, Lawson R P 2005 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **131** 1695.
- [36] Lawson R P, Baker B A, Pilson B L 2003 *30th International Symposium on Remote Sensing of Environment* Honolulu, Hawaii, November 10–14, 2003 p707
- [37] Pedernera D A, Ávila E E 2018 *J. Geophys. Res.* **123** 1244

# Feedback effect of electric field force on electrification and charge structure in thunderstorm\*

Sun Ling<sup>1)2)4)</sup> Qie Xiu-Shu<sup>1)4)†</sup> Edward R. Mansell<sup>3)</sup> Chen Zhi-Xiong<sup>1)4)</sup> Xu Yan<sup>1)</sup>  
 Jiang Ru-Bin<sup>1)</sup> Sun Zhu-Ling<sup>1)</sup>

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

2) (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

3) (Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, University of Oklahoma and U.S. NOAA/OAR/National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA)

4) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 21 March 2018; revised manuscript received 8 May 2018 )

## Abstract

The electrification within the thunderstorm, caused mainly by inductive and noninductive charging mechanism, can produce strong local electric field inside the thundercloud. Due to the resulting electric field force, the vertical velocity of the graupel and hail particles which are the main in-cloud charge carriers, would change. As a feedback, this variation could affect the original electrification and charge structure of the thunderstorm. In order to investigate such a feedback effect, a weather research forecasting (WRF) model coupled with explicit lightning physics including charging and discharge lightning scheme (hereafter WRF-Elec) is employed and modified in this study. We derive the formulas for calculating the mass-weighted mean terminal velocities of graupel and hail under the balance among gravity, resistance and electric field force. Then, the National Severe Storm Laboratory (NSSL) two-moment bulk microphysics scheme is modified by adding the calculating code with consideration of electric field force (EFF) acting on the fall speed of graupel and hail particles. Eventually, the two-coupled WRF-Elec is developed successfully.

Based on this modified WRF-Elec, sensitivity tests are conducted to quantitatively investigate the influences of EFF on the thunderstorm electrification and the corresponding charge structure in an idealized supercell case. The results show that during the rapid enhancement of the thunderstorm, the grid-scale mass-weighted mean fall speed of graupel and hail vary significantly in consideration of EFF, with the maximum values both exceeding 4 m/s, although this situation occurs within a local area and lasts a short time. The action of EFF tends to enhance the falling of graupel and weaken the falling of hail. The influences of EFF on those graupel and hail particles with smaller-size and lower number concentration are stronger, as determined by composite factors of the strength and polarity of electric field, the diameter and number concentration of graupel and hail, and their charge density and polarity as well. The adjustment of the terminal velocity of the graupel and hail in consideration of EFF, eventually results in increasing the rate of both inductive and noninductive charge separation, where the inductive charging is the much more significant one. This leads to a grid-scale total charge density variation of  $-0.6\text{--}1.2\text{ nC/m}^3$  and a redistribution of the charge structure in the thunderstorm, and correspondingly, an increase of the local vertical electric field by 5 kV/m, thus producing stronger lightning eventually. In addition, due to the effect of electric field force, the mass mixing ratio of four precipitation particles including graupel, hail, ice crystal and snow is changed in the ranges of  $-0.09\text{--}0.24$ ,  $-0.16\text{--}0.04$ ,  $-0.04\text{--}0.05$ , and  $-0.01\text{--}0.006\text{ g/kg}$ , respectively. Therefore, the electric field force in thunderstorm affects not only the electrification and charge structure, but also the microphysical process. Generally, the overall influence of EFF on electrification tends to be positive, and the feedback effect of EFF on the charge structure should not be neglected.

**Keywords:** electric field force, charge structure, feedback effect, WRF-Elec model

**PACS:** 92.60.Pw, 21.10.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180505

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB441401) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41630425, 41475002).

† Corresponding author. E-mail: [qiex@mail.iap.ac.cn](mailto:qiex@mail.iap.ac.cn)